



KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN TEKNOLOGI
BANDAR STANDAR, KURIKULUM, DAN ASESMEN PENDIDIKAN
PUSAT PERBUKUAN

Fisika

untuk SMA Kelas XII
Cambridge
International AS & A Level

Mike Crundell and Geoff Goodwin

Hak Cipta pada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia

Dilindungi Undang-Undang.

Disclaimer: Buku ini disiapkan oleh Pemerintah dalam rangka pemenuhan kebutuhan buku pendidikan yang bermutu, murah, dan merata sesuai dengan amanat dalam UU No. 3 Tahun 2017. Buku ini digunakan secara terbatas pada Sekolah Penggerak. Buku ini disusun dan ditelaah oleh berbagai pihak di bawah koordinasi Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Buku ini merupakan dokumen hidup yang senantiasa diperbaiki, diperbarui, dan dimutakhirkan sesuai dengan dinamika kebutuhan dan perubahan zaman. Masukan dari berbagai kalangan yang dialamatkan kepada penulis atau melalui alamat surel buku@kemdikbud.go.id diharapkan dapat meningkatkan kualitas buku ini. kualitas buku ini.

Fisika untuk SMA Kelas XII - Cambridge International AS & A Level

Judul Asli

Cambridge International AS & A Level Physics Third Edition

Penulis

Mike Crundell

Geoff Goodwin

Penerjemah/Penyadur

Irma Rahma Suwarma

Lia Laela Sarah

Theresia Ang Le Tjien

Penelaah

Firmanul Catur Wibowo

Khairul Basar

Penyelia/Penyelaras

Supriyatno

Singgih Prajoga

Nening Daryati

Editor

Drajat

Desainer

Tantan Yulianto

Penerbit

Pusat Perbukuan

Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan

Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi

Kompleks Kemdikbudristek, Jalan RS. Fatmawati, Cipete, Jakarta Selatan

<https://buku.kemdikbud.go.id>

Cetakan pertama, 2022

ISBN 978-602-244-830-3 (Jilid Lengkap)

ISBN 978-602-244-832-7 (Jilid 2)

Isi buku ini menggunakan huruf Linux Libertine 12 pts, Philipp H. Poll

xvi, 360 hlm.: 21 cm × 29,7 cm

Meskipun segala upaya telah dilakukan untuk memastikan bahwa alamat situs web benar pada saat akan dicetak, kami tidak bertanggung jawab atas konten situs web apa pun yang disebutkan dalam buku ini. Menemukan halaman web yang dipindahkan dengan mengetikkan alamat halaman beranda situs web di jendela URL browser Anda terkadang mudah ditemukan terkadang juga tidak.

Kebijakan Hachette UK adalah menggunakan kertas yang merupakan produk alami, terbarukan, dan dapat didaur ulang dan terbuat dari kayu yang tumbuh di hutan yang dikelola dengan baik dan sumber terkontrol lainnya. Proses penebangan dan manufaktur diharapkan sesuai dengan peraturan lingkungan negara asal.

Pesanan: Silakan hubungi Hachette UK Distribution, Hely Hutchinson Centre, Milton Road, Didcot, Oxfordshire, OX11 7HH. Telepon: +44 (0)1235 827827. Email education@hachette.co.uk. Antrean dibuka dari jam 9 pagi sampai jam 5 sore, Senin sampai Jumat.

© Mike Crundell dan Geoff Goodwin 2020

Pertama kali diterbitkan pada tahun 2008

Edisi kedua terbit tahun 2014

Edisi ini diterbitkan pada tahun 2020 oleh
Perusahaan Inggris Hachette
Rumah Karmelit
50 Tanggul Victoria
London EC4Y 0DZ

Nomor tayangan 10 9 8 7 6 5 4 3 2

Tahun 2023 2022 2021

Seluruh hak cipta. Terlepas dari penggunaan apa pun yang diizinkan berdasarkan undang-undang hak cipta Inggris, tidak ada bagian dari publikasi ini yang boleh direproduksi atau ditransmisikan dalam bentuk apa pun atau dengan cara apa pun, elektronik atau mekanis, termasuk memfotokopi dan merekam, atau disimpan dalam sistem penyimpanan dan pengambilan informasi apa pun, tanpa izin di tertulis dari penerbit atau di bawah lisensi dari Copyright Licensing Agency Limited. Rincian lebih lanjut dari lisensi tersebut (untuk reproduksi reprografis) dapat diperoleh dari Copyright Licensing Agency Limited, www.cla.co.uk

Foto sampul Korn V. – stock.adobe.com

Ilustrasi oleh Integra Software Services, Charon Tec dan Aptara Inc

Typeset di ITC Berkeley Oldstyle Book 10.5/12.5 oleh Aptara Inc

Dicetak di Inggris

Catatan katalog untuk judul ini tersedia dari British Library.

ISBN 9781510482807

Kata Pengantar

Pusat Perbukuan; Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan; Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi memiliki tugas dan fungsi mengembangkan buku pendidikan pada satuan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah. Buku yang dikembangkan saat ini mengacu pada Kurikulum Merdeka, dimana kurikulum ini memberikan keleluasaan bagi satuan/program pendidikan dalam mengembangkan potensi dan karakteristik yang dimiliki oleh peserta didik. Pemerintah dalam hal ini Pusat Perbukuan mendukung implementasi Kurikulum Merdeka di satuan pendidikan Pendidikan Anak Usia Dini, Pendidikan Dasar, dan Pendidikan Menengah dengan mengembangkan Buku Teks Utama.

Buku teks utama merupakan salah satu sumber belajar utama untuk digunakan pada satuan pendidikan. Adapun acuan penyusunan buku teks utama adalah Capaian Pembelajaran PAUD, SD, SMP, SMA, SDLB, SMPLB, dan SMALB pada Program Sekolah Penggerak yang ditetapkan melalui Keputusan Kepala Badan Penelitian dan Pengembangan dan Perbukuan Nomor 028/H/KU/2021 Tanggal 9 Juli 2021. Sajian buku dirancang dalam bentuk berbagai aktivitas pembelajaran untuk mencapai kompetensi dalam Capaian Pembelajaran tersebut. Dalam upaya menyediakan buku-buku teks utama yang berkualitas, selain melakukan penyusunan buku, Pusat Perbukuan juga membeli hak cipta atas buku-buku teks utama dari Penerbit asing maupun buku-buku teks utama dari hasil hibah dalam negeri, untuk disadur disesuaikan dengan Capaian Pembelajaran/Kurikulum yang berlaku. Penggunaan buku teks utama pada satuan pendidikan ini dilakukan secara terbatas pada Sekolah Penggerak.

Sebagai dokumen hidup, buku ini tentu dapat diperbaiki dan disesuaikan dengan kebutuhan serta perkembangan keilmuan dan teknologi. Oleh karena itu, saran dan masukan dari para guru, peserta didik, orang tua, dan masyarakat sangat dibutuhkan untuk pengembangan buku ini di masa yang akan datang. Pada kesempatan ini, Pusat Perbukuan menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan buku ini, mulai dari penulis, penelaah, editor, ilustrator, desainer, dan kontributor terkait lainnya. Semoga buku ini dapat bermanfaat khususnya bagi peserta didik dan guru dalam meningkatkan mutu pembelajaran.

Jakarta, Juni 2022
Kepala Pusat,

Supriyatno
NIP 19680405 198812 1 001

Daftar Isi

Kata Pengantar	iii
----------------	-----

AS LEVEL

Bab 1 Listrik Arus Searah

1.1 Arus Listrik	2
1.2 Beda Potensial dan Daya	6
1.3 Hambatan dan Hambatan Jenis	8

Bab 2 Rangkaian DC

2.1 Rangkaian Listrik	26
2.2 Hukum Kirchhoff	31
2.3 Pembagi Potensial	37

A LEVEL

Bab 3 Medan Listrik

3.1 Medan Listrik dan Garis Medan Listrik	54
3.2 Medan listrik homogen	60
3.3 Gaya Listrik Antara Muatan Titik	65
3.4 Medan Listrik Muatan Titik	67
3.5 Potensial listrik	69

Bab 4 Kapasitansi

4.1 Kapasitor dan kapasitansi	78
4.2 Energi yang Tersimpan dalam Kapasitor	86
4.3 Pengosongan kapasitor	88

Bab 5 Medan Magnet

5.1 Konsep Medan Magnet	98
5.2 Gaya pada Konduktor Berarus	101
5.3 Gaya pada Muatan Bergerak	105
5.4 Medan magnetik akibat arus listrik	116
5.5 Induksi Elektromagnetik	121

Bab 6 Arus Bolak-Balik

6.1 Karakteristik Arus Bolak-Balik	136
6.2 Penyebarahan dan Perataan	142

AS LEVEL

Bab 7 Fisika Partikel

7.1 Atom, Inti, dan Radiasi	150
7.2 Partikel dasar	167

Bab 8 Fisika Kuantum

8.1 Energi dan momentum foton	182
8.2 Efek Fotolistrik	184
8.3 Dualitas Gelombang-Partikel	192
8.4 Tingkat energi dalam atom dan spektrum garis	195

A LEVEL

Bab 9 Fisika Nuklir

9.1 Defek massa dan energi ikat nuklir	206
9.2 Peluruhan radioaktif	217

Bab 10 Fisika Medis

10.1 Produksi dan Penggunaan Diagnosis Ultrasound	231
10.2 Produksi dan penggunaan sinar-X	240
10.3 Pemindaian PET	252

Bab 11 Astronomi dan Kosmologi

11.1 Lilin Standar	260
11.2 Jari-jari Bintang	264
11.3 Hukum Hubble dan teori “Big Bang”	268

AS & A LEVEL

Bab 12 Unjuk Kerja

Daftar Persamaan dan Data	315
Kunci Jawaban	317
Glosarium	337
Indeks	347
Glosarium	355

Pengantar

Selamat datang di *Cambridge International AS & A Level Physics* edisi ketiga. Buku teks ini telah direvisi secara komprehensif sesuai dengan silabus Fisika *Cambridge International AS & A Level* (9702) untuk ujian pertama pada tahun 2022.

Buku teks ini, yang didukung oleh Cambridge Assessment International Education dan telah dirancang untuk membuat studi Fisika Anda sesukses dan sebaik mungkin.

Bagaimana cara menggunakan buku ini?

Buku teks ini, yang didukung oleh Cambridge Assessment International Education dan telah dirancang untuk membuat studi Fisika Anda sesukses dan sebaik mungkin.

Susunan Buku

Buku ini dibagi menjadi dua bagian. Topik 1–11 mencakup konten silabus Fisika Cambridge International AS Level dan Topik 12–25 mencakup konten tambahan yang diperlukan oleh siswa yang mempelajari mata kuliah Fisika A-Level Cambridge International. Judul-judul topik dalam buku ini sama persis dengan yang ada di silabus. Pada umumnya, kasus yang disajikan pada subjudul dalam topik juga sesuai dengan cakupan dalam silabus. Topik 26 merupakan bab yang berdiri sendiri dan memberikan informasi tentang kerja praktek.

Jawaban numerik untuk pertanyaan disertakan di bagian belakang buku.

Fitur-fitur untuk membantu Anda belajar

Setiap topik berisi sejumlah fitur yang dirancang untuk membantu Anda menavigasi konten silabus secara efektif.

Di awal setiap topik, ada kotak biru yang memberikan ringkasan poin-poin silabus yang akan dibahas dalam topik tersebut. Kotak biru tersebut berisi tujuan pembelajaran yang tepat yang tercantum dalam silabus.

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

7.1. Energi dan momentum foton

1. memahami bahwa radiasi gelombang elektromagnetik memiliki sifat partikel
2. memahami bahwa foton adalah sebuah kuantum energi gelombang elektromagnetik
3. mengingat dan menggunakan persamaan $E = hf$
4. menggunakan elektron volt (eV) sebagai satuan energi
5. memahami bahwa foton memiliki momentum dan persamaan momentum foton dinyatakan dengan $p = E/c$

7.2. Efek fotolistrik

1. memahami bahwa foto elektron dapat dipancarkan dari permukaan logam ketika disinari oleh radiasi gelombang elektromagnetik
2. memahami dan menggunakan istilah frekuensi ambang dan panjang gelombang ambang
3. menjelaskan emisi fotolistrik dalam bentuk energi foton dan fungsi kerja
4. mengingat dan menggunakan persamaan $hf = \Phi + \frac{1}{2}mv_{max}^2$
5. menjelaskan mengapa energi kinetik maksimum fotoelektron

tidak bergantung pada intensitas, sedangkan arus fotolistrik sebanding dengan intensitas

7.3. Dualitas gelombang-partikel

1. memahami bahwa efek fotolistrik menunjukkan bukti sifat partikel radiasi gelombang elektromagnetik sedangkan fenomena seperti interferensi dan difraksi memberikan bukti sifat gelombangnya
2. menggambarkan dan menafsirkan secara kualitatif bukti yang diberikan oleh difraksi elektron sebagai sifat gelombang dari partikel
3. memahami panjang gelombang de Broglie sebagai panjang gelombang dari sebuah partikel yang bergerak
4. mengingat dan menggunakan persamaan $\lambda = h/p$

7.4. Tingkat energi pada atom dan spektrum garis

1. memahami bahwa ada tingkat energi elektron yang bersifat diskrit pada atom yang terisolasi (misalnya atom hidrogen)
2. memahami proses pembentukan dan urutan spektrum garis emisi dan absorpsi
3. mengingat dan menggunakan relasi $hf = E_1 - E_2$

Setiap topik juga memiliki sejumlah pemahaman pendahuluan, informasi penting yang mungkin berguna untuk diingatkan sebelum Anda mulai membaca.

Pemahaman Pendahuluan

- Sebuah model atom sederhana yang terdiri dari sebuah inti berukuran kecil bermuatan positif dengan elektron bermuatan negatif mengelilinginya
- Elektron-elektron mengelilingi inti pada kulit pada jarak yang berbeda-beda dari inti.
- Kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa $3,00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.
- kecepatan c, frekuensi f dan panjang gelombang λ radiasi elektromagnetik memiliki hubungan yang dapat dinyatakan dengan persamaan $c = f \lambda$.
- Gelombang elektromagnetik dapat mengalami interferensi dan difraksi
- Momentum partikel adalah hasil perkalian massa dan kecepatan.

Poin-poin dan definisi-definisi kunci disorot dalam panel-panel biru di seluruh buku sehingga mereka dapat dengan mudah diidentifikasi dan dirujuk kembali.

Setiap benda terus dalam keadaan diam, atau dengan kecepatan seragam, kecuali jika dikerjakan oleh gaya resultan.

Ada juga sejumlah kotak berlabel Catatan Matematika untuk memandu Anda melalui beberapa keterampilan matematika yang diperlukan.

CATATAN MATEMATIKA

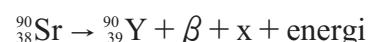
Bukti eksperimental menunjukkan bahwa arus fotolistrik, yaitu laju emisi fotoelektron, bergantung pada intensitas radiasi ketika frekuensinya konstan. Peningkatan intensitas menyebabkan meningkatnya jumlah fotoelektron

Pengamatan ini telah menyebabkan banyak siswa menganggap bahwa laju emisi tidak tergantung pada frekuensi. Hal ini tidak benar. Sebenarnya radiasi memiliki intensitas. Intensitas ini memiliki nilai yang sama dengan daya per satuan luas permukaan. Karena cahaya terdiri dari aliran foton, intensitas dihasilkan dari laju kedatangan foton dan energi masing-masing foton. Pada intensitas konstan, kecepatan foton yang tiba di permukaan logam bergantung pada energi masing-masing foton. Jadi, jika frekuensi radiasi meningkat, energi setiap foton meningkat dan, oleh karena itu, untuk intensitas konstan, laju kedatangan foton menurun. Lebih sedikit foton per satuan waktu berarti tingkat emisi elektron menjadi lebih kecil.

Setiap topik menampilkan sejumlah Contoh Soal, yang menunjukkan kepada Anda bagaimana menjawab jenis pertanyaan yang mungkin ditanyakan kepada Anda tentang konten yang terkandung dalam topik itu.

CONTOH SOAL 7B

Atom strontium-90 (nuklida induk) dapat meluruh dengan emisi partikel- β untuk membentuk nuklida anak itriium-90. Peluruhan diwakili oleh persamaan inti



Nyatakan dan jelaskan apakah partikel tersebut merupakan elektron negatif atau positif. Nyatakan jenis partikel yang diwakili oleh x.

Jawaban

Jumlah proton bertambah satu, maka elektron yang dipancarkan adalah **elektron negatif**. Partikel x adalah **antineutrino** karena partikel ini dipancarkan dengan elektron negatif.

Latihan Soal disertakan untuk memberi Anda kesempatan menguji pemahaman Anda tentang topik dan untuk menggunakan keterampilan dan teknik yang ditunjukkan dalam Contoh yang Dikerjakan.

Soal Latihan

- 1 Sebuah foton memiliki energi sebesar 4,3 eV. Untuk foton ini, hitung
- a Panjang gelombang radiasi gelombang elektromagnetiknya
 - b Momentum dari gelombang elektromagnetik tersebut.

(Konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$)

Materi yang melampaui persyaratan silabus Fisika AS & A Level Cambridge International, tetapi mungkin menarik, terutama bagi Anda yang berencana untuk belajar Fisika di tingkat yang lebih tinggi, diberi label dengan jelas dalam kotak Ekstensi.

PENGAYAAN

Dalam astronomi, panjang gelombang cenderung diukur daripada frekuensi. Jika panjang gelombang terukur dari cahaya yang dipancarkan (lihat Topik 25) kurang dari yang diukur untuk sumber stasioner, maka jarak antara sumber (bintang) dan detektor berkurang (pergeseran biru). Jika panjang gelombang terukur lebih besar dari nilai sumber stasioner, maka sumber bergerak menjauh dari detektor (pergeseran merah). Pergeseran biru dan merah disebut terjadi karena merah memiliki panjang gelombang terpanjang dalam spektrum tampak dan biru memiliki panjang gelombang terpendek.

Di akhir setiap topik, ada rangkuman poin-poin penting yang telah dibahas.

RANGKUMAN

- » Foton adalah kuantum (atau paket) energi radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki energi sama dengan hasil kali konstanta Planck dan frekuensi radiasi, $E = hf$.
- » Energi partikel subatom sering diukur dalam elektron volt (eV) atau mega-elektron volt (MeV).
- » Sebuah foton memiliki momentum yang diberikan oleh $p = E/c$.
- » Elektron dapat dipancarkan dari permukaan logam jika logam disinari oleh radiasi elektromagnetik. Fenomena ini disebut emisi fotolistrik.
- » Emisi fotolistrik tidak dapat dijelaskan dengan teori gelombang cahaya. Untuk menjelaskan hal ini perlu menggunakan teori kuantum, radiasi elektromagnetik dianggap terdiri dari paket energi yang disebut foton.
- » Fungsi kerja Φ dari logam adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron dari permukaan logam.
- » Persamaan fotolistrik Einstein adalah: $hf_0 = \Phi \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$.
- » Frekuensi ambang f_0 adalah frekuensi minimum radiasi yang diperlukan untuk menyebabkan emisi fotoelektron dari permukaan logam tertentu dan diberikan oleh: $hf_0 = \Phi$.
- » Panjang gelombang ambang adalah panjang gelombang maksimum yang sesuai untuk menimbulkan emisi fotolistrik.
- » Peningkatan intensitas radiasi meningkatkan arus fotolistrik (laju emisi fotoelektron) tetapi tidak memengaruhi energi kinetik elektron yang dipancarkan.
- » Interferensi dan difraksi memberikan bukti sifat gelombang dari radiasi gelombang elektromagnetik sedangkan efek fotolistrik memberikan bukti untuk sifat partikel (foton).
- » Difraksi elektron memberikan bukti bahwa elektron yang bergerak memiliki sifat seperti gelombang.
- » Partikel bergerak menunjukkan sifat seperti gelombang.
- » Panjang gelombang de Broglie dari partikel yang bergerak diberikan oleh $\lambda = h/p$, di mana p adalah momentum partikel dan h adalah konstanta Planck.
- » Elektron dalam atom yang terisolasi hanya dapat memiliki energi tertentu. Energi ini dapat direpresentasikan dalam diagram tingkat energi.
- » Elektron pada tingkat energi tertentu dapat menyerap energi dan melakukan transisi ke tingkat energi yang lebih tinggi.
- » Elektron yang tereksitasi dapat kembali ke tingkat yang lebih rendah dengan emisi foton, menghasilkan spektrum garis emisi.
- » Frekuensi f dari radiasi yang dipancarkan diberikan oleh $E_2 - E_1 = hf$, di mana E_2 dan E_1 adalah energi tingkat atas dan bawah dan h adalah konstanta Planck; panjang gelombang diberikan oleh $\lambda = c/f$, di mana c adalah kecepatan cahaya.
- » Ketika elektron menyerap energi dari spektrum radiasi elektromagnetik kontinu dan bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi, maka spektrum garis serapan dapat diamati.

Akhirnya, setiap topik diakhiri dengan serangkaian Asesmen Formatif, beberapa adalah pertanyaan bergaya ujian yang ditulis oleh penulis, yang lain diambil dari Cambridge International AS & A Level Physics (9702) kertas ujian sebelumnya.

ASESMEN FORMATIF

- 1** Sebuah pelat seng ditempatkan pada tutup elektroskop daun emas dan bermuatan negatif. Daun emas terlihat membelok. Jelaskan secara lengkap pengamatan berikut.
- a** Ketika pelat seng c disinari dengan lampu merah, daun emas tetap dibelokkan.
 - b** Ketika pelat seng disinari dengan radiasi ultraviolet, daunnya runtuh.
 - c** Ketika intensitas radiasi ultraviolet meningkat, daun lebih cepat rontok.
 - d** Aku f pelat seng awalnya bermuatan positif, sisa-sisa daun emas dibelokkan terlepas dari sifat radiasi insiden.

Penilaian

- ∅ Jika Anda mengikuti pelajaran Fisika Tingkat AS Cambridge International, Anda akan mengambil tiga kertas ujian:
 - ∅ Paper 1 Pilihan Ganda (1 jam 15 menit)
 - ∅ Paper 2 AS Level Structured Questions (1 jam 15 menit)
 - ∅ Paper 3 Keterampilan Praktis Lanjutan (2 jam)
- ∅ Jika Anda mempelajari Fisika Tingkat A Cambridge International, Anda akan mengambil lima makalah ujian: Makalah 1, 2 dan 3 dan juga:
 - ∅ Paper 4 A Level Structured Questions (2 jam)
 - ∅ Paper 5 Perencanaan, Analisis dan Evaluasi (1 jam 15 menit)

Kata-kata perintah

Tabel di bawah ini, diambil dari silabus, termasuk kata-kata perintah yang digunakan dalam penilaian untuk silabus ini. Penggunaan kata perintah akan berhubungan dengan konteks subjek. Pastikan Anda sudah familiar dengan ini.

Kata perintah	Apa artinya
Menghitung	bekerja dari fakta, angka atau informasi yang diberikan
Komentar	memberikan pendapat yang terinformasi
Membandingkan	mengidentifikasi/mengomentari persamaan dan/atau perbedaan
Mendefinisikan	memberikan arti yang tepat
Menentukan	membangun jawaban menggunakan informasi yang tersedia
Menjelaskan	menetapkan tujuan atau alasan/membuat hubungan antara hal-hal menjadi jelas/menyediakan mengapa dan/atau bagaimana dan mendukung dengan bukti yang relevan
Memberikan	menghasilkan jawaban dari sumber atau ingatan/memori yang diberikan
Mengidentifikasi	namai/pilih/kenali
Membenarkan	mendukung suatu kasus dengan bukti/argumen
Memperkirakan	menyarankan apa yang mungkin terjadi berdasarkan informasi yang tersedia
Menunjukkan (bahwa)	menyarankan apa yang mungkin terjadi berdasarkan informasi yang tersedia
Sketsa	menyarankan apa yang mungkin terjadi berdasarkan informasi yang tersedia
Menyatakan	menyarankan apa yang mungkin terjadi berdasarkan informasi yang tersedia
Menyarankan	menerapkan pengetahuan dan pemahaman untuk situasi di mana ada berbagai tanggapan yang valid untuk membuat proposal

Catatan untuk guru

Konsep kunci

Kunci konsep merupakan ide-ide penting yang membantu peserta didik untuk mengembangkan pemahaman yang mendalam tentang subjek dan untuk membuat hubungan antara topik yang berbeda. Meskipun para guru cenderung mengingat hal ini setiap saat ketika mereka mengajar silabus, ikon-ikon berikut disertakan dalam buku teks pada poin-poin di mana konsep-konsep kunci secara khusus berhubungan dengan teks:



Model sistem fisik

Fisika adalah ilmu yang berusaha memahami perilaku alam semesta. Pengembangan model sistem fisik adalah pusat fisika. Model menyederhanakan, menjelaskan dan memprediksi bagaimana sistem fisik berperilaku.



Menguji prediksi berdasarkan bukti

Model fisik biasanya didasarkan pada pengamatan sebelumnya, dan prediksi mereka diuji untuk memeriksa apakah mereka konsisten dengan perilaku dunia nyata. Pengujian ini membutuhkan bukti, yang seringkali diperoleh dari eksperimen.



Matematika sebagai bahasa dan alat pemecahan masalah

Matematika merupakan bagian integral dari fisika, karena merupakan bahasa yang digunakan untuk mengekspresikan prinsip dan model fisika. Ini juga merupakan alat untuk menganalisis model teoritis, memecahkan masalah kuantitatif dan menghasilkan prediksi.



Materi, energi, dan gelombang

Segala sesuatu di alam semesta terdiri dari materi dan/ atau energi. Gelombang adalah mekanisme kunci untuk transfer energi dan sangat penting untuk banyak aplikasi fisika modern.



Gaya dan medan

Cara materi dan energi berinteraksi adalah melalui gaya dan medan. Perilaku Alam Semesta diatur oleh gaya fundamental dengan besaran berbeda yang berinteraksi pada jarak yang berbeda. Fisika melibatkan studi tentang interaksi ini melintasi jarak mulai dari yang sangat kecil (fisika kuantum dan partikel) hingga yang sangat besar (astronomi dan kosmologi).

Informasi dalam pendahuluan ini dan hasil pembelajaran di seluruh buku ini diambil dari silabus Cambridge International untuk ujian mulai tahun 2022. Anda harus selalu mengacu pada dokumen silabus yang sesuai untuk tahun ujian siswa Anda untuk mengonfirmasi perincian dan untuk informasi lebih lanjut. Dokumen silabus tersedia di situs web Cambridge International di www.cambridgeinternational.org.

Tambahan Pendukung

Sejumlah sumber daya Pendidikan Hodder lainnya tersedia untuk membantu guru menyampaikan silabus Fisika Tingkat AS & A Cambridge International.

- ◊ Buku Kerja Keterampilan Praktis Fisika Tingkat AS & A Cambridge International adalah sumber tertulis yang dirancang untuk digunakan selama kursus dan memberi siswa kesempatan ekstra untuk menguji pemahaman mereka tentang keterampilan praktis yang dibutuhkan oleh silabus.
- ◊ Buku Guru Fisika Tingkat AS & A Cambridge International mencakup pengantar pengajaran kursus, skema kerja, dan sumber daya pengajaran tambahan.
- ◊ Panduan Studi dan Revisi Fisika Tingkat AS & A Cambridge International adalah sumber daya yang berdiri sendiri yang dirancang untuk digunakan secara mandiri oleh siswa di akhir program studi mereka saat mereka mempersiapkan ujian mereka. Gelar ini belum melalui proses pengesahan Cambridge International.

1 Listrik Arus Searah

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

1.1. Arus Listrik

1. mendefinisikan arus listrik sebagai laju aliran muatan listrik.
2. menerapkan konsep muatan sebagai pembawa muatan terkuantisasi.
3. menerapkan persamaan $Q = It$.
4. menerapkan persamaan $I = Anvq$ untuk penghantar arus, dengan n adalah kerapatan jumlah pembawa muatan.

1.2. Beda Potensial dan Daya

1. mendefinisikan beda potensial sebagai perpindahan energi tiap satuan muatan.
2. merumuskan persamaan $V = W/Q$.
3. merumuskan persamaan $P = VI$, $P = I^2R$ and $P = V^2/R$.

1.3. Resistansi (hambatan) & resistivitas (hambatan jenis)

1. mendefinisikan resistansi (hambatan).

2. merumuskan persamaan $V = IR$
3. menyajikan sketsa karakteristik $I - V$ untuk konduktor logam pada suhu konstan, diode semi konduktor dan lampu filamen
4. menjelaskan bahwa hambatan lampu filamen meningkat dengan meningkatnya arus karena suhunya meningkat
5. menerapkan hukum Ohm
6. merumuskan persamaan $R = \rho L/A$
7. mendeskripsikan hambatan LDR berkurang dengan meningkatnya intensitas cahaya
8. mendeskripsikan hambatan termistor koefisien suhu negatif berkurang dengan meningkatnya suhu (diasumsikan bahwa termistor memiliki koefisien suhu negatif)

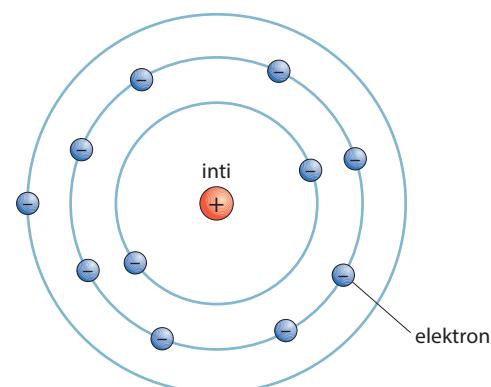
Pemahaman Pendahuluan

- Ide dasar mengenai muatan listrik dan arus listrik
- Penggunaan arus listrik contohnya pada kabel rumah tangga dan peralatan listrik.
- Beda potensial diperlukan agar perubahan energi terjadi dalam suatu rangkaian.
- Terjadi perpindahan energi saat usaha dilakukan.
- Daya didefinisikan sebagai laju usaha yang dilakukan, atau energi yang ditransfer.
- Hambatan mengatur aliran muatan dalam suatu rangkaian.

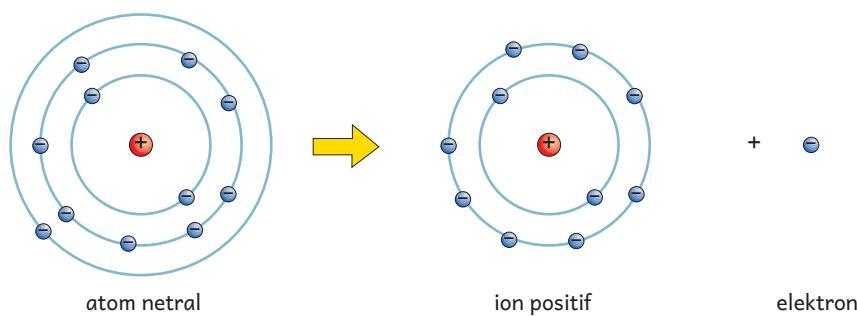
1.1. Arus Listrik

Semua materi terdiri dari partikel kecil yang disebut atom, masing-masing terdiri dari inti bermuatan positif dengan elektron bermuatan negatif yang bergerak di sekitarnya.

Satuan muatan adalah **coulomb** (simbol C). Muatan pada elektron e besarnya $1,60 \times 10^{-19}$ C. Dalam kondisi normal, atom-atom memiliki jumlah muatan positif dan negatif yang sama, sehingga muatan keseluruhannya adalah nol. Tetapi beberapa atom relatif mudah untuk melepaskan elektron. Elektron meninggalkan atom sehingga mengakibatkan atom memiliki jumlah muatan positif yang tidak seimbang dengan jumlah muatan negatif. Kondisi saat atom kehilangan elektron disebut dengan **ion positif**.



▲ **Gambar 1.1** atom terdiri dari inti bermuatan positif dan elektron negatif di sekitarnya.



▲ **Gambar 1.2** Sebuah atom kehilangan satu atau lebih elektron merupakan ion positif.

Robert Millikan (1868–1953) melakukan percobaan pada tahun 1912 untuk menentukan muatan pada satu elektron menggunakan tetesan minyak bermuatan. Hasil eksperimennya menunjukkan bahwa, berapa pun muatan pada tetesan, elektron muncul hanya pada kelipatan bilangan bulat dari nilai tertentu, yang ia simpulkan sebagai, e . Maka kesimpulannya, muatan tidak kontinu

tetapi **terkuantisasi**, yaitu hanya ada dalam jumlah diskrit, kelipatan bilangan bulat dari muatan elektron. Foton adalah contoh lain dari besaran terkuantisasi yang akan dibahas pada **Bab 8** Fisika Kuantum.

Maka dari itu, karena muatan terkuantisasi, ion-ion yang terbentuk melalui pelepasan atau penambahan elektron, dari atau ke atom, juga memiliki muatan terkuantisasi sebesar $\pm e$, $\pm 2e$, $\pm 3e$, dll. Muatan pada proton adalah $+e$.

Atom-atom dalam logam memiliki satu atau lebih elektron terluar yang tidak terikat erat pada inti. Elektron bebas ini bergerak secara acak di seluruh logam. Namun, ketika baterai dihubungkan di ujung logam, elektron bebas mengalir menuju kutub positif baterai, menghasilkan **arus listrik**.

Pembawa muatan dalam arus listrik dapat berupa partikel bermuatan apa pun. Di dalam logam pembawa muatan adalah elektron tetapi dalam larutan atau dalam plasma (gas terionisasi) pembawa muatan adalah ion positif dan negatif.

Besarnya arus listrik ditentukan oleh laju aliran muatan. Arus listrik adalah besaran pokok Standar Internasional. Satuan dasar SI untuk arus adalah **ampere** (atau disingkat amp), dengan simbol A. Satuan SI dari semua besaran listrik lainnya diturunkan dari satuan dasar SI.

Arus sebesar 3 ampere berarti bahwa ada 3 coulomb muatan melewati suatu titik dalam rangkaian setiap detik. Dalam 5 detik, muatan total 15 coulomb akan melewati titik tersebut. Jadi, muatan Q yang mengalir (dalam coulomb) dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$\text{muatan} = \text{arus} \times \text{waktu}$$

atau

$$Q = It$$

dengan arus I dalam satuan ampre dan waktu t dihitung dalam detik (sekon).

Satuan ampere sekon (A s) disebut coulomb (C). $1\text{ C} = 1\text{ A s}$.

► CONTOH SOAL 1A

Jika arus dalam filamen bola lampu adalah $0,03\text{ A}$.

Berapa banyak muatan yang mengalir melalui bola lampu tersebut dalam 1 menit?

Jawab:

Menggunakan persamaan $Q = It$, $Q = 0,03 \times 60$ (perlu diingat bahwa satuan waktu harus dalam detik), maka $Q = 1,8\text{ C}$.

Soal Latihan

- 1 Hitung arus ketika muatan 240 C melewati suatu titik dalam rangkaian selama 2 menit.
- 2 Dalam percobaan pelapisan perak, diperlukan muatan $9,65 \times 10^4\text{ C}$ untuk mengendapkan sejumlah massa perak. Hitung waktu yang diperlukan untuk mengendapkan massa perak ini ketika arusnya $0,20\text{ A}$.
- 3 Arus dalam sebuah kawat adalah 200 mA . Hitunglah:
 - a muatan yang melewati suatu titik pada kawat dalam waktu 5 menit
 - b jumlah elektron yang diperlukan untuk membawa muatan ini.

(Muatan elektron $e = -1,60 \times 10^{-19}\text{ C}$.)

Arus Konvensional

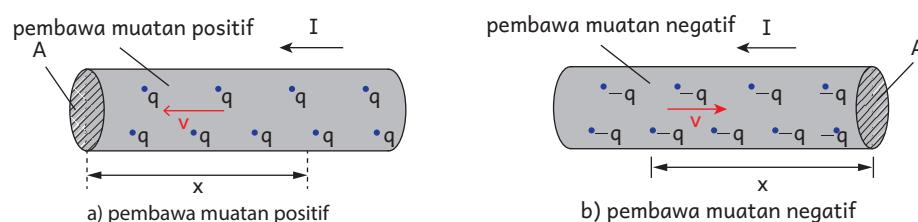
Studi awal tentang efek listrik membuat para ilmuwan percaya bahwa arus listrik adalah aliran dari “sesuatu”. Untuk mengembangkan pemahaman lebih lanjut tentang listrik, perlu diketahui arah alirannya. Maka diputuskan bahwa aliran dalam rangkaian ini harus berasal dari kutub positif baterai atau catu daya ke kutub negatif. Arus ini disebut dengan **arus konvensional**, dan searah dengan aliran muatan positif. Sekarang kita mengetahui bahwa dalam logam, arus listrik adalah aliran elektron dalam arah berlawanan, dari kutub negatif ke kutub positif. Namun, hukum kelistrikan menjadi prinsip bagi sebagian besar ilmuwan, sehingga gagasan arus konvensional tetap ada. Tapi berhati-hatilah! Kadang-kadang kita perlu mempertimbangkan fakta bahwa aliran elektron berlawanan arah dengan arus konvensional, misalnya,

dalam **Bab 5** ketika menentukan arah gaya pada muatan atau konduktor berarus listrik dalam medan magnet.



Konduksi dalam Penghantar Arus Listrik

Gambar 1.3 menunjukkan bagian konduktor (penghantar) dengan luas penampang A yang dialiri arus I . Pada Gambar 1.3a pembawa muatannya positif dan pada Gambar 1.3b pembawa muatannya negatif. Arus di masing-masing penghantar dari kanan ke kiri tetapi pembawa muatan bergerak dalam arah yang berlawanan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1.3b. Gerak bersama elektron-elektron bebas searah gaya listrik ini memiliki kelajuan yang disebut sebagai kelajuan hanyut (*drift speed*), v .



▲ **Gambar 1.3** konduksi dalam bahan

Arus disebabkan oleh pergerakan pembawa muatan di sepanjang penghantar. Aliran pembawa muatan bisa dilihat dari kelajuan arus rata-rata. Kelajuan arus rata-rata pembawa muatan dalam penghantar adalah v dan rapat muatannya (jumlah muatan per satuan volume) pembawa muatan adalah n . Muatan pada masing-masing pembawa muatan adalah q . (Lihat Gambar 1.3a)

Banyaknya pembawa muatan sepanjang x penghantar adalah Axn . Jumlah muatan yang meninggalkan volume ini melalui sisi kiri penghantar dalam waktu t adalah $Axntq$.

Dengan interval waktu t adalah x/v

Dan arus $I = \text{muatan/waktu} = (Axnq)/(x/v)$

Maka,

$$I = Axnq$$

Ilustrasi yang sama diperoleh jika pembawa muatan negatif dipertimbangkan dalam konduktor yang ditunjukkan pada Gambar 1.3b.

CONTOH SOAL 1B

Sebuah kawat tembaga memiliki pembawa muatan (elektron bebas) $8,5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$. Kawat tersebut memiliki arus 2,0 A dan luas penampang $1,2 \text{ mm}^2$. Hitung kelajuan arus rata-rata elektron.

Jawaban:

$$v = \frac{I}{nAe} = \frac{2}{(8,5 \times 10^{28} \times 1,2 \times 10^{-6} \times 1,6 \times 10^{-19})} = 1,2 \times 10^{-19} \text{ ms}^{-1}$$

Soal Latihan

- 4 Kelajuan hanyut rata-rata (*drift speed*) elektron dalam kawat logam adalah $6,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ketika arusnya 0,80 A. Diameter kawat adalah 0,50 mm. Hitung jumlah elektron ‘bebas’ per satuan volume dalam kawat (rapat muatannya).

1.2. Beda Potensial dan Daya

Adanya sebuah elemen (sumber tegangan) membuat salah satu ujung rangkaian menjadi positif dan ujung lainnya menjadi negatif. Sumber tegangan dikatakan dapat mengatur **beda potensial** di dalam rangkaian. Beda potensial diukur dalam **volt** (simbol V), dan sering disebut tegangan. Tidaklah tepat menyebutkan tentang beda potensial atau tegangan di sepanjang rangkaian, karena sebenarnya beda potensial tersebut terjadi pada kedua ujung rangkaian. Beda potensial menyediakan energi untuk memindahkan muatan melalui rangkaian.

Beda potensial antara dua titik mana pun dalam suatu rangkaian adalah ukuran energi yang dipindahkan, atau usaha yang dilakukan, oleh setiap coulomb muatan saat bergerak dari satu titik ke titik lainnya. Kita telah mengetahui bahwa satuan beda potensial adalah volt (V). Energi W diukur dalam joule, dan muatan Q dalam coulomb.

$$\text{beda potensial} = \frac{\text{energi yang ditransfer (usaha yang dilakukan)}}{\text{muatan}}$$

atau

$$V = \frac{W}{Q}$$

Satuan beda potensial joule-couloumb⁻¹ disebut **volt** (V). $1 \text{ V} = 1 \text{ JC}^{-1}$.

Kita dapat mengatur ulang persamaan ini untuk mendapatkan persamaan energi yang dipindahkan atau dikonversi ketika muatan Q dipindahkan melalui beda potensial V :

energi yang dipindahkan (usaha yang dilakukan) = beda potensial \times muatan

$$W = VQ$$

Pada **Gambar 1.4**, satu lampu dihubungkan ke sumber listrik 240 V dan yang lainnya ke aki mobil 12 V. Kedua lampu memiliki arus yang sama, namun lampu 240 V bersinar lebih terang. Ini karena energi yang diberikan ke setiap coulomb muatan pada lampu 240 V, 20 kali lebih besar dari pada lampu 12 V.



▲ **Gambar 1.4** Lampu utama 240 V, 100 W jauh lebih terang daripada lampu mobil 12 V, 5 W, tetapi keduanya memiliki arus yang sama. (Jangan coba sendiri eksperimen ini karena melibatkan tegangan yang besar.)

► CONTOH SOAL 1C

Elektron dalam tabung televisi tertentu dipercepat oleh beda potensial 20 kV antara filamen dan layar. Muatan elektron adalah $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Hitung perolehan energi kinetik setiap elektron.

Jawaban:

Karena $V = W/Q$, maka $W = VQ$. Energi potensial yang diberikan ke elektron meningkatkan energi kinetiknya. Dengan demikian,

$$\text{energi kinetik yang diperoleh} = VQ$$

$$= 20 \times 10^3 \times 1,60 \times 10^{-19}$$

$$= 3,2 \times 10^{-15} \text{ J}$$

■ Jangan lupa untuk mengubah 20 kV menjadi volt.

Soal Latihan

- 5 Sebuah elektron dalam akselerator partikel dipercepat melalui beda potensial 10^6 V. Hitung energi, dalam joule, yang diperoleh elektron.
- 6 Sebuah bola lampu senter bernilai 2,2 V, 0.25 A.
Hitung:
- a muatan yang melewati bola lampu dalam satu detik
 - b energi yang diberikan oleh setiap coulomb muatan.

**Daya Listrik**

Di kelas XI kita mendefinisikan **daya** P sebagai laju untuk melakukan usaha, atau perpindahan energi,
 $P = W/t$.

Definisi beda potensial V merupakan perpindahan per satuan muatan,

$$V = W/Q.$$

$$\text{Oleh karena itu, } P = VQ/t$$

$$\text{dan karena } Q/t = I$$

$$P = VI$$

daya = beda potensial \times arus

Daya diukur dalam **watt** (W) ketika beda potensial dalam volt (V) dan arus dalam ampere (A). Sebuah voltmeter dapat mengukur beda potensial perangkat dan ampermeter mengukur arus yang melaluinya; persamaan di atas kemudian dapat digunakan untuk menghitung daya dalam perangkat.

1.3. Hambatan dan Hambatan Jenis

Kabel penghubung dalam rangkaian umumnya menggunakan bahan dari tembaga, karena tembaga hanya melakukan sedikit perlawanan terhadap pergerakan elektron. Kawat tembaga dikatakan memiliki **hambatan listrik** yang rendah. Dengan kata lain, tembaga adalah konduktor yang baik.

Beberapa bahan, seperti plastik, adalah konduktor yang buruk. Bahan-bahan ini dikatakan isolator, karena dalam keadaan normal mereka menghantarkan hanya sedikit

arus atau tidak sama sekali.

Hambatan R suatu konduktor didefinisikan sebagai perbandingan beda potensial V melewati konduktor dengan arus listriknya I .

atau

$$R = \frac{V}{I}$$

satuan hambatan dalam ohm jika satuan beda potensial dalam volt dan satuan arus dalam ampere. Satuan hambatan, volt/ampere disebut **ohm** (Ω). Simbol untuk ohm adalah huruf kapital Yunani omega, $1\Omega = 1\text{VA}^{-1}$.

Kita telah mendefinisikan hambatan sebuah konduktor, tetapi banyak komponen listrik lain memiliki hambatan. Istilah umum untuk komponen listrik semacam itu disebut resistor. (Perhatikan bahwa hambatan resistor diukur dalam ohm).

Hubungan antara hambatan, beda potensial, dan arus listrik berarti bahwa, untuk beda potensial tertentu, hambatan menentukan ukuran arus dalam suatu rangkaian. Hambatan tinggi berarti arus kecil, sedangkan hambatan rendah berarti arus besar.

CONTOH SOAL 1D

Arus dalam pemanas listrik pada saa percobaan di sekolah adalah $6,3\text{ A}$ ketika beda potensialnya adalah 12 V . Hitung hambatan pemanas.

Jawaban:

$$\text{Karena } R = \frac{V}{I}, \text{ hambatan } R = \frac{12}{6,3} = 1,9\Omega.$$

Soal Latihan

- 7 Arus dalam LED (light emitting dioda) adalah 20 mA ketika memiliki beda potensial $2,0\text{ V}$ melintasinya. Hitung hambatan LED.



Pemanas listrik

Ketika arus listrik melewati resistor, resistor menjadi panas. Efek pemanasan ini kadang-kadang disebut pemanasan Joule. Daya listrik P yang dihasilkan diberikan oleh $P = VI$. Kita dapat memperoleh dua persamaan

pernyataan alternatif untuk daya berkaitan dengan hambatan R dari resistor. Karena $R = \frac{V}{I}$, maka

$$P = I^2 R$$

dan

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Untuk resistor dengan hambatan konstan, daya yang hilang tergantung pada kuadrat arus. Oleh karena itu, jika arus digandakan (dengan menggandakan tegangan pada resistor), daya akan empat kali lebih besar. Oleh karena itu, melipat gandakan tegangan, dan melipat gandakan arus akan meningkatkan dayanya sebesar empat kali.

► CONTOH SOAL 1E

1. Sebuah pemanas listrik yang digunakan dalam percobaan sekolah memiliki arus 6,3 A ketika beda potensialnya 12 V. Hitung daya pemanas.
2. Beda potensial pemanas pada soal nomor 1 dikurangi menjadi 6,0 V. Hitung daya pemanas baru (anggap hambatan pemanas tetap konstan).

Jawaban

1. Karena $P = VI$, daya = $12 \times 6,3 = 76 \text{ W}$.
2. Karena hambatannya konstan, daya sebanding dengan kuadrat beda potensial ($P = V^2/R$). Beda potensial V menjadi setengahnya sehingga daya berkurang sebesar $(\frac{1}{2})^2$ atau $76/4 = 19 \text{ W}$

Soal Latihan

- 8 Tunjukkan bahwa lampu 100 W yang dihubungkan ke sumber listrik 240 V akan memiliki arus yang sama dengan lampu mobil 5 W yang dihubungkan ke baterai 12 V. (Lihat [Gambar 1.4](#).)
- 9 Sebuah ketel listrik memiliki daya 2,2 kW pada tegangan 240 V. Hitung:
 - a arus dalam ketel
 - b hambatan elemen ketel.

Karakteristik arus-tegangan (I-V)

Hubungan antara beda potensial yang melintasi komponen listrik dan arus yang melaluinya dapat diselidiki menggunakan rangkaian [Gambar 1.5](#) yang ditunjukkan di atas. Misalnya, jika lampu filamen akan diselidiki, sesuaikan sumber tegangan untuk berbagai beda potensial dan ukur arus yang sesuai dan beda potensial di seluruh lampu. Variasi arus dengan beda potensial ditunjukkan pada [Gambar 1.6](#). Grafik ini dikenal sebagai karakteristik *I*-*V*.

Hambatan R lampu dapat dihitung dari $R = V/I$. Pada awalnya, hambatannya konstan (ditunjukkan dengan grafik lurus yang melalui titik asal), selanjutnya hambatan meningkat dengan meningkatnya arus (grafiknya melengkung).

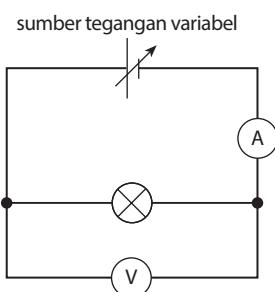
Jika lampu diganti dengan seutas kawat konstantan, hasil grafiknya seperti pada [Gambar 1.7](#). Grafiknya berupa garis lurus melalui titik asal. Hal ini menunjukkan bahwa, untuk kawat konstantan, arus sebanding dengan beda potensial. Hambatan kawat ditemukan konstan dengan meningkatnya arus. Perbedaan antara [Gambar 1.6](#) dan [1.7](#) adalah bahwa suhu kawat konstantan konstan untuk semua arus yang digunakan dalam percobaan, sedangkan suhu filamen lampu meningkat menjadi sekitar $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan meningkatnya arus.

Hukum Ohm

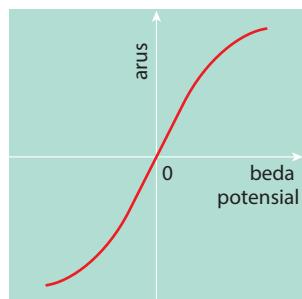
Grafik seperti [Gambar 1.7](#) akan diperoleh untuk kawat dari logam apapun, asalkan suhu kawat tidak berubah selama percobaan. Grafik tersebut menggambarkan hukum yang ditemukan oleh ilmuwan Jerman Georg Simon Ohm ([Gambar 1.8](#)). (Nama Ohm sekarang digunakan untuk satuan hambatan.)

Hukum Ohm menyatakan bahwa, untuk penghantar logam pada suhu konstan, arus dalam penghantar sebanding dengan beda potensial yang melintasinya.

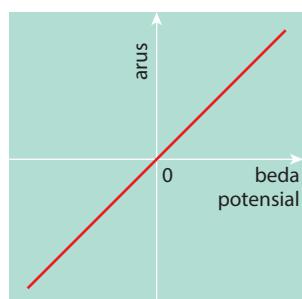
Penghantar dengan grafik arus terhadap beda potensial berupa garis lurus, seperti pada [Gambar 1.7](#), dikatakan memenuhi hukum Ohm. Ditemukan bahwa hukum Ohm berlaku untuk kabel logam, asalkan arusnya tidak terlalu besar. Apa yang dimaksud dengan ‘terlalu besar’ di sini? Ini berarti bahwa arus tidak boleh terlalu besar



▲ **Gambar 1.5** Rangkaian untuk memplot grafik arus terhadap beda potensial



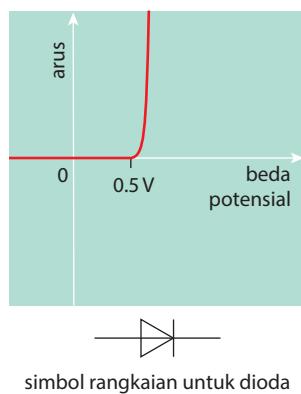
▲ **Gambar 1.6** Arus terhadap beda potensial untuk lampu filamen



▲ **Gambar 1.7** Arus terhadap beda potensial untuk kawat konstantan



▲ Gambar 1.8 Georg Ohm (1789–1854)



▲ Gambar 1.9 Arus terhadap beda potensial untuk dioda

sehingga ada efek pemanasan yang nyata, menyebabkan peningkatan suhu kawat.

Filamen lampu terdiri dari kawat logam tipis. Mengapa tidak memenuhi hukum Ohm? (Gambar 1.6 menunjukkan bahwa grafik arus terhadap beda potensial bukan garis lurus.) Hal ini karena, seperti yang dinyatakan sebelumnya, suhu filamen tidak tetap. Peningkatan arus menyebabkan suhu meningkat sedemikian rupa sehingga filamen berpijar. Alasan ini dijelaskan kebalikannya pada sub bab hambatan dan suhu.

Karakteristik Arus-tegangan Dioda

Ketika dioda diuji dengan cara yang sama seperti lampu filamen (lihat rangkaian pada Gambar 1.5), diperoleh grafik arus - beda potensial yang ditunjukkan pada Gambar 1.9. Dioda terbuat dari bahan semikonduktor. Dioda bekerja ketika arus searah dengan panah pada simbol. Kondisi ini disebut **panjar maju** (*bias positif/forward bias*). Potensial di sisi kiri dioda lebih positif daripada potensial di sisi kanan. Ketika beda potensial dibalik, terjadi bias negatif. Ini disebut juga sebagai **panjar mundur** (*reverse bias*). Gambar 1.9 menunjukkan perbedaan penting dalam grafik arus - beda potensial ketika beda potensial terbalik. Dioda tidak bekerja ketika dalam kondisi panjar mundur. Oleh karena itu, dioda digunakan untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah dalam perangkat yang disebut **penyearah** (*rectifiers*) (lihat Bab 6).

Dioda tidak mematuhi hukum Ohm. Hambatan dioda sangat tinggi untuk tegangan rendah dalam kondisi panjar maju. Dioda bekerja pada tegangan panjar maju sekitar 0,5 V. Hambatan dioda menurun seiring tegangan meningkat pada panjar maju. Bagian garis lurus dari grafik di wilayah ini tidak mengikuti hukum Ohm karena garis tidak melalui titik asal dan, oleh karena itu, hambatannya tidak konstan. Arus tidak sebanding dengan beda potensial.



Hambatan dan suhu

Semua zat padat terdiri dari atom-atom yang terus-menerus bergetar di sekitar posisi kesetimbangannya. Semakin tinggi suhu, semakin besar amplitudo getarannya.

Arus listrik adalah aliran elektron melalui logam. Saat

elektron bergerak, elektron bertabrakan dengan ion logam yang bergetar, sehingga pergerakannya terhambat. Semakin banyak ion bergetar, semakin besar kemungkinan tumbukan. Hal ini berarti bahwa arus lebih kecil dan hambatan logam meningkat seiring bertambahnya suhu.

PENGAYAAN

Peningkatan suhu dapat menyebabkan peningkatan jumlah elektron bebas. Jika elektron bebas lebih banyak, mungkin lebih banyak dari ion yang bergetar, maka aliran elektron atau arus akan meningkat. Hambatan akan berkurang. Hal ini terjadi pada semikonduktor. Isolator juga menunjukkan pengurangan hambatan karena peningkatan suhu. Untuk logam, tidak ada kenaikan jumlah elektron bebas. Peningkatan amplitudo getaran atom-atom membuat hambatan logam meningkat karena kenaikan suhu.

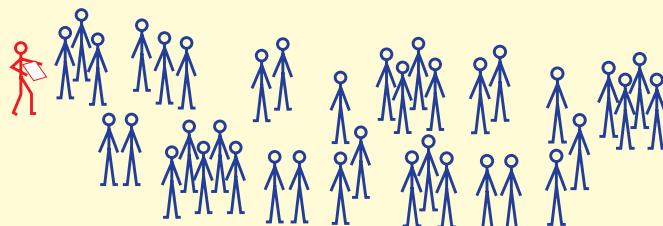
Resistivitas (Hambatan Jenis)

Semua material memiliki hambatan terhadap aliran muatan. Beda potensial pada material menyebabkan muatan bebas di dalamnya bergerak cepat. Saat muatan bergerak melalui logam, muatan bebas bertabrakan dengan ion tetap yang bergetar di dalam logam. Muatan bebas memindahkan sebagian atau seluruh energi kinetiknya, dan kemudian dipercepat lagi karena adanya beda potensial. Perpindahan energi pada tumbukan inilah yang menyebabkan pemanasan listrik pada resistor.

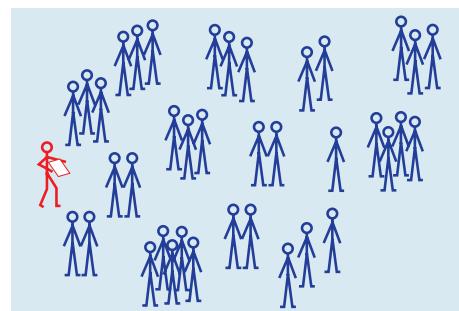
Semakin panjang kawat, semakin besar hambatannya. Hal ini karena muatannya harus melewati logam lebih jauh; ada lebih banyak kemungkinan tabrakan dengan ion tetap yang bergetar. Hambatan suatu penghantar sebanding dengan panjangnya, atau $R \propto L$. Juga, semakin tebal suatu penghantar, semakin kecil hambatannya. Ini karena luas penampang yang lebih besar untuk dilalui muatan, dengan kemungkinan tabrakan menjadi lebih kecil. Dengan demikian, hambatan berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar, atau $R \propto \frac{1}{A}$.

Hubungan ini diilustrasikan dengan analogi untuk kawat logam pada [Gambar 1.10](#) dan [1.11](#). Pelayan yang mengantarkan pesanan mewakili elektron yang tertarik ke terminal positif dan orang lain mewakili kisi ion positif

dalam logam. Dalam setiap kasus, keseluruhan ‘jumlah kepadatan’ orang (jumlah per satuan volume) adalah sama (karena ruangan mewakili jenis bahan yang sama).



▲ Gambar 1.10 semakin panjang ruangan, semakin besar hambatan pelayan



▲ Gambar 1.11 Semakin luas ruangan, semakin mudah bagi pelayan untuk melewatkinya.

Akhirnya, hambatan tergantung pada jenis bahan. Seperti yang dinyatakan sebelumnya, tembaga adalah konduktor yang baik, sedangkan plastik adalah isolator yang baik. Menyatukan semua ini mengarah pada persamaan

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

dengan ρ adalah konstanta untuk bahan tertentu pada suhu tertentu. ρ disebut nilai **resistivitas** bahan, atau disebut juga hambatan jenis, pada suhu tertentu dan didefinisikan sebagai:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

Hambatan satuannya ohm, luas penampang satuannya meter kuadrat dan panjang satuannya meter, maka satuan hambatan jenis adalah **ohm meter** ($\Omega \text{ m}$).

Ingin bahwa A adalah luas penampang yang dilalui arus, bukan luas permukaan.

Kita telah melihat bahwa hambatan kawat (hambatan) bergantung pada suhu. Jadi, resistivitas (hambatan

jenis) juga tergantung pada suhu. Resistivitas logam meningkat dengan meningkatnya suhu, dan hambatan jenis semikonduktor menurun sangat cepat dengan meningkatnya suhu.

Nilai hambatan jenis beberapa bahan (material) pada suhu kamar diberikan pada **Tabel 1.1**. Perhatikan rentang hambatan jenis yang sangat besar ditunjukkan oleh bahan-bahan dalam daftar ini – kisaran 23 kali lipat, dari 10^{-8} m hingga $10^{15} \Omega \text{m}$.

Perhatikan juga bahwa resistivitas (hambatan jenis) adalah properti (karakteristik) bahan, sedangkan resistansi (hambatan) adalah properti dari bagian kawat atau bagian tertentu perangkat saja.

Bahan	Resistivitas (hambatan jenis)/ Ωm
Logam	
Tembaga	$1,7 \times 10^{-8}$
Emas	$2,4 \times 10^{-8}$
Alumunium	$2,6 \times 10^{-8}$
Semikonduktor	
Germanium (murni)	0,6
Silikon (murni)	$2,3 \times 10^3$
Isolator	
Kaca	Sekitar 10^{12}
Perspex	Sekitar 10^{13}
Polietilen	Sekitar 10^{14}
Belerang	Sekitar 10^{15}

▲ **Tabel 1.1** Resistivitas beberapa bahan pada suhu ruang

CONTOH SOAL 1F

Tentukan resistansi (hambatan) per meter pada suhu ruang dari kawat kostantin yang diameternya 1,25 mm. Resistivitas (hambatan jenis) konstantin pada suhu ruang adalah $5,0 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$.

Jawaban

Luas penampang kawat dihitung menggunakan

$$A = \pi \left(\frac{1,25 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 = 1,23 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

■ Jangan lupa mengubah satuan mm ke m

Hambatan per meter R/L dan $\frac{R}{L} = \frac{\rho}{A}$ jadi

$$\text{Hambatan per meter} = \frac{5,0 \times 10^{-7}}{1,23 \times 10^{-6}} = 0,41 \Omega \text{ m}^{-1}$$

Soal Latihan

- 10** Tentukan panjang kawat tembaga, dengan diameter 0,63 mm, yang memiliki hambatan $1,00 \Omega$. Resistivitas tembaga pada suhu kamar adalah $1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.
- 11** Tentukan diameter kawat tembaga yang memiliki hambatan sama dengan kawat aluminium dengan panjang dan diameter yang sama 1,20 mm. Hambatan jenis tembaga dan aluminium pada suhu kamar masing-masing adalah $1,7 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ dan $2,6 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$.

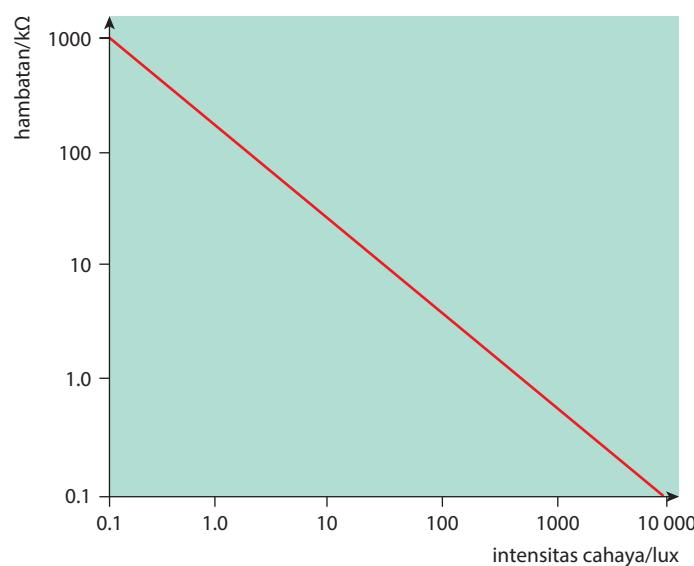


▲ Gambar 1.12 Sebuah LDR dan simbolnya

LDR

LDR (*Light dependent Resistor*) atau fotoresistor terdiri dari dua kisi logam yang berpotongan satu sama lain. Ruang antara kisi-kisi diisi dengan bahan semikonduktor, misalnya kadmium sulfida yang didoping dengan tembaga, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 1.12](#).

Ketika cahaya mengenai bahan semikonduktor, jumlah elektron bebas dalam semikonduktor meningkat. Semakin tinggi intensitas cahaya pada LDR maka semakin besar jumlah elektron yang dapat bergerak bebas. Oleh karena itu, ketika intensitas cahaya meningkat, hambatan LDR berkurang. [Gambar 1.13](#) menunjukkan variasi hambatan terhadap intensitas cahaya suatu LDR tertentu.



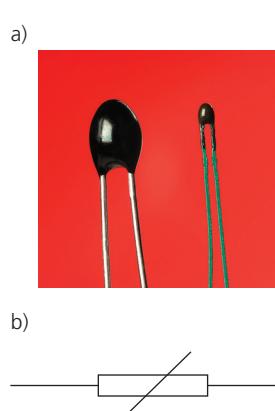
▲ Gambar 1.13 Hambatan terhadap intensitas cahaya untuk LDR

Catatan: Intensitas cahaya diukur dalam lux, dan hambatan diukur dalam ohm, diplot dalam bentuk skala logaritmik pada Gambar 1.13. Grafiknya berupa garis lurus tetapi ini tidak berarti bahwa hambatan berbanding terbalik dengan intensitas cahaya. Data yang berkaitan dengan intensitas cahaya dan hambatan untuk LDR yang umum ditunjukkan pada Tabel 9.2.

Jenis Cahaya	iluminasi/lux	Hambatan LDR / Ω
Cahaya bulan	0,1	1×10^6
Cahaya ruangan normal	450	900
Cahaya matahari	28.000	100

▲ Tabel 1.2 Data LDR tertentu

Lux adalah satuan yang digunakan untuk mengukur daya cahaya yang datang per satuan luas permukaan.



▲ Gambar 9.14 Termistor dan simbolnya

Termistor

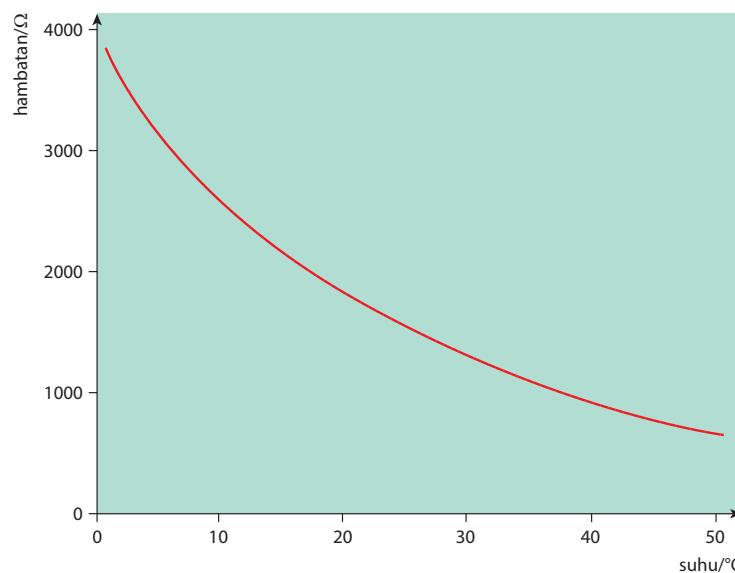
Hambatan sebagian besar logam meningkat sampai batas tertentu dengan kenaikan suhu. Perangkat dengan koefisien suhu negatif, terbuat dari bahan semi konduktor, biasanya oksida logam sering disebut termistor, biasanya oksida logam. Hambatan termistor berkurang secara signifikan dengan kenaikan suhu. Termistor diproduksi dalam berbagai bentuk dan ukuran, termasuk batang, cakram, dan manik-manik. Gambar 1.14 menunjukkan contoh termistor cakram dan manik-manik.

Data yang berkaitan dengan suhu dan hambatan termistor manik-manik khas ditunjukkan pada **Tabel 1.3**.

Suhu/°C	hambatan termistor/Ω
1	3700
10	2500
20	1800
30	1300
40	900
50	660

▲ **Tabel 1.3** Data termistor khas

Variasi dengan suhu termistor tertentu ditunjukkan pada **Gambar 1.15**. Variasi ini tidak linier, namun berupa eksponensial pada rentang suhu yang terbatas.



▲ **Gambar 1.15** Hambatan terhadap suhu untuk termistor

► CONTOH SOAL 1G

Jelaskan apa yang dimaksud dengan termistor koefisien suhu negatif

Jawaban:

Itu merupakan perangkat elektronik yang hambatannya menurun saat suhunya meningkat.

Soal Latihan

- 1 a Gambar sketsa grafik untuk menunjukkan variasi hambatan R terhadap suhu Θ dari sebuah termistor. Beri tanda nilai khusus pada sumbu grafiknya.
- b Gambar sketsa grafik untuk menunjukkan variasi hambatan R terhadap intensitas cahaya L dari sebuah LDR. Beri tanda nilai khusus pada sumbu grafiknya

RANGKUMAN

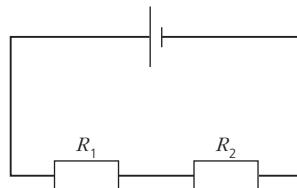
- » Arus listrik adalah laju aliran muatan:
 $I = \frac{Q}{t}$.
- » Pembawa muatan bisa positif atau negatif.
- » Arus konvensional didefinisikan sebagai aliran muatan positif dari positif ke negatif. Dalam logam, pembawa muatan adalah elektron, yang bergerak dari kutub negatif ke kutub positif.
- » Muatan pada pembawa muatan dikuantisasi dalam kelipatan bilangan bulat dari muatan dasar elektron,
 $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.
- » Coulomb adalah satuan muatan dan satu coulomb setara dengan satu ampere sekon.
- » Muatan dapat dihitung menggunakan
 $Q = It$.
- » Untuk penghantar arus $I = Anvq$, dengan n adalah jumlah kerapatan pembawa muatan dan v adalah kelajuan hanyut rata-rata pembawa muatan.
- » Beda potensial didefinisikan sebagai energi yang dipindahkan per satuan muatan: $V = \frac{W}{Q}$.
- » Volt adalah satuan beda potensial dan 1 volt setara dengan 1 joule per coulomb.
- » Resistansi (hambatan) R dari sebuah resistor didefinisikan sebagai: $R = \frac{V}{I}$.
- » Ohm adalah satuan resistansi (hambatan) dan merupakan volt per ampere.
- » Daya listrik $P = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$.
- » Hukum Ohm : untuk penghantar logam pada suhu konstan, arus dalam penghantar sebanding dengan beda potensial yang melintasinya.
- » Karakteristik $I-V$ komponen listrik adalah grafik arus terhadap beda potensial; bentuk grafik merupakan karakteristik untuk komponen yang berbeda.
- » Untuk penghantar logam pada suhu konstan, grafik $I-V$ berupa garis lurus yang melalui titik asal, menunjukkan mematuhi hukum Ohm.
- » Grafik $I-V$ untuk lampu filamen memiliki gradien konstan untuk tegangan rendah dan gradien menurun (menunjukkan peningkatan hambatan) untuk tegangan tinggi, oleh karena itu filamen tidak mematuhi hukum Ohm.
- » Grafik $I-V$ untuk dioda memiliki arus nol untuk panjar mundur (*reverse bias*) (hambatan sangat tinggi). Untuk tegangan rendah pada panjar maju arus masih nol. Ketika tegangan meningkat (di atas sekitar 0,5 V) arus di dioda meningkat. Grafiknya hampir berupa

garis lurus. Akan tetapi, hambatannya tidak konstan tetapi menurun, menunjukkan bahwa dioda tidak mematuhi hukum Ohm.

- » Hambatan penghantar logam konduktor meningkat seiring dengan meningkatnya suhu; penghantar semikonduktor berkurang dengan meningkatnya suhu.
- » Hambatan filamen dalam lampu meningkat dengan meningkatnya arus karena arus yang lebih tinggi menyebabkan suhu filamen meningkat.

- » Sebuah dioda memiliki hambatan yang rendah ketika dihubungkan pada panjar maju, dan hambatan yang sangat tinggi pada panjar mundur.
- » Resistivitas (hambatan jenis) konduktor ρ dengan panjang L dan luas penampang A diberikan oleh persamaan: $R = \rho \frac{L}{A}$.
- » Hambatan LDR berkurang seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya.
- » Hambatan dari termistor koefisien suhu negatif berkurang dengan meningkatnya suhu.

ASESMEN FORMATIF



▲ Gambar 1.16

- 1 Gambar 1.16 menunjukkan rangkaian dengan dua resistor, R_1 dan R_2 , secara seri dihubungkan ke sumber tegangan. Resistor terbuat dari kawat logam yang bahan dan panjangnya sama. Diameter R_1 adalah dua kali diameter R_2 . Kelajuan hanyut (*drift speed*) elektron di R_1 adalah v_1 dan kelajuan hanyut elektron di R_2 adalah v_2 .

Manakah dari jawaban berikut merupakan perbandingan v_1/v_2 yang benar?

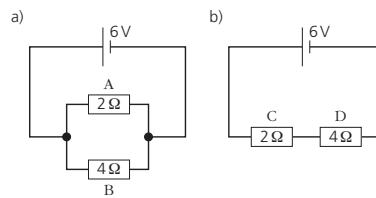
- a 0,25 b 0,50 c 1,0 d 4,0

- 2 Gambar 1.17 menunjukkan sebuah sumber tegangan yang terhubung ke dua resistor P dan Q yang dihubungkan secara paralel. Resistor terbuat dari kabel logam yang bahannya sama. Panjang P adalah L dan panjang Q adalah $2L$. Diameter P adalah $\frac{d}{2}$ dan diameter Q adalah d . Arus yang melalui P adalah I_1 dan arus yang melalui Q adalah I_2 .

Berapa rasio $\frac{I_1}{I_2}$?

- a 0,13 b 0,25 c 4,0 d 8,0

- 3 Gambar 1.18 menunjukkan sumber tegangan GGL 6 V terhubung ke dua resistor 2Ω dan 4Ω . Untuk:
a) resistor disusun paralel dan b) resistor disusun secara seri. Di mana posisi resistor A, B, C atau D yang akan menghasilkan daya terkecil?



▲ Gambar 1.18

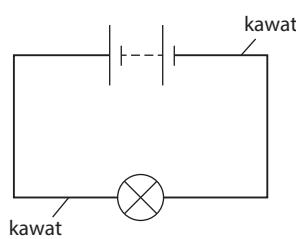
- 4 Sebuah pemanas 240 V membutuhkan arus sebesar 4,2 A. Hitunglah:
 - a muatan yang melewati pemanas dalam 3 menit,
 - b laju energi panas yang dihasilkan oleh pemanas,
 - c hambatan pemanas.
- 5 Sebuah senter kecil memiliki baterai 3,0 V yang terhubung ke bola lampu dengan hambatan 15 Ω.
 - a Hitung:
 - i arus dalam bola lampu,
 - ii daya pada bola lampu.
 - b Baterai mengalirkan arus konstan ke bola lampu selama 2,5 jam. Hitung energi total yang diberikan ke bola lampu.
- 6 Kapasitas baterai penyimpanan dinilai dalam ampere-jam (*Ampere-hour; Ah*). Baterai 80 Ah dapat menghasilkan arus sebesar 80 A selama 1 jam, atau 40 A selama 2 jam, dan seterusnya. Hitung energi total, dalam joule, yang disimpan dalam aki mobil 12 V, 80 Ah.
- 7 Ketel listrik memiliki daya 2,2 kW dan tegangannya 240 V. Jika ketel listrik dihubungkan dengan sumber tegangan 230 V, maka daya ketel listrik menjadi
- 8 Filamen ketel listrik memiliki hambatan 26Ω pada suhu kamar. Filamen ini terbuat dari kawat nikrom dengan diameter 0,60 mm dan hambatan jenis $1,1 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$ pada suhu kamar. Hitung panjang kawat.
- 9 Nilai arus I melalui komponen listrik untuk beda potensial V yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 1.19.

V/V	0	0,19	0,48	1,47	2,92	4,56	6,56	8,70
I/A	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40

▲ Gambar 1.19

- a Gambar diagram rangkaian yang dapat digunakan untuk memperoleh nilai-nilai ini.

- b** Hitung hambatan komponen pada setiap nilai arus.
 - c** Buat grafik untuk menunjukkan variasi arus dengan hambatan komponen.
 - d** Sarankan kemungkinan jenis komponen tersebut, berikan alasan untuk jawaban Anda.
- 10** Arus pada kawat dengan panjang 2,50 m berdiameter 1,5 mm adalah 0,65 A ketika beda potensial 0,40 V diterapkan di antara ujung-ujungnya. Hitunglah:
- a** Nilai hambatan kawat
 - b** Nilai resistivitas bahan kawat.
- 11 a** Daya keluaran dari pemanas S adalah 2,5 kW bila dihubungkan ke sumber tegangan 220 V.
- i** Hitung hambatan pemanas. [2]
 - ii** Pemanas terbuat dari kawat dengan luas penampang $2,0 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ dan hambatan jenis $1,1 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$.
- Gunakan jawaban Anda pada **i** untuk menghitung panjang kawat. [3]
- b** Tegangan sumber diubah menjadi 110 V.
- i** Hitung daya keluaran pemanas pada tegangan ini, dengan asumsi tidak ada perubahan hambatan kabel. [1]
 - ii** Secara kuantitatif, jelaskan salah satu cara mengubah kawat pemanas agar menghasilkan daya yang sama dengan daya seperti pada **a**. [2]
 - iii** Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 21 Q4 May/June 2012
- 12 a** Definisikan yang disebut muatan. [1]
- b** Sebuah pemanas dibuat dari kawat dengan hambatan $18,0 \Omega$ dan dihubungkan ke catu daya 240 V. Pemanas dinyalakan selama 2,60 Ms. Hitunglah:
- i** daya yang ditransformasikan dalam pemanas, [2]
 - ii** arus di pemanas, [1]
 - iii** muatan yang melewati pemanas selama dinyalakan, [2]
 - iv** jumlah elektron per detik yang melewati titik tertentu dalam pemanas. [2]
- Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 22 Q6
May/June 2013



▲ Gambar 1.20

- 13 Suatu kawat pengantar dihubungkan dengan baterai yang hambatan internal (hambatan dalam)-nya dapat diabaikan, ke lampu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.20.

Lampu berada pada suhu pengoperasian normal. Beberapa data untuk kawat filamen lampu dan untuk kawat penghubung rangkaian ditunjukkan pada Gambar 1.21.

	Kawat filamen	Kawat penghubung
diameter	d	$14d$
Total panjang	L	$7,0L$
hambatan logam (pada suhu operasi normal)	ρ	$0,028\rho$

▲ Gambar 1.21

- i Tunjukkan bahwa :

$$\frac{\text{hambatan kawat filamen}}{\text{total hambatan kawat penghubung}} = 1000 \quad [2]$$

- ii Gunakan informasi dalam i untuk menjelaskan secara kualitatif mengapa daya yang dihasilkan dalam kawat filamen lampu lebih besar daripada daya total yang dihasilkan dalam kawat penghubung. [1]

- iii Lampu diberi nilai 12 V, 6,0 W. Gunakan informasi di i untuk menentukan hambatan total dari kawat penghubung. [3]

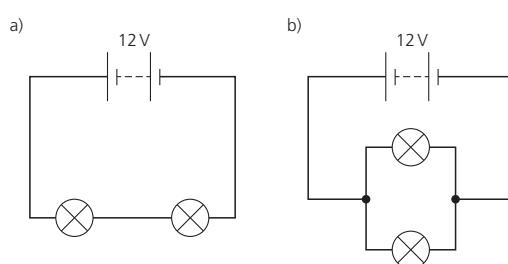
- iv Diameter kawat penghubung dikurangi. Panjang total kawat penghubung dan resistivitas logam kawat penghubung tetap sama. Nyatakan dan jelaskan perubahan, jika ada, yang terjadi pada hambatan kawat filamen lampu. [3]

*Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 21 Q7 part b only
Oct/Nov 2017*

- 14 a Jelaskan karakteristik $I-V$ dari:

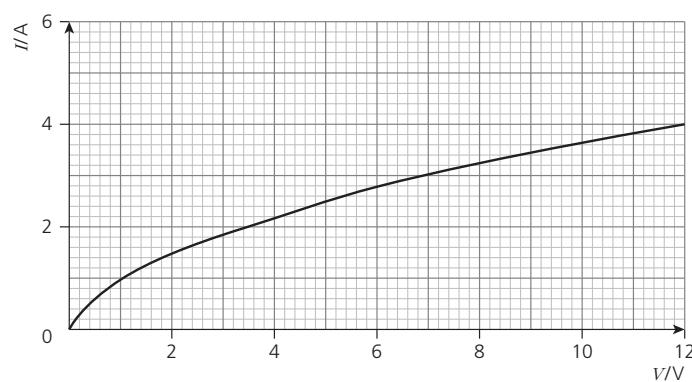
- konduktor logam pada suhu konstan, [1]
- dioda semikonduktor. [2]

- b Dua lampu filamen identik dihubungkan secara seri dan kemudian secara paralel ke baterai dengan gaya gerak listrik (GGL) 12 V dan hambatan internal yang dapat diabaikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.22a dan Gambar 1.22b.



▲ Gambar 1.22

Karakteristik I - V dari setiap lampu ditunjukkan pada Gambar 1.23.



▲ Gambar 1.23

- i Gunakan informasi yang ditunjukkan pada Gambar 9.23 untuk menentukan arus yang melalui baterai pada:
 - 1 rangkaian Gambar 1.22a,
 - 2 rangkaian Gambar 1.22b.[3]
- ii Hitung hambatan total dalam:
 - 1 rangkaian Gambar 1.22a,
 - 2 rangkaian Gambar 1.22b.[3]
- iii Hitung rasionya:

$$\frac{\text{daya lampu pada rangkaian (Gambar 1.22a)}}{\text{daya lampu pada rangkaian (Gambar 1.22b)}}$$
[2]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 22 Q6 May/June 2017

2 Rangkaian DC

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

2.1. Rangkaian Listrik

1. Mengidentifikasi simbol rangkaian yang sesuai dengan silabus.
2. Menafsirkan diagram rangkaian yang memiliki sumber energi, saklar, resistor, amperemeter dan voltmeter dan/atau jenis komponen lainnya yang dirujuk dalam silabus
3. Mendefinisikan dan menerapkan Gaya Gerak Listrik (GGL) dari sumber sebagai energi yang mengalir tiap satuan muatan pada muatan bergerak di sekitar rangkaian tertutup
4. Membedakan antara GGL dan beda potensial (V) dalam perhitungan energi.
5. Mendeskripsikan pengaruh hambatan dalam sumber GGL terhadap tegangan terminal.

2.2. Hukum Kirchhoff

1. Menjelaskan hukum pertama Kirchhoff dan mendeskripsikannya sebagai konsekuensi dari kekekalan muatan
2. Menjelaskan hukum kedua Kirchhoff dan mendeskripsikannya sebagai konsekuensi dari kekekalan energi
3. Dengan menggunakan hukum Kirchhoff, merumuskan persamaan

- hambatan gabungan seri dari dua resistor atau lebih
4. Menerapkan persamaan hambatan gabungan seri dari dua resistor atau lebih
 5. Dengan menggunakan hukum Kirchoff, merumuskan persamaan hambatan gabungan paralel dari dua resistor atau lebih.
 6. Menerapkan persamaan hambatan gabungan paralel dari dua resistor atau lebih.
 7. Menerapkan hukum Kirchoff untuk menyelesaikan masalah rangkaian sederhana

2.3. Pembagi Potensial

1. Menjelaskan prinsip rangkaian pembagi potensial
2. Menerapkan prinsip potensiometer sebagai sarana untuk membandingkan beda potensial
3. Mengidentifikasi penggunaan galvanometer metode nol
4. Mendeskripsikan penggunaan termistor dan fotoresistor pada pembagi potensial untuk membuat beda potensial yang bergantung pada suhu dan intensitas cahaya

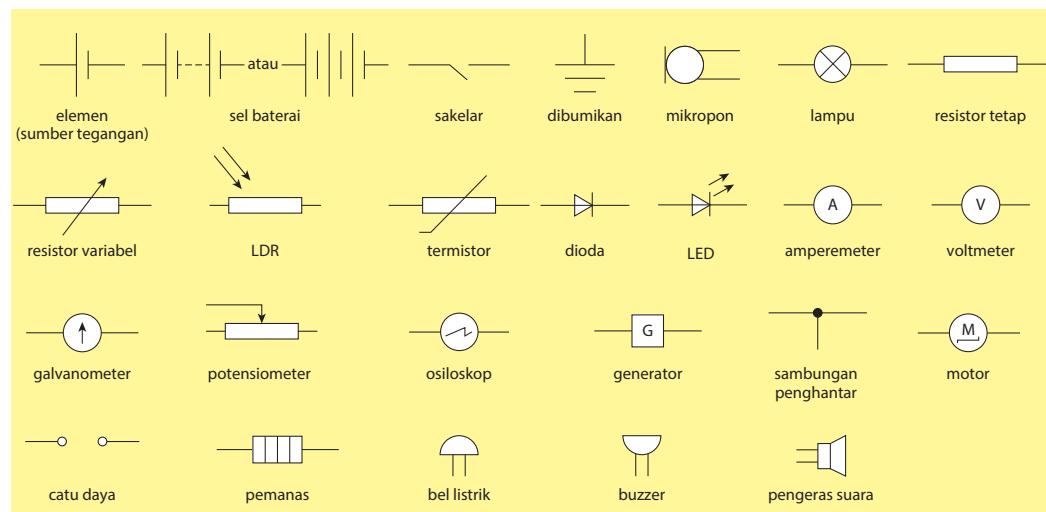
Pemahaman Pendahuluan

- Pengetahuan dasar tentang simbol rangkaian yang sesuai.
- Metode untuk menggambar dan menafsirkan diagram rangkaian
- Arus listrik adalah laju aliran muatan.
- Beda potensial diperlukan dalam menyediakan energi untuk memindahkan muatan melalui perangkat.
- Beda potensial V yang melintas pada komponen dan arus I yang melaluinya dihubungkan oleh $V = IR$ dengan R adalah hambatannya.

2.1 Rangkaian Listrik

Saat menyajikan hasil eksperimen listrik, atau mendeskripsikan rangkaian, penting untuk mengetahui dengan tepat bagaimana komponen-komponen tersebut dihubungkan. Hal ini dapat dilakukan dengan mengambil foto, tetapi teknik ini memiliki kelemahan. Foto pada [Gambar 1.4](#), misalnya, tidak jelas dan tidak menunjukkan seluruh komponennya. Anda dapat membuat sketsa diagram blok, dengan komponen-komponennya diindikasikan sebagai kotak persegi panjang berlabel ‘baterai’, ‘amperemeter’, ‘resistor’, dll. Blok kemudian akan dihubungkan dengan garis untuk menunjukkan kabel. Hal ini juga tidak memuaskan; terlalu membutuhkan banyak waktu untuk memberi label pada semua kotak. Jauh lebih baik untuk menggambar diagram rangkaian menggunakan seperangkat simbol yang dikenali oleh semua orang dan yang tidak perlu diberi label.

[Gambar 2.1](#) menunjukkan simbol-simbol yang mungkin diperlukan saat mengerjakan soal-soal di sekolah atau di perguruan tinggi (Anda pasti sudah menemukannya.) Penting bagi Anda untuk mempelajari ini sehingga dapat langsung mengenalinya. Satu-satunya label yang mungkin dapat dilihat adalah nilai komponennya, misalnya 1,5 V untuk baterai atau 22Ω untuk resistor.



▲ Gambar 2.1 Simbol Rangkaian

Gaya Gerak Listrik dan Beda Potensial

Saat muatan melewati sumber tegangan seperti baterai akan terjadi perpindahan energi. Sumber tegangan dikatakan memiliki **gaya gerak listrik**, atau singkatnya **GGL**. GGL merupakan properti (karakteristik) dari sumber tegangan, baterai atau elemen. Gaya gerak listrik satunya volt yaitu energi yang dipindahkan tiap satuan muatan yang melewati sumber tegangan. Perhatikan bahwa, terlepas dari namanya, GGL bukan gaya. Energi yang diperoleh oleh muatan berasal dari energi kimia baterai.

$$GGL = \frac{\text{energi yang berubah dari bentuk lain ke energi listrik pada muatan bergerak di sekitar rangkaian tertutup}}{\text{muatan}}$$

Ketika beda potensial (V) diberikan pada resistor, muatan melewati resistor. Energi muatan diubah menjadi energi panas dalam resistor. Seperti yang kita lihat pada Bab 1.2, beda potensial yaitu energi yang berpindah tiap satuan muatan yang melewati resistor.

Beda potensial = energi yang berpindah tiap satuan muatan.

CONTOH SOAL 2A

Dua lampu dihubungkan secara seri ke baterai.

Nyatakan perubahan energi yang terjadi pada

- baterai
- lampu.

Jawaban

- kimia menjadi listrik
- listrik menjadi termal (panas) dan cahaya

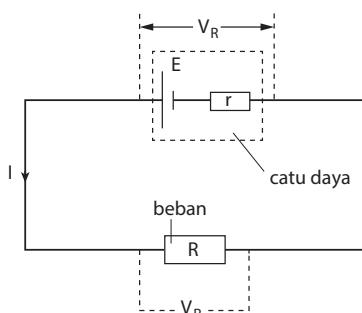
Soal Latihan

- 1 Setiap lampu pada contoh 2A di atas memiliki hambatan R dan dan GGL baterainya adalah E . Jika arus pada rangkaian sebesar E , nyatakan laju perubahan energinya pada:
- baterai
 - sebuah lampu.

**Hambatan dalam**

Saat mesin mobil dihidupkan dengan lampu depan menyala, lampu depan terkadang redup. Hal ini karena aki mobil memiliki resistansi (hambatan).

Semua sumber tegangan memiliki hambatan di antara terminalnya (kutubnya), yang disebut resistansi internal (hambatan dalam). Ketika sumber tegangan mengalirkan arus, muatan yang melewati rangkaian menghilangkan (mendisipasi) sebagian energi listriknya menjadi energi panas dalam sumber tegangan itu sendiri. Sumber tegangan menjadi hangat saat mengalirkan arus.



▲ Gambar 2.2

Gambar 2.2 menunjukkan sumber tegangan yang memiliki GGL E dan hambatan dalam r . Sumber tegangan mengalirkan arus I ketika dihubungkan ke resistor eksternal dengan hambatan R (disebut beban). V_R adalah beda potensial yang melewati seluruh beban, dan V_r adalah beda potensial yang melewati hambatan dalam. Menurut kekekalan energi,

$$E = V_R + V_r$$

Dengan demikian tegangan yang melewati seluruh beban V_R adalah:

$$V_R = E - V_r$$

V_R juga merupakan beda potensial terminal (tegangan jepit) atau tegangan terminal di sumber tegangan.

Tegangan terminal selalu lebih kecil dari gaya gerak listrik ketika sumber tegangan mengalirkan arus. Ini karena adanya beda potensial yang melintasi hambatan dalam.

$$\text{Beda potensial hambatan dalam} = \text{GGL} - \text{tegangan terminal}$$

Gaya gerak listrik adalah tegangan terminal ketika sumber tegangan berada pada rangkaian terbuka (ketika tidak ada arus yang dialirkan). Tegangan yang melintasi hambatan

dalam V_r adalah nol ($V_r = I \cdot r = 0$). GGL dapat diukur dengan menghubungkan voltmeter yang memiliki hambatan sangat tinggi melintasi kutub-kutub sumber tegangan.

Rangkaian pada **Gambar 2.3** menunjukkan bahwa semakin besar arus yang diberikan oleh sumber tegangan, semakin rendah tegangan terminalnya. Beda potensial pada hambatan dalam, diberikan oleh:

$$\text{Beda potensial pada hambatan dalam} = \text{arus} \times \text{hambatan dalam}$$

Karena lebih banyak lampu dihubungkan secara paralel ke sumber tegangan, arus akan meningkat menyebabkan beda potensial hambatan dalam akan meningkat. Dengan demikian tegangan terminal akan berkurang.

Kembali ke contoh menghidupkan mobil dengan lampu depan menyala, arus besar (mungkin 100 A) diberikan ke starter motor oleh baterai. Kemudian akan ada beda potensial yang besar di seluruh hambatan dalam baterai; artinya, tegangan yang hilang akan besar. Tegangan terminal akan turun dan lampu akan redup. Lampu kembali normal cerah setelah mesin hidup. Ini karena starter motor secara otomatis terputus saat mesin dihidupkan.

Pada terminologi **Gambar 2.2**, $V_r = I_r$ dan $V_r = Ir$, sehingga $E = V_r + V_r$ menjadi

$$E = I_r + Ir, \text{ atau } E = I(R + r)$$

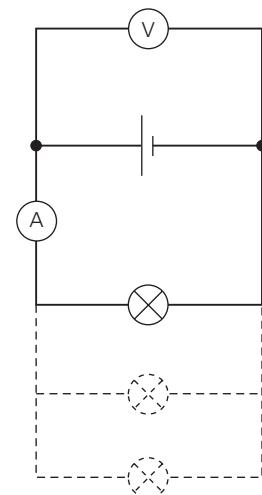
GGL E dan hambatan dalam r baterai dapat diukur dengan menggunakan rangkaian yang ditunjukkan pada **Gambar 2.4**. Voltmeter hambatan tinggi mengukur beda potensial (V) yang melintasi kutub baterai. Arus I dalam rangkaian divariasikan menggunakan resistor variabel (*rheostat*).

Tegangan terminal berkurang saat arus yang diberikan oleh baterai meningkat dan beda potensial yang melintas hambatan dalam meningkat. Grafik tegangan terminal (V) diplot terhadap arus I yang diberikan oleh baterai (lihat **Gambar 2.5**). Grafiknya berupa garis lurus dengan gradien negatif dan titik potong positif pada sumbu V . Persamaan garis diberikan oleh:

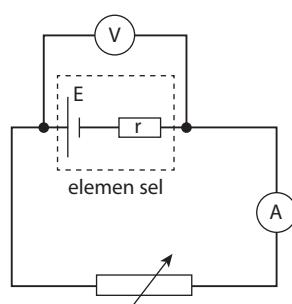
$$\text{Tegangan terminal} = \text{GGL} - \text{Beda potensial hambatan dalam}$$

atau

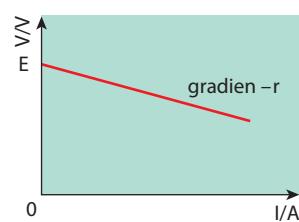
$$V = E - Ir.$$



▲ **Gambar 2.3** Pengaruh rangkaian arus terhadap tegangan terminal.



▲ **Gambar 2.4** Rangkaian untuk mengukur GGL dan hambatan dalam.



▲ **Gambar 2.5** Grafik tegangan terminal terhadap arus

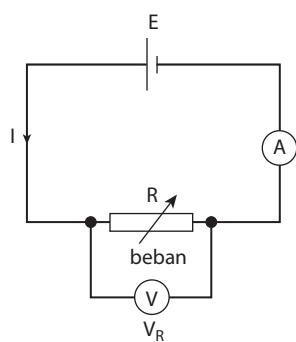
PERINGATAN

jangan mencoba eksperimen ini, karena kabel menjadi sangat panas; ada juga bahaya baterai meledak.

Persamaan ini merupakan fungsi $y = mx + c$. Oleh karena itu gradiennya adalah $-r$ dan titik potong sumbu Y adalah E .

Arus maksimum yang dapat diberikan oleh sumber tegangan adalah ketika terminalnya (kutub-kutubnya) dihubungkan singkat oleh kabel dengan hambatan yang dapat diabaikan, sehingga $R = 0$. Dalam hal ini, beda potensial hambatan dalam akan sama dengan GGL dari elemen. Tegangan terminal kemudian menjadi nol.

Pada soal, cukup sering, hambatan dalam sumber tegangan dianggap dapat diabaikan, sehingga tegangan V_R pada beban dan tegangan terminal sama dengan GGL dari sumber tegangan.



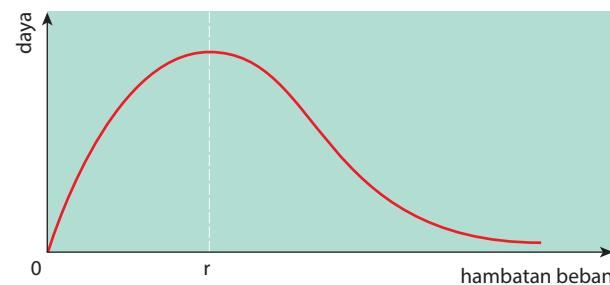
▲ Gambar 2.6 Rangkaian untuk penyelidikan transfer daya ke beban eksternal

Pengaruh hambatan dalam pada daya baterai

Daya yang dikirimkan oleh baterai ke hambatan variabel beban eksternal dapat diselidiki dengan menggunakan rangkaian [Gambar 2.6](#). Pembacaan arus I dan beda potensial V_R di seluruh beban diambil untuk nilai yang berbeda dari beban resistor variabel. Hasil kali $I.V_R$ merupakan daya yang didisipasi dalam beban, dan hasil bagi $\frac{V_R}{I}$ merupakan hambatan beban R .

[Gambar 2.7](#) menunjukkan grafik daya disipasi $I.V_R$ terhadap variasi hambatan beban R .

Grafik menunjukkan bahwa ada daya maksimum yang dihantarkan oleh baterai pada satu nilai hambatan eksternal. Nilai ini sama dengan hambatan dalam baterai r .



▲ Gambar 2.7 Grafik daya yang dihantarkan ke beban eksternal terhadap hambatan beban

Baterai menghantarkan daya maksimum ke rangkaian ketika hambatan beban rangkaian sama dengan hambatan dalam baterai.

CONTOH SOAL 2B

Voltmeter hambatan tinggi membaca 13,0V ketika dihubungkan ke kutub kutub baterai. Pembacaan voltmeter turun menjadi 12,0V ketika baterai mengalirkan arus 3,0A ke lampu. Nyatakan GGL baterai.

- Hitung beda potensial pada hambatan dalam ketika baterai dihubungkan ke lampu.
- Hitung hambatan dalam baterai.

Jawaban

- GGL sebesar 13,0V, voltmeter membaca ketika baterai menghasilkan arus yang dapat diabaikan.
- Gunakan $V_r = E - V_R$, beda potensial pada hambatan dalam = $V_r = 13,0 - 12,0 = 1,0\text{ V}$.
- Gunakan $V_r = I_r$,

$$r = \frac{V_r}{I} = 1,0/3,0 = 0,33\Omega$$

Soal Latihan

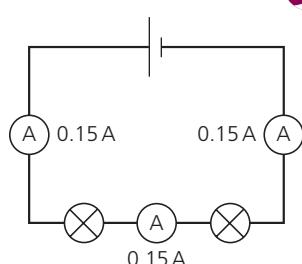
- 2 Tiga sel (baterai) identik, masing-masing GGL nya 1,5 V, dihubungkan secara seri ke lampu 15Ω . Arus dalam rangkaian adalah 0,27 A. Hitung hambatan dalam setiap sel.
- 3 Sebuah sel dengan GGL 1,5 V memiliki hambatan dalam $0,50\Omega$.
- Hitung arus maksimum yang dapat dihantarkan. Dalam keadaan apa sel menghantarkan arus maksimum?
 - Hitung juga daya maksimum yang dapat dihantarkan ke beban eksternal. Dalam keadaan apa, sel menghantarkan daya maksimum?



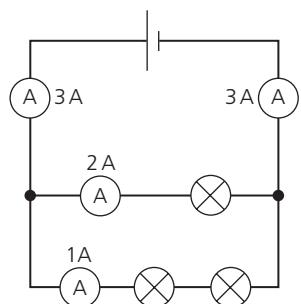
2.2 Hukum Kirchhoff

Kekekalan Muatan: Hukum Pertama Kirchhoff

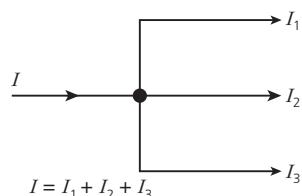
Rangkaian seri adalah rangkaian dengan komponen-komponennya dihubungkan satu demi satu, membentuk satu loop rangkaian lengkap. Anda mungkin telah menghubungkan amperemeter pada titik yang berbeda dalam rangkaian seri untuk menunjukkan bahwa ampermeter membaca arus yang sama pada setiap titik (lihat [Gambar 2.8](#)).



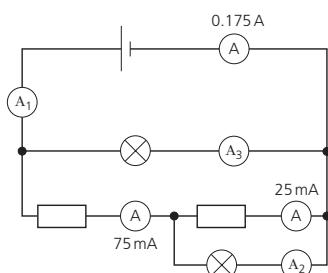
▲ **Gambar 2.8** Arus listrik di setiap titik pada rangkaian seri sama besar.



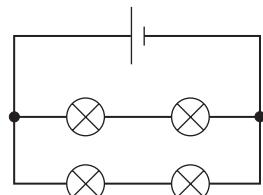
▲ Gambar 2.9 Arus terbagi pada rangkaian paralel



▲ Gambar 2.10



▲ Gambar 2.11



▲ Gambar 2.12

Rangkaian paralel adalah rangkaian dengan arus dapat mengambil jalur alternatif dalam loop yang berbeda. Dalam rangkaian paralel, arus terbagi pada suatu percabangan, tetapi arus yang masuk pada percabangan tersebut sama dengan arus yang keluar (lihat Gambar 2.9).

Faktanya bahwa arus tidak ‘habis’ di persimpangan karena arus adalah laju aliran muatan, dan muatan tidak dapat menumpuk atau ‘habis’ di persimpangan. Konsekuensi dari kekekalan muatan listrik ini dikenal sebagai hukum pertama Kirchoff. Hukum ini biasanya dinyatakan sebagai berikut.

Jumlah arus yang memasuki suatu titik cabang dalam suatu rangkaian selalu sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik cabang tersebut.

Pada percabangan yang ditunjukkan pada Gambar 2.10,

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

CONTOH SOAL 2C

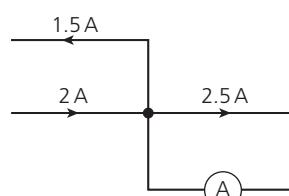
Untuk rangkaian gambar 2.11 nyatakan pembacaan Ampermeter A_1 , A_2 , A_3

Jawaban

- A_1 akan terbaca 175 mA, dengan arus masuk ke sumber listrik sama dengan arus yang keluar
- A_2 akan terbaca $75 - 25 = 50$ mA, dengan jumlah arus yang masuk percabangan sama dengan jumlah arus yang keluar
- A_3 akan terbaca $175 - 75 = 100$ mA

Soal Latihan

- 4 Gambar 2.12 menunjukkan lampu-lampu yang identik. Arus 0,50 A melalui baterai. Berapa arus pada masing-masing lampu?
- 5 Gambar 2.13 menunjukkan sebuah percabangan pada rangkaian. Hitung hasil pembacaan amperemeternya.

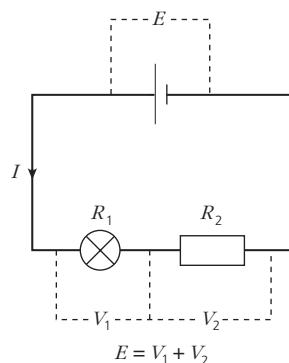


▲ Gambar 2.13

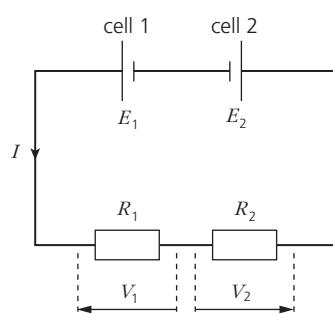
Kekekalan Energi: Hukum Kedua Kirchhoff

Ketika baterai menghasilkan arus ke rangkaian, muatan yang mengalir di sekitar rangkaian memperoleh energi listrik saat melewati baterai dan kehilangan energi listrik saat melewati sisa rangkaian. Dari hukum kekekalan

energi, kita tahu bahwa energi total harus tetap sama. Konsekuensi dari kekekalan energi ini dikenal sebagai hukum kedua Kirchhoff. Hukum ini dapat dinyatakan sebagai berikut.



▲ Gambar 2.14



▲ Gambar 2.15

Jumlah gaya gerak listrik dalam rangkaian tertutup sama dengan jumlah beda potensial.

Gambar 2.14 menunjukkan rangkaian yang berisi baterai, lampu dan resistor secara seri. Baterai memiliki hambatan dalam yang dapat diabaikan. Gunakan hukum kedua Kirchhoff, gaya gerak listrik dalam rangkaian adalah GGL baterai E . Jumlah beda potensial adalah beda potensial V_1 yang melewati lampu ditambah beda potensial V_2 melintasi resistor. Jadi, $E = V_1 + V_2$. Jika arus dalam rangkaian adalah I dan hambatan lampu dan resistor berturut-turut adalah R_1 dan R_2 , beda potensial dapat ditulis sebagai $V_1 = IR_1$ dan $V_2 = IR_2$, jadi

$$E = IR_1 + IR_2$$

Harus diingat bahwa gaya gerak listrik dan beda potensial memiliki arah. Ini harus dipertimbangkan ketika mengerjakan persamaan untuk hukum kedua Kirchhoff. Misalnya, pada rangkaian Gambar 2.15, dua elemen telah dihubungkan secara berlawanan. Kedua elemen memiliki hambatan dalam yang dapat diabaikan.

Gaya gerak listrik total dalam rangkaian adalah $E_1 - E_2$, dan menurut hukum kedua Kirchhoff

$$E_1 - E_2 = V_1 + V_2 = IR_1 + IR_2$$

Pada Gambar 2.15 arah arus akan tergantung pada apakah $E_1 > E_2$ atau $E_1 < E_2$. Jika arah normal arus yang melalui elemen dibalik, elemen itu akan diisi muatan bukan memberikan energi ke muatan yang melewatinya. Arus yang melalui elemen 1 pada arah arah normal dan yang melalui elemen 2 kebalikannya. Oleh karena itu elemen 2 sedang diisi oleh elemen 1.

Pada soal soal, GGL atau baterai dianggap konstan. Pada kenyataannya GGL berkurang karena penggunaannya dan baterai dapat diisi ulang jika baterai tersebut dapat diisi ulang (*rechargeable*).

CONTOH SOAL 2D

Untuk rangkaian gambar 2.15 elemen sel 1 memiliki GGL 3,0 V dan GGL sel 2 yaitu 1,5 V. Nilai hambatan R_1 dan R_2 masing-masing 2 Ω dan 4 Ω . Hitung arus pada rangkaian

Jawaban

Gunakan hukum II Kirchoff

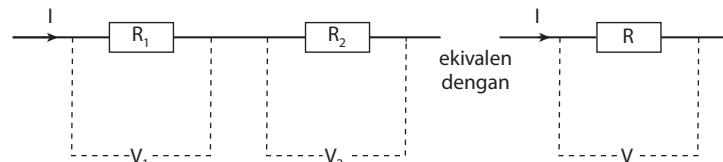
$$3,0 - 1,5 = (I \times 2) + (I \times 4) \text{ jadi } I = 1,5/6 = 0,25\text{A}$$

Soal Latihan

- 6 Untuk rangkaian pada Gambar 2.15 GGL elemen sel 1 adalah 6,0 V dan elemen sel 2 memiliki GGL E_2 . Nilai hambatan resistor R_1 dan R_2 masing-masing adalah 5,0 Ω dan 3,0 Ω . Arus dalam rangkaian adalah 0,50 A. Hitung GGL dari elemen sel 2.

Rangkaian Seri Resistor

Gambar 2.16 menunjukkan dua resistor dengan hambatan R_1 dan R_2 yang dihubungkan secara seri, dan sebuah resistor tunggal dengan hambatan R yang merupakan hambatan ekivalennya (gabungan). Arus I pada resistor, dan pada resistor gabungannya, adalah sama.



▲ Gambar 2.16 Rangkaian Seri Resistor

Beda potensial total V di kedua resistor harus sama dengan yang melintasi resistor tunggal. Jika V_1 dan V_2 adalah beda potensial pada masing-masing resistor,

$$V = V_1 + V_2$$

Karena beda potensial sama dengan arus dikalikan dengan hambatan,

$$IR = IR_1 + IR_2$$

Dibagi dengan arus I , maka:

$$R = R_1 + R_2$$

Persamaan ini dapat diperpanjang sehingga hambatan ekivalen (hambatan total) R dari beberapa resistor yang dihubungkan dinyatakan oleh persamaan:

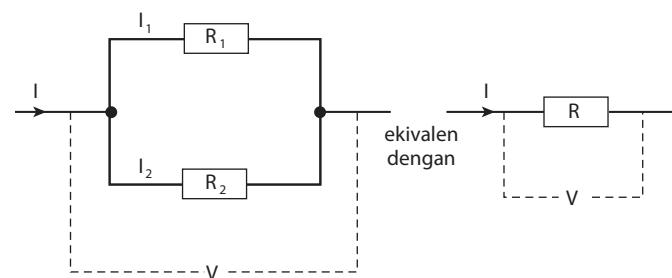
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

Jadi

Hambatan gabungan/total dari beberapa resistor secara seri adalah jumlah dari semua hambatan setiap resistor.

Rangkaian Paralel Resistor

Sekarang perhatikan dua resistor dengan hambatan R_1 dan R_2 yang terhubung secara paralel, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 2.17](#). Arus yang melalui masing-masing akan berbeda, tetapi masing-masing akan memiliki beda potensial yang sama. Resistor tunggal ekuivalen R akan memiliki beda potensial yang sama, tetapi arus akan menjadi arus total yang melalui resistor terpisah.



▲ **Gambar 2.17** Rangkaian Paralel Resistor

Dengan hukum pertama Kirchhoff,

$$I = I_1 + I_2$$

dan menggunakan **hambatan = beda potensial/arus**, sehingga

$$I = \frac{V}{R}$$

$$\frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2}$$

dibagi dengan beda potensial V ,

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

persamaan ini dapat dikembangkan sehingga hambatan ekivalen Resistor R dari beberapa resistor yang dihubungkan paralel menjadi

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

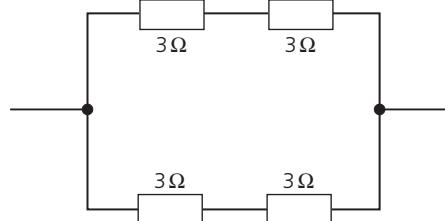
Jadi

Kebalikan dari hambatan gabungan resistor paralel adalah jumlah kebalikan dari semua hambatan masing-masing resistor.

Perhatikan bahwa:

- Untuk dua resistor identik secara paralel, hambatan gabungan sama dengan setengah dari nilai masing-masing resistor.
- Untuk resistor paralel, hambatan gabungan selalu lebih kecil dari nilai hambatan resistor terkecil.

CONTOH SOAL 2E



▲ Gambar 2.18

Hitung hambatan ekivalen (hambatan gabungan) dari susunan resistor pada [Gambar 2.18](#).

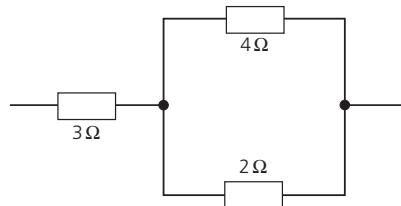
Jawaban

Susunannya setara dengan dua resistor 6Ω secara paralel, sehingga hambatan R diberikan oleh $1/R = 1/6 + 1/6 = 2/6$.

(Jangan lupa untuk menemukan kebalikan dari nilai ini.)

Jadi $R = 3\Omega$.

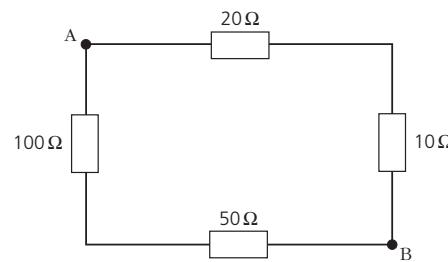
Soal Latihan



▲ Gambar 2.19

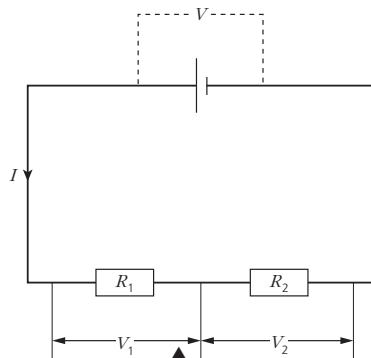
- 7 Hitung hambatan ekivalen dari susunan resistor pada [Gambar 2.19](#).

Petunjuk: Pertama cari hambatan dari kombinasi paralel.



▲ Gambar 2.20

- 8 Hitung hambatan efektif antara titik A dan B pada rangkaian [Gambar 2.20](#).



▲ Gambar 2.21 Pembagi Potensial

2.3 Pembagi Potensial

Dua buah resistor yang dihubungkan seri dengan sebuah elemen (baterai) masing-masing memiliki beda potensial. Rangkaian dapat digunakan untuk membagi GGL dari elemen. Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 2.21](#).

Arus pada masing-masing resistor sama besar, karena dirangkai secara seri. Jadi $V_1 = IR_1$ dan $V_2 = IR_2$. Dengan cara membagi persamaan pertama dengan persamaan kedua dihasilkan

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

Perbandingan tegangan pada dua resistor sama dengan perbandingan hambatannya. Jika beda potensial gabungan adalah 12 V dan R_1 sama dengan R_2 , maka setiap resistor masing-masing akan memiliki beda potensial 6 V. Jika besar R_1 dua kali besar R_2 , maka V_1 akan menjadi 8 V dan V_2 akan menjadi 4 V.



Penggunaan Pembagi Potensial

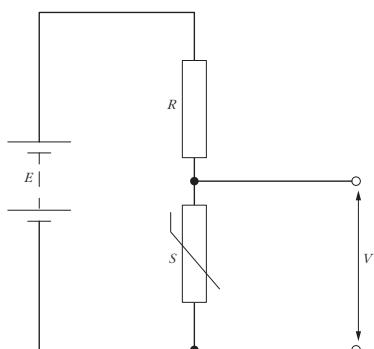
Jika komponen dengan hambatan variabel dihubungkan secara seri dengan resistor tetap, dan kombinasinya dihubungkan ke elemen sel untuk membuat pembagi potensial, maka kita memiliki pembagi potensial yang bervariasi antara batas-batas tertentu. Komponen hambatan variabel dapat berupa, misalnya, resistor yang bergantung pada cahaya (*fotoresistor*) atau termistor ([lihat Bab 1.3](#)). Perubahan intensitas cahaya atau temperatur menyebabkan perubahan hambatan salah satu komponen pembagi potensial, sehingga beda potensial antar komponen ini berubah. Perubahan beda potensial dapat digunakan untuk mengoperasikan rangkaian kontrol jika, misalnya, intensitas cahaya menjadi terlalu rendah atau terlalu tinggi, atau suhu turun di luar batas tertentu.

Tegangan kemudian dapat digunakan untuk mengontrol perangkat keluaran (*output*).

Pada [Gambar 2.22](#), sebuah termistor dengan hambatan yang bervariasi S dihubungkan secara seri dengan resistor dengan hambatan konstan R .

Baterai dengan GGL E diasumsikan memiliki hambatan dalam yang dapat diabaikan. Tegangan keluaran V pada termistor diberikan oleh persamaan:

$$V = \frac{SE}{(S + R)}$$



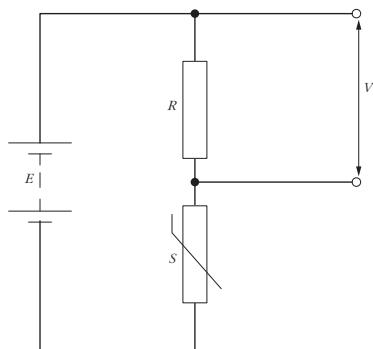
▲ **Gambar 2.22** Rangkaian pembagi potensial

Besar beda potensial (tegangan) V pada setiap nilai hambatan tertentu S dari termistor tergantung pada nilai relatif S dan R . Perhatikan bahwa, ketika hambatan S dari termistor meningkat, tegangan output V juga meningkat.

Dengan mengamati beda potensial resistor dengan hambatan tetap R , seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 2.23](#), tegangan keluaran akan diberikan oleh:

$$V = \frac{RE}{(S + R)}$$

Tegangan keluaran V kemudian akan berkurang dengan meningkatnya hambatan termistor S (suhu termistor menurun).



▲ Gambar 2.23 Rangkaian alternatif untuk pembagi potensial

Jika termistor pada rangkaian yang ditunjukkan pada [Gambar 2.22](#) dan [Gambar 2.23](#) diganti dengan resistor yang bergantung pada cahaya (LDR) tegangan output akan dikontrol oleh hambatan LDR.

CONTOH SOAL 2F

Sebuah pembagi potensial terdiri dari sebuah baterai GGL-nya 6,00 V dan hambatan dalam yang dapat diabaikan, dihubungkan secara seri dengan resistor hambatannya 120Ω dan resistor variabel dengan hambatan $0 \rightarrow 200\Omega$. Tentukan kisaran beda potensial yang dapat diperoleh pada resistor tetap.

Jawaban

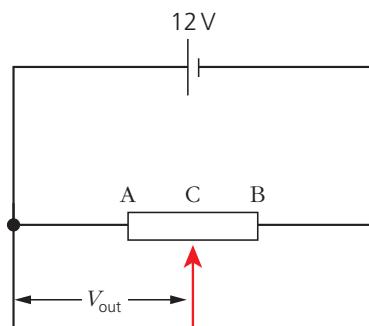
Ketika resistor variabel berada pada 0Ω , beda potensial resistor tetap = 6,0 V. Ketika resistor variabel berada pada 200Ω ,

$$\text{beda potensial pada resistor tetap} = \frac{120}{(120+200)} \times 6.00 = 2.25 \text{ V}$$

Rentangnya adalah 2.25 V → 6.00 V.

Soal Latihan

- 9 Sebuah pembagi potensial terdiri dari baterai dengan GGL 7,5 V dan hambatan dalam yang dapat diabaikan, dihubungkan secara seri dengan resistor yang hambatannya R dan resistor variabel dengan hambatan $0 \rightarrow 500\Omega$. Simpulkan bagaimana pembagi potensial dapat diatur sehingga menghasilkan beda potensial yang bervariasi antara 0 dan 3,0 V.

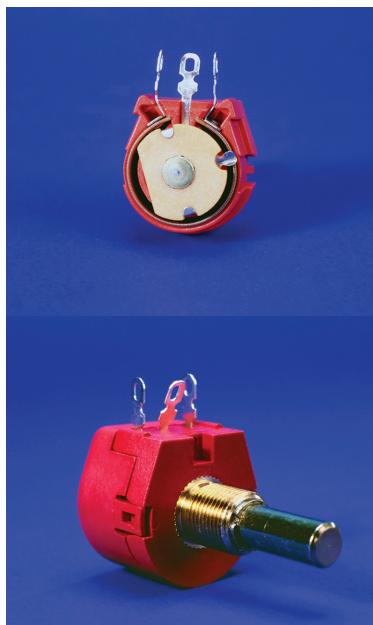


▲ Gambar 2.24

Potensiometer

Potensiometer merupakan sebuah pembagi potensial variabel kontinu. [Pada Bab 1](#), sebuah sumber tegangan variabel digunakan untuk memvariasikan tegangan pada komponen rangkaian yang berbeda. Sebuah **resistor variabel**, atau **rheostat**, dapat digunakan untuk menghasilkan tegangan variabel terus menerus.

Resistor variabel tersebut ditunjukkan pada [Gambar 2.24](#). Ujung tetap AB dihubungkan dengan baterai sehingga terdapat tegangan baterai penuh di seluruh resistor. Seperti halnya pembagi potensial, perbandingan tegangan AC dan CB akan sama dengan perbandingan hambatan



▲ Gambar 2.25

AC dan CB. Ketika kontak geser C berada di ujung B, tegangan keluaran V_{out} akan menjadi 12 V. Ketika kontak geser berada di ujung A, maka tegangan keluaran akan menjadi nol. Jadi, saat kontak geser dipindahkan dari A ke B, tegangan keluaran bervariasi terus menerus dari nol sampai tegangan baterai. Berkaitan dengan tegangan terminal V dari elemen sel, tegangan keluaran V_{out} dari pembagi potensial diberikan oleh:

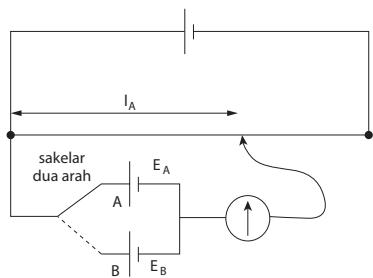
$$V_{out} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E$$

dimana R_1 adalah hambatan AC dan R_2 adalah hambatan CB. Sebuah resistor variabel yang terhubung dengan cara ini disebut potensiometer. Jenis potensiometer ditunjukkan pada **Gambar 2.25**. Perhatikan tiga sambungannya.

Menggunakan Potensiometer untuk Membandingkan Beda Potensial atau GGL Elemen

Potensiometer juga dapat digunakan sebagai alat untuk membandingkan beda potensial. Rangkaian **Gambar 2.26** mengilustrasikan prinsip tersebut. Pada rangkaian ini potensiometer resistor variabel terdiri dari satu panjang kawat dengan hambatan seragam, membentang sepanjang satu meter. Kontak dapat dibuat ke titik mana pun pada kawat ini menggunakan kontak geser. Sebuah galvanometer digunakan untuk mendekksi arus melalui elemen A. **Galvanometer** merupakan pengukur arus analog meter yang sensitif. Sebuah galvanometer dengan skala pusat-nol menunjukkan arus negatif ketika jarum berada di sebelah kiri tanda nol dan arus positif ketika jarum berada di sebelah kanan. Pada rangkaian ini digunakan sebagai indikator nol; yaitu, untuk mendekksi ketika arus yang melalui elemen A adalah nol.

Misalkan elemen A memiliki GGL yang diketahui, E_A . Elemen ini dihubungkan ke rangkaian menggunakan saklar dua arah. Kontak geser kemudian dipindahkan sepanjang kawat sampai galvanometer pusat-nol membaca nol. Posisi kontak geser pada kawat ini disebut titik keseimbangan. Arus yang melalui elemen A adalah nol dan beda potensial sepanjang kawat l_A ‘seimbang’ dengan beda potensial elemen A. Karena arus yang melalui elemen adalah nol maka beda potensial elemen sama dengan GGL.



▲ Gambar 2.26 Potensiometer digunakan untuk membandingkan GGL sel

Panjang kawat l_A dari ujung nol bersama ke kontak geser dicatat. Elemen B memiliki GGL yang tidak diketahui. E_B . Elemen ini kemudian dihubungkan ke rangkaian dan proses penyeimbangan diulang. Misalkan posisi galvanometer membaca nol maka jarak l_B dari nol bersama ke kontak geser dicatat. Perbandingan GGL adalah perbandingan keseimbangan panjang;

$$\frac{E_A}{E_B} = \frac{l_A}{l_B}$$

dan E_B dapat ditentukan dari GGL yang diketahui. E_A .

CONTOH SOAL 2B

- 1** Sebuah LED dihubungkan secara seri dengan sebuah resistor ke sumber energi 5,0 V.
- c** Hitung hambatan resistor seri yang diperlukan untuk memberikan arus pada LED 12 mA, dengan tegangan 2,0 V.
 - d** Hitung beda potensial pada LED ketika resistor seri memiliki hambatan 500Ω . Asumsikan hambatan LED tetap konstan.
- 2** GGL dari dua sel dibandingkan dengan menggunakan rangkaian kawat geser pada Gambar 2.26. Sel A memiliki GGL 1,02 V; menggunakan sel ini, titik keseimbangan diperoleh ketika bilah geser berada 37,6 cm dari skala nol. Menggunakan sel B, titik keseimbangan berada di 55,3 cm.
- a** Hitunglah GGL dari sel B
 - b** Nyatakan keuntungan menggunakan metode nol ini untuk membandingkan GGL.
- adalah 2,0 V, beda potensial V pada resistor harus $5,0 - 2,0 = 3,0$ V. Arus yang melalui resistor adalah 12 mA karena dirangkai seri dengan LED. Menggunakan $R = V/I$, hambatan resistor adalah $3,0/12 \times 10^{-3} = 250\Omega$.**
- b** Hambatan LED diberikan oleh $R = V/I = 2,0/12 \times 10^{-3} = 167\Omega$. Jika hambatan ini dirangkai seri dengan resistor 500Ω dan tegangan sumber 5,0 V, beda potensial melintasi LED adalah $5,0 \times 167/(167 + 500) = 1,25$ V.
- 2 a** Aplikasi rumus potensiometer, $E_B/E_A = lB/lA$. Subtitusikan angkanya diperoleh $E_B = 1,50$ V.
- b** Ketika membandingkan GGL sel, perlu diatur agar sel berada pada rangkaian terbuka sehingga tidak ada penurunan beda potensial terminal karena arus yang melewati hambatan dalam. Ketika potensiometer seimbang, tidak ada arus dari sel yang diuji.

Jawaban

- 1 a** Jika tegangan sumber 5,0 V dan beda potensial (V) melintasi LED

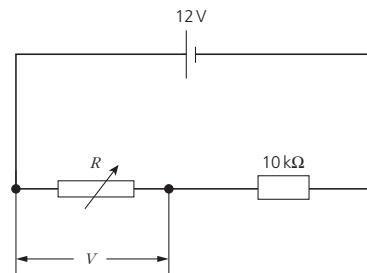
Soal Latihan

10 Gambar 2.27 menunjukkan sebuah resistor variabel R yang dihubungkan seri dengan sebuah resistor $10\text{ k}\Omega$ dan sumber tegangan 12 V . Hitung:

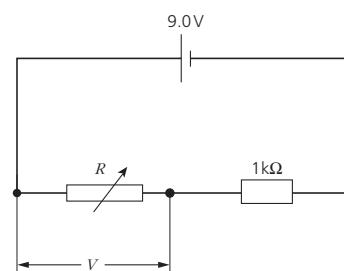
- a** beda potensial V pada R saat hambatannya $8,0\text{ M}\Omega$
- b** beda potensial pada R saat hambatannya $500\text{ }\Omega$
- c** hambatan R yang membuat beda potensial V pada R sama dengan $4,0\text{ V}$.

11 Resistor R pada rangkaian pembagi potensial Gambar 2.28 memiliki hambatan yang bervariasi antara $100\text{ }\Omega$ dan $6,0\text{ k}\Omega$. Hitung beda potensial V pada R jika hambatannya adalah:

- a** $100\text{ }\Omega$
- b** $6,0\text{ k}\Omega$.



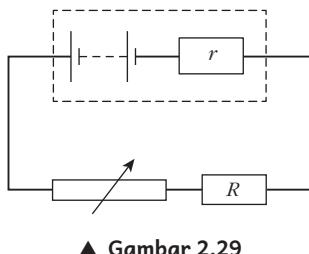
▲ Gambar 2.27



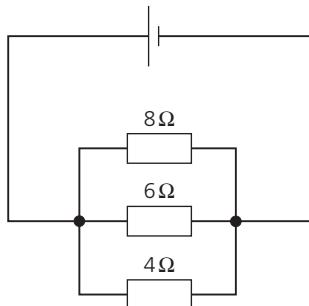
▲ Gambar 2.28

RANGKUMAN

- Gaya gerak listrik (GGL) dari sumber tegangan sama dengan energi yang berubah dari bentuk lain ke energi listrik per satuan muatan pada muatan bergerak di sekitar rangkaian tertutup.
- Beda potensial (V) pada sebuah komponen sama dengan energi per satuan muatan yang melewati komponen. Untuk resistor, energi diubah ke energi panas dan cahaya.
- Tegangan terminal pada rangkaian selalu lebih kecil dari GGL sumber saat sumber mengalirkan arus, karena beda potensial pada hambatan dalam.
- Untuk GGL E yang memiliki hambatan dalam r , $E = I(R + r)$ dimana R adalah hambatan rangkaian eksternal dan I adalah arus pada rangkaian
- Sebuah sumber tegangan memberikan daya maksimum ke beban ketika hambatan beban sama dengan hambatan dalam sumber.
- Pada setiap percabangan suatu rangkaian, arus total yang memasuki titik percabangan sama dengan arus total yang meninggalkannya. Hal ini merupakan hukum pertama Kirchhoff, dan merupakan konsekuensi dari hukum kekekalan muatan.
- Dalam setiap loop rangkaian tertutup, jumlah gaya gerak listrik sama dengan jumlah beda potensial. Ini merupakan hukum kedua Kirchhoff, dan merupakan konsekuensi dari hukum kekekalan energi.
- Hambatan ekivalen (hambatan gabungan) R dari resistor yang dihubungkan seri adalah: $R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$
- Hambatan ekivalen (hambatan gabungan) R dari resistor yang dihubungkan secara paralel adalah:
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$
- Dua resistor pada rangkaian seri bertindak sebagai pembagi potensial, di mana $\frac{V_1}{V_2} = \frac{R_1}{R_2}$. Jika V adalah tegangan sumber dan V_{out} adalah tegangan pada R_1 maka $V_{out} = \frac{V \cdot R_1}{(R_1 + R_2)}$
- Potensiometer adalah resistor variabel yang dihubungkan sebagai pembagi potensial untuk memberikan tegangan keluaran variabel yang kontinu.
- Termistor dan fotoresistor dapat digunakan dalam rangkaian pembagi potensial untuk memberikan beda potensial yang tergantung pada suhu dan intensitas cahaya masing-masing.
- Sebuah potensiometer dapat digunakan untuk membandingkan GGL elemen sel atau beda potensial.
- Saat menggunakan potensiometer untuk membandingkan GGL elemen sel atau beda potensial, galvanometer dengan skala pusat-nol digunakan untuk mendeteksi ketika arus yang melalui sel adalah nol.



▲ Gambar 2.29

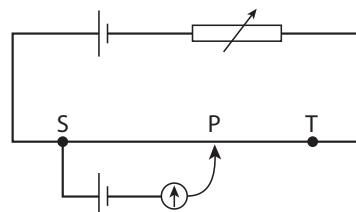


▲ Gambar 2.30

ASESMEN FORMATIF

- 1** Gambar 2.29 menunjukkan baterai dengan hambatan dalam r terhubung ke resistor tetap R dan resistor variabel. Hambatan resistor variabel meningkat. Manakah dari pernyataan berikut yang benar?
 - a** Beda potensial pada baterai berkurang
 - b** Arus melalui baterai meningkat.
 - c** Beda potensial pada baterai meningkat.
 - d** Beda potensial di r meningkat.

- 2** Gambar 2.30 menunjukkan sebuah elemen sel yang dihubungkan ke tiga resistor dengan hambatan, 4Ω , 6Ω dan 8Ω , secara paralel. Pernyataan mana yang benar?
 - a** Arus yang melalui resistor 8Ω lebih besar dari arus yang melalui resistor 4Ω .
 - b** Beda potensial (V) pada resistor 8Ω lebih besar dari V melintasi resistor 4Ω .
 - c** Daya setiap resistor paling besar pada resistor 4Ω .
 - d** Hambatan total dalam rangkaian lebih besar dari 8Ω .



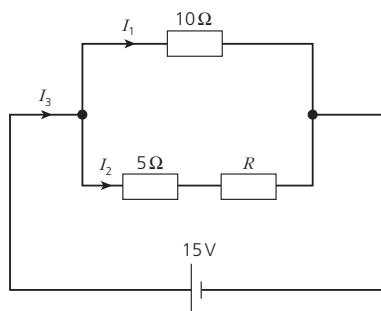
▲ Gambar 2.31

- 3** Gambar 2.31 menunjukkan rangkaian potensiometer yang digunakan untuk membandingkan gaya gerak listrik (GGL). Galvanometer membaca nol ketika sambungan berada di titik P pada kabel ST. Hambatan rheostat meningkat. Pernyataan mana yang benar?
 - a** Beda potensial (V) di ST meningkat.
 - b** Arus di ST meningkat.
 - c** Titik keseimbangan sekarang lebih dekat ke S.
 - d** Titik keseimbangan lebih dekat ke T.

- 4** Hambatan dalam sel kering meningkat secara bertahap seiring bertambahnya usia, bahkan saat sel tidak digunakan. Namun, GGL hampir tetap konstan.

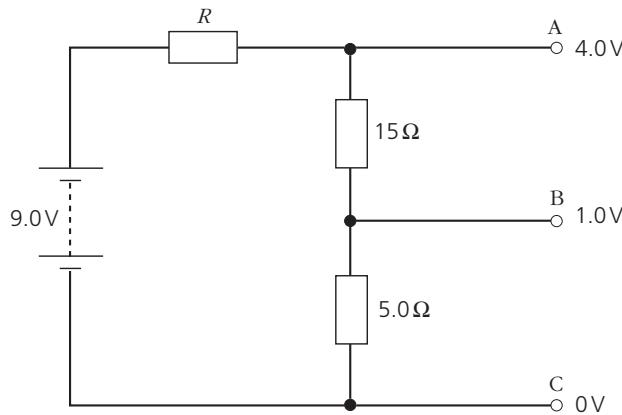
Anda dapat memeriksa usia elemen sel dengan menghubungkan amper meter hambatan rendah ke sel dan mengukur arus. Untuk sebuah sel baru 1,5 V dari jenis tertentu, hubungan arus singkat harus sekitar 30 A.

- a** Hitung resistansi internal (hambatan dalam) elemen sel baru.
 - b** Seorang siswa melakukan tes ini pada sel yang lebih tua, dan menemukan hubungan arus singkat hanya 5 A. Hitung hambatan dalam sel ini.
- 5** Sebuah bohlam obor memiliki sumber tegangan dari dua elemen sel 1,5 V yang dihubungkan secara seri. Beda potensial pada bola lampu adalah 2,2 V, dan daya disipasinya 550 mW. Hitung:
- a** arus yang melalui bola lampu,
 - b** hambatan dalam setiap sel,
 - c** energi panas yang didisipasikan di setiap sel dalam 2 menit.
- 6** Dua bola lampu identik dihubungkan pertama secara seri, dan kemudian secara paralel, menggunakan baterai yang sama (diasumsikan memiliki hambatan dalam yang dapat diabaikan). Gunakan hukum Kirchhoff untuk memutuskan rangkaian mana yang akan memberikan output cahaya total yang lebih terang.
- 7** Anda diberi tiga resistor dengan hambatan 22Ω , 47Ω dan 100Ω . Hitung:
- a** hambatan maksimum yang mungkin
 - b** hambatan minimal yang mungkin, yang dapat diperoleh dengan menggabungkan salah satu atau semua resistor ini.
- 8** Dalam rangkaian [Gambar 2.32](#), arus I_1 dan I_2 adalah sama. Hitung:
- a** hambatan R dari resistor yang tidak diketahui,
 - b** arus total I_3 .
- 9** [Gambar 2.33](#) menunjukkan rangkaian pembagi potensial, dirancang untuk menghasilkan beda potensial 1,0 V dan 4,0 V dari GGL baterai 9,0 V dan hambatan dalam yang dapat diabaikan.



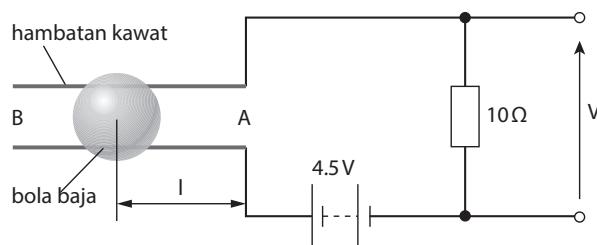
▲ **Gambar 2.32**

- a Hitung nilai hambatan R .
- b Nyatakan dan jelaskan apa yang terjadi pada tegangan di titik A ketika resistor tambahan $1,0\Omega$ dihubungkan antara titik B dan C secara paralel dengan resistor $5,0\Omega$. Tidak diperlukan perhitungan.



▲ Gambar 2.33

- 10** Seorang siswa merancang metode kelistrikan untuk memantau posisi bola baja yang menggelinding pada dua rel sejajar. Setiap rel terbuat dari kawat dengan panjang 30 cm dan hambatan 20Ω . Rangkaian penginderaan posisi ditunjukkan pada [Gambar 2.34](#). Hambatan bola baja dan hambatan dalam baterai dapat diabaikan.



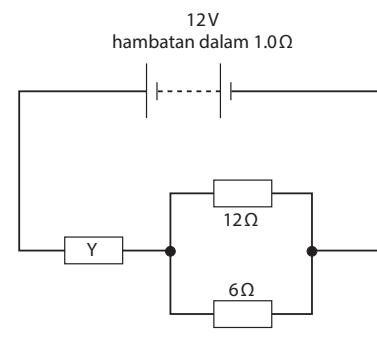
▲ Gambar 2.34

- a Nyatakan tegangan pada resistor 10Ω ketika bola berada di A, di mana $I = 0$.
- b Dengan bola di ujung B rel, hitung:
- hambatan total rangkaian,
 - arus pada resistor 10Ω ,
 - tegangan keluaran V.

- 11** Dua persamaan untuk daya P yang didisipasikan dalam sebuah resistor adalah $P = I^2 R$ dan $P = \frac{V^2}{R}$. Yang pertama

menunjukkan bahwa semakin besar hambatan resistor R , semakin besar daya yang didisipasikan. Yang kedua menunjukkan sebaliknya: semakin besar hambatan, semakin kecil dayanya. Jelaskan ketidakkonsistennya ini.

- 12** Nyatakan jumlah minimum resistor, masing-masing dengan hambatan yang sama dan peringkat daya $0,5\text{ W}$, yang harus digunakan untuk menghasilkan sebuah resistor setara $1,2\text{ k}\Omega$, 5 W . Hitung hambatan masing-masing, dan nyatakan bagaimana resistor tersebut harus dihubungkan.
- 13** Pada rangkaian yang ditunjukkan pada [Gambar 2.35](#), arus dalam baterai adalah $1,5\text{ A}$. Baterai memiliki hambatan dalam $1,0\Omega$. Hitung:
- hambatan gabungan dari resistor yang dihubungkan secara paralel pada rangkaian [Gambar 2.35](#),
 - hambatan total rangkaian,
 - hambatan resistor Y,
 - arus yang melalui resistor 6Ω .



▲ **Gambar 2.35**

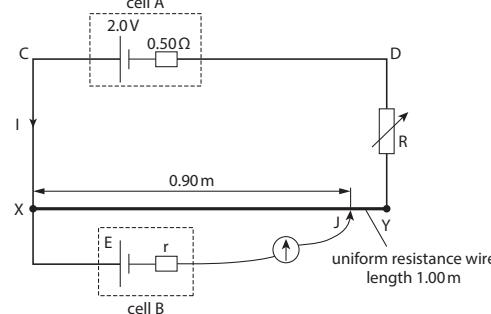
- 14** Arus pada motor starter mobil adalah 160 A saat menghidupkan mesin. Kabel penghubung memiliki panjang total $1,3\text{ m}$, dan terdiri dari 15 helai kawat, masing-masing berdiameter $1,2\text{ mm}$. Hambatan jenis logam kawat adalah $1,4 \times 10^{-8}\Omega\text{ m}$.

- Hitung:
 - hambatan setiap helai kawat,
 - hambatan total kabel,
 - daya disipasi pada kabel.
- Ketika motor starter digunakan untuk menghidupkan mobil, muatan 700 C melewati

penampang kabel tertentu. Dengan asumsi bahwa arus konstan pada 160 A, hitung berapa lama muatan mengalir. Hitung jumlah elektron yang melewati penampang kabel tertentu saat ini. Muatan elektron e adalah $-1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

- c GGL baterai adalah 13,6 V dan hambatan dalamnya adalah $0,012 \Omega$. Hitung:
- i beda potensial ujung-ujung baterai ketika arus dalam baterai 160 A,
 - ii laju produksi energi panas dalam baterai.
- 15 Sebuah kawat tembaga dengan panjang 16 m memiliki hambatan $0,85 \Omega$. Kawat dihubungkan dengan baterai dengan GGL 1,5 V dan hambatan dalam $0,40 \Omega$.
- a Hitung beda potensial pada kawat dan daya disipasinya.
 - b Dalam sebuah percobaan, panjang kabel yang dihubungkan ke kutub baterai secara bertahap dikurangi.
 - i Buat sketsa grafik untuk menunjukkan bagaimana daya disipasi dalam kabel bervariasi terhadap panjang yang terhubung.
 - ii Hitung panjang kawat ketika daya disipasi dalam kawat maksimum.
 - iii Hitung daya disipasi maksimum dalam kawat.

16



▲ Gambar 2.36

- a Nyatakan hukum kedua Kirchhoff. [1]
Hukum kedua Kirchhoff berkaitan dengan kekekalan kuantitas tertentu. Nyatakan besaran ini. [1]
- b Rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 2.36 digunakan untuk membandingkan beda potensial.

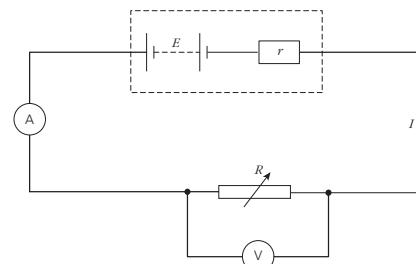
Kawat XY dengan hambatan seragam memiliki panjang 1,00 m dan hambatan $4,0 \Omega$. Sel A memiliki GGL 2,0 V dan hambatan dalam $0,50 \Omega$. Arus yang melalui sel A adalah I . Sel B memiliki GGL E dan hambatan dalam r .

Arus yang melalui sel B dibuat nol ketika sambungan bergerak J disetel sehingga panjang XJ adalah 0,90 m. Resistor variabel R memiliki hambatan $2,5 \Omega$.

- i** Terapkan hukum kedua Kirchhoff pada rangkaian CXYDC untuk menentukan arus I . [2]
- ii** Hitung beda potensial sepanjang kawat XJ. [2]
- iii** Gunakan jawaban Anda di poin ii untuk menyatakan nilai E . [1]
- iv** Nyatakan mengapa nilai hambatan dalam sel B tidak diperlukan untuk penentuan E . [1]

*Cambridge International AS and A Level Physics (9702)
Makalah 21 Q5 Mei/Juni 2012*

- 17** Sebuah Rangkaian yang digunakan untuk mengukur transfer daya dari baterai ditunjukkan pada Gambar 2.37. Daya ditransfer ke resistor variabel dengan hambatan R .

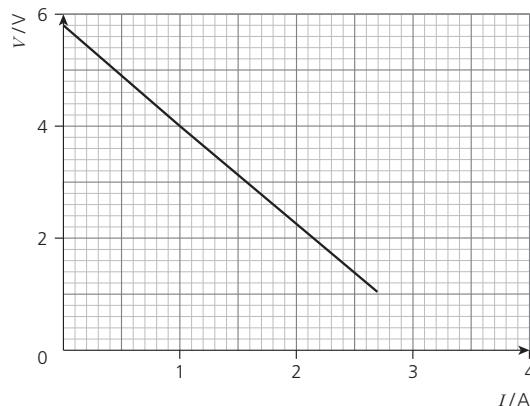


▲ Gambar 2.37

Baterai memiliki gaya gerak listrik (GGL) E dan hambatan dalam r . Beda potensial pada R adalah V . Arus dalam rangkaian adalah I .

- a** Dengan mengacu pada rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 2.37, bedakan antara definisi GGL dan beda potensial [3]

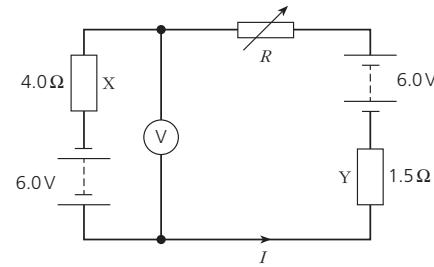
- b** Gunakan hukum kedua Kirchoff, tentukan persamaan untuk arus I dalam rangkaian. [1]
- c** Variasi arus I dari beda potensial V pada R ditunjukkan oleh Gambar. 2.38.



▲ Gambar 2.38

Gunakan [Gambar 2.38](#) untuk menentukan:

- i** GGL E , [1]
ii hambatan dalam r . [2]
- d i** Gunakan data dari [Gambar 2.38](#), hitung daya yang ditransfer ke R untuk arus 1,6A [2]
- ii** Gunakan jawaban Anda dari **c i** dan **d i** untuk menghitung efisiensi baterai untuk arus 1,6A [2]
- 18 a** Nyatakan Hukum kedua Kirchoff. [2]
- b** Dua baterai, masing-masing dengan gaya gerak listrik (GGL.) 6,0 V dan hambatan dalamnya dapat diabaikan, dihubungkan secara seri dengan tiga resistor, seperti ditunjukkan pada [Gambar 2.39](#). Resistor X memiliki hambatan $4,0\Omega$ dan resistor Y memiliki hambatan $1,5\Omega$.



▲ Gambar 2.39

- i** Hambatan R dari resistor variabel diubah sampai voltmeter pada rangkaian membaca nol. Hitung:

1 arus I pada rangkaian, [1]

2 hambatan R . [2]

- ii** Resistor X dan Y adalah kabel yang terbuat dari bahan yang sama. Diameter kawat X dua kali diameter kawat Y.

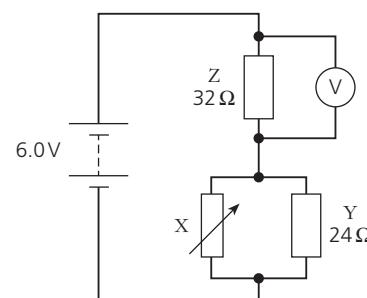
Tentukan perbandingan:

$$\frac{\text{kelajuan hanyut (drift speed)}}{\text{kelajuan hanyut (drift speed)}} \frac{\text{rata rata elektron bebas di } X}{\text{rata rata elektron bebas di } Y} [2]$$

- iii** Hambatan R dari resistor variabel mulai meningkat. Nyatakan dan jelaskan pengaruh kenaikan R pada daya yang ditransformasikan oleh masing-masing baterai. [3]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 22 Q5, bagian a, bi, bii, biii March 2018

- 19 a** Dengan menggunakan transformasi energi, jelaskan gaya gerak listrik (GGL) baterai dan beda potensial (V) pada resistor. [2]
- b** Sebuah baterai GGL. nya 6,0 V dan hambatan dalamnya dapat diabaikan terhubung ke rangkaian resistor dan voltmeter, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.40. Resistor Y memiliki hambatan 24Ω dan resistor Z memiliki hambatan 32Ω



▲ Gambar 2.40

- i** Hambatan R_X dari resistor variabel X diatur sampai voltmeter membaca 4,8 V. Hitunglah:

1 arus pada resistor Z, [1]

2 total daya yang dihasilkan oleh baterai, [2]

3 jumlah elektron konduksi yang bergerak melalui baterai dalam selang waktu 25s, [2]

4 hambatan total X dan Y yang dirangkai paralel, [2]

5 hambatan R_x . [2]

ii Hambatan RX sekarang berkurang. Sebutkan dan jelaskan perubahannya, jika ada, untuk pembacaan pada voltmeter. [2]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Makalah 22 Q5 Maret 2019

3 Medan Listrik

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

3.1. Medan listrik dan garis medan

1. mendeskripsikan medan listrik sebagai contoh medan gaya
2. mendefinisikan medan listrik sebagai gaya per satuan muatan positif
3. memformulasikan $F = qE$ untuk gaya pada muatan dalam medan listrik
4. menyajikan medan listrik melalui garis-garis medan

3.2. Medan listrik seragam

1. memformulasikan $E = \Delta V / \Delta d$ untuk menentukan kuat medan seragam antara pelat paralel bermuatan
2. menjelaskan pengaruh medan listrik seragam pada gerak partikel bermuatan

3.3. Gaya listrik antar muatan titik

1. mengidentifikasi suatu titik di luar konduktor bola, muatan pada bola dapat dianggap sebagai muatan titik di pusatnya
2. memformulasikan persamaan hukum Coulomb $F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$ untuk

menentukan gaya antara dua muatan titik dalam ruang hampa

3.4. Medan listrik muatan titik

1. memformulasikan $E = Q / (4\pi\epsilon_0 r^2)$ untuk kuat medan listrik pada muatan titik di ruang hampa

3.5. Potensial listrik

1. mendefinisikan potensial listrik pada suatu titik sebagai usaha yang dilakukan per satuan muatan positif dalam membawa muatan uji kecil dari tak terhingga ke titik tersebut
2. mengidentifikasi fakta kuat medan listrik di suatu titik sama dengan negatif dari gradien potensial di titik itu
3. menerapkan $V = Q / (4\pi\epsilon_0 r)$ untuk potensial listrik pada muatan titik
4. mengidentifikasi konsep potensial listrik mengarah ke energi potensial listrik dari dua muatan titik dan menggunakan $Ep = Qq / (4\pi\epsilon_0 r)$

Pemahaman Pendahuluan

- Ada dua jenis muatan, positif dan negatif, dan satuan dari muatan adalah coulomb.
- Sebuah benda dapat diberi muatan melalui gesekan atau induksi.
- Gaya listrik mempertahankan posisi elektron dalam atom, dan atom mengikat bersama-sama dalam molekul dan benda padat.
- Usaha dilakukan ketika gaya menggerakkan titik ke arah gaya tersebut.
- Beda potensial listrik adalah usaha yang dilakukan (energi yang dipindahkan) per satuan muatan saat bergerak dari satu titik ke titik yang lain.



3.1 Medan Listrik dan Garis Medan Listrik

Beberapa efek listrik statis sudah tidak asing lagi dalam kehidupan sehari-hari. Sebagai contoh, balon yang digosok dengan bahan wol akan menempel ke dinding, rambut kering (bahkan mungkin akan menghasilkan percikan listrik) ketika disisir, dan Anda mungkin merasa kejutan seperti tersengat listrik ketika Anda menyentuh pegangan pintu besi mobil ketika keluar setelah perjalanan dalam cuaca kering. Semua ini adalah contoh benda terisolasi yang memperoleh muatan listrik melalui gesekan – yaitu dengan digosokkan dengan benda lain.

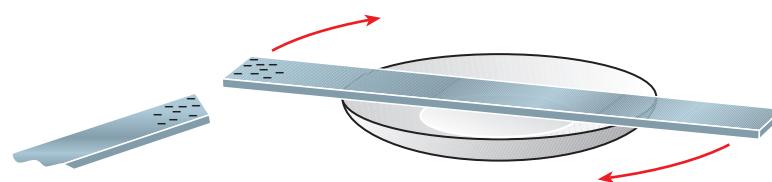
Isolator yang diberi muatan karena mengalami peristiwa gesekan akan menarik benda lain. Beberapa efeknya telah dikenal selama berabad-abad. Ilmuwan Yunani berekspimen dengan batu amber yang diberi muatan dengan menggosoknya menggunakan bulu. Sekarang percobaan elektrostatika sering dilakukan menggunakan bahan plastik anti lembab dan dapat mempertahankan muatan di dalamnya lebih lama.

Proses pemuatan dengan gesekan bisa berbahaya. Misalnya, kapal tanker yang membawa bubuk curah harus dibumikan (*earthed/grounded*) sebelum dibongkar, jika tidak, muatan listrik dapat menumpuk di kapal tanker. Hal ini kemudian dapat menyebabkan percikan api antara tanker dan bumi, dan dapat menyebabkan ledakan. Demikian pula, pipa yang digunakan untuk memindahkan cairan yang sangat mudah terbakar (misalnya, bensin)

dilapisi logam. Sebuah pesawat yang bergerak di udara juga akan menjadi bermuatan. Untuk mencegah orang pertama yang menyentuh pesawat setelah mendarat dari resiko menjadi terluka, ban pesawat terbang melakukan proses pelepasan muatan, sehingga saat mendarat pesawat telah kehilangan muatannya.

Muatan listrik ada dua macam. Bahan polietilena menjadi bermuatan negatif ketika digosok dengan wol dan selulosa asetat menjadi bermuatan positif, juga ketika digosok dengan wol. Untuk memahami ini, kita perlu mempertimbangkan model atom. Sebuah atom terdiri dari inti bermuatan positif dengan elektron bermuatan negatif yang mengorbitnya. Ketika bahan polietilena digosok dengan wol, gesekan menyebabkan beberapa elektron ditransfer dari wol ke polietilena. Polietilena menjadi bermuatan negatif dan wol bermuatan positif. Selulosa asetat menjadi positif karena kehilangan beberapa elektron ke wol ketika digosok. Polietilena dan Selulosa asetat adalah bahan dengan konduktivitas buruk sehingga muatannya tetap statis di permukaan bahannya.

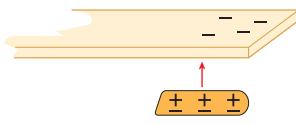
Menempatkan dua batang polietilen bermuatan berdekatan satu sama lain, atau dua batang asetat bermuatan berdekatan satu sama lain, menunjukkan bahwa muatan sejenis saling tolak menolak ([Gambar 3.1](#)). sebaliknya, muatan yang berbeda saling tarik-menarik. Sebuah batang polietilena bermuatan menarik batang asetat bermuatan.



▲ **Gambar 3.1** muatan sejenis saling tolak menolak.

Hal ini merupakan hukum dasar gaya antar muatan:

Muatan sejenis tolak menolak, muatan tak sejenis tarik menarik.



▲ **Gambar 3.2** Batang bermuatan dapat menginduksi muatan pada benda yang tidak bermuatan.

Batang bermuatan juga akan menarik benda yang tidak bermuatan. Misalnya, batang plastik bermuatan akan menarik potongan kertas kecil. Adanya muatan pada batang menyebabkan redistribusi muatan pada kertas. Elektron yang ditolak ke sisi jauh dari batang sehingga sisi terdekat batang positif dan, oleh karena itu, tertarik ke

batang ([Gambar 3.2](#)). Kertas dikatakan bermuatan secara induksi. Ketika batang dilepas, elektron akan bergerak kembali dan membatalkan muatan positif.

Medan listrik

Muatan listrik memberikan gaya pada satu sama lain bahkan terpisah oleh jarak. Konsep medan listrik digunakan untuk menjelaskan gaya ini pada jarak tertentu.

Medan listrik adalah wilayah ruang ketika muatan listrik stasioner mengalami gaya.

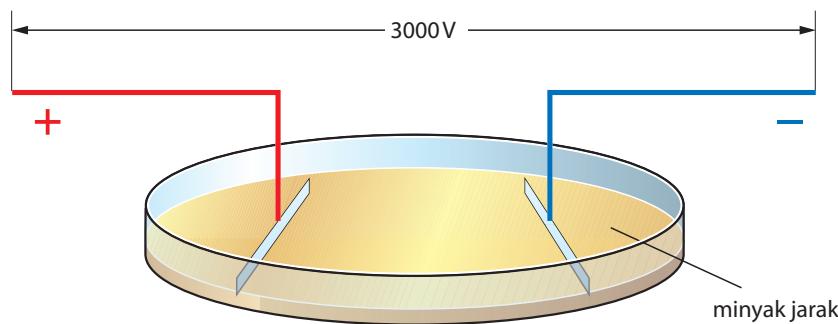
Medan listrik tidak terlihat tetapi dapat diwakili oleh garis gaya listrik seperti halnya medan gravitasi dapat diwakili oleh garis gaya gravitasi dan medan magnet dapat diwakili oleh garis gaya magnet. Arah medan listrik didefinisikan sebagai arah muatan positif akan bergerak jika dalam keadaan bebas. Oleh karena itu, garis-garis gaya digambar dengan panah yang menunjuk dari muatan positif ke muatan negatif.

Untuk medan listrik:

- » garis gaya dimulai dari muatan positif dan berakhir pada muatan negatif
- » garis gaya merupakan garis lengkung halus yang tidak pernah berpotongan atau bersilangan
- » kuat medan listrik ditunjukkan dengan kerapatan garis: semakin rapat garis, semakin kuat medannya.

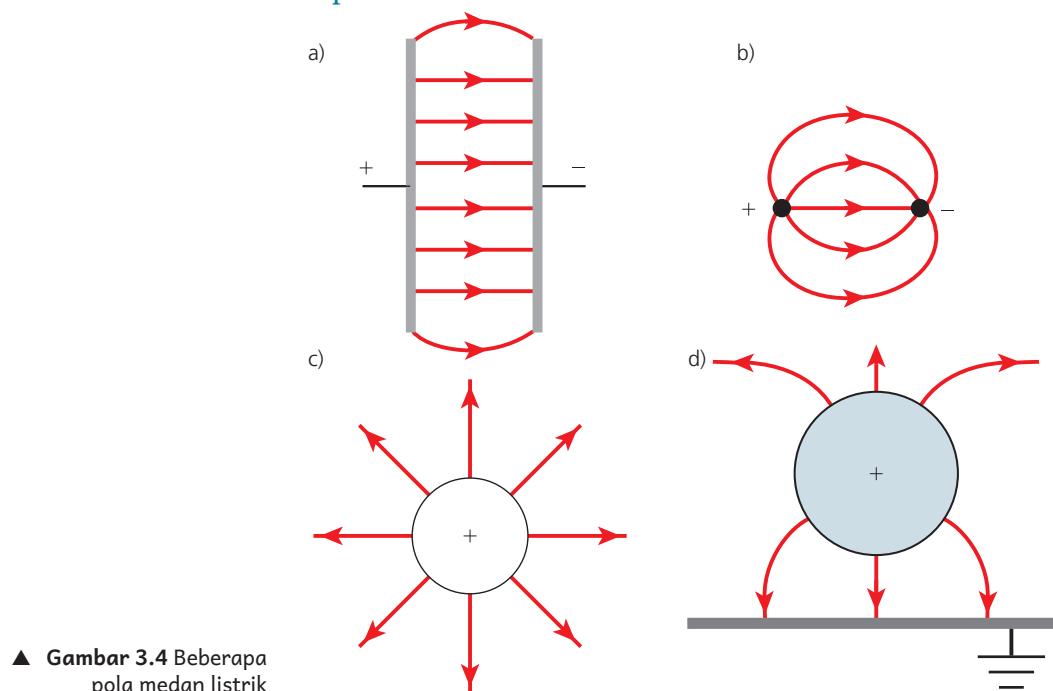
Perhatikan bahwa medan listrik dan kuat medan listrik adalah besaran vektor.

▲ **Gambar 3.3**
Peralatan untuk
menyelidiki pola
medan listrik



Peralatan [Gambar 3.3](#) dapat digunakan untuk menunjukkan pola medan listrik. Semolina (sejenis tepung gandum) ditaburkan ke permukaan minyak non-

konduktor dan tegangan tinggi diterapkan di antara pelat. Semolina menjadi bermuatan dengan induksi dan berbaris di sepanjang garis gaya. Beberapa pola medan listrik diilustrasikan pada [Gambar 3.4](#). Perhatikan bahwa garis gaya medan listrik selalu tegak lurus terhadap permukaan konduksi. Pola untuk bola konduktor bermuatan ([Gambar 3.4c](#)) sangat penting dan akan dibahas lebih rinci pada [Topik 3.3](#).

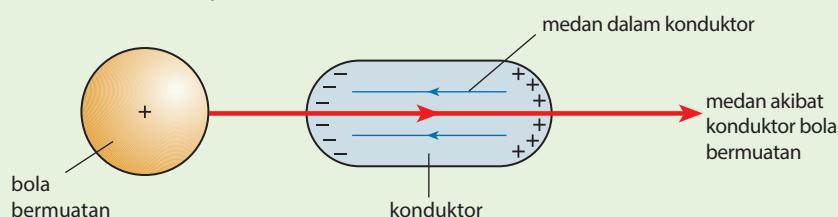


▲ **Gambar 3.4** Beberapa pola medan listrik

EKSTENSI

Medan dan muatan induksi

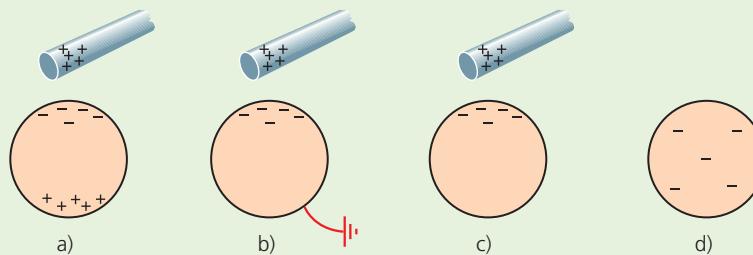
Tidak ada medan listrik yang dihasilkan di dalam konduktor kecuali jika ini dipertahankan oleh sumber gaya gerak listrik (GGL). Alasannya karena elektron bergerak bebas dalam konduktor. Begitu benda bermuatan didekatkan dengan konduktor, medan listrik dari benda menyebabkan elektron dalam konduktor bergerak dalam arah yang berlawanan dengan medan listrik (elektron bermuatan negatif). Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 3.5](#). Elektron menciptakan medan listrik dengan arah yang berlawanan dengan medan dikarenakan benda bermuatan. Muatan induksi (elektron) akan berhenti bergerak jika kedua medan tersebut sama besar dan berlawanan arah. Akibatnya tidak ada medan listrik di dalam konduktor.



▲ [Gambar 3.5](#) Muatan Terinduksi

Proses Pemberian Muatan dengan Induksi

Efek yang diilustrasikan pada [Gambar 3.5](#) dapat digunakan untuk melakukan pemuatan konduktor. Prosesnya ditunjukkan pada [Gambar 3.6](#). Sebuah batang bermuatan positif didekatkan ke konduktor tak bermuatan. Muatan induksi muncul pada konduktor terisolasi, seperti ditunjukkan pada [Gambar 3.6a](#). Konduktor sekarang dibumikan, seperti pada [Gambar 3.6b](#). Elektron bergerak dari bumi untuk menetralkan muatan positif pada konduktor. Sambungan ke bumi dicabut. Muatan negatif masih berada pada konduktor, dan batang bermuatan positif, seperti pada [Gambar 3.6c](#). Akhirnya, batang bermuatan dijauhkan. Selanjutnya elektron pada konduktor terdistribusi merata di atas permukaannya, seperti pada [Gambar 3.6d](#). Perhatikan bahwa jika batang bermuatan negatif digunakan, muatan akhir pada konduktor adalah positif.



▲ [Gambar 3.6](#) Pengisian muatan dengan induksi

Kuat medan listrik

Kuat medan listrik pada suatu titik didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan yang bekerja pada muatan positif yang ditempatkan pada titik tersebut.

Jika gaya yang dialami oleh muatan uji positif $+q$ yang ditempatkan dalam medan listrik adalah F , maka kuat medan listrik E sebesar:

$$E = F/q$$

Catatan: Jangan bingung dengan penggunaan simbol E untuk kuat medan listrik. Simbol ini juga digunakan untuk energi!

Satuan kuat medan listrik dapat disimpulkan dari persamaan ini. Karena gaya diukur dalam newton (N) dan muatan dalam coulomb (C), maka unit SI dari kuat medan listrik yaitu newton per coulomb (N/C). Kita akan lihat nanti bahwa volt per meter (V/m) adalah satuan SI lain yang umum untuk kuat medan listrik. Kedua unit ini setara.

Dari definisi kuat medan listrik, gaya F pada muatan q dalam medan listrik adalah:

$$F = qE$$

► CONTOH SOAL 3A

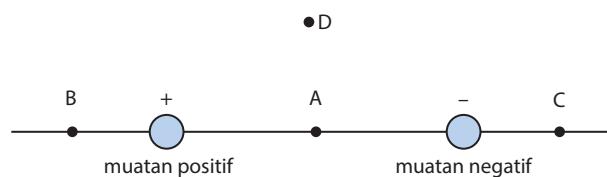
Dua pelat logam datar sejajar dipisahkan oleh jarak 5,0cm. Medan listrik seragam di antara pelat adalah $2,0 \times 10^4$ V/m. Hitung gaya dari benda bermuatan $5,0nC$ yang terletak di tengah posisi antara pelat.

Jawaban

$$\begin{aligned} \text{gaya pada elektron } F &= qE = 5,0 \times 10^{-9} \times 2,0 \times 10^4 \\ &= 1,0 \times 10^{-4} \text{ N} \end{aligned}$$

Soal Latihan

- 1** **a** Jelaskan apa yang dimaksud dengan medan listrik.
b Buat sketsa pola medan listrik:
i antara dua partikel bermuatan negatif
ii antara muatan positif titik dan pelat logam datar bermuatan negatif.
- 2** Sebuah muatan positif dan negatif yang besarnya sama berada pada garis lurus seperti pada **Gambar 3.7**. Nyatakan arah kuat medan listrik:
a di titik A
b di titik B
c di titik C
d di titik D

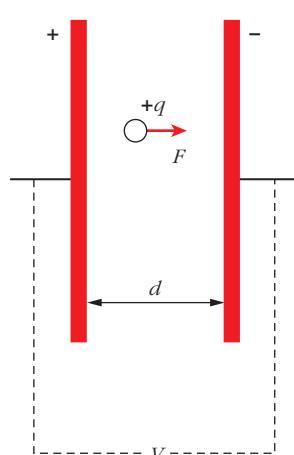
**▲ Gambar 3.7**

- 3** Hitung percepatan elektron yang ada dalam medan listrik seragam dengan kuat medan listrik $5.0 \times 10^2 \text{ V m}^{-1}$.

**3.2 Medan listrik homogen**

Medan listrik homogen yaitu daerah dengan kuat medan listrik sama di semua titik.

Pada **Gambar 3.4a**, pola medan listrik antara pelat sejajar yang bermuatan terdiri dari garis sejajar yang berjarak sama, kecuali di dekat tepi pelat. Hal ini menunjukkan bahwa medan listrik antara pelat sejajar bermuatan (seperti, misalnya, dalam kapasitor pelat sejajar (lihat **Topik 4.1**) adalah seragam. Dengan demikian gaya yang dialami oleh muatan sama besar, tidak dipengaruhi posisi muatan ditempatkan dalam medan listrik tersebut.

**▲ Gambar 3.8**

Gambar 3.8 mengilustrasikan pelat sejajar bermuatan yang berjarak d terpisah dengan beda potensial V di antara keduanya. Sebuah muatan $+q$ dalam medan homogen antara pelat memiliki gaya F yang bekerja padanya. Untuk memindahkan muatan ke arah pelat positif membutuhkan usaha yang harus dilakukan pada muatan. Usaha

didefinisikan sebagai hasil kali gaya dan jarak searah gaya. Untuk memindahkan muatan dari satu pelat ke pelat lainnya membutuhkan usaha (W) sebesar:

$$W = Fd$$

Dari definisi beda potensial sebagai energi yang dipindahkan per satuan muatan ([Topik 1.2](#)),

$$W = Vq$$

Jadi, $W = Fd = Vq$ sehingga,

$$F/q = V/d$$

Tapi, F/q adalah gaya per satuan muatan yang merupakan kuat medan listrik. Jadi, untuk medan homogen, besar kuat medan listrik menjadi:



$$E = V/d$$

Persamaan di atas memberikan alternatif satuan untuk kuat medan listrik, V/m . Kedua Satuan, V/m dan N/C adalah setara.

Diasumsikan bahwa beda potensial V berubah dengan laju konstan sepanjang jarak d .

Dengan perubahan beda potensial bervariasi terhadap jarak, maka perubahan kecil V dari beda potensial pada jarak kecil d harus dipertimbangkan sehingga kuat medan listrik E .

$$E = \Delta V / \Delta d$$

CONTOH SOAL 3B

Dua pelat logam sejajar dipisahkan oleh jarak 5,0 cm. Beda potensial antara pelat adalah 1000 V.

Hitung kuat medan listrik antara pelat.

Jawaban

Dari $E = V/d$, $E = 1000/5,0 \times 10^{-2} = 2,0 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$.

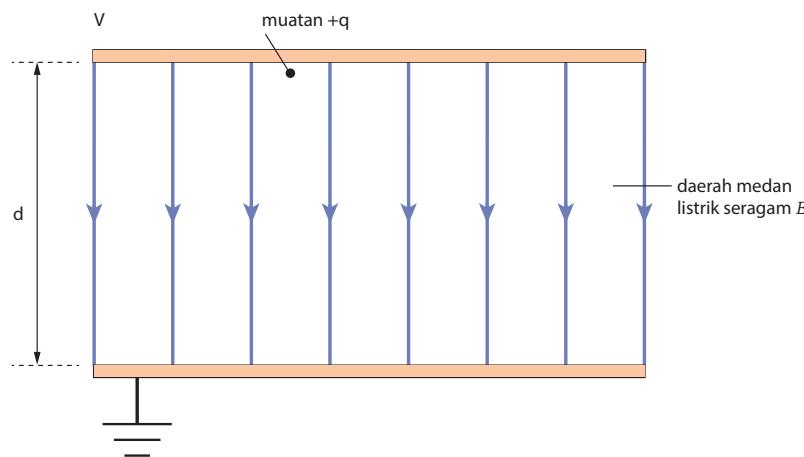
Soal Latihan

- 4 Dua pelat logam terpisah 15 mm memiliki beda potensial 750 V di antara keduanya. Gaya pada bola bermuatan kecil yang ditempatkan antara pelat adalah $1,2 \times 10^{-7}$ N. Hitung:
- kuat medan listrik antara pelat
 - muatan pada bola.

**Gerak Partikel Bermuatan dalam Medan Listrik****Partikel Bermuatan yang Bergerak Sejajar Terhadap Medan**

Sebuah partikel bermuatan baik dalam keadaan diam atau bergerak sejajar dengan medan listrik mengalami gaya listrik. Arah gaya bergantung pada jenis muatan. Sebuah partikel bermuatan $+q$ dipercepat ke arah medan oleh gaya listrik. Untuk medan yang homogen, gaya dan percepatan partikel konstan. Persamaan gerak dipercepat homogen, dipelajari di topik kelas XI, dapat digunakan untuk menentukan gerak partikel.

Medan listrik homogen E dihasilkan oleh beda potensial V melintasi dua pelat logam sejajar horizontal yang dipisahkan oleh jarak d , seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3.9**. Sebuah partikel, muatan $+q$ dan massa m , awalnya diam di pelat atas kemudian bergerak ke pelat bawah. Medan listrik yang bekerja pada partikel dan muatan meningkatkan nilai energi kinetiknya.



▲ Gambar 3.9

Untuk kecepatan akhir v ,

usaha yang dilakukan = perubahan energi kinetik

$$V \cdot q = \frac{1}{2} m v^2$$

dan

$$v = \sqrt{\frac{2Vq}{m}}$$

Sebagai alternatif, gerakan partikel dapat ditentukan dengan mempertimbangkan percepatan a yang dihasilkan oleh gaya F akibat medan listrik. Percepatan a menjadi:

$$a = F/m = qE/m$$

Untuk partikel yang bergerak dari keadaan diam melalui jarak d dari pelat atas ke pelat bawah, menggunakan

$$v^2 = u^2 + 2a_s$$

$$v^2 = 2 \times qE/m \times d = 2 \times qV/dm \times d$$

$$v = \sqrt{\frac{2Vq}{m}}$$

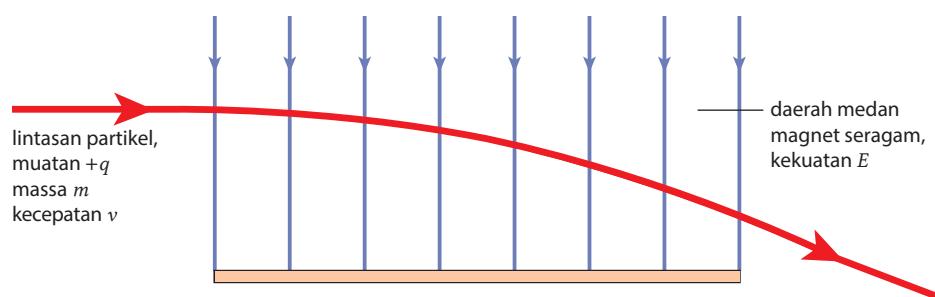
Seperti yang diharapkan, hasilnya sama!

Sebuah partikel bermuatan negatif akan dipercepat dalam arah yang berlawanan dengan partikel bermuatan positif.

Perhatikan bahwa efek gravitasi pada partikel belum dipertimbangkan karena partikel bermuatan, berat partikel dapat diabaikan jika dibandingkan dengan gaya apa pun yang disebabkan oleh medan listrik.

Partikel bermuatan bergerak dengan kecepatan awal tegak lurus terhadap arah medan.

Sebuah partikel bermuatan, memiliki muatan $+q$ dan massa m , memasuki medan listrik homogen dengan kecepatan v tegak lurus ke arah medan listrik, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 3.10](#). Partikel mengalami gaya pada sudut kanan ke arah awal. Partikel akan mengikuti lintasan parabola saat melewati medan.



▲ [Gambar 3.10](#)

Analisis gerak yang digunakan sama dengan yang terjadi pada partikel bermassa m bergerak dalam medan gravitasi homogen dengan kecepatan konstan dalam satu arah dan percepatan konstan dalam arah tegak lurus seperti yang dijelaskan untuk [gerak peluru](#) di Topik kelas XI.

► CONTOH SOAL 2B

Dua pelat logam sejajar dipisahkan oleh jarak 15 mm. Pelat berada dalam ruang hampa dan beda potensial antara pelat adalah 600 V.

Sebuah partikel- α bermassa $6,7 \times 10^{-27}$ kg dan muatan $3,2 \times 10^{-19}$ C, awalnya berada pada pelat bermuatan positif. Tentukan:

- gaya pada partikel
- percepatan partikel
- kecepatan partikel saat mencapai pelat bermuatan negatif.

Jawaban

- Gaya $F = Eq = V/d \times q$
 $= (600 \times 3,2 \times 10^{-19})/(15 \times 10^{-3})$
 $= 1,28 \times 10^{-14}$ N
- Percepatan $a = F/m = (1,28 \times 10^{-14})/(6,7 \times 10^{-27})$
 $= 1,91 \times 10^{12}$ m s⁻²
- $v^2 = 2as$, $v^2 = 2 \times 1,91 \times 10^{12} \times 15 \times 10$ m s⁻³
 $v = 2,4 \times 10^5$ m s⁻¹

Soal Latihan

- 5 Sebuah elektron dengan massa $9,1 \times 10^{-31}$ kg dan muatan $-1,6 \times 10^{-19}$ C, masuk ke wilayah antara dua pelat horizontal, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 3.10, dengan kecepatan horizontal $6,5 \times 10^7$ m/s. medan listrik vertikal seragam memiliki kuat medan $4,2 \times 10^5$ V/m diantara platnya. Dengan jarak antar pelat adalah 2,5 cm.

Hitung perpindahan vertikal elektron untuk perjalanan antara pelatnya



3.3 Gaya Listrik Antara Muatan Titik

Muatan Titik

Gambar 3.11 menunjukkan sebuah bola bermuatan positif yang terisolasi. Medan listrik yang mengelilingi bola ditunjukkan oleh garis-garis gaya dan karena bola bermuatan positif, arah medan listrik keluar dari bola.

Bola merupakan konduktor dan muatannya terdistribusi secara merata di sekitar permukaan bola. Bagaimanapun, dari posisi manapun di luar bola, garis-garis medan listrik tampak memancar dari pusat bola. Akibatnya:

Untuk setiap titik di luar konduktor bola, muatan pada bola dapat dianggap sebagai muatan titik yang terkonsentrasi di pusat bola.

Gagasan ini mirip dengan gagasan massa bola seragam dapat dianggap sebagai massa titik di pusat bola (lihat [Topik Gravitasi di Kelas XI](#)).

Gaya Antara Muatan Titik

Kita telah menemukan ‘hukum dari muatan’, yaitu:

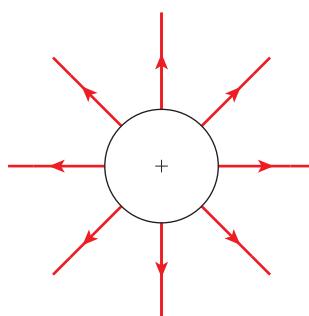
- » Muatan sejenis saling tolak menolak.
- » Muatan tidak sejenis saling tarik menarik

Namun, hukum ini murni kualitatif dan tidak memberikan indikasi besarnya gaya yang bekerja.

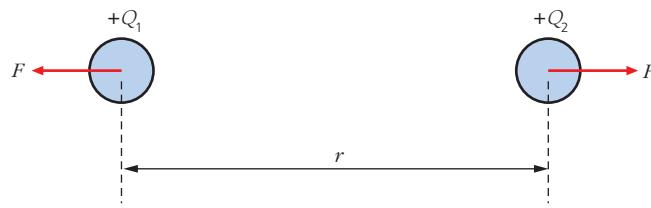
Pada akhir abad kedelapan belas, ilmuwan Prancis Charles Coulomb menyelidiki besarnya gaya antara muatan, dan bagaimana gaya ini bervariasi dengan muatan yang terlibat dan jarak di antara muatan tersebut. Dia menemukan aturan berikut:

Gaya antara dua muatan titik sebanding dengan hasil kali muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan titik. Hal ini dikenal sebagai **Hukum Coulomb**.

Percobaan Coulomb dilakukan dengan memanfaatkan bola kecil yang terisolasi. Sebenarnya, hukum berlaku untuk muatan titik, tetapi dapat digunakan untuk bola bermuatan asalkan jari-jarinya berukuran lebih kecil dibandingkan dengan jaraknya



▲ Gambar 3.11 medan listrik di dekat bola bermuatan terisolasi



▲ Gambar 3.12 Gaya antara bola bermuatan

Untuk muatan titik Q_1 dan Q_2 terletak jarak r terpisah (Gambar 3.12), hukum Coulomb memberikan nilai gaya F sebesar:

$$F \propto Q_1 Q_2 / r^2$$

atau

$$F = k Q_1 Q_2 / (r^2)$$

di mana k adalah konstanta proporsionalitas, yang nilainya tergantung pada bahan pengisi ruang di sekitar muatan. Dalam satuan SI, F diukur dalam satuan newton, Q dalam coulomb dan r dalam meter. Maka konstanta k diberikan sebagai

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Sehingga

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{(4\pi\epsilon_0 r^2)}$$

ketika muatan berada dalam ruang hampa (ruang bebas). Besaran ϵ_0 disebut permitivitas listrik ruang hampa.

Perhatikan bahwa persamaan ini memiliki bentuk serupa dengan hukum gravitasi Newton antara dua massa titik. Kedua hukum, baik hukum gravitasi Newton maupun hukum Coulomb merupakan hukum kuadrat terbalik dari gaya. Kita katakan persamaannya analog, atau ada analogi antara aspek medan listrik dan medan gravitasi ini.

Namun, ada perbedaan penting:

- » Gaya listrik bekerja pada muatan, sedangkan gaya gravitasi bekerja pada massa.
- » Gaya listrik dapat menarik atau menolak, tergantung pada jenis muatan yang berinteraksi, sedangkan dua massa selalu menarik satu sama lain.

Nilai permitivitas udara sangat dekat dengan ruang vakum ($1.0005 \epsilon_0$), sehingga persamaan dapat digunakan untuk gaya antara muatan dalam ruang hampa atau di udara.

Nilai permitivitas listrik ruang hampa sebesar

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$$

dimana satuan yang diwakili oleh "F" disebut farad dan 1 F adalah 1 C V^{-1} (kita akan mencari tahu tentang satuan ini di Topik selanjutnya).

Perhatikan bahwa, ketika menuliskan persamaan untuk hukum Coulomb, dalam contoh pertama, dituliskan ϵ_0 dan bukan k . Nilai k adalah $1/(4\pi\epsilon_0) = 8,99 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$.

Hukum Coulomb sering disebut sebagai **hukum kuadrat terbalik** dari gaya, karena variasi gaya dengan jarak r antara muatan sebanding dengan $1/r^2$. Kita telah menemukan hukum kuadrat terbalik dari gaya penting lainnya ketika kita mempertimbangkan gaya gravitasi antara dua massa titik (Topik kelas XI).

CONTOH SOAL 3D

Hitung gaya antara dua muatan titik, masing-masing $1,4 \mu \text{C}$, yang terpisah $6,0 \text{ cm}$ dalam ruang hampa.

(Permitivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$)

Jawaban:

$$\text{Menggunakan } F = \frac{Q_1 Q_2}{(4\pi\epsilon_0 r^2)}$$

$$\begin{aligned} F &= (1,4 \times 10^{-6})^2 / 4\pi \times 8,85 \times 10^{-12} \times (6,0 \times 10^{-2})^2 \\ &= 4,9 \text{ N} \end{aligned}$$

Soal Latihan

- 6 Hitung gaya pada partikel α dengan muatan $+3,2 \times 10^{-19} \text{ C}$, yang terletak dalam ruang hampa dengan jarak $3,2 \times 10^{-7} \text{ m}$ dari inti emas bermuatan $+1,3 \times 10^{-17} \text{ C}$ dalam ruang hampa.

(Permitivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$)



3.4 Medan Listrik Muatan Titik

Kuat medan listrik pada suatu titik didefinisikan sebagai gaya per satuan muatan yang bekerja pada muatan positif yang ditempatkan pada titik tersebut (lihat Topik 3.1).

Kita telah melihat bahwa medan listrik akibat muatan titik terisolasi berupa radial (lihat Gambar 3.11). Kita harus menyebutkan bahwa muatan titik tersebut terisolasi. Jika

ada objek lain bermuatan atau lainnya berada di dekatnya, medan akan terdistorsi.

Dari hukum Coulomb, gaya pada muatan uji q pada jarak r dari muatan titik terisolasi Q sebesar:

$$F = Qq/4\pi\epsilon_0 r^2$$

Medan listrik E di lokasi muatan uji q diberikan oleh $E = F/q$. Dengan demikian, kuat medan listrik akibat muatan titik terisolasi dalam ruang hampa (ruang bebas) adalah

$$E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$$

► CONTOH SOAL 2E

Dalam model atom hidrogen yang disederhanakan, elektron berada pada jarak $5,3 \times 10^{-11}$ m dari proton. Muatan proton adalah $+1,6 \times 10^{-19}$ C. Hitung kuat medan listrik proton pada jarak ini.

Jawaban

Dengan asumsi bahwa medannya radial,

$$\begin{aligned} E &= Q/4\pi\epsilon_0 r^2 = 1,6 \times 10^{-19} / (4\pi \times 8,85 \times 10^{-12} \times (5,3 \times 10^{-11})^2) \\ &= 5,1 \times 10^{11} \text{ N C}^{-1} \end{aligned}$$

Soal Latihan

- 7 Sebuah generator Van de Graaff memiliki kubah logam berbentuk bola dengan diameter 36 cm. Kuat medan listrik maksimum yang diperbolehkan pada permukaan kubah adalah $2,0 \times 10^4$ V m $^{-1}$. Dengan asumsi bahwa muatan pada kubah bertindak seolah-olah semuanya terkonsentrasi di pusat kubah bola, hitunglah besar muatan ini.
(Permitivitas ruang hampa = $8,85 \times 10^{-12}$ F m $^{-1}$)

3.5 Potensial listrik

Kita mendefinisikan potensial listrik dengan cara yang sama seperti kita mendefinisikan potensial gravitasi di **Topik gravitasi kelas XI**. Artinya, dalam hal perubahan energi, atau usaha yang dilakukan, ketika muatan kecil q dipindahkan antara dua titik A dan B dalam medan listrik. Ini merupakan usaha yang dilakukan oleh gaya listrik dalam memindahkan muatan positif kecil menuju muatan titik Q.

Kita telah mengetahui bahwa hanya beda energi potensial yang dapat diukur. Kita perlu menentukan titik acuan untuk bertindak sebagai nol energi potensial dan potensial listrik. Seperti energi gravitasi, kita sering mengambil lantai laboratorium atau permukaan Bumi sebagai titik nol kemudian mengukur $mg\Delta h$ dari titik tersebut. Demikian juga energi potensial listrik, lebih mudah menganggap potensial bumi sebagai nol khususnya jika bagian rangkaian dibumikan (*earthed*). Namun demikian, definisi dari potensial listrik nol adalah potensial dari suatu titik yang jaraknya jauh tak terhingga. Ini berarti bahwa:

Potensial listrik pada suatu titik dalam medan listrik didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan per satuan muatan positif dalam membawa muatan uji kecil dari jarak tak terhingga ke titik tersebut.

Simbol potensial adalah V, dan satuannya adalah volt yang setara dengan joule per coulomb (J/C).

Dua titik dalam medan listrik memiliki potensial yang sama jika usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan di antara keduanya sepanjang lintasan adalah nol.

Dua titik mungkin berada pada potensial yang berbeda. Perbedaan nilai dari suatu energi potensial karena interaksi antar dua muatan dikenal sebagai beda potensial. Kita telah menemukan gagasan dalam **Topik 1.2** bahwa beda potensial melintasi komponen dalam suatu rangkaian adalah energi yang diberikan per satuan muatan dalam memindahkan muatan antara titik-titik ini dalam rangkaian. Kita sekarang dapat menggunakan ide ini untuk menggambarkan beda potensial antara titik mana pun dalam medan listrik.

CONTOH SOAL 3F

Potensial listrik di titik A adalah 450 V dan di titik B adalah -150 V. Hitung:

- beda potensial antara titik A dan B
- usaha yang dilakukan untuk memindahkan proton dari titik B ke titik A.

Jawaban

- beda potensial = $450 - (-150) = 600$ V
- Usaha dilakukan pada proton untuk memindahkannya ke arah muatan positif (potensial meningkat)

$$\text{usaha yang dilakukan } W = q\Delta V = 1,60 \times 10^{-19} \times 600 \\ = 9,6 \times 10^{-17} \text{ J}$$

Potensial listrik dalam medan akibat muatan titik

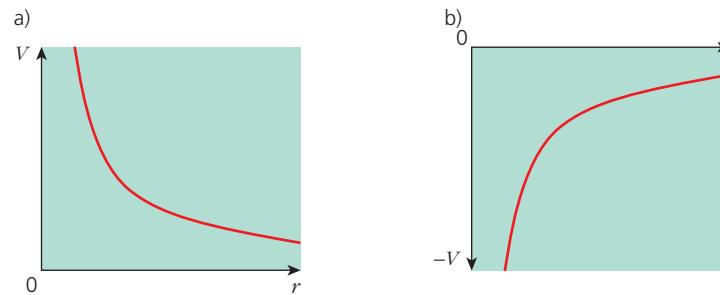
Potensial listrik V di titik-titik dalam medan muatan titik Q dapat disajikan dalam bentuk persamaan:



$$V = \frac{Q}{(4\pi\epsilon_0 r)}$$

dengan r adalah jarak dari muatan Q .

Semakin dekat ke titik positif maka potensialnya semakin besar, dan berkurang menuju nol saat semakin jauh dari muatan yang merupakan sumber dari medan listriknya. Jika muatan yang menghasilkan medan adalah negatif, potensialnya juga negatif dan meningkat menuju nol dengan bertambahnya jarak dari muatan. Perhatikan bahwa variasi potensial dengan jarak adalah proporsionalitas terbalik, dan bukan hubungan kuadrat terbalik yang berlaku untuk variasi kuat medan listrik dengan jarak.



▲ Gambar 3,13 Variasi dari potensial listrik a) untuk muatan titik positif dan b) untuk muatan titik negatif

Kuat medan listrik dan potensial listrik

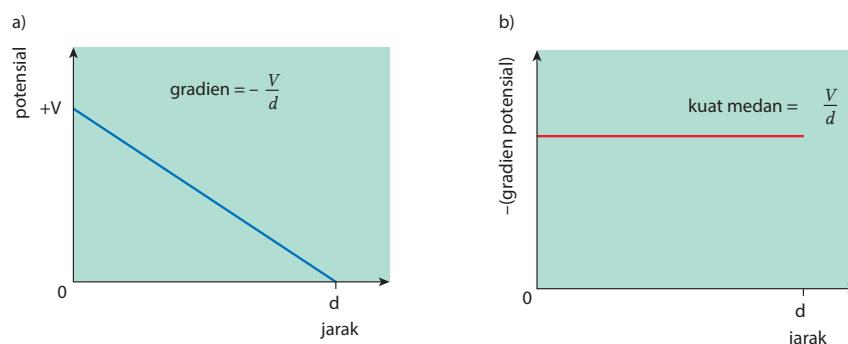
Laju perubahan potensial listrik dengan jarak disebut gradien potensial. Dapat ditunjukkan bahwa ada hubungan penting antara kuat medan listrik di sembarang titik dan gradien potensial listrik di titik itu.

Kuat medan listrik sama dengan negatif dari gradien potensial pada titik tersebut.

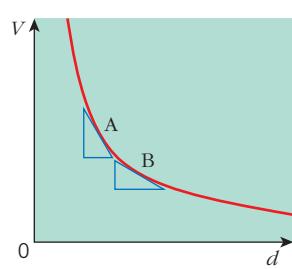
Jadi, jika kita memiliki grafik yang menunjukkan bagaimana perubahan potensial dengan jarak dalam medan listrik, gradien grafik ini pada setiap titik merupakan besar dari kuat medan pada titik itu.

Perhatikan bahwa kuat medan dan gradien potensial memiliki tanda yang berlawanan karena keduanya berlawanan arah. Jika beda potensial antara dua titik dalam suatu medan adalah negatif (potensialnya berkurang) muatan positif yang kecil akan cenderung bergerak ke arah medan listrik. Jika beda potensial antara dua titik dalam medan listrik adalah positif, muatan positif kecil akan cenderung bergerak ke arah yang berlawanan dengan dengan medan listrik.

Untuk kasus khusus medan listrik seragam, kuat medannya konstan sehingga gradien potensialnya konstan. Hal ini dapat dilihat pada [Gambar 3.14](#).



▲ Gambar 3.14 Grafik dari nilai potensial dan (negatif dari) gradien potensial untuk medan listrik seragam



▲ Gambar 3.15 Mencari gradien grafik potensial-jarak

Untuk medan listrik suatu muatan titik, kuat medannya tidak konstan. [Gambar 3.15](#) menunjukkan variasi potensial listrik untuk muatan titik positif. Potensial listrik menurun sangat drastis saat dekat dengan muatan titik, seperti yang ditunjukkan oleh kemiringan curam (negatif) garis singgung kurva di titik A. Pada titik B gradien potensial masih negatif, tetapi kemiringan garis singgung kurva tidak begitu curam. Potensial gradien menurun dengan

meningkatnya jarak dari muatan titik, menunjukkan (seperti yang diharapkan) bahwa kuat medan listrik menurun seiring bertambahnya jarak. Gradien kurva potensial – jarak pada setiap titik, dalam volt per meter (V/m), sama dengan negatif dari kuat medan listrik, diukur dalam $V\ m^{-1}$ atau newton per coulomb ($N\ C^{-1}$).

Energi potensial listrik

Kita telah melihat bahwa potensial listrik pada suatu titik dalam medan listrik didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan per satuan muatan positif dalam membawa muatan uji kecil dari tak terhingga ke titik tersebut. Untuk suatu benda yang bermuatan q , maka energi potensial listrik benda tersebut akan menjadi q kali lebih besar untuk muatan satuan muatan.

$$\text{energi potensial listrik} = \text{muatan} \times \text{potensial listrik}$$

Kita juga telah melihat bahwa potensial listrik pada jarak r dari muatan titik Q_1 adalah $Q_1/(4\pi\epsilon_0 r)$.

Jadi, jika muatan titik q ditempatkan pada jarak r dari muatan titik Q , maka energi potensial listrik E dari dua muatan titik adalah:

$$Ep = \frac{Qq}{(4\epsilon_0 r)}$$

Usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan titik terisolasi q dan Q sehingga sehingga r adalah $Qq/(4\pi\epsilon_0 r)$.

Soal Latihan

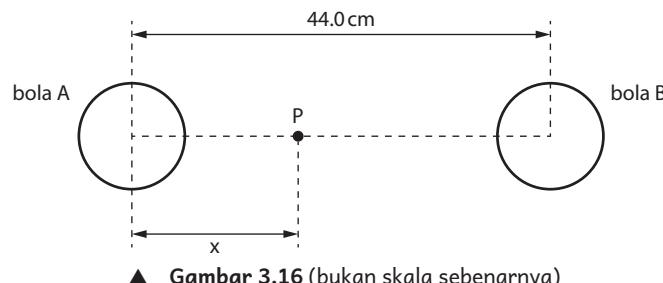
- 8** Dua muatan sebesar $30\ \mu\text{C}$ ditempatkan pada garis lurus dan terpisah sejauh $0,40\ \text{m}$. Sebuah muatan sebesar $0,5\ \mu\text{C}$ harus dipindahkan sejauh $0,10\ \text{m}$ sepanjang garis dari titik tengah antara muatan. Berapa besar usaha yang harus dilakukan?

RANGKUMAN

- Muatan sejenis saling tolak menolak; muatan yang tidak sejenis saling tarik menarik.
- Ketika benda bermuatan ditempatkan di dekat konduktor terisolasi, ada redistribusi muatan yang menimbulkan pemuatan dengan induksi.
- Medan listrik adalah daerah ruang dimana muatan listrik mengalami gaya.
- Arah garis medan listrik menunjukkan arah gaya pada muatan positif yang ditempatkan dalam medan, jarak pisah menunjukkan besarnya kuat medan – semakin besar jarak pisah, semakin kecil kuat medan listriknya
- Dari suatu titik di luar konduktor bola, muatan pada bola dapat diperlakukan sebagai muatan titik di pusatnya.
- Kuat medan listrik adalah gaya per satuan muatan positif $E = F/Q$.
- Medan listrik antar pelat sejajar bermuatan adalah seragam dan dapat disajikan dalam bentuk persamaan: $E = \Delta V/\Delta d$
- Muatan listrik yang awalnya bergerak tegak lurus terhadap medan listrik homogen mengalami gaya konstan dan dibelokkan menjadi linatasan parabola.
- Gaya antara dua muatan titik sebanding dengan hasil kali muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya.
- Hukum Coulomb: $F = Q_1 Q_2 / (4\pi\epsilon_0 r^2)$ ketika kedua muatan berada di ruang hampa (vakum) atau udara.
- ϵ_0 merupakan permitivitas listrik dalam ruang hampa; nilainya adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ N m}^{-1}\text{C}^{-2}$.
- Kuat medan listrik E pada suatu titik dalam medan suatu muatan titik terisolasi diberikan oleh $E = Q/(4\pi\epsilon_0 r^2)$
- Potensial listrik pada suatu titik dalam medan listrik adalah usaha yang dilakukan per satuan muatan dalam membawa muatan uji positif kecil dari tak hingga ke titik tertentu.
- Kuat medan listrik di setiap titik dalam medan sama dengan negatif gradien potensial di titik tersebut.
- Potensial listrik V pada suatu titik dalam medan muatan titik terisolasi diberikan oleh $V = Q/(4\pi\epsilon_0 r)$.
- Energi potensial listrik E_p dari dua muatan titik diberikan oleh $E_p = Qq/(4\pi\epsilon_0 r)$.

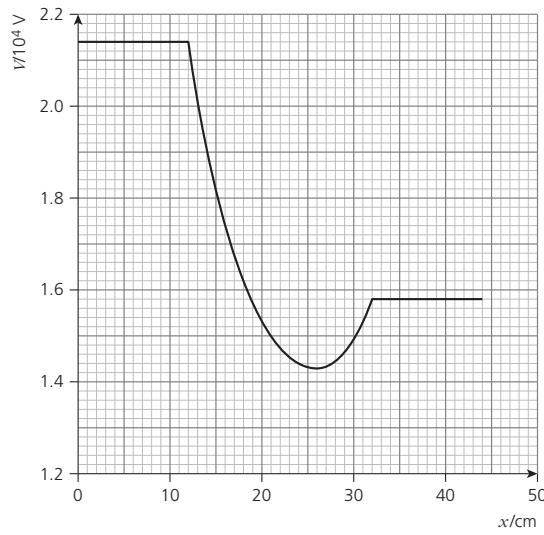
ASESMEN FORMATIF

- 1** Sebuah partikel α memiliki energi awal 6,2 MeV mendekati inti emas-197 ($^{197}_{79}\text{Au}$). Muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ C.
 - a** Hitung jarak terdekat dari partikel ke inti emas.
 - b** Usulkan mengapa jawaban Anda di **a** menunjukkan batas atas jari-jari inti emas.
- 2 a** Nyatakan apa yang dimaksud dengan potensial listrik di suatu titik [2]
- b** Pusat dua bola logam bermuatan A dan B dipisahkan oleh jarak 44,0 cm, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 3.16](#).



▲ **Gambar 3.16** (bukan skala sebenarnya)

Sebuah titik P bergerak terletak pada garis yang menghubungkan pusat-pusat kedua bola. Titik P adalah jarak x dari pusat bola A. Variasi jarak x dengan potensial listrik V di titik P ditunjukkan pada [Gambar 3.17](#).



▲ **Gambar 3.17**

- i** Gunakan [Gambar 3.17](#) untuk menyatakan dan menjelaskan apakah kedua bola memiliki muatan yang sama atau berlawanan jenis.

ii Partikel bergerak bebas dari permukaan bola A ke permukaan bola B.

- 1** Jelaskan secara kualitatif variasi, jika ada, dengan jarak x dari kecepatan partikel seperti itu:

bergerak dari $x = 12\text{ cm}$ ke $x = 25\text{ cm}$

melewati $x = 26\text{ cm}$

bergerak dari $x = 27\text{ cm}$ ke $x = 31\text{ cm}$

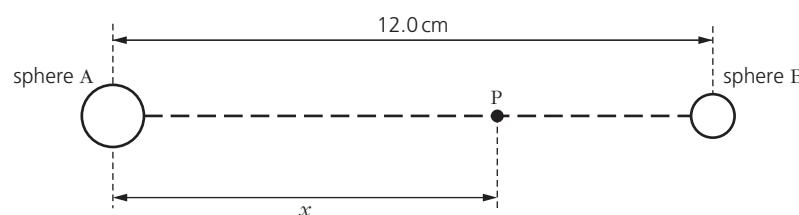
mencapai $x = 32\text{ cm}$ [4]

- 2** Partikel memiliki muatan $3,2 \times 10^{-19}\text{ C}$ dan massa $6,6 \times 10^{-27}\text{ kg}$.

Hitunglah kecepatan maksimum partikel tersebut. [2]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Makalah 42 Q7 Maret 2018

- 3** Dua bola bermuatan kecil A dan B terletak dalam ruang hampa. Jarak antara pusat bola adalah $12,0\text{ cm}$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.18.



▲ Gambar 3.18 (bukan skala sebenarnya)

Muatan pada setiap bola dapat dianggap sebagai muatan titik di pusat bola.

Titik P adalah titik yang dapat bergerak, terletak pada garis yang menghubungkan pusat-pusat bola bermuatan dengan jarak x dari pusat bola A.

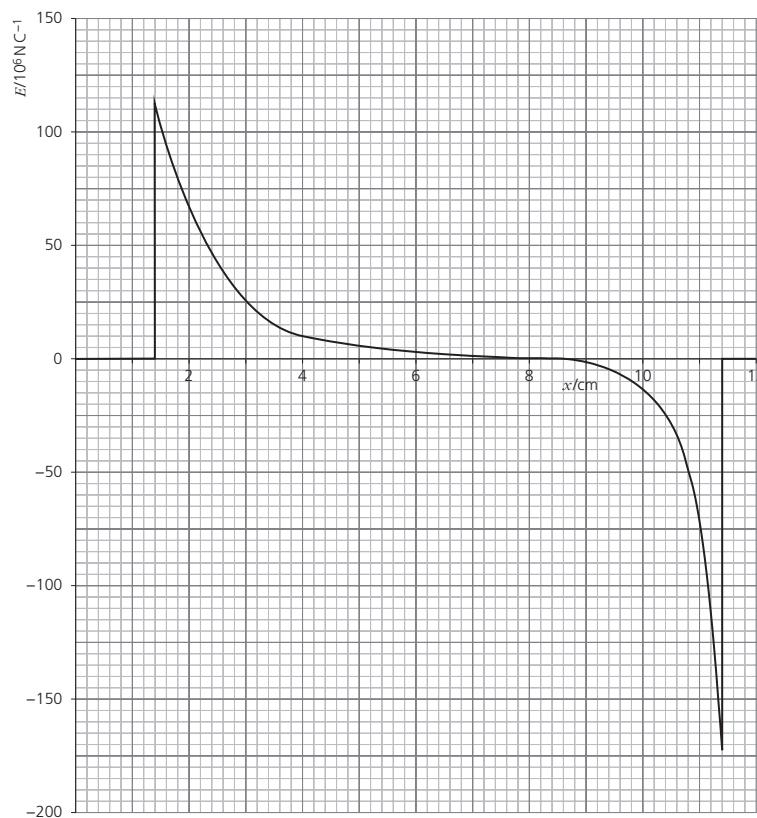
Variasi dengan jarak x kuat medan listrik E di titik P ditunjukkan pada Gambar 3.19.

- a** Nyatakan bukti yang diberikan oleh Gambar 3.19 untuk pernyataan bahwa:

i bola adalah konduktor, [1]

ii muatan pada bola keduanya positif atau keduanya negatif. [2]

- b i** Nyatakan hubungan antara kuat medan listrik E dan gradien potensial di suatu titik. [1]
- ii** Gunakan gambar 3.19 untuk menyatakan dan menjelaskan jarak x dimana laju perubahan potensial dengan jarak:
- maksimum, [2]
- minimum. [2]



▲ Gambar 3.19

*Cambridge International AS dan A Level Physics (9702)
Makalah 41 Q4 Okt/Nov 2011*

- 4** Sebuah partikel α diam, bermassa $6,6 \times 10^{-27}$ kg dan bermuatan $3,2 \times 10^{-19}$ C, terletak pada jarak $4,7 \times 10^{-14}$ m dari pusat inti emas-197 ($^{197}_{79}Au$).
- a** Hitung, untuk partikel dan inti emas:
- i** gaya listrik diantara muatan,
ii energi potensial listrik .
- b** Partikel α mengalami interaksi ditolak oleh inti emas stasioner.

Gunakan jawaban Anda dalam **a ii** untuk menentukan kecepatan maksimum partikel.
(Permitivitas ruang hampa adalah $8,85 \times 10^{-12}$ F m⁻¹)

4 Kapasitansi

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

4.1. Kapasitor dan kapasitansi

1. mendefinisikan kapasitansi, seperti yang diterapkan pada bola konduktor terisolasi dan kapasitor pelat sejajar
2. menerapkan $C = \frac{Q}{V}$
3. merumuskan dan menerapkan $C = \frac{Q}{V}$ untuk kapasitansi gabungan kapasitor yang disusun seri dan paralel
4. menerapkan rumus kapasitansi untuk kapasitor disusun seri dan paralel

4.2. Energi yang tersimpan dalam kapasitor

1. menentukan energi potensial listrik yang tersimpan dalam kapasitor

dari area di bawah grafik potensial-muatan

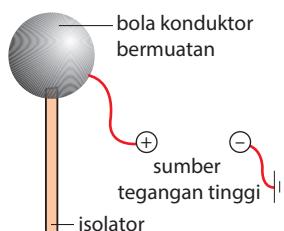
$$\text{dengan } W = \frac{1}{2} QV \quad \text{dan karenanya} \\ W = \frac{1}{2} CV^2$$

4.3. Pengosongan kapasitor

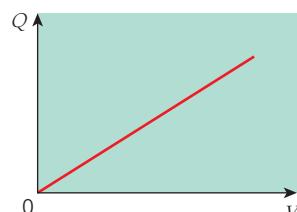
1. menganalisis grafik variasi waktu dengan beda potensial muatan, arus untuk kapasitor yang dikosongkan melalui resistor
2. menerapkan $\tau = RC$ konstanta waktu untuk kapasitor yang dikosongkan melalui resistor
3. menerapkan persamaan $x = x_0 e^{-(t/RC)}$ dengan x dapat mewakili arus, muatan, atau beda potensial untuk kapasitor yang dikosongkan melalui resistor

Pemahaman Pendahuluan

- Terdapat medan listrik seragam antara dua pelat sejajar yang bermuatan.
- Ketika konduktor terisolasi diberi muatan, potensial konduktor naik.
- Potensial listrik adalah usaha yang dilakukan per satuan muatan positif untuk memindahkan muatan uji positif dari tak hingga ke titik tersebut.
- Peningkatan potensial konduktor berarti bahwa energi tersimpan semakin besar.



▲ Gambar 4. 1 Bola Konduktor Bermuatan



▲ Gambar 4. 2 Hubungan antara muatan dan potensial

4.1 Kapasitor dan kapasitansi

Kapasitansi

Pertimbangkan bola konduktor terisolasi yang terhubung ke sumber tegangan tinggi (**Gambar 4.1**). Ditemukan bahwa, ketika potensial bola meningkat, muatan yang disimpan pada bola juga meningkat. Grafik yang menunjukkan variasi muatan Q pada konduktor dengan potensial V ditunjukkan pada **Gambar 4.2**.

Dapat dilihat bahwa muatan Q berhubungan dengan potensial V yaitu

$$Q \sim V$$

Sehingga,

$$Q = CV$$

dengan C adalah konstanta yang bergantung pada ukuran dan bentuk konduktor. C dikenal sebagai **kapasitansi** konduktor.



Kapasitansi C adalah perbandingan muatan Q dengan potensial V untuk suatu penghantar

yaitu:

$$C = \frac{Q}{V}$$

Untuk menghindari kebingungan! Huruf C digunakan sebagai singkatan untuk satuan muatan, coulomb (lihat Topik Listrik statis). Huruf miring C digunakan sebagai simbol untuk kapasitansi.

Satuan kapasitansi adalah **farad** (simbol F). Satu farad adalah satu coulomb per volt.

Farad merupakan satuan kapasitansi yang sangat besar. Dalam rangkaian elektronik dan eksperimen laboratorium, kisaran nilai kapasitansi yang umum adalah dari sekitar 10^{-12} F (1 piko farad, atau 1 pF) hingga 10^{-3} F (1 mili farad, atau 1 mF). (Lihat **Topik Pengukuran kelas XI** untuk daftar kelipatan desimal dan sub kelipatan digunakan dengan satuan.)

Isolator tidak memiliki kapasitansi. Ketika muatan ditempatkan pada bola pada **Gambar 4.1**, muatan

mendistribusikan dirinya sendiri sehingga ada satu nilai potensial untuk seluruh bola. Untuk menentukan kapasitansi, seluruh bola harus memiliki nilai potensial yang sama. Dalam isolator, muatan tidak akan dapat bergerak, sehingga akan terjadi beda potensial pada titik-titik yang berbeda pada isolator. Jadi, kapasitansi tidak berlaku untuk isolator.

Komponen rangkaian yang menyimpan muatan dan, oleh karena itu, memiliki kapasitansi disebut **kapasitor**.

► CONTOH SOAL 4A

1. Tunjukkan bahwa kapasitansi C dari bola konduktor terisolasi berjari-jari r diberikan oleh $C=4\pi\epsilon_0 r$.
2. Hitunglah muatan yang tersimpan pada sebuah penghantar terisolasi kapasitansi $280 \mu F$ ketika potensialnya $25V$.

Jawaban

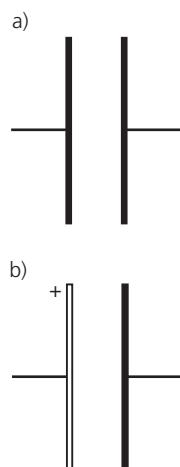
1. Pertimbangkan muatan $+Q$ pada permukaan bola. Muatan pada bola konduktor yang terisolasi dapat dianggap sebagai muatan titik di pusatnya. Jadi, potensial V pada permukaan bola diberikan oleh $V = Q/4\pi\epsilon_0 r$.
Kapasitansi $C = Q/V = Q/(Q/4\pi\epsilon_0 r) = 4\pi\epsilon_0 r$
2. Menggunakan $C = Q/V$, kita mendapatkan
$$Q = CV = 280 \times 10^{-6} \times 25 = 7,0 \times 10^{-3} C.$$

Soal Latihan

- 1 Muatan pada bola yang terisolasi adalah $5,4 \text{ mC}$ ketika potensialnya 12 V . Hitung kapasitansi, dalam mikrofarad, bola tersebut.

Kapasitor

Kapasitor paling sederhana dalam rangkaian listrik terdiri dari dua pelat logam, dengan celah udara di antara keduanya yang bertindak sebagai isolator. Ini disebut kapasitor keping sejajar. **Gambar 4.3a** (bagian atas) menunjukkan simbol rangkaian untuk sebuah kapasitor. Ketika pelat terhubung ke baterai, baterai mentransfer elektron dari pelat yang terhubung ke terminal positif



▲ Gambar 4.3 Simbol rangkaian untuk a) sebuah kapasitor dan b) kapasitor elektrolit

baterai ke pelat yang terhubung ke terminal negatif. Jadi pelat membawa muatan yang sama tetapi berlawanan.

Kapasitansi kapasitor pelat sejajar didefinisikan sebagai muatan yang disimpan pada satu pelat per satuan beda potensial antar pelat.

Perhatikan bahwa ada muatan yang sama tetapi berlawanan pada kedua pelat. Dengan demikian, kapasitor tidak menyimpan muatan. Kita akan melihat nanti bahwa kapasitor berfungsi untuk menyimpan energi.

Kapasitansi kapasitor berisi udara dapat ditingkatkan dengan meletakkan bahan isolasi, seperti mika atau kertas lilin, di antara pelat. Bahan di antara pelat disebut **dielektrik**. Dalam sebuah jenis kapasitor yang dikenal sebagai **kapasitor elektrolit**, dielektrik disimpan oleh reaksi elektrokimia. Kapasitor ini harus dihubungkan dengan polaritas yang benar untuk pelatnya, atau kapasitor akan rusak. Simbol rangkaian untuk kapasitor elektrolit ditunjukkan pada [Gambar 4.3b](#). Kapasitor elektrolit tersedia dengan kapasitansi hingga sekitar 1 mF.

EKSTENSI

Faktor-faktor yang memengaruhi kapasitansi

Seperti yang dinyatakan sebelumnya, bahan yang digunakan sebagai dielektrik mempengaruhi kapasitansi kapasitor. Faktor lain yang menentukan kapasitansi adalah luas pelat dan jarak di antaranya. Percobaan menunjukkan bahwa

Kapasitansi C berbanding lurus dengan luas pelat A , dan berbanding terbalik dengan jarak d di antara keduanya.

Menempatkan kedua faktor ini bersama-sama memberikan

$$C \propto A/d$$

dengan A adalah luas salah satu pelat.

Untuk kapasitor dengan udara atau ruang hampa di antara pelat, konstanta proporsionalitas adalah permitivitas ruang hampa ϵ_0 . Jadi

$$C = \epsilon_0 A/d$$

Karena C diukur dalam farad, A dalam meter persegi dan d dalam meter, kita dapat melihat bahwa satuan untuk ϵ_0 adalah farad per meter, $F\text{m}^{-1}$ ([lihat juga Topik 18](#)). Nilai ϵ_0 adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$.

Kita kenalkan kuantitas yang disebut **permittivitas relatif** ϵ_r dielektrik untuk menjelaskan fakta bahwa penggunaan dielektrik meningkatkan kapasitansi.

Permitivitas relatif didefinisikan sebagai kapasitansi kapasitor pelat sejajar dengan dielektrik antara pelat dibagi dengan kapasitansi kapasitor yang sama dengan ruang hampa di antara pelat.

Permitivitas relatif ϵ_r adalah rasio (perbandingan) dan tidak memiliki satuan. Beberapa nilai permitivitas relatif diberikan pada [Tabel 4.1](#).

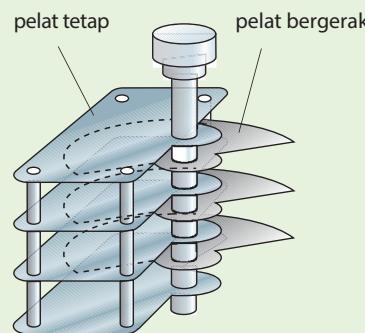
Bahan	Permitivitas relative ϵ_r
Udara	1.0005
Polietilena	2.3
Belerang	4
Minyak paraffin	4.7
Mika	6
barium titanat	1200

▲ [Tabel 4.1](#) Permitivitas relatif bahan dielektrik yang berbeda

Termasuk faktor permitivitas relatif, persamaan lengkap untuk kapasitansi kapasitor keping sejajar adalah:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

Kapasitor variabel ([Gambar 4.4](#)) memiliki satu set pelat yang dipasang pada poros, sehingga area tumpang tindih dapat diubah.



▲ [Gambar 4.4](#) Kapasitor variabel

Memvariasikan kapasitansi dalam rangkaian tuning elektronik adalah salah satu cara menyetel ke frekuensi yang berbeda.

CONTOH SOAL 4B

Sebuah kapasitor pelat sejajar berisi udara memiliki pelat persegi dengan sisi 30 cm yang berjarak 1,0 mm. Hitung kapasitansi kapasitor tersebut.

Jawaban

$$\text{Gunakan } C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

$$C = 8.85 \times 10^{-12} \times 1 \times (30 \times 10^{-2})^2 / 1.0 \times 10^{-3}$$

$$= 8,0 \times 10^{-10} \text{ F}$$

Soal Latihan

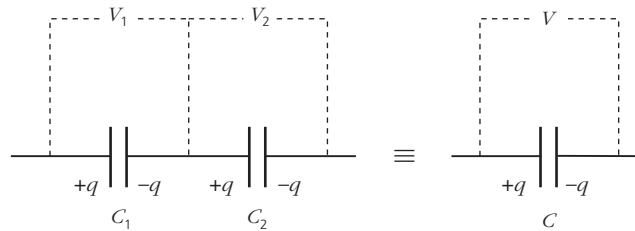
- 2** Sebuah kapasitor terdiri dari dua buah piringan logam berdiameter 15 cm yang dipisahkan oleh selembar plastik setebal 0,25 mm. Permitivitas relatif dari polietilen adalah 2,3. Hitung kapasitansi kapasitor tersebut. (ϵ_0 adalah $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$).



Kapasitor seri dan paralel

Pada [Gambar 4.5](#), dua kapasitor kapasitansi C_1 dan C_2 dihubungkan secara seri.

▲ **Gambar 4.5**
Kapasitor secara
seri



Kita akan menunjukkan bahwa kapasitansi gabungan C diberikan oleh

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Jika beda potensial pada kapasitor ekuivalen (gabungan) kedua kapasitor ini adalah V dan muatan yang tersimpan pada setiap pelat adalah q , maka $V = \frac{q}{C}$.

Beda potensial pada rangkaian adalah jumlah dari beda potensial di masing-masing kapasitor, $V = V_1 + V_2$, dan setiap kapasitor memiliki muatan q pada setiap pelat. (Sebelum menerapkan beda potensial, kapasitor tidak bermuatan. Kemudian muatan $+q$ yang diinduksi pada salah satu pelat kapasitor akan menginduksi muatan $-q$

pada pelat kapasitor lainnya. Hal ini akan menginduksi muatan $+q$ pada salah satu pelat kapasitor kedua dan $-q$ pada pelat lainnya. (Ingatlah bahwa muatan selalu kekal.) Karena $V = \frac{q}{C}$ dan $V_1 = \frac{q}{C_1}$, maka :

$$\frac{q}{C} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2}$$

Membagi setiap sisi persamaan dengan q , kita dapatkan:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

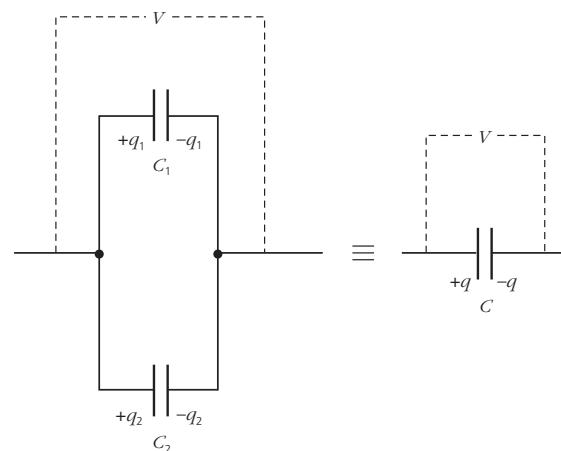
Kebalikan dari kapasitansi gabungan sama dengan jumlah kebalikan dari kapasitansi masing-masing yang dihubungkan secara seri.

Perhatikan bahwa:

- Untuk dua kapasitor identik secara seri, kapasitansi gabungan sama dengan setengah dari nilai masing-masing kapasitor.
- Untuk kapasitor secara seri, kapasitansi gabungan selalu lebih kecil dari nilai masing-masing kapasitansi terkecil.

Pada Gambar 4.6, dua kapasitor kapasitansi C_1 dan C_2 dihubungkan secara paralel. Kita akan menunjukkan bahwa kapasitansi gabungan C diberikan oleh

$$C = C_1 + C_2$$



▲ Gambar 4.6 Kapasitor paralel

Jika beda potensial pada kapasitor gabungan dua kapasitor paralel adalah V dan muatan yang tersimpan pada setiap

pelat adalah q , maka $q = CV$. Muatan total yang tersimpan adalah jumlah muatan pada masing-masing kapasitor, $q = q_1 + q_2$, dan ada beda potensial yang sama V di setiap kapasitor karena mereka dihubungkan secara paralel. Karena:

$$q_1 = C_1 V \text{ dan } q_2 = C_2 V$$

maka:

$$CV = C_1 V + C_2 V$$

Membagi setiap sisi persamaan dengan V , kita dapatkan:

$$C = C_1 + C_2$$

Hasil yang sama berlaku untuk sejumlah kapasitor yang terhubung secara paralel.

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Kapasitansi gabungan sama dengan jumlah semua kapasitansi secara paralel.

Perhatikan bahwa persamaan untuk kapasitor secara seri mirip dengan persamaan untuk resistor secara paralel, dan persamaan untuk kapasitor secara paralel mirip dengan persamaan untuk resistor secara seri (lihat [Topik 2.1](#))

CONTOH SOAL 4C

1. Kapasitor $50\ \mu F$, dihubungkan secara paralel dengan kapasitor $10\ \mu F$, dihubungkan ke catu daya $12\ V$.

Hitung:

- a. kapasitansi gabungan
- b. beda potensial tiap kapasitor
- c. muatan yang tersimpan pada satu pelat masing-masing kapasitor.

2. Sebuah kapasitor $12\ \mu F$, dihubungkan secara seri dengan kapasitor $6\ \mu F$ dihubungkan ke sumber $15\ V$.

Hitung:

- a. kapasitansi gabungan
- b. beda potensial di setiap kapasitor.
- c. muatan yang tersimpan pada satu pelat masing-masing kapasitor

Jawaban

1. a. Gunakan persamaan kapasitor secara paralel,

$$C = C_1 + C_2 = 50 + 10 = 60 \mu\text{F}$$

- b. Beda potensial pada setiap kapasitor sama dengan beda potensial pada sumber sebesar **12 V**.

- c. Gunakan $Q = CV$, muatan yang tersimpan pada kapasitor $50 \mu\text{F}$ adalah $50 \times 10^{-6} \times 12 = 6.0 \times 10^{-4} \text{ C}$. Muatan yang tersimpan pada kapasitor $10 \mu\text{F}$ adalah $10 \times 10^{-6} \times 12 = 1.2 \times 10^{-4} \text{ C}$.

2. a. Gunakan persamaan kapasitor secara seri,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

$$= 1/(12 \times 10^{-6}) + 1/(6 \times 10^{-6}) = 2.5 \times 10^5$$

Jadi $C = 4 \mu\text{F}$.

- b. Muatan yang disimpan oleh masing-masing kapasitor sama dengan muatan yang disimpan oleh gabungannya, jadi $Q = CV = 4 \times 10^{-6} \times 15 = 6.0 \times 10^{-5} \text{ C}$

- c. Gunakan $V = Q/C$, beda potensial pada kapasitor $12 \mu\text{F}$ adalah $(6.0 \times 10^{-5})/(12 \times 10^{-6}) = 5.0 \text{ V}$.

Beda potensial pada kapasitor $6 \mu\text{F}$ adalah $(6.0 \times 10^{-5})/(6 \times 10^{-6}) = 10.0 \text{ V}$.

■ Perhatikan bahwa dua beda potensial menambah tegangan suplai.

Soal Latihan

- 3 a** Sebuah Kapasitor $250 \mu\text{F}$ dihubungkan ke sumber tegangan 6.0 V . Hitung muatan yang tersimpan pada salah satu pelat kapasitor.
- b** Kapasitor di **a** sekarang terputus dari sumber dan terhubung ke kapasitor $250 \mu\text{F}$ yang tidak bermuatan.
- i** Jelaskan mengapa:
- 1** kapasitor paralel, bukan seri
 - 2** jumlah muatan yang disimpan oleh kapasitor gabungan harus sama dengan jawaban **a**.
- ii** Hitung kapasitansi gabungan.
- iii** Hitung beda potensial di setiap kapasitor.
- iv** Hitung muatan yang tersimpan pada satu pelat masing-masing kapasitor.



4.2 Energi yang Tersimpan dalam Kapasitor

Saat mengisi kapasitor, usaha dilakukan oleh baterai untuk memindahkan muatan ke kapasitor, memisahkan muatan positif dan negatif. Energi ditransfer dari catu daya dan disimpan sebagai **energi potensial listrik** dalam kapasitor.

Ada banyak penggunaan kemampuan kapasitor untuk menyimpan energi. Unit lampu kilat kamera menggunakan kapasitor untuk menyimpan energi. Kapasitor membutuhkan beberapa detik untuk mengisi daya saat terhubung ke baterai di kamera. Kemudian energi dilepaskan dengan sangat cepat ketika kapasitor dihubungkan ke lampu kilat untuk memberikan kilatan singkat namun intens.

Karena $Q = CV$, muatan yang tersimpan pada setiap pelat kapasitor berbanding lurus dengan beda potensial pada kapasitor (lihat [Gambar 4.7](#)).

Dari definisi beda potensial ([Topik 3](#)), usaha yang dilakukan untuk mengisi kapasitor (dan oleh karena itu, energi yang ditransfer ke kapasitor) adalah hasil kali dari beda potensial dan muatan. yaitu

$$W(\text{dan } Ep) = VQ$$

Namun, semakin banyak muatan yang ditransfer ke kapasitor, beda potensial meningkat. Misalkan beda potensial adalah V_0 ketika muatan yang disimpan adalah Q_0 . Ketika sejumlah kecil muatan q diberikan pada beda potensial rata-rata V_0 , energi yang ditransfer diberikan oleh

$$\Delta Ep = V_0 \Delta q$$

yang sama dengan luas potongan pada [Gambar 4.7](#). Demikian pula, energi yang ditransfer ketika muatan q ditambahkan diberikan oleh luas potongan berikutnya, dan seterusnya. Jika jumlah muatan q sangat kecil, garis menjadi sangat tipis dan luas gabungannya sama dengan luas antara garis grafik dan sumbu horizontal. Jadi



Energi yang ditransfer dari baterai ketika kapasitor diberi muatan yaitu luas di bawah garis grafik ketika muatan (sumbu x) diplot terhadap beda potensial (sumbu y).

Karena grafiknya berupa garis lurus yang melalui titik asal, maka luas ini hanyalah luas segitiga siku-siku yang dibentuk oleh garis dan sumbu muatan. Jadi

$$Ep = \frac{1}{2} QV$$

Persamaan diatas adalah persamaan untuk energi yang ditransfer dari baterai dalam pengisian kapasitor. Ini merupakan energi potensial listrik, dan dilepaskan ketika kapasitor dikosongkan. Karena $C = Q/V$, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk yang berbeda.

$$Ep = \frac{1}{2} CV^2$$

CONTOH SOAL 4D

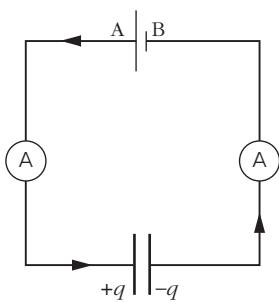
1. Hitung energi yang disimpan oleh kapasitor $280\ \mu F$ yang diberi beda potensial $12\ V$.
2. Lampu flash kamera menggunakan kapasitor $5000\ \mu F$ yang diberi muatan oleh baterai $9\ V$. Kapasitor kemudian diputuskan dari baterai. Hitung energi yang ditransfer ketika kapasitor dilepaskan melalui lampu sehingga beda potensial akhir pada pelatnya adalah $4,0\ V$.

Jawaban

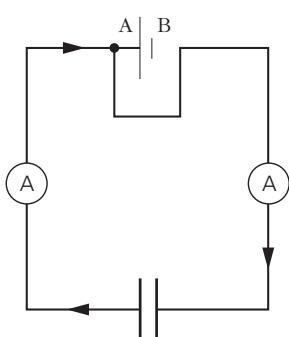
1. Gunakan $Ep = \frac{1}{2} CV^2$
 $= 1/2 \times 280 \times 10^{-6} \times 12^2 = 20\ mJ$.
2. Perubahan energi
 $Ep = \frac{1}{2} CV_1^2 - \frac{1}{2} CV_2^2$
 $= 1/2 \times 5000 \times 10^{-6} \times (9^2 - 4^2) = 0,163\ J$

Soal Latihan

4. Lampu flash kamera menggunakan kapasitor $5000\ \mu F$ yang diisi oleh baterai sebesar GGL E . Ketika kapasitor terisi penuh, energinya adalah $0,20\ J$. Hitung muatan yang tersimpan pada satu pelat kapasitor yang terisi penuh



▲ Gambar 4.8 Pemuatan Kapasitor



▲ Gambar 4.9 Pengosongan Kapasitor

4.3 Pengosongan kapasitor

Ketika baterai dihubungkan melalui kapasitor, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 4.8](#), elektron ditransfer sehingga satu pelat menjadi bermuatan positif dan pelat lainnya bermuatan negatif. Kapasitor telah menjadi bermuatan.

Amperemeter sensitif yang terhubung ke setiap pelat kapasitor akan menunjukkan elektron bergerak ke pelat negatif dan pada saat yang sama, meninggalkan pelat positif. Jarum meter akan bergerak ke arah yang sama dan kembali ke nol, menunjukkan pulsa arus sesaat.

Amperemeter akan menunjukkan arus yang sama untuk waktu singkat yang sama, menunjukkan bahwa muatan pada setiap pelat sama besar. Arus dan proses pengisian berhenti ketika beda potensial pada kapasitor sama dengan ggl baterai.

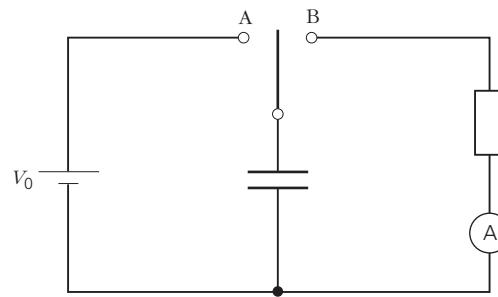
Ketika kabel baterai ke terminal B diputus dan dihubungkan ke terminal A ([Gambar 4.9](#)) sehingga baterai tidak lagi dalam rangkaian, amperemeter memberikan pulsa sesaat yang sama ke arah berlawanan dengan saat kapasitor sedang diisi.

Kali ini, arus dalam arah yang berlawanan telah memindahkan muatan $-q$ dari pelat sebelah kanan untuk membatalkan muatan $+q$ di pelat sebelah kiri. Kapasitor telah menjadi kosong.

Ingatlah bahwa dalam kawat logam arus dibawa oleh elektron bebas. Elektron bergerak ke arah yang berlawanan dengan arus konvensional ([lihat Topik 9](#)). Ketika kapasitor diisi, elektron bergerak dari terminal negatif baterai ke pelat kanan kapasitor, dan dari pelat kiri ke terminal positif baterai. Ketika kapasitor dilepaskan, elektron mengalir dari pelat kanan negatif kapasitor ke pelat kiri positif.

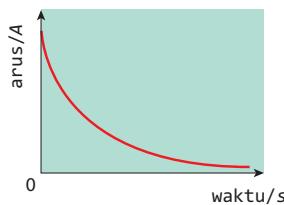
Percobaan yang dijelaskan menggunakan rangkaian pada [Gambar 4.9](#) menunjukkan bahwa ada arus sesaat ketika kapasitor dikosongkan. Sebuah resistor yang dihubungkan secara seri dengan kapasitor akan mengurangi arus, sehingga pengosongan kapasitor lebih lambat.

Rangkaian yang ditunjukkan pada [Gambar 4.10](#) dapat digunakan untuk menyelidiki lebih tepat bagaimana pengosongan kapasitor.



▲ Gambar 4.10 Rangkaian untuk menyelidiki pengosongan kapasitor

Ketika sakelar dua arah dihubungkan ke titik A, kapasitor akan terisi daya sampai beda potensial antara pelatnya sama dengan ggl sumber V_0 . Ketika sakelar dipindahkan ke B, kapasitor akan melepaskan muatan melalui resistor. Ketika sakelar membuat kontak dengan B, arus dapat direkam pada interval waktu yang teratur saat kapasitor dilepaskan.



▲ Gambar 4.11 Rangkaian untuk penyelidikan pengosongan muatan

Grafik pengosongan arus terhadap waktu ditunjukkan pada [Gambar 4.11](#).

Arus terlihat berubah dengan cepat pada awalnya, dan kemudian lebih lambat. Analisis yang lebih rinci menunjukkan bahwa penurunannya **eksponensial** – arus berkurang dengan fraksi yang sama selama interval waktu yang sama. Kita akan menemui perubahan eksponensial lagi ketika kita berurusan dengan peluruhan zat radioaktif ([Bab 1.2](#)) dan atenuasi ultrasonik dan sinar-X ([Topik 10](#)).



Semua kurva peluruhan eksponensial memiliki persamaan bentuk

$$x = x_0 e^{-kt}$$

dimana x adalah besaran yang mengalami peluruhan (dan x_0 adalah nilai x pada waktu $t = 0$), e sampai tiga desimal adalah bilangan 2,718 (basis logaritma natural) dan k adalah karakteristik konstanta peluruhan. Nilai k yang besar berarti peluruhananya cepat, dan nilai kecil berarti peluruhananya lambat.

Persamaan untuk pelepasan kapasitor kapasitansi C melalui resistor resistansi R adalah dalam bentuk:

$$Q = Q_0 e^{-t/CR}$$

Grafik [Gambar 4.11](#) dan [4.12](#) memiliki bentuk yang persis sama, dan dengan demikian persamaan untuk pengosongan arus I dalam kapasitor dapat ditulis sebagai

$$I = I_0 e^{-t/CR}$$

Selanjutnya, karena untuk kapasitor Q sebanding dengan V , maka persamaan untuk beda potensial V saat kapasitor dikosongkan dapat dituliskan sebagai

$$V = V_0 e^{-t/CR}$$

CONTOH SOAL 4E

Hitung waktu yang diperlukan untuk mengosongkan kapasitor dengan kapasitansi $2,5 \mu\text{F}$ melalui hambatan $0,5 \text{ M}\Omega$ sampai beda potensialnya berkurang 50%.

Jawaban

$$\begin{aligned} \text{Menggunakan } V &= V_0 e^{-t/CR}, 0,5 = e^{-t}/(2,5 \times 10^{-6} \times 0,5 \times 10^6) \\ &= e^{-t}/1,25. \end{aligned}$$

Mengambil logaritma natural dari kedua sisi, $\ln e^x = x$ sehingga

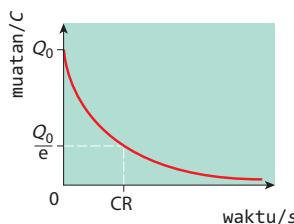
$$\ln 0,5 = -t/1,25, t = 0,693 \times 1,25 = \mathbf{0,87 \text{ s}}$$



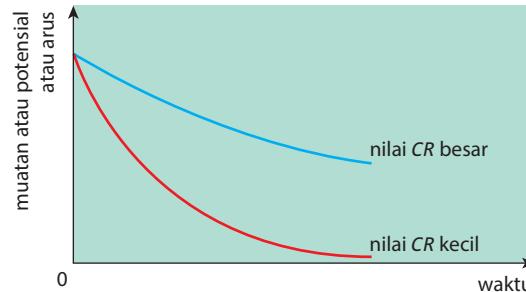
Konstanta waktu

Seiring berjalanannya waktu, kurva eksponensial pada **Gambar 4.12** semakin dekat dengan sumbu waktu, tetapi tidak pernah benar-benar memenuhiinya. Dengan demikian, tidak mungkin untuk mendapat waktu pengosongan kapasitor sepenuhnya.

Namun, kuantitas CR dalam persamaan peluruhan dapat digunakan untuk memberikan indikasi apakah peluruhan itu cepat atau lambat, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.13**.



▲ **Gambar 4.12** Grafik Muatan terhadap waktu untuk pengosongan muatan



▲ **Gambar 4.13** Kurva peluruhan untuk konstanta waktu besar dan kecil

CR disebut **konstanta waktu** dari rangkaian kapasitor-resistor.

CR memiliki satuan waktu, dan diukur dalam detik.

Kita dapat dengan mudah menunjukkan bahwa CR memiliki satuan waktu. Dari $C = Q/V$ dan $R = V/I$, maka $CR = Q/I$. Karena muatan Q dalam coulomb dan arus I dalam ampere, dan satu ampere sama dengan satu coulomb per detik, Q/I dalam detik.

Untuk mencari muatan Q pada pelat kapasitor setelah waktu $t = CR$, kita substitusikan ke persamaan peluruhan eksponensial

$$Q = Q_0 e^{-CR/CR} = Q_0 e^{-1} = Q_0/e = Q_0/2,718$$

Jadi

Konstanta waktu adalah waktu untuk muatan berkurang menjadi $1/e$ (atau $1/2.718$) dari nilai awalnya.

Ingat bahwa persamaan dasar untuk peluruhan dapat dalam bentuk muatan pada satu pelat atau arus pada kabel penghubung atau beda potensial pada kapasitor. Jadi, konstanta waktu dapat didefinisikan dalam bentuk muatan, arus atau beda potensial.

Dalam satu waktu konstan, muatan yang disimpan oleh kapasitor turun menjadi $1/e$ (kira-kira sepertiga) dari nilai awalnya. Selama konstanta waktu berikutnya akan turun dengan rasio yang sama, menjadi $1/e^2$, sekitar sepersembilan dari nilai pada awal peluruhan.

► CONTOH SOAL 4F

Kapasitor $250\ \mu\text{F}$ dihubungkan ke sumber 12V , dan kemudian dikosongkan melalui resistor $200\ \text{k}\Omega$. Hitung:

- muatan awal yang disimpan oleh kapasitor
- arus pelepasan awal
- nilai konstanta waktu
- muatan pada pelat setelah $100\ \text{s}$
- waktu yang diperlukan sehingga muatan yang tersisa adalah $1,8 \times 10^{-3}\ \text{C}$.

Jawaban

- Dari $Q = CV$, kita mendapatkan $Q = 250 \times 10^{-6} \times 12 = 3,0 \times 10^{-3}\ \text{C}$.
- Dari $I = V/R$, kita mendapatkan $I = 12/$

$$(200 \times 10^3) = 6,0 \times 10^{-5}\ \text{A}.$$

$$c. CR = 250 \times 10^{-6} \times 200 \times 10^3 = 50\ \text{s}.$$

- Setelah $50\ \text{s}$, muatan pada pelat adalah

$$Q_0/e = (3,0 \times 10^{-3})/2,718 = 1,1 \times 10^{-3}\ \text{C};$$

setelah 50 detik berikutnya,

muatannya adalah

$$= (1,1 \times 10^{-3})/2,718 = 4,1 \times 10^{-4}\ \text{C}.$$

- Gunakan $Q = Q_0 e^{-t/CR}$, $1,8 \times 10^{-3} = 3,0 \times 10^{-3} e^{-t/50}$,

$$\text{atau } 0,60 = e^{-t/50}.$$

Mengambil logaritma natural dari

kedua sisi, $\ln 0,60 = -0,510 = -t/50$,

atau $t = 26\ \text{s}$.

Soal Latihan

- 5 Sebuah kapasitor yang memiliki kapasitansi $12,0\ \mu\text{F}$ dihubungkan dengan baterai $20\ \text{V}$ sehingga terjadi pengisian kapasitor. Kemudian, kapasitor dikosongkan kembali $20\ \text{V}$, dan kemudian dilepaskan melalui resistor $0,50\ \text{M}\Omega$. Hitung:
- muatan awal kapasitor
 - muatan pada kapasitor $2,8\ \text{s}$ setelah pengosongan dimulai
 - beda potensial pada kapasitor saat ini.

Penggunaan kapasitor

Beberapa penggunaan kapasitor telah diuraikan. Seperti yang akan terlihat pada [Topik 6.2](#), kapasitor juga dapat digunakan dalam rangkaian untuk memberikan keluaran beda potensial yang lebih stabil dan mengurangi 'riak' pada arus atau tegangan yang disearahkan.

RANGKUMAN

- Kapasitor menyimpan energi. Kapasitor memungkinkan penyimpanan muatan yang terpisah.
- Kapasitansi C dari konduktor terisolasi diberikan oleh $C = Q/V$, di mana Q adalah muatan pada konduktor dan V adalah potensialnya.
- Kapasitansi C kapasitor pelat sejajar diberikan oleh $C = Q/V$, di mana Q adalah muatan pada salah satu pelat kapasitor dan V adalah beda potensial V antara pelatnya.
- Satuan kapasitansi, farad (F), adalah satu coulomb per volt.
- Energi yang tersimpan dalam kapasitor bermuatan diberikan oleh

$$Ep = \frac{1}{2} QV$$

$$Ep = \frac{1}{2} CV^2$$

$$Ep = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}$$

- Luas daerah di bawah grafik muatan potensial sama dengan energi yang tersimpan dalam kapasitor.
- Kapasitansi gabungan C dari dua atau lebih kapasitor yang dihubungkan seri diberikan oleh:

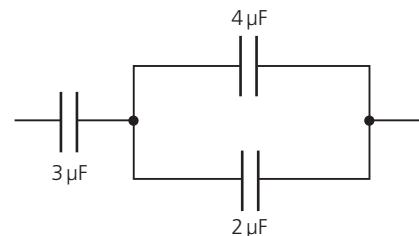
$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$$

- Kapasitansi gabungan C dari dua atau lebih kapasitor yang dihubungkan secara paralel diberikan oleh:

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$
- Ketika kapasitor yang bermuatan dilepaskan, muatan pada pelat meluruh secara eksponensial. Persamaan peluruhannya adalah $Q = Q_0 e^{-t/CR}$ dimana Q_0 adalah muatan awal.
- Persamaan peluruhan yang sama $x = x_0(e^{-t/CR})$ berlaku untuk muatan Q pada salah satu pelat kapasitor, beda potensial V melintasi kapasitor dan untuk pengosongan arus I .
- Konstanta waktu dari rangkaian, yang diberikan oleh $\tau = CR$, adalah waktu bagi kuantitas Q , V , atau I untuk meluruh menjadi $1/e$ dari nilai awalnya.
- Waktu yang diperlukan untuk kuantitas Q , V , atau I untuk meluruh ke nilai selanjutnya dapat ditemukan dengan mengatur ulang persamaan dan mengambil logaritma ke basis e (\ln).

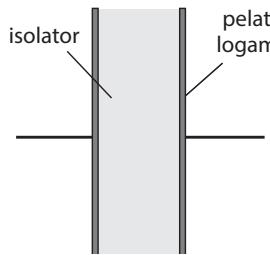
ASESMEN FORMATIF

- 1** Gambar 4.14 menunjukkan susunan kapasitor.
- Hitung kapasitansi total dari susunan ini.
 - Kapasitor $4\ \mu\text{F}$ terputus. Hitung kapasitansinya.



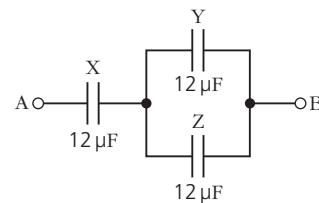
▲ Gambar 4.14

- 2** Sebuah kapasitor $15\ \mu\text{F}$ diberi muatan dari baterai $6,0\text{ V}$.
- Hitung:
 - energi potensial listrik yang disimpan oleh kapasitor,
 - muatan yang tersimpan pada setiap pelat kapasitor.
 - Kapasitor bermuatan pengosongan melalui resistor $200\ \text{k}\Omega$. Hitung:
 - arus pengosongan awal,
 - konstanta waktu,
 - beda potensial pada kapasitor setelah kapasitor dikosongkan selama $4,8\text{ s}$.
- 3 a i** Tentukan kapasitansi. [1]
- ii** Sebuah kapasitor terbuat dari dua pelat logam, terisolasi satu sama lain, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 19.15. Jelaskan mengapa kapasitor dikatakan menyimpan energi tetapi tidak menyimpan muatan. [4]



▲ Gambar 4.15

- b** Tiga kapasitor tak bermuatan X, Y dan Z, masing-masing berkapasitas $12\ \mu\text{F}$ dihubungkan seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.16**.



▲ **Gambar 4.16**

Beda potensial $9,0\text{ V}$ diterapkan antara titik A dan B.

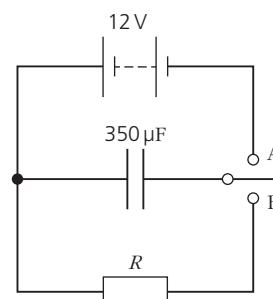
- i** Hitung kapasitansi gabungan dari kapasitor X, Y dan Z.

[2]

- ii** Jelaskan mengapa, ketika beda potensial $9,0\text{ V}$ diterapkan, muatan pada salah satu pelat kapasitor X adalah $72\ \mu\text{C}$. [2]

- iii** Tentukan:
beda potensial pada kapasitor X, [1]
muatan pada salah satu pelat kapasitor Y. [2]

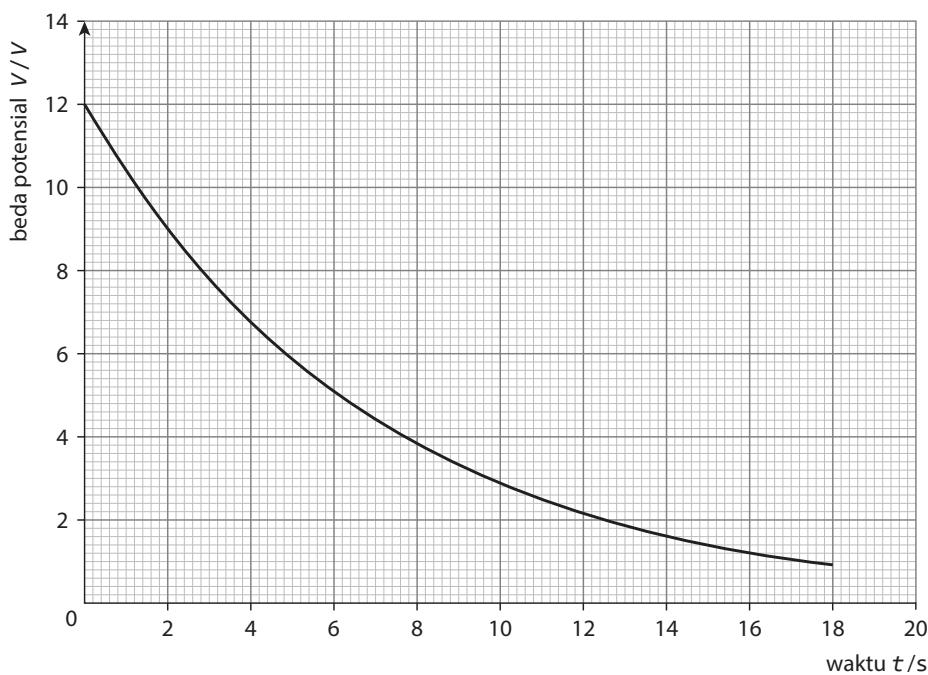
- 4** Sebuah kapasitor kapasitansi $350\ \mu\text{F}$ dan resistor resistansi R dihubungkan ke rangkaian yang ditunjukkan pada **Gambar 4.17**.



▲ **Gambar 4.17**

- 5** Variasi waktu dari beda potensial V di kapasitor ditunjukkan pada **Gambar 4.18**.

Ketika sakelar berada di posisi A, kapasitor diisi dengan beda potensial 12 V . Sakelar kemudian dipindahkan ke posisi B sehingga, pada waktu $t = 0$, kapasitor mulai pengosongan. Variasi waktu t dari beda potensial V melintasi kapasitor ditunjukkan pada **Gambar 4.18**.



▲ Gambar 4.18

- a Untuk pengosongan kapasitor melalui resistor:
- i nyatakan apa yang dimaksud dengan konstanta waktu,
 - ii Gunakan data dari Gambar 4.18 untuk menentukan nilai konstanta waktu,
 - iii gunakan jawaban Anda di ii untuk menentukan resistansi R .
- b Sebuah resistor kedua, juga R , dihubungkan secara seri dengan resistor pada [Gambar 4.17](#). Kapasitor diisi ulang dan kemudian dibiarkan kosong.
- i Dengan mengacu pada jawaban Anda di a ii, nyatakan nilai baru dari konstanta waktu.
 - ii Pada salinan Gambar 4.18, gambarkan untuk pengosongan kedua ini, variasi dengan waktu t dari perbedaan potensial V melintasi kapasitor untuk waktu $t = 0$ sampai waktu $t = 18\text{ s}$.

■ Catatan: $(V_1^2 - V_2^2)$ tidak sama dengan $(V_1 - V_2)^2$, kesalahan umum di kalangan siswa!

5 Medan Magnet

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

5.1. Konsep medan magnet

1. menjelaskan medan magnet sebagai contoh dari medan gaya yang dihasilkan baik oleh muatan bergerak maupun magnet permanen.
2. menggambarkan medan magnet dalam bentuk garis-garis medan.

5.2. Gaya pada konduktor berarus listrik

1. mengidentifikasi gaya yang bekerja pada konduktor berarus listrik dalam medan magnetik.
2. menerapkan persamaan $F = BIL \sin \theta$, dengan arah seperti yang diinterpretasikan oleh kaidah tangan kiri Fleming
3. mendefinisikan kerapatan fluks magnet sebagai gaya yang bekerja per satuan arus per satuan panjang pada kawat yang ditempatkan tegak lurus terhadap medan magnet

5.3. Gaya pada muatan bergerak

1. menentukan arah gaya pada muatan yang bergerak dalam medan magnet
2. menerapkan persamaan $F = BQvsin \theta$
3. mengidentifikasi penyebab tegangan Hall
4. memformulasikan dan menerapkan persamaan $V_H = BI/(ntq)$ dengan t = ketebalan
5. menjelaskan penggunaan sensor Hall untuk mengukur kerapatan fluks magnet

6. menggambarkan gerak partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet seragam yang tegak lurus terhadap arah gerak partikel
7. menjelaskan medan listrik dan medan magnet dapat digunakan dalam pemilihan kecepatan

5.4. Medan magnet akibat arus listrik

1. menggambarkan sketsa pola medan magnet akibat arus pada kawat lurus panjang, kumparan melingkar datar dan solenoida panjang
2. mengidentifikasi peristiwa meningkatnya medan magnet akibat arus dalam solenoida oleh inti besi
3. menjelaskan penyebab gaya antara konduktor berarus dan menentukan arah gaya-gaya tersebut

5.5. Induksi elektromagnetik

1. mendefinisikan fluks magnet sebagai hasil kali kerapatan fluks magnet dan luas penampang yang tegak lurus terhadap arah kerapatan fluks magnet
2. menerapkan persamaan $\Phi = BA$
3. menerapkan konsep tautan fluks magnet
4. mendeskripsikan hasil percobaan yang menunjukkan:
 - perubahan fluks magnetik dapat menimbulkan GGL induksi dalam rangkaian

- GGL induksi yang dihasilkan bertujuan untuk melawan perubahan fluks yang memproduksinya.
- faktor-faktor yang memengaruhi besar GGL induksi
- menerapkan hukum Faraday dan hukum Lenz mengenai induksi elektromagnetik

Pemahaman Bermakna

- Mengidentifikasi bahan magnetik.
- Magnet menciptakan medan magnet di sekitarnya.
- Medan magnet dihasilkan oleh kawat konduktor dan kumparan berarus listrik.
- Hukum magnet – kutub sejenis tolak menolak, kutub berbeda tarik menarik.



5.1 Konsep Medan Magnet

Beberapa sifat magnet telah dikenal selama berabad-abad. Orang Yunani kuno menemukan bijih besi yang disebut lodestone (batu sihir atau batu magnit). Bijih besi ketika digantung pada seutas benang, akan berhenti dan selalu menunjuk ke arah yang sama. Hal ini merupakan prinsip dasar dari kompas magnetik yang telah digunakan sejak sekitar 1500 SM sebagai alat navigasi.

Fakta menunjukkan kompas magnetik yang menggantung bebas akan berhenti menunjuk ke utara-selatan. Ujung magnet disebut sebagai kutub. Kutub yang mengarah ke utara disebut sebagai kutub pencari utara (kutub utara atau kutub U) dan yang lainnya disebut kutub pencari selatan (kutub selatan atau kutub S). Sekarang diketahui kompas berperilaku seperti ini karena Bumi merupakan sebuah magnet.

Magnet menimbulkan gaya satu sama lain. Gaya tarik-menarik atau tolak-menolak ini digunakan di banyak mainan anak-anak, di kait pintu dan ‘magnet kulkas’. Pengaruh gaya didefinisikan dalam hukum magnet sebagai berikut:

Kutub yang sejenis tolak menolak.

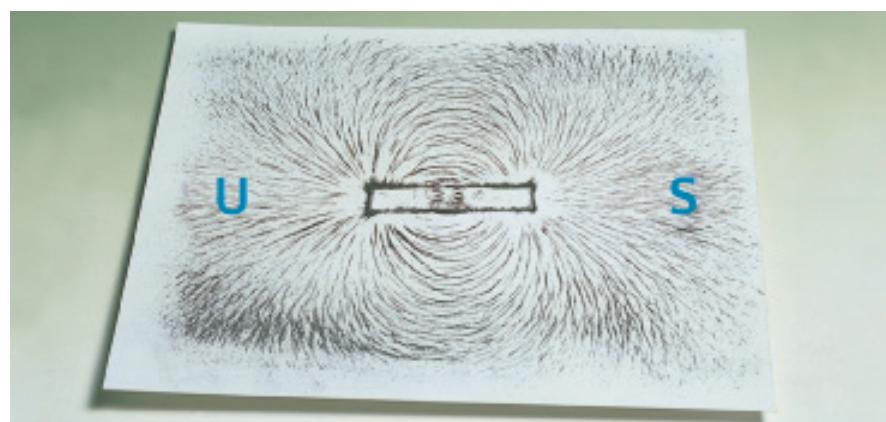
Kutub yang tidak sejenis tarik menarik.

Hukum magnet menyatakan bahwa di sekitar magnet, terdapat daerah dimana kutub magnet akan mengalami gaya. Daerah ini dikenal sebagai medan magnet.

Medan magnet adalah daerah ruang dimana kutub magnet mengalami gaya.

Medan magnet tidak dapat terlihat tetapi dapat digambarkan oleh garis gaya magnet atau garis medan magnet. Kita akan kembali nanti dalam topik ini untuk pemahaman yang lebih lengkap mengenai kerapatan dari garis-garis gaya magnet dapat dihubungkan dengan jumlah medan persatuannya luas yang disebut ‘fluks’ magnetik. Cara sederhana untuk membayangkan garis medan magnet adalah dengan membayangkan satu garis arah gerak bebas kutub utara magnet jika ditempatkan pada suatu medan. Garis-garis medan magnet dapat ditunjukkan menggunakan kompas kecil (jarum kompas) atau dengan menggunakan serbuk besi dan kompas ([Gambar 5.1](#)).

▲ **Gambar 5.1** Serbuk besi sejajar dengan medan magnet dari magnet batang yang berada di bawah lembaran kertas. Sebuah jarum kompas akan memberikan arah medan.



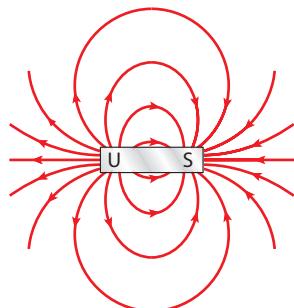
Garis-garis medan magnet magnet batang ditunjukkan pada [Gambar 5.2](#).

Pengaruh medan magnet bumi tidak dibahas karena medan bumi relatif lemah dan hanya akan berpengaruh pada jarak tertentu dari magnet. Penting untuk disadari bahwa, meskipun medan magnet telah ditarik dalam dua dimensi, medan magnet yang sebenarnya adalah tiga dimensi.



Untuk setiap medan magnet:

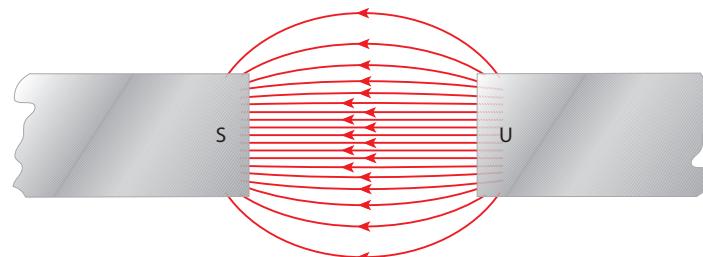
- » garis medan magnet keluar dari kutub utara dan masuk ke kutub selatan
- » panah pada setiap garis menunjukkan arah pergerakan kutub utara magnet bebas akan bergerak jika ditempatkan pada titik garis tersebut.
- » garis medan magnet adalah kurva halus yang tidak pernah bersentuhan atau bersilangan
- » kuat medan magnet digambarkan dengan kerapatan garis gaya magnet, semakin rapat garisnya, semakin kuat medan magnetnya.



▲ Gambar 5.2 Pola medan magnet untuk magnet batang

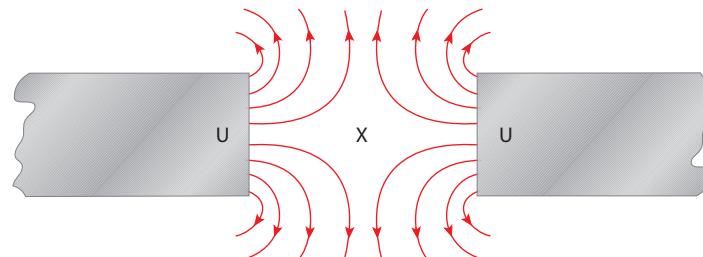
Dapat dilihat bahwa sifat-sifat ini sangat mirip dengan garis-garis medan listrik ([Topik 3.1](#)).

[Gambar 5.3](#) mengilustrasikan pola medan magnet antara kutub utara magnet dan kutub selatan magnet lainnya. Pola ini mirip dengan yang dihasilkan oleh kutub magnet tapal kuda.



▲ Gambar 5.3 Pola medan magnet antara kutub utara dan kutub selatan

[Gambar 5.4](#) menunjukkan medan magnet antara kutub utara dua magnet. Medan magnet yang disebabkan oleh salah satu magnet berlawanan dengan medan magnet yang lain. Garis-garis medan tidak dapat bersilangan dan akibatnya ada titik X yang dikenal sebagai titik netral, dimana tidak ada medan magnet yang dihasilkan karena kedua medan itu sama besarnya tetapi berlawanan arah.



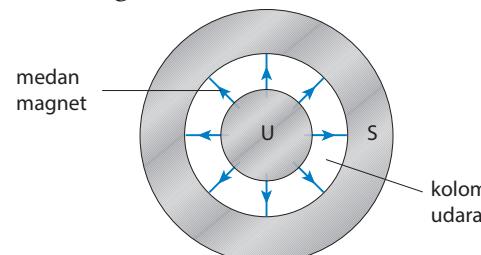
▲ Gambar 5.4 Pola medan magnet antara dua kutub utara

► CONTOH SOAL 5A

Sebuah magnet melingkar dibuat dengan kutub utara di tengah, dipisahkan dari kutub selatan melingkar di sekitarnya oleh celah udara. Gambarlah garis-garis medan magnet pada celah tersebut ([Gambar 5.5](#)).

Jawaban

Medan magnet, celah udara



▲ Gambar 5.5

Soal Latihan

- 1 Gambarlah diagram yang menunjukkan medan magnet antar kutub selatan dua magnet yang berdekatan.
- 2 Dua buah magnet batang ditempatkan pada permukaan horizontal ([Gambar 5.6](#)).
Gambar dua magnet, dan buat sketsa garis medan magnet di sekitarnya. Pada diagram Anda, tandai posisi setiap titik netral (titik dimana tidak ada medan magnet yang dihasilkan).



▲ **Gambar 5.6)**



▲ **Gambar 5.7** Hans Christian Oersted

Medan magnetik di sekitar arus listrik

Penemuan pertama kali medan magnetik dari arus listrik dibuat pada tahun 1820 oleh **Oersted**, seorang fisikawan Denmark ([Gambar 5.7](#)).

Dia menyadari bahwa kompas dibelokkan ketika didekati ke kawat yang dilalui arus listrik. Saat ini diketahui bahwa semua arus listrik menghasilkan medan magnet. Besar medan magnet tergantung pada besar arus dan bentuk (konfigurasi) kawat yang dilalui arus. Besar medan magnet pada berbagai bentuk kawat akan dibahas secara lebih rinci di [Topik 5.4](#). Oleh karena itu, pemahaman yang lebih lengkap tentang medan magnet yaitu:

Medan magnet merupakan daerah ruang dimana gaya dialami oleh muatan bergerak maupun oleh magnet permanen.



5.2 Gaya pada Konduktor Berarus

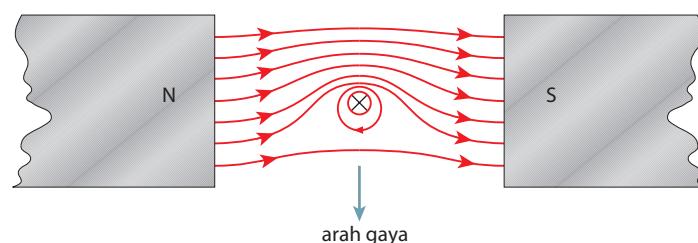
Kita telah melihat garis gaya magnet menunjukkan arah dan bentuk medan magnet. Begitu juga, jarak antara garis menunjukkan kuat medan. Namun, besar kuat medan magnet tersebut belum ditentukan. Fisika merupakan ilmu yang berkaitan dengan pengukuran sehingga, topik ini tidak akan lengkap tanpa mendefinisikan dan mengukur

kuat medan magnet. Kuat medan magnet didefinisikan melalui gaya pada konduktor berarus.

Efek Motor (Gaya Elektromagnetik)

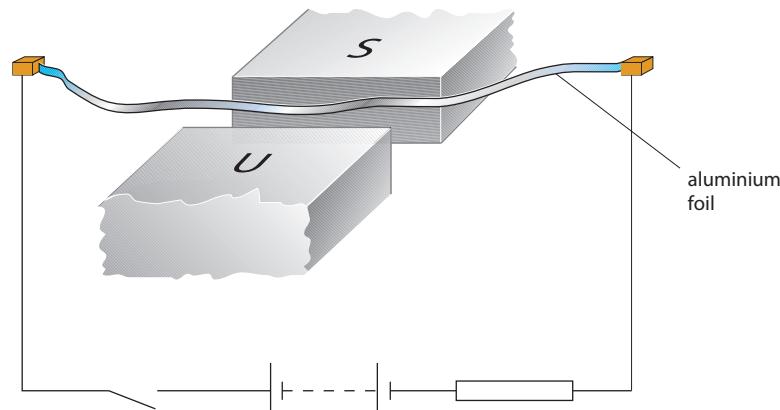
Interaksi medan magnet yang dihasilkan oleh dua magnet menimbulkan gaya tarik menarik atau tolak menolak antara keduanya. Sebuah kawat berarus menghasilkan medan magnet di sekitar kawat ([lihat Topik 5.4](#)). Jika sebuah kawat ditempatkan di antara kutub magnet permanen dan arus dilewatkan melalui kawat, maka medan magnet kawat berarus dan magnet permanen tersebut akan berinteraksi, sehingga menyebabkan gaya. Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 5.8](#).

▲ Gambar 5.8 Medan magnet yang berinteraksi dari konduktor berarus dan kutub magnet



Keberadaan gaya dapat ditunjukkan dengan peralatan yang ditunjukkan pada [Gambar 5.9](#).

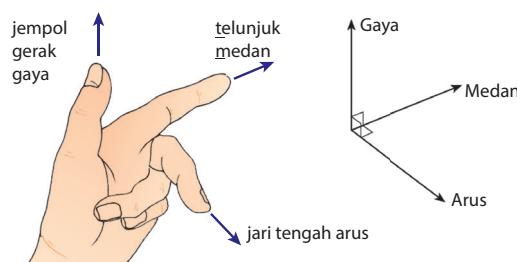
▲ Gambar 5.9 Mendemonstrasikan efek motor yang bekerja pada sepotong aluminium



Potongan aluminium foil dikaitkan secara longgar di antara kutub magnet tapal kuda sehingga foil berada pada sudut yang tepat terhadap medan magnet. Ketika arus dialirkkan, foil meregang dan menjadi tegang, ini menunjukkan ada gaya yang bekerja padanya. Arah gaya, yang dikenal sebagai gaya elektromagnetik, bergantung pada arah medan magnet dan arus. Fenomena ini, ketika kawat berarus berada pada sudut medan magnet, disebut efek motor (gaya elektromagnetik) dan digunakan dalam motor listrik.

Arah gaya relatif terhadap arah arus dan medan magnet dapat diprediksi dengan menggunakan aturan tangan kiri Fleming. Hal ini diilustrasikan pada [Gamb. 5.10](#).

▲ Gambar 5.10 Kaidah tangan kiri Fleming's



Jika dua jari, jari telunjuk dan ibu jari tangan kiri diarahkan saling tegak lurus satu sama lain dengan ibu jari ke arah bidang dan jari telunjuk ke arah arus, maka ibu jari memberikan arah gaya atau gerakan.

Namun, harus diingat bahwa jari telunjuk digunakan untuk menunjukkan arah arus konvensional. Perhatikan, jika kawat ditahan, kawat tidak bergerak. Namun gaya elektromagnetiknya akan tetap ada.

Percobaan menunjukkan bahwa gaya elektromagnetik F sebanding dengan arus I dan sebanding dengan panjang kawat L dalam medan magnet. Gaya juga tergantung pada sudut antara kawat dan arah medan magnet. Oleh karena itu dihasilkan persamaan $F \propto IL \sin \theta$.

Jika kawat dan garis medan sejajar satu sama lain, $\theta = 0$ dan $\sin \theta$ sama dengan 0. Oleh karena itu, tidak ada gaya yang diberikan pada kawat jika sejajar dengan medan magnet.

Persamaannya dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$F = BIL \sin \theta$$

dengan B adalah sebuah besaran. Jika medan magnet homogen, besaran B tergantung pada kuat magnet dan, jika magnet yang lebih kuat digunakan, konstanta memiliki nilai yang lebih besar. Oleh karena itu, persamaan tersebut dapat digunakan sebagai persamaan yang mendefinisikan kuat medan magnet. Kuat medan magnet lebih tepat disebut **kerapatan fluks magnet**.

Persamaannya dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$B = \frac{F}{IL \sin \theta}$$

Sehingga,

Kerapatan fluks magnet B secara numerik sama dengan gaya per satuan arus per satuan panjang pada kawat lurus yang ditempatkan tegak lurus terhadap medan magnet seragam,

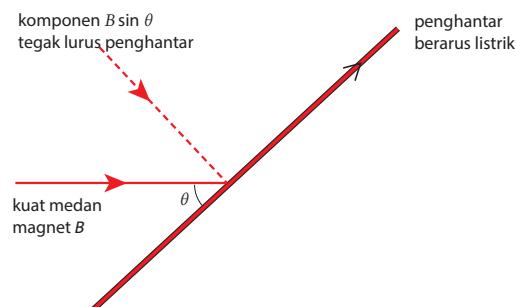
Kerapatan fluks magnet B diukur dalam tesla (T). Seperti yang akan kita lihat di [Topik 5.5](#), nama alternatif untuk satuan ini adalah **weber per meter persegi** (Wb m^{-2}).

Satu tesla adalah kerapatan fluks magnet seragam yang bekerja secara tegak lurus pada kawat lurus panjang yang membawa arus 1 ampere, menyebabkan gaya per satuan panjang 1 N m^{-1} pada konduktor.

Karena gaya diukur dalam newton, panjang dalam meter dan arus dalam ampere, maka dapat diturunkan dari persamaan definisi kerapatan fluks magnet bahwa tesla juga dapat dinyatakan sebagai $\text{Nm}^{-1}\text{A}^{-1}$. Satuan ini melibatkan gaya yang merupakan besaran vektor dan dengan demikian kerapatan fluks magnet juga merupakan vektor.

Saat menggunakan persamaan $F = BIL \sin \theta$, istilah $B \sin \theta$ sebagai komponen kerapatan fluks magnet yang tegak lurus terhadap konduktor (lihat [Gambar 5.11](#)).

▲ **Gambar 5.11** $B \sin \theta$ adalah komponen medan magnet yang tegak lurus terhadap kawat.



Tesla merupakan satuan besar kerapatan fluks. Magnet yang sangat kuat mungkin memiliki kerapatan fluks di antara kutubnya beberapa tesla. Kerapatan fluks magnet akibat Bumi di UK (Britania Raya) adalah sekitar $44 \mu\text{T}$ pada sudut 66° terhadap horizontal.

CONTOH SOAL 5B

Komponen horizontal kerapatan fluks magnet bumi adalah $1,8 \times 10^{-5} \text{ T}$. Arus dalam kabel horizontal adalah 120 A. Hitung, untuk kabel ini:

- gaya maksimum per satuan panjang
- gaya minimum per satuan panjang.

Dalam setiap kasus, nyatakan sudut antara kabel dan medan magnet.

Jawaban:

- Gaya per satuan panjang = $F/L = BIs \in \theta$

gaya per satuan panjang memiliki nilai maksimum pada $\theta = 90^\circ$ dan $\sin \theta = 1$.

$$\text{Gaya per satuan panjang} = 1,8 \times 10^{-5} \times 120 = 2,16 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$$

Gaya maksimum per satuan panjang = $2,16 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$ ketika kabel memiliki sudut tegak lurus terhadap medan.

- Gaya per satuan panjang minimum ketika $\theta = 0$ dan $\sin \theta = 0$.

Gaya minimum per satuan panjang = 0 ketika kabel searah medan magnet.

Soal Latihan

- Panjang efektif filamen dalam bola lampu adalah 3,0 cm dan, untuk tingkat kecerahan normal, arus dalam filamen adalah 0,40 A. Hitung gaya elektromagnetik maksimum pada filamen ketika berada di medan magnet bumi dengan kerapatan fluks $42 \mu\text{T}$.
- Sebuah kawat lurus yang dialiri arus 7,5 A terletak dalam medan magnet homogen dengan kerapatan fluks $4,0 \text{ mT}$. Hitung gaya elektromagnetik per satuan panjang kawat ketika sudut antara kawat dan medan adalah:
 - 90°
 - 60°



5.3 Gaya pada Muatan Bergerak

Arus listrik adalah muatan yang bergerak. Karena muatan selalu dikaitkan dengan partikel, maka arus dalam kawat merupakan pergerakan partikel bermuatan. Jika kawat berarus ditempatkan dalam medan magnet, kawat tersebut mungkin mengalami gaya tergantung pada sudut antara medan dan kawat. Gaya tersebut timbul dari gaya pada

masing-masing partikel bermuatan yang bergerak di dalam kawat.

Sebelumnya telah ditunjukkan bahwa kawat dengan panjang L yang membawa arus I pada sudut θ tertentu terhadap suatu medan magnet seragam dengan kerapatan fluks B mengalami gaya F yang diberikan oleh

$$F = BIL \sin \theta$$

Jika ada n partikel bermuatan dalam panjang L kawat, masing-masing membawa muatan q , yang melewati suatu titik di kawat dalam waktu t , maka arus I dalam kawat sebesar:

$$I = \frac{nq}{t}$$

dan kelajuan v partikel bermuatan diberikan oleh $v = L/t$. Sehingga,

$$F = B \times \left(\frac{nq}{t} \right) \times L \sin \theta$$

dan

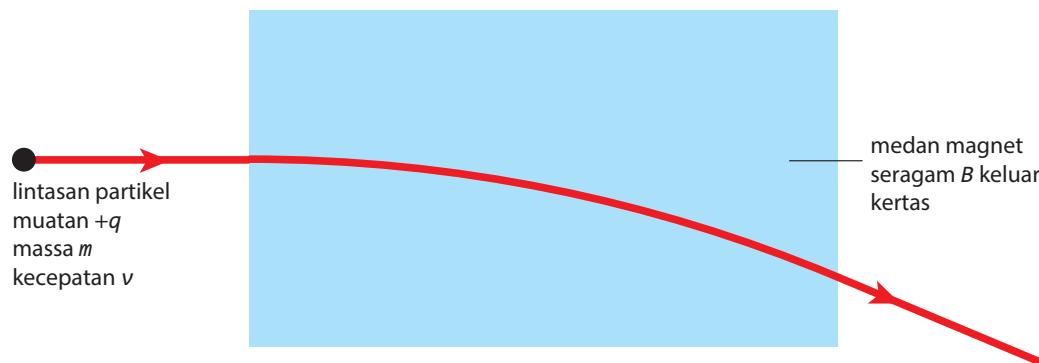
$$F = Bnqvsin \theta$$

Gaya ini adalah gaya pada n partikel bermuatan. Oleh karena itu,

Gaya pada partikel muatan q yang bergerak dengan kecepatan v pada sudut tertentu terhadap medan magnet seragam dengan kerapatan fluks B diberikan oleh $F = Bqvsin \theta$.

Arah gaya akan diberikan oleh aturan tangan kiri Fleming (lihat [Gambar 5.10](#)). Namun, harus diingat bahwa jari telunjuk digunakan untuk menunjukkan arah arus konvensional. Jika partikel bermuatan positif, maka jari telunjuk diletakkan searah dengan arah kecepatan. Namun, jika partikel bermuatan negatif (misalnya elektron), jari harus menunjuk ke arah yang berlawanan dengan kecepatan.

Perhatikan partikel bermuatan positif bermassa m yang membawa muatan q dan bergerak dengan kecepatan v seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 5.12](#).



▲ Gambar 5.12 Lintasan partikel bermuatan dalam medan magnet

Partikel memasuki medan magnet homogen dengan kerapatan fluks B yang tegak lurus terhadap arah gerak partikel. Saat partikel memasuki medan, partikel akan mengalami gaya tegak lurus ke arahnya. Gaya ini tidak akan mengubah kelajuan partikel tetapi akan mengubah arah geraknya. Saat partikel bergerak melalui medan, gaya akan tetap konstan, karena kelajuannya tidak berubah, dan akan selalu tegak lurus terhadap arah gerak. Oleh karena itu, lintasan partikel akan bergerak dalam bentuk lingkaran dengan jari-jari r ([lihat Topik Gerak Melingkar di kelas XI](#)).

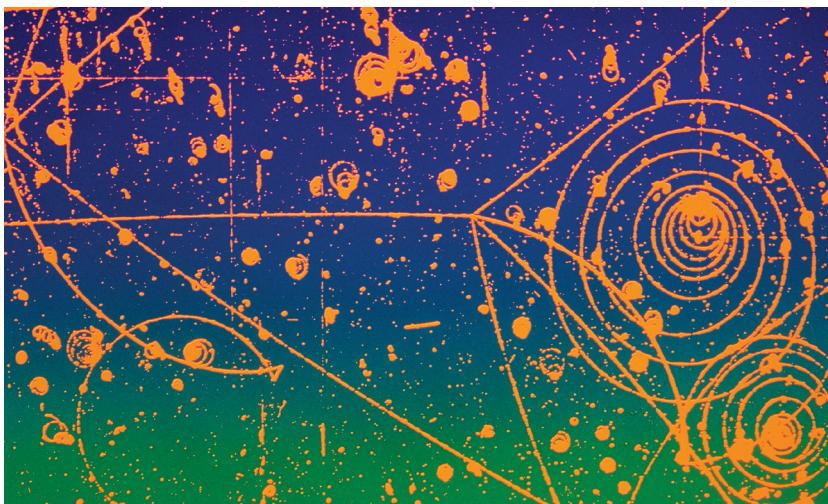
Gaya $F = Bqv \sin \theta$ (dalam kasus ini, $\sin \theta = 1$), menghasilkan gaya sentripetal untuk gerak melingkar. Oleh karena,

$$\text{Gaya sentripetal} = mv^2/r = Bqv$$

atau,

$$\text{Lintasan jari-jari } r = \frac{mv}{Bq}$$

Manfaat persamaan ini yaitu jika kecepatan partikel dan jari-jari lintasannya dihitung, maka muatan spesifik, yaitu perbandingan muatan terhadap massa q/m , dapat dihitung. Kemudian, jika muatan pada partikel diketahui, massanya dapat dihitung. Teknik ini juga digunakan dalam penelitian nuklir untuk mengidentifikasi beberapa partikel elementer. Jejak partikel bermuatan dibuat terlihat di kamar gelembung ([Gambar 5.13](#)). Dengan menganalisis jejak partikel ini, kita dapat mengetahui tanda muatan pada partikel dan muatan spesifiknya.



▲ Gambar 5.13 Jejak partikel yang dihasilkan di kamar gelembung

CONTOH SOAL 5C

Elektron dipercepat hingga kecepatan $9,1 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$. Elektron kemudian masuk ke daerah fluks magnet homogen dengan kerapatan fluks $0,50 \text{ mT}$. Lintasan elektron dalam medan berupa lingkaran dengan jari-jari $10,2 \text{ cm}$. Hitung:

- muatan spesifik elektron
- massa elektron, dengan asumsi muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Jawaban

- $$\begin{aligned} e/m &= v/Br \\ &= 9,1 \times 10^6 / (0,50 \times 10^{-3} \times 0,102) \\ &= 1,8 \times 10^{11} \text{ C kg}^{-1} \end{aligned}$$
- $$\begin{aligned} e/m &= 1,8 \times 10^{11} = 1,6 \times 10^{-19} / m \\ m &= 9,0 \times 10^{-31} \text{ kg} \end{aligned}$$

EKSTENSI

Muatan spesifik elektron: *The Fine Beam Tube*

Muatan spesifik merupakan perbandingan muatan q pada partikel dan massanya m .

$$\text{Muatan spesifik} = q/m$$

Seperti yang telah disebutkan, muatan spesifik dapat memberi kita informasi tentang sebuah partikel dan, jika muatan pada partikel diketahui, maka massa partikel dapat ditentukan.

Muatan pada elektron adalah $1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$. Penentuan muatan spesifik pada elektron memungkinkan kita untuk mendapatkan nilai massanya.

Kita telah mengetahui sebuah partikel bermassa m dan muatan q bergerak dengan kecepatan v tegak lurus terhadap medan magnet seragam dengan kerapatan fluks B mengalami gaya F sebesar

$$F = Bqv$$

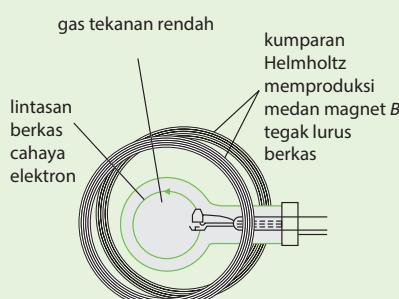
Arah gaya ini sesuai dengan aturan tangan kiri Fleming dan selalu tegak lurus terhadap kecepatan, sehingga menimbulkan gerakan melingkar

$$Bqv = mv^2/r$$

Mengatur ulang persamaan,

$$q/m = v/Br$$

Perbandingan muatan/massa (e/m) untuk sebuah elektron – muatan spesifiknya – dapat ditentukan dengan menggunakan sebuah alat *Fine Beam Tube* (tabung berkas sinar tipis), seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 5.14](#).



Gambar 5.14 Fine-Beam Tube

Lintasan elektron dibuat terlihat pada gas bertekanan rendah di dalam tabung, dengan demikian jari-jari orbit dapat diukur. Dengan mempercepat elektron melalui beda potensial V yang diketahui, kecepatannya v saat memasuki daerah medan magnet dapat dihitung (lihat Gerak partikel bermuatan dalam medan listrik pada [Topik 3.2](#)) menggunakan

$$eV = \frac{1}{2} mev^2$$

Medan magnet ditimbulkan oleh sepasang kumparan berarus (kumparan Helmholz, lihat [Gambar 5.27](#)).

Dengan menggabungkan $e/me = v/Br$ and $eV = \frac{1}{2} m_e v^2$

Maka:

Muatan spesifik pada elektron $e/m_e = 2V/B^2r^2$.

Nilai untuk muatan e dan massa m_e sebesar:

muatan $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$

masa $me = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$



▲ Gambar 5.15 Elektron bergerak dengan lintasan heliks

Sangat menarik memutar tabung berkas sinar sedikit, sehingga kecepatan elektron tidak tegak lurus terhadap medan magnet. Dalam hal ini, jalur elektron terlihat sebagai heliks (seperti gulungan pegas). Komponen kecepatan tegak lurus terhadap medan menimbulkan gerak melingkar. Namun, ada juga komponen kecepatan di sepanjang arah medan. Tidak ada gaya pada elektron yang dihasilkan dari komponen kecepatan ini. Akibatnya, elektron melakukan gerak melingkar dan bergerak ke arah yang tegak lurus terhadap bidang lingkaran. Lingkaran ‘ditarik keluar’ menjadi heliks ([Gambar 5.15](#)). Lintasan heliks merupakan aspek penting dari memfokuskan berkas elektron oleh medan magnet dalam mikroskop elektron ([Gambar 5.16](#)).



▲ Gambar 5.16 Teknisi Laboratorium menggunakan mikroskop elektron

Soal Latihan

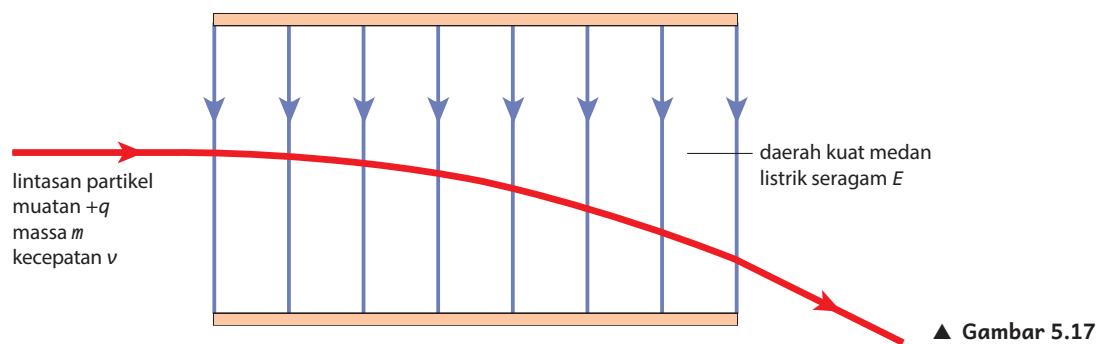
- 5 Elektron dipercepat melalui beda potensial 250 V. Elektron kemudian melewati daerah fluks magnet homogen dengan kerapatan fluks 0,58 mT. Lintasan elektron tegak lurus terhadap medan magnet. Apabila muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ C dan massanya adalah $9,1 \times 10^{-31}$ kg, hitung:
- kecepatan elektron yang dipercepat
 - jari-jari lintasan melingkar dalam medan magnet.

Selektor kecepatan partikel bermuatan

Kita telah melihat ([Topik 3.2](#)) ketika partikel bermassa m dan muatan $+q$ memasuki medan listrik dengan kuat medan E , maka ada gaya F_E pada partikel yang diberikan oleh

$$F_E = qE$$

Jika kecepatan partikel sebelum memasuki medan adalah v dan tegak lurus terhadap garis medan ([Gambar 5.17](#)), partikel akan mengikuti lintasan parabola saat melewati medan.

▲ **Gambar 5.17**

Sekarang anggap bahwa medan magnet seragam bekerja di daerah yang sama dengan medan listrik. Jika medan ini bekerja ke arah bawah bidang halaman buku, maka dengan aturan tangan kiri Fleming, sebuah gaya akan bekerja pada partikel bermuatan dalam arah yang berlawanan dengan gaya yang disebabkan oleh medan listrik. Besarnya F_B dari gaya ini adalah

$$F_B = Bqv$$

dimana B adalah kerapatan fluks medan magnet.

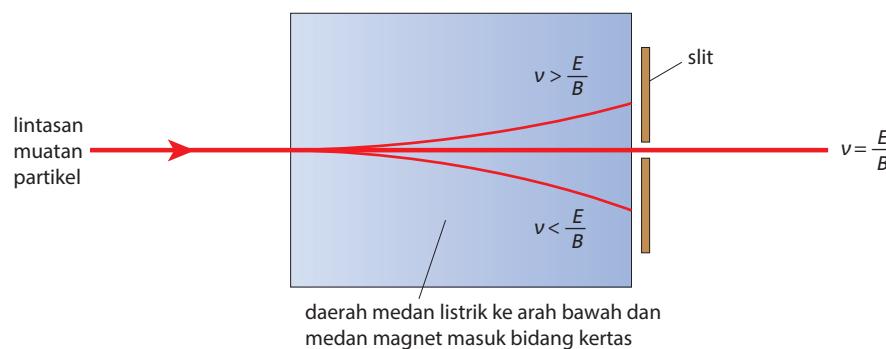
Jika besar salah satu dari dua medan diatur, maka dapat timbul situasi kedua gaya, F_E dan F_B , sama besarnya tetapi berlawanan arah. Jadi

$$Bqv = qE$$

dan

$$v = E/B$$

Untuk nilai kecepatan yang diberikan oleh E/B , partikel tidak akan dibelokkan, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 5.18](#).

▲ **Gambar 5.18** selektor kecepatan

Namun karena gaya magnet bergantung pada kecepatan, partikel bermuatan dengan kecepatan lain akan dibelokkan. Jika berkas partikel sejajar memasuki medan magnet maka semua partikel yang melewati celah tanpa menyimpang akan memiliki kecepatan yang sama. Perhatikan bahwa massa tidak masuk ke dalam persamaan untuk F_B atau F_E dan oleh karena itu, partikel dengan massa yang berbeda (tetapi muatan yang sama) semuanya akan melewati daerah medan tanpa menyimpang jika memenuhi kondisi $v = E/B$.

Susunan yang ditunjukkan pada [Gambar 5.18](#) dikenal sebagai selektor kecepatan. Selektor kecepatan sangat penting dalam mempelajari ion. Seringkali, produksi ion menimbulkan kecepatan yang berbeda tetapi untuk melakukan penyelidikan pada ion, ion harus memiliki satu kecepatan saja.

Jika beberapa ion semuanya memiliki kecepatan yang sama – dicapai dengan menggunakan selektor kecepatan – maka jari-jari lintasan ion dalam medan magnet bergantung pada perbandingan muatan dan massa ion. Oleh karena itu, ion dapat diidentifikasi berdasarkan perbandingan muatan terhadap massanya, dan yang terpenting dengan mengetahui muatan ion, massa ion dapat ditentukan. Instrumen yang menggunakan prinsip-prinsip ini untuk menentukan massa disebut sebagai spektrometer massa.

► CONTOH SOAL 5D

Jika terdapat ion bermuatan yang memiliki kecepatan $6,3 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$, dan kuat medan listrik pada selektor kecepatan adalah $4,8 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$. Hitung kerapatan fluks magnet yang diperlukan.

Jawaban

$$v = E/B$$

$$B = (4.8 \times 10^4) / (6.3 \times 10^6)$$

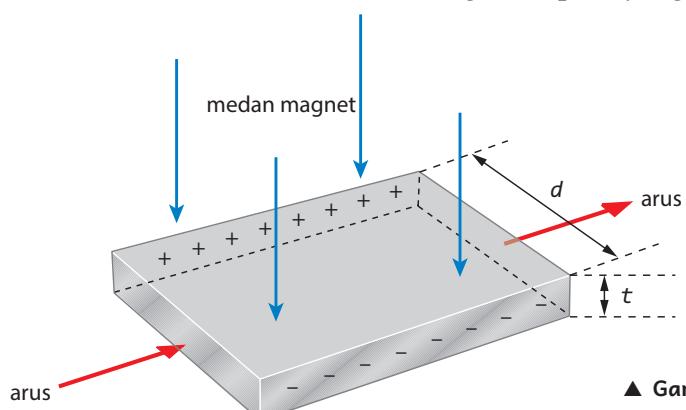
$$= 7.6 \times 10^{-3} \text{ T}$$

Soal Latihan

- 6 Ion bermuatan tunggal bergerak tanpa penyimpangan melalui selektor kecepatan. Kuat medan listrik pada selektor adalah $4,2 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$ dan kerapatan fluks magnet adalah $8,4 \times 10^{-3} \text{ T}$. Hitung kecepatan ion yang dipilih.

Efek Hall

Pertimbangkan irisan tipis kawat yang tegak lurus terhadap medan magnet, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 5.19](#).



▲ **Gambar 5.19** Efek Hall

Ketika ada arus dalam konduktor dalam arah seperti yang ditunjukkan pada gambar, partikel bermuatan (elektron dalam logam) akan bergerak tegak lurus terhadap medan magnet. Partikel bermuatan akan mengalami gaya yang akan cenderung membuatnya bergerak ke satu sisi konduktor. Beda potensial yang dikenal sebagai tegangan Hall V_H akan melintasi konduktor. Tegangan Hall tidak meningkat tanpa batas tetapi mencapai nilai konstan ketika gaya akibat medan magnet pada muatan sama dengan gaya akibat medan listrik yang terbentuk sebagai akibat dari tegangan Hall.

Jika jarak antara dua permukaan dengan beda potensial V_H adalah d (lihat [Gambar 5.19](#)), maka kuat medan listrik E antara kedua permukaan ini akan diberikan oleh $E = V_H/d$ (lihat Topik 18.2). Gaya F_E yang bekerja pada setiap partikel bermuatan adalah

$$F_E = q \times (V_H/d)$$

dengan q adalah muatan pada partikel bermuatan.

Gaya F_B akibat medan magnet pada muatan dengan kerapatan fluks B diberikan oleh

$$F_B = Bqv$$

dengan v adalah laju aliran (*drift speed*) muatan.

Ketika medan listrik telah terbentuk, partikel bermuatan akan melewati irisan dan $F_E = F_B$,

$$q \times (V_H/d) = Bqv$$

$$V_H/d = Bv$$

Sekarang, diberikan kelajuan hanyut (*drift speed*) v dari partikel bermuatan, dengan arus I dalam irisan, sesuai persamaan (lihat [Topik 9.1](#)),

$$I = Anvq$$

dengan A adalah luas penampang irisan dan n adalah jumlah kerapatan muatan (jumlah partikel bermuatan per satuan volume).

Karena luas A sama dengan td dengan t adalah ketebalan irisan (lihat [Gambar 5.19](#)), maka

$$V_H/d = B \times (I/tdnq)$$

dan

$$\text{tegangan Hall } V_H = \frac{BI}{(ntq)}$$

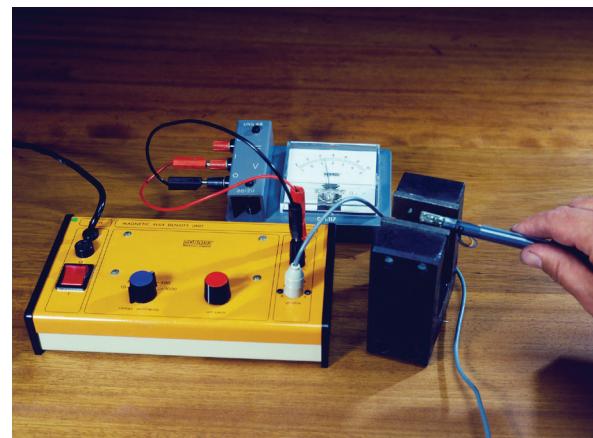
Ukuran tegangan Hall tergantung pada bahan dan ketebalan konduktor, arus dalam sampel dan kerapatan fluks magnet. Nilai kerapatan partikel bermuatan sangat besar dalam logam dan, akibatnya, tegangan Hall sangat kecil. Namun, pada semikonduktor, nilai kerapatan sangat berkurang oleh karena itu, tegangan Hall dapat dideteksi dan diukur. Efek Hall digunakan untuk mempelajari bahan semikonduktor dan mengidentifikasi apakah partikel bermuatan positif atau negatif berdasarkan tegangannya..

Jika arus dijaga konstan, maka tegangan Hall pada sampel akan sebanding dengan kerapatan fluks magnet. Dengan demikian efek Hall menyediakan sarana kerapatan fluks dapat diukur, menggunakan probe Hall.

Mengukur kerapatan fluks magnet

Alat probe Hall yang digunakan di laboratorium sekolah atau perguruan tinggi terdiri dari lapisan tipis bahan semikonduktor yang ditempatkan dengan bidangnya tegak lurus terhadap arah medan magnet. Unit kontrol diatur untuk

melewatkkan arus tertentu melalui irisan semikonduktor. Tegangan Hall, yang sebanding dengan kerapatan fluks magnet, terbaca pada meteran analog atau digital, yang dikalibrasi dalam satuan kerapatan fluks magnetik (tesla). Susunannya diilustrasikan pada [Gambar 5.20](#).



▲ **Gambar 5.20**
peralatan probe
Hall

Perhatikan bahwa tegangan Hall tergantung pada sudut antara medan magnet dan bidang probe Hall. Sebelum memulai pembacaan, probe harus ditempatkan disesuaikan dan diputar untuk mendapatkan pembacaan maksimum pada alat. Bidang probe Hall kemudian tegak lurus terhadap medan magnet.

► CONTOH SOAL 2B

Sebuah probe Hall ditempatkan di sudut kanan ke medan magnet yang seragam. Tegangan Hall mengukur 82 mV. Probe disesuaikan sehingga sudut yang dibuat bidangnya dengan medan magnet adalah 35° .

Hitung nilai tegangan Hall.

Jawaban

Komponen kerapatan fluks magnet B yang tegak lurus terhadap bidang adalah $B \sin 35^\circ$.

Karena tegangan Hall sebanding dengan kerapatan fluks magnet yang tegak lurus terhadap bidang probe, maka

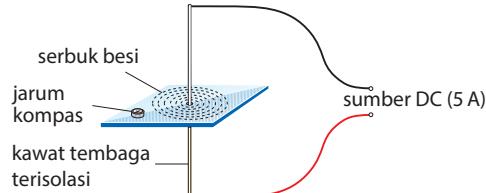
$$\text{Tegangan hall} = 82 \sin 35^\circ = 47 \text{ mV}$$

Soal Latihan

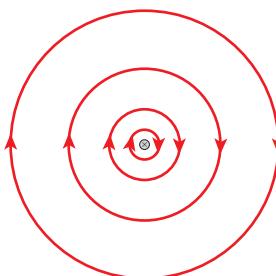
- 7 Sepotong pita aluminium memiliki tebal 0,10 mm. Arus dalam pita tersebut adalah 4,5 A. Aluminium memiliki $6,0 \times 10^{28}$ elektron bebas per meter kubik. Medan magnet homogen dengan kerapatan fluks 85 mT tegak lurus pada irisan. Hitung tegangan Hall yang dihasilkan. (Muatan elektron = $1,6 \times 10^{-19}$ C.)

**5.4 Medan magnetik akibat arus listrik**

Medan magnet akibat kawat lurus yang panjang dapat diplot dengan menggunakan peralatan yang diilustrasikan pada **Gambar 5.21**. Perhatikan bahwa arus harus cukup besar (sekitar 5 A). Serbuk besi ditaburkan ke papan horizontal dan kompas jarum digunakan untuk menentukan arah medan.



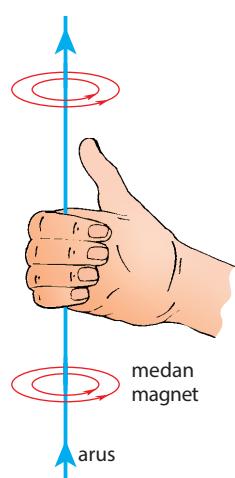
▲ **Gambar 5.21** peralatan untuk menemukan medan magnet akibat kawat lurus



▲ **Gambar 5.22** pola medan magnet akibat kawat lurus

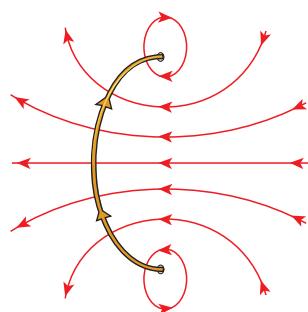
Gambar 5.22 menunjukkan pola medan magnet akibat kawat berarus lurus yang panjang. Garis-garisnya adalah lingkaran konsentris yang berpusat di tengah kawat. Pemisahan garis semakin bertambah seiring dengan bertambahnya jarak dari kawat, hal tersebut menunjukkan kuat medan berkurang. Arah medan magnet dapat ditemukan menggunakan aturan tangan kanan seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 5.23**.

Misalkan anda memegang konduktor di tangan kanan dengan ibu jari menunjuk ke arah arus konvensional. Arah jari-jari lainnya menunjukkan arah medan magnet.

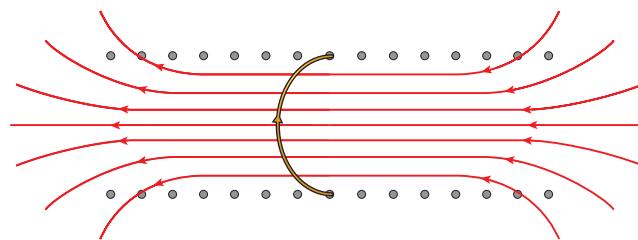


▲ **Gambar 5.23** Aturan tangan kanan

Alat dan bahan serupa pada Gambar 5.21 dapat digunakan untuk menyelidiki bentuk medan magnet akibat kumparan datar dan solenoida (kumparan panjang). **Gambar 5.24** mengilustrasikan pola medan magnet akibat kumparan datar. Medan ditarik pada bidang yang tegak lurus terhadap kumparan dan melalui pusatnya.



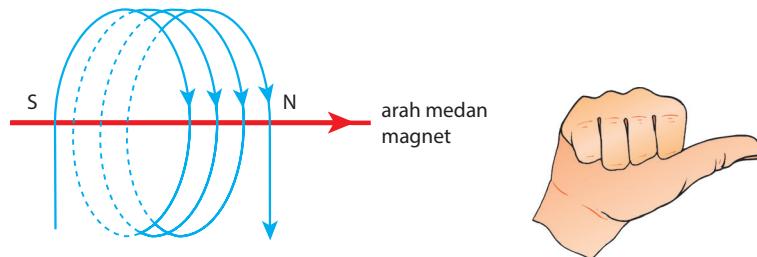
▲ Gambar 5.24 pola medan magnet akibat kumparan datar



▲ Gambar 5.25 pola medan magnet akibat solenoida

Sebuah solenoida dapat dianggap terdiri dari banyak kumparan datar yang ditempatkan berdampingan. Pola medan magnet dari solenoida panjang (yaitu, kumparan yang panjang dibandingkan dengan diameternya) ditunjukkan pada [Gambar 5.25](#).

Garis-garis medan sejajar dan berjarak sama di atas bagian tengah solenoida, menunjukkan bahwa medannya homogen. Garis-garis medan menyebar ke arah ujung. Kuat medan magnet di setiap ujung adalah setengah dari kuat medan di pusat. Arah medan magnet dalam kumparan datar dan dalam solenoida dapat ditemukan menggunakan aturan pegangan tangan kanan, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 5.26](#).



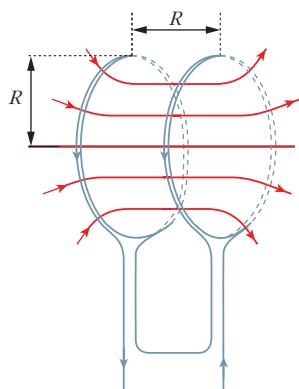
▲ Gambar 5.26 Aturan pegangan tangan kanan

Pegang kumparan atau solenoida di tangan kanan dengan jari-jari menunjuk ke arah arus konvensional. Ibu jari memberikan arah medan magnet.

Ujung utara magnet dari kumparan atau solenoida adalah ujung tempat garis-garis gaya magnet muncul. Perhatikan

persamaan dan, yang lebih penting, perbedaan antara aturan ini dan aturan tangan kanan untuk kawat lurus panjang (Gambar 5.23).

Medan magnet homogen sangat penting dalam mempelajari partikel bermuatan, seperti saat menggunakan selektor kecepatan (lihat Topik 5.3) atau saat menggunakan *fine beam tube* untuk menentukan rasio e/m .



▲ Gambar 5.27 Medan magnet dalam kumparan Helmholtz

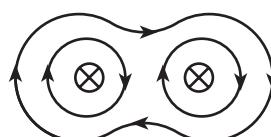
Medan homogen dihasilkan dalam solenoida tetapi medan ini berada di dalam solenoida dan akibatnya, mungkin sulit untuk melakukan pengamatan dan melakukan pengukuran. Masalah ini diatasi dengan menggunakan kumparan Helmholtz. Kumparan Helmholtz adalah dua kumparan datar identik, dengan arus yang sama di masing-masing. Kumparan diposisikan sedemikian rupa sehingga bidangnya sejajar dan dipisahkan oleh jarak yang sama dengan jari-jari kedua kumparan. Kumparan dan medan magnet yang dihasilkan diilustrasikan pada Gambar 5.27.

► CONTOH SOAL 5F

Dua kabel lurus panjang, dengan penampang melingkar, masing-masing membawa arus yang arahnya menjauh dari Anda, ke dalam buku. Gambarlah medan magnet akibat dua kawat pembawa arus.

Jawaban

Solusinya ditunjukkan pada Gambar 20.28.



▲ Gambar 20.28

Soal Latihan

- 8 Gambar pola medan magnet, masing-masing satu pada setiap keadaan berikut:
 - a Medan magnet seragam
 - b kuat medannya berkurang ke arah medan
 - c kuat medannya bertambah sepanjang arah medan.
- 9 Gambar diagram medan magnet akibat dua kawat lurus yang panjang jika arus pada kedua kawat berlawanan arah.

Elektromagnet dan Kegunaannya

Kuat medan magnet akibat kumparan datar atau solenoida dapat ditingkatkan dengan melilitkan kumparan pada

sebatang besi lunak. Batang tersebut dianggap sebagai inti dari kumparan. Besi disebut ‘lunak’ karena dapat dimagnetisasi dan didemagnetisasi dengan mudah. Dengan inti tersebut (inti besi), kuat medan magnet dapat ditingkatkan hingga 1000 kali lipat. Dengan paduan besi (paduan besi dengan kobalt atau nikel), medannya mungkin 10^4 kali lebih kuat. Magnet seperti ini disebut elektromagnet. Elektromagnet memiliki banyak kegunaan karena, tidak seperti magnet permanen, medan magnet dapat dimatikan dengan mematikan arus dalam kumparan.

Membandingkan Efek Medan

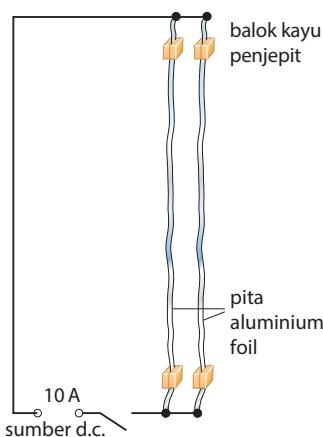
Kita dapat menyimpulkan efek dari berbagai jenis medan pada massa, muatan dan konduktor pembawa arus. Meskipun, ada analogi yang erat antara medan magnet, gravitasi, dan listrik, tetapi ada beberapa hal yang membuat ketiganya berperilaku sangat berbeda.

Mari kita mulai dengan mencermati efek medan gravitasi pada massa. Karena massa selalu menarik satu sama lain, maka massa yang ditempatkan dalam medan gravitasi akan selalu bergerak ke arah medan, dari posisi potensial yang lebih tinggi ke potensial yang lebih rendah. Untuk sebuah medan yang dihasilkan oleh sebuah titik massa, maka besar kuat medan mengikuti ketentuan hukum kuadrat terbalik, dan potensial mengikuti hubungan kebalikan dengan jarak dari sumber medan.

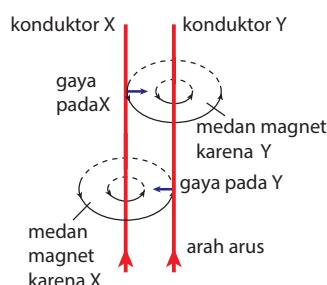
Medan listrik seperti medan gravitasi, untuk medan yang dihasilkan oleh titik muatan, kuat medannya juga diberikan oleh hukum kuadrat terbalik, dan potensial oleh hubungan kebalikan. Namun, kita dapat memiliki muatan positif dan muatan negatif. Muatan listrik positif bergerak ke arah medan, dari posisi potensial yang lebih tinggi ke potensial yang lebih rendah (seperti massa dalam medan gravitasi). Tetapi muatan negatif melakukan hal yang sebaliknya, melawan arah medan dan dari potensial rendah ke potensial tinggi.

Bagaimana dengan muatan listrik dalam medan magnet? Muatan yang diam tidak terpengaruh, tetapi muatan yang bergerak mengalami gaya F yang diberikan oleh $F = Bqv \sin \theta$. Arah gaya diberikan oleh aturan tangan kiri Fleming (untuk muatan positif).

Kawat berarus dalam medan magnet tidak mengalami gaya jika kawat sejajar dengan arah medan, tetapi untuk semua arah lain mengalami gaya yang diberikan oleh $F = BIL \sin \theta$. Arah gaya diberikan oleh aturan tangan kiri Fleming.



▲ Gambar 5.29 Peralatan untuk mendemonstrasikan gaya antar kawat konduktor sejajar berarus



▲ Gambar 5.30

Gaya antara kawat sejajar

Sebuah kawat konduktor berarus memiliki medan magnet di sekitarnya. Jika kawat berarus kedua ditempatkan sejajar dengan kawat pertama, kawat kedua ini akan berada dalam medan magnet yang pertama dan, oleh efek motor, akan mengalami gaya.

Dengan alasan yang sama, kawat pertama juga akan mengalami gaya. Menurut hukum ketiga Newton kedua gaya ini akan sama besar dan berlawanan arah. Efeknya dapat ditunjukkan dengan menggunakan peralatan pada **Gambar 5.29**.

Dapat dilihat jika arus searah, potongan-potongan foil bergerak ke arah satu sama lain (efek jepit). Jika arus berada dalam arah yang berlawanan, potongan-potongan foil bergerak terpisah (menjauh). Penjelasan untuk efeknya dapat ditemukan dengan mengacu pada **Gambar 5.30**.

Arus dalam kawat X menyebabkan medan magnet dan garis-garis medan berbentuk lingkaran konsentrasi (lihat **Gambar 5.22**). Garis-garis medan ini akan tegak lurus terhadap kawat Y sehingga dengan menggunakan aturan tangan kiri Fleming, akan ada gaya pada Y dalam arah X. Dengan menggunakan penalaran yang sama, gaya pada X akibat medan magnet Y akan menuju Y. Membalikkan arah arus dalam satu kawat akan membalikkan arah kedua gaya sehingga ketika arus berada dalam arah yang berlawanan, kawat cenderung bergerak terpisah.

Gaya per satuan panjang pada masing-masing penghantar bergantung pada besarnya arus pada masing-masing penghantar dan juga jarak pisahnya. Hingga 2019, ampere didefinisikan sebagai gaya per satuan panjang yang bekerja antara dua kawat pembawa arus paralel lurus panjang dengan luas penampang yang dapat diabaikan, terletak dalam ruang hampa.

CONTOH SOAL 2B

Sebuah partikel bermuatan memiliki massa $6,7 \times 10^{-27}$ kg dan muatan $+3,2 \times 10^{-19}$ C. Partikel bergerak dengan kecepatan $3,4 \times 10^8$ m s $^{-1}$ ketika memasuki wilayah ruang di mana terdapat medan magnet homogen kerapatan fluks 1,8 T tegak lurus terhadap arah geraknya.

Hitung:

- gaya gravitasi pada partikel
- gaya pada partikel karena medan magnet
- jari-jari orbitnya pada medan magnet.

Jawaban

- Gaya gravitasi = $mg = 6,7 \times 10^{-27} \times 9,81$
 $= 6,6 \times 10^{-26}$ N (diabaikan jika dibandingkan dengan gaya akibat medan magnet)
- Gaya (F) = $Bqv \sin \theta$
 $= 1,8 \times 3,2 \times 10^{-19} \times 3,4 \times 10^8 \times 1$
 $= 2,0 \times 10^{-10}$ N ($1,96 \times 10^{-10}$ N)
- Gaya sentripetal oleh gaya elektromagnetik
 $mv^2/r = Bqv$
 $6,7 \times 10^{-27} \times (3,4 \times 10^8)^2/r = 1,96 \times 10^{-10}$
 $r = 4,0$ m (3,95 m)

Soal Latihan

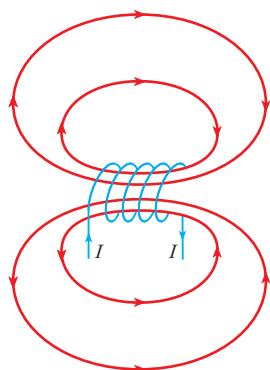
- 10 Sebuah elektron dan partikel α bergerak dengan kecepatan sama besar memasuki daerah medan magnet seragam yang tegak lurus terhadap arah geraknya. Nyatakan dan jelaskan perbedaan antara dua lintasan pada medan magnet yang terbentuk.



5.5 Induksi Elektromagnetik

Dalam Topik 5.4 kita mempelajari pola medan magnet di daerah kawat lurus dan berbagai kumparan. Namun, pola yang ditunjukkan pada Gambar 5.24 dan 5.25 tidak lengkap. Semua garis medan magnet harus kontinu, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5.31.

Eksperimen terdahulu mengira bahwa ada suatu aliran di sepanjang garis ini dan memunculkan gagasan fluks magnet, karena ‘fluks’ berarti ‘aliran’. Mengacu pada Gambar 5.3, kita dapat melihat bahwa garis-garis medan magnet lebih dekat antara pusat kutub daripada di luar wilayah kutub. Dengan demikian semakin dekat garis-garis semakin kuat medan magnet dan semakin besar kerapatan fluks magnet. Jika suatu daerah ditarik sejajar dengan permukaan kutub, maka jumlah garis yang melewati secara tegak lurus melalui satuan luas memberikan ukuran kerapatan fluks magnet. Fluks



▲ Gambar 5.31 Garis medan magnet kontinu

magnet, simbol Φ , dapat dianggap sebagai jumlah total garis yang melalui seluruh area tegak lurus terhadap garis.

Fluks magnet adalah hasil kali dari kerapatan fluks magnet dan luas penampang yang tegak lurus terhadap garis-garis fluks.

$$\Phi = BA$$

Sudut pada permukaan yang terbentuk oleh medan magnet mempengaruhi nilai Φ . Fluks akan maksimum ketika permukaan tegak lurus dengan garis-garis medan dan nol ketika permukaan sejajar dengan garis-garis medan.

Untuk medan magnet homogen dengan kerapatan fluks B yang membentuk sudut dengan luas A , fluks magnet Φ diberikan dengan persamaan $\Phi = BA \sin \theta$.

Satuan fluks magnet adalah **weber** (Wb). Karena satuan kerapatan fluks magnet adalah tesla, dari $\Phi = BA$, satu weber sama dengan satu tesla meter-kuadrat, $T\text{m}^2$.

Kerapatan fluks magnet dalam kumparan N lilitan yang memiliki luas penampang A adalah B . Fluks yang melalui kumparan ini diberikan oleh $\Phi = BA$. Fluks magnet ini melewati N lilitan kumparan dan menghasilkan tautan fluks (*flux linkage*) magnetik $N\Phi$.

tautan fluks (*flux linkage*) magnetik = $N\Phi = BAN$

► CONTOH SOAL 5H

Sebuah kumparan dibuat dengan melilitkan 400 lilitan kawat pada inti besi berbentuk silinder. Jari-jari rata-rata kumparan adalah 3,0 cm. Jika kerapatan fluks B di inti akibat arus dalam kumparan adalah 1,4 T.

Hitunglah:

- fluks magnet dalam inti
- tautan fluks kumparan (*flux linkage*).

Jawaban

- $\Phi = BA$, sehingga $\Phi = 1.4 \times \pi(0.03)^2 = 4.0 \text{ mWb}$
- tautan fluks kumparan (*flux linkage*) = $N\Phi = 4.0 \times 400 = 1.6 \text{ Wb}$

Soal Latihan

11 Sebuah kumparan datar berisi 250 lilitan kawat terisolasi dan memiliki jari-jari rata-rata 1,5 cm. Kumparan ditempatkan di daerah fluks magnet seragam dengan kerapatan fluks 85 mT sedemikian rupa sehingga ada sudut antara bidang kumparan dan garis fluks.

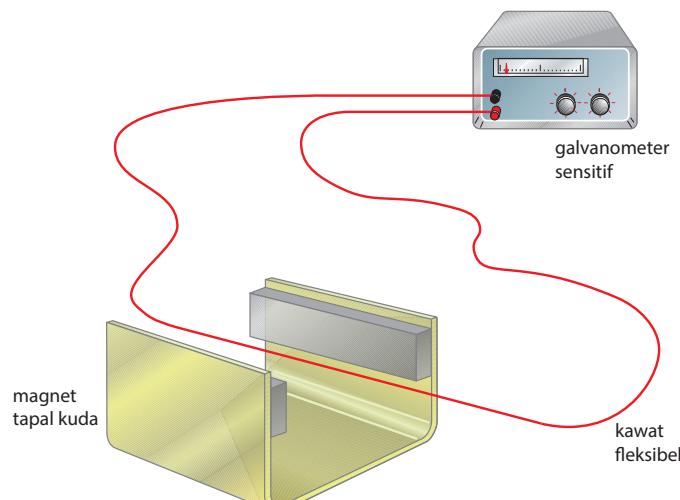
Hitung tautan fluks (*flux linkage*) dalam kumparan dengan sudut:

- a** Nol
- b** 90°
- c** 35°

Induksi elektromagnetik

Seperti dijelaskan sebelumnya, hubungan antara arus listrik dan medan magnet ditemukan oleh Oersted pada tahun 1820. Pada tahun 1831, Joseph Henry di Amerika Serikat dan Michael Faraday di Inggris mendemonstrasikan bahwa GGL. dapat diinduksi oleh medan magnet. Efeknya disebut **induksi elektromagnetik**.

Induksi elektromagnetik sekarang mudah ditunjukkan di laboratorium karena tersedia alat ukur yang peka. **Gambar 5.32** mengilustrasikan peralatan yang dapat digunakan untuk tujuan ini.



▲ **Gambar 5.32** Alat untuk menunjukkan induksi elektromagnetik

Galvanometer mendeteksi arus yang sangat kecil tetapi penting untuk disadari bahwa apa yang dideteksi adalah gaya gerak listrik (GGL) yang kecil. Arus muncul karena ada rangkaian tertutup yang memiliki GGL. Pengamatan berikut dapat dilakukan.

- GGL induksi terjadi ketika:
 - kawat digerakkan melalui medan magnet, melintasi bagian depan kutub
 - magnet digerakkan sehingga kawat melintasi bagian depan kutub.
- GGL induksi tidak terjadi ketika:
 - kawat tetap diam di antara bagian kutub
 - magnet digerakkan namun kutub bergerak sepanjang kawat
 - kawat bergerak memanjang agar tidak berubah posisinya di antara kutub magnet.

Pengamatan ini mengarah pada kesimpulan bahwa GGL induksi terjadi setiap kali garis fluks magnet berubah.

Perubahan garis fluks dapat disebabkan oleh pergerakan kawat atau magnet. Besar GGL juga diamati bervariasi.

■ Besar GGL :

- meningkat ketika kecepatan gerak kawat meningkat
- bertambah dengan bertambahnya kecepatan gerak magnet
- bertambah jika kawat dibuat menjadi melingkar dengan beberapa lilitan (lihat [Gambar 5.33](#))
- meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah lilitan pada loop.

Dapat disimpulkan bahwa besar GGL induksi tergantung pada laju perubahan garis fluks magnet. Laju dapat diubah dengan mengubah laju garis fluks oleh satu kawat atau dengan menggunakan jumlah lilitan kawat yang berbeda. Kedua faktor tersebut diperhitungkan dengan menggunakan tautan fluks magnet ($N\Phi$). Perubahan tautan fluks magnet ($N\Phi$) sama dengan hasil kali perubahan fluks magnet dan jumlah lilitan N dari kawat yang terlibat dalam perubahan fluks.

$$\text{Perubahan tautan fluks } \Delta(N\Phi) = N\Delta\Phi$$

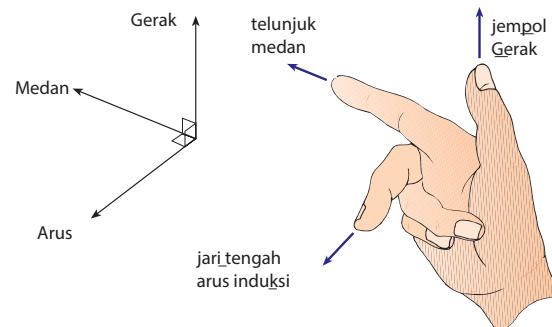


Pengamatan eksperimental diringkas dalam [hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik](#).

GGL induksi sebanding dengan laju perubahan tautan fluks magnet.

Pengamatan eksperimental yang dilakukan dengan peralatan [Gambar 5.32](#) dan [Gambar 5.33](#) berkaitan dengan

besarnya GGL. Namun, diperhatikan bahwa arah GGL induksi berubah dan arahnya tergantung pada arah perubahan garis fluks magnet. Arah GGL induksi atau arus dalam kawat yang bergerak melalui medan magnet pada sudut tegak lurus ke medan dapat ditentukan menggunakan aturan tangan kanan Fleming. Aturan ini diilustrasikan pada [Gambar 5.34](#).

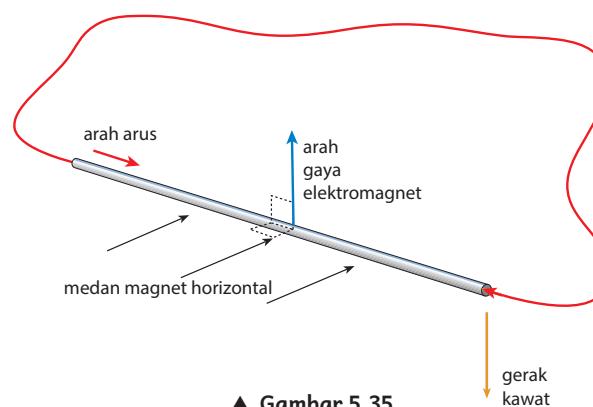


▲ [Gambar 5.34](#) Aturan tangan kanan Fleming

Jika dua jari pertama dan ibu jari tangan kanan dipegang tegak lurus satu sama lain, Jari pertama searah dengan Medan magnet dan ibu jari pada arah Gerak, maka jari kedua memberikan arah GGL induksi. atau Arus.

Penjelasan untuk arah GGL induksi dapat ditemukan dengan mengacu pada efek motor dan konservasi energi.

[Gambar 5.35](#) menunjukkan kawat yang sedang bergerak ke bawah melalui medan magnet.



▲ [Gambar 5.35](#)

Kawat berbentuk loop kontinu, GGL induksi menimbulkan arus, dan arah arus ini dapat ditemukan dengan menggunakan aturan tangan kanan Fleming. Arus ini tegak lurus terhadap fluks magnet. Karena efek dari motor, akan ada gaya pada kawat. Menggunakan kaidah tangan kiri Fleming ([Gambar 5.10](#)), gaya ke atas ketika kawat bergerak ke bawah. Dengan membalikkan arah gerak kawat menyebabkan arus dalam

arah yang berlawanan, gaya elektromagnetik akan melawan gerakannya. Kesimpulan ini tidak mengejutkan ketika konservasi energi dipertimbangkan. Arus listrik mentransfer energi dan energi ini pasti telah ditransfer dari sumber. Gerakan kawat melawan gaya elektromagnetik berarti bahwa usaha telah dilakukan pada kawat dalam mengatasi gaya ini dan usaha inilah yang mentransfer energi ke muatan di kawat. Siapa pun yang pernah mengendarai sepeda dengan dinamo akan menyadari bahwa harus ada usaha yang dilakukan untuk menyalaikan lampu! Penerapan kekekalan energi ini disimpulkan dalam hukum Lenz.

Arah GGL induksi sedemikian rupa sehingga menimbulkan efek yang melawan perubahan yang menghasilkannya.

Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik dan hukum Lenz dapat dinyatakan dengan persamaan

$$E = -\frac{d(N\Phi)}{dt}$$

■ lihat Catatan Matematika di bawah.

E adalah GGL. induksi oleh laju perubahan fluks $d(N\Phi)/dt$. Tanda negatif menunjukkan bahwa GGL induksi menyebabkan efek (gaya) melawan perubahan yang menghasilkannya.

Untuk perubahan kecil fluks $\Delta(N\Phi)$ yang terjadi dalam waktu t (fluks berubah secara linier terhadap waktu), maka GGL induksi. E diberikan oleh

$$E = -\frac{\Delta(N\Phi)}{\Delta t}$$



CATATAN MATEMATIKA

Cara singkat untuk menyatakan laju perubahan besaran x terhadap waktu t adalah laju perubahan x terhadap $t = dx/dt$.

Persamaan ini mewakili operasi matematika yang dikenal sebagai diferensial. Hal ini dicapai dengan mencari gradien grafik x terhadap t .

Anda akan menemukan notasi ini dalam hubungan dengan laju perubahan fluks magnet, dan dalam salah satu persamaan peluruhan radioaktif ([Topik 9.2](#)). Matematika ini berada di luar cakupan Cambridge International AS & A Level Physics. Namun, Anda mungkin menemukannya jika Anda mempelajari Cambridge International AS & A Level Mathematics.

CONTOH SOAL 5I

Kerapatan fluks seragam antara kutub magnet adalah 0,075 T. Sebuah kumparan kecil dengan luas penampang $4,8 \text{ cm}^2$ memiliki 200 lilitan dan ditempatkan tegak lurus terhadap medan magnet. Kumparan ditarik dalam medan selama 0,24 s.

Tentukan:

- fluks magnet yang melalui kumparan ketika berada di antara kutub magnet
- perubahan fluks magnet ketika kumparan dilepaskan dari medan
- GGL induksi rata-rata dalam kumparan saat sedang ditarik.

Jawaban

- Fluks magnetik $\Phi = BA \sin \theta$
 $= 0,075 \times 4,8 \times 10^{-4}$
 $= 3,6 \times 10^{-5} \text{ Wb}$
- perubahan tautan fluks magnet
 $= (N\Phi) \text{ akhir} - (N\Phi) \text{ awal}$
 $= 0 - (200 \times 3,6 \times 10^{-5})$
 $= -7,2 \times 10^{-3} \text{ Wb}$
 (tanda menunjukkan bahwa tautan fluks menurun)
- $\text{ggl induksi} = \frac{\text{perubahan fluks magnet}}{\text{waktu yang dibutuhkan}}$
 $= \frac{7,2 \times 10^{-3}}{0,24} = 30 \text{ mV}$

Soal Latihan

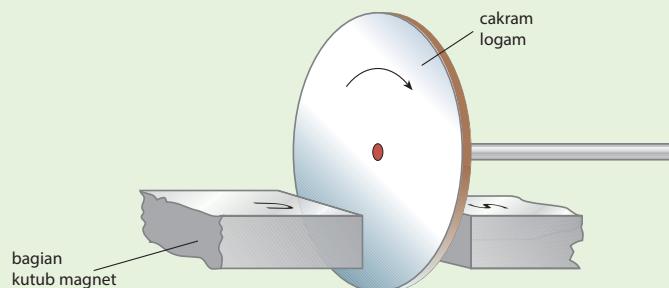
- 12** Sebuah pesawat terbang memiliki lebar sayap 16 m dan terbang mendatar ke arah utara dengan kecepatan 85 m s^{-1} . Komponen vertikal medan magnet bumi adalah $40 \mu\text{T}$ dalam arah ke bawah
- a** Hitung :
- i** Luas yang tersapu per detik oleh sayap
 - ii** fluks magnet per detik yang dipotong oleh sayap
 - iii** GGL induksi di antara ujung sayap.
- b** Nyatakan ujung sayap mana yang memiliki potensial lebih tinggi.
- 13** Sebuah solenoida berarus listrik menghasilkan fluks magnet homogen dengan kerapatan $4,6 \times 10^{-2} \text{ T}$ sepanjang sumbunya. Sebuah kumparan melingkar kecil dengan jari-jari 1,2 cm memiliki 350 lilitan kawat dan ditempatkan pada sumbu solenoida dengan bidangnya tegak lurus terhadap sumbu. Hitung rata-rata GGL induksi dalam kumparan ketika arus dalam solenoida dibalik dalam waktu 85 ms

Soal Latihan

- 14** Sebuah cakram logam dibuat berputar dengan kecepatan 16 putaran per detik terhadap suatu sumbu yang melalui pusatnya tegak lurus bidang piringan. Cakram memiliki jari-jari 20 cm dan berputar dalam medan magnet seragam dengan kerapatan fluks 0,15 T, sejajar dengan sumbu rotasi. Hitung:
- luas yang tersapu setiap detik oleh jari-jari cakram
 - fluks yang dipotong setiap detik oleh jari-jari cakram
 - GGL induksi dalam cakram

PENGAYAAN**Aplikasi Induksi Elektromagnetik****Redaman arus eddy**

Pembangkitan arus listrik dalam konduktor dengan melakukan usaha mekanis dapat ditunjukkan dengan memutar piringan logam dalam medan magnet, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 5.36](#).



▲ [Gambar 5.36](#) alat untuk menunjukkan redaman arus Eddy

Sebuah GGL induksi antara tepi cakram dan poros. Peralatan yang diilustrasikan merupakan dasar dari alat dimana GGL langsung dapat dihasilkan ([lihat pertanyaan 14](#)).

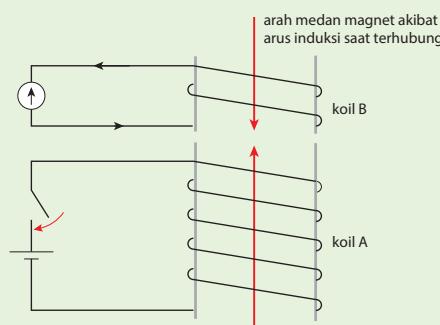
Cakram terlihat melambat jauh lebih cepat saat magnet di tempatnya daripada ketika telah magnet dihilangkan kembali. Saat cakram berputar akan memotong garis fluks magnet. Pemotongan ini menjadi lebih jelas jika jari-jari cakram dipertimbangkan. Saat jari-jari cakram berputar akan memotong fluks. Sebuah GGL akan diinduksi dalam cakram tetapi karena laju pemotongan fluks bervariasi dari satu bagian cakram

ke bagian lain, GGL akan memiliki besaran yang berbeda di daerah yang berbeda dari cakram. Cakram adalah logam, oleh karena itu elektron akan bergerak di antara daerah di dalam cakram yang memiliki nilai GGL berbeda. Arus diinduksi dalam cakram. Karena arus ini bervariasi dalam besar dan arahnya maka disebut arus eddy. Arus eddy menyebabkan pemanasan pada cakram dan disipasi energi putaran cakram disebut sebagai redaman arus eddy.

Jika magnet permanen pada [Gambar 5.36](#) diganti dengan elektromagnet, putaran cakram akan diperlambat setiap kali ada arus dalam elektromagnet. Hal ini merupakan prinsip penggeraman elektromagnetik. Keuntungan dari rem konvensional adalah tidak ada kontak fisik dengan cakram yang berputar. Rem ini sangat berguna untuk kereta yang melaju dengan kecepatan tinggi. Namun, kerugiannya adalah saat cakram melambat, arus eddy yang diinduksi akan lebih kecil, oleh karena itu penggeraman menjadi kurang efisien. Sistem ini tidak akan berguna sebagai rem parkir pada mobil!

GGL induksi antara dua kumparan

Solenoida atau kumparan berarus diketahui memiliki medan magnet. Perhatikan peralatan yang diilustrasikan pada [Gambar 5.37](#).



▲ [Gambar 5.37](#)

Saat arus dalam kumparan A dialirkan, medan magnet dalam kumparan ini meningkat. Medan magnet terhubung dengan lilitan pada kumparan B sehingga ada perubahan fluks pada kumparan B dan GGL induksi dalam kumparan ini. Kumparan B merupakan bagian dari rangkaian tertutup sehingga ada arus mengalir dalam kumparan B. Arah arus ini dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Lenz.

Perubahan yang menyebabkan terjadinya arus induksi adalah bertambahnya fluks magnet pada kumparan A. Arus induksi pada kumparan B akan menimbulkan peningkatan medan magnet pada kumparan B dan menurut hukum Lenz, medan ini akan mencoba melawan medan pada kumparan A. Akibatnya, karena medan pada kumparan A vertikal ke atas (aturan pegangan tangan kanan), medan pada kumparan B akan vertikal ke bawah dan arus induksi akan berlawanan arah jarum jam melalui alat pengukur.

Ketika arus pada kumparan A tidak dialirkan, medan magnet pada kumparan A akan berkurang. Medan magnet dalam kumparan B akibat arus induksi harus berusaha mencegah penurunan ini oleh karena itu arah B akan vertikal ke atas. Arus induksi berubah arah.

Besarnya GGL induksi dapat ditingkatkan dengan memasukkan inti besi lunak ke dalam kumparan (tapi hati-hati jangan sampai merusak alat pengukur karena setiap GGL induksi akan sangat jauh lebih besar) atau dengan meningkatkan jumlah lilitan pada kumparan atau dengan mengganti arus yang lebih besar dalam kumparan A.

Penting untuk disadari bahwa GGL induksi hanya ketika fluks magnet dalam kumparan A berubah; yaitu, ketika arus dalam kumparan A berubah. Arus tetap dalam kumparan A tidak akan menimbulkan GGL induksi. Sebuah GGL dapat diinduksi terus menerus dalam kumparan B jika arus bolak-balik dialirkan pada kumparan A. Hal ini merupakan prinsip **transformator**.

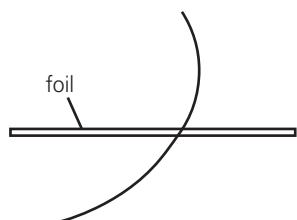
RANGKUMAN

- » Medan magnet yaitu daerah ruang ketika magnet atau muatan yang bergerak akan mengalami gaya.
- » Medan magnet dapat digambarkan oleh garis-garis medan magnet. Garis medan magnet tidak pernah bersinggungan atau bersilangan.
- » Kerapatan garis medan magnet menunjukkan kuat medan magnet.
- » Arah medan magnet ditimbulkan oleh arah kutub utara magnet bebas akan bergerak, jika ditempatkan di dalam medan.
- » Ada gaya pada kawat berarus setiap kali kawat itu membentuk sudut terhadap medan magnet.
- » Arah gaya sesuai aturan tangan kiri Fleming – letakkan dua jari pertama, ibu jari tangan kiri tegak lurus satu sama lain, ibu jari searah dengan medan magnet, jari telunjuk searah dengan arah medan magnet arus, maka ibu jari merupakan arah gaya.
- » Besar gaya F pada kawat dengan panjang L berarus I dalam medan magnet pada sudut θ terhadap kerapatan fluks B memiliki persamaan $F = BIL \sin \theta$.
- » Besar kerapatan fluks didefinisikan sebagai gaya yang bekerja per satuan arus per satuan panjang pada kawat lurus yang ditempatkan tegak lurus terhadap medan magnet.
- » Kerapatan fluks magnet (kuat medan) dinyatakan dengan satuan tesla (T). $1\text{ T} = 1\text{ Wb m}^{-2}$.
- » Gaya F pada partikel dengan muatan q bergerak dalam medan magnet dengan kecepatan v pada sudut θ terhadap kerapatan fluks B memiliki persamaan: $F = Bqv \sin \theta$.
- » Arah gaya sesuai aturan tangan kiri Fleming.
- » Lintasan partikel bermuatan yang bergerak dengan kecepatan konstan pada bidang tegak lurus terhadap

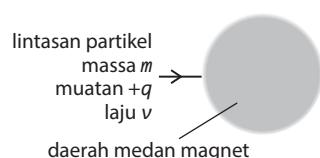
- medan magnet homogen adalah berbentuk lingkaran.
- » Gaya pada partikel bermuatan yang bergerak melalui konduktor yang ditempatkan dalam medan magnet menghasilkan beda potensial, tegangan Hall, melintasi konduktor.
 - » Tegangan Hall V_H diberikan oleh persamaan $V_H = BI/ntq$. Karena tegangan Hall sebanding dengan kerapatan fluks magnet, probe Hall yang dikalibrasi dapat digunakan untuk mengukur kerapatan fluks.
 - » Medan listrik dan magnet, ditempatkan saling tegak lurus satu sama lain dan sejajar terhadap arah gerak partikel bermuatan, dapat digunakan untuk menentukan kecepatan partikel bermuatan.
 - » Arus listrik menimbulkan medan magnet, kuat dan arahnya tergantung pada besar arus dan bentuk kawat pembawa arus.
 - » Arah medan akibat kawat lurus sesuai dengan aturan tangan kanan.
 - » Arah medan dalam solenoida sesuai dengan aturan pegangan tangan kanan.
 - » Kuat medan solenoida dapat ditingkatkan dengan inti besi; hal ini merupakan prinsip elektromagnet.
 - » Dua kawat yang berarus searah akan saling tarik menarik dan jika arah arusnya berlawanan akan tolak menolak.
 - » Fluks magnet merupakan hasil kali rapat fluks dengan luas yang tegak lurus terhadap fluks .
 - » Tautan Fluks (*flux linkage*) magnet merupakan hasil kali antara fluks magnet yang melalui kumparan dan jumlah lilitan pada kumparan, $N\Phi$.
 - » Arah arus induksi dalam konduktor yang bergerak melalui medan magnet sesuai aturan tangan kanan Fleming. Artinya, jika dua jari pertama dan ibu jari tangan kanan dipegang tegak lurus satu sama lain, jari pertama ke arah medan magnet dan ibu jari ke arah gerak, maka jari kedua merupakan arah GGL atau arus induksi.
 - » Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik menyatakan bahwa GGL induksi sebanding dengan laju perubahan tautan fluks magnet.
 - » Hukum Lenz menyatakan bahwa arah GGL induksi. sedemikian rupa sehingga menimbulkan efek melawan perubahan yang menghasilkannya.
 - » Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik dan hukum Lenz dapat dinyatakan dengan persamaan $E = -d(N\Phi)/dt$ dengan E adalah GGL induksi oleh laju perubahan tautan fluks $d(N\Phi)/dt$ dan tanda negatif menunjukkan arah relatif GGL serta perubahan tautan fluks (*flux linkage*).

ASESMEN FORMATIF

- 1 Sebuah kawat lurus kaku memiliki massa per satuan panjang 55 g m^{-1} . Kawat diletakkan di atas bangku horizontal dan seorang siswa mengalirkan arus melaluiinya untuk mencoba membuatnya terangkat dari bangku. Komponen horizontal medan magnet bumi adalah $18 \mu\text{T}$ dengan arah dari selatan ke utara dan percepatan jatuh bebas adalah 10 m s^{-2}
 - a **i** Nyatakan arah di mana kawat harus diletakkan di atas bangku.
 - ii** Hitung arus minimum yang diperlukan.
- 2 Kerapatan fluks magnet B pada jarak r dari kawat lurus panjang yang dialiri arus I diberikan oleh persamaan $B = (2,0 \times 10^{-7}) \times I/r$, dengan r dalam meter dan I dalam ampere
 - a Hitung:
 - i** kerapatan fluks magnet pada jarak titik $4,0 \text{ cm}$ dari kawat yang dialiri arus 16 A ,
 - ii** gaya per satuan panjang pada kawat kedua, juga membawa arus 16 A , yang sejajar dengan kawat pertama dan berjarak $4,0 \text{ cm}$.
 - b Jelaskan mengapa gaya antara dua kawat ditunjukkan di laboratorium menggunakan aluminium foil daripada kawat tembaga.
- 3 Sebuah magnet tapal kuda kecil ditempatkan pada keseimbangan dan kawat kaku dijepit di ruang antara kutubnya. Panjang kawat antar kutub adalah $5,0 \text{ cm}$. Ketika arus $3,5 \text{ A}$ dilewatkan melalui kawat, pembacaan pada neraca meningkat sebesar $0,027 \text{ N}$.
 - a Hitung kerapatan fluks magnet antara kutub magnet.
 - b Nyatakan tiga asumsi yang telah Anda buat dalam perhitungan Anda.
- 4 **Gambar 5.38** menunjukkan jejak partikel dalam ruang gelembung (*bubble chamber*) saat melewati lembaran tipis lembaran logam. Medan magnet homogen diterapkan ke bidang kertas. Nyatakan dengan alasan:



▲ Gambar 5.38



▲ Gambar 5.39

- a ke arah mana partikel bergerak,
- b apakah partikel tersebut bermuatan positif atau negatif.

5 a Jelaskan apa yang dimaksud dengan medan magnet. [2]

- b Sebuah partikel memiliki massa m , muatan $+q$ dan kecepatan v . Partikel memasuki medan magnet homogen dengan kerapatan fluks B sedemikian rupa sehingga saat partikel masuk bergerak tegak lurus ke medan magnet, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.39.

Arah medan magnet tegak lurus, dan ke bidang kertas.

- i Pada salinan Gambar 5.39, gambarkan lintasan partikel melalui, dan di luar daerah medan magnet. [3]

- ii Gaya yang bekerja pada partikel, menyebabkannya percepatan.

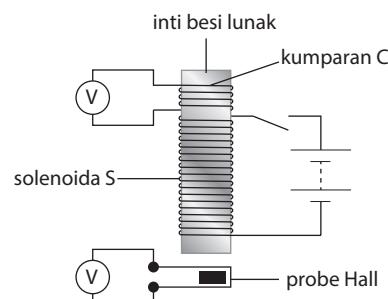
Jelaskan mengapa laju partikel saat meninggalkan medan magnet adalah v . [1]

- c Partikel di b kehilangan elektron sehingga muatannya menjadi $+2q$. Perubahan massanya dapat diabaikan. Tentukan kecepatan awal partikel v sedemikian rupa sehingga lintasannya melalui medan magnet tidak berubah. Jelaskan jawaban Anda. [3]

*Cambridge International AS dan A Level Physics (9702)
Makalah 43 Q8 Okt/Nov 2018*

6 a Nyatakan hukum induksi elektromagnetik Faraday. [2]

- b Sebuah solenoida S dililitkan pada inti besi lunak, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.40.



▲ Gambar 5.40

Sebuah kumparan C memiliki 120 lilitan kawat dililitkan pada salah satu ujung inti besi. Luas penampang kumparan C adalah $1,5 \text{ cm}^2$. Sebuah probe Hall dekat dengan ujung lain dari inti. Ketika ada arus konstan dalam solenoida S , kerapatan fluks dalam inti lunak adalah $0,19 \text{ T}$. Pembacaan pada voltmeter yang terhubung ke probe Hall adalah $0,20 \text{ V}$. Arus dalam solenoida S sekarang dibalik dalam waktu $0,13 \text{ s}$ dengan laju konstan.

- i** Hitung pembacaan pada voltmeter yang terhubung ke kumparan C selama arus berubah. [2]
- ii** Lengkapi salinan **Gambar 5.41** untuk pembacaan voltmeter sebelum, selama dan setelah arah arus dibalik.

	Sebelum arus berubah	Saat arus berubah saat arus=nol	Setelah arus berubah
pembacaan pada voltmeter yang terhubung ke kumparan C/V			
pembacaan pada voltmeter yang terhubung ke probe Hall/ V	0.20		

▲ Gambar 5.41

[4]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 43 Q9 Oct/Nov 2018

A level

6 Arus Bolak-Balik

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

6.1. Karakteristik arus bolak-balik

1. mengidentifikasi istilah periode, frekuensi, dan nilai puncak yang diterapkan pada arus atau tegangan bolak-balik
2. menerapkan persamaan $x = x_0 \sin \omega t$ mewakili arus atau tegangan bolak-balik sinusoidal
3. menerapkan fakta bahwa daya rata-rata dalam beban resistif adalah setengah daya maksimum untuk arus bolak-balik sinusoidal
4. membedakan antara *root-mean-square* (rms) dan nilai puncak serta mengingat dan menggunakan dan untuk arus bolak-balik sinusoidal

6.2. Penyebarahan dan perataan

1. membedakan secara grafis antara penyebarahan setengah gelombang dan gelombang penuh
2. mendeskripsikan penggunaan dioda tunggal untuk penyebarah setengah gelombang arus bolak-balik
3. mendeskripsikan penggunaan empat dioda (jembatan penyebarah) untuk penyebarahan gelombang penuh dari arus bolak-balik
4. menganalisis pengaruh kapasitor tunggal dalam perataan, termasuk pengaruh nilai kapasitansi dan hambatan beban

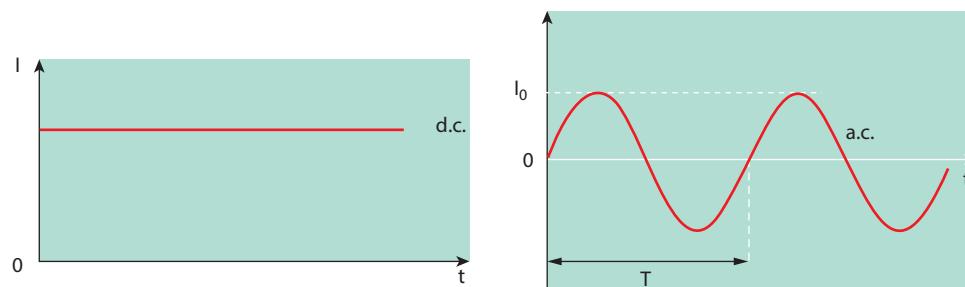
Pemahaman Bermakna

- Frekuensi f berhubungan dengan periode T dengan persamaan $f = 1/T$.
- Daya yang didisipasikan pada resistor sebesar $P = I^2 R$ atau $P = VI$ atau $P = V^2/R$.
- Dioda adalah perangkat yang memungkinkan arus mengalir hanya dalam satu arah.

6.1 Karakteristik Arus Bolak-Balik

Kita telah mempelajari sistem baterai terhubung dalam rangkaian dan arus yang stabil bergerak searah. Jenis arus ini adalah **arus searah**, disingkat DC (*Direct Current*). Namun, pasokan listrik domestik yang dihasilkan oleh generator menggunakan **arus bolak-balik** (AC/*alternating current*). Arus atau tegangan bolak-balik membolak-balikkan arah kutub secara teratur dan biasanya sinusoidal, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.1**.

▲ **Gambar 6.1**
Arus searah
dan Arus
bolak-balik



Waktu T yang diperlukan untuk satu siklus lengkap arus bolak-balik disebut periode arus.



Kita dapat menyatakan hubungan antara arus dan tegangan dengan persamaan

$$I = I_0 \sin \omega t$$

$$V = V_0 \sin \omega t$$

Grafik $I = I_0 \sin \omega t$ dan $V = V_0 \sin \omega t$ memiliki bentuk sinusoidal yang sama dengan grafik untuk merepresentasikan gerak harmonik sederhana sehingga elektron dalam penghantar arus AC bergerak secara mundur dan maju dalam bentuk gerak harmonik sederhana. Oleh karena itu kita dapat menggambarkan frekuensi sudut arus dalam rad/s sebagai ω , dan $T = 2\pi/\omega$. Kebalikan dari periode adalah frekuensi f . Artinya, $f = 1/T$ dan $f = \omega/2\pi$. Frekuensi adalah jumlah siklus lengkap per satuan waktu. Satuan frekuensi adalah hertz (Hz). 1 Hz = 1 siklus per detik.

Nilai puncak arus atau tegangan adalah I_0 atau V_0 , amplitudo arus atau tegangan osilasi. Istilah nilai puncak ke puncak berarti $2I_0$ atau $2V_0$, atau dua kali amplitudo.

CONTOH SOAL 6A

Variasi beda potensial (dalam volt) terhadap waktu t (dalam detik) dari sumber arus bolak-balik diberikan oleh persamaan $V = 24 \sin 380t$.

Berdasarkan sumber arus ini, tentukan:

- beda potensial puncak
- frekuensi.

Jawaban

a. beda potensial puncak = 24 V

$$b. \omega = 2\pi f = 380$$

$$\text{frekuensi} = 380/2\pi = 60 \text{ Hz}$$

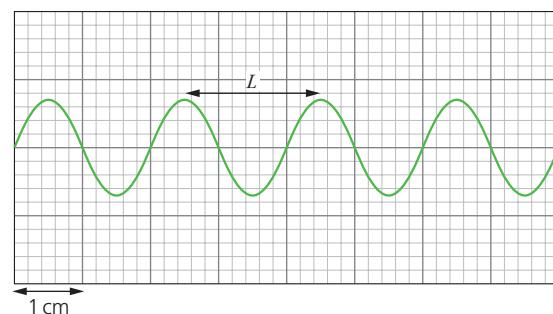
Soal Latihan

- 1 Nilai puncak dari beda potensial listrik yang dikirim ke rumah-rumah di India adalah 325 V dan frekuensinya adalah 50 Hz. Tulis persamaan beda potensial listrik sebagai fungsi waktu t .

Pengukuran Periode dan Frekuensi Menggunakan Osiloskop Sinar Katoda

Osiloskop sinar katoda/Cathode Ray Oscilloscope (CRO) memiliki kalibrasi berbasis waktu, sehingga pengukuran dari layar CRO dapat digunakan untuk memberikan nilai interval waktu. Salah satu aplikasinya adalah mengukur frekuensi arus atau tegangan yang berubah-ubah secara sinusoidal. Sinyal dihubungkan ke input Y (masukan vertikal) dari CRO, y-gain (penguat vertikal) dan kontrol basis waktu disesuaikan sampai setidaknya satu jejak, tapi lebih kecil dari lima, siklus lengkap sinyal diperoleh pada layar. Jarak L pada graticule (skala pada layar) yang sesuai dengan satu siklus lengkap diukur ([Gambar 6.2](#)).

▲ **Gambar 6.2**
Penggunaan CRO
untuk mengukur
frekuensi



Praktik baik dalam mengukur panjang, misalkan ukur empat siklus kemudian bagi dengan 4 untuk mendapatkan nilai rata-rata L . Garis-garis *graticule* mungkin akan dibagi menjadi skala sentimeter dan mungkin milimeter atau per dua milimeter. Jika pengaturan basis waktu adalah x (dalam satuan detik, milidetik atau mikrodetik per sentimeter), waktu T untuk satu siklus diberikan oleh $T = Lx$. Frekuensi f sinyal kemudian diperoleh dari $f = 1/T$.

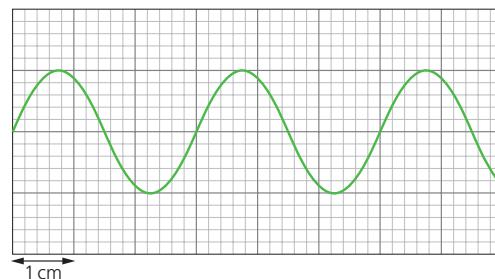
Penentuan nilai ketidakpastian akan tergantung pada seberapa baik Anda dapat memperkirakan pengukuran panjang siklus dari *graticule* (*trace/jejak*). Mengingat bahwa *graticule* memiliki lebar yang terbatas, pengukuran panjang ini mungkin memiliki ketidakpastian sekitar $\pm 2\text{ mm}$.

► CONTOH SOAL 6B

Arus bolak-balik terhubung ke input Y dari CRO. Ketika kontrol basis waktu diatur pada 0,50 milidetik per sentimeter, diperoleh jejak yang ditunjukkan pada Gambar 6.3. Berapa frekuensi arusnya?

Jawaban:

Dua siklus lengkap dari jejak menempati 6,0 cm pada *graticule*. Oleh karena itu, panjang satu siklus adalah 3,0 cm. Pengaturan basis waktu adalah 0,50 ms/cm, jadi 3,0 cm setara dengan $3,0 \times 0,50 = 1,5\text{ ms}$. Jadi frekuensinya adalah $1/1,5 \times 10^{-3} = 670\text{ Hz}$.



▲ Gambar 6.3

Soal Latihan

- 2 Sinyal yang sama diterapkan pada input-Y dari CRO seperti pada Contoh Soal 6B, tetapi kontrol basis waktu diubah menjadi 2,0 milidetik per sentimeter. Berapa banyak siklus lengkap dari jejak yang akan muncul di layar, jika lebarnya 8,0 cm?

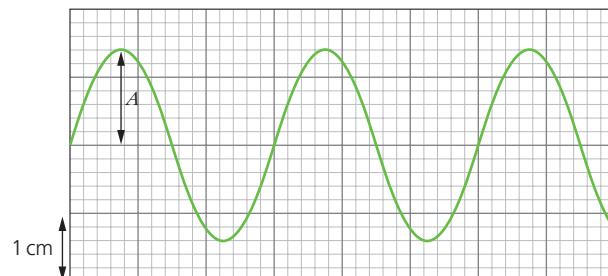
Mengukur Tegangan atau Arus Menggunakan Osiloskop Sinar Katoda

Osiloskop sinar katoda, dengan y -gain yang terkalibrasi, dapat digunakan untuk mengukur amplitudo sinyal tegangan bolak-balik.

(Kita telah melihat bagaimana basis waktu CRO dapat digunakan untuk mengukur waktu.) Sinyal dihubungkan ke input-Y, dan pengaturan y -gain dan basis waktu disesuaikan hingga jejak yang sesuai ditemukan, diperoleh (Gambar 6.4). Amplitudo A dari jejak diukur. Jika pengaturan y -gain adalah Q (dalam satuan volt per sentimeter), nilai puncak V_0 dari sinyal diberikan oleh $V_0 = AQ$. Nilai puncak ke puncak adalah $2V_0$.

Jika basis waktu dimatikan, garis vertikal lurus akan ditampilkan di layar. Nilai puncak-ke-puncak jejak ini dari bawah ke atas dapat diukur. Nilai puncak V_0 adalah setengah dari tegangan puncak-ke-puncak.

Setelah kita mengetahui tegangan puncak (V_0) dan hambatan (R) dari komponen yang dihubungkan melalui osiloskop, kita dapat menghitung arus puncak (I_0) menggunakan persamaan $V = IR$.



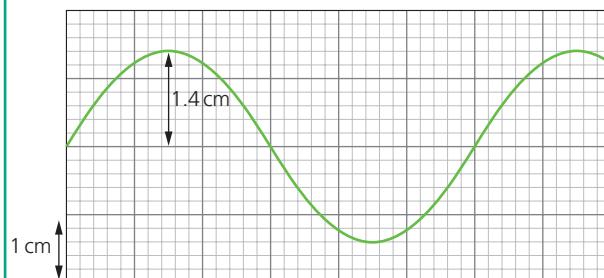
▲ Gambar 6.4 Pengukuran tegangan bolak-balik

CONTOH SOAL 2B

Tegangan bolak-balik terhubung ke input Y dari CRO. Ketika kontrol Y-gain diatur ke 5,0 mili-volt per sentimeter, diperoleh jejak yang ditunjukkan pada Gambar 6.5. Temukan tegangan puncak sinyal.

Jawaban

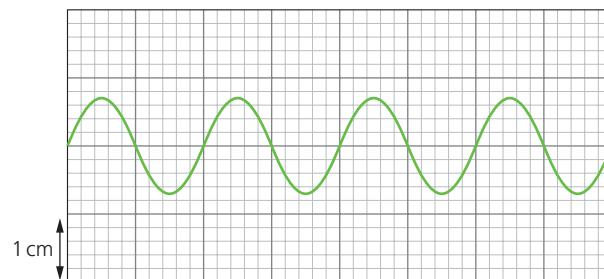
Ukur amplitudo jejak pada *graticule*: hasil pembacaan adalah 1,4 cm. Pengaturan y-gain adalah 5,0 mV/cm. Dengan demikian, 1,4 cm setara dengan $1,4 \times 5,0 = 7,0 \text{ mV}$. Tegangan puncak sinyal adalah 7,0 mV.



▲ Gambar 6.5

Soal Latihan

- 3 Input - Y dari CRO terhubung ke sumber tegangan bolak-balik. Ketika kontrol y-gain diatur ke 20 milivolt per sentimeter, diperoleh jejak yang ditunjukkan pada Gambar 6.6. Temukan tegangan puncak-ke-puncak sinyal.



▲ Gambar 6.6

Daya dalam Rangkaian AC

Dari Gambar 6.1 jelas bahwa nilai rata-rata arus bolak-balik adalah nol. Namun, ini tidak berarti bahwa ketika AC sumber terhubung ke resistor, tidak ada daya yang dihasilkan dalam resistor. Arus bolak-balik dalam kawat dapat dianggap sebagai elektron yang bergerak maju mundur, dan meneruskan energinya melalui tumbukan.

Daya yang dihasilkan dalam resistansi R diberikan oleh persamaan

$$P = I^2R$$

Namun pada bagian ini, I harus ditulis sebagai

$$I = I_0 \sin \omega t$$

Dengan demikian

$$P = I_0^2 R \sin^2 \omega t$$

Karena I_0^2 dan $\sin^2 \omega t$ selalu positif, kita lihat bahwa daya P juga selalu positif.

Persamaan yang baru saja kita peroleh untuk P merupakan daya setiap saat. Apa yang jauh lebih berguna adalah daya rerata atau rata-rata, yaitu kuantitas yang harus digunakan dalam menentukan daya yang dihasilkan dalam resistor. Karena I_0 dan R adalah konstanta, nilai rata-rata P akan bergantung pada nilai rata-rata $\sin^2 \omega t$, yaitu $\frac{1}{2}$. Jadi daya rata-rata $\langle P \rangle$ yang dikirimkan ke resistor adalah

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_0^2 R = \frac{1}{2} V_0^2 / R$$

atau

Untuk arus bolak-balik sinusoidal, daya rata-rata adalah setengah dari daya maksimum.

Kita dapat menggunakan nilai rata-rata kuadrat arus atau tegangan dalam hubungan ini, karena

$$\langle I^2 \rangle = \frac{1}{2} I_0^2 \text{ dan } \langle V^2 \rangle = \frac{1}{2} V_0^2$$

Akar kuadrat dari $\langle I^2 \rangle$ disebut akar-rata-rata-kuadrat, atau r.m.s. (*root mean square*) nilai arus I_{rms} dan juga akar kuadrat dari $\langle V^2 \rangle$ akar-rata-rata-kuadrat, atau nilai tegangan r.m.s. (V_{rms}). Hubungan matematisnya adalah

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\langle I^2 \rangle} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = 0,707 I_0$$

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{\langle V^2 \rangle} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} = 0,707 V_0$$



r.m.s. merupakan nilai yang berguna, karena mewakili nilai efektif arus dan tegangan dalam rangkaian AC. Arus searah dengan nilai I , sama dengan arus r.m.s I_{rms} dari rangkaian AC, akan menghasilkan efek pemanasan yang sama persis dalam sebuah resistor. Dalam menentukan sumber tegangan domestik, yang digunakan adalah nilai r.m.s., bukan nilai puncak.

Nilai arus atau tegangan bolak-balik r.m.s. merupakan nilai arus searah atau tegangan searah yang akan menghasilkan energi panas dengan laju yang sama dalam suatu resistor.

CONTOH SOAL 2B

Sebuah pemanas $1,5\text{ kW}$ terhubung ke sumber listrik domestik, yang terukur sebagai 230 V . Hitung arus puncak di pemanas, dan hambatannya.

Jawaban:

Versi r.m.s dari persamaan daya/arus/tegangan adalah I_{rms} $V_{\text{rms}} = \text{daya rata-rata}$.

Ini menghasilkan $I_{\text{rms}} = (1,5 \times 10^3)/230 = 6,5\text{ A}$.

Arus puncak $I_0 = 2I_{\text{rms}} = 9,2\text{ A}$

Resistansi $R = V_{\text{rms}}/I_{\text{rms}} = 230/6,5 = 35\Omega$

Soal Latihan

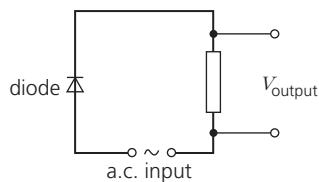
- 4 Tegangan puncak dari sinyal bolak-balik adalah 28 mV . Tentukan nilai tegangan r.m.s.-nya.
- 5 Untuk sumber bolak-balik yang diberikan oleh $V = 24 \sin 380t$ dengan V dalam volt, tentukan nilai tegangan r.m.s.-nya
- 6 Sebuah pemanas dengan resistansi 35Ω dihubungkan ke sumber listrik domestik, terbaca 230 V .

Hitunglah

- a tegangan puncak sumber listrik
- b daya rata-rata dalam resistor.
- c Berapakah nilai maksimum dan minimum dari daya sesaat pada resistor?

6.2 Penyearahan dan Perataan

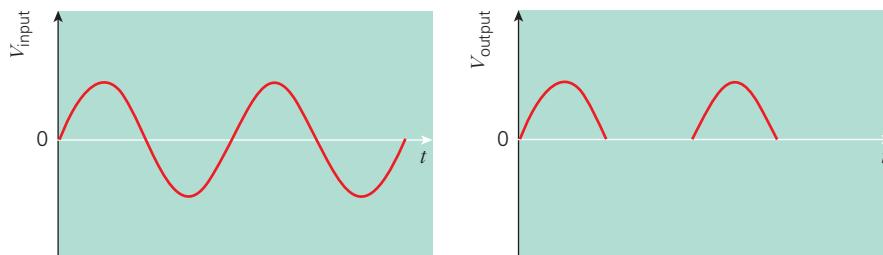
Terkadang perlu untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah. Ini karena sebagian besar perangkat elektronik membutuhkan arus searah, sedangkan pasokan sumber listrik domestik berbentuk arus bolak-balik. Konversi dapat dilakukan dengan proses yang dikenal sebagai **rektifikasi** (penyearahan).



▲ **Gambar 6.7** Rangkaian diode tunggal untuk penyearah setengah gelombang

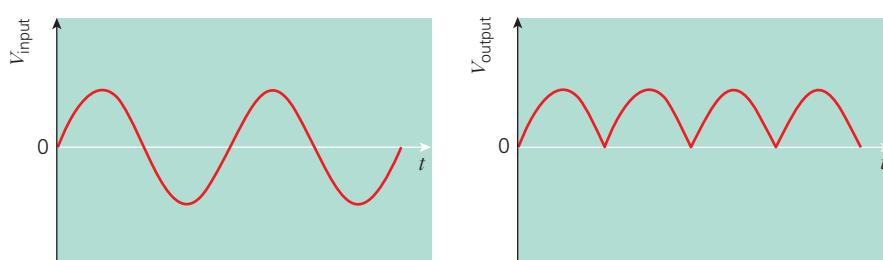
Misalkan dioda tunggal (lihat Topik 1.3) dihubungkan ke AC rangkaian **Gambar 6.7**.

Kita tahu bahwa dioda memungkinkan arus mengalir dalam satu arah saja. Tegangan keluaran melintasi resistor hanya akan terdiri dari setengah siklus positif dari tegangan masukan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.8**. Dioda telah menolak bagian negatif dari masukan, menghasilkan tegangan searah melintasi resistor keluaran yang sangat berfluktuasi, bukan tegangan langsung yang konstan. Namun demikian, kita telah mendapat apa yang disebut **rektifikasi** atau **penyearahan** (*half wave rectification*).



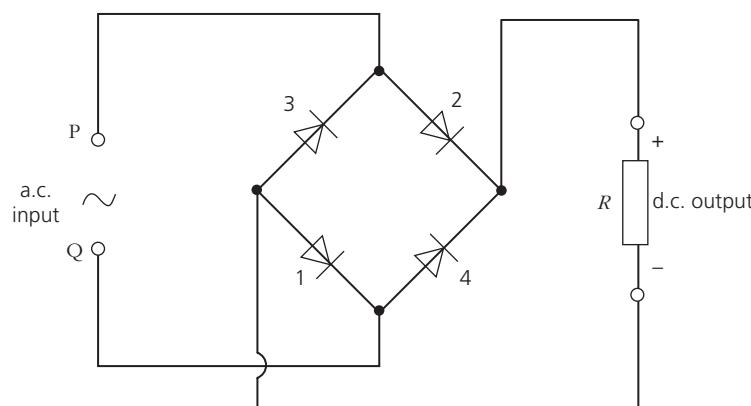
▲ **Gambar 6.8**
Penyearah setengah gelombang

Lebih hemat energi, untuk memanfaatkan setengah siklus negatif dari input dan membalikkan polaritasnya, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6.9**. Proses ini disebut **penyearahan gelombang penuh** (*full wave rectification*).



▲ **Gambar 6.9**
Penyearahan gelombang penuh

Satu rangkaian yang digunakan untuk penyearah gelombang penuh diilustrasikan pada **Gambar 6.10**.

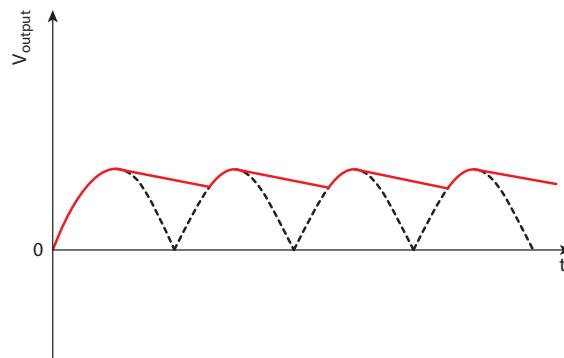
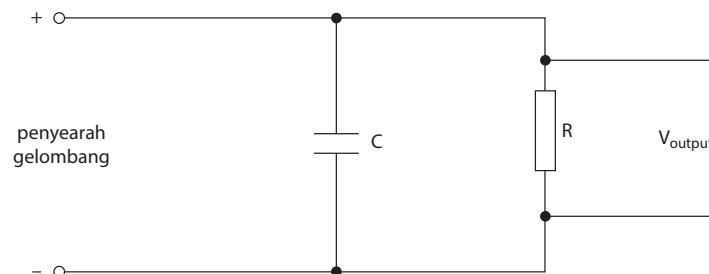


▲ Gambar 6.10 rangkaian empat dioda (jembatan) untuk penyearah gelombang penuh

Dalam gambar menunjukkan penggunaan empat dioda yang disusun dalam pola berlian dan disebut sebagai rangkaian jembatan penyearah. Terminal inputnya adalah P dan Q. Jika P positif selama setengah siklus pertama, dioda 1 dan 2 di sisi berlawanan dari berlian akan bekerja. Pada setengah siklus berikutnya Q positif, dan dioda 3 dan 4 bekerja. Jadi resistor yang bertindak sebagai beban akan selalu memiliki kutub atas positif dan kutub bawah negatif.

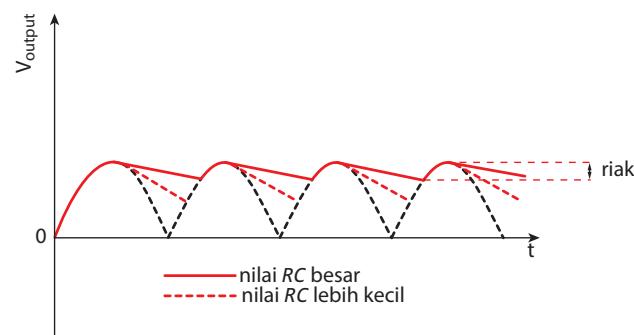
Rangkaian telah menghasilkan tegangan searah, tetapi keluarannya masih belum mendekati tegangan searah yang stabil, seperti yang dipersyaratkan oleh sebagian besar peralatan elektronik. Kita dapat memperbaiki situasi dengan menyisipkan kapasitor pada terminal output dari rangkaian jembatan seperti pada [Gambar 6.11](#).

▲ Gambar 6.11
Perataan (smoothing)
dengan kapasitor



Kapasitor mengisi muatan pada bagian naik dari setengah siklus, dan kemudian melepaskan melalui resistor saat tegangan output turun. Efeknya adalah untuk mengurangi fluktuasi keluaran searah. Proses ini disebut *smoothing* (perataan).

Pelepasan kapasitor telah dibahas dalam [Topik 3.3](#). Faktor penting adalah konstanta waktu dari rangkaian resistor-kapasitor. Jika hasil kali kapasitansi C dan resistansi beban R jauh lebih besar dari setengah periode sumber asli ke rangkaian penyearah, riak pada tegangan atau arus searah akan kecil. Riak merupakan ukuran variasi tegangan atau arus yang ditumpangkan pada tegangan atau arus searah. Mengurangi konstanta waktu akan meningkatkan riak, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 6.12](#).



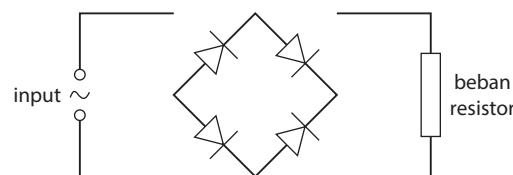
▲ [Gambar 6.12](#) ukuran riak

RANGKUMAN

- » Arus atau tegangan bolak-balik disajikan dalam bentuk persamaan $x = x_0 \sin \omega t$.
- » Nilai arus atau tegangan rms bolak-balik adalah nilai arus searah atau tegangan searah yang akan menghasilkan energi panas dengan laju yang sama dalam suatu resistor.
- » Nilai puncak dan akar-rata-rata-kuadrat (r.m.s.) dari arus atau tegangan sinusoidal dihubungkan dengan persamaan dalam bentuk $x_0 = \sqrt{2x_{rms}}$
- » Untuk masukan sinusoidal, daya rata-rata dalam beban resistif adalah setengah dari daya puncak.
- » Sebuah dioda tunggal digunakan sebagai penyearah setengah gelombang: setengah siklus negatif diblokir.
- » Rangkaian jembatan empat dioda dapat digunakan sebagai penyearah gelombang penuh.
- » Kapasitor yang terhubung melintasi keluaran mengurangi fluktuasi tegangan hasil penyearahan yang diterapkan pada resistor beban.
- » Derajat riak tergantung pada konstanta waktu RC pengosongan kapasitor *smoothing* melalui resistor beban. RC yang lebih besar memberikan riak yang lebih kecil.

ASESMEN FORMATIF

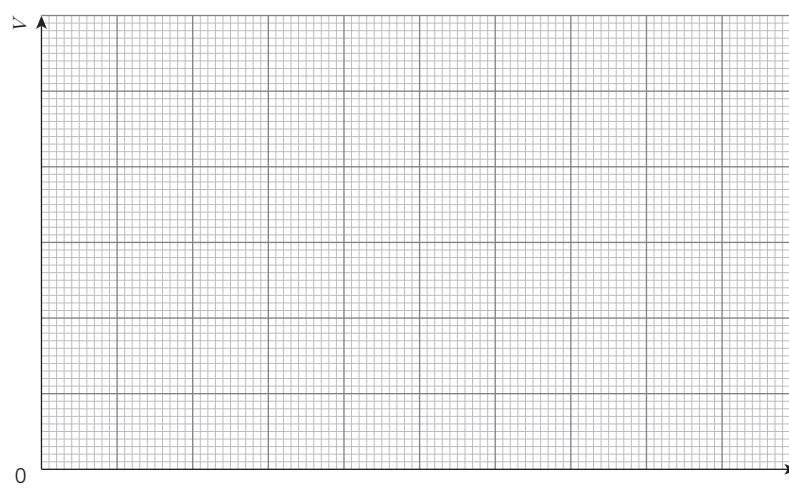
- 1 Sistem stereo memiliki dua saluran keluaran, masing-masing terhubung ke pengeras suara dengan resistansi efektif $8,0\Omega$. Setiap saluran dapat mengirimkan output daya rata-rata maksimum 48 W ke speakernya. Hitung tegangan r.m.s. dan arus r.m.s. saat dihubungkan ke satu speaker pada daya maksimum ini. Asumsikan bahwa pengeras suara dapat diperlakukan sebagai resistansi sederhana dan tegangannya sinusoidal.
- 2 Rangkaian penyearah gelombang penuh pada [Gambar 6.10](#) digunakan untuk menyearahkan tegangan masukan AC sebesar 240 Vrms . Resistor keluaran memiliki resistansi $17\text{ k}\Omega$.
 - a Hitung nilai puncak tegangan input.
 - b Perkirakan arus rata-rata pada resistor keluaran.
- 3 a Lengkapi salinan [Gambar 6.13](#) untuk menunjukkan empat dioda yang terhubung untuk membentuk penyearah gelombang penuh.



▲ [Gambar 6.13](#)

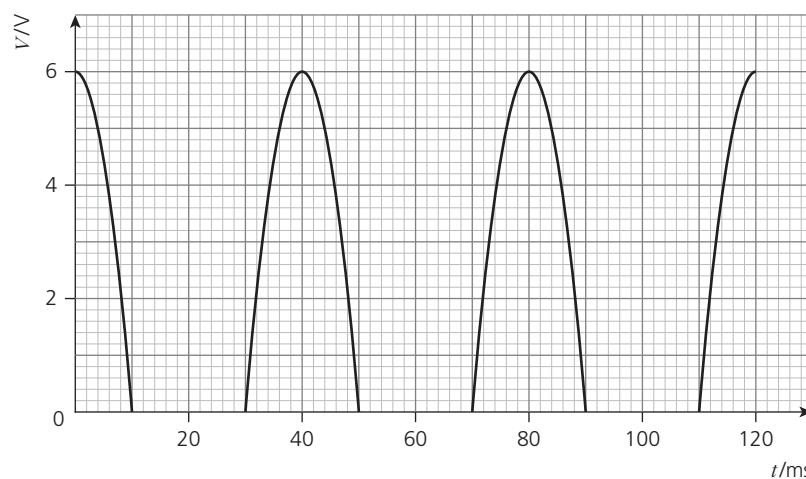
- b Beda potensial input akar-rata-rata-kuadrat ke penyearah gelombang penuh lengkap adalah 12 V . Frekuensi beda potensial masukan adalah 50 Hz .

Pada sumbu [Gambar 6.14](#), buat sketsa variasi waktu t dari beda potensial V melintasi resistor beban selama 3 periode beda potensial input.



▲ [Gambar 6.14](#)

- c Pada diagram rangkaian lengkap dari Gambar 6.13, gambarkan simbol untuk kapasitor, dihubungkan sehingga menghasilkan perataan (*smoothing*) beda potensial keluaran.
- d Resistor beban keluaran dalam rangkaian yang menyediakan penyebarluasan setengah gelombang adalah $23\text{ k}\Omega$. Variasi waktu t dari tegangan keluaran V melintasi beban ditunjukkan pada Gambar 6.15.



▲ Gambar 6.15

Sebuah kapasitor dengan nilai kapasitansi $2\mu\text{F}$ terhubung secara paralel dengan resistor. Pada salinan Gambar 6.15, buat sketsa garis untuk menunjukkan variasi waktu t dari tegangan keluaran yang mengalami proses perataan (*smoothing*).

7 Fisika Partikel

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

7.1. Atom, inti dan radiasi

1. mengambil kesimpulan tentang keberadaan inti dan ukuran kecil inti berdasarkan hasil eksperimen hamburan sebuah partikel
2. menjelaskan model sederhana inti atom yang terdiri dari proton dan neutron, serta elektron yang mengelilinginya.
3. membedakan jumlah nukleon dan jumlah proton
4. memahami bahwa isotop adalah unsur yang sama dengan jumlah neutron yang berbeda dalam intinya
5. memahami dan menggunakan notasi $_{\text{Z}}^{\text{A}}\text{X}$ untuk menyatakan sebuah nuklida
6. memahami bahwa jumlah nukleon dan jumlah muatan selalu tetap dalam reaksi inti (reaksi nuklir)
7. menggambarkan perbandingan massa dan muatan dari radiasi α , β , dan γ . Termasuk β^- (elektron) dan β^+ (positron)
8. memahami bahwa sebuah antipartikel memiliki massa yang sama, tetapi muatannya berlawanan dengan partikel yang bersangkutan dan bahwa positron adalah antipartikel dari elektron

9. menyatakan bahwa (elektron) antineutrino diproduksi selama peluruhan β^- dan (β^-) neutrino yang dihasilkan selama peluruhan β^+

10. memahami bahwa partikel α memiliki energi diskrit tapi partikel β^- memiliki rentang energi yang bersifat kontinu karena (anti) neutrino yang dipancarkan dalam peluruhan β^-

11. menunjukkan contoh peluruhan α dan β^- dengan persamaan peluruhan radioaktif dalam bentuk $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{234}_{90}\text{Th} + ^4_2\alpha$

12. menggunakan satuan massa atom terpadu (u) sebagai satuan massa

7.2. Partikel dasar

1. memahami bahwa quark adalah partikel dasar dan ada enam macam (jenis) quark: up, down, strange, charm, top, dan bottom.
2. mengingat dan menggunakan muatan dari setiap macam quark dan memahami bahwa masing-masing antiquark memiliki muatan yang berlawanan (tidak diperlukan pengetahuan tentang sifat quark lainnya)
3. Mengingat bahwa proton dan neutron bukan partikel dasar dan menjelaskan komposisi quark untuk proton dan neutron

4. memahami bahwa hadron dapat berupa baryon (terdiri dari tiga quark) atau meson (terdiri dari satu quark dan satu antiquark)
5. menggambarkan perubahan komposisi quark yang terjadi selama peluruhan tempat β^- dan β^+
6. mengingat bahwa elektron dan neutrino adalah partikel dasar yang disebut lepton

Pemahaman Pendahuluan

- Atom terdiri dari inti yang sangat kecil berisi proton dan neutron, dan dikelilingi oleh elektron yang mengorbit inti.
- Peluruhan inti tidak stabil inti menghasilkan emisi radioaktif.
- Proton dan neutron bukan partikel dasar. .

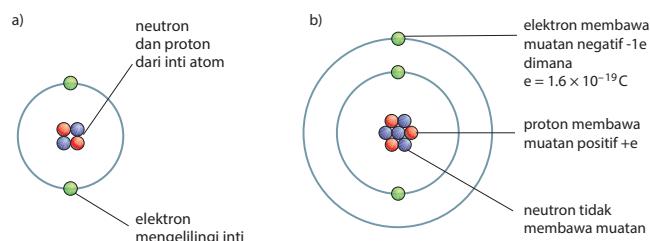
7.1 Atom, Inti, dan Radiasi

Atom adalah suatu unsur yang terdiri atas tiga partikel yang disebut proton, neutron, dan elektron. Proton dan neutron berada di pusat atau inti atom. Elektron bergerak mengelilingi (mengorbit) inti.

Pada pembahasan dalam bab ini, kita akan melihat bahwa diameter nukleus hanya sekitar 1/10 000 dari diameter atom. Kita juga akan menemukan bagaimana bukti adanya inti dan ukuran kecil dari inti diperoleh.



Gambar 7.1 mengilustrasikan model yang sangat sederhana (tidak menunjukkan skala) dari atom helium dan atom litium.



▲ Gambar 7.1 Struktur a) atom helium dan b) atom lithium

Massa atom dan partikel penyusunnya lebih mudah dinyatakan dalam **satuan massa atom (u)** daripada satuan SI massa kilogram. ($1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$).

Proton dan neutron keduanya memiliki massa sekitar satu satuan massa atom u. Sebagai perbandingan, massa elektron sangat kecil, sekitar 1/2000 dari 1u. Oleh karena itu, sebagian besar massa atom berada di dalam nukleus.

Sifat dasar proton, neutron dan elektron dirangkum dalam **Tabel 7.1**.

	massa/u	muatan	posisi
proton	1,0073	+e	dalam nukleus
neutron	1,0087	0	dalam nukleus
elektron	0,00055	-e	mengorbit inti

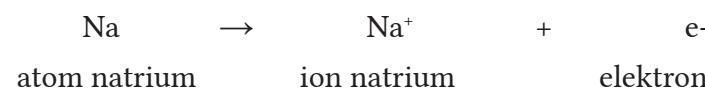
$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Tabel 7.1

Atom dan Ion

Atom tidak bermuatan (netral) karena mengandung jumlah proton dan elektron yang sama, muatan pada elektron sama dan berlawanan dengan muatan pada proton. Jika sebuah atom kehilangan satu atau lebih elektron, sehingga tidak mengandung jumlah proton dan elektron yang sama, ia menjadi partikel bermuatan dan disebut ion.

Misalnya, jika atom natrium kehilangan salah satu elektronnya, ia menjadi ion natrium positif.



Jika sebuah atom memperoleh elektron, atom tersebut akan menjadi ion negatif.

Jumlah proton dan jumlah nukleon

Banyaknya proton dalam inti sebuah atom disebut dengan jumlah proton atau nomor atom Z.

Jumlah proton dan jumlah neutron dalam inti atom disebut dengan jumlah nukleon atau nomor massa A

Nukleon merupakan nama yang diberikan kepada proton maupun neutron yang berada dalam inti atom.

Perbedaan antara jumlah nukleon (A) dan jumlah proton (Z) memengaruhi jumlah neutron dalam nukleus.

Lambang nuklida

Jika lambang kimia suatu unsur adalah X, unsur-unsur tertentu dari atom ini, nuklida, dilambangkan dengan notasi ${}^A_Z X$

A = jumlah nukleon (nomor massa)

Z = jumlah proton (nomor atom)

Unsur berubah untuk setiap perubahan nilai Z (jumlah proton) dan simbol X berubah. Sebuah nuklida adalah nama yang diberikan untuk atom yang intinya mengandung sejumlah proton dan jumlah neutron tertentu. Inti dari natrium mengandung 11 proton dan 12 neutron. Oleh karena itu, jumlah protonnya Z adalah 11 dan jumlah nukleon A adalah $11 + 12 = 23$. Nuklida ini dapat ditunjukkan sebagai ${}^{23}_{11} \text{Na}$. Semua atom dengan inti yang mengandung 11 proton dan 12 neutron termasuk dalam golongan ini dan merupakan nuklida yang sama.

CONTOH SOAL 7A

Inti oksigen diwakili oleh ${}^{16}_8 \text{O}$. Jelaskan struktur atomnya.

Jawaban:

Inti atom dari oksigen memiliki jumlah proton 8 dan nomor atom 16. Oleh karena itu inti atom memiliki proton 8 dan $16 - 8 = 8$ neutron, serta memiliki 8 elektron (sama dengan jumlah proton) yang mengelilingi inti atom.

Soal Latihan

- Tuliskan jumlah proton dan nomor nukleon untuk inti kalium 1940K. Hitung jumlah neutron dalam inti.

Isotop

Kadang-kadang atom dari unsur yang sama memiliki jumlah neutron yang berbeda dalam intinya. Jika dua nuklida berbeda memiliki inti dengan nomor atom Z yang sama tetapi nomor massa A berbeda, mereka disebut isotop dari unsur yang sama.

Pada umumnya, Klorin mempunyai 17 proton dan 18 neutron dalam intinya, dengan demikian jumlah nukleon (omer massa) A = $17 + 18 = 35$. Bentuk klorin ini sering disebut klorin-35. Bentuk lain dari klorin mengandung

17 proton dan 20 neutron di dalam inti, sehingga jumlah nukleon (nomer massa) adalah 37. Klorin-37. Klorin-35 dan klorin-37 ini dikatakan sebagai isotop klorin.

Isotop adalah bentuk lain dari suatu unsur yang sama dan memiliki jumlah proton sama, tetapi jumlah neutron berbeda dalam intinya.

Beberapa unsur memiliki banyak isotop, tetapi unsur yang lain hanya memiliki sangat sedikit isotop. Untuk hidrogen, isotop yang paling umum adalah hidrogen-1. Inti atomnya hanya memiliki satu proton. Hidrogen-2 disebut deuterium; inti deuterium mengandung satu proton dan satu neutron. Hidrogen-3, dengan satu proton dan dua neutron, disebut tritium.

Perhatikan bahwa istilah isotop digunakan untuk menggambarkan inti dengan nomor proton yang sama (yaitu, inti dari unsur yang sama) tetapi dengan nomor inti yang berbeda.

Perhatikan bahwa istilah nuklida digunakan untuk menggambarkan golongan inti tertentu:

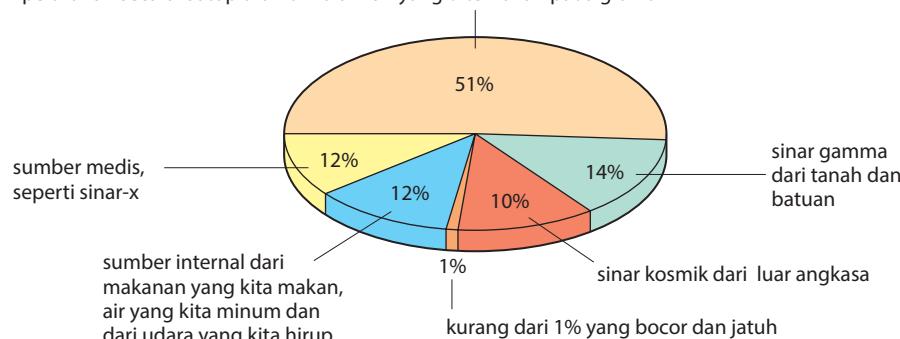
Nuklida adalah golongan inti yang memiliki jumlah nukleon tertentu dan jumlah proton tertentu.

Radiasi Latar

Radioaktivitas adalah fenomena alam. Batuan seperti granit mengandung sejumlah nuklida radioaktif, beberapa makanan yang kita makan memancarkan radiasi, dan bahkan tubuh kita secara alami bersifat radioaktif.

Meskipun atmosfer memberikan kehidupan di Bumi dengan beberapa pelindung, namun ada beberapa radiasi dari luar angkasa (radiasi kosmik). Selain radioaktivitas alami ini, kita juga terpapar radiasi dari sumber buatan manusia. Radiasi buatan ini ditemukan dalam pengobatan, dampak ledakan nuklir, dan kebocoran dari pembangkit listrik tenaga nuklir. Jumlah dari semua radiasi ini dikenal sebagai **radiasi termal**. Gambar 7.2 menunjukkan proporsi relatif radiasi termal yang berasal dari berbagai sumber.

radon dan inti anaknya yang dilepaskan ke udara diikuti dengan peluruhan secara isotop uranium alamiah yang ditemukan pada granit

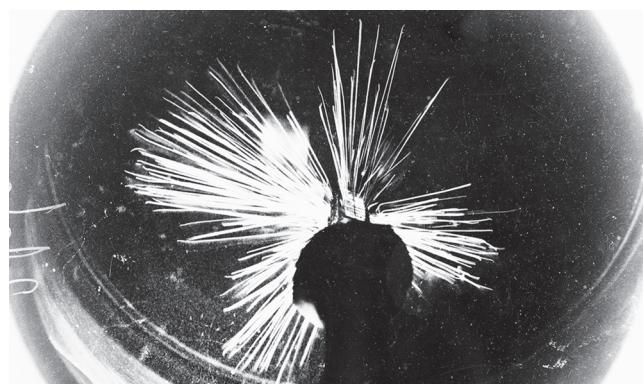


▲ Gambar 7.2 Sumber radiasi latar



Partikel α , partikel β , dan radiasi sinar γ

Beberapa unsur memiliki inti yang tidak stabil. Artinya, perbandingan jumlah proton dan neutron yang ada dalam inti tidak sama yang mengakibatkan gaya yang bekerja pada inti tidak seimbang. Untuk menjadi lebih stabil, inti atom tersebut memancarkan partikel dan/ atau radiasi gelombang elektromagnetik. Inti yang memiliki sifat semacam itu dikatakan bersifat radioaktif, dan emisi yang dihasilkan disebut radioaktivitas. Emisi radiasi yang dihasilkan tidak terlihat oleh mata, tetapi jejaknya pertama kali terlihat melalui alat yang disebut kamar kabut (*cloud chamber*). Foto pada [Gambar 7.3](#) menunjukkan jejak radioaktif yang dihasilkan oleh satu jenis emisi, yaitu partikel α .



▲ Gambar 7.3 Lintasan partikel- α dari sumber radioaktif

Hasil penyelidikan karakteristik dan sifat dari partikel atau radiasi yang dipancarkan menunjukkan bahwa ada tiga jenis emisi yang berbeda. Ketiga jenis emisi tersebut adalah partikel- α (partikel alpha), partikel β (partikel beta) dan radiasi sinar γ (radiasi gamma). Ketiga emisi tersebut berasal dari nukleus(inti)

Partikel- α

Sebuah partikel- α terdiri dari dua proton dan dua neutron dan karenanya memiliki muatan $+2e$. Oleh karena itu, partikel- α juga disebut inti helium. Partikel- α dipancarkan oleh inti berat (misalnya, nuklida dengan nomor atom antara bismuth 83 dan uranium 92) dengan kecepatan tinggi sampai mencapai sekitar 10^7 m s^{-1} (sekitar 5% dari kecepatan cahaya). Emisi partikel - α memiliki daya tembus paling lemah diantara tiga jenis emisi radiasi yang dihasilkan. Radiasi partikel - α dapat melewati kertas yang sangat tipis, tetapi tidak dapat menembus lembaran timah setebal sebuah kartu. Jangkauannya di udara hanya beberapa sentimeter.

Sebuah partikel- α identik dengan inti atom helium.

Simbol partikel- α :

Sebuah partikel- α ditulis sebagai 

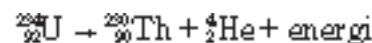
Saat partikel- α bergerak melalui materi, ia berinteraksi dengan atom terdekat, dan menyebabkan atom tersebut kehilangan satu atau lebih elektron. Atom yang terionisasi dan elektron yang terlepas disebut pasangan ion. Produksi pasangan ion mengharuskan terjadinya pemisahan muatan yang berbeda, dan proses ini memerlukan energi. Partikel- α memiliki massa dan muatan yang relatif besar, akibatnya partikel ini memiliki kemampuan yang sangat besar untuk mengionisasi. Partikel- α dapat menghasilkan sebanyak 105 pasangan ion untuk setiap sentimeter udara yang dilaluinya. Dengan demikian, partikel- α relatif cepat mengalami kehilangan energi, dan memiliki daya tembus yang rendah.

Ketika sebuah inti atom memancarkan partikel- α , inti tersebut dikatakan mengalami peluruhan α . Inti atom kehilangan dua proton dan dua neutron pada emisi partikel- α .

Dalam peluruhan α , jumlah proton inti berkurang dua, dan jumlah nomor massa berkurang empat.

Setiap unsur memiliki nomor proton tertentu, dan oleh karena itu, peluruhan menyebabkan satu unsur berubah menjadi unsur lain (proses ini kadang-kadang disebut transmutasi). Nuklida asli disebut nuklida induk, dan nuklida yang baru terbentuk disebut nuklida anak.

Misalnya, uranium-234 (sebagai nuklida induk) dapat memancarkan partikel α . Nuklida anak yang terbentuk adalah thorium-230. Selain itu, reaksi tersebut juga melepaskan energi, yang akan muncul sebagai energi kinetik partikel alfa dan nuklida anak. Emisi tersebut di atas disebut persamaan reaksi inti:



Perhatikan bahwa dalam proses terjadinya peluruhan radioaktif (pada kenyataannya, dalam semua proses terjadinya reaksi inti/reaksi nuklir) jumlah total (muatan)nukleon dan jumlah total (muatan) proton adalah kekal (konstan). Oleh karena itu, untuk semua persamaan yang terjadi pada reaksi nuklir, jumlah jumlah nomor massa di ruas kiri sama dengan jumlah nomor massa di ruas kanan. Begitu juga dengan itu, jumlah proton di ruas kiri persamaan sama dengan jumlah proton di ruas kanan.

Dalam persamaan di atas:

- » Jumlah proton pada nuklida induk ($Z = 92$) sama dengan jumlah proton pada nuklida anak ($Z = 90$) ditambah jumlah proton pada partikel alfa ($Z = 2$), jadi muatan sebelum dan sesudah reaksi sifatnya kekal.
- » Jumlah nukleon pada nuklida induk ($A = 234$) sama dengan jumlah jumlah nukleon pada nuklida anak ($A = 230$) ditambah jumlah nukleon pada partikel alfa ($A = 4$).

Energi dan massa, secara bersama-sama, juga kekal dalam semua reaksi nuklir, seperti halnya momentum.

PENGAYAAN

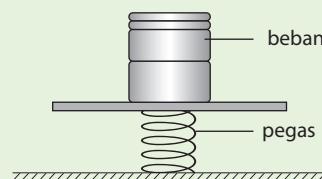
Mendeteksi radioaktivitas

Beberapa metode yang digunakan untuk mendeteksi emisi radioaktif didasarkan pada sifat pengion dari partikel atau radiasi.

Pencacah Geiger

Gambar 7.4 mengilustrasikan tabung Geiger-Müller yang terhubung dengan skala penghitung. Ketika radiasi memasuki jendela, radiasi tersebut menciptakan pasangan ion pada gas yang ada di dalam tabung. Partikel-partikel bermuatan, khususnya elektron, dipercepat oleh beda potensial antara anoda

kawat pusat dan katoda silinder. Partikel yang dipercepat ini kemudian menyebabkan ionisasi lebih lanjut. Hasil dari proses berkelanjutan ini digambarkan sebagai efek bola salju. Artinya, masuknya satu partikel ke dalam tabung yang mengakibatkan terbentuknya satu pasangan ion menghasilkan sejumlah besar elektron dan ion yang tiba di anoda dan katoda secara terus menerus. Kejadian ini menghasilkan sejumlah muatan yang diperkuat dan dihitung oleh scaler atau ratemeter. (Scaler mengukur jumlah total muatan yang terbentuk dalam tabung, selama scaler beroperasi. Pengukur kecepatan terus memantau jumlah hitungan per detik). Setelah pulsa terdeteksi, muatan dikeluarkan dari gas dalam kondisi siap untuk mendeteksi radiasi lain memasuki tabung.



▲ Gambar 7.4 Tabung Geiger-Muller dan scaler

Lempeng fotografi

Ketika emisi radioaktif mengenai kertas film fotografi, kertas film bereaksi seolah-olah telah terkena sejumlah kecil cahaya tampak. Ketika film diperbesar, terlihat seperti kabut atau menghitam. Kabut ini dapat digunakan untuk mendeteksi, tidak hanya adanya radioaktivitas, tetapi juga dosis radiasi.

Gambar 7.5 menunjukkan dosimeter (pengukur dosis radiasi) pada film. Alat ini berisi sepotong film fotografi yang menjadi berkabut saat terkena radiasi. Pekerja yang berisiko terkena radiasi memakai lempeng tersebut untuk mengukur jenis dan dosis radiasi yang telah terpapar pada mereka. Radiasi melewati filter yang berbeda sebelum mencapai film. Akibatnya, jenis radiasi, serta kuantitas, dapat dinilai.



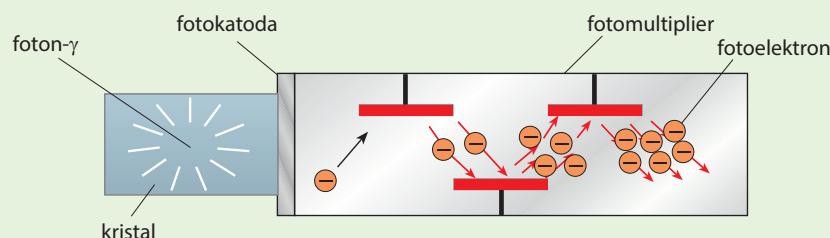
▲ Gambar 7.5 Lempeng Film dosimeter

Pencacah Sintilasi/Scintillation counter

Pada tahap awal, para pekerja di bidang radioaktif menggunakan layar kaca yang dilapisi dengan seng sulfida untuk mendeteksi radiasi. Ketika radiasi terjadi pada seng sulfida, ia memancarkan pulsa cahaya kecil yang disebut kilau. Tingkat di mana pulsa ini dipancarkan menunjukkan intensitas radiasi.

Para peneliti awal bekerja di ruangan gelap, mengamati layar seng sulfida dengan mata melalui mikroskop dan menghitung jumlah kilatan cahaya yang terjadi dalam waktu tertentu. Saat alat yang digunakan adalah Scintillation counter (lihat Gambar 7.6).

Seringkali kristal sintilator digunakan sebagai pengganti layar seng sulfida. Kristal dipasang dekat dengan perangkat yang dikenal sebagai photomultiplier, perangkat tabung vakum yang menggunakan prinsip emisi fotolistrik (lihat Topik 22). Kilatan cahaya menyebabkan emisi fotoelektron dari elektroda negatif fotomultiplier. Arus fotolistrik diperkuat di dalam tabung. Elektroda keluaran dihubungkan ke scaler atau ratemeter, seperti pada tabung Geiger- Müller.



▲ Gambar 7.6 Pencacah Sintilasi

Partikel- β

Sebuah inti radioaktif yang mengalami peluruhan β dapat memancarkan elektron bermuatan negatif (β^-) atau elektron bermuatan positif (β^+). Elektron positif (β^+) disebut positron atau antielektron. Positron adalah anti-partikel dari elektron, dan karena itu, memiliki massa yang sama tetapi muatan yang berlawanan dengan elektron.

Partikel- β adalah elektron yang bergerak cepat, baik β^- , atau positron, β^+ .

Partikel- β memiliki kecepatan yang dapat mencapai lebih dari 99% kecepatan cahaya. Partikel- β memiliki muatan yang nilainya setengah dari muatan partikel- α dan massanya jauh lebih kecil dibandingkan massa partikel- α . Akibatnya, Partikel- β menghasilkan pasangan ion lebih kecil bila dibandingkan dengan partikel- α , karena partikel- β , memiliki daya tembus materi lebih besar, dan mampu bergerak hingga sekitar satu meter di udara. Partikel- β dapat menembus kartu dan lembaran aluminium setebal beberapa milimeter.

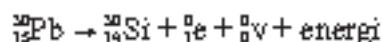
Dengan demikian, partikel- β jauh lebih besar daya tembusnya daripada partikel alfa , karena mampu

melakukan bergerak hingga sekitar satu meter di udara. Partikel- β dapat menembus kartu dan lembaran aluminium setebal beberapa milimeter.

Sebuah partikel- β dapat dipancarkan dari inti timah-214 (nuklida induk). Nuklida anak yang dihasilkan adalah bismut-214, dan sebagai tambahan, energi akan dilepaskan. Emisi partikel β diwakili oleh persamaan reaksi inti:



Sebuah partikel β^+ dapat dipancarkan dari inti fosfor-30 (nuklida induk). Nuklida anak yang dihasilkan adalah silikon-30 dan energi juga dihasilkan. Emisi β^+ diwakili oleh persamaan reaksi inti:



Dalam persamaan inti di atas, simbol ${}_{-1}^0e$ dan ${}_{+1}^0e$ masing-masing mewakili elektron dan positron. Emisi β^+ juga dikenal sebagai emisi positron. Kita akan melihat tentang hal ini secara lebih rinci dalam Bab 10.3 dalam konteks tomografi emisi positron (PET scan).

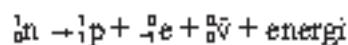
Simbol ${}_{\pm 1}^0\nu$ dan ${}_{\mp 1}^0\nu$ masing-masing mewakili neutrino dan antineutrino. Antineutrino adalah antimateri yang setara dengan neutrino. Neutrino tidak memiliki muatan listrik dengan massa yang sangat kecil atau tidak bahkan bisa dikatakan tidak bermassa dan dipancarkan dari inti pada saat yang bersamaan dengan partikel- β (elektron atau positron).

Karena neutrino dan antineutrino tidak bermuatan, kita dapat melihat bahwa pada kedua jenis peluruhan tersebut, muatan bersifat kekal dan jumlah total nukleon juga bersifat kekal.

Perubahan yang terjadi pada inti

Dinyatakan sebelumnya bahwa inti mengandung proton dan neutron. Lalu, dari mana asal emisi partikel- β ? Setiap partikel pada reaksi inti tentu saja berasal dari inti, bukan dari elektron di luar inti. Pada waktunya sebelum emisi, neutron dalam inti berubah menjadi proton, elektron negatif, dan antineutrino. Kita akan mempelajari lebih lanjut tentang bagaimana perubahan ini terjadi di Topik 7.2. Perbandingan jumlah proton dan neutron dalam inti berubah dan ini membuat nuklida anak lebih stabil.

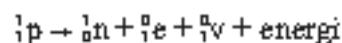
Faktanya, neutron bebas (yang tidak berada di dalam inti/nukleus) juga diketahui meluruh dengan cara yang sama:



Proses serupa terjadi di nukleus. Dalam peluruhan partikel- β , elektron negatif dan antineutrino $\bar{\nu}$ yang dipancarkan dari inti. Partikel ini meninggalkan inti dengan jumlah nukleon yang sama seperti sebelumnya, tetapi dengan satu proton tambahan dan satu neutron lebih sedikit.

Dalam emisi β^+ , proton dalam inti membentuk neutron, elektron positif, dan neutrino. Proses ini sekali lagi mengubah rasio proton terhadap neutron dalam inti dan membuat nuklida anak lebih stabil.

Dalam peluruhan β^+ proton dianggap mengubah dirinya sebagai berikut:



Dalam peluruhan β^+ , elektron positif dan neutrino dipancarkan dari inti. Partikel ini meninggalkan inti dengan jumlah nukleon yang sama seperti sebelumnya, tetapi dengan satu neutron ekstra dan satu proton lebih sedikit.

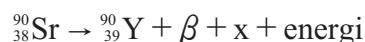
Dalam peluruhan β^- (elektron negatif yang dipancarkan), sebuah nuklida anak dibentuk dengan jumlah proton bertambah satu, tetapi dengan jumlah nukleon yang sama.

Dalam peluruhan β^+ (elektron positif yang dipancarkan), nuklida anak terbentuk dengan jumlah proton berkurang satu, tetapi dengan jumlah nukleon yang sama.

Partikel antimateri, positron (elektron positif), dengan sangat cepat bertemu dengan partikel ekivalennya, elektron negatif. Kedua partikel saling memusnahkan untuk menghasilkan radiasi γ . Hal ini membuat elektron positif sulit untuk dideteksi.

CONTOH SOAL 7B

Atom stronsium-90 (nuklida induk) dapat meluruh dengan emisi partikel- β untuk membentuk nuklida anak itriium-90. Peluruhan diwakili oleh persamaan inti



Nyatakan dan jelaskan apakah partikel tersebut merupakan elektron negatif atau positif. Nyatakan jenis partikel yang diwakili oleh x.

Jawaban

Jumlah proton bertambah satu, maka elektron yang dipancarkan adalah **elektron negatif**. Partikel x adalah **antineutrino** karena partikel ini dipancarkan dengan elektron negatif.

Soal Latihan

- 2 Tuliskan persamaan reaksi inti untuk menyatakan peluruhan α dari inti thorium (${}_{90}^{232}\text{Th}$) menjadi inti radium (Ra).
- 3 Tuliskan persamaan reaksi untuk menyatakan peluruhan β dari peluruhan inti radium (${}_{88}^{226}\text{Ra}$) menjadi inti aktinium (Ac).



Energi kinetik partikel alfa dan beta yang dipancarkan

Jumlah energi yang sama dilepaskan dalam peluruhan setiap inti dan tergantung pada nuklida induk dan jenis peluruhan. Misalnya, jumlah energi yang sama dilepaskan dalam peluruhan α dari setiap inti ${}_{90}^{232}\text{U}$.

Partikel- α yang dipancarkan dari nuklida radioaktif tertentu semua memiliki energi kinetik yang sama. Sebaliknya partikel- β dari nuklida tertentu, memiliki perbedaan energi kontinu, dari nol hingga energi maksimum yang memungkinkan.

Pada peluruhan- β , neutrino atau antineutrino dipancarkan dari inti pada saat yang bersamaan dengan partikel- β (elektron atau positron). Jadi energi yang dilepaskan dalam peluruhan terbagi antara energi kinetik partikel- β , nuklida anak yang dihasilkan serta energi neutrino atau antineutrino. Jumlah energi yang sama dilepaskan dalam peluruhan setiap partikel inti tertentu. Namun, energi partikel- β (elektron atau positron) yang dipancarkan dari nuklida radioaktif tertentu memiliki jumlah energi kinetik

yang bervariasi. Besarnya tergantung pada energi total yang tersedia terbagi menjadi energi kinetik partikel- β dan neutrino atau antineutrino. Jumlah dari energi positron dan energi neutrino serta jumlah energi elektron dan energi antineutrino konstan untuk peluruhan nuklida tertentu.

Partikel- α yang dipancarkan dari nuklida radioaktif tertentu semua memiliki energi kinetik yang sama.

Partikel- β yang dipancarkan dari nuklida radioaktif tertentu memiliki energi kinetik yang berubah secara kontinu karena neutrino atau antineutrino yang dipancarkan dalam peluruhan β .

► CONTOH SOAL 7C

Sebuah inti polonium stasioner ($^{212}_{84}\text{Po}$) bermassa 212 u secara spontan memancarkan partikel- α . Partikel- α tersebut dipancarkan dengan energi $1,4 \times 10^{-12}$ J dan reaksi menghasilkan inti timbal (Pb).

- Tuliskan persamaan reaksi yang menggambarkan peluruhan partikel- α dari inti polonium.
- Hitung kecepatan partikel- α

Penyelesaian

- $$^{212}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He} + \text{energi}$$
- $$\frac{1}{2}mv^2 = \text{energi-partikel-}\alpha$$

$$v = [(2 \times 1,4 \times 10^{-12}) / (4 \times 1,66 \times 10^{-27})]^{1/2}$$

$$= 2,1 \times 10^7 \text{ ms}^{-1}$$

Soal Latihan

- Energi kinetik partikel- β adalah $3,2 \times 10^{-16}$ J. Hitung kecepatan partikel- β tersebut.
- Gunakan prinsip kekekalan momentum untuk menghitung kecepatan inti timah pada [Contoh Soal 7C](#).

Radiasi- γ

Radiasi- γ adalah bagian dari spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang antara 10^{-11} m dan 10^{-13} m.

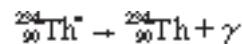
Karena radiasi- γ tidak bermuatan, daya ionisasinya jauh lebih kecil dibandingkan partikel- α atau partikel- β . Radiasi- γ dapat menembus ketebalan hampir tak terbatas

dari udara, beberapa meter dari beton atau beberapa sentimeter timbal.

Partikel- α dan partikel- β dipancarkan oleh inti yang tidak stabil dan memiliki kelebihan energi. Emisi partikel-partikel ini menghasilkan perubahan perbandingan jumlah proton terhadap neutron, tetapi nuklida anak mungkin masih memiliki energi berlebih. Inti/nuklida tersebut dapat kembali ke keadaan tidak tereksitasi (atau keadaan dasar) dengan memancarkan energi dalam bentuk radiasi.

Dalam emisi sinar γ , tidak ada partikel yang dipancarkan dan, oleh karena itu, tidak ada perubahan pada jumlah proton atau jumlah nukleon dari nuklida induk.

Misalnya, ketika uranium-238 meluruh dengan memancarkan partikel- α , inti thorium-234 yang dihasilkan mengandung energi berlebih (dalam keadaan tereksitasi) dan memancarkan foton radiasi untuk kembali ke keadaan dasar. Proses ini diwakili oleh persamaan reaksi inti:



Tanda* di sebelah simbol Th di ruas kiri persamaan menunjukkan bahwa inti torium dalam keadaan tereksitasi.

Ringkasan komposisi emisi radioaktif

Tabel 7.2 merangkum komposisi, massa dan muatan partikel- α , partikel- β , dan radiasi- γ

Karakteristik	α -partikel	partikel- β negatif	partikel- β positif	Radiasi- γ
massa	$4u$	Kurang lebih $u/2000$	Kurang lebih $u/2000$	0
muatan	$+2e$	$-e$	$+e$	0
Bentuk	inti helium (2 proton + 2 neutron)	elektron	positron	gelombang elektromagnetik yang termasuk dalam kategori gelombang pendek
kecepatan	hingga $0,05c$	hingga $0,99c$	hingga $0,99c$	c
mempengaruhi plat film?	Iya	Iya	Iya	Iya

▲ Tabel 7.2

Deret peluruhan radioaktif

Nuklida anak dari peluruhan radioaktif, bisa jadi bersifat tidak stabil sehingga dapat memancarkan radiasi untuk menghasilkan nuklida lain yang berbeda. Rangkaian peluruhan unsur radioaktif dari nuklida induk menjadi nuklida anak dilanjutkan dengan peluruhan berikutnya disebut deret peluruhan radioaktif. Deret peluruhan radioaktif akan berakhir ketika terbentuk nuklida yang stabil.

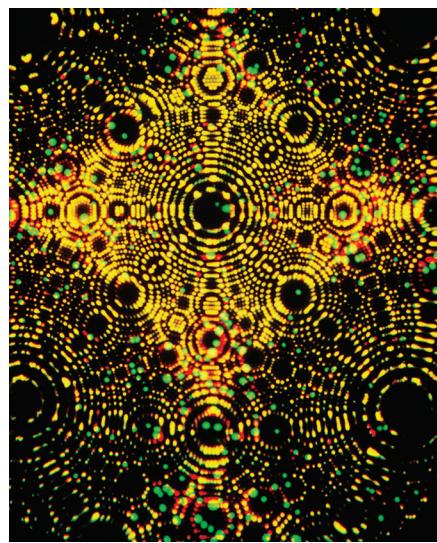
Salah satu dari deret peluruhan radioaktif seperti itu, yaitu deret uranium, ditunjukkan pada **Tabel 7.3**.

Peluruhan	radiasi yang dipancarkan
$^{238}_{\text{U}} \rightarrow ^{234}_{\text{Th}} + 2^{\text{He}} + \gamma$	α, γ
$^{234}_{\text{Th}} \rightarrow ^{234}_{\text{Pa}} + -1^{\text{e}} + \gamma$	β^-, γ
$^{234}_{\text{Pa}} \rightarrow ^{234}_{\text{U}} + -1^{\text{e}} + \gamma$	β^-, γ
$^{234}_{\text{U}} \rightarrow ^{230}_{\text{Th}} + 2^{\text{He}} + \gamma$	α, γ
$^{230}_{\text{Th}} \rightarrow ^{226}_{\text{Ra}} + 2^{\text{He}} + \gamma$	α, γ
$^{226}_{\text{Ra}} \rightarrow ^{222}_{\text{Rn}} + 2^{\text{He}}$	A
$^{222}_{\text{Rn}} \rightarrow ^{218}_{\text{Po}} + 2^{\text{He}}$	A

▲ **Tabel 7.3** Salah satu deret peluruhan uranium-238

Percobaan hamburan partikel- α

Gambar 7.7 menunjukkan foto yang diambil dengan mikroskop ion, alat yang memanfaatkan panjang gelombang de Broglie dari ion gas ([lihat Topik 8](#)). Gambar tersebut menunjukkan sampel iridium pada perbesaran sekitar lima juta.kali. Posisi atom iridium tunggal dapat dilihat.



▲ **Gambar 7.7** Foto mikroskop dari ion iridium

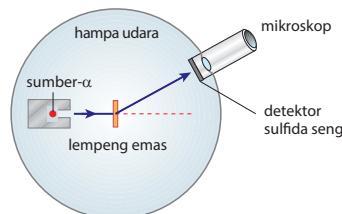
Foto-foto seperti ini memperkuat gagasan bahwa semua materi terbuat dari partikel yang sangat kecil yang kita sebut atom. Eksperimen yang dilakukan pada akhir abad kesembilan belas dan awal abad kedua puluh membuat sebagian besar fisikawan percaya bahwa atom itu sendiri terbuat dari partikel yang lebih kecil, beberapa di antaranya memiliki muatan positif atau negatif. Sayangnya, bahkan mikroskop yang paling kuat pun tidak dapat menunjukkan

kepada kita struktur internal atom. Banyak teori dikemukakan tentang struktur atom, tetapi serangkaian eksperimen yang dilakukan oleh Ernest Rutherford dan rekan-rekannya sekitar tahun 1910 yang menyebabkan lahirnya model yang sekarang kita kenal sebagai inti atom.



Percobaan hamburan partikel α

Pada tahun 1911, Rutherford dan dua rekannya, Hans Geiger dan Ernest Marsden, menembakkan seberkas partikel pada selembar kertas emas yang sangat tipis. Detektor seng sulfida dipindahkan di sekitar lapisan tipis (foil) tersebut untuk mendeteksi arah perjalanan partikel setelah menabrak foil (Gambar 7.8).



▲ Gambar 7.8 percobaan hamburan- α

Mereka menemukan bahwa:

- » sebagian besar partikel -melewati lapisan tipis dengan penyimpangan yang sangat kecil atau tanpa penyimpangan dari lintasannya semula
- » sangat sedikit partikel yang dibelokkan dengan sudut lebih dari 10°
- » sejumlah kecil partikel (satu dari sepuluh ribu) dibelokkan dengan sudut lebih dari 90° .

Dari pengamatan tersebut, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

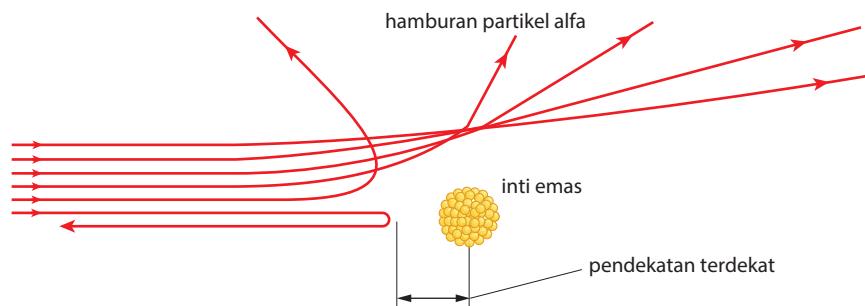
- » sebagian besar massa atom terkonsentrasi pada bagian yang sangat kecil di pusat atom. Oleh karena itu, sebagian besar partikel akan melewati lapisan tipis emas tanpa penyimpangan.
- » Pusat (atau inti) atom memiliki muatan. Partikel- α , yang juga bermuatan, yang melintas dekat dengan nukleus akan mengalami gaya yang menyebabkan partikel tersebut mengalami penyimpangan.
- » Hanya partikel- α yang melintas sangat dekat

dengan inti, atau bahkan hampir menabraknya secara langsung, akan mengalami gaya yang cukup besar untuk menyebabkannya menyimpang dengan sudut yang bernilai lebih besar dari 90° . Fakta bahwa begitu sedikit partikel yang mengalami gejala ini menegaskan bahwa nukleus berukuran sangat kecil, dan sebagian besar atom adalah ruang kosong.

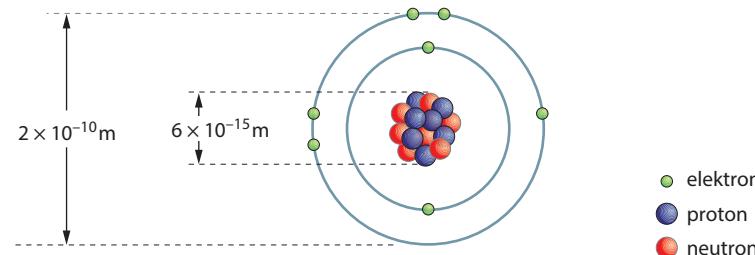


Gambar 7.9 menunjukkan beberapa kemungkinan lintasan partikel- α . Menggunakan model inti atom dan persamaan untuk menggambarkan gaya antar partikel bermuatan, Rutherford menghitung bagian dari partikel- α yang diharapkan akan menyimpang melalui berbagai sudut. Perhitungannya sesuai dengan hasil percobaan. Ini menegaskan model inti atom. Rutherford menghitung bahwa diameter inti atom adalah sekitar 10-15 m, dan diameter seluruh atom sekitar 10-10 m. Gambar 7.10 menunjukkan gambaran model inti atom nitrogen.

▲ Gambar 7.9
Kemungkinan
lintasan
partikel- α



▲ Gambar 7.10
Diameter dari
atom nitrogen
lebih dari 30 000
kali lebih besar
dari diameter
intinya



- elektron
- proton
- neutron

Beberapa tahun kemudian, percobaan hamburan partikel- α diulang menggunakan partikel- α dengan energi yang lebih tinggi. Beberapa perbedaan antara hasil eksperimen terakhir dengan eksperimen yang dilakukan Rutherford adalah pada rumus hamburan yang diamati. Hasil ini tampaknya terjadi karena partikel- α berenergi tinggi melintas sangat dekat dengan inti, dan mengalami, tidak hanya gaya elektrostatik tolak-menolak, tetapi juga gaya tarik menarik yang kuat. Gaya ini tampaknya tidak

memiliki pengaruh apapun di luar inti dan, karena itu, dianggap memiliki rentang pengaruh sangat kecil (sangat mendekati nilai diameter inti, sekitar 10^{-14} m). Gaya ini dikenal sebagai gaya inti kuat. Gaya ini adalah gaya yang menahan nukleon-nukleon tetap berada dalam nukleus bersama-sama. Gaya kuat bekerja pada proton dan neutron tetapi tidak pada elektron.

7.2 Partikel Dasar

Pada abad kesembilan belas, atom dianggap sebagai partikel dasar yang menyusun semua materi. Partikel dasar tidak terbentuk dari partikel lain. Ide tentang atom seperti ini digunakan untuk menjelaskan struktur dasar semua unsur. Percobaan yang dilakukan pada akhir abad kesembilan belas dan awal abad kedua puluh, seperti percobaan hamburan partikel alfa, memberikan bukti untuk struktur atom. Kesimpulannya adalah bahwa semua atom memiliki inti yang mengandung proton yang dikelilingi oleh elektron dan inti sangat kecil dibandingkan dengan ukuran atom. Sebuah partikel netral kemudian diajukan untuk menjelaskan perbedaan antara massa atom dan jumlah massa proton (jumlah muatan positif). Pada tahun 1932 [James Chadwick](#) menemukan neutron dan kemudian yang dianggap sebagai partikel dasar adalah proton, neutron dan elektron. Struktur atom kemudian dianggap serupa dengan yang ditunjukkan sebelumnya pada [Gambar 7.1](#).

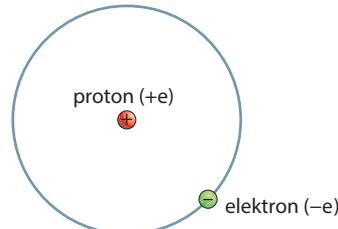
Partikel dalam atom harus mengalami gaya untuk mempertahankan strukturnya. Gaya-gaya tersebut adalah adalah [gaya gravitasi](#) yang bekerja antar semua massa (lihat [Topik 13](#)) dan gaya elektrostatik yang bekerja antar benda-benda bermuatan (lihat [Topik 18](#)). Gaya tolak-menolak elektrostatik kira-kira 1036 kali lebih besar daripada gaya tarik-menarik antar proton. Ada gaya tarik menarik lain yang harus menjaga agar proton tetap bersama di dalam nukleus. Gaya ini dikenal sebagai gaya kuat dan bekerja antar nukleon. Gaya ini tampaknya tidak memiliki efek apapun di luar inti, dan karena itu, dianggap rentangnya yang sangat pendek (hanya sedikit lebih besar diameter inti, sekitar 10^{-14} m). Tampaknya ada jarak yang membatasi antar nukleon yang serupa pada inti yang berbeda dan ini menunjukkan bahwa gaya tolak menolak timbul segera setelah nukleon saling berdekatan. Gaya kuat ini tidak bekerja pada elektron.

- Gaya kuat bekerja pada proton dan neutron tetapi tidak pada elektron.

CONTOH SOAL 2B

Gambar 7.11 mengilustrasikan atom hidrogen dengan elektron yang mengorbit nukleus.

- Untuk gaya-gaya yang bekerja pada elektron dan proton, sebutkan
 - sifat-sifatnya
 - arah geraknya.
- Jelaskan mengapa gaya kuat tidak bekerja pada elektron atau proton.



▲ Gambar 7.11 atom hidrogen

Jawaban

- Gaya gravitasi (disebabkan oleh massa elektron dan proton), gaya elektrostatik (disebabkan muatan pada elektron dan proton)
 - Kedua gaya itu menyebabkan proton dan elektron saling tarik-menarik, oleh karena itu, arahnya berasal dari satu partikel ke partikel lainnya.
- Elektron bukan nukleon, karena itu tidak terpengaruh oleh gaya kuat. Pada atom Hidrogen hanya ada satu nukleon, gaya kuat bekerja antar nukleon.

Soal Latihan

- Nyatakan gaya-gaya yang bekerja pada nukleon-nukleon inti helium.

Penemuan antimateri dalam radiasi kosmik mendukung teori yang dikembangkan dari teori relativitas khusus dan teori kuantum bahwa semua partikel dasar memiliki partikel antimateri yang sesuai. Setiap materi dan partikel antimaterinya memiliki massa yang sama tetapi muatannya berlawanan. Partikel-partikel berikut diperlukan untuk mendukung teori tersebut: antiproton, antineutron, dan antielektron. Antipartikel dapat dilambangkan dengan simbol yang sama dengan simbol partikel yang bersangkutan, tetapi dengan tanda berlawanan. Oleh karena itu, simbol yang digunakan untuk antiproton adalah p^- atau p dan untuk antineutron dan n^0- atau n .

Antielektron atau elektron positif (positron) diperkenalkan pada peluruhan partikel di [Topik 11.1](#). Sebuah elektron diwakili oleh e- atau e dan antielektron (positron) diwakili oleh e+ atau e.

Banyak partikel lain dan antipartikelnya ditemukan dalam radiasi kosmik di seluruh negara (kedua puluh?). Hasil ini mendukung gagasan bahwa proton dan neutron bukanlah partikel dasar.

[Hadron dan lepton](#)

Berbagai jenis partikel subatom ditempatkan ke dalam dua kategori tergantung pada sifat-sifatnya. Yang terkena gaya kuat disebut **hadron**, misalnya proton dan neutron, dan yang tidak terpengaruh gaya kuat disebut lepton, misalnya elektron dan positron.

Banyak partikel berbeda yang ditemukan dalam radiasi kosmik telah direproduksi pada tumbuhan inti atom berenergi tinggi menggunakan akselerator partikel seperti di Stanford California dan CERN di Swiss. Sejumlah besar tumbuhan telah dilakukan dan sejumlah besar hadron telah diproduksi. Dua dari kesimpulan untuk reaksi ini adalah:

- » total muatan listrik tetap
- » jumlah total nukleon umumnya tetap konstan.

Banyak hadron dideteksi dengan massa dan sifat yang berbeda dari proton dan neutron. Hasil ini mendukung gagasan bahwa proton dan neutron bukanlah partikel dasar, tetapi terdiri dari partikel yang lebih kecil (partikel dasar).



[Model quark dari hadron](#)

Masalah apa yang dianggap sebagai partikel fundamental diselesaikan dengan **model quark** untuk hadron. Dalam model quark, hadron terdiri dari partikel dasar yang disebut **quark**. Tiga jenis quark, disebut ‘rasa’ quark, yang diperkenalkan pada saat awal: **up (u)**, **down (d)** dan **strange (s)**.

Model quark dikembangkan karena lebih banyak partikel ditemukan. Jumlah total jenis quark atau ‘rasa’ quark dianggap ada enam. ‘Rasa’ tambahan dari quark adalah **charm (c)**, **bottom (b)** dan **top (t)**.

Rasa quark memiliki muatan dan **keanehan** seperti yang ditunjukkan pada [Tabel 7.4](#).

'rasa' quark	muatan	keanehan
up(u)	$+\frac{2}{3}e$	0
down (d)	$-\frac{1}{3}e$	0
strange (s)	$-\frac{1}{3}e$	- 1
charm (c)	$+\frac{2}{3}e$	0
bottom (b)	$-\frac{1}{3}e$	0
top (t)	$+\frac{2}{3}e$	0

▲ Tabel 7.4 nilai muatan untuk enam quark

Ada juga enam antiquark, \bar{u} , \bar{d} , \bar{s} , \bar{c} , \bar{b} , dan \bar{t} dan partikel-partikel ini memiliki nilai muatan yang berlawanan.

Kemungkinan kombinasi quark dan antiquark yang berbeda menjelaskan banyaknya partikel hadron yang berbeda. Muatan pecahan yang dibawa oleh quark berarti hanya kombinasi tertentu dari quark yang terjadi, untuk menghasilkan hadron dengan muatan utuh atau nol.

Ada dua jenis hadron: **baryon** dan **meson**.

Proton dan neutron adalah baryon. Antipartikel yang sesuai (\bar{p} dan \bar{n}) memiliki muatan listrik yang berlawanan.

Pion (π) dan Kappa (K) adalah contoh meson.

Baryon terdiri dari tiga quark atau tiga antiquark. Oleh karena itu proton dan neutron terdiri dari tiga quark.

proton:	u	u	d	neutron:	u	d	d	
Muatan	+1e	$+\frac{2}{3}e$	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$	Muatan	0	$+\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}e$

Meson terdiri dari quark dan antiquark. Misalnya, meson K^+ dibentuk dengan quark up dan quark antistrange. Meson A π^+ dibentuk oleh *quark up* dan *quark antidown*.

PENGAYAAN

Dalam interaksi yang kuat, sifat quark dipertahankan.

CONTOH SOAL 7E

Nyatakan nilai muatan untuk antiquark \bar{u} dan \bar{d} .

Jawaban

\bar{u} bermuatan $-\frac{2}{3}e$
dan \bar{d} bermuatan $-\frac{1}{3}e$

Soal Latihan

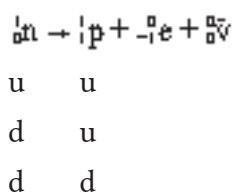
- 7** Tunjukkan bahwa muatan pada a) π^+ meson adalah $+e$ dan b) K^- adalah $-e$.
- 8** Tunjukkan apakah reaksi berikut dapat terjadi.
- $$p + p \rightarrow p + \bar{p} + n$$

Lepton

Lepton adalah partikel yang tidak terpengaruh oleh gaya kuat. Elektron dan neutrino dan pasangan antimaterinya, positron dan antineutrino, adalah contoh lepton. Jenis partikel ini tampaknya tidak terdiri dari partikel yang lebih kecil dan, oleh karena itu, lepton dianggap sebagai partikel fundamental.

Memahami peluruhan beta dalam bentuk quark dan lepton

Emisi elektron atau positron dari inti telah dibahas sebelumnya dalam topik ini. Selama peluruhan neutron dalam inti, proton terbentuk dan elektron bersama antineutrino dipancarkan. Ini adalah peluruhan β^- . Dalam hal partikel dasar, quark, reaksi dapat ditunjukkan sebagai berikut:



Perhatikan bahwa tidak ada quark yang diperlihatkan untuk elektron dan antineutrino karena keduanya adalah lepton dan lepton tidak terbuat dari quark.

PENGAYAAN

Sifat quark tidak dipertahankan karena quark bawah telah berubah menjadi quark atas. Reaksi tidak dapat disebabkan oleh gaya yang kuat. Peluruhan β^- harus disebabkan oleh kekuatan lain. Gaya ini disebut gaya lemah atau interaksi lemah.

Jumlah lepton total sebelum reaksi sama dengan jumlah ion lepton setelah reaksi.

Jumlah lepton adalah $+1$ untuk partikel dan -1 untuk antipartikel.

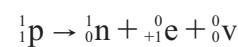
Jumlah total lepton sebelum reaksi adalah nol dalam peluruhan- β^- di atas. Nomor lepton untuk partikel setelah reaksi adalah +1 untuk elektron dan -1 untuk antineutrino, jumlah totalnya nol.

CONTOH SOAL 7F

Berikan persamaan untuk reaksi ketika proton dalam inti meluruh menjadi neutron dan memancarkan partikel. Jelaskan reaksi dalam model quark.

Jawaban

Reaksi peluruhan β^+ ini, memberikan emisi positron:



$$\text{u} \rightarrow \text{u}$$

$$\text{u} \rightarrow \text{d}$$

$$\text{d} \rightarrow \text{d}$$

Selama peluruhan proton dalam inti, neutron terbentuk dan positron dan neutrino dipancarkan. Dalam hal quark, quark up berubah menjadi quark down.

Soal Latihan

9 Apa perbedaan antara hadron dan lepton?

RANGKUMAN

- » Atom terdiri dari inti yang mengandung proton dan neutron yang dikelilingi oleh elektron yang mengorbit.
- » Sebagian besar massa atom terdapat dalam nukleusnya.
- » Sebuah atom bersifat netral karena mengandung jumlah proton dan elektron yang sama.
- » Satuan massa atom terpadu (u) digunakan sebagai satuan massa untuk partikel subatom.
- » Atom yang telah memperoleh atau kehilangan elektron akan bermuatan, dan disebut ion.
- » Nomor nukleon A suatu nukleus adalah jumlah nukleon (proton dan neutron) di dalam nukleus.
- » Nomor proton Z suatu inti adalah jumlah proton dalam inti; maka jumlah neutron dalam inti adalah $A - Z$.
- » Sebuah inti dengan simbol kimia X mungkin diwakili oleh: 
- » Isotop adalah bentuk yang berbeda dari unsur yang sama, yaitu inti dengan nomor proton yang sama tetapi dengan nomor nukleon yang berbeda.
- » Jumlah nukleon dan muatan (jumlah proton, Z) kekal dalam proses nuklir

- » Sebuah partikel- α adalah inti helium (dua proton dan dua neutron).
- » Sebuah partikel- β adalah elektron yang bergerak cepat, sebuah partikel- β^+ adalah positron bergerak cepat.
- » Radiasi γ terdiri dari panjang gelombang pendek gelombang elektromagnetik.
- » Dalam notasi nuklir emisi tersebut direpresentasikan sebagai: partikel- α ${}^4_2\text{He}$; partikel- β^- ${}^0_{-1}\text{e}$ atau partikel- β^+ ${}^0_{+1}\text{e}$; radiasi- γ ${}^0_0\gamma$.
- » emisi partikel- α mengurangi jumlah nukleon dari inti induk sebesar 4, dan mengurangi jumlah proton sebesar 2.
- » emisi partikel- β tidak menyebabkan perubahan jumlah nukleon pada inti induk, dan menyebabkan kenaikan atau penurunan jumlah proton sebesar 1.
- » emisi tidak menyebabkan adanya perubahan jumlah nukleon jumlah proton dari inti induk.
- » Untuk setiap partikel subatom ada antipartikel yang memiliki massa yang sama tetapi muatannya berlawanan dengan partikel yang bersesuaian.
- » Positron adalah antipartikel elektron dan, oleh karena itu, memiliki massa yang sama dengan elektron tetapi bermuatan $+e$.
- » partikel- γ dipancarkan dari nuklida tertentu yang memiliki energi diskrit.
- » partikel- β dipancarkan dari nuklida tertentu yang memiliki energi kontinu pada suatu rentang nilai tertentu akibat adanya emisi tambahan neutrino atau antineutrino pada peluruhan- β .
- » Eksperimen hamburan partikel- α dari Rutherford mengkonfirmasi model inti atom: atom terdiri dari inti kecil bermuatan positif, dikelilingi oleh elektron bermuatan negatif di orbit sekitar inti dan bahwa sebagian besar massa atom adalah dalam nukleus.
- » Diameter inti adalah sekitar 10^{-15} m; sedangkan diameter atom adalah sekitar 10^{-10} m.
- » Proton dan neutron adalah hadron dan dipengaruhi oleh gaya kuat.
- » Model quark memiliki enam *flavours quark* (*up*, *down*, *strange*, *charm*, *bottom*, dan *top*) bersama dengan antiquarknya.
- » Hadron terdiri dari quark.
- » Quark memiliki muatan fraksi seperti $\pm \frac{2}{3}e$ atau $\pm \frac{1}{3}e$.
- » Hadron menggabungkan quark atau antiquark untuk memberikan muatan keseluruhan atau muatan nol.
- » Baryon berisi tiga quark (atau tiga antiquark) dan meson berisi satu quark dan antiquark.
- » Proton tersusun atas *quark up*, *up* dan *down*, dan neutron dari *quark up* *down* dan *down*.
- » Elektron dan neutrino adalah lepton yang merupakan partikel fundamental.
- » Selama peluruhan β^- :

$${}^1_n \rightarrow {}^1_{n-1} + {}^0_{-1}\text{e}[\text{elektron}] + {}^0_0\bar{\nu}[\text{antineutrino}]$$
- » Selama peluruhan β^+ :

$${}^1_p \rightarrow {}^1_{p-1} + {}^0_{+1}\text{e}[\text{positron}] + {}^0_0\nu[\text{neutrino}]$$
- » Selama peluruhan β^- : sebuah *quark down* berubah menjadi *quark up*.
- » Selama peluruhan β^+ : *quark up* berubah menjadi *quark down*.

ASESMEN FORMATIF

- 1** Manakah dari partikel berikut yang merupakan partikel fundamental?
 A atom
 B elektron
 C neutron
 D proton
- 2** Berapa muatan pada quark *strange*?
 A $-\frac{1}{3}e$
 B $+\frac{1}{3}e$
 C $-\frac{2}{3}e$
 D $+\frac{2}{3}e$
- 3** Berapa kecepatan partikel α dengan energi kinetik 72 pJ?
 A 15 km s⁻¹
 B 21 km s⁻¹
 C 15 Mm s⁻¹
 D 21 Mm s⁻¹
- 4** Nyatakan (i) jumlah proton dan (ii) jumlah neutron dalam inti dari inti berikut:
 a $^{56}_{26}\text{Fe}$
 b $^{107}_{47}\text{Ag}$
 c $^{196}_{79}\text{Au}$
 d $^{238}_{92}\text{Pu}$
- 5** Jelaskan perubahan yang terjadi pada inti atom ketika memancarkan:
 a sebuah partikel- α
 b sebuah partikel- β
 c radiasi $-\gamma$
- 6** Lengkapi deret radioaktif berikut.

$$\begin{array}{l} {}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{1}^{1}\text{Y} + {}_{2}^{4}\text{He} \\ {}_{1}^{1}\text{Y} \rightarrow {}_{1}^{1}\text{Z} + {}_{-1}^{0}\text{e} \\ {}_{1}^{1}\text{Z} \rightarrow {}_{1}^{1}\text{Z} + {}_{1}^{1}\text{?} \end{array}$$

- 7** Hitung kecepatan:
- sebuah elektron dengan energi kinetik dari $2,4 \times 10^{-16}$ J,
 - sebuah partikel- α dengan energi kinetik dari $2,4 \times 10^{-16}$ J.
- 8** Sebuah inti radium dalam keadaan diam (^{226}Ra) bermassa 224 u secara spontan memancarkan partikel- α . Partikel- α tersebut dipancarkan dengan energi $9,2 \times 10^{-13}$ J, dan reaksi ini membentuk inti radon (Rn).
- Tuliskan persamaan inti untuk menyatakan peluruhan dari inti radium.
 - Tunjukkan bahwa kecepatan partikel- α dipancarkan dari inti radium $1,7 \times 10^7$ m s $^{-1}$.
 - Hitung kecepatan inti radon pada emisi partikel- α . Jelaskan bagaimana prinsip kekekalan momentum diterapkan dalam perhitungan Anda.
- 9**
- sebuah radiasi- β dipancarkan selama peluruhan spontan sebuah inti radioaktif yang tidak stabil.
 - Nyatakan sifat partikel- β . [1]
 - Nyatakan dua sifat radiasi- β . [2]
 - Persamaan berikut menunjukkan peluruhan inti hidrogen-3 dengan emisi sebuah partikel- β . Salin dan lengkapi persamaannya.
- $${}^1_3\text{H} \rightarrow {}^2_3\text{He} + \dots \beta \quad [2]$$
- Partikel- β dipancarkan dengan energi $9,1 \times 10^{-16}$ J. Hitung kecepatan partikel- β . [3]
 - Isotop hidrogen yang berbeda adalah hidrogen-2 (deuterium). Jelaskan persamaan dan perbedaan antara atom hidrogen-2 dan hidrogen-3. [2]

*Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper
23 Q6 parts a i dan ii, b, c, d Oct/Nov 2012*

- 10**
- Berikan satu contoh dari:
 - sebuah hadron,
 - sebuah lepton. [1]
 - Jelaskan, dalam bentuk model quark sederhana:
 - sebuah proton, [1]
 - isebuah neutron. [1]

c Partikel beta dapat dipancarkan selama peluruhan inti atom yang tidak stabil. Emisi partikel beta disebabkan oleh peluruhan neutron.

i Lengkapi persamaan reaksi berikut untuk partikel yang dihasilkan dalam reaksi ini.
 $\text{neutron} \rightarrow \dots + \dots + \dots$ [1]

ii Nyatakan perubahan komposisi partikel kuark selama reaksi ini. [1]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 21 Q7 May/June 2016

11 a Sebutkan sebuah perbedaan antara hadron dan lepton. [1]

b Sebuah proton dalam inti meluruh untuk membentuk neutron dan dua partikel lainnya. Bagian persamaan yang mewakili peluruhan ini adalah ${}^1_1\text{p} \rightarrow {}^1_0\text{n} + \dots + \dots$.

i Salin dan selesaikan persamaannya. [2]

ii Nyatakan nama interaksi atau gaya yang menimbulkan peluruhan ini. [1]

iii Nyatakan tiga besaran yang kekal dalam peluruhan tersebut. [3]

c Gunakan komposisi quark dari sebuah proton untuk menunjukkan bahwa ia memiliki muatan $+e$, di mana e adalah muatan dasar. Jelaskan maksud yang Anda kerjakan. [3]

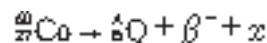
Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 22 Q6 Oct/Nov 2016

12 a Partikel berikut digunakan untuk menggambarkan struktur atom.

elektron neutron proton quark

Nyatakan partikel dasar dalam daftar di atas. [1]

b Persamaan berikut mewakili peluruhan inti dari ${}^{60}_{27}\text{Co}$ untuk membentuk inti Q oleh emisi partikel β^- .



i Salin dan lengkapi Gambar 7.12. [1]

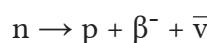
	nilai
A	
B	

▲ Gambar 7.12

ii Nyatakan nama partikel x. [1]

*Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper
23 Q7 May/June 2017*

- 13 Sebuah neutron dalam inti meluruh untuk menghasilkan proton, sebuah partikel- β dan (elektron) antineutrino.



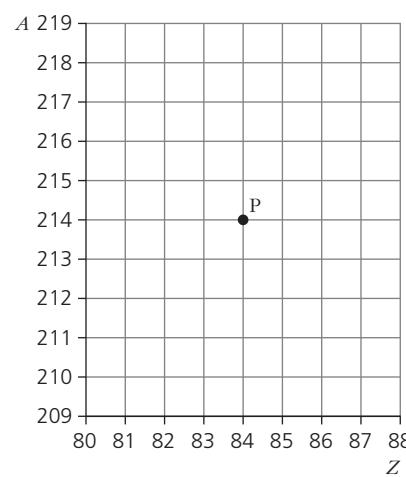
- a Gunakan komposisi quark neutron untuk menunjukkan bahwa neutron tidak bermuatan. [3]
- b Salin dan lengkap Gambar 7.13 dengan memberikan nilai muatan yang sesuai dan massa proton, partikel- β dan (elektron) antineutrino. [2]

	proton	β -partikel	antineutrino
muatan			
massa			

▲ Gambar 7.13

*Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper
21 Q8 Oct/Nov 2017*

- 14 Grafik Jumlah nukleon A terhadap Jumlah proton Z ditunjukkan pada Gambar 7.14.



▲ Gambar 7.14

Grafik tersebut menunjukkan sebuah tanda silang (berlabel P) yang merupakan inti P. Peluruhan Inti P memancarkan partikel- α untuk membentuk inti Q.

Inti Q kemudian meluruh dan memancarkan partikel β untuk membentuk inti R.

- Pada salinan Gambar 7.14 gunakan tanda silang untuk menyatakan:
 - inti Q (beri label tanda silang ini Q), [1]
 - inti R (beri label tanda silang ini R). [1]
- Nyatakan nama kelas (kelompok) dari partikel yang mencakup partikel- β . [1]
- Komposisi quark dari sebuah nukleon di Q yang berubah selama emisi partikel- β . Jelaskan perubahan komposisi quark ini. [1]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 23 Q7 May/June 2018

- 15 a** Terdapat nama empat partikel pada daftar di bawah ini.

alpha beta-plus neutron proton

Nyatakan nama partikel dalam daftar ini yang:

- bukan partikel fundamental [1]
 - tidak mengalami gaya listrik ketika berada dalam medan listrik, [1]
 - memiliki muatan terbesar terhadap massa terbesar. [2]
- Sebuah hadron memiliki muatan $+e$ dimana e adalah muatan dasar. Hadron hanya terdiri dari dua quark. Salah satu quark ini adalah quark antidown (\bar{d}). Dengan mempertimbangkan muatannya, nyatakan dan jelaskan nama (flavour) quark lainnya. [3]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 22 Q7 ai & ii, b, March 2019

- 16 a** Salah satu hasil dari eksperimen hamburan partikel- α adalah bahwa sebagian kecil dari partikel- α dihamburkan melalui sudut yang lebih besar dari 90° .

Nyatakan apa yang dapat disimpulkan tentang struktur atom dari hasil ini. [2]

- Sebuah hadron memiliki muatan keseluruhan $+e$, di mana e adalah muatan dasar. Hadron mengandung tiga quark. Salah satu quark adalah quark *strange* (s).
 - Nyatakan muatan dari quark *strange*(s) dalam bentuk e. [1]
 - Dua quark lainnya dalam hadron memiliki muatan yang sama satu sama lain. [1]

Dengan mempertimbangkan muatan, tentukan kemungkinan jenis (flavour) dari dua quark lainnya.

Jelaskan apa yang telah Anda kerjakan [2]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 21 Q7 May/June 2019

- 17 a** Bukti dari Inti atom diberikan oleh percobaan hamburan partikel- α . Nyatakan hasil dari percobaan ini. [2]

- b** Berikan perkiraan untuk diameter:

- atom, [1]
- inti. [1]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 02 Q7 Oct/Nov 2007

8 Fisika Kuantum

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan mampu:

8.1. Energi dan momentum foton

- memahami bahwa radiasi gelombang elektromagnetik memiliki sifat partikel
- memahami bahwa foton adalah sebuah kuantum energi gelombang elektromagnetik
- mengingat dan menggunakan persamaan $E = hf$
- menggunakan elektron volt (eV) sebagai satuan energi
- memahami bahwa foton memiliki momentum dan persamaan momentum foton dinyatakan dengan $p = E/c$

8.2. Efek fotolistrik

- memahami bahwa foto elektron dapat dipancarkan dari permukaan logam ketika disinari oleh radiasi gelombang elektromagnetik
- memahami dan menggunakan istilah frekuensi ambang dan panjang gelombang ambang
- menjelaskan emisi fotolistrik dalam bentuk energi foton dan fungsi kerja
- mengingat dan menggunakan persamaan $hf = \Phi + \frac{1}{2}mv_{\max}^2$
- menjelaskan mengapa energi kinetik maksimum fotoelektron tidak bergantung pada intensitas,

sedangkan arus fotolistrik sebanding dengan intensitas

8.3. Dualitas gelombang-partikel

- memahami bahwa efek fotolistrik menunjukkan bukti sifat partikel radiasi gelombang elektromagnetik sedangkan fenomena seperti interferensi dan difraksi memberikan bukti sifat gelombangnya
- mggambarkan dan menafsirkan secara kualitatif bukti yang diberikan oleh difraksi elektron sebagai sifat gelombang dari partikel
- memahami panjang gelombang de Broglie sebagai panjang gelombang dari sebuah partikel yang bergerak
- mengingat dan menggunakan persamaan $\lambda = h/p$

8.4. Tingkat energi pada atom dan spektrum garis

- Memahami bahwa ada tingkat energi elektron yang bersifat diskrit pada atom yang terisolasi (misalnya atom hidrogen)
- memahami proses pembentukan dan urutan spektrum garis emisi dan absorpsi
- mengingat dan menggunakan relasi $hf = E_1 - E_2$.

Pemahaman Bermakna

- Sebuah model atom sederhana yang terdiri dari sebuah inti berukuran kecil bermuatan positif dengan elektron bermuatan negatif mengelilinginya.
- Elektron-elektron mengelilingi inti pada kulit pada jarak yang berbeda-beda dari inti.
- Kecepatan gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa $3,00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.
- Kecepatan c , frekuensi f dan panjang gelombang λ radiasi elektromagnetik memiliki hubungan yang dapat dinyatakan dengan persamaan $c = f\lambda$.
- Gelombang elektromagnetik dapat mengalami interferensi dan difraksi.
- Momentum partikel adalah hasil perkalian massa dan kecepatan.



8.1 Energi dan momentum foton

Pada akhir abad kesembilan belas, teori cahaya sebagai gelombang diterima sepenuhnya. Bukti untuk teori ini datang dari efek interferensi dan difraksi yang diamati (Topik Superposisi). Kesimpulan eksperimen tentang efek fotolistrik yang pertama kali diamati pada tahun 1887 (dan dijelaskan kemudian dalam topik ini) menimbulkan keraguan apakah cahaya merupakan gelombang yang bersifat kontinu.

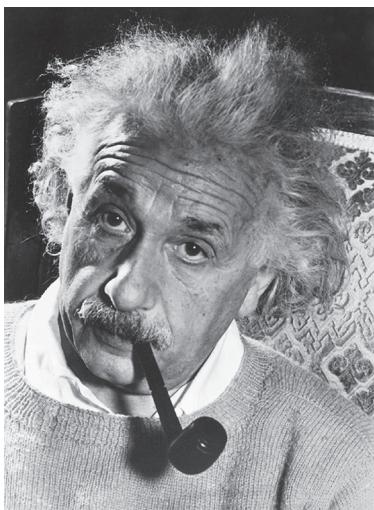
Energi Terkuantisasi

Pada tahun 1901, fisikawan Jerman Max Planck mengungkapkan gagasan bahwa energi yang dibawa oleh radiasi gelombang elektromagnetik mungkin bersifat sebagai paket atau kuantitas diskrit yang disebut kuanta. Energi E yang dibawa dalam setiap kuantum dinyatakan dalam persamaan:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

di mana f adalah frekuensi radiasi, λ adalah panjang gelombang dan h adalah konstanta yang disebut konstanta Planck. Nilai konstanta Planck adalah $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Pada tahun 1905, Albert Einstein mengembangkan teori energi terkuantisasi untuk menjelaskan semua



▲ Gambar 8.1 Albert Einstein

pengamatan yang berhubungan dengan emisi fotolistrik. Dia mengungkapkan gagasan bahwa radiasi cahaya terdiri dari aliran paket energi yang disebut **foton**.

Foton adalah nama khusus yang diberikan untuk kuantum energi ketika energi tersebut merupakan bentuk radiasi gelombang elektromagnetik.

Dalam teori gelombang cahaya, aliran energi dalam gelombang bersifat kontinu. Konsep kuanta, atau ‘paket’ energi, memunculkan sifat partikel dari gelombang elektromagnetik.

Sifat partikel radiasi gelombang elektromagnetik mengandung arti bahwa setiap foton tidak hanya memiliki energi tetapi juga momentum. Momentum p dari setiap foton berhubungan dengan energi E dan kecepatan c gelombang elektromagnetik dengan persamaan

$$p = \frac{E}{c}$$

Energi foton cahaya tampak bervariasi dengan nilai sekitar $5,7 \times 10^{-19}$ J dan $2,7 \times 10^{-19}$ J. Dapat dilihat bahwa ketika berhadapan dengan foton, menyatakan energi dalam satuan joule akan menyebabkan penggunaan angka yang sangat kecil nilainya. Maka sering digunakan satuan energi yang lebih kecil, yaitu **elektron volt (eV)**.

Satu elektron volt (eV) adalah energi yang diperoleh elektron ketika dipercepat dari keadaan diam melalui beda potensial satu volt dalam ruang hampa.

Karena usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan Q melalui beda potensial V adalah QV ([lihat Topik Beda Potensial dan Daya](#)) dan muatan pada elektron adalah $1,60 \times 10^{-19}$ C, lalu $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$ J

Elektron volt seringkali merupakan satuan yang sesuai untuk pengukuran energi foton dan tingkat energi elektron dalam atom. Selanjutnya, kita akan melihat bahwa, ketika mempelajari fisika nuklir (Bab 9), suatu kelipatan elektron volt, mega-elektron volt (MeV), adalah satuan yang sesuai untuk pengukuran energi nuklir. Satu mega-elektron volt (MeV) adalah 10^6 eV atau $1,60 \times 10^{-13}$ J.

CONTOH SOAL 8A

Gelombang elektromagnetik memiliki kecepatan $3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ dan panjang gelombang 550 nm. Untuk satu foton dalam gelombang ini, hitunglah:

- a energi dengan satuan elektron volt
- b momentum.

(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$)

Jawaban

$$\begin{aligned}\text{energi} &= hc/\lambda = (6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8)/(550 \times 10^{-9}) \\ &= 3,6 \times 10^{-19} \text{ J} = (3,6 \times 10^{-19})/(1.6 \times 10^{-19}) \\ &= \mathbf{2,3 \text{ eV}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{momentum} &= E/c \\ &= (3,6 \times 10^{-19})/(3,0 \times 10^8) \\ &= \mathbf{1,2 \times 10^{-27} \text{ N s}}\end{aligned}$$

Soal Latihan

- 1 Sebuah foton memiliki energi sebesar 4,3 eV. Untuk foton ini, hitung
- a Panjang gelombang radiasi gelombang elektromagnetiknya
 - b Momentum dari gelombang elektromagnetik tersebut.

(Konstanta Planck = $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$)

8.2 Efek Fotolistrik

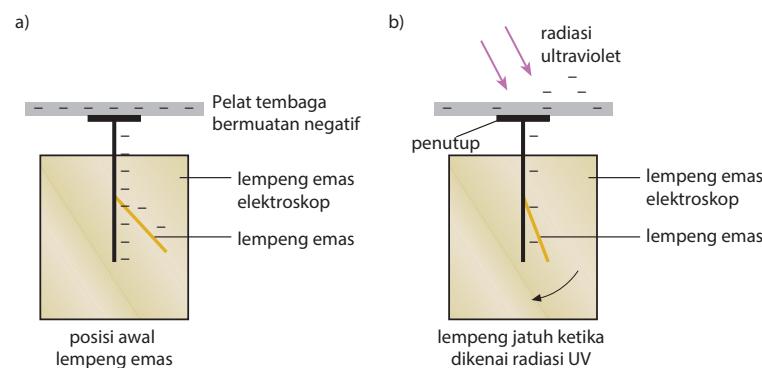
Beberapa elektron dalam logam bebas bergerak di dalamnya. (Elektron-elektron inilah yang membentuk arus listrik ketika diberikan beda potensial di ujung-ujung kawat logam). Namun, untuk melepaskan elektron dari permukaan logam membutuhkan energi, karena elektron-elektron ini ditahan di dalam logam oleh gaya tarik elektrostatik dari inti bermuatan positif. Jika sebuah elektron hendak meninggalkan permukaan logam, usaha harus dilakukan pada elektron itu. Elektron harus diberi energi. Ketika bentuk energi yang digunakan dalam bentuk cahaya, fenomenanya disebut **emisi fotolistrik**.

Emisi fotolistrik adalah peristiwa lepasnya elektron dari permukaan logam saat radiasi gelombang elektromagnetik datang pada permukaan logam tersebut.

Elektron yang dilepaskan disebut sebagai **fotoelektron**.

Demonstrasi Emisi Fotolistrik

Pelat seng yang bersih ditempatkan pada tutup elektroskop daun emas. Elektroskop kemudian diberi muatan negatif, dan daun emas saling tolak menolak, peristiwa ini membuktikan bahwa pelat seng bermuatan. Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 8.2](#).



▲ **Gambar 8.2** Demonstrasi emisi fotolistrik

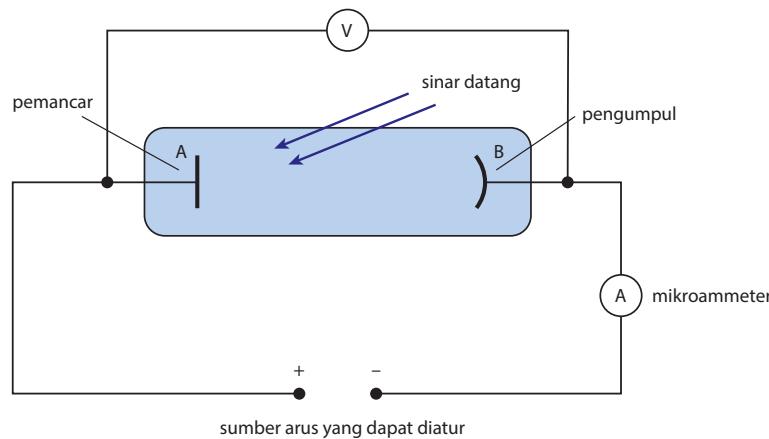
Saat cahaya tampak dengan warna apapun menyinari pelat, daun logam tidak bergerak. Bahkan ketika intensitas (kecerahan) cahaya ditingkatkan, daun logam tetap dalam posisi saling tolak-menolak. Namun, ketika radiasi ultraviolet diarahkan pada pelat, daun logam mulai jatuh dengan cepat, jatuhnya daun logam menunjukkan bahwa daun logam tersebut kehilangan muatan negatif. Hal ini menunjukkan bahwa elektron sedang dipancarkan dari pelat seng. Elektron ini adalah fotoelektron. Jika intensitas radiasi ultraviolet ditingkatkan, daun logam jatuh lebih cepat, hal ini menunjukkan bahwa laju emisi elektron meningkat.

Perbedaan antara radiasi ultraviolet dan cahaya tampak adalah bahwa radiasi ultraviolet memiliki panjang gelombang yang lebih pendek dan frekuensi yang lebih tinggi daripada cahaya tampak.

Penyelidikan lebih lanjut dengan peralatan seperti ini mengarah pada kesimpulan berikut:

- ❖ Elektroskop bermuatan positif tidak dapat dilepaskan, menunjukkan bahwa hanya elektron yang dapat dipancarkan.
- ❖ Fotoemisi terjadi dengan sangat cepat. Tidak ada penundaan antara proses pencahayaan dan saat emisi terjadi.
- ❖ Fotoemisi terjadi hanya jika frekuensi radiasi datang di atas nilai minimum tertentu yang disebut **frekuensi ambang** f_o .
- ❖ Panjang gelombang yang sesuai dengan frekuensi ambang dikenal sebagai panjang **gelombang ambang** λ_o .
- ❖ Logam yang berbeda memiliki frekuensi ambang yang berbeda.
- ❖ Terjadi atau tidaknya emisi tergantung pada frekuensi radiasi yang digunakan apakah berada di atas ambang batas untuk permukaan tersebut. Peristiwa emisi tidak tergantung pada intensitas radiasi.
- ❖ Untuk frekuensi tertentu, laju emisi fotoelektron (arus fotolistrik) sebanding dengan intensitas radiasi.

Eksperimen lain, dengan menggunakan peralatan yang ditunjukkan pada Gambar 22.3, dapat dilakukan untuk menyelidiki energi fotoelektron.



▲ Gambar 8.3 Percobaan untuk mengukur energi kinetik maksimum elektron

Jika radiasi ultraviolet dengan frekuensi tetap (di atas ambang batas) diarahkan ke permukaan logam A, ia memancarkan fotoelektron. Beberapa elektron ini bergerak dari A ke B. Arus dideteksi menggunakan mikroammeter. Jika beda potensial diterapkan antara A dan B, dengan B negatif terhadap A, setiap elektron yang

bergerak dari A ke B akan memperoleh energi potensial saat bergerak melawan medan listrik. Energi potensial yang diperoleh mengurangi energi kinetik elektron. Ini berarti

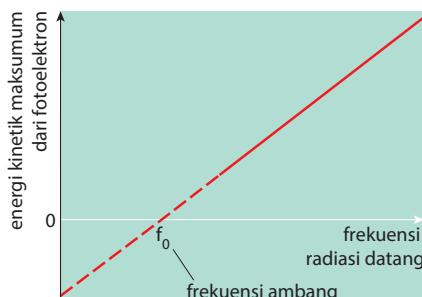
$$\begin{aligned}\text{hilangnya energi kinetik} &= \text{perolehan energi potensial elektron} \\ &= \text{muatan elektron} \times \text{beda potensial.}\end{aligned}$$

Jika tegangan antara A dan B dinaikkan secara bertahap, arus yang terlihat pada mikroammeter berkurang dan akhirnya mencapai nilai nol. Nilai minimum dari beda potensial yang diperlukan untuk menghentikan aliran elektron dikenal sebagai **potensial henti**. Peristiwa ini dapat mengukur energi kinetik maksimum fotoelektron yang dipancarkan. Fakta bahwa ada arus di mikroammeter pada tegangan kurang dari potensial henti menunjukkan bahwa ada perbedaan energi kinetik pada elektron-electron tersebut.

Jika percobaan diulang dengan radiasi yang intensitas yang lebih besar tetapi frekuensi yang sama, arus maksimum dalam mikroammeter meningkat, tetapi nilai potensial henti tidak berubah.

Percobaan dapat diulang menggunakan radiasi ultraviolet dari frekuensi yang berbeda, dan dilakukan pengukuran nilai potensial henti untuk setiap frekuensi. Ketika energi kinetik maksimum fotoelektron diplot terhadap frekuensi radiasi, akan diperoleh grafik seperti terlihat pada [Gambar 8.4](#).

Kesimpulan berikut yang dapat diambil dari percobaan ini:



▲ **Gambar 8.4** Grafik energi kinetik maksimum elektron terhadap frekuensi radiasi

- ∅ Fotoelektron memiliki rentang energi kinetik, dari nol hingga beberapa nilai maksimum. Jika frekuensi radiasi yang datang meningkat, energi kinetik maksimum fotoelektron juga meningkat.
- ∅ Untuk radiasi yang datang dengan frekuensi konstan, energi kinetik maksimum tidak dipengaruhi oleh intensitas radiasi.
- ∅ Ketika grafik Gambar 22.4 diekstrapolasikan ke titik di mana energi kinetik maksimum fotoelektron bernilai nol, frekuensi minimum yang diperlukan untuk menyebabkan emisi dari permukaan logam (frekuensi ambang) dapat ditemukan.

Kesimpulan eksperimen fotoemisi menimbulkan keraguan apakah cahaya merupakan gelombang kontinu. Salah satu masalah utama adalah adanya nilai frekuensi ambang.



Teori gelombang klasik memprediksi bahwa ketika gelombang elektromagnetik (yaitu, cahaya) berinteraksi dengan elektron, elektron akan menyerap energi darinya. Jadi, jika elektron menyerap energi yang cukup, ia harus dapat melepaskan diri dari logam. Ingat bahwa energi yang dibawa oleh gelombang tergantung pada amplitudo (dan frekuensi) ([lihat Topik 7.1](#)). Jadi, bahkan jika kita memiliki gelombang berfrekuensi rendah, energinya dapat ditingkatkan dengan meningkatkan amplitudo (yaitu, dengan meningkatkan kecerahan cahaya). Dengan demikian, menurut teori gelombang, kita harus dapat menyebabkan fotoemisi menggunakan frekuensi cahaya berapapun, asalkan kita membuat cahaya tersebut cukup terang. Alternatif lainnya, kita bisa menggunakan cahaya yang kurang terang untuk menyinari logam dalam waktu yang lama, emisi dapat terjadi sampai jumlah energi yang dibutuhkan telah diberikan. Tetapi hal ini tidak terjadi – emisi terjadi seketika.

Percobaan yang telah kami jelaskan di atas menunjukkan secara meyakinkan bahwa radiasi frekuensi di bawah ambang batas, tidak peduli seberapa kuat atau untuk berapa lama digunakan, tidak menghasilkan fotoelektron. Selain itu, emisi terjadi seketika. Teori gelombang klasik radiasi gelombang elektromagnetik mengarah pada prediksi berikut:

- 1** Apakah elektron dipancarkan atau tidak harus bergantung pada kekuatan gelombang datang; yaitu, pada intensitasnya. Gelombang dengan intensitas yang besar intensitas, dengan frekuensi berapa pun, akan menyebabkan fotoemisi.
- 2** Energi kinetik maksimum fotoelektron harus lebih besar jika intensitas radiasi lebih besar.
- 3** Tidak ada alasan fotoemisi harus terjadi seketika.

Prediksi berdasarkan teori gelombang, tidak sesuai dengan pengamatan. Pendekatan baru, berdasarkan konsep yang sama sekali baru, teori kuantum, dapat digunakan untuk menjelaskan temuan ini.

Teori Emisi Fotolistrik dari Einstein

Pada tahun 1905, Albert Einstein mengembangkan teori energi terkuantisasi, yang diusulkan oleh Planck, untuk menjelaskan semua pengamatan yang terkait dengan emisi fotolistrik. Dia mengusulkan bahwa radiasi cahaya terdiri dari aliran paket energi yang disebut **foton**. Ingat bahwa foton adalah nama khusus yang diberikan kepada energi quantum dalam bentuk energi radiasi gelombang elektromagnetik.

Ketika foton berinteraksi dengan elektron, ia mentransfer semua energinya pada elektron. Hanya mungkin bagi satu foton untuk berinteraksi dengan satu elektron; foton tidak dapat membagi energinya ke beberapa elektron. Perpindahan energi ini terjadi seketika.

Teori foton dari emisi fotolistrik adalah sebagai berikut. Jika frekuensi radiasi kurang dari frekuensi ambang logam, energi yang dibawa oleh setiap foton tidak cukup bagi elektron untuk melepaskan diri dari permukaan logam. Jika energi foton tidak cukup untuk melepaskan elektron, maka akan diubah menjadi energi panas dalam logam.

Jumlah energi minimum yang diperlukan elektron untuk lepas dari permukaan disebut fungsi kerja.

Beberapa nilai untuk fungsi kerja dan frekuensi ambang f_0 dari logam yang berbeda diberikan pada Tabel 22.1.

logam	Φ/J	Φ/eV	f_0/Hz
sodium	$3,8 \times 10^{-19}$	2,4	$5,8 \times 10^{14}$
kalsium	$4,6 \times 10^{-19}$	2,9	$7,0 \times 10^{14}$
seng	$5,8 \times 10^{-19}$	3,6	$8,8 \times 10^{14}$
perak	$6,8 \times 10^{-19}$	4,3	$1,0 \times 10^{14}$
platinum	$9,0 \times 10^{-19}$	5,6	$1,4 \times 10^{14}$

▲ Tabel 8. 1 fungsi Kerja dan frekuensi ambang

■ Ingat: $1eV = 1,6 \times 10^{-19} J$

Jika frekuensi radiasi yang datang sama dengan frekuensi ambang, energi yang dibawa oleh setiap foton cukup untuk melepaskan elektron dari permukaan. Jika frekuensi radiasi datang lebih besar dari frekuensi ambang, elektron akan lepas dari permukaan logam dan memiliki kelebihan energi dalam bentuk energi kinetik. Elektron ini akan memiliki energi kinetik maksimum. Jika sebuah foton

berinteraksi dengan elektron di bawah permukaan (di bawah kulit terluar), sebagian energi akan digunakan untuk membawa elektron ke permukaan (kulit terluar), akibatnya elektron akan dipancarkan dengan energi kinetik kurang dari energi kinetik maksimum. Hal ini dapat menimbulkan nilai energi kinetik yang berbeda-beda.

Einstein menggunakan prinsip kekekalan energi untuk menurunkan persamaan fotolistrik

$$\text{energi foton} = \text{energi fungsi kerja} + \text{energi kinetik maksimum fotoelektron}$$

atau

$$hf = \Phi + \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$

Untuk peristiwa radiasi pada frekuensi ambang f_0 , maka $\frac{1}{2}m_e v_{\max}^2 = 0$ sehingga $hf_0 = \Phi$. Persamaan fotolistrik kemudian dapat dituliskan

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}m_e v_{\max}^2$$

Catatan

Bukti eksperimental menunjukkan bahwa arus fotolistrik, yaitu laju emisi fotoelektron, bergantung pada intensitas radiasi ketika frekuensinya konstan. Peningkatan intensitas menyebabkan meningkatnya jumlah fotoelektron

Pengamatan ini telah menyebabkan banyak siswa menganggap bahwa laju emisi tidak tergantung pada frekuensi. Hal ini tidak benar. Sebenarnya cahaya radiasi memiliki intensitas. Intensitas ini memiliki nilai yang sama dengan daya per satuan luas permukaan. Karena cahaya terdiri dari aliran foton, intensitas dihasilkan dari laju kedatangan foton dan energi masing-masing foton. Pada intensitas konstan, kecepatan foton yang tiba di permukaan logam bergantung pada energi masing-masing foton. Jadi, jika frekuensi radiasi meningkat, energi setiap foton meningkat dan, oleh karena itu, untuk intensitas konstan, laju kedatangan foton menurun. Lebih sedikit foton per satuan waktu berarti tingkat emisi elektron menjadi lebih kecil.

CONTOH SOAL 8B

Energi fungsi kerja platina adalah $9,0 \times 10^{-19}$ J. Hitung:

- frekuensi ambang untuk emisi foto elektron dari platina
 - energi kinetik maksimum sebuah foto elektron ketika radiasi frekuensi $2,0 \times 10^{15}$ Hz datang pada permukaan platina.
- (Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s)

Jawaban

Menggunakan $hf_0 = \Phi$, $f_0 = \Phi/h$, maka

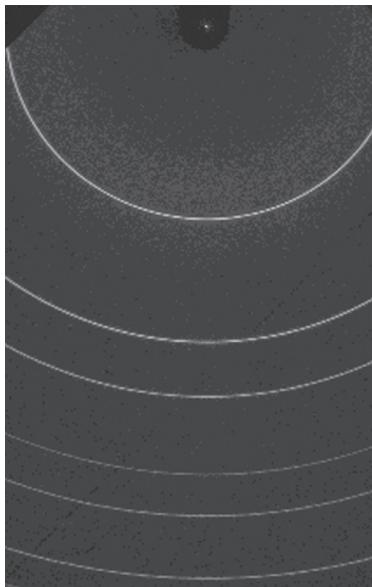
- $f_0 = 9,0 \times 10^{-19} / 6,63 \times 10^{-34} = 1,4 \times 10^{15}$ Hz ($1,36 \times 10^{15}$ Hz)
- Menggunakan $hf = hf_0 + \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$, $hf - hf_0 = \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$, dan juga $\frac{1}{2} m_e v_{\max}^2 = 6,63 \times 10^{-34} (2,0 \times 10^{15} - 1,4 \times 10^{15}) = 4,0 \times 10^{-19}$ J

Soal Latihan

- Fungsi kerja energi seng adalah 3,6 eV. Hitung panjang gelombang ambang untuk radiasi elektromagnetik pada permukaan seng.
- Radiasi elektromagnetik dengan frekuensi 3.0×10^{15} Hz terjadi pada permukaan logam natrium. Fotoelektron yang dipancarkan memiliki energi kinetik maksimum 10 eV. Hitung frekuensi ambang untuk fotoemisi dari natrium.
- Data untuk frekuensi ambang f_0 dan fungsi kerja beberapa permukaan logam ditunjukkan pada Tabel 8.2.

logam	$f_0 / 10^{14}$ Hz	$\Phi / 10^{-19}$ J
platinum		9.0
sodium	5.8	3.8
seng	8.8	5.8

- Hitung frekuensi ambang untuk platinum.
- Seberkas radiasi gelombang elektromagnetik memiliki rentang panjang gelombang kontinu antara 320 nm dan 550 nm, secara bergantian datang pada masing-masing logam di atas. Tentukan logam mana yang akan memancarkan fotoelektron.
- Ketika cahaya berfrekuensi f dan intensitas I datang pada permukaan logam tertentu, elektron dipancarkan. Nyatakan dan jelaskan pengaruhnya, jika ada, pada emisi fotoelektron untuk cahaya berfrekuensi $2f$ dan intensitas I .



▲ Gambar 8.5 Pola difraksi sinar X dari logam tipis

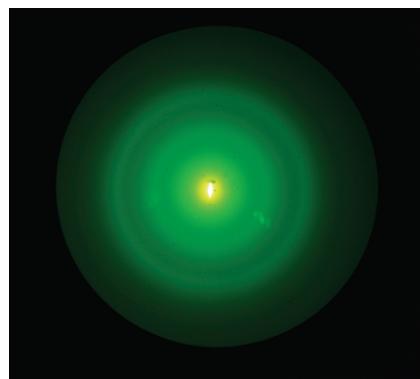
8.3 Dualitas Gelombang-Partikel

Kita telah melihat bahwa efek fotolistrik memberikan bukti untuk sifat partikel (foton) dari radiasi gelombang elektromagnetik sementara fenomena seperti interferensi dan difraksi memberikan bukti untuk sifat gelombang. Ada sifat ‘dualitas gelombang - partikel’. Kemudian timbul pertanyaan, jika gelombang cahaya dapat berperilaku seperti partikel (foton), apakah mungkin partikel yang bergerak dapat berperilaku seperti gelombang?

Ketika seberkas sinar-X dengan panjang gelombang tunggal diarahkan pada lempeng logam tipis, pola difraksi dihasilkan seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 8.5](#).

Ini adalah efek yang mirip dengan pola difraksi yang dihasilkan ketika cahaya melewati kisi difraksi (lihat Superposisi). Lempeng logam mengandung banyak kristal kecil. Celah antara bidang atom yang bersebelahan dalam kristal bertindak sebagai celah, menciptakan pola difraksi. Perhatikan bahwa titik di tengah sebanding dengan pusat (atau orde nol) maksimum dari kisi difraksi dan lingkaran, yang di luar pusat lingkaran, sesuai dengan orde maksimum ke-1, ke-2 dan ke-3.

Pada tahun 1927 percobaan menunjukkan bahwa jika berkas elektron diarahkan pada lapisan tipis grafit, pola difraksi yang sama akan dihasilkan, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 8.6](#).



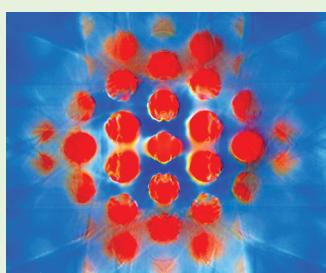
▲ Gambar 8.6 Pola difraksi Electron dari grafit

EKSTENSI

Menyelidiki materi menggunakan elektron

Elektron tidak terpengaruh oleh gaya nuklir kuat. Oleh karena itu elektron mungkin disarankan menjadi alat yang lebih efektif untuk menyelidiki struktur atom.

Jika berkas elektron diarahkan pada sampel kristal bubuk dan panjang gelombang elektron sebanding dengan jarak antar atom dalam kristal, gelombang elektron yang tersebar dari bidang atom dalam kristal kecil, menciptakan pola difraksi (Gambar 22.7). Fakta diperolehnya pola difraksi menegaskan susunan teratur atom dalam kristal padat. Pengukuran sudut di mana hamburan kuat diperoleh dapat digunakan untuk menghitung jarak antara bidang atom.



▲ Gambar 8.7 Pola difraksi Electron dari sampel titanium murni

Jika energi berkas elektron meningkat, panjang gelombangnya akan berkurang. Akhirnya, panjang gelombang elektron mungkin memiliki ukuran yang besarnya setara dengan diameter nukleus. Menyelidiki nukleus dengan elektron berenergi tinggi, dibandingkan partikel α , memberikan wawasan lebih lanjut tentang dimensi nukleus, dan juga memberikan informasi tentang distribusi muatan dalam nukleus itu sendiri.

Elektron, yang biasanya kita anggap sebagai partikel, menunjukkan sifat yang biasanya dikaitkan dengan gelombang. Ingatlah bahwa, untuk mengamati difraksi, panjang gelombang radiasi harus sebanding dengan ukuran celah atau ‘bukaan’. Pemisahan bidang atom dalam kristal bernilai sekitar 10^{-10} m. Fakta bahwa difraksi teramat pada elektron menunjukkan bahwa elektron-elektron yang bergerak tersebut memiliki panjang gelombang yang kira-kira sama besarnya dengan jarak atom dalam grafit. Pengukuran yang diambil dari pola difraksi elektron juga memungkinkan nilai panjang gelombang ditentukan dari rumus kisi difraksi (lihat Topik 8.3).

Pada tahun 1924 fisikawan Perancis Louis de Broglie mengungkapkan gagasan bahwa semua partikel yang bergerak memiliki sifat seperti gelombang. Menggunakan ide-ide berdasarkan teori kuantum dan teori relativitas

Einstein, ia mengungkapkan bahwa momentum p dari partikel dan λ gelombang memiliki hubungan yang dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\lambda = h/p$$

di mana h adalah konstanta Planck λ dikenal sebagai panjang **gelombang de Broglie**.

Pengukuran panjang gelombang elektron yang dilakukan pada percobaan difraksi dan dilakukan tiga tahun setelah prediksi de Broglie dikonfirmasi tidak hanya menunjukkan bahwa elektron memiliki sifat seperti gelombang, tapi panjang gelombangnya memenuhi persamaan seperti yang diberikan oleh de Broglie, $\lambda = h/p$.

► CONTOH SOAL 8C

Hitung panjang gelombang de Broglie dari elektron yang bergerak dengan kecepatan $2,6 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$.

(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; massa elektron $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.)

Jawaban

Menggunakan $= h/p$ dan $p = mv$,

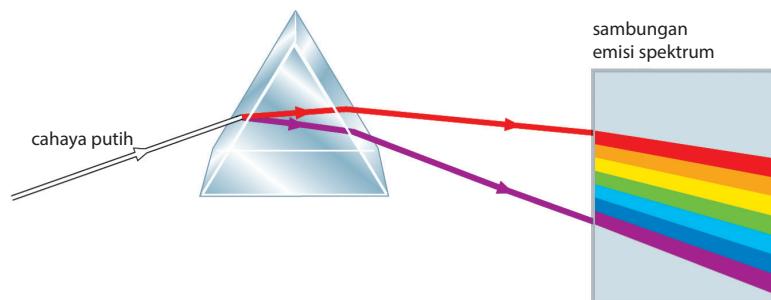
$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34} / 9,11 \times 10^{-31} \times 2,6 \times 10^7 = 2,8 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Soal Latihan

- 5 Hitunglah panjang gelombang de Broglie dari elektron yang bergerak dengan kecepatan $7,5 \times 10^7 \text{ ms}^{-1}$ (Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$; massa elektron $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$).
- 6 Hitung panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang dipercepat dari keadaan diam melalui beda potensial 650 V. (Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$; massa elektron $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; muatan elektron $e = -1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$).
- 7 Hitung kecepatan neutron dengan panjang gelombang de Broglie $1,6 \times 10^{-10} \text{ m}$. (Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; massa neutron $m_n = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$.)

8.4 Tingkat energi dalam atom dan spektrum garis

Ketika cahaya putih dari lampu filamen tungsten dilewatkan melalui sebuah prisma, cahaya tersebut terdispersi menjadi warna komponennya, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 8.8](#).

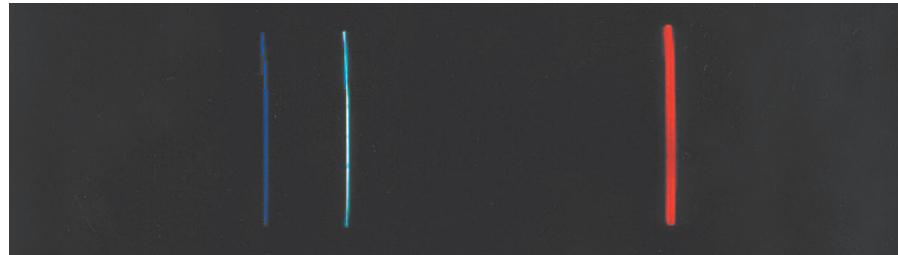


▲ [Gambar 8.8](#) Co spektrum continuous cahaya putih dari lampu filamen tungsten

Pita warna yang berbeda disebut spektrum kontinu. Spektrum kontinu memiliki semua warna (dan panjang gelombang) di antara dua batas. Dalam kasus cahaya putih, batas warna dan panjang gelombang adalah ungu (sekitar 400 nm) dan merah (sekitar 700 nm). Karena spektrum ini telah dihasilkan oleh emisi cahaya dari filamen tungsten yang dipanaskan, maka spektrum ini disebut sebagai spektrum emisi. Detail spektrum emisi yang lebih baik dibandingkan yang diperoleh dengan menggunakan prisma dapat dicapai dengan menggunakan kisi difraksi.

Tabung lucutan adalah tabung transparan yang berisi gas pada tekanan rendah. Ketika beda potensial tinggi ditetapkan di dua elektroda dalam tabung, cahaya dipancarkan. Pemeriksaan cahaya dengan kisi difraksi menunjukkan bahwa spektrum yang dipancarkan tidak lagi kontinu, tetapi terdiri dari sejumlah garis terang ([Gambar 22.9](#)).

▲ [Gambar 8.9](#) Jalur hidrogen dari tabung discharge



Spektrum seperti ini dikenal sebagai spektrum garis emisi. Ini terdiri dari sejumlah warna yang terpisah, masing-masing warna terlihat sebagai garis yang merupakan

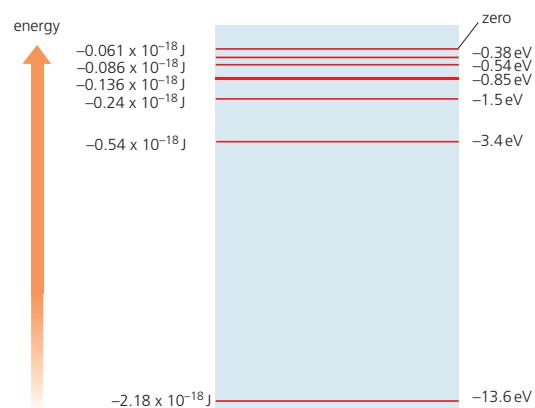
gambar dari celah di depan sumber cahaya. Panjang gelombang yang sesuai dengan garis spektrum adalah karakteristik dari gas yang ada di dalam tabung lucutan. Perhatikan gas bisa berupa benda padat atau benda cair yang menguap.



Tingkat energi elektron dalam atom

Untuk menjelaskan bagaimana spektrum garis diproduksi, kita perlu memahami bagaimana elektron dalam atom berperilaku. Elektron dalam atom hanya dapat memiliki nilai energi tertentu yang sifatnya spesifik. Energi ini disebut tingkat energi elektron dalam atom. Tingkat energi dapat direpresentasikan sebagai serangkaian garis skala energi vertikal, seperti yang diilustrasikan pada

Gambar 8.10.

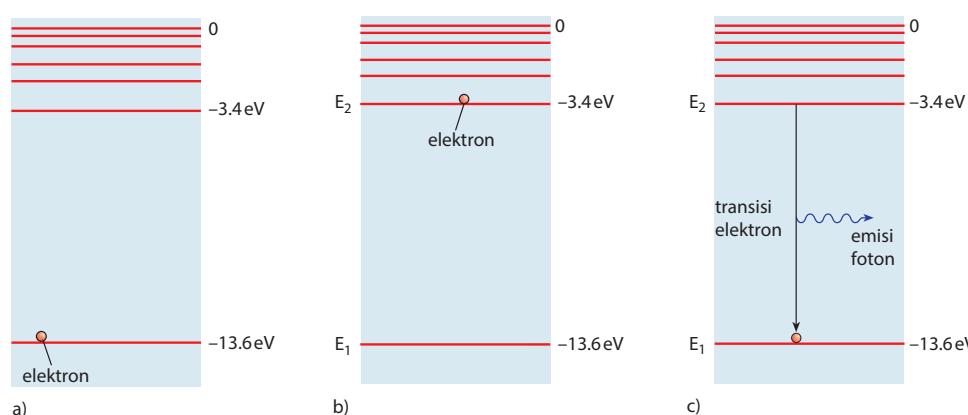


▲ **Gambar 8.10** tingkat energi elektron untuk atom hidrogen

Elektron dalam atom hidrogen dapat memiliki salah satu dari nilai energi ini, tetapi tidak dapat memiliki energi di antara keduanya. Tingkat energi disebut sebagai **tingkat energi diskrit**.

Biasanya elektron dalam atom menempati tingkat energi terendah yang tersedia. Dalam kondisi ini atom dan elektronnya dikatakan dalam keadaan dasar. **Gambar 8.11a** (halaman berikut) menunjukkan atom hidrogen dengan elektron tunggalnya dalam keadaan energi terendah.

Namun, jika elektron menyerap energi, bisa jadi karena dipanaskan, atau akibat bertumbukan dengan elektron lain, elektron tersebut dapat dipindahkan ke tingkat energi yang lebih tinggi. Energi yang diserap persis sama dengan perbedaan energi dari dua tingkat. Dalam kondisi ini atom digambarkan dalam keadaan tereksitasi. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 8.11b**.



▲ **Gambar 8.11** elektron dalam atom hidrogen a) dalam keadaan dasarnya b) dalam keadaan tereksitasi c) kembali ke keadaan dasarnya dengan emisi foton

Sebuah atom dalam keadaan tereksitasi tidak stabil. Dalam waktu yang singkat, elektron yang tereksitasi akan kembali ke tingkat yang lebih rendah. Untuk mencapai ini, elektron harus melepaskan energi. Ia melakukannya dengan memancarkan foton radiasi gelombang elektromagnetik, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 8.11c](#).

Energi hf foton diberikan oleh

$$hf = E_2 - E_1$$

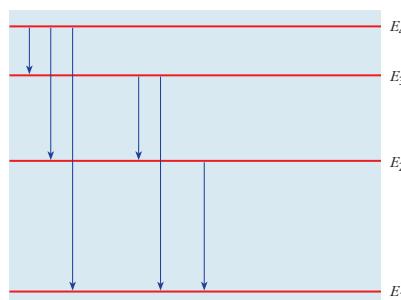
E_2 adalah tingkat energi yang lebih tinggi dan E_1 adalah tingkat energi yang lebih rendah, dan h adalah konstanta Planck. Menggunakan hubungan antara kecepatan cahaya c , frekuensi f dan panjang gelombang λ , panjang gelombang radiasi yang dipancarkan dapat dinyatakan dengan persamaan

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E}$$

dimana $\Delta E = E_2 - E_1$. Perpindahan elektron antar tingkat energi ini disebut **transisi elektron**. Perhatikan bahwa, semakin besar energi transisi, semakin tinggi frekuensi (dan semakin pendek panjang gelombang) radiasi yang dipancarkan .

Perhatikan bahwa transisi ke bawah ini menghasilkan **emisi** foton. Atom dapat dinaikkan ke keadaan tereksitasi dengan **penyerapan** foton, tetapi foton harus memiliki energi yang tepat, sesuai dengan perbedaan energi keadaan tereksitasi dan keadaan awal. Jadi, transisi ke bawah sesuai dengan emisi foton, dan transisi ke atas membutuhkan penyerapan foton.

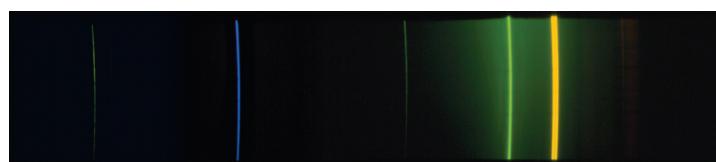
Gambar 8.12 menunjukkan beberapa transisi yang mungkin terjadi ketika elektron dalam atom tereksitasi kembali ke tingkat energi yang lebih rendah.



▲ **Gambar 8.12** Beberapa kemungkinan transisi elektron

Setiap transisi menghasilkan emisi foton dengan panjang gelombang tertentu. Misalnya, transisi dari E₄ ke E₁ menghasilkan cahaya dengan frekuensi tertinggi dan panjang gelombang terpendek. Di sisi lain, transisi dari E₄ ke E₃ memberikan frekuensi terendah dan panjang gelombang terpanjang.

Karena atom dari semua unsur memiliki tingkat energi yang berbeda, perbedaan energi itu unik untuk setiap unsur. Akibatnya, setiap elemen menghasilkan spektrum garis yang berbeda dan karakteristik. Spektrum tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan unsur tertentu. Spektrum garis emisi merkuri ditunjukkan pada **Gambar 8.13**.



▲ **Gambar 8.13** spektrum garis Mercury dari lampu uap merkuri

Ilmu yang mempelajari spektrum disebut spektroskopii, dan instrumen yang digunakan untuk mengukur panjang gelombang spektrum adalah spektrometer. Spektrometer untuk pengukuran panjang gelombang yang akurat menggunakan kisi-kisi difraksi untuk menyebarkan cahaya.



Spektrum Kontinu

Sementara cahaya yang dipancarkan oleh atom-atom terisolasi seperti pada gas bertekanan rendah menghasilkan spektrum garis, cahaya yang dipancarkan oleh atom dalam zat padat, cair, atau gas pada tekanan tinggi menghasilkan spektrum kontinu. Ini terjadi

karena kedekatan atom satu sama lain. Interaksi antara atom menghasilkan perluasan tingkat energi elektron. Akibatnya, transisi dari berbagai magnitudo energi dimungkinkan, dan cahaya dengan panjang gelombang yang tersebar luas dapat dipancarkan untuk membentuk spektrum kontinu tanpa celah. Sebagian besar spektrum kontinu berasal dari benda panas dan padat seperti bintang, atau filamen panas lampu listrik seperti pada [Gambar 8.8](#).

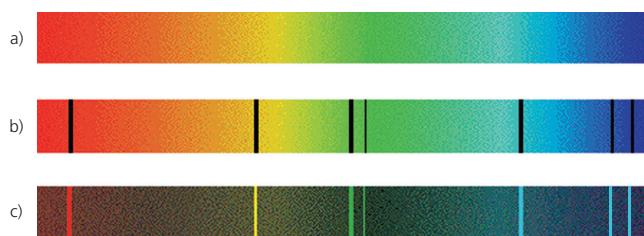
Spektrum Absorpsi

Ketika cahaya dengan spektrum kontinu (seperti cahaya putih) melewati gas bertekanan rendah, seperti lapisan luar bintang, dan spektrum cahaya kemudian dianalisis, ditemukan bahwa cahaya dengan panjang gelombang tertentu hilang. Di tempat cahaya yang hilang tersebut terdapat garis-garis gelap. Jenis spektrum ini disebut spektrum absorpsi; salah satunya ditunjukkan pada [Gambar 8.14](#).



▲ **Gambar 8.14** Spektrum Matahari menunjukkan garis absorpsi

Saat cahaya melewati gas, beberapa elektron menyerap energi dan membuat transisi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Hanya foton dengan energi tertentu yang diserap. Panjang gelombang cahaya yang diserap sesuai persis dengan energi yang dibutuhkan untuk membuat transisi ke atas tertentu. Ketika elektron yang tereksitasi ini kembali ke tingkat yang lebih rendah, foton dipancarkan ke segala arah, bukan ke arah awal cahaya. Dengan demikian, intensitas panjang gelombang tertentu berkurang dan panjang gelombang ini muncul sebagai garis-garis gelap. Oleh karena itu, panjang gelombang yang hilang dari spektrum garis absorpsi akan sama dengan spektrum garis emisi dari unsur yang sama. Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 8.15](#). Dengan demikian garis-garis dalam spektrum garis absorpsi dapat digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan unsur tertentu dalam zat gas atau zat yang menguap yang telah dilalui cahaya.



▲ **Gambar 8.15** Hubungan antara spektrum absorpsi dan spektrum emisi dari unsur yang sama: a) spektrum cahaya putih, b) spektrum penyerapan unsur dan c) spektrum emisi dari unsur yang sama

CONTOH SOAL 2B

Hitung panjang gelombang radiasi yang dipancarkan ketika elektron dalam atom hidrogen membuat ion transisi dari tingkat energi $-0,54 \times 10^{-18} \text{ J}$ ke level $-2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ (Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; kecepatan cahaya $c = 3,00 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.)

Jawaban

$$\Delta E = E_2 - E_1 = -0,54 \times 10^{-18} - (-2,18 \times 10^{-18}) = 1,64 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Menggunakan persamaan $\lambda = hc/\Delta E$,

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8 / 1,64 \times 10^{-18} = 1,21 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$= 121 \text{ nm}$$

Soal Latihan

- 8** Hitunglah panjang gelombang radiasi yang dipancarkan ketika elektron dalam atom hidrogen melakukan transisi dari tingkat energi pada $-0,85 \text{ eV}$ ke tingkat pada $-3,4 \text{ eV}$.
(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$; kecepatan cahaya $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)
- 9** Elektron dalam atom hidrogen melakukan transisi dari tingkat energi $-13,58 \text{ eV}$ ke tingkat energi $-0,38 \text{ eV}$ ketika satu ton foton diserap. Hitung frekuensi radiasi yang diserap.
(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$)
- 10** Energi yang diperlukan untuk melepaskan elektron secara sempurna dari tingkat energi dasar atom disebut energi ionisasi. Energi yang diperlukan dapat diperoleh dari penyerapan foton, dalam hal ini prosesnya disebut foto-ionisasi. Gunakan informasi dari [Gambar 8.10](#) untuk menyimpulkan panjang gelombang radiasi yang diperlukan untuk mencapai foto-ionisasi hidrogen.
(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; kecepatan cahaya $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$).

1.

RANGKUMAN

- » Foton adalah kuantum (atau paket) energi radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki energi sama dengan hasil kali konstanta Planck dan frekuensi radiasi, $E = hf$.
- » Energi partikel subatom sering diukur dalam elektron volt (eV) atau mega-elektron volt (MeV).
- » Sebuah foton memiliki momentum yang diberikan oleh $p = E/c$.
- » Elektron dapat dipancarkan dari permukaan logam jika logam disinari oleh radiasi elektromagnetik. Fenomena ini disebut emisi fotolistrik.
- » Emisi fotolistrik tidak dapat dijelaskan dengan teori gelombang cahaya. Untuk menjelaskan hal ini perlu menggunakan teori kuantum, radiasi elektromagnetik dianggap terdiri dari paket energi yang disebut foton.
- » Fungsi kerja Φ dari logam adalah energi minimum yang dibutuhkan untuk membebaskan elektron dari permukaan logam.
- » Persamaan fotolistrik Einstein adalah: $hf_0 = \Phi \frac{1}{2} m_e v_{\max}^2$.
- » Frekuensi ambang f_0 adalah frekuensi minimum radiasi yang diperlukan untuk menyebabkan emisi fotoelektron dari permukaan logam tertentu dan diberikan oleh: $hf_0 = \Phi$.
- » Panjang gelombang ambang adalah panjang gelombang maksimum yang sesuai untuk menimbulkan emisi fotolistrik.
- » Peningkatan intensitas radiasi meningkatkan arus fotolistrik (laju emisi fotoelektron) tetapi tidak memengaruhi energi kinetik elektron yang dipancarkan.
- » Interferensi dan difraksi memberikan bukti sifat gelombang dari radiasi gelombang elektromagnetik sedangkan efek fotolistrik memberikan bukti untuk sifat partikel (foton).
- » Difraksi elektron memberikan bukti bahwa elektron yang bergerak memiliki sifat seperti gelombang.
- » Partikel bergerak menunjukkan sifat seperti gelombang.
- » Panjang gelombang de Broglie dari partikel yang bergerak diberikan oleh $\lambda = h/p$, di mana p adalah momentum partikel dan h adalah konstanta Planck.
- » Elektron dalam atom yang terisolasi hanya dapat memiliki energi tertentu. Energi ini dapat direpresentasikan dalam diagram tingkat energi.
- » Elektron pada tingkat energi tertentu dapat menyerap energi dan melakukan transisi ke tingkat energi yang lebih tinggi.
- » Elektron yang tereksitasi dapat kembali ke tingkat yang lebih rendah dengan emisi foton, menghasilkan spektrum garis emisi.
- » Frekuensi f dari radiasi yang dipancarkan diberikan oleh $E_2 - E_1 = hf$, di mana E_2 dan E_1 adalah energi tingkat atas dan bawah dan h adalah konstanta Planck; panjang gelombang diberikan oleh $\lambda = c/f$, di mana c adalah kecepatan cahaya.
- » Ketika elektron menyerap energi dari spektrum radiasi elektromagnetik kontinu dan bergerak ke tingkat energi yang lebih tinggi, maka spektrum garis serapan dapat diamati.

ASESMEN FORMATIF

- 1** Sebuah pelat seng ditempatkan pada tutup elektroskop lempeng emas dan bermuatan negatif. Lempeng emas terlihat membelok. Jelaskan secara lengkap pengamatan berikut.
 - a** Ketika pelat seng c disinari dengan lampu merah, lempeng emas tetap dibelokkan.
 - b** Ketika pelat seng disinari dengan radiasi ultraviolet, lempengnya runtuh.
 - c** Ketika intensitas radiasi ultraviolet meningkat, lempeng lebih cepat rontok.
 - d** Jika pelat seng awalnya bermuatan positif, sisanya lempeng emas dibelokkan terlepas dari sifat radiasi insiden

- 2** Seberkas cahaya monokromatik sejajar dengan panjang gelombang 660 nm memiliki intensitas $0,25 \text{ mW m}^{-2}$. Sinar datang secara normal pada permukaan di mana cahaya diserap secara total. Hitung, untuk luas penampang $1,2 \text{ cm}^2$
 - a** jumlah foton yang melewati area per detik,
 - b** momentum foton cahaya,
 - c** gaya yang diberikan pada permukaan oleh cahaya.
(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; kecepatan cahaya $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$.)

- 3** Fungsi kerja permukaan logam tertentu adalah $3,9 \times 10^{-19} \text{ J}$
 - a** Hitung panjang gelombang terpanjang yang diperoleh emisi foton.
 - b** Logam ini disinari dengan radiasi ultraviolet dengan panjang gelombang 250 nm. Hitung, untuk elektron yang dipancarkan:
 - i** energi kinetik maksimum,
 - ii** kecepatan maksimum.

(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$; kecepatan cahaya $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$; massa elektron $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.)

- 4** Hitung panjang gelombang de Broglie dari:
- sebuah bola bermassa $0,30\text{ g}$ yang bergerak dengan kecepatan 50 ms^{-1} ,
 - peluru bermassa 50 g yang bergerak dengan kecepatan 500 ms^{-1} ,
 - elektron bermassa $9,1 \times 10^{-31}\text{ kg}$ yang bergerak dengan kecepatan $3,0 \times 10^7\text{ ms}^{-1}$
 - proton bermassa $1,7 \times 10^{-27}\text{ kg}$ bergerak dengan kecepatan $3,0 \times 10^6\text{ ms}^{-1}$.

(Konstanta Planck $h = 6,63 \times 10^{-34}\text{ J s}$)

- 5** Ketika spektrum cahaya tampak yang dipancarkan oleh Matahari diamati dengan cermat, diketahui bahwa cahaya dengan frekuensi tertentu hilang dan sebagai gantinya adalah garis gelap.
- Jelaskan bagaimana gas atmosfer di luar Matahari dapat menyebabkan tidak adanya frekuensi-frekuensi ini.
 - Sarankan bagaimana analisis spektrum ini dapat digunakan untuk menentukan gas yang ada di atmosfer matahari
- 6** **a** Jelaskan apa yang dimaksud dengan efek fotolistrik. [2]
- b** Satu panjang gelombang radiasi elektromagnetik yang dipancarkan dari lampu uap air raksa adalah 436 nm . Hitung energi foton yang sesuai dengan panjang gelombang ini. [2]
- c** Cahaya dari lampu pada soal **b** datang secara terpisah pada permukaan logam cesium dan tungsten.

Data untuk fungsi kerja logam cesium dan tungsten diberikan pada **Gambar 8.16**.

logam	energi fungsi kerja/eV
cesium	1,4
tungsten	4,5

▲ **Gambar 22,16**

Hitung panjang gelombang ambang untuk emisi fotolistrik dari:

- i** cesium, [2]
ii tungsten. [1]

- c** Gunakan jawaban Anda di c untuk menyatakan dan menjelaskan apakah radiasi dari lampu merkuri dengan panjang gelombang 436 nm akan menimbulkan emisi fotolistrik dari masing-masing logam. [2]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Paper 41 Q10 Oct/Nov 2016

9 Fisika Nuklir

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

9.1. Defek massa dan energi ikat nuklir

1. memahami kesetaraan antara energi dan massa yang diwakili oleh $E=m.c^2$ ingat dan gunakan persamaan ini
2. menggunakan reaksi nuklir sederhana dengan persamaan nuklir dalam bentuk



3. mendefinisikan dan menggunakan istilah defek massa dan energi ikat
4. membuat sketsa variasi energi ikat per nukleon dengan nomor nukleon
5. menjelaskan apa yang dimaksud dengan fusi nuklir dan fisi nuklir
6. menjelaskan relevansi energi ikat per nukleon dengan reaksi nuklir, termasuk fusi nuklir dan ion fisi nuklir
7. menghitung energi yang dilepaskan dalam reaksi nuklir menggunakan $E=c^2 \cdot \Delta m$

9.2. Peluruhan radioaktif

1. memahami bahwa fluktuasi tingkat hitungan memberikan bukti sifat acak peluruhan radioaktif
2. memahami bahwa peluruhan radioaktif adalah spontan dan acak
3. mendefinisikan aktivitas dan konstanta peluruhan, mengingat dan menggunakan $A = \lambda \cdot N$
4. menentukan waktu paruh penggunaan $\lambda = 0,693/t_{1/2}$
5. memahami sifat eksponensial dari peluruhan radioaktif, mensketsa dan menggunakan hubungan $x = x_0 e^{-\lambda t}$, di mana x mewakili aktivitas, jumlah inti yang tidak meluruh atau tingkat penghitungan yang diterima

Pemahaman Bermakna

- Sebuah atom dapat dimodelkan berukuran besar, tapi nyatanya sangat kecil, inti bermuatan positif dikelilingi oleh elektron bermuatan negatif.
- Sebuah inti mengandung proton dan neutron.
- Gunakan notasi ${}^A_Z X$ untuk representasi nuklida dan untuk menulis persamaan reaksi nuklir.
- Massa atom dan konstituen mereka biasanya dinyatakan dalam satuan massa atom terpadu (u).
- Elektronvolt (eV) adalah satuan energi.
- Selama peluruhan radioaktif, inti yang tidak stabil memancarkan partikel dan/atau radiasi elektromagnetik

9.1 Defek massa dan energi ikat nuklir



Defek massa

Pada tingkat nuklir, massa yang kita tangani sangat kecil sehingga akan sangat sulit untuk mengukurnya dalam kilogram. Sebagai gantinya, kami mengukur massa nukleus dan nukleon dalam satuan massa atom terpadu (u).

Satu satuan massa atom terpadu ($1 u$) didefinisikan sama dengan seperdua belas massa atom karbon-12. $1 u$ sama dengan $1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Dengan menggunakan skala pengukuran ini, hingga enam tempat desimal, kita memiliki

$$\text{massa proton } m_p = 1,007276 \text{ } u$$

$$\text{massa neutron } m_n = 1,008665 \text{ } u$$

$$\text{massa elektron } m_e = 0,000549 \text{ } u$$

Karena semua atom dan inti terdiri dari proton, neutron, dan elektron, kita dapat menggunakan angka-angka ini untuk menghitung massa atom atau nukleus apa pun. Misalnya, massa inti helium-4, yang terdiri dari dua proton dan dua neutron, seharusnya:

$$(2 \times 1,007276) \text{ } u + (2 \times 1,008665) \text{ } u = 4,031882 \text{ } u$$

Namun, massa sebenarnya dari inti helium adalah $4,001508 \text{ } u$.

Selisih antara massa yang diharapkan dan massa yang sebenarnya dari inti disebut **defek massa inti**. Dalam kasus

inti helium-4, defek massanya adalah $4,031882 - 4,001508 = 0,030374$ u.

Defek massa nukleus adalah perbedaan antara massa total nukleon yang terpisah dan massa gabungan dari nukleus.

► CONTOH SOAL 9A

Hitung defek massa untuk inti karbon-14 ($^{14}_6\text{C}$). Massa yang diukur adalah 14,003240 u.

Jawaban

Nukleus mengandung enam proton dan delapan neutron, dengan massa total

$$(6 \times 1.007276) + (8 \times 1.008665) = 14,112976 \text{ u.}$$

Defek massa adalah $14,112976 - 14,003240 = 0,109736$ u.

Soal Latihan

- 1 Hitung defek massa untuk inti nitrogen-14 ($^{14}_7\text{N}$). Massa yang diukur adalah 14,003070 u

Massa-kesetaraan energi

Pada tahun 1905, Albert Einstein mengusulkan bahwa ada kesetaraan antara massa dan energi. Hubungan antara energi E dan massa, atau perubahan massa m, adalah

$$E = m.c^2$$

dimana c adalah kecepatan cahaya. E diukur dalam joule, m dalam kilogram dan c dalam meter per detik.

Dengan menggunakan hubungan ini, kita dapat menghitung bahwa 1,0 kg materi setara dengan $1,0 \times (3,0 \times 10^8)^2 = 9,0 \times 10^{16}$ J.

Defek massa inti helium, dihitung sebelumnya sebagai 0,030374 u, setara dengan

$$0,030374 \times 1,66 \times 10^{-27} \times (3,00 \times 10^8)^2 = 4,54 \times 10^{-12} \text{ J.}$$

(Perhatikan bahwa massa dalam u harus diubah menjadi kg dengan mengalikannya dengan $1,66 \times 10^{-27}$)

Joule adalah satuan besar yang kurang sesuai untuk digunakan dalam perhitungan nuklir. Satuan energi yang lebih sesuai adalah elektronvolt (eV) atau mega-elektronvolt

(MeV) karena banyak perubahan energi c yang terjadi di dalam nukleus dengan orde beberapa MeV.

Karena satu elektronvolt adalah energi yang diperoleh oleh satu elektron ketika dipercepat melalui beda potensial satu volt (lihat Topik 8.1)

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-19} \times 1,0 \times 10^6$$

atau

$$1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$$

dengan demikian, energi yang setara dengan defek massa inti helium adalah $4,54 \times 10^{-12}/1,60 \times 10^{-13} = 28,4$ MeV.

Jika massa diukur dalam u dan energi dalam MeV,
 $1u = 934 \text{ MeV c}^{-2}$.

Energi ikat

Di dalam inti terdapat gaya kuat yang mengikat proton dan neutron bersama-sama. Untuk benar-benar memisahkan semua nukleon ini membutuhkan energi. Energi ini disebut sebagai **energi ikat** inti. Inti stabil, yang memiliki sedikit atau tidak ada kecenderungan untuk meluruh, memiliki energi ikat yang besar. Inti yang kurang stabil memiliki energi ikat yang lebih kecil.

Demikian pula, ketika proton dan neutron bergabung bersama untuk membentuk nukleus, energi ikat ini harus dilepaskan. Energi ikat adalah energi yang setara dengan defek massa.

Kita telah melihat bahwa energi yang setara dengan defek massa inti helium-4 adalah 28,4 MeV. Oleh karena itu, 28,4 MeV adalah energi ikat inti dan merupakan energi yang dibutuhkan untuk memisahkan, hingga tak terhingga, dua proton dan dua neutron dari inti ini.

Energi ikat adalah energi yang setara dengan defek massa inti. Ini adalah energi yang dibutuhkan untuk memisahkan hingga tak terhingga semua nukleon inti.

CONTOH SOAL 9B

Hitung energi ikat, dalam MeV, dari inti karbon-14 n dengan defek massa 0,109736 u.

Jawaban:

Baik Menggunakan kesetaraan $1 \text{ u} = 934 \text{ MeV}$,
0,109736 u setara dengan 102 MeV. Karena energi ikat adalah energi yang setara dengan defek massa, energi ikat = **102 MeV**.

Atau

$$\begin{aligned}\text{energi ikat} &= 0,109736 \times 1,66 \times 10^{-27} \times (3,00 \times 10^8)^2 \\ &= 1,64 \times 10^{-11} \text{ J} \\ &= (1,64 \times 10^{-11}) / (1,60 \times 10^{-13}) \\ &= \mathbf{102 \text{ MeV}}\end{aligned}$$

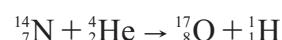
Soal Latihan

- 2 Hitung energi ikat, dalam MeV, dari inti nitrogen-14 dengan defek massa 0,1085 u.



Persamaan nuklir

Inti dari setiap nuklida dapat direpresentasikan dengan notasi nuklida (lihat [Topik 7.1](#)). Notasi ini berguna ketika kita ingin mempertimbangkan reaksi nuklir. Sebagai contoh, ketika inti helium membombardir nitrogen n u Cl e kita, reaksi dapat diwakili oleh



Ingatlah bahwa jumlah nukleon dan muatan adalah kekal dalam proses nuklir ([Topik 7.1](#)). Agar reaksi ini berlangsung, maka tiga syarat harus dipenuhi.

- 1 Kekekalan nomor proton ($7 + 2 = 8 + 1$)
- 2 Kekekalan nomor nukleon ($14 + 4 = 17 + 1$)
- 3 Konservasi massa-energi.

$$\text{massa } {}^{14}_7\text{N} = 14.003074 \text{ u}$$

$$\text{massa } {}^4_2\text{He} = 4.002604 \text{ u}$$

$$\text{massa } {}^{17}_8\text{O} = 16.99913 \text{ u}$$

$$\text{massa } {}^1_1\text{H} = 1.007825 \text{ u}$$

Perubahan massa adalah $18.005678 \text{ u} - 18.006955 \text{ u} = (-)1.277 \times 10^{-3} \text{ u}$.

Perubahan massa ini setara dengan 1,2 MeV.

Perhatikan bahwa massa produk lebih besar dari massa inti induk yang berasal dan terdapat kelebihan massa.

Agar reaksi ini berlangsung dengan kekekalan massa-energi, maka inti helium harus memiliki energi kinetik paling sedikit 1,2 MeV ketika bereaksi dengan inti nitrogen.

Agar reaksi terjadi secara spontan, harus ada defek massa sehingga produk reaksi memiliki beberapa energi kinetik dan dengan demikian massa energi adalah kekal.

► CONTOH SOAL 9C

Inti uranium-234 meluruh dengan emisi partikel α untuk membentuk inti thorium-90. Total energi dilepaskan selama peluruhan ini adalah 4,77 MeV. Hitunglah perubahan massa total selama peluruhan.

Jawaban

$$4,77 \text{ MeV} = 4,77 \times 1,60 \times 10^{-13} = 7,63 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$E = c^2 \Delta m$$

$$7,63 \times 10^{-13} \text{ J} = (3,0 \times 10^8)^2 \times \Delta m$$

$$\text{perubahan massa} = 8,48 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

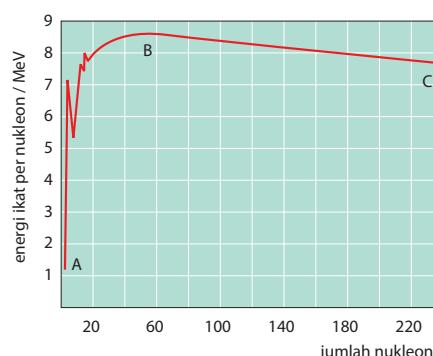
Stabilitas Inti

Inti yang stabil adalah inti yang memiliki kemungkinan peluruhan yang sangat rendah. Inti yang kurang stabil lebih mungkin untuk meluruh. Ukuran stabilitas yang berguna adalah energi ikat per nukleon nukleon dalam nukleus.

Energi ikat per nukleon didefinisikan sebagai energi total yang dibutuhkan untuk memisahkan semua nukleon dalam inti dibagi dengan jumlah nukleon dalam inti.

Gambar 9.1 menunjukkan variasi dengan jumlah nukleon dari energi ikat per nukleon untuk berbagai nuclida.

► Gambar 9.1
energi ikat per
nukleon terhadap
jumlah nukleon

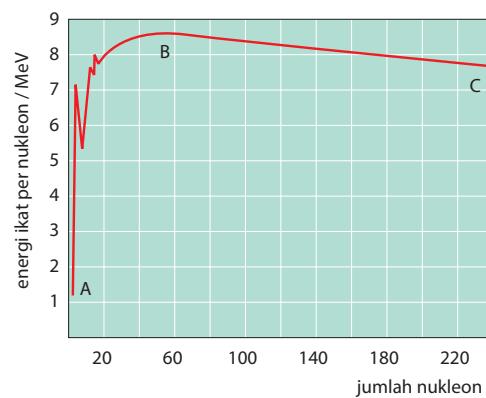


Nuklida yang paling stabil adalah yang memiliki energi ikat per nukleon tertinggi. Artinya, nuklida-nuklida yang berada dekat titik B pada grafik. Iron-56 adalah salah satu nuklida yang paling stabil. Biasanya, nuklida yang sangat stabil memiliki energi ikat per nukleon sekitar 8 MeV.

Inti ringan, antara A dan B pada grafik, dapat bergabung atau melebur membentuk inti yang lebih besar dengan energi ikat yang lebih besar per nukleon. Proses ini disebut **fusi nuklir** dan dijelaskan lebih rinci di bawah. Agar proses tersebut berlangsung, diperlukan kondisi suhu dan tekanan yang sangat tinggi, seperti pada bintang/matahari.

Inti berat, antara B dan C pada grafik, ketika dibombardir dengan neutron, dapat pecah menjadi dua inti yang lebih kecil, sekali lagi dengan nilai energi ikat per nukleon yang lebih besar. Proses ini disebut **fisi nuklir**. Proses ini juga dijelaskan secara lebih rinci di bawah ini.

Gambar 9.2 menyoroti nuklida yang mungkin mengalami fusi (bagian kurva berwarna biru) atau fisi (bagian kurva berwarna merah) untuk meningkatkan energi ikatnya per nukleon.



▲ **Gambar 9.2**

Ketika fusi atau fisi nuklir terjadi, ada perubahan jumlah nukleon dari inti yang terlibat dalam reaksi. Energi ikat per nukleon yang lebih tinggi tercapai, dan ini disertai dengan pelepasan energi. Pelepasan energi selama reaksi fisi ini adalah bagaimana pembangkit listrik tenaga nuklir saat ini menghasilkan energi listrik.

CONTOH SOAL 9D

- 1 Energi ikat inti helium-4 adalah 28,4 MeV. Hitung energi ikat per nucleon.
- 2 Massa inti uranium-238 ($^{238}_{92}\text{U}$), proton dan neutron berturut-turut adalah 237,9997 u, 1,00728 u, dan 1,00867 u. Hitung energi ikat per nukleon uranium-238.

Jawaban

- 1 Inti helium-4 memiliki 4 nukleon.

Energi ikat per nukleon, dengan demikian

$$28,4/4 = 7,1 \text{ MeV per nukleon.}$$

- 2 Massa konstituen inti U-238

$$\begin{aligned} &= (92 \times 1,00728) + (146 \times 1,00867) \\ &= 239,93558 \text{ u} \end{aligned}$$

$$\text{Defek massa} = 239,93558 \text{ u} - 237,9997 \text{ u} = 1,93588 \text{ u}$$

$$\text{Energi ikat per nukleon} = (1,93588 \times 934)/238$$

$$= 7,5971 \text{ MeV per nukleon}$$

Soal Latihan

- 3 Energi ikat inti nitrogen-14 adalah 101 MeV. Hitung energi ikat per nukleon.
- 4 Data untuk massa beberapa partikel diberikan pada Tabel 9.1.

inti atau partikel	massa/u
proton	1,0073
neutron	1,0087
zirkonium $^{97}_{40}\text{Zr}$	97,0980

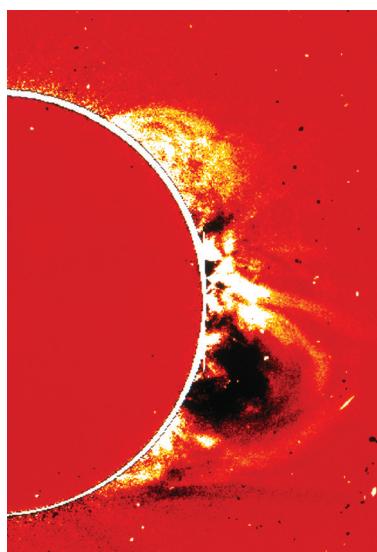
▲ Tabel 9.1

Tentukan untuk inti zirkonium-97:

- a defek massa
- b energi ikat
- c energi ikat per nukleon

Fusi nuklir

Sebagian besar energi di Bumi berasal dari Matahari, yang dihasilkan oleh reaksi fusi nuklir. Inti ringan, seperti isotop hidrogen, bergabung bersama untuk menghasilkan inti yang lebih berat dan lebih stabil, dan dengan demikian melepaskan energi.



▲ Gambar 9.3 Permukaan Matahari

Gambar 9.3 menunjukkan letusan dari permukaan Matahari yang disebabkan oleh reaksi fusi yang sangat energik.

Fusi nuklir terjadi ketika dua inti ringan bergabung membentuk inti bermassa lebih besar.

Salah satu reaksi fusi tersebut adalah



Dari kurva energi ikat per nukleon (**Gambar 23.1**) kita melihat bahwa energi ikat per nukleon untuk inti ringan, seperti hidrogen adalah rendah. Tetapi jika dua inti ringan dibuat untuk melebur bersama, mereka dapat membentuk inti baru yang lebih berat yang memiliki energi ikat per nukleon yang lebih tinggi. Inti baru akan lebih stabil daripada dua inti yang lebih ringan sebelum reaksi peleburan. Karena perbedaan stabilitas ini, reaksi fusi seperti ini akan melepaskan energi.

Meskipun reaksi fusi adalah sumber energi matahari, saat ini kita tidak dapat menduplikasi reaksi ini secara terkendali di Bumi. Ini karena inti yang terlibat dalam fusi harus dibawa sangat berdekatan serta memerlukan kondisi suhu dan tekanan yang sangat tinggi, mirip dengan yang ditemukan di pusat Matahari. Reaksi yang memerlukan kondisi ini disebut **reaksi termo-nuklir**. Beberapa reaksi fusi yang melibatkan isotop hidrogen telah dibuat untuk bekerja di Joint European Torus (JET), meskipun belum secara terkendali dan berkelanjutan. Pada tahun 2006, sebuah konsorsium internasional setuju untuk melakukan proyek ITER (International Tokamak Engineering Research), yang dirancang untuk menghasilkan hingga 500 MW daya fusi yang dipertahankan selama lebih dari 400 detik dengan fusi campuran ${}^1\text{H} - {}^3\text{H}$. Konstruksi di sebuah situs di Prancis selatan akan memakan waktu beberapa tahun.

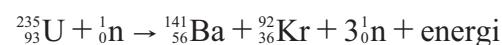
Fisi nuklir

Di dalam inti atom, nukleon mengalami gaya tarik menarik dan gaya tolak menolak. Gaya tarik menarik disebut **gaya nuklir kuat**. Gaya nuklir kuat bertindak seperti ‘lem nuklir’ untuk menyatukan nukleon. Gaya tolak menolak adalah gaya listrik (hukum Coulomb) antara proton bermuatan positif. Gaya tarik gravitasi ada, tetapi dapat diabaikan jika dibandingkan dengan

gaya lainnya. Inti stabil memiliki gaya tarik menarik yang jauh lebih besar daripada gaya tolak. Nuklida stabil umumnya memiliki jumlah neutron dan proton yang kurang lebih sama di dalam inti. Artinya, rasio neutron-proton mendekati satu. Dalam inti berat seperti uranium dan plutonium, ada jauh lebih banyak neutron daripada proton, memberikan rasio neutron-proton lebih dari satu. Misalnya, uranium-235 memiliki 92 proton dan 143 neutron, memberikan rasio neutron-proton 1,55. Hal ini menyebabkan energi ikat per nukleon jauh lebih rendah dibandingkan dengan besi, dan nuklida tersebut kurang stabil. Setiap peningkatan lebih lanjut dalam jumlah neutron dalam inti seperti itu kemungkinan akan menyebabkan inti mengalami **fisi nuklir**.

Fisi nuklir adalah pemecahan inti yang berat menjadi dua inti yang lebih ringan dengan massa yang kira-kira sama.

Ketika inti uranium-235 menyerap neutron, ia menjadi tidak stabil dan terpecah menjadi dua inti yang lebih ringan dan lebih stabil. Ada banyak kemungkinan reaksi nuklir, salah satunya adalah



Proses ini disebut fisi nuklir terinduksi, karena dimulai dengan penangkapan neutron oleh inti uranium.

CONTOH SOAL 9E

Gunakan data pada [Tabel 9.2](#) untuk menghitung reaksi fisi:



- d** sebuah perubahan massa sebagai akibat dari fisi
- e** energi yang dilepaskan per fisi.

inti atau partikel	massa/u
neutron	1.009
$^{235}_{93}\text{U}$	235.123
$^{141}_{56}\text{Ba}$	140.912
$^{92}_{36}\text{Kr}$	91.913

▲ Tabel 9.2

Jawaban

- a** total massa reaktan = $235,123 + 1,009$
 $= 236,132 \text{ u}$
 massa total produk = $140,912 + 91,913 + (3 \times 1,009)$
 $= 235,852 \text{ u}$
 (elektron memiliki massa yang dapat diabaikan)
 perubahan massa = $236,132 - 235,852$
 $= 0,28 \text{ u}$
- b** energi yang dilepaskan = $c^2 \Delta m$
 $= (3,00 \times 10^8)^2 \times 0,28 \times 1,66 \times 10^{-27}$
 $= 4,18 \times 10^{-11} \text{ J}$

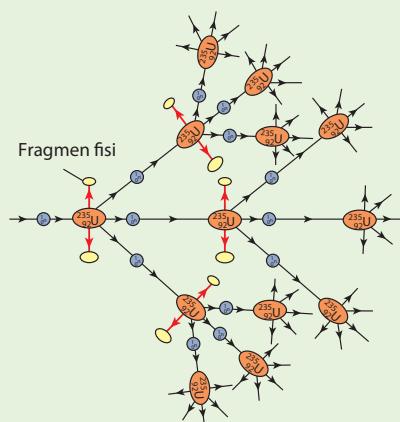
Soal Latihan

- 5** Salah satu reaksi fusi yang terjadi di Matahari adalah bergabungnya inti deuterium ${}^2\text{H}$ dan proton ${}^1\text{p}$ untuk membentuk inti helium-3.
 Energi ikat per nukleon deuterium dan helium-3 adalah 0,864 MeV dan 2,235 MeV.
- a** Tuliskan persamaan nuklir untuk reaksi ini.
 - b** Jelaskan mengapa energi ikat per nukleon proton adalah nol.
 - c** Hitung energi yang dilepaskan dalam reaksi ini.

PENGAYAAN

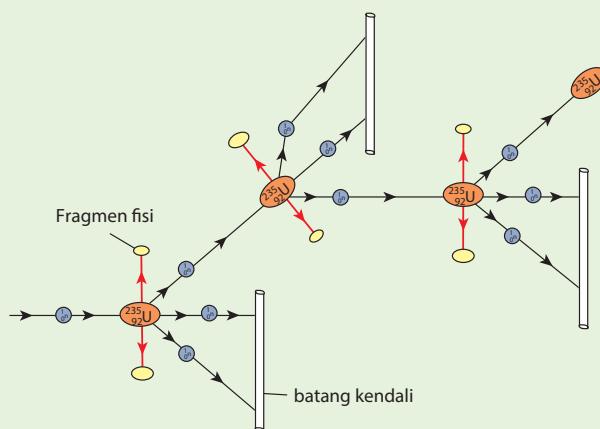
Reaksi berantai

Setiap reaksi fisi yang dijelaskan oleh persamaan di halaman 215 menghasilkan pelepasan tiga neutron. Reaksi fisi lain yang mungkin melepaskan dua atau tiga neutron. Jika neutron ini diserap oleh inti uranium-235 lainnya, ini juga dapat menjadi tidak stabil dan mengalami fisi, sehingga melepaskan lebih banyak neutron. Reaksi digambarkan sebagai **reaksi berantai** yang dipercepat. Hal ini diilustrasikan pada **Gambar 9.4**. Jika jenis reaksi ini berlanjut tanpa kendali, banyak energi dilepaskan dalam waktu singkat, dan terjadilah ledakan nuklir.



▲ Gambar 9.4 Mempercepat reaksi berantai

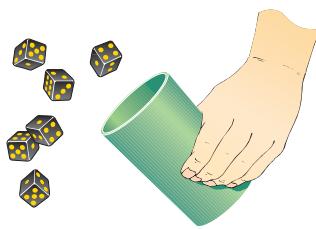
Jika jumlah neutron yang mengambil bagian dalam reaksi berantai dikendalikan sehingga jumlah fisi per satuan waktu konstan, bukan meningkat, laju pelepasan energi dapat dikendalikan. Situasi ini diilustrasikan pada **Gambar 9.5**.



▲ Gambar 9.5 reaksi berantai terkendali

Kondisi ini berlaku di reaktor pembangkit listrik tenaga nuklir modern, di mana beberapa neutron yang dilepaskan dalam reaksi fisi diserap oleh batang kendali untuk membatasi laju reaksi fisi.

Dua dari neutron yang dihasilkan oleh fisi diserap oleh batang kendali. Neutron ketiga menginduksi fisi nuklir lebih lanjut.



▲ Gambar 9.6 Percobaan dadu

9.2 Peluruhan radioaktif

Beberapa unsur memiliki inti yang tidak stabil. Agar lebih stabil, mereka memancarkan partikel dan/atau radiasi elektromagnetik (lihat [Topik 9.1.1](#)) mengenai inti radioaktif.

Deteksi fluktuasi tingkat penghitungan sumber radioaktif memberikan bukti sifat acak peluruhan radioaktif . Peluruhan bersifat acak sehingga tidak mungkin untuk memprediksi inti dalam sampel yang akan peluruhan berikutnya.

Peluruhan radioaktif merupakan proses acak karena tidak dapat diprediksi inti mana yang akan meluruh selanjutnya dan inti akan meluruh dalam periode waktu tertentu.

Laju peluruhan bahan radioaktif menurun seiring waktu. Namun, laju peluruhan tidak dapat diubah dengan mengubah faktor lingkungan apa pun (misalnya suhu atau tekanan). Hal ini menunjukkan bahwa peluruhan radioaktif adalah proses spontan.

Peluruhan radioaktif adalah proses spontan karena tidak terpengaruh oleh faktor eksternal, seperti temperatur atau tekanan.

Peluruhan acak

Sekarang kita melihat beberapa konsekuensi dari sifat acak dari peluruhan radioaktif . Jika enam dadu dilempar secara bersamaan ([Gambar 9.6](#)), kemungkinan salah satunya akan menunjukkan angka enam.

Jika 12 dadu dilempar, kemungkinan dua di antaranya akan menunjukkan angka enam, dan seterusnya. Meskipun dimungkinkan untuk memprediksi kemungkinan jumlah angka enam yang akan dilempar, tidak mungkin untuk mengatakan dadu mana yang benar-benar akan menunjukkan angka enam. Kami menggambarkan situasi ini untuk menunjukkan bahwa dari pelemparan dadu tersebut, kemunculan angka enam adalah [proses acak](#).

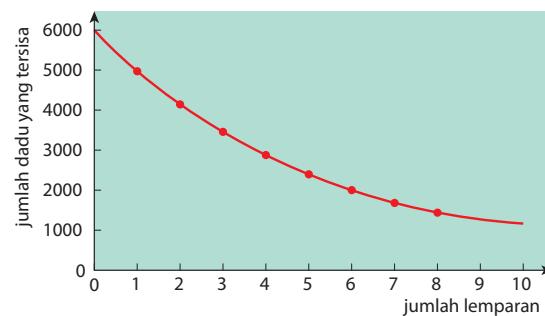
Dalam percobaan yang mirip dengan yang baru saja dijelaskan, beberapa siswa melempar sejumlah dadu (katakanlah 6000). Setiap kali dadu itu dilemparkan dan beberapa angka enam muncul, maka dadu yang

memunculkan angka 6 tersebut dipisahkan. Hasil jumlah dadu yang tersisa setelah setiap lemparan ditunjukkan pada [Tabel 9.3](#).

jumlah lemparan	jumlah dadu yang tersisa	jumlah dadu yang dipisahkan
0	6000	1000
1	5000	827
2	4173	696
3	3477	580
4	2897	483
5	2414	402
6	2012	335
7	1677	280
8	1397	

▲ [Tabel 9.3](#) Hasil penelitian lempar dadu

[Gambar 9.7](#) adalah grafik jumlah dadu yang tersisa terhadap jumlah lemparan.

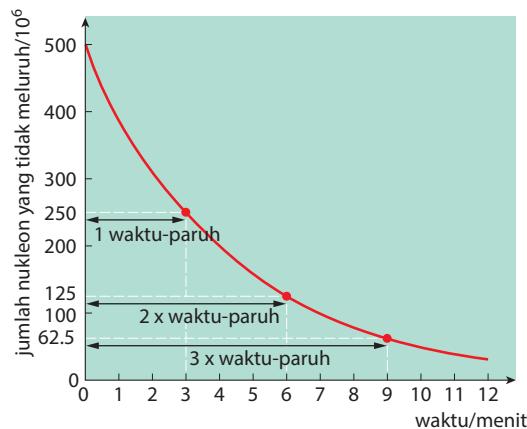


▲ [Gambar 9.7](#)

Grafik semacam ini disebut kurva peluruhan. Jumlah rata-rata dadu yang dipisahkan tidak linier, tetapi ada polanya. Setelah lemparan ke-3 dan 4, jumlah dadu yang tersisa menjadi setengahnya. Membaca nilai dari grafik menunjukkan bahwa sekitar 3,8 lemparan akan diperlukan untuk membagi dua jumlah dadu. Setelah 3,8 lemparan lainnya, angkanya menjadi dua lagi, dan seterusnya.

Kita dapat menerapkan eksperimen dadu untuk memodelkan peluruhan radioaktif. 6000 dadu mewakili inti radioaktif. Untuk skor enam mewakili emisi radioaktif. Semua dadu dengan skor enam dihilangkan, karena begitu inti mengalami peluruhan radioaktif, ia tidak lagi tersedia untuk peluruhan lebih lanjut. Dengan demikian, kita dapat menggambarkan seberapa cepat sampel bahan radioaktif akan meluruh.

Grafik jumlah inti yang tidak meluruh dalam sampel terhadap waktu memiliki bentuk kurva peluruhan yang khas yang ditunjukkan pada [Gambar 9.8](#).



▲ **Gambar 9.8** kurva peluruhan radioaktif

Tidak mungkin untuk menyatakan berapa lama seluruh sampel akan meluruh. Namun, setelah 3 menit, jumlah inti yang tidak meluruh dalam sampel berkurang setengahnya. Setelah 3 menit berikutnya, jumlah atom yang tidak meluruh telah berkurang setengahnya lagi. Kami menggambarkan situasi ini dengan mengatakan bahwa isotop radioaktif ini memiliki waktu paruh hingga 3 menit.

Waktu paruh nuklida radioaktif adalah waktu yang diperlukan untuk mereduksi jumlah inti yang tidak meluruk menjadi setengah dari jumlah aslinya.

Waktu paruh isotop yang berbeda memiliki rentang nilai yang sangat luas. Contoh beberapa isotop radioaktif dan waktu paruhnya diberikan pada [Tabel 9.4](#).

radioaktif isotop	Waktu paruh
uranium-238	$4,5 \times 10^9$ tahun
radium-226	$1,6 \times 10^3$ tahun
radon-222	3,8 hari
fransium-221	4,8 menit
astatin-217	0,03 detik

▲ **Tabel 9.4** Contoh waktu-paruh

Kita akan melihat nanti bahwa waktu paruh juga dapat dinyatakan dalam bentuk aktivitas materi.

Jika Anda mengukur laju hitungan dari isotop dengan waktu paruh yang sangat panjang, Anda mungkin

mengharapkan untuk mendapatkan nilai yang konstan. Bahkan, tingkat hitungan berfluktuasi tentang nilai rata-rata. Ini menunjukkan sifat acak peluruhan radioaktif.

► CONTOH SOAL 9F

Waktu paruh fransium-221 adalah 4,8 menit. Hitung fraksi sampel fransium-221 yang tersisa tidak meluruh setelah waktu 14,4 menit.

Jawaban

Waktu paruh fransium-221 adalah 4,8 menit, jadi setelah 4,8 menit, setengah sampel akan tetap tidak meluruh. Setelah dua waktu paruh (9,6 menit), $0,5 \times 0,5 = 0,25$ sampel akan tetap tidak meluruh. Setelah tiga waktu paruh (14,4 menit), $0,5 \times 0,25 = 0,125$ akan tetap tidak meluruh. Jadi pecahan yang tersisa yang tidak meluruh adalah 0,125 atau 1/8.

Soal Latihan

- 6 Menggunakan nilai waktu paruh yang diberikan pada Tabel 23.4, hitung:
- sebuah fraksi sampel uranium-238 sisanya undecayed setelah $9,0 \times 10^9$ tahun
 - fraksi sampel ast atine-217 yang tersisa tidak membusuk setelah 0,30 s
 - fraksi sampel radium-226 yang meluruh setelah 3200 tahun
 - fraksi sampel radon-222 yang meluruh setelah 15,2 hari.

Dalam melakukan percobaan dengan sumber radioaktif, penting untuk memperhitungkan nilai awal radiasi. Untuk menentukan laju hitung akibat sumber radioaktif, laju hitung mula-mula harus dikurangi dari total laju hitung terukur. Penyisihan radiasi mula-mula memberikan tingkat hitungan yang benar.

Perhatikan bahwa detektor yang ditempatkan di dekat sumber radioaktif mengukur laju radiasi yang dipancarkan ke arah detektor. Detektor tidak mengukur aktivitas sumber. Aktivitas adalah laju total peluruhan inti di sumbernya.

Deskripsi matematis peluruhan radioaktif

Aktivitas dan peluruhan konstan

Seperti yang kita lihat dalam eksperimen dadu, menambah jumlah dadu akan meningkatkan jumlah enam dadu yang muncul pada setiap lemparan. Demikian pula, jika kita menyelidiki peluruhan sampel bahan radioaktif, kita menemukan bahwa semakin besar jumlah inti radioaktif dalam sampel, semakin besar laju peluruhan.

Jika ada N inti dalam sampel pada waktu t , maka pada waktu $(t + dt)$ beberapa inti akan meluruh sehingga jumlah yang tersisa adalah $(N - dN)$.

Untuk peluruhan radioaktif, probabilitas peluruhan per satuan waktu adalah konstan, yang dikenal sebagai **konstanta peluruhan λ** .

Untuk peluruhan radioaktif, konstanta peluruhan adalah peluang peluruhan inti per satuan waktu.

Konstanta peluruhan λ memiliki satuan s^{-1} , yr^{-1} , dan seterusnya.

Pada kasus ini,

$$\text{probabilitas peluruhan} = -dN/N$$

dan

$$\text{probabilitas peluruhan per satuan waktu} = \lambda = -(dN/dt)/N$$

sehingga

$$\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Perhatikan tanda negatif pada persamaan tersebut. Tanda negatif ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya waktu t , jumlah inti yang tersisa, N berkurang.

dN/dt adalah laju perubahan jumlah inti dalam sampel, jadi dN/dt mewakili laju peluruhan. $-dN/dt$ dikenal sebagai **aktivitas A** dari sumber, dan diukur dalam **becquerels**.

Aktivitas sumber radioaktif adalah jumlah n peluruhan nuklir yang terjadi per satuan waktu pada sumber tersebut.

Aktivitas diukur dalam becquerels (Bq), di mana 1 becquerel adalah 1 peluruhan per detik.

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Perhatikan bahwa menuliskan laju perubahan besaran N dengan waktu t dalam bentuk dN/dt adalah cara singkat untuk menyatakan laju, tetapi tidak diperlukan di *Cambridge International AS & A Level Physics* (lihat Catatan Matematika pada [Topik 5.5](#)).

Menggabungkan $A = -dN/dt$ dan $dN/dt = -\lambda N$, kita memiliki

$$A = \lambda N$$

Persamaan ini penting karena menghubungkan kuantitas yang dapat kita ukur (aktivitas, atau laju peluruhan inti) dengan kuantitas yang dalam praktiknya tidak dapat ditentukan (N , jumlah inti yang tidak meluruh). Kita akan melihat nanti bahwa konstanta peluruhan berhubungan langsung dengan waktu paruh $t_{\frac{1}{2}}$ dan waktu paruh dapat diperoleh dengan eksperimen. Waktu paruh tersebut membuka cara untuk menghitung jumlah inti yang tidak meluruh dalam sampel. Mencoba menghitung inti ketika sedang meluruh mirip dengan menghitung domba di ladang sementara beberapa melarikan diri melalui celah pagar!

► CONTOH SOAL 9G

Hitung jumlah inti fosfor-32 dalam sampel yang

memiliki aktivitas $5,0 \times 10^6$ Bq.

(Konstanta peluruhan fosfor-32 = $5,6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$)

Jawaban

Dari $dN/dt = -\lambda N$, $N = (-dN/dt)/\lambda = -5,0 \times 10^6 / 5,6 \times 10^{-7}$
 $= -8,9 \times 10^{12}$.

Tanda minus pada jawaban ini muncul karena dN/dt adalah laju peluruhan. Kuantitas yang diukur oleh pengukur kecepatan adalah laju peluruhan, dan karenanya harus negatif, tetapi selalu ditampilkan sebagai kuantitas positif. Demikian pula, kegiatan di becquerel selalu dikutip positif. Jadi jangan khawatir membuang tanda minus di sini!

Jumlah inti fosfor-32 = $8,9 \times 10^{12}$.

Catatan: Dalam perhitungan jenis ini, karena aktivitas diukur dalam becquerel (s^{-1}), konstanta peluruhan harus diukur dalam satuan yang konsisten, yaitu s^{-1} . Jika λ telah dikutip sebagai $4,8 \times 10^{-2} \text{ hari}^{-1}$, itu akan diperlukan untuk mengubah ke s^{-1} .

Soal Latihan

- 7 Hitung aktivitas, dalam Bq, dari sampel bahan radioaktif berikut:

a $2,4 \times 10^{15}$ atom strontium-90

(Konstanta peluruhan strontium-90
 $= 5,0 \times 10^{-8} \text{ menit}^{-1}$.)

b 2,5 g uranium-238 (0,238 kg uranium-238 mengandung $6,0 \times 10^{23}$ atom)

(Konstanta peluruhan uranium-238
 $= 5,0 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$)

Untuk menyelesaikan persamaan $dN/dt = -\lambda N$ membutuhkan matematika di luar lingkup Fisika *Cambridge International AS & A Level*. Namun, penting untuk mengetahui solusinya, untuk menemukan variasi dengan waktu jumlah inti yang tersisa dalam sampel. Solusinya adalah

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ atau } N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

dimana N_0 adalah jumlah awal inti yang tidak meluruh dalam sampel, dan N adalah jumlah inti yang tidak meluruh pada waktu t .

Persamaan mewakili peluruhan eksponensial. Kurva peluruhan N terhadap t seperti terlihat pada [Gambar 29.8](#). Karena kegiatan A sebanding dengan N ($A = \lambda N$), kurva A melawan t adalah bentuk yang sama, dan kita dapat menulis

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Persamaan ini juga berlaku untuk tingkat hitungan yang diterima. Jadi peluruhan radioaktif dapat diwakili oleh persamaan

$$x = x_0 e^{-\lambda t}$$

di mana x mewakili setiap aktivitas jumlah inti yang tidak meluruh atau laju penghitungan yang diterima.

► CONTOH SOAL 9H

Sampel fosfor-32 mengandung $8,6 \times 10^{12}$ inti pada waktu $t = 0$. Konstanta peluruhan fosforus-32 adalah $4,8 \times 10^{-2}$ hari $^{-1}$. Hitung jumlah inti fosfor-32 yang tidak membusuk dalam sampel setelah 10 hari.

Jawaban

Dari $N = N_0 e^{-\lambda t}$, kita memiliki $N = 8,6 \times 10^{12} \times e^{-0,048 \times 10}$, sehingga $N = 5,3 \times 10^{12}$.

(Sekali lagi, penting untuk mengukur λ dan t dalam satuan yang konsisten.

Berikut λ pada hari $^{-1}$ dan t adalah hari, sehingga tidak ada masalah.)

Soal Latihan

- 8** Aktivitas radon-222 dalam $1,0 \text{ m}^3$ udara ruangan adalah 350 Bq. Konstanta peluruhan dari radon-222 adalah $2,1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Hitung waktu, dalam hari, sebelum kegiatan dalam $1,0 \text{ m}^3$ udara berkurang hingga 210 Bq.



Peluruhan konstan dan waktu paruh

Dengan menggunakan persamaan $N = N_0 e^{-\lambda t}$, kita dapat memperoleh persamaan yang menghubungkan waktu-paruh ke konstanta peluruhan. Untuk setiap isotop radioaktif, jumlah inti yang tidak membusuk setelah satu waktu-paruh, menurut definisi waktu-paruh, sama dengan $\frac{1}{2}N_0$, dimana N_0 adalah jumlah asli inti yang tidak meluruh. Menggunakan persamaan peluruhan radioaktif

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

kita mendapatkan, pada waktu $t = t_{\frac{1}{2}}$

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 \exp(-\lambda t_{\frac{1}{2}})$$

dan, membagi setiap sisi persamaan dengan N_0 ,

$$0,5 = \exp(-\lambda t_{\frac{1}{2}})$$

atau

$$2 = \exp(\lambda t_{\frac{1}{2}})$$

Mengambil logaritma natural dari kedua sisi,

$$\ln 2 = \lambda t_{\frac{1}{2}}$$

Maka

$$t_{\frac{1}{2}} = \ln 2 / \lambda$$

atau

$$t_{\frac{1}{2}} = 0,693 / \lambda$$

dan $= 0,693 / t_{\frac{1}{2}}$.

CONTOH SOAL 2B

Hitung waktu-paruh, dalam tahun, radium-226, yang memiliki konstanta peluruhan $1,42 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$.

Jawaban

Menggunakan $t_{\frac{1}{2}} = 0,693/\lambda$, kita memiliki $t_{\frac{1}{2}} = 0,693 / 1,42 \times 10^{-11} = 4,88 \times 10^{10} \text{ s} = 1550 \text{ tahun}$.

Soal Latihan

- 9 Hitung waktu-paruh nuklida radioaktif berikut:
 - a bismut-214, yang memiliki konstanta peluruhan $5,83 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.
 - b karbon-14, yang memiliki konstanta peluruhan $4,1 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$.
- Berikan jawaban Anda untuk beberapa tahun,
- 10 Hitung konstanta peluruhan, dalam s^{-1} , natrium-24, yang memiliki waktu-paruh 15 jam.

RANGKUMAN

- ❖ Defek massa inti adalah perbedaan antara massa total nukleon yang terpisah dan massa inti.
- ❖ Relasi ekivalen massa - energi Einstein $E = mc^2$.
- ❖ Energi ikat inti adalah energi yang diperlukan untuk memisahkan sepenuhnya semua inti penyusunnya.
- ❖ Energi ikat per nukleon adalah ukuran stabilitas nukleus. Energi ikat per nukleon yang lebih tinggi berarti nukleus lebih stabil.
- ❖ Fusi nuklir adalah bergabungnya inti ringan untuk membentuk inti yang lebih besar dan lebih berat.
- ❖ Fisi nuklir adalah pemecahan inti yang berat menjadi dua inti yang lebih kecil dan lebih ringan dengan massa yang kira-kira sama.
- ❖ Persamaan peluruhan dan reaksi nuklir dapat disajikan dengan notasi nuklida
- ❖ Perbedaan massa dapat digunakan untuk menghitung energi yang dilepaskan dalam reaksi nuklir (termasuk persamaan peluruhan radioaktif) menggunakan $E = c^2 \Delta m$.
- ❖ Grafik energi ikat per nukleon terhadap jumlah nukleon menunjukkan bahwa inti dengan jumlah nukleon rendah, dan juga inti dengan jumlah nukleon tinggi, memiliki energi ikat per nukleon yang lebih kecil dibandingkan dengan inti dengan jumlah nukleon sekitar 56.
- ❖ Untuk alasan ini, fusi inti nomor nukleon rendah dan fisi inti nomor nukleon tinggi adalah proses yang melepaskan energi.
- ❖ Peluruhan radioaktif adalah proses acak yang spontan.
- ❖ Waktu paruh $t_{\frac{1}{2}}$ dari nuklida radioaktif adalah waktu yang diperlukan untuk

mereduksi jumlah inti yang tidak membusuk menjadi setengah dari jumlah aslinya.

- ❷ Aktivitas sumber radioaktif adalah jumlah inti yang meluruh per satuan waktu. Satuan aktivitas adalah becquerel (Bq). 1 becquerel = 1 s^{-1} .
- ❸ Aktivitas A dari suatu sumber berhubungan dengan jumlah N inti yang tidak meluruh dengan persamaan $A = -\lambda N$ di mana λ adalah konstanta peluruhan.
- ❹ Konstanta peluruhan didefinisikan sebagai peluang peluruhan per satuan waktu dari sebuah inti.
- ❺ Peluruhan radioaktif diwakili oleh persamaan peluruhan eksponensial $X = x_0 e^{-\lambda t}$, di mana x adalah aktivitas atau jumlah inti yang tidak meluruh atau laju hitungan yang diterima
- ❻ Waktu paruh $t_{\frac{1}{2}}$ dan konstanta peluruhan dihubungkan dengan persamaan $\ln 2 = \lambda t_{\frac{1}{2}}$ atau $t_{\frac{1}{2}} = 0,693/\lambda$.

ASESMEN FORMATIF

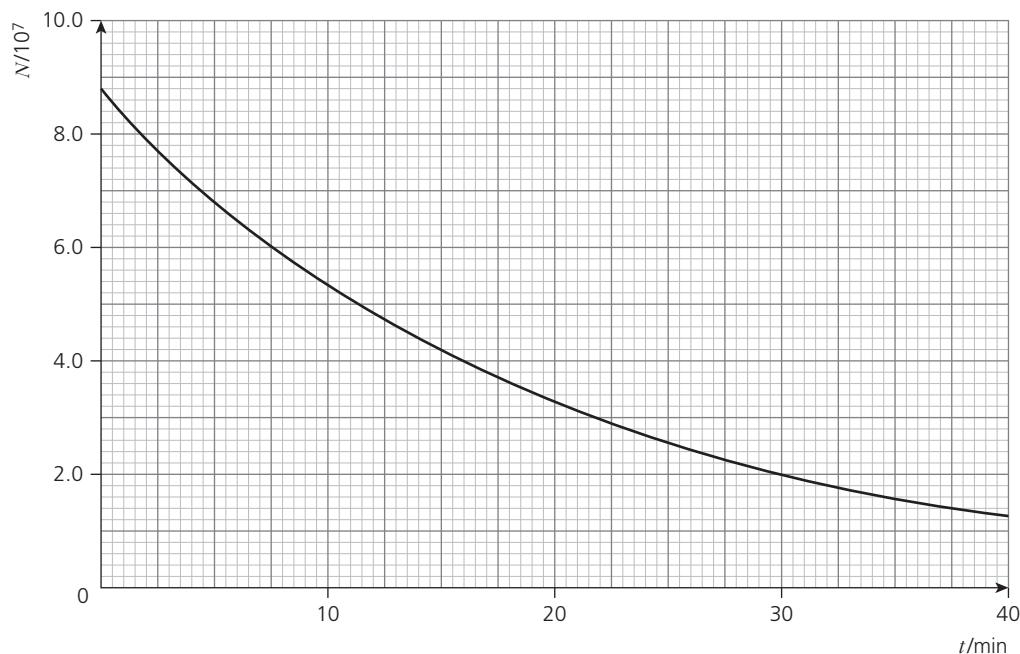
- 1 Gambar 9.9 menunjukkan variasi dengan waktu t dari aktivitas sampel nuklida radioaktif X. Rata-rata jumlah nilai awal selama percobaan adalah 36 min^{-1} .

t/jam	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Kegiatan / min-1	854	752	688	576	544	486	448	396	362	334	284

▲ Gambar 9.9

- a Plot grafik untuk menunjukkan variasi dengan waktu t dari tingkat hitungan yang dikoreksi.
 - b Gunakan grafik untuk menentukan waktu paruh nuklida X.
- 2 Hitung defek massa, energi ikat inti, dan energi ikat per nucleon dari inti zirkonium-97 ($^{97}_{40}\text{Zr}$) memiliki massa nuklir 97,09801 u.
(Massa proton = 1,00728 u; massa neutron = 1,00867 u.)
- 3 Salah satu kemungkinan reaksi yang terjadi di inti reaktor nuklir adalah
- $$^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{95}_{42}\text{Mo} + {}^{139}_{57}\text{La} + 2 {}^1_0\text{n} + 7 {}^0_{-1}\text{e}$$
- Untuk reaksi ini, hitung:
- a perubahan massa setelah fisi terjadi,
 - b energi yang dilepaskan per fisi uranium-235,
 - c energi yang tersedia dari fisi lengkap 1,00 g uranium-235,
 - d massa uranium-235 yang digunakan oleh 500 Nuclea MW pembangkit listrik r dalam satu jam, dengan asumsi 30% eff i siensi.
- (Massa: U, 235,123 u; Mo, 94.945 u; La, 138.955 u; proton, 1,007 u; neutron, 1,009 u. 0,235kg uranium-235 mengandung $6,0 \times 10^{23}$ atom.)
- 4 Dua reaksi fusi yang terjadi di Matahari dijelaskan di bawah ini.
- a Inti hidrogen-2 (deuterium) menyerap proton untuk membentuk inti helium-3.
 - b Dua inti helium-3 melebur membentuk inti helium-4 ditambah dua proton bebas.
- Untuk setiap reaksi, tuliskan persamaan inti yang sesuai dan hitung energi yang dilepaskan.
- (Massa: ${}^2_1\text{H}$, 2.01410 u; ${}^2_1\text{He}$, 3.01605 u; ${}^4_2\text{He}$, 4.00260 u; ${}^1_1\text{p}$, 1.00728; ${}^1_0\text{n}$, 1.00867 u.)
- 5 Hitung massa cesium-137 yang memiliki aktivitas $2,5 \times 10^5$ Bq.
Jumlah atom dalam 0,137 kg cesium-137 adalah $6,0 \times 10^{23}$. Waktu paruh cesium-137 adalah 30 tahun.
- 6 a Aktivitas sumber radioaktif X turun dari $4,5 \times 10^{10}$ Bq menjadi $1,2 \times 10^{10}$ Bq dalam 5,0 jam. Hitung waktu paruhnya.
b Aktivitas massa karbon-14 tertentu adalah $3,60 \times 10^9$ Bq. Waktu paruh karbon-14 adalah 5570 tahun. Hitung jumlah inti karbon-14 dalam sampel.

- 7 a Sebutkan apa yang dimaksud dengan peluruhan radioaktif. [2]
- b Variasi dengan waktu t dari jumlah N inti teknesium-101 dalam sampel bahan radioaktif ditunjukkan pada [Gambar 9.10](#).



▲ Gambar 23.10

- i Gunakan Gambar 23.10 untuk menentukan aktivitas, dalam Bq, sampel teknesium-101 pada waktu $t = 14,0$ menit. Tunjukkan hasil kerja Anda. [4]
- ii Tanpa menghitung waktu paruh teknesium-101, gunakan jawaban Anda di i untuk menentukan konstanta peluruhan teknesium-101. [2]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Makalah 41 Q13 Mei/Juni 2018

10 Fisika Medis

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

10.1. Produksi dan penggunaan ultrasound

1. memahami bahwa kristal piezo-listrik berubah bentuk ketika p.d. diterapkan di atasnya dan bahwa kristal menghasilkan GGL. ketika bentuknya berubah
2. memahami bagaimana gelombang ultrasound dihasilkan dan dideteksi oleh transduser piezo-listrik
3. memahami bagaimana refleksi pulsa ultrasound pada permukaan jaringan dapat digunakan untuk memperoleh informasi diagnostik tentang struktur internal
4. mendefinisikan impedansi akustik spesifik media sebagai $Z = c$, dimana c adalah kecepatan suara dalam media.
5. menggunakan $I_R/I_0 = (Z_1 - Z_2)^2/(Z_1 + Z_2)^2$ untuk koefisien refleksi intensitas batas antara dua media.
6. mengingat dan menggunakan $I = I_0 e^{-\mu x}$ untuk redaman ultrasound dalam materi

10.2. Produksi dan penggunaan sinar-X

1. menjelaskan bahwa sinar-X dihasilkan oleh penembakan elektron dari target logam dan menghitung panjang gelombang minimum sinar-X yang dihasilkan dari p.d yang dipercepat.

2. memahami penggunaan sinar-X dalam pencitraan struktur tubuh internal, termasuk pemahaman tentang istilah kontras dalam pencitraan sinar-X
3. mengingat dan menggunakan $I = I_0 e^{-\mu x}$ untuk redaman sinar-X dalam materi
4. memahami bahwa pemindaian computed tomography (CT) menghasilkan gambar 3D dari struktur internal dengan terlebih dahulu menggabungkan beberapa gambar sinar-X yang diambil di bagian yang sama dari sudut yang berbeda untuk mendapatkan Gambar 2D dari bagian tersebut, lalu mengulangi proses ini di sepanjang sumbu dan menggabungkan Gambar 2D dari beberapa bagian

10.3. Pemindaian PET

1. memahami bahwa pelacak adalah zat yang mengandung inti radioaktif yang dapat dimasukkan ke dalam tubuh dan kemudian diserap oleh jaringan yang sedang dipelajari
2. memahami bahwa pelacak yang meluruh β^+ digunakan dalam tomografi emisi positron (pemindaian PET)
3. memahami bahwa pemusnahan terjadi ketika sebuah partikel

- berinteraksi dengan antipartikelnya dan bahwa massa-energi dan momentum kekal.
4. menjelaskan bahwa, dalam pemindaian PET, positron yang dipancarkan oleh peluruhan pelacak musnah ketika mereka bereaksi dengan elektron dalam jaringan, menghasilkan sepasang foton sinar gamma yang bergerak dalam arah yang berlawanan
 5. menghitung energi foton sinar gamma yang dipancarkan selama pemusnahan pasangan elektron-positron
 6. memahami bahwa foton sinar gamma dari peristiwa pemusnahan, berjalan ke luar tubuh dan dapat dideteksi, dan gambar konsentrasi pelacak dalam jaringan dapat dibuat dengan memproses waktu kedatangan foton sinar gamma

Pemahaman Pendahuluan

- Sifat gelombang suara dan sinar-X.
- Sinar-X memiliki panjang gelombang yang jauh lebih pendek daripada cahaya tampak.
- Semua jenis gelombang dapat dipantulkan.
- Pemahaman tentang istilah panjang gelombang, frekuensi, kecepatan, amplitudo dan intensitas.
- Radiasi sinar-X adalah bagian dari spektrum elektromagnetik.
- Radiasi sinar-X sangat menembus jaringan lunak tubuh.
- Isotop adalah bentuk yang berbeda dari unsur yang sama.
- Peluruhan radioaktif dapat terjadi dengan peluruhan alfa, beta atau gamma.
- Sebuah positron bersama dengan elektron neutrino dapat dipancarkan selama peluruhan radioaktif.
- Positron adalah antipartikel elektron.

10.1 Produksi dan Penggunaan Diagnosis Ultrasound

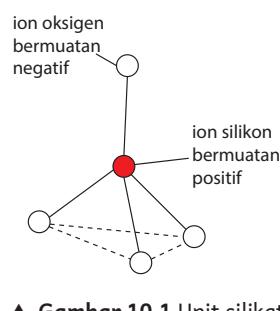


Produksi dan penggunaan ultrasound dalam diagnosis

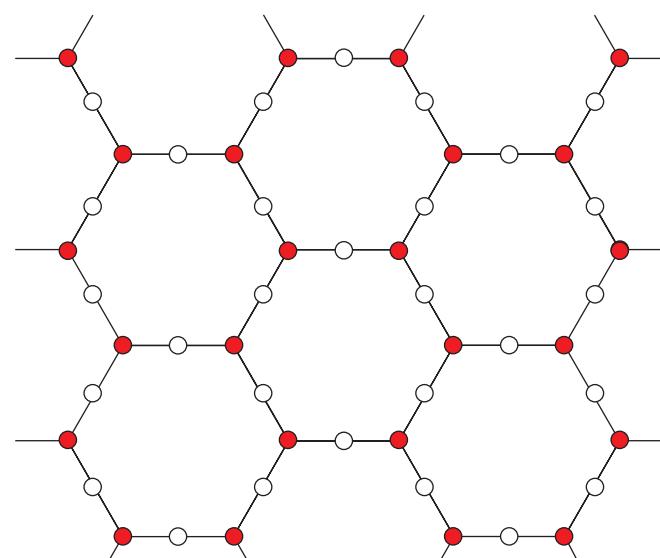
Ultrasound adalah suara dengan frekuensi di atas jangkauan pendengaran manusia, biasanya di atas sekitar 20 kHz. Rentang frekuensi ultrasound yang digunakan dalam diagnosis medis biasanya lebih tinggi, hingga sekitar 10 MHz. Seperti halnya gelombang suara, gelombang ultrasound adalah gelombang tekanan longitudinal.

Gelombang ultrasonik dapat dihasilkan menggunakan **transduser piezo-listrik**. Transduser adalah nama yang diberikan untuk perangkat apa pun yang mengubah energi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam hal ini, energi listrik diubah menjadi energi ultra-suara melalui kristal piezo-listrik seperti kuarsa.

Struktur kuarsa terdiri dari sejumlah besar unit silikat tetrahedral, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10.1**. Unit-unit ini dibangun untuk membentuk kristal kuarsa yang dapat diwakili, dalam dua dimensi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10.2**.



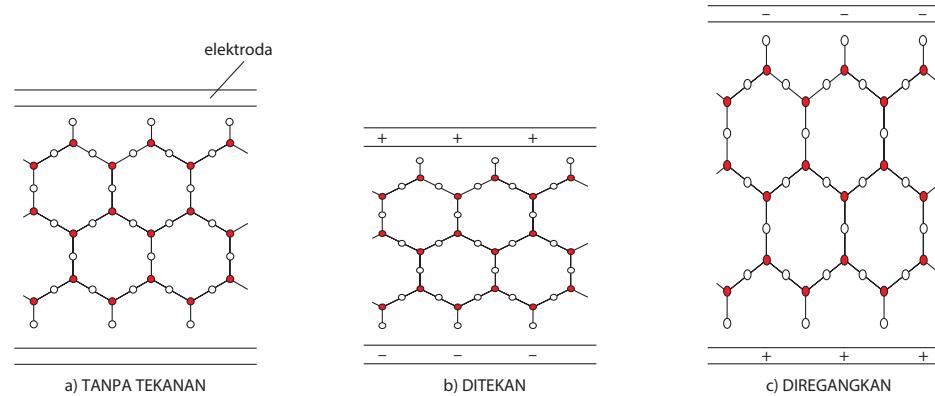
▲ **Gambar 10.1** Unit silikat tetrahedral



▲ **Gambar 10.2** Representasi dua dimensi dari kristal kuarsa

Ketika kristal tidak diberi tekanan, pusat muatan ion positif dan ion negatif dalam satu unit bertemu/berpotongan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 10.3a**. Elektroda dapat dibentuk pada sisi berlawanan dari

kristal dengan menyimpan perak pada permukaannya. Ketika perbedaan potensial diterapkan antara elektroda, medan listrik diatur dalam kristal. Medan ini menyebabkan gaya bekerja pada ion. Ion oksigen bermuatan negatif dan ion silikon bermuatan positif. Ion-ion tidak ditahan secara kaku pada posisinya dan, akibatnya, mereka akan sedikit bergeser ketika medan listrik diterapkan di seluruh kristal. Ion positif akan tertarik menuju elektroda negatif dan ion negatif akan tertarik ke elektroda positif. Tergantung pada arah medan listrik, kristal akan menjadi sedikit lebih tipis ([Gambar 10.3b](#)) atau sedikit lebih tebal ([Gambar 10.3c](#)).

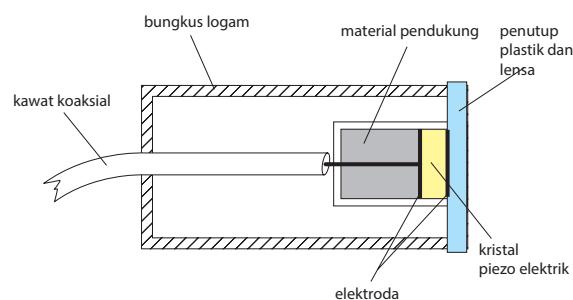


▲ **Gambar 10.3** Pengaruh medan listrik pada kristal kuarsa

Tegangan bolak-balik diterapkan di elektroda menyebabkan kristal bergetar dengan frekuensi yang sama dengan tegangan yang diberikan. Osilasi ini cenderung memiliki amplitudo kecil. Namun, jika frekuensi tegangan yang diberikan sama dengan frekuensi alami getaran kristal, resonansi akan terjadi dan amplitudo getaran akan maksimum. Dimensi kristal dapat sedemikian rupa sehingga osilasi berada dalam rentang frekuensi ultrasound (lebih besar dari sekitar 20 kHz). Osilasi ini akan menimbulkan gelombang ultrasound di media apa pun yang mengelilingi kristal.

Jika tekanan diterapkan pada kristal kuarsa yang tidak bermuatan, gaya yang terlibat akan mengubah posisi ion positif dan negatif, menciptakan perbedaan potensial di seluruh kristal. Oleh karena itu, jika gelombang ultrasound mengenai kristal, variasi tekanan dalam gelombang akan menimbulkan variasi tegangan di seluruh kristal. Oleh karena itu, transduser ultrasound dapat juga digunakan sebagai detektor (atau penerima).

Diagram sederhana dari transduser/penerima piezo-listrik ditunjukkan pada [Gambar 10.4](#).

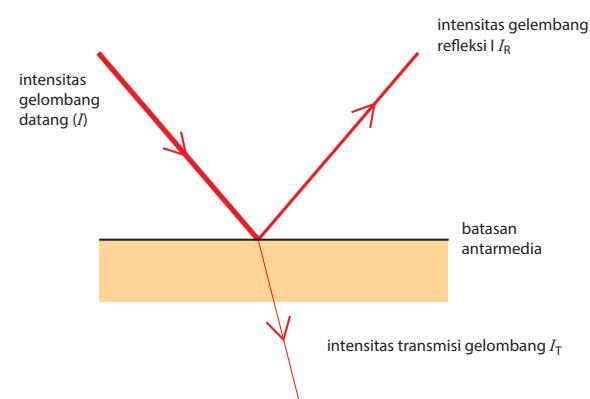


▲ **Gambar 10.4** Transduser/penerima piezo-listrik

Transduser seperti ini mampu menghasilkan dan mendeteksi ultrasound dalam rentang frekuensi megahertz, yang merupakan tipikal rentang frekuensi yang digunakan dalam medis.

Refleksi dan penyerapan ultrasound

Ultrasonik adalah tipikal dari banyak jenis gelombang, ketika itu terjadi pada batas antara dua media, sebagian besar dari kekuatan gelombang dipantulkan dan sebagian ditransmisikan. Hal ini diilustrasikan pada [Gambar 10.5](#).



▲ **Gambar 10.5** Refleksi dan Transmisi Gelombang pada suatu batasan

Untuk intensitas gelombang datang I , intensitas pantulan I_R dan intensitas yang ditransmisikan I_T , dengan mempertimbangkan kekekalan energi, maka

$$I = I_R + I_T$$

Meskipun, untuk sinar dengan intensitas konstan, jumlah dari intensitas yang dipantulkan dan ditransmisikan adalah konstan, besaran relatifnya tidak hanya bergantung pada sudut datang berkas pada batas tetapi juga pada media itu sendiri. Besaran relatif I_R dan I_T dihitung dengan mengacu pada [impedansi akustik spesifik Z](#) dari masing-

masing media. Ini didefinisikan sebagai produk kerapatan medium dan kecepatan c gelombang dalam medium. Itu adalah,

$$Z = \rho c$$

Untuk kejadian gelombang yang biasanya pada batas antara dua media yang memiliki impedansi akustik spesifik Z_1 dan Z_2 , rasio intensitas intensitas I_R dengan intensitas yang diberikan oleh I_0 dinyatakan dalam



$$\frac{I_R}{I_0} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

Rasio I_R/I_0 dikenal sebagai **koefisien refleksi intensitas** untuk batas dan diberi simbol α . Seperti yang ditunjukkan persamaan di atas, α tergantung pada perbedaan antara impedansi akustik spesifik dari dua media. Dengan demikian, koefisien refleksi intensitas dapat memberikan informasi tentang sifat dua media yang membentuk batas. Beberapa nilai khas dari impedansi akustik spesifik diberikan pada **Tabel 10.1**, bersama dengan perkiraan kecepatan ultrasound dalam medium.

medium	laju/ m s^{-1}	Impedansi Akustik Spesifik/ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
udara	330	430
darah	1600	$1,6 \times 10^6$
tulang	4100	$5,6 \times 10^6 - 7,8 \times 10^6$
gemuk	1500	$1,4 \times 10^6$
otot	1600	$1,7 \times 10^6$
Jaringan lunak	1600	$1,6 \times 10^6$
air	1500	$1,5 \times 10^6$

▲ **Tabel 10.1** Nilai kecepatan ultrasound dan impedansi akustik spesifik untuk beberapa media

► CONTOH SOAL 10A

Dengan menggunakan data dari Tabel 24.1, hitung koefisien refleksi intensitas untuk berkas paralel dari insiden ultrasound secara normal pada batas antara:

- a** udara dan jaringan lunak(soft tissue)
- b** otot dan tulang yang memiliki impedansi akustik spesifik $6,5 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Jawaban

$$\begin{aligned}\mathbf{a} \quad \alpha &= (Z_2 - Z_1)^2 / (Z_2 + Z_1)^2 \\ &= (1.6 \times 10^6 - 430)^2 / (1.6 \times 10^6 + 430)^2 \\ &= \mathbf{0.999} \\ \mathbf{b} \quad \alpha &= (6.5 \times 10^6 - 1.7 \times 10^6)^2 / (6.5 \times 10^6 + 1.7 \times 10^6)^2 \\ &= \mathbf{0.34}\end{aligned}$$

Soal Latihan

- 1** Dengan menggunakan data pada Tabel 24.1:

- a** Jelaskan mengapa, meskipun kecepatan ultrasound dalam darah dan otot kira-kira sama, impedansi akustik spesifiknya berbeda
- b** hitung koefisien refleksi intensitas untuk sinar paralel dari insiden ultrasound secara normal pada batas antara lemak dan otot.

Dapat dilihat bahwa koefisien refleksi intensitas untuk batas antara udara dan jaringan lunak kira-kira sama dengan satu. Ini berarti bahwa, ketika ultrasound menghampiri/mendatangi tubuh, sangat sedikit yang ditransmisikan ke dalam tubuh. Agar ultrasound dapat ditransmisikan ke dalam tubuh dan juga agar ultrasound dapat kembali ke transduser, penting agar tidak ada udara antara transduser dan kulit (jaringan lunak). Hal ini dicapai dengan cara jeli berbasis air. Jeli ini memiliki impedansi akustik spesifik sekitar $1,5 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ yang sangat mirip dengan impedansi akustik spesifik kulit. Jadi ada sedikit pantulan sinar ultrasound saat memasuki tubuh.



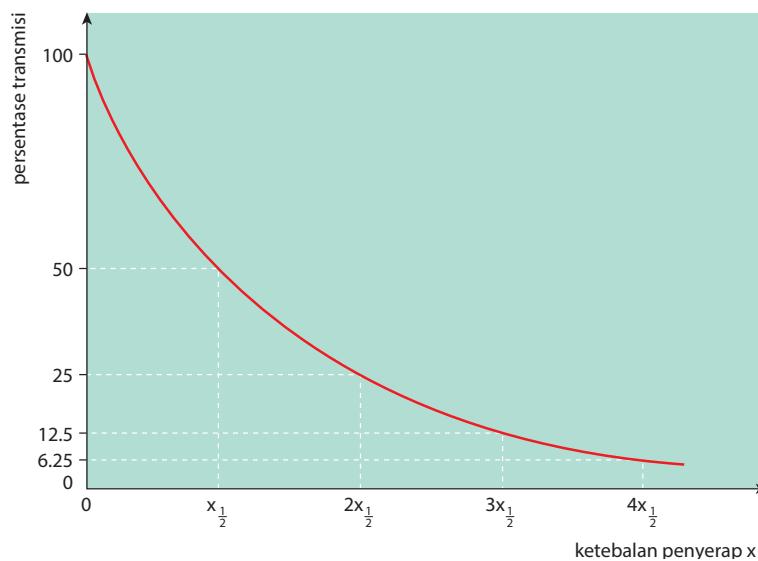
Redaman ultrasound

Begitu gelombang ultrasound berada di dalam medium, intensitas gelombang akan dikurangi (dilemahkan) oleh penyerapan energi saat melewati medium. Media dipanaskan. Faktanya, efek pemanasan yang dihasilkan oleh ultrasound dengan frekuensi yang sesuai digunakan dalam fisioterapi untuk membantu pemulihan dari keseleo dan cedera serupa.



Deskripsi matematis pengurangan intensitas

Untuk sinar ultrasonik paralel, pengurangan intensitas kira-kira eksponensial dan ditunjukkan pada Gambar 24.6 (di atas). Persentase transmisi berkurang dengan fraksi yang sama pada ketebalan penyerap yang sama. Sebuah redaman eksponensial serupa diamati ketika sinar paralel radiasi sinar-X melewati media (lihat [Topik 24.2](#)).



▲ **Gambar 10.6** Persentase transmisi ultrasound dalam suatu medium

Untuk berkas insiden ultrasound seperti itu biasanya pada media dengan ketebalan x , intensitas yang ditransmisikan I terkait dengan intensitas insiden I_0 dengan persamaan

$$I = I_0 e^{-\mu x} \text{ or } I = I_0 \exp(-\mu x)$$

di mana a adalah konstanta untuk medium yang dikenal sebagai **koefisien absorpsi linier (atau atenuasi)**. Koefisien tidak hanya bergantung pada medium itu sendiri tetapi juga pada frekuensi ultrasound. Beberapa nilai khas dari koefisien penyerapan linier (atenuasi) ditunjukkan pada

Tabel 10.2. Satuan adalah mm^{-1} atau cm^{-1} . Jika satuan x diberikan dalam cm, maka satuan harus diberikan dalam cm^{-1} .

Media	Koefesien Penyerapan linear (<i>attenuation</i>) / cm^{-1}
Udara	1.2
Tulang	0.13
Otot	0.23
Air	0.0002

▲ **Tabel 10.2** Beberapa nilai koefisien absorpsi linier (atenuasi) untuk ultrasound

Perhatikan bahwa persamaan untuk perubahan intensitas yang ditransmisikan hanya berlaku untuk sinar paralel. Jika berkas divergen, maka intensitasnya akan berkurang tanpa adanya penyerapan oleh medium.

► CONTOH SOAL 10B

Seberkas sinar ultrasonografi paralel mengenai permukaan otot dan melewati ketebalan otot 3,5 cm. Ini kemudian dipantulkan di permukaan tulang dan kembali melalui otot ke permukaannya. Dengan menggunakan data dari **Tabel 10.1** dan **10.2**, hitung fraksi intensitas insiden yang tiba kembali di permukaan otot.

Jawaban

Balok melewati ketebalan total otot 7,0 cm. Untuk atenuasi pada otot,

$$I = I_0 \exp(-0,23 \times 7,0) = 0.20I_0$$

Fraksi tercermin pada antarmuka otot-tulang

$$= (6,5 \times 10^6 - 1,7 \times 10^6)^2 / (6,5 \times 10^6 + 1,7 \times 10^6)^2$$

$$= 0,34$$

Fraksi diterima kembali di permukaan

$$= 0,20 \times 0,34 = \mathbf{0,068}$$

Soal Latihan

- 2 Sinar paralel ultrasound melewati ketebalan otot 4,0 cm. Kemudian terjadi secara normal pada tulang yang memiliki impedansi akustik spesifik $6,4 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Tulangnya setebal 1,5 cm. Dengan menggunakan data dari [Tabel 10.1](#) dan [10.2](#), hitung fraksi intensitas insiden yang ditransmisikan melalui otot dan tulang.

Memperoleh informasi diagnostik menggunakan *ultrasound*

Transduser ultrasound ditempatkan pada kulit, dengan jeli berbahan dasar air yang mengeluarkan udara antara transduser dan kulit ([Gambar 10.7](#)).



▲ **Gambar 10.7** Diagnosis USG

Pulsa pendek ultrasound ditransmisikan ke dalam tubuh di mana sebagian dipantulkan dan sebagian ditransmisikan pada batas antara media dalam tubuh seperti lemak-otot dan otot-tulang. Pulsa yang dipantulkan kembali ke transduser di mana mereka terdeteksi dan diubah menjadi pulsa tegangan. Pulsa tegangan ini dapat diperkuat dan diproses oleh rangkaian elektronik sehingga keluaran rangkaian dapat ditampilkan pada layar seperti pada, misalnya, osiloskop sinar katoda.

Pulsa ultrasound diperlukan agar pulsa ultrasound yang dipantulkan dapat dideteksi dalam interval waktu antara pulsa yang ditransmisikan. Waktu antara transmisi pulsa dan penerimanya kembali di transduser memberikan informasi tentang jarak batas dari transduser. Intensitas pulsa yang dipantulkan kembali memberikan informasi tentang sifat batas. Dua teknik yang umum digunakan untuk tampilan pemindaian ultrasound.

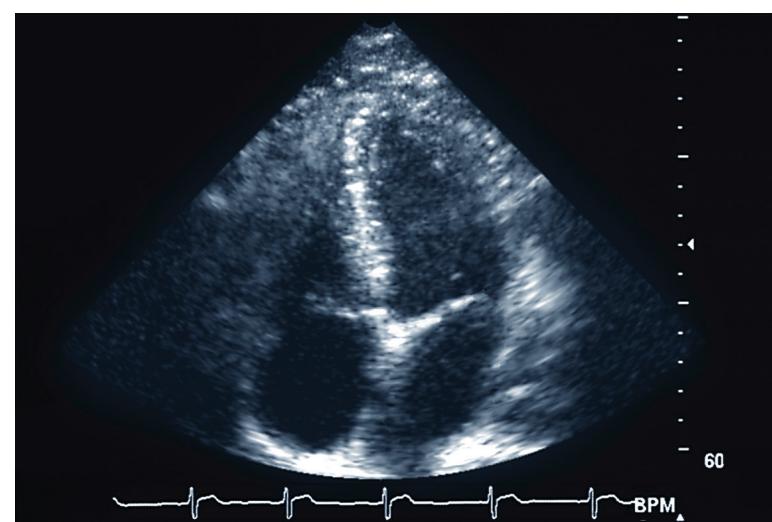
Pada **A-scan**, denyut pendek ultrasound ditransmisikan ke dalam tubuh melalui media penghubung (jeli berbahan dasar air). Pada setiap batas antara media, sebagian energi pulsa dipantulkan dan sebagian ditransmisikan. Transduser mendeteksi pulsa yang dipantulkan karena sekarang bertindak sebagai penerima. Sinyal diperkuat dan ditampilkan pada osiloskop sinar katoda (CRO). Pulsa yang dipantulkan (gema) yang diterima di transduser dari bagian tubuh yang lebih dalam cenderung memiliki intensitas yang lebih rendah daripada yang dipantulkan dari batas dekat kulit. Hal ini disebabkan tidak hanya

oleh penyerapan energi gelombang di berbagai media tetapi juga, pada kembalinya pulsa yang dipantulkan ke transduser, sebagian energi dari pulsa akan dipantulkan kembali pada batas-batas intervensi. Untuk memungkinkan hal ini, gema yang diterima kemudian di transduser diperkuat lebih dari yang diterima sebelumnya. Garis vertikal diamati pada layar CRO yang sesuai dengan deteksi setiap pulsa yang dipantulkan. Basis waktu CRO dikalibrasi sehingga, dengan mengetahui kecepatan gelombang ultrasound di setiap media, jarak antar batas dapat ditentukan. Contoh A-scan diilustrasikan pada [Gambar 10.8](#).



▲ [Gambar 10.8](#) Sebuah A-scan

B-scan terdiri dari serangkaian *A-scan*, semuanya diambil dari sudut yang berbeda sehingga, pada layar CRO, terbentuk gambar dua dimensi. Gambar seperti itu ditunjukkan pada [Gambar 10.9](#).



▲ [Gambar 10.9](#) Gambar jantung sehat yang dihasilkan dari B-scan

Probe ultrasound untuk B-scan tidak terdiri dari satu kristal. Sebaliknya, ia memiliki susunan kristal kecil, masing-masing pada sudut yang sedikit berbeda dari tetangganya. Sinyal terpisah yang diterima dari masing-masing kristal dalam probe diproses. Setiap pulsa yang dipantulkan ditampilkan pada layar CRO sebagai titik terang dalam arah orientasi kristal tertentu yang memunculkan sinyal. Pola bintik-bintik terbentuk untuk membentuk gambar dua dimensi yang mewakili posisi batas-batas di dalam tubuh. Gambar dapat dilihat langsung atau difoto atau disimpan dalam memori komputer.

Keuntungan utama pemindaian ultrasound dibandingkan dengan pencitraan sinar-X adalah risiko kesehatan bagi pasien dan operator sangat jauh lebih sedikit. Selain itu, peralatan ultrasound jauh lebih portabel dan relatif mudah digunakan.

Ultrasonografi frekuensi tinggi memungkinkan resolusi yang lebih besar untuk diperoleh karena panjang gelombang akan lebih pendek dan akan ada lebih sedikit difraksi di sekitar fitur kecil. Artinya, lebih detail bisa dilihat. Selain itu, karena teknik modern memungkinkan pendeksi pulsa pantul dengan intensitas sangat rendah, batas antar jaringan di mana terdapat sedikit perubahan pada impedansi akustik tertentu dapat dideteksi.

10.2 Produksi dan penggunaan sinar-X



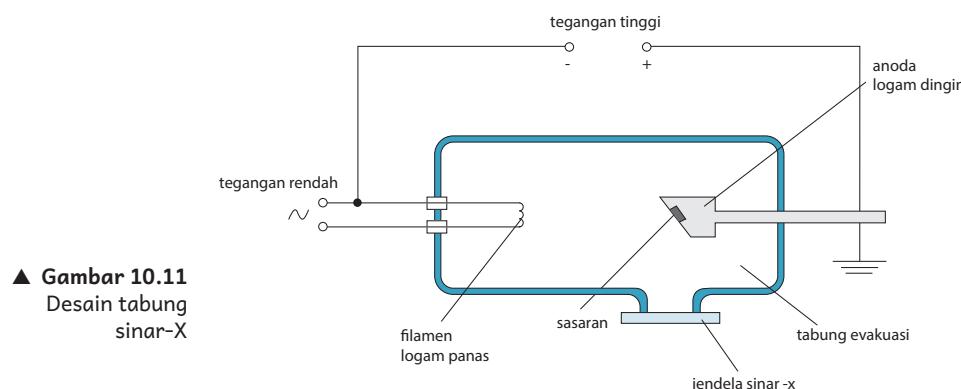
▲ Gambar 10.10 Mesin sinar-X modern

Setiap kali partikel bermuatan dipercepat, maka radiasi elektromagnetik dipancarkan. Radiasi ini dikenal sebagai radiasi Bremsstrahlung atau radiasi ‘pengereman’ (memperlambat). Frekuensi radiasi tergantung pada besarnya percepatan. Semakin besar percepatan (atau

perlambatan), semakin besar frekuensi foton yang dipancarkan.

Foton sinar-X dapat dihasilkan dengan membombardir target logam dengan elektron berkecepatan tinggi. Elektron pertama-tama dipercepat melalui beda potensial ribuan volt sehingga memiliki energi dan kecepatan tinggi. Percepatan ini, bagaimanapun, tidak cukup untuk radiasi sinar-X yang akan dipancarkan. Elektron berkecepatan tinggi menabrak target logam, yang menyebabkan elektron berubah arah dan kehilangan energi kinetik dengan sangat cepat. Deselerasi besar terlibat yang menimbulkan emisi foton sinar-X. Harus diingat bahwa tidak semua energi elektron dipancarkan sebagai foton sinar-X. Mayoritas ditransfer ke energi panas dalam logam target.

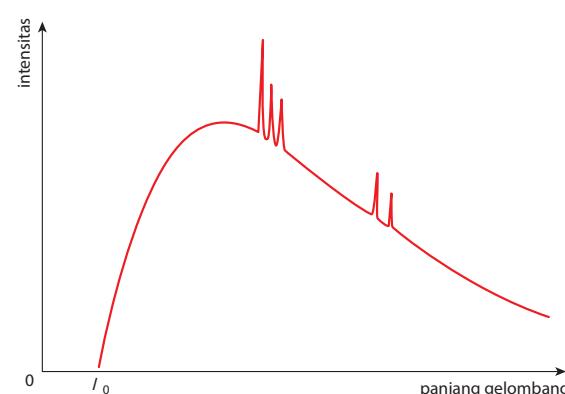
Desain tabung sinar-X yang disederhanakan ditunjukkan pada [Gambar 10.11](#).



▲ **Gambar 10.11**
Desain tabung sinar-X

Memvariasikan panjang gelombang sinar-X yang dihasilkan

Spektrum sinar-X khas yang menunjukkan variasi dengan panjang gelombang intensitas berkas sinar-X ditunjukkan pada [Gambar 10.12](#).



▲ **Gambar 10.12** Khas spektrum sinar-X

Spektrum memiliki dua komponen yang berbeda. Pertama, ada distribusi panjang gelombang yang kontinu dengan cut-off yang tajam pada panjang gelombang terpendek λ_0 . Kedua, puncak tajam dapat diamati. Puncak tajam ini sesuai dengan spektrum garis emisi dari logam target dan, oleh karena itu, merupakan karakteristik dari target. (lihat [Topik 22.4](#)).

Distribusi kontinu terjadi karena elektron, ketika mengenai target logam, tidak semuanya memiliki perlambatan yang sama tetapi akan memiliki rentang nilai yang luas. Karena panjang gelombang radiasi yang dipancarkan tergantung pada perlambatan, akan ada distribusi panjang gelombang. Panjang gelombang cut-off sesuai dengan elektron yang berhenti dalam satu tumbukan di target sehingga semua energi kinetiknya diberikan sebagai satu foton sinar-X.

Energi kinetik E_k elektron sama dengan energi yang diperoleh elektron ketika dipercepat dari katoda ke anoda.

$$E_k = eV$$

di mana e adalah muatan elektron dan V adalah beda potensial yang dipercepat.

Energi E dari foton dengan panjang gelombang diberikan oleh (lihat [Topik 22.1](#))

$$E = hc/\lambda$$

di mana h adalah konstanta Planck. Jadi, pada panjang gelombang cut-off (minimum) λ_0 ,

$$eV = hc/\lambda_0$$

sehingga

$$\lambda_0 = \frac{hc}{eV}$$

Potensi percepatan V dengan demikian menentukan panjang gelombang cut-off λ_0 . Semakin besar beda potensial, semakin pendek panjang gelombangnya. Oleh karena itu, kekerasan (kemampuan penetrasi) berkas sinar-X dikendalikan oleh variasi perbedaan potensial percepatan antara katoda dan anoda.

Distribusi panjang gelombang yang terus menerus menyiratkan bahwa akan ada foton sinar-X dengan panjang gelombang panjang yang tidak akan menembus orang yang sedang diselidiki dan karenanya tidak akan

berkontribusi terhadap gambar sinar-X. Foton dengan panjang gelombang panjang seperti itu akan menambah dosis radiasi yang diterima oleh orang tersebut tanpa memiliki tujuan yang berguna. Untuk alasan ini, berkas sinar-X yang muncul dari tabung sinar-X sering melewati filter aluminium yang menyerap foton dengan panjang gelombang panjang ini.

CONTOH SOAL 10C

Beda potensial percepatan antara katoda dan anoda tabung sinar-X adalah 30 kV. Mengingat bahwa konstanta Planck adalah $6,63 \times 10^{-34}$ J s, muatan elektron adalah $1,60 \times 10^{-19}$ C dan laju cahaya di ruang bebas adalah $3,00 \times 10^8$ m s⁻¹, hitung panjang gelombang minimum foton dalam berkas sinar-X.

Jawaban

Untuk panjang gelombang minimum,
energi yang diperoleh elektron = energi foton

$$eV = hc/\lambda_0$$

$$1,60 \times 10^{-19} \times 30 \times 10^3 = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8)}{\lambda_0}$$

$$\lambda_0 = 4.14 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Soal Latihan

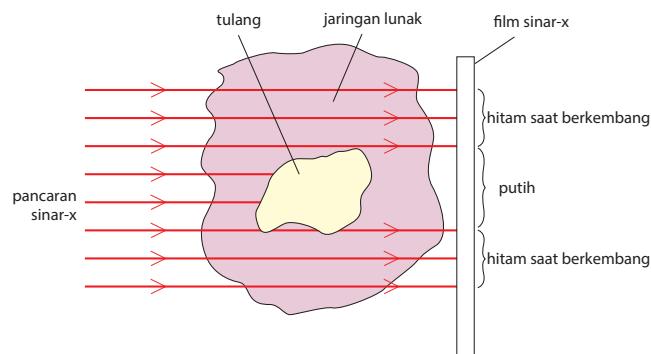
- 3 Hitung panjang gelombang minimum foton yang dihasilkan dalam tabung sinar-X untuk beda potensial yang dipercepat sebesar 75 kV

Gambar sinar-X

Gambar sinar-X ditunjukkan pada Gambar 24.13. Ini sebenarnya bukan gambar dalam arti gambar nyata yang dihasilkan oleh lensa. Sebaliknya, gambar itu seperti bayangan, seperti yang dilustrasikan pada Gambar 10.14.



▲ **Gambar 10.13** Gambar sinar-X menunjukkan tulang selangka yang retak



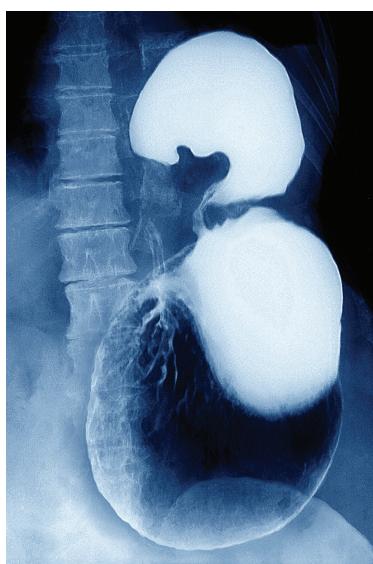
▲ Gambar 10.14 Bagaimana gambar sinar-X dihasilkan

Sinar X-ray mengenai bagian tubuh pasien. Sinar X-ray dapat menembus jaringan lunak (kulit, lemak, otot, dll.) dengan sedikit kehilangan intensitas dan film fotografi, setelah pengembangan, akan menunjukkan area gelap yang sesuai dengan jaringan lunak ini. Tulang, bagaimanapun, menyebabkan redaman yang lebih besar (mengurangi intensitas dengan tingkat yang lebih besar) daripada jaringan lunak dan, oleh karena itu, film fotografi akan berwarna lebih terang di area yang sesuai dengan posisi tulang. Apa yang dihasilkan pada film adalah bayangan dua dimensi dari tulang dan jaringan di sekitarnya.

Kualitas bayangan bayangan yang dihasilkan tergantung pada kontrasnya. Gambar bayangan di mana tulang dan organ lainnya digariskan dengan jelas dikatakan sebagai ‘gambar tajam’. Meskipun gambar mungkin tajam, mungkin masih tidak terlihat jelas karena ada sedikit perbedaan dalam tingkat kehitaman antara, katakanlah, tulang dan jaringan di sekitarnya. Gambar sinar-X yang memiliki rentang derajat kehitaman yang lebar di berbagai daerah dikatakan memiliki kontras yang baik.

Kontras yang baik dicapai ketika organ dan jaringan tubuh yang berdekatan menyerap foton sinar-X ke tingkat yang sangat berbeda (lihat Redaman sinar-X, di bawah). Ini biasanya terjadi pada tulang dan otot. Namun, ini bukan kasus di mana, misalnya, perut harus diselidiki. Pasien kemudian diminta untuk menelan larutan barium sulfat – ‘makanan barium’ ([Gambar 10.15](#)).

Barium adalah penyerap foton sinar-X yang baik. Akibatnya, ketika larutan barium sulfat melapisi bagian dalam lambung, garis luar lambung akan terlihat jelas pada gambar. Demikian pula, pembuluh darah dapat



▲ Gambar 10.15 X-ray perut setelah makan barium

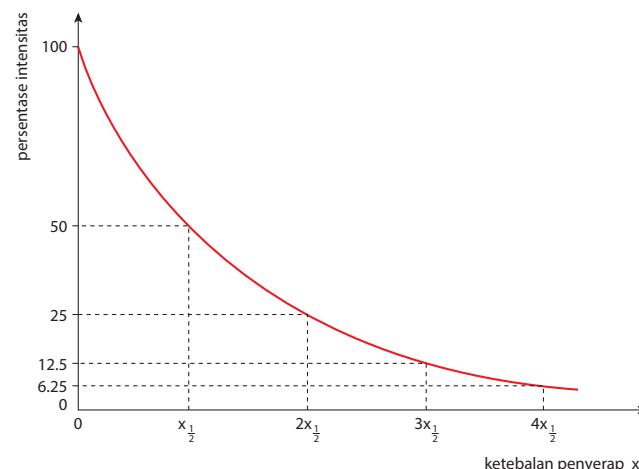
dibuat terlihat dengan menyuntikkan pewarna radio-opak ke dalam aliran darah.

Kontras juga tergantung pada faktor lain, seperti waktu pemaparan. Kontras dapat ditingkatkan dengan mendukung film sinar-X dengan bahan fluoresen.



Redaman sinar-X

Ketika seberkas foton sinar-X melewati suatu medium, terjadi proses absorpsi yang mengurangi intensitas berkas tersebut. Intensitas sinar sejajar berkurang dengan fraksi yang sama setiap kali sinar melewati ketebalan medium yang sama. Akibatnya, variasi persentase intensitas yang ditransmisikan dengan ketebalan penyerap dapat ditunjukkan seperti pada Gambar 24.16 (sebelah kiri).



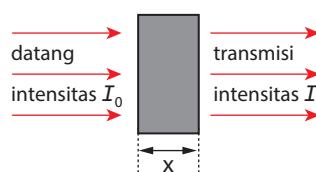
▲ Gambar 10.16 Persentase transmisi sinar-X dalam suatu medium

Dapat dilihat bahwa ketebalan medium yang sama selalu diperlukan untuk mengurangi intensitas pancaran sinar sebesar 50%, tidak peduli titik awal mana yang dipilih. Hal ini sesuai dengan waktu paruh peluruhan radioaktif yang konstan, dan disebabkan oleh sifat eksponensial peluruhan radioaktif dan redaman dengan jarak radiasi berkas paralel.

Penurunan intensitas sinar-X yang ditransmisikan merupakan penurunan eksponensial. Pertimbangkan balok paralel yang memiliki intensitas datang I_0 . Media (penyerap) memiliki ketebalan x dan intensitas yang ditransmisikan adalah I , seperti yang diilustrasikan pada Gambar 10.17.

Intensitas yang ditransmisikan diberikan oleh persamaan

$$I = I_0 e^{-\mu x} \text{ atau } I = I_0 \exp(-\mu x)$$



▲ Gambar 10.17 Penyerapan Sinar-X dalam suatu medium

dimana μ adalah konstanta yang bergantung pada medium dan energi foton sinar-X, yang dikenal sebagai **koefisien atenuasi linier** atau **koefisien absorpsi linier** medium. Satuan adalah mm^{-1} atau cm^{-1} .

Perkiraan nilai koefisien atenuasi linier (penyerapan) untuk beberapa zat diberikan dalam [Tabel 10.3](#).

Perhatikan bahwa persamaan $I = I_0 \exp(-\mu x)$ berlaku untuk balok paralel. Jika balok tidak sejajar, maka akan terjadi perubahan intensitas lebih lanjut tanpa adanya penyerapan. Misalnya, intensitas sinar divergen berkurang dengan jarak dari sumber.

substance	μ/cm^{-1}
tembaga	7
air	0.3
tulang	3
lemak	0.9

▲ **Tabel 10.3** Beberapa nilai perkiraan koefisien atenuasi linier (penyerapan)

► CONTOH SOAL 10D

Koefisien penyerapan linier tembaga adalah $0,693 \text{ mm}^{-1}$.

Hitunglah:

- a ketebalan tembaga yang dibutuhkan untuk mengurangi intensitas insiden sebesar 50%
- b fraksi intensitas datang dari sinar paralel yang ditransmisikan melalui pelat tembaga dengan ketebalan 1,2 cm.

Jawaban

a $I/I_0 = 0.50 = \exp(-0.693 \times x)$

$$\ln 0.50 = -0.693x$$

$$x = 1.0 \text{ mm}$$

b $I/I_0 = \exp(-0.7 \times 1.2)$

$$I/I_0 = 2.4 \times 10^{-4}$$

Soal Latihan

- 3 a** Pertanyaan Nyatakan apa yang dimaksud dengan kontras pada citra sinar-X.
- b** Jelaskan bagaimana kontras dalam gambar sinar-X dapat ditingkatkan.
- 4** Untuk satu energi tertentu foton sinar-X, air memiliki koefisien atenuasi (penyerapan) linier sebesar $0,29 \text{ cm}^{-1}$. Hitung kedalaman air yang diperlukan untuk mengurangi intensitas sinar paralel sinar-X ini menjadi $3,0 \times 10^{-3}$ intensitas datangnya.
- 5** Koefisien atenuasi linier (penyerapan) tulang dan jaringan lunak di sekitar tulang masing-masing adalah $2,9 \text{ cm}^{-1}$ dan $0,95 \text{ cm}^{-1}$. Seberkas sinar-X sejajar datang secara terpisah pada tulang dengan ketebalan $3,0 \text{ cm}$ dan pada jaringan lunak dengan ketebalan $5,0 \text{ cm}$. Hitung rasionya:

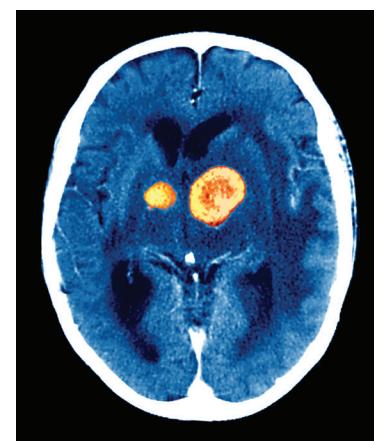
$$\frac{\text{intensitas yang ditransmisikan melalui tulang}}{\text{intensitas yang ditransmisikan melalui jaringan lunak}}$$

Computed tomography (pemindaian CT)

Gambar yang dihasilkan pada film sinar-X, sebagaimana diuraikan sebelumnya, adalah gambar ‘bayangan’ atau ‘datar’. Ada sedikit indikasi kedalaman(jika ada). Artinya, posisi suatu organ di dalam tubuh tidak terlihat jelas. Selain itu juga, jaringan lunak yang terletak di belakang struktur yang sangat padat tidak dapat dideteksi. Tomografi adalah teknik di mana gambar tiga dimensi atau ‘iris’ melalui tubuh dapat diperoleh. Gambar dihasilkan oleh **computed tomography** menggunakan apa yang dikenal sebagai CT scanner (**Gambar 10.18**). Contoh dari gambar tersebut ditunjukkan pada **Gambar 10.19**.

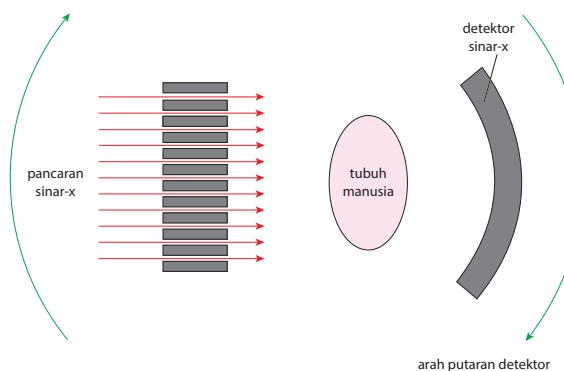
▲ **Gambar 10.18**
Ahli radiologi
memindahkan pasien
ke pemindai C





▲ **Gambar 10.19** Pindai melalui kepala pasien dengan limfoma serebral

Dalam teknik ini, serangkaian gambar sinar-X diperoleh. Setiap gambar diambil melalui bagian atau irisan tubuh yang sama dari sudut yang berbeda, seperti yang dilustrasikan pada **Gambar 10.20**.

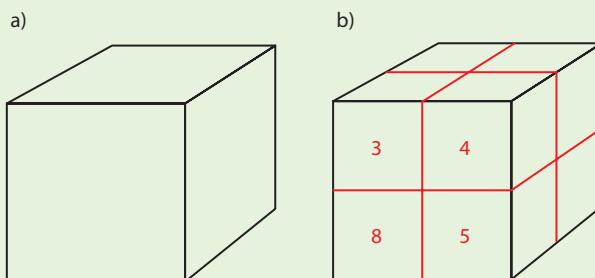


▲ **Gambar 10.20** Pengaturan untuk CT scan

Data untuk setiap gambar sinar-X individu dan sudut pandang dimasukkan ke komputer berdaya tinggi. Gambar dua dimensi dari irisan dihitung. Ini kemudian diulang untuk irisan berturut-turut. Komputer memungkinkan gambar setiap irisan digabungkan sehingga gambar tiga dimensi lengkap dari seluruh objek diperoleh, yang kemudian dapat dilihat dari sudut mana pun.

PENGAYAAN

Prinsip dasar CT scan dapat diilustrasikan menggunakan bentuk kubik sederhana seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10.21](#).

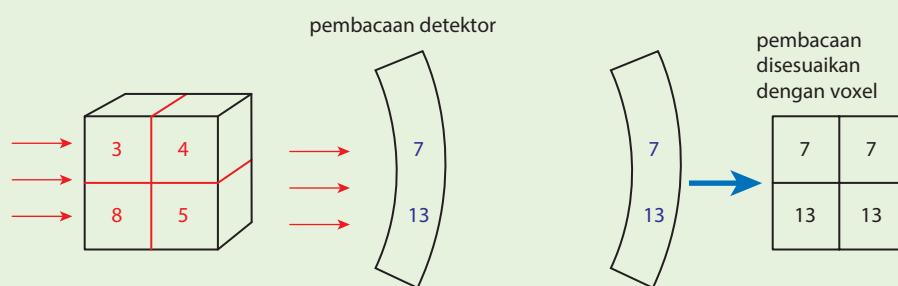


▲ [Gambar 10.21](#) Bagian pertama menunjukkan piksel

Tujuan CT scan adalah untuk menghasilkan gambar bagian melalui kubus dari pengukuran yang dilakukan terhadap sumbunya. Bagian, atau ‘iris’ melalui kubus dibagi menjadi serangkaian unit kecil, yang disebut voxel. Setiap voxel akan menyerap sinar X-ray pada tingkat yang berbeda. Intensitas yang ditransmisikan melalui setiap voxel saja dapat diberikan angka, yang disebut sebagai piksel. Berbagai piksel dibangun dari pengukuran intensitas sinar-X sepanjang arah yang berbeda melalui bagian atau irisan.

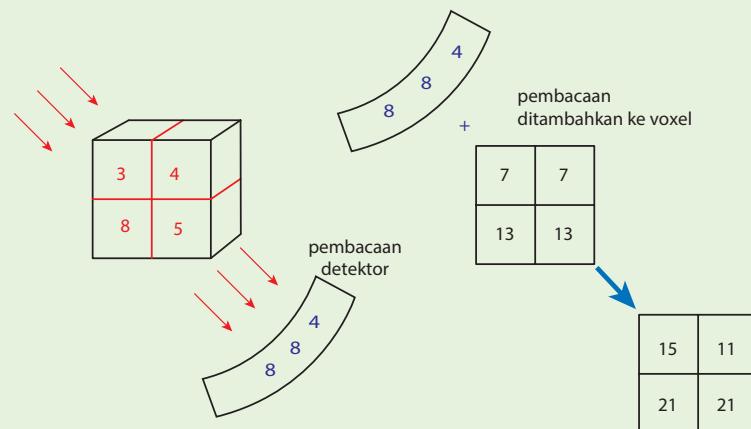
Misalkan kubus pada [Gambar 10.21a](#) dibagi menjadi delapan voxel. Kubus dapat dianggap terdiri dari dua irisan atau bagian. Untuk bagian pertama, biarkan piksel seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10.21b](#). Tujuan CT scan adalah untuk mereproduksi piksel-piksel ini pada posisi yang benar.

Ketika berkas sinar-X diarahkan pada bagian dari kiri, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10.22](#), detektor akan memberikan pembacaan 7 dan 13. Voxel akan diselesaikan sebagian seperti yang ditunjukkan.



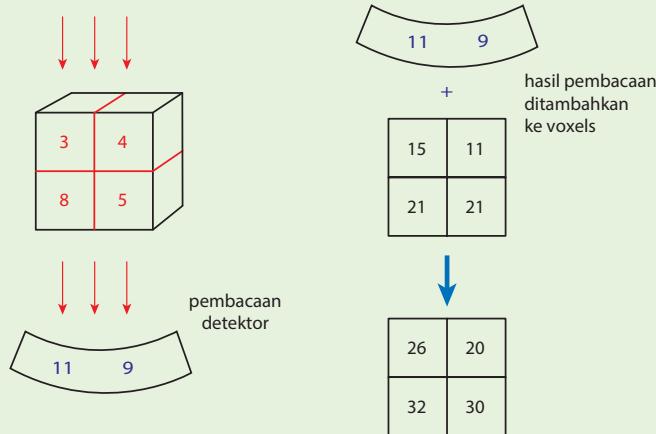
▲ [Gambar 10.22](#) Rangkaian pembacaan detektor pertama

Tabung sinar-X dan detektor sekarang diputar hingga 45°. Pembacaan detektor baru adalah 4, 8 dan 8. Pembacaan ini ditambahkan ke pembacaan yang sudah ada di voxel, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10.23](#).



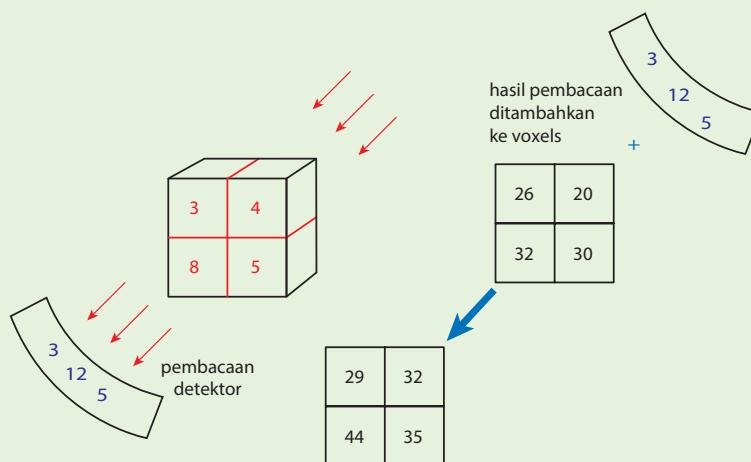
▲ Gambar 10.23 Rangkaian pembacaan detektor kedua

Setelah rotasi melalui 45° lebih lanjut, set ketiga pembacaan detektor diambil. Pembacaan ini ditambahkan ke pembacaan voxel. Hasilnya ditunjukkan pada [Gambar 10.24](#).



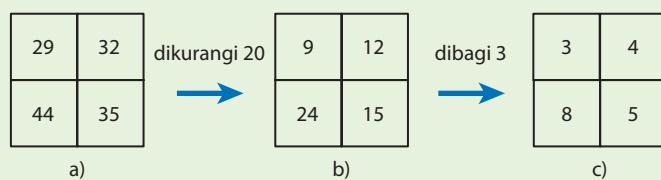
▲ Gambar 10.24 Rangkaian pembacaan detektor ketiga

Setelah rotasi melalui 45° lebih lanjut, satu set pembacaan terakhir diambil. Sekali lagi bacaan ditambahkan ke yang sudah ada di voxel, memberikan hasil yang ditunjukkan pada [Gambar 10.25](#) (sebelah kiri).



▲ Gambar 10.25 Rangkaian pembacaan detektor keempat

Pola piksel yang dihasilkan ditunjukkan pada Gambar 24.26a.



▲ **Gambar 10.26** Hasil akhir

Setelah menjumlahkan semua pengukuran, tetap mengurangi pengukuran ini dengan yang asli. Ini dicapai dalam dua tahap.

- 1** Intensitas latar belakang harus dihilangkan. Latar belakang ini sama dengan jumlah pembacaan detektor untuk setiap posisi. Dalam hal ini, jumlahnya adalah 20. Latar belakang ini dikurangkan dari setiap piksel, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 10.26b](#).
- 2** Kelonggaran sekarang harus dibuat untuk fakta bahwa lebih dari satu tampilan dibuat dari bagian tersebut. Dalam contoh ini, ada empat set pembacaan dan akibatnya setiap pembacaan piksel dibagi 3.

Hasil akhir ditunjukkan pada [Gambar 10.26c](#) – dan, perhatikan, ini sama dengan [Gambar 10.21b](#).

Setelah pola piksel untuk satu bagian diperoleh, pemindai CT dipindahkan relatif terhadap objek sehingga bagian tetangga berikutnya dianalisis. Prosedur ini diulang sampai seluruh objek yang akan dianalisis telah dipindai.

Analisis di atas adalah contoh yang sangat sederhana. Dalam praktiknya, citra setiap bagian dibangun dari sejumlah besar unit atau voxel. Semakin besar jumlah voxel, semakin baik definisinya. Ini mirip, pada prinsipnya, dengan kamera digital. Penggunaan sejumlah besar voxel menyiratkan bahwa pengukuran harus dilakukan dari sejumlah besar sudut yang berbeda. Penyimpanan data untuk setiap sudut dan konstruksinya menjadi gambar akhir di layar membutuhkan komputer yang kuat. Rekonstruksi intensitas di setiap voxel akan melibatkan lebih dari satu juta perhitungan terpisah. Semua data untuk semua bagian disimpan dalam memori komputer sehingga terbentuk gambar tiga dimensi dari keseluruhan objek. Hal ini memungkinkan bagian dari gambar untuk dilihat dari berbagai sudut. Terakhir, komputer memungkinkan kecerahan dan kontras gambar divariasikan sehingga gambar yang optimal dapat diperoleh.

CONTOH SOAL 10E

Bandingkan gambar yang dihasilkan selama penyelidikan sinar-X dan yang dihasilkan dalam pemindaian CT.

Jawaban

Gambar sinar-X adalah proyeksi dua dimensi ke layar datar dari objek tiga dimensi. CT scan adalah gambar tiga dimensi. Komputer tempat data untuk gambar disimpan memungkinkan bagian yang berbeda untuk dilihat dari sudut yang berbeda.

Soal Latihan

- 7 Prinsip-prinsip CT scan telah dipahami selama beberapa waktu. Namun, pemindai tidak dapat dikembangkan sampai komputer besar yang kuat tersedia. Dengan mengacu pada gambar yang dihasilkan dalam CT scan, sarankan mengapa komputer seperti itu diperlukan.
- 8 a Garis besar bagaimana gambar sinar-X digunakan untuk membangun gambar yang dihasilkan dalam CT scan.
b Jelaskan mengapa dosis radiasi yang diterima selama CT scan lebih besar daripada 'foto-grafik' sinar-X.

10.3 Pemindaian PET

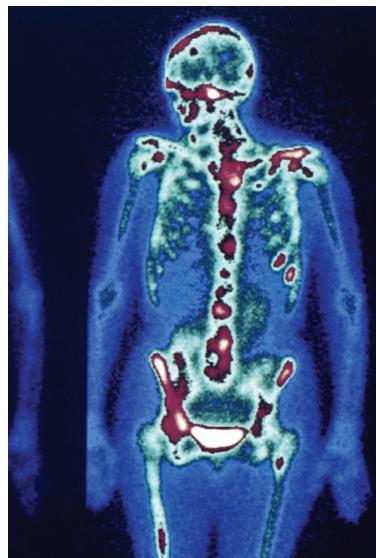
Pelacak radioaktif

Isotop adalah bentuk berbeda dari unsur yang sama yang memiliki jumlah neutron berbeda dalam intinya ([Topik 11.1](#)) tetapi memiliki sifat kimia yang sama. Beberapa isotop suatu unsur memiliki inti yang tidak stabil sehingga bersifat radioaktif yang berarti bahwa isotop tersebut mengeluarkan radiasi (partikel α , partikel dan/atau radiasi). Radiasi ini dapat dideteksi dan dengan demikian keberadaan bahan radioaktif dapat ditetapkan.

Jika suatu senyawa kimia memiliki satu atau lebih atomnya yang digantikan oleh atom radioaktif dari unsur yang sama maka, sebagai akibat peluruhan radioaktif dari atom-atom ini, lokasi senyawa dapat ditentukan atau

perkembangannya dalam jaringan hidup dapat diikuti. Senyawa tersebut dikenal sebagai pelacak.

Pelacak adalah senyawa kimia di mana satu atau lebih atomnya telah digantikan oleh inti radioaktif dari unsur yang sama yang kemudian dapat digunakan untuk mencari atau mengikuti perkembangan senyawa dalam jaringan hidup.



▲ **Gambar 10.27** Pemindaian gamma ini menggunakan pelacak technetium-99 untuk mendekati aktivitas abnormal dalam metabolisme tulang.

Pelacak yang digunakan dalam pencitraan medis biasanya dimasukkan ke dalam tubuh melalui suntikan atau ditelan. Mereka kemudian melakukan perjalanan dalam darah ke jaringan di mana senyawa pelacak diserap. Senyawa pelacak yang berbeda diserap dalam jumlah yang berbeda oleh jaringan yang berbeda tergantung pada proses biologis yang dilakukan, sehingga pilihan pelacak tergantung pada jaringan yang dipelajari.

Karena radiasi yang dipancarkan oleh pelacak harus dideteksi dari luar tubuh, umumnya hanya pemancar radiasi gamma yang dapat digunakan sebagai pelacak. Radiasi alfa dan beta jauh lebih sedikit menembus dan akan diserap oleh tubuh.

Keuntungan dari pelacak(detektor) adalah bahwa senyawa radioaktif berperilaku kimia dengan cara yang sama seperti senyawa tanpa pelacak sehingga proses biologis tidak terpengaruh.

Dalam banyak penggunaan pelacak pada pencitraan medis, pelacak memiliki waktu paruh hanya beberapa jam sehingga risiko paparan radiasi bagi pasien atau staf medis berkurang. Paparan radiasi merupakan kerugian dari penggunaan pelacak tetapi ini diimbangi dengan teknik diagnosis yang non-invasif dan tidak memerlukan pembedahan atau pengambilan biopsi (sampel jaringan).

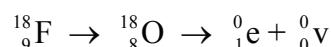
Pelacak yang umum digunakan adalah teknesium-99m. Isotop radioaktif ini memiliki waktu paruh 6 jam dan dapat dihasilkan di tempat yang akan digunakan. Technetium-99m digunakan untuk gambar kerangka dan organ termasuk otot jantung, otak dan kelenjar tiroid. Akumulasi teknesium-99m pada rangka ditunjukkan pada [Gambar 10.27](#).

Pelacak lain yang sering digunakan termasuk yodium-131 (untuk kondisi tiroid), besi-59 (untuk metabolisme limpa) dan kalium-42 (untuk komposisi darah).



Emisi dan pemusnahan positron

Tomografi emisi positron (PET) menggunakan pelacak radioaktif. Pelacak yang digunakan dalam pemindaian PET membusuk dengan emisi β^+ . Emisi **positron** selama peluruhan β^+ terjadi ketika proton di dalam inti diubah menjadi neutron (lihat [Topik 11.1](#)). Emisi juga mencakup neutrino elektron. Contoh peluruhan seperti itu adalah fluor-18:



Fluorin-18 sangat sering digunakan sebagai pelacak dalam pemindaian PET (lihat di bawah). Pemancar positron lainnya termasuk magnesium-23 dan natrium-23.

Dalam waktu yang sangat singkat dari positron yang dipancarkan, positron melambat dan bertabrakan dengan elektron. Elektron adalah antipartikel dari positron.

Pemusnahan terjadi ketika partikel berinteraksi dengan antipartikelnya. Massa kedua partikel diubah menjadi energi melalui hubungan massa-energi Einstein $E = \Delta mc^2$, di mana c adalah kecepatan cahaya (lihat [Topik 23.1](#)).

Ketika partikel dan antipartikel bertemu, mereka saling memusnahkan, melepaskan massa gabungan mereka sebagai energi dalam bentuk foton.

Selama proses pemusnahan, hukum konservasi diikuti. Yaitu

◊muatan: muatan positif dan muatan negatif pada partikel dan antipartikel adalah sama besar. Muatan keseluruhan tetap nol.

◊energi massa: ketika partikel dan antipartikel bertabrakan, karena massa dan energi setara, energi massa total sebelum pemusnahan harus sama dengan energi massa total setelah pemusnahan.

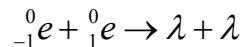
◊momentum: momentum kekal sehingga total momentum sebelum pemusnahan harus sama dengan total momentum setelah pemusnahan.

Pemusnahan menghasilkan energi dalam bentuk foton. Karena kita dapat mengasumsikan bahwa positron dan elektron bertabrakan dengan momentum awal yang dapat diabaikan, agar momentum tetap nol setelah pemusnahan, maka energi yang dihasilkan terlihat sebagai dua foton dengan energi yang sama yang bergerak dalam arah

yang berlawanan. Setiap foton memiliki momentum dan momentum total foton adalah nol.

Juga, karena kita dapat mengasumsikan bahwa positron dan elektron bertabrakan dengan energi kinetik awal yang dapat diabaikan, energi total dari dua foton yang dihasilkan harus sama dengan energi yang setara dengan kehilangan massa.

Pertimbangkan pemusnahan pasangan elektron-positron:



Setiap partikel memiliki massa m sebesar $9,11 \times 10^{-31}$ kg.

Energi foton total diberikan oleh $E = \Delta mc^2$, di mana c adalah kecepatan cahaya.

$$\begin{aligned} E &= 2 \times (9,11 \times 10^{-31}) \times (3,00 \times 10^8)^2 \\ &= 1,64 \times 10^{-13} \text{ J} \end{aligned}$$

Karena $1 \text{ MeV} = 1,60 \times 10^{-13} \text{ J}$, maka

$$E = (1,64 \times 10^{-13}) / (1,60 \times 10^{-13}) = 1,02 \text{ MeV}$$

Energi setiap foton yang dipancarkan sebagai hasil dari pemusnahan dengan demikian adalah 0,512 MeV.

Frekuensi setiap foton ditemukan dari $E = hf$:

$$f = E / h = \frac{1}{2} \times 1,64 \times 10^{-34} = 1,24 \times 10^{20} \text{ Hz}$$

Frekuensi ini berada dalam kisaran sinar gamma dari spektrum elektromagnetik.

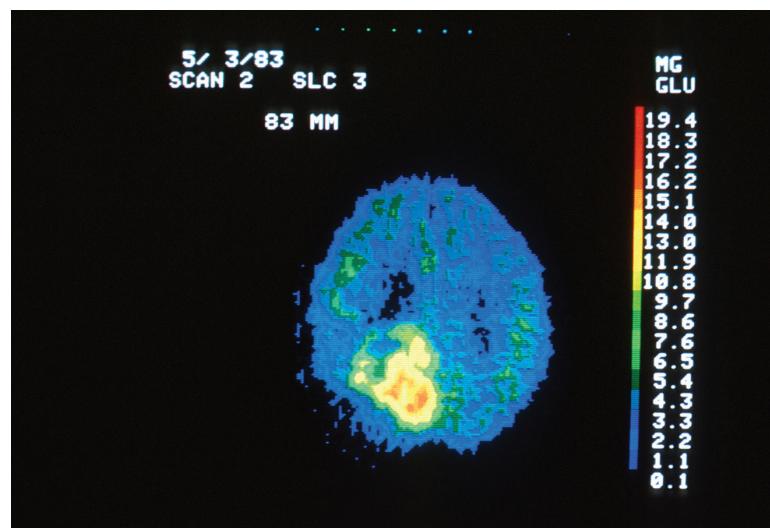
Pemindai PET

Pemindai PET digunakan dalam pencitraan medis dan diagnosis untuk menentukan seberapa baik fungsi tubuh tertentu beroperasi dan untuk mengidentifikasi kelainan.

Pelacak yang umum digunakan dalam pemindaian PET adalah fluorodeoxyglucose (FDG) yang diberi label dengan fluor radioaktif. Fluor ini adalah pemancar positron (lihat di atas) dan memiliki waktu paruh 118 menit. FDG adalah gula alami yang tidak mengganggu fungsi tubuh. Dengan menggunakan pelacak radioaktif, dimungkinkan untuk menganalisis di mana FDG menumpuk, atau tidak. Misalnya, jaringan kanker cenderung menumpuk gula lebih banyak daripada jaringan sehat.

Untuk pemindaian PET, pasien dikelilingi oleh cincin detektor sinar-. Ketika positron musnah, dua foton sinar-γ dipancarkan, memiliki energi yang sama tetapi dalam arah

yang berlawanan. Energi foton cukup bagi mereka untuk meninggalkan tubuh dan dideteksi. Jika dua detektor, pada sisi pasien yang berlawanan, mendeteksi foton sinar- γ secara bersamaan, maka diketahui bahwa pemusnahan positron terjadi sepanjang garis lurus yang menghubungkan kedua detektor. Arah garis ini disimpan di komputer. Satu set data untuk pemindaian PET terdiri dari jutaan garis yang dapat diproses oleh komputer untuk memberikan gambar organ atau jaringan tempat pelacak terakumulasi. Sebuah gambar PET scan ditunjukkan pada Gambar 10.28.



▲ Gambar 10.28 PET scan pasien dengan tumor otak (area putih terang di tengah scan)

Soal Latihan

- 9 Selama peluruhan radioaktif inti, massa $1,5 \times 10^{-3}$ u diubah menjadi energi foton sinar- γ . Hitung energi ini, dalam MeV.

RANGKUMAN

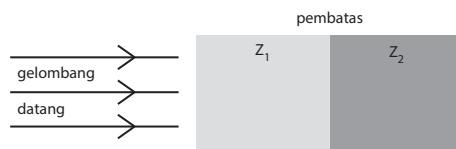
- ❖ Ultrasound dapat dihasilkan dan dideteksi oleh kristal piezo-elektrik.
- ❖ Gambar ultrasound terbentuk sebagai hasil dari deteksi dan pemrosesan pulsa ultrasound yang telah dipantulkan dari batas jaringan.
- ❖ Impedansi akustik Z dari suatu medium adalah ρc .
- ❖ Koefisien pantul intensitas pada batas antara dua media adalah $I_R/I_0 = (Z_2 - Z_1)^2/(Z_2 + Z_1)^2$.

- ❖ Redaman sinar paralel ultrasound diberikan oleh $I = I_0 e^{-\mu x}$.
- ❖ Pemindaian US dua dimensi dapat diperoleh dengan menggunakan generator/detektor yang terdiri dari banyak kristal terpisah, semuanya pada sudut orientasi yang berbeda.
- ❖ Sinar-X dihasilkan ketika elektron berkecepatan tinggi dihentikan oleh target logam.

- ❖ Panjang gelombang minimum sinar-X yang dihasilkan bergantung pada percepatan p.d.
- ❖ Gambar sinar-X adalah <bayangan> struktur di mana berkas sinar-X dilemahkan.
- ❖ Kontras dalam gambar sinar-X tergantung pada jaringan tetangga yang memiliki koefisien penyerapan yang sangat berbeda.
- ❖ Redaman dalam intensitas berkas sinar-X paralel diberikan oleh $I = I_0 e^{-\mu x}$.
- ❖ Computed tomography (CT scan) memungkinkan gambar bagian tubuh diperoleh dengan menggabungkan banyak gambar sinar-X, masing-masing diambil dari sudut yang berbeda.
- ❖ Pelacak adalah senyawa yang salah satu atomnya telah digantikan oleh isotop radioaktif dari unsur yang sama.
- ❖ Lokasi atau kemajuan pelacak dalam jaringan hidup dapat diikuti tanpa mempengaruhi fungsi jaringan.
- ❖ Pelacak yang digunakan dalam pemindaian PET adalah pemancar positron.
- ❖ Sebuah positron, massa saya dan muatan $+q$, adalah antipartikel elektron.
- ❖ Pemusnahan terjadi ketika partikel dan antipartikel berinteraksi.
- ❖ Pemusnahan pasangan elektron-positron menghasilkan dua foton sinar- γ yang memiliki energi yang sama dan bergerak ke arah yang berlawanan.
- ❖ Gambar pemindaian PET dibuat dengan memproses arah pergerakan sejumlah besar pasangan foton sinar- γ yang terdeteksi secara bersamaan yang dihasilkan dari pemusnahan elektron-positron.

ASESMEN FORMATIF

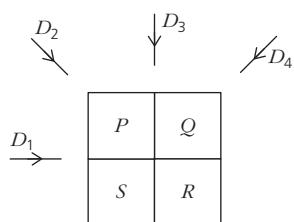
- 1** Jelaskan mengapa, saat melakukan pemindaian ultrasound:
 - a** USG berdenyut dan tidak terus menerus,
 - b** sinyal yang dipantulkan yang diterima dari bagian tubuh yang lebih dalam diperkuat lebih dari yang diterima dari dekat kulit.
- 2** Impedansi akustik spesifik lemak, otot dan tulang adalah $1,4 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $1,6 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dan $6,5 \times 10^6 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Koefisien absorpsi linier dalam lemak dan otot masing-masing adalah $0,24 \text{ cm}^{-1}$ dan $0,23 \text{ cm}^{-1}$.
Sebuah sinar paralel dari ultrasound intensitas I datang pada lapisan lemak. Diskusikan secara kuantitatif, dalam hal I , pemantulan dan transmisi berkas ultrasound saat melewati lapisan lemak dengan ketebalan 4,0 mm, ke dalam otot dengan ketebalan 43,5 mm dan akhirnya ke dalam tulang.
- 3**
 - a** Dengan mengacu pada gelombang ultrasound, nyatakan apa yang dimaksud dengan impedansi akustik.
 - b** Gelombang ultrasound datang pada batas antara dua media. Impedansi akustik dari dua media adalah Z_1 dan Z_2 , seperti yang diilustrasikan pada Gambar 10.29.



▲ Gambar 10.29

Jelaskan pentingnya perbedaan antara Z_1 dan Z_2 untuk transmisi ultrasound melintasi batas.

- 4 Selama pemindaian PET, pemusnahan positron dan elektron terjadi. Sarankan mengapa pemusnahan:
 - a terjadi dekat dengan titik di mana positron dibuat,
 - b menghasilkan dua foton sinar gamma dengan energi yang sama bergerak dalam arah yang berlawanan.
- 5 a Uraikan secara singkat prinsip-prinsip CT scan. [5]
 - b Dalam model untuk CT scan, bagian dibagi menjadi empat voxel. Nomor piksel P, Q, R, dan S dari voxel ditunjukkan pada Gambar. 10.30.



▲ Gambar 10.30

Bagian tersebut dilihat dari empat arah D_1 , D_2 , D_3 dan D_4 .

Pembacaan detektor untuk setiap arah dicatat.

Pembacaan detektor dijumlahkan seperti yang ditunjukkan di bawah ini.

49	61
73	55

Pembacaan latar belakang adalah 34.

Tentukan bilangan piksel P, Q, R, dan S seperti pada gambar berikut.

P	Q
S	R

[4]

Cambridge International AS dan A Level Physics (9702) Makalah 43 Q12 Mei/Juni 2014

- 6 a Sebutkan apa yang dimaksud dengan pelacak radioaktif.
- b Jelaskan mengapa pemusnahan positron dalam materi menimbulkan dua foton sinar gamma yang bergerak dalam arah yang berlawanan.
- c Hitung energi salah satu foton yang dipancarkan sebagai akibat dari pemusnahan positron.

11 Astronomi dan Kosmologi

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari topik ini, Anda diharapkan dapat:

11.1. Lilin Standar

1. Memahami istilah luminositas sebagai kekuatan total radiasi yang dipancarkan oleh bintang dengan benar;
2. Menggunakan hukum kuadrat terbalik untuk fluks radiasi intensitas F dalam konteks luminositas L menggunakan persamaan $F = L/(4\pi d^2)$ dengan benar;
3. Memahami bahwa objek luminositas yang diketahui nilanya dapat digunakan sebagai lilin standar;
4. Menganalisis penggunaan lilin standar untuk menentukan jarak ke galaksi secara proporsional.

11.2. Jari-jari Bintang

1. Menggunakan hukum pergeseran Wien maks $\lambda_{\text{max}} \propto 1/T$ untuk memperkirakan suhu tertinggi permukaan bintang dengan benar;
2. Menggunakan hukum Stefan–Boltzmann $L = 4\pi\sigma r^2 T^4$ dengan benar;

3. Menggunakan hukum pergeseran Wien dan Stefan–Boltzmann hukum untuk memperkirakan jari-jari bintang dengan benar.

11.3. Hukum Hubble dan Teori Big Bang

1. Memahami bahwa garis-garis dalam spektrum emisi dari benda yang jauh menunjukkan peningkatan panjang gelombang dari nilai yang telah diketahui sebelumnya;
2. Menggunakan $\Delta\lambda/\lambda = \Delta f/f = v/c$ untuk pergeseran sinar merah dari sumber yang bergerak relatif terhadap pengamat dengan benar;
3. Menjelaskan mengapa pergeseran sinar merah menghasilkan gagasan bahwa terjadi perluasan terhadap Alam Semesta;
4. Menggunakan hukum Hubble $v = H_0 d$ untuk menjelaskan teori Big Bang (siswa hanya diarahkan untuk menggunakan satuan-satuan SI)

Pemahaman Pendahuluan

- Ketika sumber gelombang bergerak relatif terhadap pengamat yang diam, ada perubahan frekuensi yang diamati (efek Doppler).
- Ketika spektrum cahaya kontinu melewati gas dingin, spektrum kontinu dilintasi oleh serangkaian garis yang lebih gelap (*spektra absorpsi*).

11.1 Lilin Standar

Ketika kita melihat bintang-bintang di malam hari, terlihat jelas bahwa beberapa bintang lebih terang dari yang lain. Ini mungkin karena bintang memberikan lebih banyak cahaya atau karena lebih dekat dengan kita daripada bintang lain.

Efek ini dapat diilustrasikan di laboratorium menggunakan dua lampu, satu memancarkan cahaya 3 W dan yang lainnya, cahaya 5 W. Ketika kedua lampu berada pada jarak yang sama dari pengamat, lampu 5 W lebih terang dari lampu 3 W. Namun, jika lampu 3 W hanya berjarak 1 meter dari pengamat dan lampu 5 W berjarak 10 m, lampu 3 W akan tampak lebih terang. Ini karena cahaya menyebar saat bergerak menjauh dari sumbernya.

Luminositas

Luminositas suatu benda adalah jumlah energi per satuan waktu yang dipancarkan oleh benda tersebut ke segala arah (daya total).

Bendanya mungkin bintang, lampu, dll. Energi ini dipancarkan sebagai radiasi elektromagnetik.

Satuan luminositas adalah satuan daya (W) yang juga setara dengan jumlah energi yang dipancarkan per detik (Js^{-1}). Simbol untuk luminositas adalah L.

Misalnya, luminositas L Matahari adalah $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$.

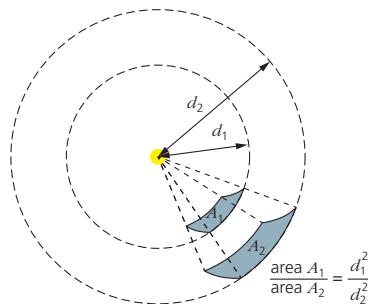
Intensitas fluks radiasi

Energi yang dipancarkan oleh bintang terpancar ke segala arah. Cahaya ini menerangi area yang terus meluas saat bergerak menjauh dari posisi bintang (lihat [Gambar 11.2](#)). Jika tidak ada energi yang diserap dan energi tersebut dipancarkan secara merata ke segala arah, maka pada



▲ **Gambar 11.1** Langit pada malam hari

jarak d dari bintang, energi tersebut akan dipancarkan pada seluruhluas permukaan bola. Luas permukaan bola dinyatakan dengan persamaan $4\pi d^2$ dan karena jumlah energi per satuan waktu adalah luminositas L , maka jumlah energi yang dipancarkan per satuan waktu, per satuan luas didefinisikan dengan $L/(4\pi d^2)$.



▲ Gambar 11.2 Hukum kuadrat terbalik

Kuantitas $L/(4\pi d^2)$ dikenal sebagai **intensitas fluks radiasi**. Untuk kecermerlangan semu) dan disajikan dalam persamaan

$$F = L/(4\pi d^2)$$

Satuan dari F adalah W m^{-2} .

Intensitas fluks radiasi adalah daya radiasi per satuan luas yang dipancarkan secara tegak lurus per satuan luas.

► CONTOH SOAL 11A

Luminositas Matahari adalah $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$. Bumi mengorbit Matahari pada jarak rata-rata $1,5 \times 10^8 \text{ km}$. Hitung intensitas fluks radiasi Matahari, pada jarak terdekat dengan Bumi.

Jawaban

$$\begin{aligned} F &= L/(4\pi d^2) \\ &= (3,9 \times 10^{26})/(4\pi \times \{1.5 \times 10^8\}^2) \quad [\text{catatan: ubah km ke m}] \\ &= \mathbf{1.400 \text{ W/m}^2} \end{aligned}$$

Soal Latihan

- 1 Intensitas fluks radiasi di Bumi akibat radiasi Matahari adalah 1400 W/m^2 . Jari-jari orbit rata-rata di sekitar Matahari, Bumi, dan Mars masing-masing adalah $1,5 \times 10^8 \text{ km}$ dan $2,3 \times 10^8 \text{ km}$. Tentukan intensitas fluks radiasi Matahari di Mars..



Lilin Standar

Bagian penting dari penelitian para astronom adalah menentukan jarak bintang dan galaksi dari Bumi. Galaksi adalah sekelompok ratusan juta bintang, sisa-sisa bintang, gas, dan materi gelap, yang disatukan oleh gravitasi. Galaksi begitu jauh dari Bumi sehingga, dengan mata telanjang, mereka tampak sebagai setitik cahaya kecil atau tidak terlihat sama sekali.

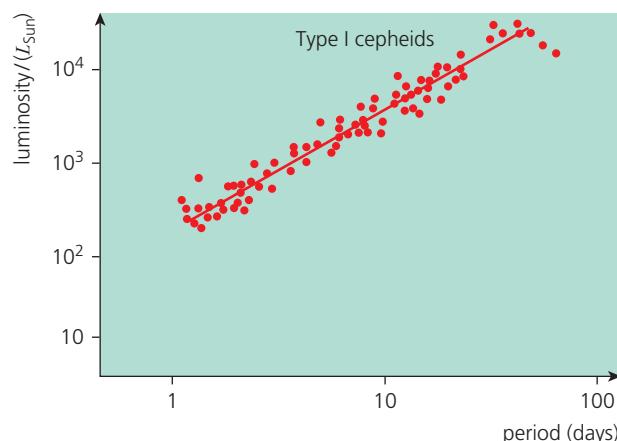
Lilin standar adalah sejumlah bintang yang memiliki luminositas yang telah diketahui dan jaraknya dapat ditentukan dengan menghitung intensitas fluks radiasi (kecemerlangan semu) dan luminositasnya.

Untuk mengukur jarak, intensitas fluks radiasi F di Bumi (kecemerlangan terlihat) diukur. Jika luminositas L dari bintang atau galaksi dapat dicari, maka jarak dapat dihitung dengan menggunakan persamaan $F = L/(4\pi d^2)$. Kesulitannya adalah dalam penentuan luminositas. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan hubungan periode dengan luminositas bintang yang mengalami perubahan cahaya secara berkala yang dikenal sebagai bintang **variabel Cepheid**.

Bintang variabel Cepheid adalah bintang yang jari-jarinya berubah secara berkala. Jari-jari bintang yang bervariasi menyebabkan suhu bintang berubah dan akibatnya, luminositas berubah secara berkala. Hubungan antara Periode dengan luminositas ini (dan juga kecemerlangan bintang yang diamati dari Bumi) berkisar dari 1 hari hingga 100 hari. Bintang variabel Cepheid pertama kali diidentifikasi oleh Henrietta Swan Leavitt pada tahun 1908. Leavitt juga menemukan bahwa bintang Cepheid yang lebih bercahaya memiliki periode yang lebih lama, dan astronom lain melakukan penelitian untuk menunjukkan bahwa ada beberapa bintang mempunyai hubungan antara luminositas dengan periode varibilitas (lihat [Gambar 11.3](#)).

Karena semua bintang Cepheid pada periode tertentu memiliki luminositas yang sama, luminositas L Cepheid dapat diperkirakan dari periode varibilitas kecemerlangannya. Oleh karena itu jarak ke bintang dihitung setelah mengukur F .

▲ **Gambar 11.3** Hubungan antara luminositas dan periode untuk bintang variabel Cepheid. Luminositas diplot sebagai kelipatan dari luminositas Matahari, L_{Sun} . Perhatikan kedua sumbu memiliki skala logaritmik.



Dengan menggunakan teknik ini, jarak ke bintang variabel Cepheid hingga 13 juta tahun cahaya dapat ditentukan dengan teleskop yang dioperasikan dari permukaan Bumi. Dengan teleskop yang beroperasi dari ruang angkasa, jarak ke bintang variabel Cepheid yang letaknya lebih jauh dapat ditentukan. Sebuah bintang variabel Cepheid di sebuah galaksi di cluster Virgo ditemukan 56 juta tahun cahaya jauhnya. Perhatikan bahwa tahun cahaya (ly) adalah jarak yang ditempuh foton cahaya melalui ruang dalam satu tahun yaitu $9,46 \times 10^{15}$ m:

$$\begin{aligned} 1,0 \text{ tahun cahaya} &= 3,0 \times 10^8 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 \\ &= 9,46 \times 10^{15} \text{ m} \end{aligned}$$

► CONTOH SOAL 11B

Luminositas L dari bintang variabel Cepheid diperkirakan periodenya $4,6 \times 10^{15}$ W. Intensitas fluks radiasinya (kecemerlangan teramat) F yang diukur di Bumi adalah $1,3 \times 10^{-23}$ W/m⁻².

Tentukan jarak bintang variabel Cepheid dari Bumi.

Jawaban

$$\begin{aligned} F &= \frac{L}{(4\pi d^2)} \\ 1,3 \times 10^{-23} &= \frac{(4,6 \times 10^{15})}{(4\pi \times d^2)} \\ d^2 &= 2,8 \times 10^{37} \\ d &= 5,3 \times 10^{18} \text{ m (560 ly)} \end{aligned}$$

Soal Latihan

- 2 Luminositas L dari bintang variabel Cepheid diperkirakan periodenya $4,6 \times 10^{15}$ W. Intensitas fluks radiasinya (kecemerlangan teramat) F yang diukur di Bumi adalah $1,3 \times 10^{-23}$ W/m².

Tentukan jarak bintang variabel Cepheid dari Bumi.

Lilin standar lainnya

Metode bintang variabel Cepheid tidak berlaku untuk galaksi yang jaraknya sangat jauh dari Bumi. Pengamatan awal terbatas pada bintang variabel Cepheid dan galaksi yang relatif dekat dengan galaksi kita sendiri. Lilin standar lainnya, seperti beberapa supernova dapat digunakan untuk galaksi yang lebih jauh.

11.2 Jari-jari Bintang

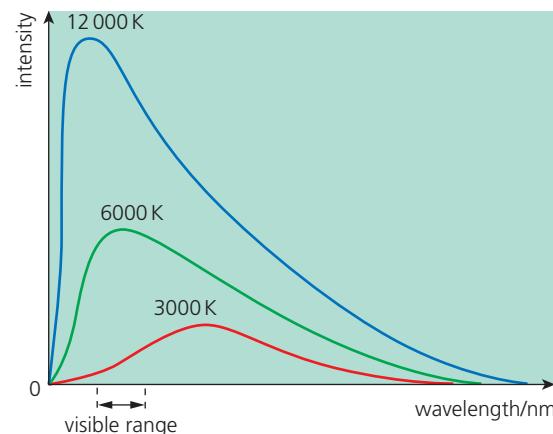
Ketika sebuah batang baja dipanaskan dengan suhu sangat tinggi, pada mulanya akan bersinar merah kusam. Saat pemanasan berlanjut, kecemerlangan cahaya meningkat dan warna berubah dari merah kusam menjadi oranye. Batang memancarkan energi ke sekelilingnya sebagai radiasi elektromagnetik. Kecemerlangan cahaya tergantung pada tingkat radiasi yang dipancarkan (intensitas) dan warna yang terlihat tergantung dari panjang gelombang radiasi yang dipancarkan.

Percobaan menunjukkan bahwa pada suhu tertentu suatu benda akan memancarkan radiasi dengan rentang panjang gelombang yang terus menerus berubah, dan bahwa intensitas serta panjang gelombang yang dipancarkan bergantung pada suhu benda.

Ide teori tentang ‘benda hitam’ dikembangkan untuk menjelaskan intensitas radiasi dari berbagai panjang gelombang. Radiasi yang dipancarkan dari benda hitam sempurna dikenal sebagai ‘radiasi benda hitam’. Bintang berperilaku sebagai benda hitam. Mempelajari sifat radiasi benda hitam di laboratorium menambah pemahaman kita tentang sifat radiasi dari bintang.



Dengan berbagai macam panjang gelombang, intensitas radiasi elektromagnetik yang dipancarkan dari permukaan benda hitam (misalnya bintang) pada suhu yang berbeda dilukiskan pada Gambar 11.4.



▲ **Gambar 11.4** Intensitas radiasi dengan panjang gelombang untuk benda hitam pada suhu 3000 K, 6000 dan 12000 K

Dapat dipahami bahwa:

- ∅ Pada berbagai suhu, radiasi elektromagnet yang dipancarkan berdasarkan rentang panjang gelombang
- ∅ Ketika suhu benda hitam meningkat maka panjang gelombang yang membuat intensitas radiasi maksimum(puncak grafik) bergerak menuju panjang gelombang yang lebih pendek
- ∅ semakin tinggi suhu, semakin besar daya yang terpancar.

Panjang gelombang yang menghasilkan intensitas radiasi maksimum pada suhu tertentu diberi simbol λ_{\max} . Terbukti bahwa λ_{\max} tergantung pada suhu.



Hukum pergeseran Wien

Wilhelm Wien (1864-1928) menemukan hubungan sederhana antara λ_{\max} dan suhu termodinamika T yang dikenal sebagai hukum pergeseran Wien. Yaitu:

$$\lambda_{\max} \propto 1/T$$

atau

$$\lambda_{\max} = b/T$$

di mana b dikenal sebagai konstanta pergeseran Wien dan sama dengan $2,898 \times 10^{-3} \text{ m K}$.

Jadi, dengan mengukur panjang gelombang dari intensitas maksimum radiasi yang dipancarkan dari sebuah bintang, suhu permukaannya dapat ditentukan.

CONTOH SOAL 11C

Panjang gelombang intensitas puncak radiasi yang dipancarkan Matahari adalah 510 nm. Gunakan hukum pergeseran Wien untuk menghitung nilai suhu permukaan Matahari.

Jawaban

$$\lambda_{\max} = (2,898 \times 10^{-3})/T$$

$$510 \times 10^{-9} = (2,898 \times 10^{-3})/T$$

$$T = 5.700 \text{ K}$$

Soal Latihan

- 3 Rigel dan Betelgeuse adalah dua rasi bintang di Orion. Panjang gelombang untuk intensitas radiasi maksimum dari Rigel dan dari Betelgeuse masing-masing adalah 240nm dan 878nm. Hitung suhu permukaan masing-masing bintang. (Konstanta pergeseran Wien = $2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$.)



Hukum Stefan-Boltzmann

Luminositas L sebuah bintang adalah jumlah energi total yang dipancarkan per detik. Pada [Gambar 11.4](#), luminositas meningkat seiring dengan bertambahnya luas di bawah kurva. Akibatnya, dapat dilihat bahwa luminositas meningkat seiring dengan naiknya suhu. Pengamatan bahwa $L \propto T^4$ dirumuskan oleh Josef Stefan (1835–93) dan dikenal sebagai hukum Stefan–Boltzmann.

Untuk benda berbentuk bola berjari-jari r yang memancarkan radiasi benda hitam pada suhu termodinamika T , luminositasnya L dinyatakan dengan persamaan $L = 4\pi\sigma r^2 T^4$.

Dimana σ adalah **konstanta Stefan–Boltzmann**, sama dengan $5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

Menentukan Jari-Jari Bintang

Dalam Sub 11.1, diketahui bahwa dengan menggunakan lilin standar, dimungkinkan untuk menentukan luminositas L bintang. Selanjutnya, dengan berbagai macam panjang gelombang intensitas radiasi yang dipancarkan oleh bintang dapat dihitung dan karenanya panjang gelombang max yang dapat menimbulkan

intensitas maksimum dapat dihitung. Mengganti λ_{\max} ke dalam persamaan hukum pergeseran Wien memungkinkan suhu permukaan T bintang dapat ditentukan.

Jadi, dengan mengetahui luminositas L sebuah bintang dan suhu permukaannya T kemudian mensubstitusi nilai-nilai ini ke dalam ekspresi hukum Stefan–Boltzmann, nilai jari-jari bintang dapat dihitung. Perlu diingat bahwa nilai tersebut hanya perkiraan, karena nilai yang akurat untuk luminositas bintang tidak dapat diperoleh dengan hanya perkiraan.

CONTOH SOAL 11D

Pengukuran yang dilakukan terhadap bintang Sirius menghasilkan luminositas L sebesar $1,6 \times 10^{28} \text{ W}$ dengan nilai intensitas maksimum pada Panjang gelombang 290 nm. Tentukan nilai radius Sirius.

(Konstanta pergeseran Wien = $2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$, Konstanta Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)

Jawaban:

Gunakan persamaan $L = 4\pi\sigma r^2 T^4$ dengan temperatur t dapat ditentukan berdasarkan hukum pergeseran wien.

$$\lambda_{\max} = b/T$$

$$290 \times 10^{-9} = 2,898 \times 10^{-3}/T$$

$$T = 1,0 \times 10^4 \text{ K}$$

$$L = 4\pi\sigma r^2 T^4$$

$$1,6 \times 10^{28} = 4\pi 5,67 \times 10^{-8} r^2 (1,0 \times 10^4)^4$$

$$R = 1,5 \times 10^9$$

(kira-kira 2,2 kali jari-jari matahari)

Soal Latihan

- 4 Bintang raksasa merah Aldebaran memiliki luminositas $1,95 \times 10^{29} \text{ W}$. Panjang gelombang yang sesuai dengan intensitas radiasi maksimumnya adalah 725 nm.
Hitung, dengan menggunakan 2 angka penting jari-jari Aldebaran.
(Konstanta pergeseran Wien = $2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$; Konstanta Stefan–Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$).

11.3 Hukum Hubble dan teori "Big Bang"

Dalam Sub 22.4 kita lihat bahwa ketika cahaya putih melewati gas bertekanan rendah dan setelah dianalisis menghasilkan spektrum kontinu berupa serangkaian garis-garis gelap. Ini dikenal sebagai spektrum absorpsi. Garis-garis gelap ini sesuai dengan panjang gelombang spektrum garis emisi gas.

Spektrum cahaya dari bintang adalah spektrum absorpsi. Bagian dalam bintang yang panas memancarkan cahaya putih dan kemudian cahaya putih ini melewati lapisan luar bintang yang lebih dingin. Di Bumi, spektrum absorpsi yang dihasilkan dapat dianalisis untuk mengidentifikasi unsur-unsur di lapisan luar bintang.



▲ Gambar 11.5

Galaksi

Bima Sakti adalah pita cahaya yang terus menerus melintasi langit yang dapat dilihat pada malam tanpa bulan yang cerah. Pada tahun 1750, Thomas Wright menjelaskan bahwa pita ini sebenarnya adalah gugusan bintang yang sangat besar yang berbentuk seperti lensa cembung. Gugusan bintang seperti itu, yang disatukan oleh gaya gravitasi, disebut sebagai **galaksi**.

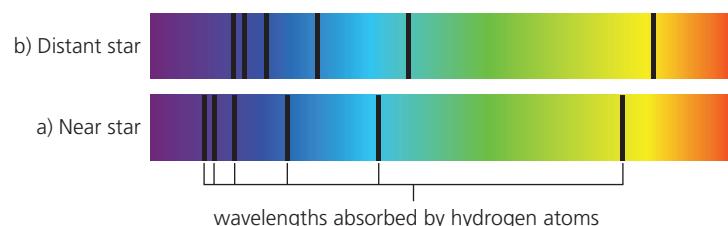
Galaksi Bima Sakti, berisi sekitar 1011 bintang berbentuk spiral, di mana Matahari kita adalah salah satu bintang tersebut. Galaksi seperti itu ditunjukkan pada [Gambar 11.5](#). Galaksi Bima Sakti memiliki diameter sekitar $9,5 \times 10^{20}$ m dan ketebalan $1,9 \times 10^{19}$ m. (bintang bergerak $9,46 \times 10^{15}$ m dalam satu tahun).

Sekarang diketahui bahwa banyak titik cahaya yang terlihat di langit pada malam bukanlah bintang di Bima Sakti, melainkan galaksi yang sangat jauh. Dengan adanya teleskop di ruang angkasa, lebih banyak lagi galaksi ditemukan yang letaknya sangat jauh dari Bumi sehingga hanya terlihat dari luar angkasa. Sekitar 77% galaksi berbentuk spiral (lihat [Gambar 11.5](#)), dan sebagian lagi sisanya berbentuk elips. Diketahui bahwa setidaknya ada 1011 galaksi di alam semesta dengan masing-masing galaksi berisi sekitar 1011 bintang!

Redshift (Pergeseran Merah)

Diperkirakan bahwa garis-garis gelap dalam spektrum absorpsi dari sebuah bintang yang dihasilkan oleh cahaya

yang melewati unsur-unsur gas yang lebih dingin ternyata tidak sama dengan garis-garis dalam spektrum emisi unsur-unsur gas yang terjadi di laboratorium. Untuk semua bintang kecuali Matahari, semua garis gelap memiliki perbedaan kecil namun signifikan dari panjang gelombang spektrum emisi unsur-unsur tersebut di laboratorium, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 25.6. Dalam spektrum terlihat, panjang gelombang spektrum meningkat seiring dengan perubahan warna dari biru menjadi merah. Ketika garis spektral dalam spektrum absorpsi terlihat memiliki peningkatan panjang gelombang dari nilai yang diketahui yang diukur di laboratorium, efeknya dikenal sebagai pergeseran merah. Jika garis spektral dalam spektrum absorpsi terlihat mengalami penurunan panjang gelombang, efeknya dikenal sebagai pergeseran biru.



▲ **Gambar 11.6** Penyederhanaan spektrum absorpsi hidrogen untuk bintang dekat dan jauh



Pengukuran kecepatan menggunakan pergeseran merah atau pergeseran biru

Dalam [Topik 7.2](#) terlihat bahwa di mana sumber suara bergerak relatif terhadap pengamat, frekuensi yang diamati berbeda dari frekuensi sumber. Ini dikenal sebagai **efek Doppler**. Suara adalah gerakan gelombang dan begitu juga cahaya, perbedaannya adalah bahwa cahaya memiliki kecepatan yang jauh lebih besar dan panjang gelombang yang jauh lebih pendek. Namun, efek Doppler diamati dengan gelombang cahaya.

Pertimbangkan cahaya kecepatan c yang dipancarkan pada frekuensi f_0 dari bintang atau galaksi yang bergerak dengan kecepatan v menjauh dari pengamat. Kemudian, dalam satu detik, gelombang f_0 akan dipancarkan dalam jarak $(c + v)$ ke arah pengamat.

Panjang gelombang semu yang diamati diberikan oleh

$$\lambda = (c + v)/f_0$$

Karena $f_0 = c/\lambda_0$ dimana λ_0 adalah panjang gelombang cahaya yang dipancarkan dari sumber stasioner, maka

$$\lambda = (c + v)/f_0 = \lambda_0 \times (c + v)/c$$

$$\lambda = \lambda_0 \times (1 + v/c)$$

$$\text{maka, } \lambda = \lambda_0 + \lambda_0 \times v/c$$

$$\text{dan } \lambda - \lambda_0 = \lambda_0 \times v/c,$$

$$(\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = v/c$$

$(\lambda - \lambda_0)$ adalah pergeseran merah $\Delta\lambda$ (atau pergeseran biru) yang diamati maka,

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\Delta f}{f} = \frac{v}{c}$$

Perbandingan panjang gelombang dalam garis spektral bintang dengan panjang gelombang yang ditentukan di laboratorium memungkinkan kecepatan dan arah bintang relatif terhadap Bumi untuk dihitung. Harus diingat bahwa hanya kecepatan sepanjang arah penglihatan yang dapat ditentukan.

Nilai positif (panjang gelombang yang diamati lebih besar dari panjang gelombang yang diukur di laboratorium) maka terlihat terjadi pergeseran merah dan benda bergerak menjauhi pengamat. Nilai negatif menunjukkan bahwa pergeseran biru dengan objek bergerak ke arah pengamat.

Untuk objek yang jaraknya sangat jauh dari Bumi (seperti quasar, akan dibahas lebih lanjut di bawah) dimana kecepatannya sangat besar, mendekati kecepatan cahaya.

Untuk benda yang bergerak mendekati kecepatan cahaya, rumusnya harus dikoreksi dan rumus di atas adalah perkiraan.

CONTOH SOAL 11E

Panjang gelombang dalam spektrum hidrogen cahaya dari Ursa Majoris adalah 486,112 nm.

Di laboratorium, garis spektral ini diketahui memiliki panjang gelombang 486,133 nm.

Tentukan kecepatan Ursa Majoris relatif terhadap Bumi.

Kecepatan c cahaya di ruang hampa adalah $3,0 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Jawaban

Gunakan persamaan $\Delta\lambda/\lambda = v/c$

dimana $\Delta\lambda = (486,133 - 486,112) = 0,021 \text{ nm}$

dan $\lambda = 486,133 \text{ nm}$

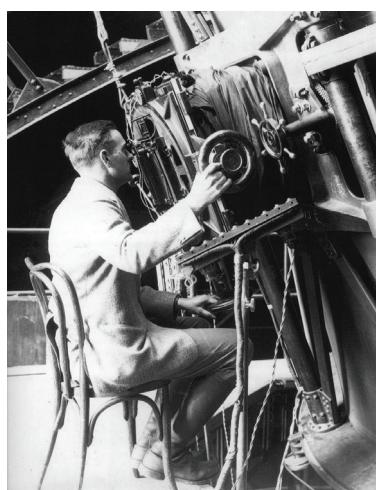
Sehingga, $0,021/486,133 = v/(3,0 \times 10^8)$

$$v = 1,3 \times 10^4 \text{ ms}^{-1}$$

$= 13 \text{ km s}^{-1}$ menuju Bumi saat cahaya bergeser biru

Soal Latihan

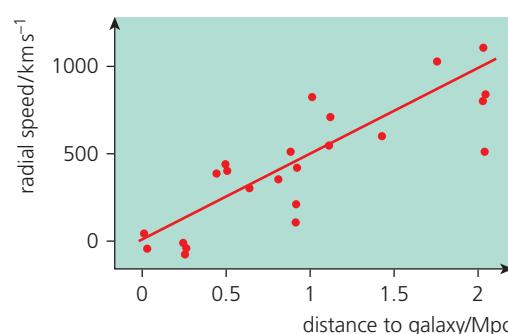
- 5** Pengukuran spektrum cahaya dari galaksi NGC 4889 mempunyai panjang gelombang 401,8 nm untuk panjang gelombang garis-K kalsium terionisasi tunggal. Di laboratorium, panjang gelombang diukur menjadi 393,3 nm.
- Berapa kecepatan dan arah galaksi ini relatif terhadap Bumi?
- (Kecepatan c cahaya di ruang hampa adalah $3,0 \times 10^8 \text{ m/s}$)



▲ **Gambar 11.7** Edwin Hubble menggunakan teleskop yang berada di observatorium Mount Wilson di Pasadena, California

Hukum Hubble

Edwin Hubble (1889–1953) mempelajari spektrum absorpsi galaksi dan menghitung bahwa sebagian besar galaksi mengalami pergeseran merah dan, oleh karena itu, letaknya menjauh dari Bumi. Dengan menggunakan metode lilin standar (lihat [Topik 25.1](#)), Hubble dapat menentukan jarak dari Bumi dari beberapa galaksi terdekat yang kecepatan radialnya dari Bumi telah dihitung pada tahun 1920-an dengan menggunakan rumus Doppler. Menggambarkan grafik kecepatan radial v terhadap jarak d memberikan garis lurus yang paling sesuai, seperti yang diilustrasikan pada [Gambar 11.8](#). Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan radial sebanding dengan jarak.



▲ **Gambar 11.8** Data asli Hubble untuk kecepatan radial terhadap jarak

Yaitu:

$$v = H_0 \times d$$

Kesimpulannya dikenal sebagai **hukum Hubble** dan konstanta H_0 , dapat ditentukan dari gradien grafik, yang dikenal sebagai **konstanta Hubble**. Data asli Hubble adalah untuk galaksi dalam rentang 0 hingga 2 Mpc dimana 1 Mpc (1 megaparsec) adalah satuan jarak yang digunakan dalam

astronomi yaitu sebesar $3,09 \times 10^{19}$ km. Data pengamatan terbaru telah memperluas plot Hubble ke galaksi pada jarak yang jauh lebih besar.

Satuan konstanta Hubble H_0 biasanya dinyatakan sebagai km s^{-1} per Mpc tetapi dalam satuan SI H_0 memiliki satuan m s^{-1} per m, yang disederhanakan menjadi s^{-1} .

Ada banyak perdebatan mengenai nilai konstanta H_0 karena bergantung pada keakuratan jarak ke galaksi yang dapat diukur dan, karenanya, ketidakpastian dalam gradien grafik kecepatan radial terhadap jarak. Diperkirakan bahwa nilai H_0 terletak antara 50 km s^{-1} per Mpc dan 100 km s^{-1} per Mpc dengan nilai yang diterima saat ini adalah 75 km s^{-1} per Mpc. Nilai ini, dalam satuan SI, kira-kira $2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m.

► CONTOH SOAL 11F

Cahaya dari galaksi terdekat diamati pergeseran merah, menunjukkan kecepatan radial dari Bumi menjadi $1,2 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$. Dengan asumsi nilai konstanta Hubble $2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m, perkirakan jarak galaksi dari Bumi.

Jawaban

Menggunakan hukum Hubble, $v = H_0 \times d$,

$$1,2 \times 10^6 = 2,4 \times 10^{-18} \times d$$

$$d = 5,0 \times 10^{23} \text{ m}$$

(Catatan: Cahaya membutuhkan waktu sekitar $1,7 \times 10^{15}$ s untuk menempuh jarak ini yaitu 54 juta tahun)

Soal Latihan

- 6** Menggunakan pergeseran merah, kecepatan radial menjauh dari Bumi galaksi NGC 4889 ditemukan 6500 km/s. Menggunakan hukum Hubble dan mengasumsikan nilai $2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m untuk konstanta Hubble, tentukan waktu yang dibutuhkan, dalam tahun, untuk cahaya untuk melakukan perjalanan dari NGC 4889 ke Bumi.
- 7** Konstanta Hubble telah ditentukan dari satu set pengukuran terbaru sebagai 75 km s^{-1} per Mpc. Jika $1 \text{ Mpc} = 3,09 \times 10^{19} \text{ km}$, tunjukkan bahwa dalam satuan SI adalah $2,4 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$.

Quasar

Objek misterius di alam semesta adalah **quasar**. Quasar adalah objek yang sangat jauh yang memiliki pergeseran merah yang sangat besar dan luminositas yang sangat besar hingga 10^{40} W . Luminositas (kecerlangan) yang besar ini memungkinkan studi objek yang berada pada jarak yang sangat jauh dari Bumi.

Alam Semesta yang terus berkembang

Einstein mengusulkan bahwa, dalam skala yang cukup besar, Semesta adalah homogen dan isotropik. Ini dikenal sebagai **Prinsip Kosmologis**. Ini berarti Semesta akan memiliki penampakan umum yang sama dari tempat lain di Semesta seperti yang muncul dari Bumi.

Kesimpulan dari data pergeseran merah adalah bahwa hampir semua galaksi bergerak menjauh dari Bumi, dan bahwa galaksi di tepi Alam Semesta yang teramat memiliki kecepatan resesi yang sangat besar, beberapa mendekati kecepatan cahaya. Menggunakan Prinsip Kosmologis, rumus Hubble juga mengarah pada kesimpulan penting bahwa setiap galaksi ‘melihat’ setiap galaksi lain yang menjauh darinya, dan semakin besar pemisahan objek yang berbeda (misalnya galaksi), semakin besar kecepatan pemisahannya.

Ini berarti bahwa Alam Semesta mengembang – ruang di antara setiap galaksi mengembang – dan ekspansi ini telah berlangsung selama miliaran tahun.

Usia Alam Semesta

Misalkan dua galaksi yang bergerak terpisah dengan kecepatan v . Galaksi-galaksi tersebut dipisahkan oleh jarak x . Jika kecepatan ini dibalik arahnya, maka galaksi-galaksi akan saling mendekat dan waktu T yang diperlukan sebelum galaksi-galaksi bertabrakan diberikan oleh

$$T = x/v$$

Menggunakan hukum Hubble,

$$v = H_0 x$$

dan menggabungkan dua rumus ini,

$$T = x/H_0 x = 1/H_0$$

Perhatikan bahwa jarak pemisahan x telah diabaikan dalam ekspresi akhir untuk T sehingga T adalah sama untuk semua galaksi. Ini mengarah pada kesimpulan bahwa T adalah waktu ketika semua galaksi berada di titik yang sama. yaitu waktu “Big Bang”.

Diasumsikan bahwa $H_0 = 2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m, maka

$$T = 4,2 \times 10^{17} \text{ s} = 13 \text{ miliar tahun.}$$

Seperti yang telah disebutkan, ada keraguan mengenai nilai sebenarnya dari H_0 dan usia Alam Semesta diperkirakan antara 11 miliar dan 20 miliar tahun.

► CONTOH SOAL 11G

Bintang tertua yang telah terdeteksi memiliki usia sekitar 15 miliar tahun.

Deduksi nilai kemungkinan untuk konstanta Hubble berdasarkan nilai ini.

Jawaban:

Diasumsikan 15 miliar tahun adalah usia alam semesta.

Maka, $15 \times 10^9 \text{ tahun} = 1/H_0$.

Menggunakan satuan SI

$$15 \times 10^9 \times 365 \times 24 \times 3600 = 1/H_0$$

$$H_0 = 2,1 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1} \text{ per m}$$

Soal Latihan

- 8** Jarak antara Bulan dan Bumi adalah sekitar $3,8 \times 10^5$ km. Hitung nilai untuk perubahan jarak per tahun antara Bulan dan Bumi sebagai akibat dari perluasan Alam Semesta. Diasumsikan konstanta Hubble H_0 adalah $2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m.

RANGKUMAN

- ϕ Luminositas suatu benda adalah jumlah energi per satuan waktu yang dipancarkan oleh benda tersebut ke segala arah (daya total).
- ϕ Intensitas fluks radiasi (kecererlangan semu) bervariasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari sumber yang dapat dianggap sebagai sumber titik, $F = L/(4\pi d^2)$.
- ϕ Benda dengan luminositas yang diketahui disebut sebagai lilit standar.
- ϕ Lilit standar dapat digunakan untuk menentukan jarak ke galaksi.
- ϕ Hukum pergeseran Wien $\lambda_{\max} = b/T$ memungkinkan suhu benda hitam dapat ditentukan
- ϕ Hukum Stefan–Boltzmann menghubungkan luminositas dengan suhu $L = 4\pi\kappa r^2 T^4$.
- ϕ Menggabungkan hukum pergeseran Wien dengan hukum Stefan–Boltzmann memungkinkan jari-jari bintang dapat ditentukan.
- ϕ Spektrum absorpsi dari objek jauh menunjukkan pergeseran merah dan, dengan menggunakan rumus Doppler $\Delta\lambda/\lambda = v/c$, kecepatan resesi dapat diperkirakan.
- ϕ Pergeseran merah mengarah pada konsep Alam Semesta yang mengembang.
- ϕ Hukum Hubble $v = H_0 \times d$ mengarah pada teori Big Bang tentang penciptaan Alam Semesta.

ASESMEN FORMATIF

Data

Kecepatan cahaya di ruang vakum $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Konstanta Stefan–Boltzmann $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Formula

Hukum Stefan–Boltzmann: $L = 4\pi\sigma r^2 T^4$

Pergeseran merah Doppler: $\Delta\lambda/\lambda = \Delta f/f = v/c$

- 1 a** Bedakan antara luminositas (kilau) L sebuah bintang dan intensitas fluks radiasi F .
- b** Jelaskan bagaimana intensitas cahaya dan intensitas fluks radiasi dapat digunakan untuk menentukan jarak ke galaksi.
- c** Sebuah wahana antariksa berjarak $1,4 \times 10^9 \text{ km}$ dari Matahari. Daya untuk wahana antariksa disediakan oleh panel surya yang mengumpulkan energi radiasi dari Matahari. Panel surya memiliki luas total 31 m^2 dan menghadap langsung ke Matahari.

Luminositas Matahari adalah $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$.

Hitung insiden daya radiasi radial pada panel.

- 2 a** Jelaskan bagaimana kurva distribusi intensitas energi radiasi dari sebuah bintang dapat digunakan untuk memperkirakan suhu permukaan puncaknya.
- b** Bintang Betelgeuse di konstelasi Orion dikenal sebagai raksasa merah. Ia memiliki luminositas $L = 3,9 \times 10^{30} \text{ W}$. Panjang gelombang maks dari intensitas puncak radiasi yang dipancarkan dari Betelgeuse adalah 970 nm.

Konstanta pergeseran Wien $= 2,9 \times 10^{-3} \text{ m K}$.

Menggunakan:

- i. Hukum pergeseran Wien untuk menentukan suhu permukaan Betelgeuse,
- ii. hukum Stefan–Boltzmann untuk menghitung jari-jari Betelgeuse.

- 3** **a** Dengan mengacu pada efek Doppler, jelaskan apa yang dimaksud dengan pergeseran merah.
- b** Satu panjang gelombang dalam spektrum cahaya hidrogen dari bintang Vega teramat sebesar 656,255 nm.
- Di laboratorium, panjang gelombang garis spektral ini diukur hingga 656.285 nm.
 - Berapa kecepatan dan arah perjalanan Vega relatif terhadap Bumi?
- 4** **a** Jelaskan mengapa pergeseran merah mengarah pada gagasan bahwa Alam Semesta mengembang.
- b** **i** Nyatakan hukum Hubble.
- ii** Pergeseran dalam cahaya merah dari Cygnus A menunjukkan kecepatan resesi dari Bumi sebesar $1,7 \times 10^4 \text{ km s}^{-1}$.
Dengan asumsi nilai konstanta Hubble H_0 sebesar $2,4 \times 10^{-18} \text{ m s}^{-1}$ per m, hitung waktu yang dibutuhkan, dalam tahun, bagi cahaya untuk melakukan perjalanan ke Bumi dari posisi di mana Cygnus A memancarkan radiasi.
- 5** **a** Jelaskan apa yang dimaksud dengan pergeseran merah.
- b** Cahaya dari galaksi jauh digeser ke arah ujung merah spektrum.
Jumlah pergeseran merah ditemukan berbeda di berbagai bagian galaksi.
- i** Nyatakan apa yang dapat disimpulkan dari fakta bahwa cahaya mengalami pergeseran merah.
- ii** Jelaskan mengapa jumlah pergeseran merah berbeda.
- 6** Hukum Stefan–Boltzmann dapat disajikan dalam bentuk persamaan:
- $$L = \sigma AT^4$$
- di mana σ adalah konstanta Stefan–Boltzmann.
- a** Sebutkan besaran-besaran yang dilambangkan dengan simbol L , A , dan T .

- b** Tunjukkan bahwa satuan SI dari konstanta σ adalah $\text{W/m}^2\text{K}^{-4}$.
- 7 Bumi yang terletak $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$ dari Matahari menerima 1370 W/m^2 tenaga surya. Matahari memiliki radius $7,0 \times 10^8 \text{ m}$. Konstanta Stefan–Boltzmann adalah $5,7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$. Tentukan suhu permukaan Matahari.

12 Unjuk Kerja

Bagian penting dari setiap mata pelajaran Fisika adalah unjuk kerja. Unjuk kerja (praktikum) akan membantu pemahaman Anda tentang aspek teoritis, pembuktian dengan unjuk kerja akan membuat bahan yang Anda pelajari menjadi lebih menarik. Keterampilan praktis yang Anda peroleh harus meningkatkan pemahaman Anda tentang prinsip-prinsip penyelidikan ilmiah dan teori ilmiah. Pengembangan keterampilan praktis yang baik juga akan membantu Anda dalam memahami mata pelajaran Fisika atau bidang karir ilmiah Anda di masa depan.

Dalam pembelajaran Fisika Cambridge International AS & A Level, Anda akan mengembangkan keterampilan eksperimental berikut:

- 1 rekayasa, pengukuran dan observasi
- 2 penyajian data dan observasi
- 3 analisis, kesimpulan dan evaluasi
- 4 perencanaan

Dalam bab ini, Anda memiliki kesempatan untuk mengembangkan keterampilan-keterampilan tersebut. Ketika Anda menjadi lebih berpengalaman, Anda akan mempelajari kemungkinan hubungan antar variabel menggunakan fungsi logaritma dan dapat menganalisis ketidakpastian secara lebih rinci.

Keamanan

Dalam semua unjuk kerja, Anda harus selalu mempertimbangkan langkah untuk menjaga keamanan dan keselamatan kerja yang tepat. Anda harus selalu mengikuti aturan umum yang berlaku di laboratorium dan langkah-langkahnya. Untuk aktivitas praktikum tertentu, Anda juga harus mempertimbangkan bahaya dan tindakan pencegahan khusus yang relevan dengan aktivitas tersebut. Anda bertanggung jawab untuk selalu waspada terhadap potensi bahaya, tidak hanya untuk diri Anda sendiri tetapi juga untuk orang lain yang berada di laboratorium.

Panduan Lebih Lanjut

Buku Latihan Keterampilan Praktikum Fisika *AS & A Level Cambridge International* adalah sumber tertulis yang dirancang untuk digunakan selama pembelajaran dan memberi Anda lebih banyak kesempatan untuk menguji pemahaman Anda tentang keterampilan melakukan unjuk kerja yang dibutuhkan sesuai tuntutan silabus.

Hal yang diharapkan dari menguasai keterampilan melakukan percobaan

1 Rekayasa, Pengukuran dan Observasi

Selama pembelajaran, ada sejumlah alat ukur yang perlu Anda pelajari dengan tujuan Anda terampil menggunakananya untuk melakukan pengukuran yang akurat. Topik 1 memberikan informasi tentang sejumlah instrumen ini. Anda harus dapat melakukan pengukuran menggunakan peralatan seperti skala milimeter, busur derajat, neraca, newton meter, alat ukur listrik analog dan digital, gelas ukur, jangka sorong, mikrometer sekrup, dan termometer. Anda juga harus dapat menggunakan stopwatch untuk mengukur waktu, termasuk periode dari sistem osilasi dengan mengukur waktu yang diperlukan untuk melakukan sejumlah getaran berurutan.

Sangat penting untuk mengikuti instruksi tertulis dan diagram yang telah ditetapkan untuk menggunakan peralatan-peralatan dasar, termasuk rangkaian listrik. Keterampilan yang Anda kembangkan memungkinkan untuk mengidentifikasi pilihan instrumen terbaik, serta memilih cara pengukuran yang akan digunakan. Misalnya, cara untuk meminimalkan ketidakpastian pengukuran periode getaran adalah dengan mengukur waktu yang dibutuhkan untuk menempuh n getaran, langkah ini dilakukan supaya waktu t yang diukur paling sedikit mencapai 10 detik. Anda kemudian dapat memperhitungkan periode getaran dengan menggunakan persamaan:

$$T = \frac{t}{n}$$

Anda perlu memahami bahwa melakukan pengukuran berulang sangat membantu mengurangi kesalahan acak. Misalnya, untuk menentukan diameter kawat logam, Anda dapat mengulangi pengukuran diameter sepanjang kawat dan kemudian menemukan diameter rata-ratanya.

Untuk melakukan eksperimen apapun, Anda perlu mempertimbangkan jumlah pengukuran yang diperlukan agar Anda mendapatkan data yang akurat. Misalnya, jika Anda menduga kecenderungan hubungan data yang Anda peroleh membentuk grafik garis lurus. Paling sedikit, Anda

harus melakukan enam kali pengambilan data. Jika grafik Anda cenderung membentuk kurva, maka Anda harus melakukan setidaknya sembilan kali pengukuran.

Anda juga perlu mempertimbangkan rentang pengukuran yang akan memberi Anda data yang akurat. Misalnya, jika Anda perlu mengukur hambatan kawat dengan panjang 85,0 cm, Anda dapat melakukan enam pengukuran hambatan untuk panjang 10,0 cm, 20,0 cm, 35,0 cm, 50,0 cm 65,0 cm, dan 80,0 cm. Pengukuran yang dilakukan tersebut menggunakan panjang total kawat yang nilainya bervariasi. Setelah menggambarkan grafik hambatan terhadap panjang kawat penghantar, hambatan penghantar yang panjangnya 85,0 cm dapat ditemukan. Jika titik-titik yang digambarkan pada grafik terlalu menyebar, Anda dapat memutuskan untuk mengulangi lagi pengukuran yang dilakukan.

2 Penyajian data Pengukuran dan Pengamatan

Selama melakukan unjuk kerja, Anda akan melakukan banyak pengukuran dan pengamatan. Semua data harus selalu disajikan dalam bentuk yang ringkas dan mudah dipahami. Akan sangat baik bila Anda mencatat hasil pengukuran dan pengamatan yang telah dilakukan dalam sebuah tabel. Dengan data-data tersebut Anda dapat menggambarkan sebuah grafik yang dapat digunakan untuk menyelidiki hubungan antara dua besaran.

Tabel Hasil Pengukuran

Anda diharapkan untuk mencatat data numerik dalam tabel hasil pengukuran. Disarankan agar Anda merencanakan tabel Anda sebelum mulai kegiatan unjuk kerja. Ketika Anda memulai percobaan, Anda sebaiknya merencanakan apa yang harus Anda lakukan agar dapat lebih mudah melakukan pengukuran data yang Anda perlukan.

Tabel data yang digunakan sebaiknya memiliki kolom yang dapat memuat semua data hasil pengukuran, serta kolom untuk menempatkan hasil perhitungan data. Jika Anda melakukan pengukuran berulang, maka harus ada kolom yang disediakan untuk mencatat setiap data hasil pengukuran berulang tersebut dan nilai rata-rata pengukuran.

Judul Kolom

Pada setiap judul kolom harus dicantumkan lambang besaran dan satuan SI yang sesuai. Cara penulisan berdasarkan konvensi ilmiah adalah lambang besaran dan satuan yang dipisahkan oleh '/'. Misalnya, jika lambang besaran diameter adalah d dan diukur dalam satuan milimeter, judul kolom akan ditulis d/mm . Kadang-kadang menuliskan satuan tanpa awalan akan mempermudah, jadi diameter d yang diukur dalam milimeter dapat ditulis sebagai $d/10^{-3}\text{ m}$. Satuan tidak boleh ditulis dalam bagian utama tabel.

Pencatatan Hasil Pengukuran

Anda harus mencatat data hasil pengukuran dari besaran tertentu dengan tingkat ketelitian yang sama. Misalnya, jika Anda mengukur panjang menggunakan alat ukur dengan skala milimeter, semua hasil pengukuran harus dicatat dan dibulatkan ke milimeter terdekat, misalnya 20,0 cm dan 23,4 cm.

Berdasarkan aturan umum, semua hasil pengukuran data harus dicatat dengan jumlah angka desimal yang sama. Hal ini dilakukan karena jumlah angka desimal dalam data memberikan informasi tentang tingkat keakuratan hasil pengukuran yang diambil. Misalnya, jika Anda mengukur panjang menggunakan alat ukur dengan skala milimeter, maka penulisan 20 cm tidak tepat karena penulisan ini menyiratkan bahwa Anda mengukur dengan skala sentimeter dan hasil pengukuran harus dibulatkan ke sentimeter terdekat. Hasil pengukuran yang ditulis tersebut bisa berada antara 19,5 cm dan 20,5 cm. Penulisan 23,40 cm juga tidak dapat diterima karena hasil pengukuran ini menyiratkan bahwa Anda telah mengukur hingga 0,1 mm terdekat yang tidak mungkin dilakukan dengan skala milimeter. Pembacaan 20,0 cm menunjukkan bahwa hasil pengukuran data telah dibulatkan ke milimeter terdekat, hasil pengukuran bisa antara 19,95 cm dan 20,05 cm.

Gambar 12.1 menunjukkan hasil pengukuran amperemeter. Hasil pengukuran 1,36 A menunjukkan bahwa arus diukur hingga 0,01 A terdekat.

1.36

▲ Gambar 12.1 Hasil pengukuran Amperemeter

Nilai Hasil Perhitungan

Dalam tabel hasil, Anda mungkin perlu menghitung besaran lain. Ketika suatu nilai dihitung dari besaran terukur, ‘jumlah angka penting yang sesuai’ bergantung pada besaran terukur dengan jumlah angka penting paling sedikit. Nilai yang dihitung harus memiliki jumlah angka penting yang sama (atau satu angka penting lebih banyak) dari jumlah angka penting dalam besaran dengan angka penting paling sedikit. (Lihat Catatan Matematika tentang angka penting).

Misalnya, jika arus $I = 1,36 \text{ A}$ dan kuadrat arus (I^2) perlu dihitung,

$$I^2 = (1,36)^2 = 1.8496 \text{ A}^2$$

Judul kolom untuk ini adalah I^2/A^2 .

Karena I memiliki 3 angka penting, maka penulisan hasil perhitungan I^2 juga harus ditulis dalam 3 angka penting (atau satu angka penting lebih banyak), jadi penulisan yang sesuai adalah $1,85 \text{ A}^2$ atau $1,850 \text{ A}^2$.

Demikian pula untuk menghitung hambatan R dari arus I dan beda potensial V , untuk nilai $I = 0,24 \text{ A}$ dan $V = 4,52 \text{ V}$,

$$R = \frac{V}{I} = \frac{4,52}{0,24} = 18,8333333 \Omega$$

Karena I dituliskan dengan 2 angka penting dan V dituliskan dengan 3 angka penting, maka R harus dituliskan dengan 2 angka penting (atau satu angka penting lebih banyak), yaitu 19Ω atau $18,8 \Omega$.

Contoh:

Dalam sebuah percobaan, seorang siswa menyelidiki hubungan antara pertambahan panjang tali karet yang bervariasi dengan diameter tali. Panjang masing-masing tali adalah 80,0 cm. Sebuah massa 500 g digantung pada setiap tali. Siswa mengukur dan mencatat diameter d masing-masing tali menggunakan jangka sorong dan menentukan pertambahan panjang ΔL masing-masing tali menggunakan penggaris. Siswa kemudian menghitung nilai $1/d^2$ dan melengkapi tabel hasil, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 12.1.

Perhatikan satuan untuk $\frac{1}{d^2}$

Hasil pengukuran d menggunakan jangka sorong dinyatakan dalam 0,1 mm terdekat

d / mm	$\frac{1}{d^2} / \text{mm}^{-2}$	e / cm
1.0	1.0	4.2
1.2	0.69	2.9
1.4	0.51	2.1
1.6	0.39	1.6
1.8	0.31	1.3
2.0	0.25	1.0

Karena e diukur menggunakan penggaris, semua nilai hasil pengukuran dinyatakan ke milimeter terdekat. penulisan 1 cm atau 1,00 cm akan salah.

Hasil perhitungan $\frac{1}{d^2}$. Karena d ditulis dalam 2 angka penting, $\frac{1}{d^2}$ juga harus dihitung dalam 2 (atau 3) angka penting. Untuk baris pertama, 1,00 dapat diterima, tetapi 1 tidak dapat diterima.

▲ **Tabel 12.1** Tabel hasil pengukuran perubahan pertambahan panjang e dengan diameter d tali karet

Grafik

Grafik memungkinkan hasil eksperimen ditampilkan sehingga informasi lebih lanjut dapat diperoleh. Mirip dengan tabel hasil pengukuran, grafik harus selalu jelas. Disarankan agar Anda menggunakan pensil yang tajam dan penggaris transparan 30 cm.

Sumbu

Sumbu x dan sumbu y harus diberi label dengan besaran dan satuan sesuai konvensi ilmiah (lihat [Gambar 1.8](#) dalam [Topik 1](#)). Sangat mudah untuk melakukan hal ini dengan menyalin judul kolom yang relevan dari tabel data Anda.

Sangat penting untuk memperhatikan agar Anda dapat dengan mudah memetakan dan membaca data pada grafik yang dibuat. Skala yang sederhana harus digunakan pada setiap sumbu. Setiap 2 cm persegi harus mewakili nilai tertentu dan setiap pertambahan 2 cm persegi akan mewakili pertambahan 1 kali, 2 kali atau 5 kali nilai tertentu tersebut. Contoh penggunaan skala yang sederhana adalah (0,2), (0,4), (0,6), dan seterusnya (data setiap kali bertambah dengan nilai 0,2), contoh lain 50, 100, 150, dan seterusnya (pertambahan nilai data sebesar 50).

Skala pada setiap sumbu harus memungkinkan titik-titik yang digambarkan menempati setidaknya setengah skala grafik, baik dalam arah x maupun arah y.

Penempatan Titik Data (*Plotting of points*)

Anda harus menggambarkan titik-titik data tersebut menggunakan pensil yang tajam. Tandai setiap titik menggunakan tanda silang atau titik yang dilingkari. Diameter setiap titik harus kurang dari 1 mm. Ketebalan grafik yang diplot harus lebih baik dari 1 mm.

Sebelum Anda menggambar pola garis yang diharapkan, ada baiknya Anda memeriksa apakah titik-titik tersebut mengikuti pola yang diharapkan. Setiap titik yang tidak mengikuti pola garis yang diharapkan harus diperiksa ulang dan diplot ulang jika perlu. Data-data ini bisa menunjukkan pengukuran yang salah. Tindakan ini merupakan latihan yang baik untuk melakukan praktik mengulangi pengukuran.

Pola Garis yang Diharapkan (*trend line*)

Pola garis yang diharapkan (*trend line*) secara efektif dapat digunakan untuk menentukan nilai rata-rata hasil pengukuran Anda dan mengurangi kesalahan acak. Pola garis ini harus menunjukkan distribusi titik yang merata di kedua sisi garis. Garis ini belum tentu melewati semua titik. Menarik garis dari titik paling atas ke titik paling bawah mungkin tidak menghasilkan garis yang seimbang.

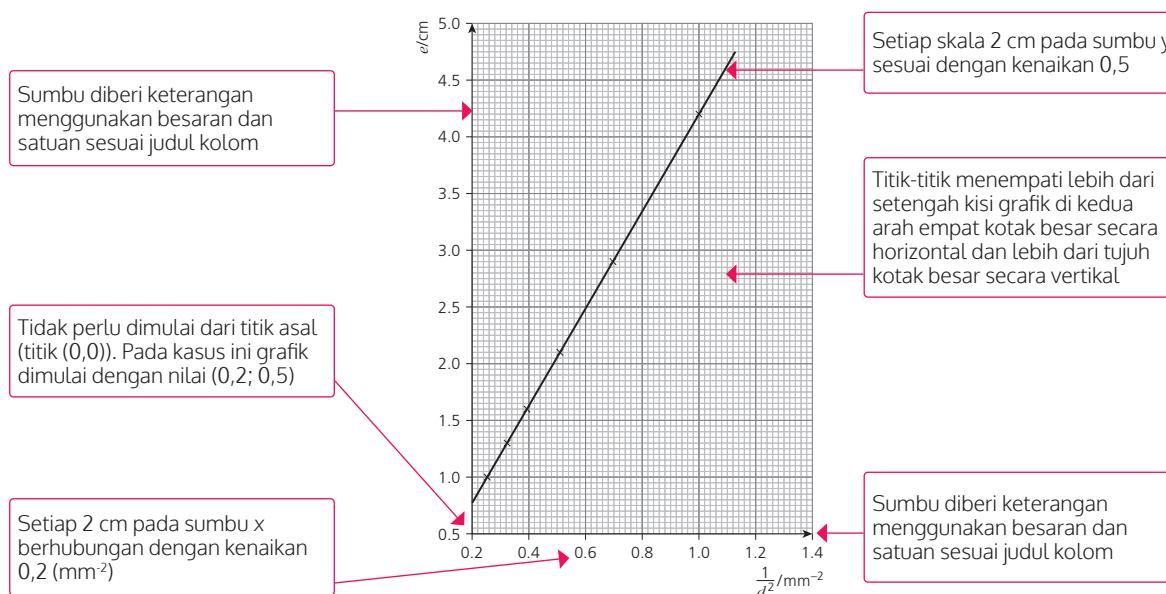
Sekali lagi, gunakan pensil tajam agar ketebalan garis kurang dari 1 mm. Untuk menggambar garis lurus, gunakan penggaris transparan 30 cm sehingga Anda dapat melihat semua plot dan memastikan tidak ada tonjolan pada garis.

Saat Anda memplot data Anda, jika ada satu titik yang tidak mengikuti pola yang diharapkan, lingkari titik ini dan beri label ‘anomali’. Saat Anda menggambar garis yang diharapkan, Anda harus mengabaikan titik anomali ini.

Bila pola yang diharapkan berupa kurva, Anda perlu menggambar kurva yang mulus. Cara terbaik adalah dengan memutar kertas grafik sehingga kurva terbentuk secara alami mengikuti gerakan pensil. Sekali lagi, kurva yang digambarkan mungkin tidak melewati setiap titik. Setelah Anda menggambarkan kurva Anda, Anda mungkin perlu menggambar garis singgung kurva pada titik tertentu.

Contoh:

Grafik pada gambar 12.2 menunjukkan data yang digambarkan dari Tabel 12.1.



▲ **Gambar 12.2** Grafik yang menunjukkan nilai pertambahan panjang e yang bervariasi terhadap diameter d tali karet

3 Analisis, Kesimpulan dan Evaluasi

Kemampuan menafsirkan grafik untuk mengambil kesimpulan hasil suatu percobaan merupakan hal yang sangat berguna. Grafik garis lurus sangat membantu untuk menentukan hubungan antar variabel. Persamaan garis lurus, $y = mx + c$, dengan m adalah gradien dan c adalah perpotongan grafik dengan sumbu y , dapat digunakan untuk membandingkan nilai besaran fisis. (Lihat Catatan Matematika pada pembahasan grafik garis lurus).

Interpretasi Grafik

Anda harus dapat membaca data berdasarkan grafik. Anda harus dapat membaca data grafik yang ketebalannya lebih baik dari 1 mm, dengan cara yang sama seperti Anda memplot data tersebut. Sangat membantu bila Anda membaca data dari perpotongan yang jelas pada kertas grafik – nilainya mungkin tidak sama dengan titik data yang diplot dari tabel data.

Grafik garis lurus berguna karena jumlah yang diplot pada sumbu x dan sumbu y dapat dikaitkan dengan persamaan garis lurus

$$y = mx + c$$

dengan m adalah gradien dan c adalah perpotongan y .

Sebagai contoh, perhatikan hubungan antara panjang L dari kawat logam dan arus I dalam rangkaian listrik.

$$\frac{1}{I} = \frac{K}{E}L + \frac{r}{E}$$

di mana E adalah gaya gerak listrik (ggl), dan K serta r adalah konstanta.

Bila grafik $1/I$ (sumbu y) diplot terhadap L (sumbu x), maka berdasarkan persamaan hubungan dari besaran-besaran ini adalah:

$$\text{gradien} = \frac{K}{E}$$

$$\text{Titik perpotongan sumbu } y = \frac{r}{E}$$

Jika ggl diukur, konstanta dapat ditentukan dengan menggunakan gradien dan perpotongan sumbu- y sebagai berikut:

$$K = E \times \text{gradien}$$

$$r = E \times \text{perpotongan sumbu } y$$

Satuan

Pada contoh di atas, jika I diukur dalam A , L diukur dalam cm, dan E diukur dalam V , maka

satuan dari $\frac{1}{I}$ adalah A^{-1}

satuan K adalah $V \times A^{-1} \text{cm}^{-1}$ atau $V A^{-1} \text{cm}^{-1}$ atau Ωcm^{-1}

satuan dari r adalah $V \times A^{-1}$ atau $V A^{-1}$ atau Ω

Menentukan Gradien dan Perpotongan dengan Sumbu y

Untuk menentukan gradien garis lurus atau garis singgung kurva, sebaiknya cari dua titik data (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) yang berada pada garis pola yang diharapkan. Titik tersebut harus mudah dibaca berdasarkan garis skala grafik dengan salah satu atau kedua nilai x dan y bertepatan dengan garis skala. Dua titik yang dipilih pada garis harus dipisahkan oleh lebih dari setengah panjang garis yang ditarik.

Gradien dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{gradien} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Anda harus menyertakan nilai pangkat sepuluh yang disertakan dalam keterangan yang ada di setiap sumbu.

Untuk menentukan perpotongan sumbu y dengan grafik garis lurus, bila sumbu x dimulai pada titik asal, perpotongan dengan sumbu y dapat dibaca langsung dari sumbu y . Data yang terbaca dari titik data harus lebih baik dari 1 mm.

Untuk menentukan perpotongan sumbu y , c , dengan grafik garis lurus bila sumbu x tidak dimulai dari titik nol koordinat, sebuah titik pada garis yang diharapkan dan nilai gradien harus disubstitusikan ke dalam persamaan garis lurus

$$y = mx + c$$

$$c = y - mx$$

Contoh Perhitungan Gradien dan Perpotongan Sumbu-y

Untuk grafik pada Gambar 12.2, gradien dapat ditentukan sebagai berikut.

Pilih dua poin: (0,40, 1,65) dan (1,10, 4,65). Kedua titik data ini terpisah lebih dari setengah panjang garis. Garis melintasi garis skala sehingga mudah untuk membaca nilainya.

$$\text{gradien} = \frac{4,65 - 1,65}{1,10 - 0,40} = \frac{3,00}{0,7} = 4,29$$

Karena sumbu x tidak dimulai dari titik nol (berawal dari 0,2), maka perpotongan sumbu y harus ditentukan dengan mensubstitusikan koordinat suatu titik pada grafik garis garis lurus dan gradien ke dalam persamaan garis lurus, $y = mx + c$. Cara sederhana untuk melakukannya adalah dengan menggunakan salah satu titik data dari perhitungan gradien.

Untuk [gambar 12.2](#),

$$c = y - mx = 1,65 - 4,29 \times 0,40 = -0,066$$

alternatif lain,

$$c = 4,65 - 4,29 \times 1,10 = -0,069$$

Anda tidak perlu khawatir tentang perbedaan antara kedua nilai tersebut. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh perbedaan pembulatan.

Untuk data yang diberikan pada [Tabel 12.1](#) dan grafik pada [gambar 12.2](#), relasi yang disarankan adalah:

$$e = PML \frac{1}{d^2} + Q$$

dimana M adalah massa yang terikat pada tali, L adalah panjang tali, serta P dan Q adalah konstanta.

Membandingkan persamaan ini dengan persamaan garis lurus,

$$\text{gradien} = PML$$

$$\text{Perpotongan grafik dengan sumbu-y} = Q$$

Menggunakan data yang diberikan, dimungkinkan untuk menentukan nilai dengan satuan yang sesuai untuk konstanta P dan Q .

$Q = \text{perpotongan grafik dengan sumbu-y} = -0,066 \text{ cm}$ (atau $-0,069 \text{ cm}$)

$$Q = -6,6 \times 10^{-4} \text{ m}$$

Perhatikan bahwa satuan (cm) sama dengan satuan dari judul sumbu y .

Untuk menentukan P , persamaan gradien perlu diatur ulang menjadi

$$P = \frac{\text{gradien}}{ML} = \frac{4,29}{0,500 \times 0,800} = 10,7$$

Namun, kita juga perlu mempertimbangkan satuan. Pertambahan panjang e diukur dalam satuan sentimeter dan diameter diukur dalam milimeter. Untuk menghitung gradien satuan-satuan tersebut perlu diubah ke satuan yang konsisten.

Dengan menggunakan meter baik untuk diameter maupun pertambahan panjang, akan menjadikan

$$\text{gradien} = \frac{3,00 \times 10^{-2}}{0,7 \times 10^6} = 4,29 \times 10^{-8} (\text{m}^3)$$

hal itu menunjukkan bahwa nilai $P = 10,7 \times 10^{-8} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$.

Untuk menentukan satuan konstanta, Anda perlu mengetahui awalan yang umum digunakan (lihat Tabel 1.5 dalam pembahasan Besaran, Satuan, Kesalahan dan Ketidakpastian) dan kepastian dalam menggunakan satuan turunan.

Memperkirakan ketidakpastian

Semua pengukuran memiliki ketidakpastian. Ketidakpastian pengukuran memberikan indikasi rentang nilai yang mungkin untuk hasil pengukuran.

Ketidakpastian tergantung pada alat ukur yang digunakan dan bagaimana pengukuran dilakukan.

Untuk memperkirakan ketidakpastian dalam suatu pengukuran, ketelitian instrumen sering digunakan. Misalnya, pada **Tabel 12.1** diameter kabel d diukur dengan menggunakan jangka sorong yang dapat mengukur hingga 0,1 mm terdekat. Skala terkecil dari jangka sorong menunjukkan bahwa hasil pengukuran pertama d dapat dicatat sebagai $1,0 \pm 0,1$ mm. ‘ $\pm 0,1$ ’ adalah ketidakpastian mutlak.

Tabel 1.7 pada pembahasan Besaran, Satuan, Kesalahan dan Ketidakpastian menunjukkan beberapa contoh ketidakpastian dalam berbagai instrumen pengukuran.

Ketidakpastian dalam bentuk pecahan dan ketidakpastian dalam bentuk persentase

Pernyataan ketidakpastian dalam bentuk pecahan atau persentase banyak digunakan.

$$\text{Ketidakpastian dalam bentuk pecahan} = \frac{\text{ketidakpastian mutlak}}{\text{hasil pengukuran}}$$

$$\text{Ketidakpastian dalam bentuk persentase} = \frac{\text{ketidakpastian mutlak}}{\text{hasil pengukuran}} \times 100$$

Ketika memperkirakan ketidakpastian mutlak dalam suatu pengukuran, metode pengukuran perlu dipertimbangkan. Untuk menentukan keliling silinder, seutas tali dapat dililitkan dengan erat di sekitar silinder. Kemudian, jika ada N lilitan tali dan panjang tali untuk N lilitan tersebut adalah L, nilai keliling silinder adalah L/N . Ketidakpastian hasil pengukuran tersebut tergantung pada ketebalan tali serta skala pada penggaris. Jelas, tali yang digunakan harus tipis, misalnya benang.

Menentukan ketidakpastian dalam pengukuran berulang

Pada banyak percobaan untuk melakukan pengukuran berulang dan menghitung nilai rata-rata dari hasil pengukuran tersebut, merupakan tindakan yang sangat tepat. Dalam percobaan untuk menentukan periode sebuah sistem getaran, pengukuran waktu umumnya dilakukan berulang untuk mengurangi kesalahan acak. Contoh lain, orang dapat melakukan pengukuran diameter sebuah kawat secara berulang di sepanjang kawat. Dalam hal ini, ketidakpastian absolut dalam pengukuran berulang adalah setengah dari selisih dari nilai tertinggi dan nilai terendah hasil tertinggi (jangkauan) pengukuran berulang. Misalnya, jika diameter kawat diukur lima kali sepanjang panjangnya dengan hasil yang diperoleh 0.93 mm, 0.87 mm, 0.95 mm, 0.91 mm dan 0.89 mm, maka

$$\text{Nilai rata-rata diameter} = \frac{0,93 + 0,87 + 0,95 + 0,91 + 0,89}{5} = 0,91\text{mm}$$
$$\text{setengah jangkauan} = \frac{\text{nilai tertinggi} - \text{nilai terendah}}{2} = \frac{0,95 - 0,87}{2} = 0,04\text{mm}$$

Jadi, diameter rata-rata kawat adalah $0,91 \pm 0,04$ mm.

Menarik kesimpulan

Kadang-kadang ada sejumlah hasil percobaan yang jumlahnya terbatas dan data yang diperoleh tidak mungkin digunakan untuk memplot grafik. Dalam kasus seperti ini, seringkali masih mungkin untuk menentukan nilai konstanta.

Misalnya, seorang siswa menyelidiki periode T bandul sederhana dan panjang L bandul untuk menentukan percepatan gravitasi g. Siswa mengulangi percobaan untuk panjang yang berbeda. Hasilnya adalah

$$L_1 = 80,2\text{ cm and } T_1 = 1,79\text{ s}$$

$$L_2 = 44,9\text{ cm and } T_2 = 1,35\text{ s}$$

Hubungan antara T dan L adalah

$$T_2 = \frac{4\pi^2 L}{g}$$

Percepatan gravitasi dapat ditentukan menggunakan masing-masing pasangan data:

$$g = \frac{4\pi^3 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 \times 80,2}{1,79^2} = 990 \text{ cms}^{-2}$$

dan

$$g = \frac{4\pi^3 L}{T^2} = \frac{4\pi^2 \times 44,9}{1,35^2} = 970 \text{ cms}^{-2}$$

Untuk menentukan apakah hubungan yang memuat konstanta ini didukung oleh data percobaan, persentase perbedaan antara dua nilai konstanta hasil percobaan harus dihitung dan dibandingkan dengan persentase ketidakpastian yang dapat diperhitungkan.

Untuk menghitung selisih persentase,

$$\text{selisih persentase} = \frac{\text{selisih kedua nilai}}{\text{salah satu nilai}} \times 100\%$$

atau

$$\text{selisih persentase} = \frac{\text{selisih kedua nilai}}{\text{nilai rata-rata}} \times 100\%$$

Maka

$$\text{selisih persentase} = \frac{20}{990} \times 100 = 2\%$$

atau

$$\text{selisih persentase} = \frac{20}{970} \times 100 = 2\%$$

atau

$$\text{selisih persentase} = \frac{20}{980} \times 100 = 2\%$$

Jika persentase ketidakpastian dalam percobaan ini bernilai 5%, dapat diambil kesimpulan bahwa data percobaan mendukung hubungan tersebut karena perbedaan persentase lebih kecil dari persentase ketidakpastian.

Mengidentifikasi keterbatasan dan menyarankan perbaikan

Saat melakukan kegiatan unjuk kerja, Anda harus terus mengevaluasi prosedur dan pengukuran sehingga data dan kesimpulan Anda akurat. Anda perlu memikirkan bagaimana akurasi percobaan tertentu dapat ditingkatkan.

Dengan demikian Anda perlu mempertimbangkan apakah Anda menggunakan alat ukur yang tepat. Misalkan, Anda dapat menggunakan penggaris dengan skala milimeter untuk mengukur diameter bagian dalam gelas kimia. Salah satu batasan yang mungkin dari prosedur ini adalah Anda hanya mengukur hingga milimeter terdekat. Kemungkinan

keterbatasan lain adalah sulit bagi Anda untuk menentukan diameter bagian dalam gelas kimia dengan mata. Perbaikan yang mungkin untuk kedua keterbatasan ini adalah dengan menggunakan jangka sorong yang mengukur hingga 0,1 mm terdekat atau mikroskop keliling (*travelling microscope*).

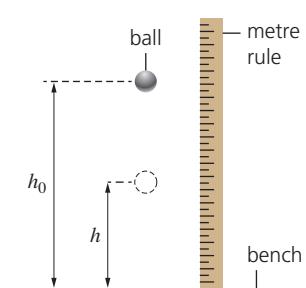
Anda harus mempertimbangkan ketidakpastian dalam pengukuran Anda. Misalnya, Saat mengukur panjang terhadap titik tengah tali tebal, ketidakpastian dalam pengukuran mungkin nilainya besar dan persentase ketidakpastian juga akan besar. Untuk memperbaiki prosedur tersebut, Anda mungkin harus menggunakan tali/kawat yang lebih tipis.

Metode sederhana untuk mengidentifikasi keterbatasan adalah dengan mempertimbangkan setiap besaran yang diukur atau ditentukan. Untuk setiap pengukuran, pertimbangkan ketidakpastian dalam pengukuran dan seberapa mudah atau sulit untuk melakukan pengukuran tertentu. Ketika Anda telah mengidentifikasi keterbatasan dalam pengukuran, Anda kemudian harus menggunakan pengalaman Anda dalam melakukan unjuk kerja untuk menyarankan perbaikan.

Keterbatasan dan peningkatan akan tergantung pada setiap percobaan dan akan mengharuskan Anda mempertimbangkan keterampilan praktis yang telah Anda peroleh selama pembelajaran. Contoh di bawah ini hanya gambaran, untuk membantu Anda memahami bagaimana Anda dapat mengembangkan keterampilan Anda dalam mengidentifikasi keterbatasan dan menyarankan perbaikan untuk eksperimen.

Contoh:

Pikirkan percobaan untuk menyelidiki ketinggian pantulan bola dari suatu permukaan, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 12.3](#).



▲ **Gambar 12.3**

- 1 Bola dijatuhkan dari ketinggian h_0 40,0 cm. Tinggi pantulan adalah h .
- 2 Sebuah penggaris meteran dengan skala milimeter dipegang dengan tangan untuk mengukur h_0 dan h .
- 3 Percobaan diulang untuk ketinggian 40,0 cm.
- 4 Langkah 1, 2 dan 3 kemudian diulang untuk ketinggian 80,0 cm.

Diperkirakan $h = kh_0$, di mana k adalah konstanta.

Ada sejumlah keterbatasan dalam percobaan ini dan beberapa kemungkinan perbaikan.

Baik pengukuran h_0 dan h bergantung pada penggaris meteran yang digunakan. Sulit untuk menjaga penggaris meteran tetap lurus dengan tangan, jadi solusi yang mungkin adalah menggunakan penjepit (clamp). Posisi penggaris meteran juga bisa jadi tidak benar-benar vertikal sehingga perbaikan lain yang bisa dilakukan adalah menggunakan segitiga siku-siku untuk mengatur posisi antara bangku dan penggaris. Akan sangat membantu bila Anda membuat sketsa perbaikan yang dilakukan tersebut.

Perhatikan pengukuran h_0 . Salah satu kekurangannya adalah sulit untuk menilai posisi awal bola dengan tepat. Cara yang mungkin dilakukan adalah dengan memasang tanda horizontal pada penggaris meteran. Anda juga perlu mengukur diameter bola sehingga Anda dapat mengidentifikasi posisi awal bola.

Sulit untuk mengukur ketinggian maksimum h sebagai tinggi pantulan. Untuk mengatasi kekurangan ini adalah menyiapkan kamera video yang ditempatkan pada perkiraan ketinggian pantulan, dan terlihat pada penggaris meteran. Dengan cara demikian ketinggian pantulan dapat direkam. Rekaman kemudian dapat diputar ulang dalam gerakan lambat untuk diamati bingkai demi bingkai saat bola mencapai ketinggian pantulan maksimumnya. Sebagai alternatif, jika kamera tidak tersedia, segitiga siku-siku dapat dipindahkan di sepanjang tepi penggaris sehingga segitiga siku-siku yang posisinya sejajar dengan posisi maksimum tinggi pantulan bola akan memperbaiki hasil pengukuran.

Karena tinggi pantulan h kecil dan ketidakpastiannya besar, persentase ketidakpastiannya akan tinggi. Percobaan tersebut dapat diperbaiki dengan mengurangi persentase ketidakpastian, caranya dengan meningkatkan tinggi awal h_0 , sehingga tinggi pantulan lebih besar nilainya.

Dalam percobaan ini, hanya dua pengukuran yang diambil untuk setiap ketinggian. Data ini tidak cukup untuk menentukan nilai k yang valid. Perbaikan yang dapat

dilakukan adalah dengan mengambil lebih banyak pasangan pengukuran h_0 dan h , dan memplot grafik h sebagai sumbu y dan h_0 sebagai sumbu x sehingga k sama dengan gradien.

Selama percobaan, bola mungkin memantul dari bangku ke lantai dan dapat menyebabkan bahaya tersandung. Perbaikan yang bisa dilakukan: menggunakan kotak sehingga bola tidak jatuh ke lantai.

4 Perencanaan

Perencanaan adalah keterampilan tingkat tinggi yang akan Anda kembangkan selama pembelajaran. Saat Anda memperoleh pengalaman lebih banyak dalam melakukan unjuk kerja, Anda akan belajar kapan dan bagaimana menggunakan peralatan laboratorium untuk melakukan pengukuran dan pengamatan. Unjuk kerja juga mengharuskan Anda untuk memahami bagaimana Anda dapat menyajikan pengukuran dan pengamatan Anda sehingga Anda dapat menganalisis data percobaan Anda. Agar dapat merencanakan percobaan dan penelitian dengan baik, Anda perlu berlatih menulis rencana dan kemudian melaksanakan rencana Anda. Anda kemudian perlu meninjau rencana Anda untuk melihat detail tambahan apa yang mungkin bisa disertakan.

Ada empat tahap kunci untuk merencanakan percobaan atau penelitian.

Tahap 1 – Mendefinisikan masalah

Pada tahap awal, Anda perlu menentukan tujuan percobaan atau penelitian Anda. Anda mungkin memiliki hubungan hendak diuji dan/atau sebuah besaran yang akan ditentukan.

Anda harus mengidentifikasi bagaimana mengatur variasi perubahan sebuah besaran – besaran ini disebut variabel bebas (independen). Anda kemudian perlu mengidentifikasi besaran yang akan diukur sebagai akibat dari mengubah variabel bebas. Besaran ini disebut variabel terikat. Selanjutnya, untuk memastikan bahwa percobaan Anda tepat, Anda perlu mengidentifikasi besaran yang harus dipertahankan konstan.

Misalnya, pada contoh sebelumnya, seorang siswa menyelidiki bagaimana pertambahan panjang e dari tali

karet bervariasi dengan diameter d tali. Sebuah massa 500 g melekat pada setiap tali. Panjang masing-masing tali adalah 80,0 cm. Dalam percobaan ini, variabel bebasnya adalah diameter kabel – besaran ini diubah nilainya. Variabel terikatnya adalah pertambahan panjang – besaran ini ini diukur berdasarkan perubahan diameter.

Jumlah yang dijaga konstan, untuk memastikan pengujian yang tepat, adalah massa yang melekat pada kabel, panjang kabel dan bahan kabel.

Tahap 2 – Metode

Setelah Anda memahami percobaan yang akan dilakukan, Anda harus menjelaskannya secara rinci sehingga orang lain dapat mengikuti rencana tersebut dan melakukan percobaan dengan aman. Rencana tersebut harus mencakup deskripsi metode untuk mengubah nilai variabel bebas. Metode juga harus menjelaskan bagaimana variabel independen dan dependen akan diukur.

Deskripsi prosedur harus jelas dan mudah diikuti. Anda harus menyertakan alat ukur yang sesuai dengan ketelitian yang sesuai. Untuk meningkatkan deskripsi, sertakan diagram yang jelas disertai keterangan tentang bagaimana peralatan harus dirakit, contoh diagram sirkuit untuk menunjukkan bagaimana osiloskop terhubung.

Diagram dapat mencakup pengukuran yang perlu dilakukan. Misalnya, dalam percobaan untuk mengukur pertambahan panjang suatu benda, diagram dapat menyertakan label L_0 pada aturan untuk menunjukkan pengukuran awal dan label L_1 untuk menunjukkan pengukuran akhir panjang. Pernyataan bahwa pertambahan panjang = $L_1 - L_0$ juga harus disertakan.

Dalam deskripsi, Anda harus menyertakan metode bagaimana mengukur besaran lain yang diperlukan untuk analisis akhir. Misalnya, dalam penelitian untuk mengidentifikasi massa jenis cairan. Dalam hal ini, deskripsi harus mencakup bagaimana massa cairan diukur dan bagaimana volume cairan diukur, serta bagaimana kepadatan ditentukan.

Uraian juga harus mencakup rincian percobaan awal yang perlu dilakukan, atau mungkin kurva kalibrasi yang perlu diperoleh.

Seringkali menggunakan peralatan teknis untuk mengukur kuantitas sangat membantu. Misalnya, pembahasan listrik arus bolak-balik menjelaskan bagaimana osiloskop sering digunakan untuk mengukur tegangan dan waktu. Dari pengukuran tegangan dan periode pada osiloskop, Anda juga harus dapat menjelaskan bagaimana osiloskop dapat digunakan untuk menentukan arus dan frekuensi. Anda dapat menyarankan penggunaan peralatan pencatat data, seperti gerbang cahaya dan sensor gerak. Sekali lagi, rencana tersebut harus mencakup deskripsi rinci tentang posisi peralatan dan setiap pengukuran yang perlu dilakukan untuk menentukan jumlah yang dibutuhkan. Untuk mengukur jumlah yang berubah dengan sangat cepat, mungkin tepat untuk menggunakan kamera video dengan kemampuan untuk memutar dalam gerakan lambat atau bingkai demi bingkai. Dalam kasus seperti itu, rencana tersebut harus mencakup posisi kamera video.

Tahap 3 – Analisis

Pada tahap ini, Anda harus mengidentifikasi bagaimana pengukuran dan pengamatan yang Anda rencanakan dapat dianalisis. Biasanya hal ini akan dilakukan dengan memplot grafik. Idealnya, grafik harus berupa grafik garis lurus. Hal ini dapat dicapai dengan menyusun kembali hubungan yang diusulkan ke dalam persamaan garis lurus, $y = mx + c$. (Lihat Catatan Matematika tentang grafik garis lurus)

Dalam rencana Anda, Anda harus menyatakan secara eksplisit jumlah yang perlu diplot pada sumbu x dan sumbu y . Rencana Anda harus menyertakan penjelasan tentang bagaimana setiap konstanta dapat dihitung menggunakan gradien dan/atau perpotongan grafik dengan sumbu y yang diusulkan. Langkah ini bisa menunjukkan bahwa pengukuran lebih lanjut mungkin diperlukan.

Misalnya, seorang siswa menyelidiki bagaimana periode T dari getaran massa yang dipasang pada pegas berubah berdasarkan massa m dari sistem getaran. Hubungan antara T dan M yang disarankan adalah

$$T = A\sqrt{\frac{m}{k}}$$

dimana k adalah konstanta pegas dan A adalah konstanta.

Siswa memutuskan untuk melakukan percobaan untuk menentukan nilai konstanta A . Siswa mengidentifikasi bahwa massa m adalah variabel bebas dan periode T adalah variabel terikat. Siswa juga mengidentifikasi bahwa, agar percobaan tersebut akurat, k harus dijaga konstan – pegas yang sama harus digunakan dalam percobaan, sehingga konstanta pegas tetap sama. Siswa merencanakan percobaan untuk memvariasikan m dan mengukur T , dan menggambarkan percobaan untuk menentukan konstanta pegas k .

Untuk menentukan A , siswa mengatur ulang persamaan dengan mengkuadratkan kedua sisi untuk mendapatkan persamaan

$$T^2 = \frac{A^2}{k} m$$

Bila persamaan tersebut dibandingkan dengan persamaan garis lurus, $y = mx + c$, maka siswa dapat memplot grafik T^2 pada sumbu y dan m pada sumbu x .

Membandingkan persamaan di atas dengan persamaan garis lurus berarti bahwa

$$\text{gradien} = \frac{A^2}{k}$$

perpotongan sumbu- y = 0

Mengatur ulang gradien dengan A sebagai nilai yang diperoleh

$$\text{gradien} = \sqrt{k \times \text{gradien}}$$

Perhatikan, siswa dapat membuat grafik dengan T pada sumbu y dan m pada sumbu x , tetapi lebih baik tidak menghitung akar kuadrat.

Saat Anda merencanakan percobaan, Anda harus dapat menguji hubungan dari bentuk-bentuk berikut:

- ∅ $y = mx + c$, di mana m adalah gradien dan c adalah perpotongan sumbu- y .
- ∅ $y = ax^n$, dimana a dan n adalah konstanta
- ∅ $y = ae^{kx}$, dimana a dan k adalah konstanta (hubungan eksponensial)

Silakan lihat bagian di bawah ini, yaitu tentang menguji hubungan dan penggunaan logaritma.

Tahap 4 – Pertimbangan keamanan

Saat merencanakan percobaan, Anda harus mempertimbangkan bahaya spesifik apa pun yang dapat menjadi bahaya bagi Anda atau orang lain di laboratorium. Kegiatan ini adalah praktik yang baik untuk melakukan penilaian risiko keselamatan semua kegiatan. Penilaian risiko ini harus mencakup penjelasan mengapa setiap tindakan pencegahan keselamatan diperlukan dan bagaimana tindakan pencegahan membantu meminimalkan risiko. Contohnya termasuk penggunaan kacamata untuk mencegah kabel logam merusak mata seseorang jika kabel putus dan mematikan catu daya ‘tegangan tinggi’ saat tidak digunakan untuk mencegah bahaya sengatan listrik.

Menguji hubungan dan penggunaan logaritma

Idealnya, untuk menguji hubungan yang diusulkan, grafik yang diplot harus menghasilkan garis lurus. Namun, dalam pembelajaran, Anda akan menemukan hubungan yang tidak mengikuti persamaan garis lurus, $y = mx + c$. Salah satu solusi untuk ini adalah dengan menggunakan logaritma.

Persamaan bentuk $P = aQ^n$

Salah satu jenis percobaan yang menggunakan logaritma adalah ketika Anda perlu mencari hubungan antara dua variabel, P dan Q , dan hubungan antara P dan Q berbentuk

$$P = aQ^n$$

dimana a dan n adalah konstanta.

Mengambil logaritma ke basis 10 dari kedua sisi persamaan

$$\lg P = \lg a + n \lg Q \quad \text{atau} \quad \log P = n \log Q + \log a$$

Membandingkan persamaan di atas dengan persamaan garis lurus, grafik $\log P$ pada sumbu y dan $\log Q$ pada sumbu x akan memberikan

$$\text{gradien} = n$$

$$\text{perpotongan sumbu-}y = \log a$$

Dengan demikian, untuk menentukan a,

$$a = 10^{\text{perpotongan sumbu-y}}$$

Hubungan bentuk $Y = Y_0 e^{-bx}$

Jenis percobaan lain di mana Anda mungkin diminta untuk menemukan hubungan antara dua variabel, Y dan x, adalah ketika hubungan antara Y dan x berbentuk

$$Y = Y_0 e^{-bx}$$

dimana Y_0 dan b adalah konstanta.

Jenis hubungan ini terjadi, misalnya, dalam Topik tentang Pengosongan Kapasitor, Peluruhan radioaktif dan Produksi dan penggunaan sinar-X.

Ambil logaritma bilangan natural (logaritma berbasis e) dari kedua sisi persamaan

$$\ln Y = \ln Y_0^{-bx} \quad \text{atau} \quad \ln Y = -bx + \ln Y_0$$

Bandingkan persamaan tersebut dengan persamaan garis lurus, grafik $\ln Y$ pada sumbu y dan x pada sumbu-x akan memberikan

$$\text{gradien} = -b$$

$$\text{perpotongan dengan sumbu y} = \ln Y_0$$

Jadi, untuk menentukan Y_0 ,

$$Y_0 = e^{\text{perpotongan sumbu-y}}$$

Angka penting dalam logaritma

Perhatikan panjang L diukur dengan penggaris dengan skala milimeter.

Jika $L = 44,6$ cm maka $\log(L/cm) = 1,649334 \dots$

Perhatikan bahwa $\log(L/cm)$ digunakan, dan bukan $\log L/cm$, karena logaritma suatu kuantitas tidak memiliki satuan. Hal ini menunjukkan bagaimana besaran harus ditulis dalam tabel hasil dan pada sumbu grafik.

Memungkinkan juga untuk menggunakan $\lg(L/mm)$.

Jika $L = 446$ mm maka $\log(L/mm) = 2,649334$.

Dalam hal ini, digit sebelum tempat desimal telah berubah. Dalam kedua kasus, L telah dicatat menjadi 3 angka penting. Untuk nilai logaritmik, jumlah tempat desimal harus sesuai dengan jumlah angka penting. Jumlah tempat

desimal dalam besaran logaritmik harus sama dengan (atau lebih satu dari) jumlah angka penting dalam data hasil pengukuran.

Dalam contoh ini, jika $L = 44,6$ cm maka $\lg(L/\text{cm})$ harus dicatat dalam tabel hasil sebagai 1,649 (atau 1,6493).

Perlakuan lanjutan dari ketidakpastian yang ditemukan

Sepanjang pembelajaran Anda, Anda harus memperkirakan ketidakpastian (mutlak) dalam pengukuran dan menghitung ketidakpastian pecahan atau ketidakpastian persentase dari ketidakpastian absolut. Untuk mengubah ketidakpastian pecahan atau ketidakpastian persentase menjadi ketidakpastian absolut, digunakan metode kebalikan.

$$\text{ketidakpastian absolut} = \frac{\text{ketidakpastian persentase kuantitas}}{100} \times \text{besaran}$$
$$= \text{ketidakpastian pecahan} \times \text{besaran}$$

Misalnya, jika pengukuran beda potensial V adalah $9,2 \text{ V} \pm 2\%$, ketidakpastian absolut diberikan oleh

$$\text{ketidakpastian absolut} = \frac{2}{100} \times 9,2 = 0,1844$$

Jadi, $V = 9,2 \pm 0,2 \text{ V}$.

Menggabungkan ketidakpastian

Ada dua aturan sederhana untuk menggabungkan ketidakpastian:

- 1** Untuk besaran yang ditambahkan atau dikurangkan untuk memberikan hasil akhir, tambahkan ketidakpastian mutlak.
- 2** Untuk besaran yang dikalikan atau dibagi untuk memberikan hasil akhir, tambahkan ketidakpastian pecahan atau persentase.

Perhatikan bahwa aturan 2 berlaku untuk besaran yang dipangkatkan. Misalnya, perhatikan panjang L sisi kubus. Volume $V = L^3 = L \times L \times L$. Jika $L = 25 \pm 1 \text{ mm}$, maka

$$\text{Persentase ketidakpastian dalam } L = \frac{1}{25} \times 100 = 4\%$$

$$\text{Persentase ketidakpastian dalam } L^3 = 4\% + 4\% + 4\% = 12\%$$

Jadi, volumenya adalah $25^3 = 15.625 \text{ mm}^3 \pm 12\%$, yang ditulis sebagai $16.000 \pm 2000 \text{ mm}^3$.

Secara umum, jika persentase ketidakpastian pada X adalah P , maka persentase ketidakpastian pada X^n adalah nP .

Untuk menggabungkan ketidakpastian di mana beberapa kuantitas dipangkatkan, misalnya $x = Ay^a z^b$, dimana A adalah konstanta, aturannya adalah mengalikan ketidakpastian pecahan dengan pangkat, jadi

$$\frac{\Delta y}{x} = a \times \frac{\Delta y}{y} + b \times \frac{\Delta y}{z}$$

Demikian pula, persentase ketidakpastian dalam x diberikan oleh

$$\frac{\Delta y}{x} \times 100 = a \times \frac{\Delta y}{y} \times 100 + b \times \frac{\Delta y}{z} \times 100$$

Metode maksimum dan minimum untuk menentukan ketidakpastian

Ketidakpastian mutlak dapat ditentukan dengan menggunakan metode maksimum dan minimum. Dalam contoh di atas, volume maksimum V_{\max} dan volume minimum V_{\min} diberikan oleh

$$V_{\max} = (25 + 1)^3 = 17576$$

$$V_{\min} = (25 - 1)^3 = 13824$$

Ketidakpastian mutlak dalam V dapat diberikan oleh

$$\begin{aligned} \text{ketidakpastian mutlak} &= V_{\max} - V = 17576 - 15625 \\ &= 1951 \approx 2000 \end{aligned}$$

atau

$$\begin{aligned} \text{ketidakpastian mutlak} &= V - V_{\min} = 17576 - 13824 \\ &= 1801 \approx 2000 \end{aligned}$$

atau

$$\text{ketidakpastian mutlak} = \frac{(V_{\max} - V_{\min})}{2} = \frac{(17576 - 13824)}{2} = 1876 \approx 2000$$

Metode ini sering digunakan ketika menyelesaikan ketidakpastian dalam jumlah yang dihitung dalam tabel hasil. Ketidakpastian jawaban akhir biasanya diberikan pada 1 angka penting. Dalam tabel hasil, lebih dari 1 angka signifikan dapat diterima.

Perhatikan bahwa kehati-hatian diperlukan ketika mengerjakan ketidakpastian di mana satu besaran dibagi dengan yang lain. Misalnya, ketika menghitung konstanta pegas k dari gaya F dan pertambahan panjang x ,

$$\max k = \frac{\max F}{\min x} \quad \text{dan} \quad \min k = \frac{\min F}{\max x}$$

Ketidakpastian pada grafik

Dalam tabel hasil, Anda mungkin memiliki ketidakpastian aktual untuk satu atau kedua besaran yang grafiknya akan diplot (lihat [Tabel 12.2](#)). Ketidakpastian ini diplot pada grafik sebagai error bar untuk setiap titik data (lihat gambar 2.4 di atas). Pensil dengan jejak halus (tipis) harus digunakan untuk menggambarkan hal ini. Ekstremitas error bar ditunjukkan oleh garis pendek di sudut kanan ke arah error bar.

Garis lurus yang paling sesuai harus ditarik, seperti yang telah dijelaskan. Untuk memperkirakan ketidakpastian dari grafik, garis lurus terburuk yang dapat diterima juga harus ditarik. Garis terburuk yang dapat diterima adalah garis paling curam atau paling dangkal yang melewati semua error bar, memungkinkan adanya titik anomali. Garis terburuk yang dapat diterima harus diberi label seperti itu atau digambar sebagai garis putus-putus. Ini adalah latihan yang baik untuk memastikan bahwa semua tanda hubung melewati error bar dengan jelas.

Setelah Anda menggambar garis terburuk yang dapat diterima, gradien dan perpotongan y dari garis ini dapat ditentukan. Anda harus berhati-hati untuk membaca informasi yang benar dari grafik Anda.

Untuk memperkirakan ketidakpastian absolut dalam gradien

$$\text{ketidakpastian absolut} = \frac{\text{gradien garis yang paling cocok} - \text{gradien garis yang paling buruk yang dapat diterima}}{\text{atau}}$$

$$\text{ketidakpastian absolut} = \frac{\text{gradien garis yang paling cocok} - \text{gradien paling dangkal dari garis paling buruk yang dapat diterima}}{2}$$

Untuk memperkirakan ketidakpastian absolut dalam perpotongan y

$$\text{ketidakpastian mutlak} = \frac{\text{perpotongan } y \text{ dari garis yang paling cocok}}{\text{perpotongan } y \text{ dari garis yang paling buruk yang dapat diterima}}$$

atau

$$\begin{aligned} \text{ketidakpastian mutlak} &= \frac{\text{perpotongan } y \text{ paling curam dari garis paling buruk yang dapat diterima}}{\text{perpotongan } y \text{ paling dangkal dari garis yang paling buruk yang dapat diterima}} \end{aligned}$$

2

Jawaban akhir dalam eksperimen apa pun harus dinyatakan sebagai nilai, perkiraan ketidakpastian, dan satuan. Misalnya, volume kubus yang dijelaskan di atas harus ditulis sebagai $(16.000 \pm 2.000) \text{ mm}^3$.

Contoh

Dalam sebuah percobaan, periode T dari getaran massa yang digantung pada pegas ditentukan dengan mengukur waktu t untuk 10 getaran. Pengukuran t diulang dua kali. Percobaan kemudian diulang untuk nilai massa m yang berbeda.

Hubungan antara periode T dan massa m dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$T = 2\pi A m^q$$

dimana A dan q adalah konstanta.

Persamaan dapat diubah sehingga grafik garis lurus dapat diplot dengan mengambil logaritma bilangan dasar 10 dari kedua sisi

$$\log T = q \log m + \log 2\pi A$$

Grafik $\log T$ terhadap $\lg m$ akan menguji hubungan ini.

Massa diukur pada neraca dengan persentase ketidakpastian 5%.

Tabel hasil percobaan ini harus terdiri dari kolom untuk pengukuran massa m dan waktu t untuk 10 getaran. Tabel juga harus menyertakan kolom untuk nilai yang dihitung dari rata-rata t , T , $\lg m$ dan $\lg T$. Kolom untuk m dan $\lg(m/g)$ juga akan memiliki ketidakpastian mutlak.

Menentukan ketidakpastian mutlak dalam m dan $\lg(m/g)$

Karena persentase ketidakpastian dalam m adalah 5%, untuk baris pertama dalam tabel hasil, ketika $m = 100\text{ g}$, ketidakpastian absolutnya adalah $5\% \times 100\text{ g} = 5\text{ g}$. Artinya, besaran pertama harus ditulis 100 ± 5 . (Ingat bahwa satuan tidak termasuk dalam badan tabel; satuan ditunjukkan pada judul kolom).

Untuk baris kedua, ketidakpastian absolut dalam m adalah $5\% \times 150 = 7,5$, yaitu 150 ± 8 . Metode serupa digunakan untuk baris berikutnya. Dalam tabel hasil, adanya lebih dari 1 angka penting dalam ketidakpastian absolut, misal pada baris keempat dari data 250 ± 13 , dapat diterima (lihat Tabel 12.2).

Sekarang ketidakpastian dalam m diketahui, dengan demikian ketidakpastian dalam $\log(m/g)$ dapat ditentukan.

Di baris pertama, $\log(100) = 2$. Karena massa ditulis dalam 3 angka penting, $\log(100)$ juga harus memiliki 3 (atau 4) tempat desimal, yaitu 2,000 (atau 2,0000).

Untuk menghitung ketidakpastian dalam $\log(100 \pm 5)$,

$$\log(105) = 2,021$$

$$\log(95) = 1,978$$

ketidakpastian dalam $\log(100 \pm 5)$ adalah

$$2,021 - 2,000 = 0,021$$

atau

$$2,000 - 1,978 = 0,022$$

atau

$$\frac{1}{2} \times (2,021 - 1,978) = 0,0215$$

Seperti yang ditunjukkan, salah satu dari nilai-nilai ini dapat diterima.

Tabel 12.2 menunjukkan tabel hasil lengkap.

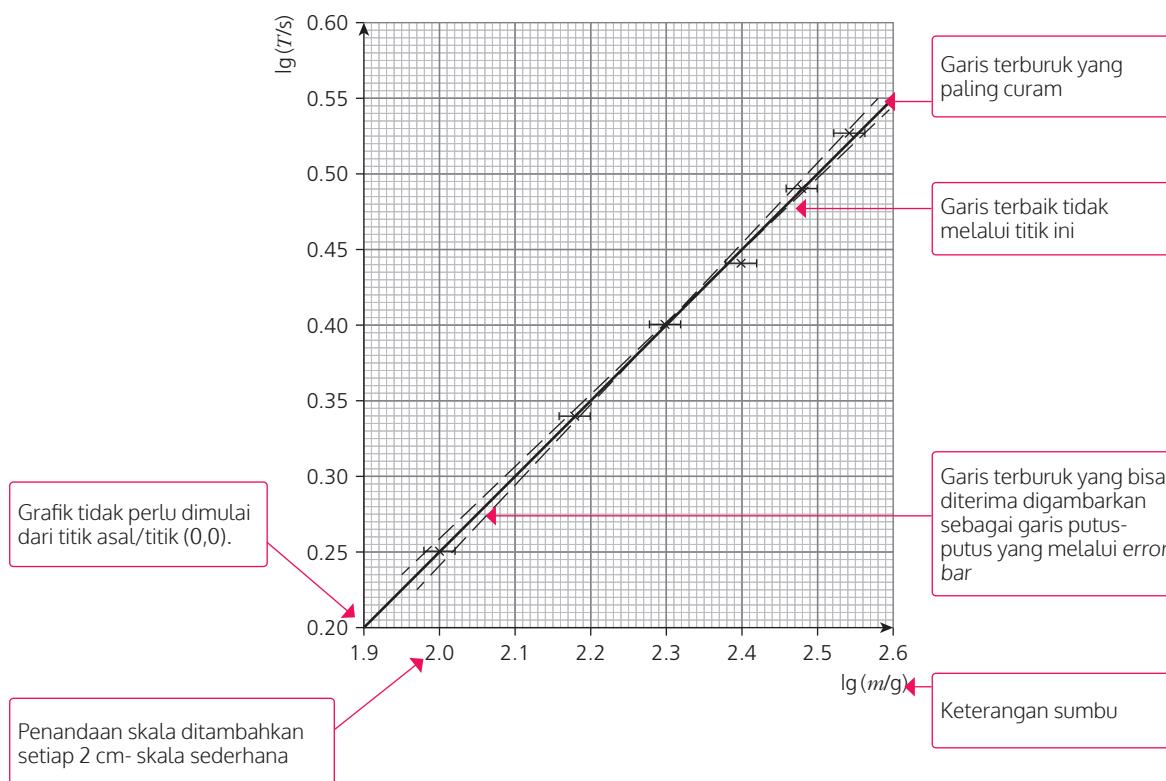
m/g	$t\ 1/s$	$t\ 1/s$	rerata t/s	t/s	$\log(m/g)$	$\log(t/s)$
100 ± 5	17,6	18,0	17,8	1,78	$2,000 \pm 0,021$	0,250
150 ± 8	22,0	21,6	21,8	2,18	$2,176 \pm 0,023$	0,338
200 ± 10	24,9	25,3	25,1	2,51	$2,301 \pm 0,022$	0,400
250 ± 13	27,4	27,8	27,6	2,76	$2,398 \pm 0,023$	0,441
300 ± 15	31,0	30,6	30,8	3,08	$2,477 \pm 0,022$	0,489
350 ± 18	33,3	33,7	33,5	3,35	$2,544 \pm 0,022$	0,525

▲ Tabel 12.2

Karena m dicatat dalam 3 angka penting, $\log(m/g)$ harus ditulis dalam 3 (atau 4) tempat desimal

Karena t dicatat dalam 3 angka penting, $\log(t/s)$ harus ditulis dalam 3 (atau 4) tempat desimal

Grafik kemudian dapat diplot dari $\log(T/s)$ terhadap sumbu y terhadap $\log(m/g)$ pada sumbu x, seperti yang ditunjukkan pada gambar 12.4.



▲ Gambar 12.4

Menentukan gradien, dan ketidakpastiannya

Gradien dari garis yang paling tepat ditentukan dengan menggunakan metode yang telah dibahas. (Lihat Catatan Matematika tentang grafik garis lurus).

Dua titik data dipilih dari garis yang paling tepat pada gambar 12.4 dan disubstitusikan ke dalam persamaan untuk menghitung gradien.

$$\text{gradien} = \frac{0,520 - 0,225}{2,54 - 1,95} = \frac{0,295}{0,59} = 0,50$$

Gradien dari garis terburuk yang paling curam atau paling dangkal dari gambar 12.4 kemudian ditentukan dengan menggunakan prinsip yang sama dengan yang digunakan untuk menentukan gradien.

$$\text{Gradien yang paling curam} = \frac{0,535 - 0,235}{2,55 - 1,99} = \frac{0,300}{0,56} = 0,536$$

$$\text{Gradien yang paling dangkal} = \frac{0,520 - 0,235}{2,55 - 1,95} = \frac{0,285}{0,6} = 0,475$$

Ketidakpastian dalam gradien adalah

$$0,536 - 0,50 = 0,036 \text{ atau}$$

$$0,50 - 0,475 = 0,025 \text{ atau}$$

$$(0,536 - 0,475)/2 = 0,031$$

Menentukan perpotongan sumbu-y, termasuk ketidakpastiannya

Karena sumbu x pada [gambar 12.4](#) tidak dimulai dari titik asal, perpotongan sumbu-y harus ditentukan dengan mensubstitusikan koordinat titik pada garis yang paling tepat dan gradien ke dalam persamaan garis lurus,
 $y = mx + C$. Cara sederhana untuk melakukannya adalah dengan menggunakan salah satu titik data dari perhitungan gradien.

Untuk grafik pada [gambar 12.4](#),

$$\begin{aligned}\text{perpotongan sumbu-y dari garis paling tepat} &= y - mx \\ &= 0,520 - 0,50 \times 2,54 = -0,75\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{perpotongan garis tercuram } y &= y - mx \\ &= 0,535 - 0,536 \times 2,55 = -0,83\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{perpotongan garis terdangkal } y &= y - mx \\ &= 0,520 - 0,475 \times 2,55 = -0,69\end{aligned}$$

Ketidakpastian dalam perpotongan y adalah

$$-0,83 - (-0,75) = 0,08 \text{ atau}$$

$$-0,75 - (-0,69) = 0,06 \text{ atau}$$

$$(-0,83 - (-0,69))/2 = 0,07$$

Menentukan konstanta A dan q, termasuk ketidakpastiannya

Karena $\log T = q \log m + \log 2\pi A$,

$$\text{gradien} = q = 0,50 \pm 0,05$$

$$\text{perpotongan sumbu-y} = \log 2\pi A$$

$$10^{\text{perpotongan sumbu-y}} = 2\pi A$$

Ingat ‘log’ mewakili logaritma dengan bilangan dasar 10.

$$A = \frac{10^{\text{perpotongan sumbu-y}}}{2\pi} = \frac{10^{-0,75}}{2\pi} = 0,028$$

Menggunakan garis paling curam,

$$A = \frac{10^{\text{perpotongan sumbu-y}}}{2\pi} = \frac{10^{-0,83}}{2\pi} = 0,024$$

Menggunakan garis paling dangkal,

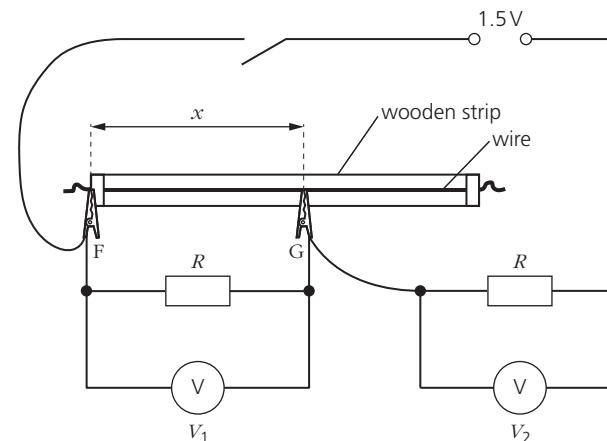
$$A = \frac{10^{\text{perpotongan sumbu-y}}}{2\pi} = \frac{10^{-0,69}}{2\pi} = 0,032$$

Dengan demikian,

$$A = 0,028 \pm 0,004$$

ASESMEN FORMATIF

- 1 Anda mungkin tidak perlu menggunakan semua materi yang disediakan. Dalam percobaan ini, Anda akan menyelidiki rangkaian listrik.
- a Atur rangkaian seperti diperlihatkan pada Gambar 12.5



▲ Gambar 12.5

F dan G adalah penjepit (klip) buaya.

- Tempatkan G pada kawat sehingga jarak x antara ujung F dan G kira-kira 40 cm.
- Ukur dan catat x.
- Tutup saklar.
- Catat tegangan V₁ dan V₂.
- Buka saklar. [2]

- b Ubah nilai x sampai Anda memiliki enam set hasil pengukuran x, V₁ dan V₂.

Catat hasil Anda dalam sebuah tabel. Sertakan nilai (V₂ – V₁) dan V₁/x di tabel Anda. [10]

- c i Gambarkan grafik (V₂ – V₁) pada sumbu y terhadap sumbu x. [3]
 ii Gambarlah garis lurus yang paling sesuai. [1]
 iii Tentukan gradien dan perpotongan y dari garis ini. [2]

- d Diketahui bahwa besaran V₂, V₁ dan x dihubungkan oleh persamaan:

$$(V_2 - V_1) = \frac{PV_1}{x} + Q$$

dengan P dan Q adalah konstanta.

Dengan menggunakan jawaban Anda di c. iii., tentukan nilai untuk P dan Q. Berikan satuan yang sesuai.

[2]

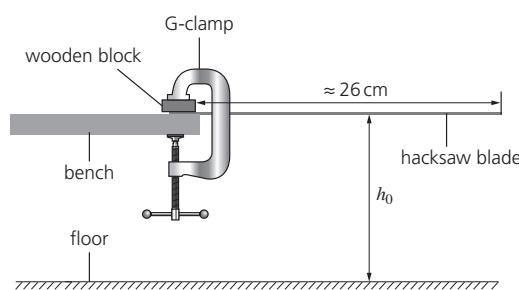
[Total skor: 20]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 33 Q1 May/June 2018

- 2** Anda mungkin tidak perlu menggunakan semua materi yang disediakan.

Dalam percobaan ini, Anda akan menyelidiki gerakan mata gergaji besi.

- a** Rangkai peralatan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



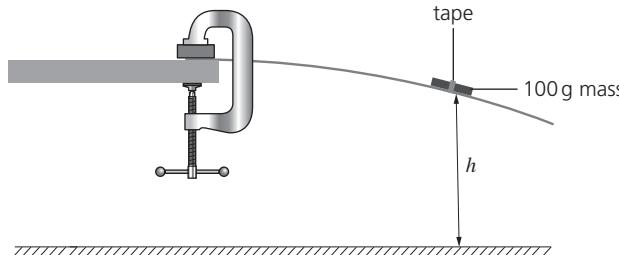
▲ Gambar 12.6 (Gambar tidak menggambarkan skala yang sebenarnya)

Jarak vertikal dari lantai ke permukaan atas mata gergaji besi adalah h_0 , seperti yang ditunjukkan pada gambar 12.6.

Ukur dan catat nilai h_0 .

[1]

- b i** Tempatkan massa 100 g pada bilah dengan pusatnya sekitar 19 cm dari bangku penyangga dan rekatkan pada posisinya.
- c** Saat dilepaskan, bilah gergaji besi akan membengkok, seperti yang ditunjukkan pada gambar 12.7.



▲ Gambar 12.7 (Gambar tidak menggambarkan skala yang sebenarnya)

Jarak vertikal dari lantai ke permukaan atas mata gergaji besi di pusat massa adalah h .

Ukur dan catat nilai h .

[1]

i Hitung y , di mana $y = h_0 - h$. [1]

d Perkirakan persentase ketidakpastian pada nilai y Anda. [1]

e Dorong ujung mata gergaji besi sedikit ke bawah, lalu lepaskan. Pisau akan bergerak dengan lambat. Tentukan periode T getaran tersebut. [2]

f Pindahkan massa yang ditempatkan kira-kira 3 cm lebih jauh dari bangku penyangga dan lekatkan kembali dengan selotip.

Ukur dan catat nilai h .

Ulangi **b ii** dan **d**. [3]

g Hubungan antara T dan y memenuhi persamaan:

$$T = c \sqrt{y}$$

c adalah konstanta

i Gunakan data Anda, untuk menghitung dua nilai c . [1]

ii Jelaskan apakah hasil Anda mendukung hubungan yang disarankan. [1]

h Teori menunjukkan bahwa nilai perkiraan percepatan gravitasi g diberikan oleh:

$$g = \frac{4\pi^2}{c^2}$$

Menggunakan nilai kedua dari c , hitung nilai g .

Gunakan satuan yang sesuai. [1]

i **i** Jelaskan empat sumber ketidakpastian atau keterbatasan prosedur untuk percobaan ini. [4]

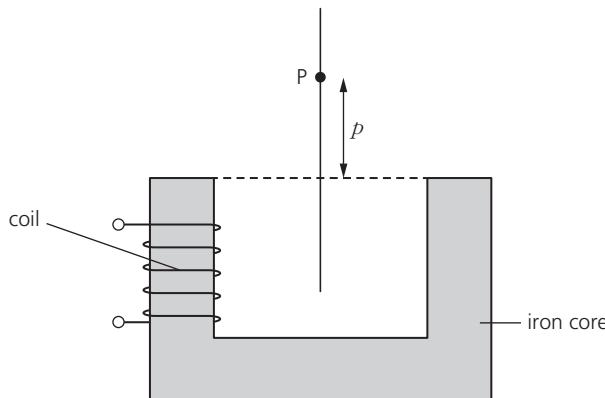
ii Jelaskan empat perbaikan yang dapat dilakukan untuk percobaan ini.

Anda dapat menyarankan penggunaan peralatan lain atau prosedur yang berbeda. [4]

[Total skor: 20]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 36 Q2 Oct/Nov 2018

- 3 Seorang siswa menggunakan probe Hall untuk menyelidiki kerapatan fluks magnet yang disebabkan elektromagnet berbentuk U, seperti yang ditunjukkan pada gambar 12.8.



▲ Gambar 12.8

Titik P berjarak sama dari kutub-kutub elektromagnet dan jarak p adalah jarak vertikal antara P dan puncak elektromagnet. Kerapatan fluks magnet di titik P adalah B . Hubungan antara B dan p dinyatakan dengan persamaan:

$$B = kNIe^{-\alpha p}$$

N adalah jumlah lilitan pada kumparan, I adalah arus dalam kumparan dan k adalah konstanta.

Rancang percobaan laboratorium menggunakan probe Hall untuk menguji hubungan antara B dan p . Jelaskan bagaimana hasil Anda dapat digunakan untuk menentukan nilai k .

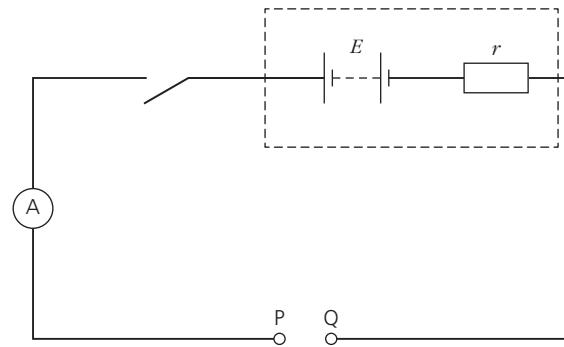
Anda harus menggambar diagram untuk menunjukkan susunan peralatan Anda. Dalam proses perhitungan, Anda harus memberi perhatian pada:

- prosedur yang harus diikuti,
- pengukuran yang akan dilakukan,
- variabel kontrol ,
- analisis data,
- tindakan pencegahan keselamatan apa saja yang harus dilakukan

[Total skor: 15]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 52 Q1 Oct/Nov 2016

- 4 Seorang siswa sedang meneliti arus dalam suatu rangkaian listrik. Rangkaian diatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 12.9.



▲ Gambar 12.9

Masing-masing resistor yang memiliki nilai hambatan R , dihubungkan secara paralel antara titik P dan Q .

Ukur arus listrik I yang mengalir. Kemudian ulangi percobaan dengan jumlah resistor n yang antara P dan Q . Hubungan antara I dan n memenuhi persamaan:

$$E = I \left(\frac{R}{n} + r \right)$$

dengan E adalah gaya gerak listrik (ggl) dan r adalah hambatan dalam dari power supply.

- a Grafik diplot dengan nilai $1/I$ pada sumbu y terhadap $1/n$ pada sumbu x.
Tentukan persamaan untuk gradien dan titik perpotongan dengan sumbu y. [1]
- b Nilai n , I dan diberikan pada gambar 2.10.

n	I/mA	$1/n$	$1/I/\text{A}^{-1}$
2	34 ± 2	0.50	
3	46 ± 2	0.33	
4	56 ± 2	0.25	
5	66 ± 2	0.20	
6	76 ± 2	0.17	
7	84 ± 2	0.14	

▲ Gambar 12.10

Hitung dan catat nilai $1/I / \text{A}^{-1}$ pada gambar 12.10. termasuk nilai ketidakpastian mutlaknya [2]

- c i Plot grafik $1/I / \text{A}^{-1}$ pada gambar 2.10 terhadap $1/n$, termasuk error bar dari data tersebut. [2]

- ii** Gambarlah garis lurus yang paling tepat dan garis lurus yang paling buruk yang dapat diterima pada grafik Anda. Kedua garis harus diberi label yang jelas. [2]
- iii** Tentukan gradien untuk garis lurus yang paling tepat. Sertakan ketidakpastian mutlak dalam jawaban Anda. [2]
- iv** Tentukan perpotongan dengan sumbu y dari garis yang paling tepat. Sertakan ketidakpastian mutlak dalam jawaban Anda. [2]
- d i** Gunakan hasil perhitungan Anda pada a, c iii dan c iv, tentukan nilai E dan r. Sertakan satuan yang sesuai.
- Data: $R = 470 \pm 5 \Omega$. [3]
- ii** Tentukan persentase ketidakpastian dalam r. [1]

[Total skor: 15]

Cambridge International AS and A Level Physics (9702) Paper 52 Q2 Oct/Nov 2018

Daftar Persamaan dan Data

Persamaan

Gerak dipercepat beraturan	$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$	$v^2 = v_0^2 + 2as$
Tekanan hidrostatis	$\Delta p = \rho g \Delta h$	
Gaya apung	$F = \rho g v$	
Efek Doppler untuk bunyi	$f_b = \frac{f_i v}{v \pm v_s}$	
Arus listrik	$I = A n v q$	
Resistor Seri	$R = R_1 + R_2 + \dots$	
Resistor paralel	$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots$	
Potensial gravitasi	$V = -GM/r$	
Energi potensial gravitasi	$Ep = -GMm/r$	
Tekanan gas ideal	$p = \frac{1}{3} N m < c^2 >$	
Gerak harmonis sederhana	$a = -\omega^2 x$	
Kecepatan partikel pada GHS	$v = v_0 \cos \omega t$	$v = \pm \omega \sqrt{(x_0^2 - x^2)}$
Potensial listrik	$V = Q/4\pi\epsilon_0 r$	
Energi potensial listrik	$Ep = Qq/4\pi\epsilon_0 r$	
Kapasitor seri	$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$	
Kapasitor paralel	$C = C_1 + C_2 + \dots$	
Pengosongan muatan pada kapasitor	$x = x_0 \exp(-t/RC)$	
Potensial Hall	$V_H = BI/ntq$	
Arus/tegangan bolak balik	$I = I_0 \sin \omega t$ atau $V = V_0 \sin \omega t$	
Peluruhan radioaktif	$x = x_0 \exp(-\lambda t)$	
Konstanta peluruhan	$\lambda = 0.693/t_{1/2}$	
Koefisien intensitas pemantulan	$\frac{I_2}{I_0} = \frac{(Z_1 - Z_2)^2}{(Z_1 + Z_2)^2}$	
Hukum Stefan–Boltzmann	$L = 4\pi\sigma r^2 T^4$	
Pergeseran merah Doppler	$\Delta\lambda/\lambda \approx \Delta f/f \approx v/c$	

Data

Percepatan gravitasi	$g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$
Laju cahaya di ruang hampa	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Muatan elementer(elektron)	$e = 1,60 \times 10^{-19}\text{C}$
Satuan massa atomik	$1\text{u} = 1,66 \times 10^{-27}\text{kg}$
Massa elektron diam	$m_e = 9,11 \times 10^{-31}\text{kg}$
Massa proton diam	$m_p = 1,67 \times 10^{-27}\text{kg}$
Konstanta avogadro	$N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Konstanta molar gas	$R = 8,31 \text{ JK}^{-1} \text{ mol}^{-1}$
Konstanta Boltzmann	$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$
Konstanta gravitasi	$G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$
Permitivitas ruang hampa	$\mathcal{E}_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1} \quad (1/4\pi\mathcal{E}_0 = 8,99 \times 10^9 \text{ mF}^{-1})$
Konstanta Planck	$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}$
Konstanta Stefan–Boltzmann	$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

Kunci Jawaban

AS Level

1 Besaran dan Satuan Fisika Latihan Soal

- 1 $10\,800 \text{ cm}^2$ atau $1,08 \times 10^4 \text{ cm}^2$
- 2 $8,5 \times 10^{-8} \text{ m}^3$
- 3 $1,0 \times 10^9$
- 4 a $6,8 \times 10^{-12} \text{ F}$
b $3,2 \times 10^{-5} \text{ C}$
c $6,0 \times 10^{10} \text{ W}$
- 5 800
- 6 $4,6 \times 10^4$
- 7 a 100–150 g
b 50–120 kg
c 2–3 m
d 0,5–1,0 cm
e 0,05 mm
f $2 \times 10^{-8} \text{ m}^3$
g $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
h $10\text{--}12 \text{ m s}^{-1}$
i $200\text{--}300 \text{ m s}^{-1}$
j 50–100 GJ
k 1–2 kJ
- 8 kg m^{-3}
- 9 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
- 10 a ya
b ya
- 11 kg s^{-2}
- 13 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$
- 14 12,52 mm
- 16 a $\pm 0,06 \text{ A}$
b $2,01 \pm 0,09 \text{ A}$
- 17 a i $\pm 2 \text{ mm}$
b 6%
- 18 a ujung penggaris rusak; ukur panjang dari tanda 10 cm
b kesalahan paralaks; letakkan pensil dalam kontak dengan skala, di atas gradasi dan tentukan ujungnya dengan set-kuadrat
- 19 a pengukur sekrup mikrometer
b nol kesalahan pada drum
c merata-ratakan akan mengurangi kesalahan acak; pembacaan spiral memungkinkan untuk penampang non-melingkar, dan bergerak sepanjang kawat memungkinkan untuk jenis pita apapun.
- 20 a 1,2
b $\pm 0,1 \text{ cm}$
- 21 $(870 \pm 40) \text{ cm}^3$
- 22 $(8,9 \pm 0,6) \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- 24 a skalar
b vektor
c skalar
- 25 a vektor
b skalar
c vektor
- 26 Kecepatan memiliki arah, sedangkan kelajuan tidak memiliki arah.
Kecepatan didefinisikan dalam perpindahan yang merupakan vektor, kelajuan didefinisikan dalam jarak yang merupakan skalar.
- 27 Siswa benar. Berat adalah gaya yang bekerja vertikal ke bawah.
- 28 Arah panah memberikan arah vektor. Panjang panah yang ditarik ke skala mewakili besaran besaran vektor.

- 29** a 690 N
b 210 N
c 510 N pada sudut 28° terhadap gaya 450 N
- 30** hulu pada 78° ke tepi sungai
- 31** 120 N pada sudut 25° terhadap gaya 50 N dalam arah berlawanan arah jarum jam
- 32** a 7 km h^{-1}
b 1 km h^{-1}
- 33** 11 N pada sudut 6,0 N gaya 56° dalam arah berlawanan arah jarum jam
- 34** a 250 km h^{-1}
b 180 km h^{-1}
- 35** a $1,0 \text{ m s}^{-1}$
b $9,1 \text{ m s}^{-1}$
- 14** a 380 pm
b $0,086 \text{ Ms}$
c 8,3 min
e ii 230 m s^{-1}
- 15** a i m^3
b $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
- 16** a i $(50-150) \times 10^{-3} \text{ kg}$
ii $50-300 \text{ cm}^3$
b $(7,9 \pm 0,5) \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- 17** b m^2
- 18** b i $0,20 \text{ W}$
ii 7%
iii $0,20 \pm 0,01 \text{ W}$

SOAL PENUTUP

- 1** A
- 2** B
- 3** B
- 4** C
- 5** C
- 6** C
- 8** kg m^2
- 9** a i $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
ii $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2}$
- 11** $(9,7 \pm 0,9) \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
- 12** b i 92 N
ii 77 N
- b i 59 N
ii 59 N
- 13** a i 18 m s^{-1}
ii 29° horizontal ke atas
b i 10 m s^{-1}
ii 33°
- 1** $5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$
- 2** 3200 s
- 3** 6 m s^{-1}
- 4** 6 m s^{-2}
- 5** 3,3 s
- 6** 30 km
- 7** 180 m s^{-1}
- 8** 3,6 h; 610 km h^{-1}
- 10** $-5,0 \text{ m s}^{-2}$
- 12** $9,8 \text{ m s}^{-2}$
- 13** $2,5 \text{ m s}^{-2}$
- 14** 7,5 s; 15 m s^{-1}
- 15** $8,2 \text{ m s}^{-1}$ ke atas
- 16** a $1,8 \text{ m s}^{-2}$
b 770 m
- 17** $6,1 \text{ m s}^{-1}$
- 18** 20 m
- 19** 75 m
- 20** 140 m s^{-1}

2 Kinematika

Latihan Soal

21 47 m s^{-1}

22 a B

b A

23 $3,5^\circ$

SOAL PENUTUP

2 8

3 a 61° ; $2,8 \text{ m}$

b $3,9 \text{ m s}^{-1}$

b $1,4 \text{ s}$

4 a $9,4 \text{ m s}^{-1}$

b 10%

6 B

7 C

8 C

9 b $0,31\text{--}0,35 \text{ m s}^{-2}$

c 84 m

d 26 s

10 b ii $9,8 \text{ m s}^{-2}$

iii 1 $9,9 \text{ m}$

2 $2,0 \text{ m}$

11 b i $10,6$

ii 30 m s^{-1}

iv $10\,800 \text{ N}$

12 b i $0,39 \text{ s}$

ii $0,75 \text{ m}$

13 a i $7,7 \text{ m s}^{-1}$

ii $9,2 \text{ m s}^{-1}$

c $8,4 \text{ m}$

14 b ii $0,61 \text{ s}$

iii $2,8 \text{ m}$

3 Dinamika

Latihan Soal

1 $1,7 \text{ m s}^{-2}$

2 $5,3 \text{ N}$

3 a 61 N

b 94 N

4 $6,8 \times 10^{-24} \text{ N s} (\text{kg m s}^{-1})$

6 $1,2 \text{ m s}^{-1}$

7 600 N

8 a $\frac{1}{2} u_A$
b 0,5

SOAL PENUTUP

1 50 kg

2 a $7,7 \text{ m s}^{-1}$

b $45,3 \text{ m s}^{-2}$

b 2040 N

4 $T/2$

5 $3,3 \times 10^4 \text{ N s} (\text{kg m s}^{-1})$

6 $3,6 \times 10^7 \text{ N}$

7 $0,27 \text{ N}$

9 $1,03 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$

10 Kecepatan partikel yang berat praktis tidak berubah; partikel yang ringan bergerak dengan kecepatan $2u$ searah dengan arah datangnya partikel berat.

11 benda yang lebih ringan

12 C

13 D

14 B

15 a $0,54 \text{ kg m s}^{-1}$

b $0,54 \text{ N s}$

c 36 N

16 a i $2,16 \text{ kg m s}^{-1}$

ii $1,07 \text{ m s}^{-1}$

iii $1,16 \text{ J}$

b $0,059 \text{ m}$

17 3080 m s^{-1}

19 a $3u$ ke kiri

b i $3u$ ke kanan

ii $3t_1$

c $3u/2$

- 20 a 3 m
b 0,25
- 21 a 75 g
- 22 a i 1 6,3 s
2 510 J
b ii $7,6 \text{ ms}^{-2}$
- 23 b i $3,9 \text{ kg m s}^{-1}$
ii 0,97 N
c i $-3,4$ dan $+3,4 \text{ kg m s}^{-1}$
- 24 a $0,11 \text{ m s}^{-1}$
i 1 47 m s^{-1}
2 0 m s^{-1}
- 25 b $3,2 \text{ m s}^{-1}$
c 97 J

4 Gaya, kerapatan dan tekanan

Latihan Soal

- 1 5,6 N m
2 4,5 N
3 14 (13,5) N
4 b 29 N
5 $11\,000 \text{ kg m}^{-3}$
6 0,18 kg
7 $1,4 \times 10^4 \text{ Pa}$
9 3,0 N

SOAL PENUTUP

- 1 B
2 D
3 B
4 a 4,2 N m
b 9,1 N
5 a 2,9 N m
b 8,0 N
6 a 88 N
b 112 N
7 67 N

- 8 b iii 1,3 N
c 7800 kg m^{-3}
- 9 a 1,4 N m
b 1,2 N m
- 10 a 8800 kg m^{-3}
b i 5,1 N
ii 44 N
c 4,1 kPa
- 11 $1,5 \times 10^5 \text{ Pa}$
- 13 b i 23 N
iv 1,9 kg
- 14 b i 12 N m
c i 0,90 N
ii 1,5 N
- 15 b i 2500 kg m^{-3}
ii $2,2 \times 10^4 \text{ Pa}$
- 16 b i 26 N
ii 15 N
- 17 a ii 190 N
- 18 0,49 N
- 19 b i $7,9 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$
iv $8,6 \text{ m s}^{-2}$
v $7,3 \text{ m s}^{-1}$

5 Usaha, Energi, dan Daya

Latihan Soal

- 1 a 180 J
b 30 J
- 2 a 15,5 J
b 7,6 J
- 3 a energi kinetik pada titik terendah
→ energi potensial pada titik
tertinggi → energi kinetik
pada titik terendah, dll. (energi
kinetik dan potensial pada titik di
antaranya)

- b** energi potensial gas terkompresi
 → energi kinetik tetesan semprot
 → panas ketika tetesan berhenti bergerak (energi ditransfer ke atmosfer sekitarnya)
- c** energi kinetik ketika dilempar → energi potensial dan kinetik pada titik gerak tertinggi → energi internal dan panas dan suara ketika tanah liat menyentuh tanah
- 4** Semua energi listrik diubah menjadi energi internal pemanas dan pemanas menjadi panas.
 Pemanas melepaskan semua energi ini ke lingkungan sehingga prosesnya 100% efisien.
- 5** 58%
- 6** $4,3 \times 10^5 \text{ J}$
- 7** $1,2 \times 10^5 \text{ N}$
- 8** 1,5 kW
- 9** **a** $1,3 \times 10^4 \text{ J}$ gain
b 12J gain
c $2,4 \times 10^9 \text{ J}$ loss
- 10** $3,1 \times 10^5 \text{ J}$
- 11** **a** 1000J
b 3000J
- 5** **a** 11J
b 14 m s^{-1}
- 6** **a** 16 MJ
b 110 MJ
c 210 MJ
- 7** 15%
- 9** C
- 10** A
- 11** C
- 12** **a** **i** 16,5 kW
ii 3200 N
iii 96 kW
b **i** 1,32 MJ
ii 3,84 MJ
- 13** **b** **i** **1** 8,3J
ii 13 m
iii 3
- 14** **b** 1090 N
c **ii** 76 m
iii **1** $2,7 \times 10^5 \text{ J}$
ii $3,5 \times 10^5 \text{ J}$
- 15** **a** **ii** 17,6 m
b **i** 140 N naik
ii 17,6 m
- 16** **b** 2,9 m
c **i** 1,6J
ii 0,60J
e 0,55 N s
f 5,9 N
- 17** **b** **i** $9,0 \times 10^4 \text{ W}$
ii $11,6 \times 10^7 \text{ J}$
 $27,0 \times 10^6 \text{ J}$
 $39,0 \times 10^6 \text{ J}$
iii $1,1 \times 10^3 \text{ N}$

SOAL PENUTUP

- 1** 90J; 0; 78J; 0,15 m; 36° ; $2,6 \times 10^3 \text{ N}$
- 2** **a** 7,9N
b 0,19J
- 3** **a** kimiawi
b potensial gravitasi
c kinetik dari angin
d kinetik gas, suara, cahaya, energi potensial gravitasi
e potensial internal
- 4** **a** 0,51 m
b 80 J s^{-1}

6 Deformasi(Perubahan Bentuk) zat Padat

Latihan Soal

- 2 400 N m^{-1}
- 3 a $3,0 \times 10^4 \text{ N m}^{-1}$
b 54 N
- 4 a $1,29 \times 10^7 \text{ Pa}$
b $1,17 \times 10^{-4}$
c 0,16 mm
- 5 $5,3 \times 10^6 \text{ Pa}$
- 7 $5,4 \times 10^{-2} \text{ J}$
- 8 $4,2 \times 10^{-2} \text{ m}$

SOAL PENUTUP

- 1 C
- 2 D
- 3 B
- 4 a 500 N m^{-1}
b 13,1 cm
- 5 7,9 J
- 6 0,36 mm
- 8 c ii 1 0,057 J
3 0,020 J
- 9 b i $4,6 \times 10^{-3} \text{ m}$
ii 4 ×
- 10 b ii 78 N m^{-1}
iii 0,26 J
c i 0,12 m
ii 53 N m^{-1}
- 11 b ii $1,3 \times 10^{11} \text{ N m}^{-2}$
iii $1,2 \times 10^{-3} \text{ J}$
- 12 b i $4,5 \times 10^7 \text{ N m}^{-1}$
ii 90 J

7 Gelombang

Latihan Soal

- 1 60° allow $\pi/3$ radian
- 2 $0,40 \text{ m s}^{-1}$
- 3 0,68 m
- 4 1,4
- 5 a $1,2 \times 10^{-3} \text{ s}$
b 830 Hz
- 6 amplitudo = 0,99 cm, perioda waktu tidak berubah
- 7 270 Hz
- 8 460 THz
- 9 6,3
- 10 0,038 m
- 11 Grafik intensitas dengan menunjukkan grafik \cos^2 dengan intensitas maksimum ketika = 0, 180° dan 360° dan intensitas nol ketika = 90° dan 270° .
- 12 60°

SOAL PENUTUP

- 1 B
- 2 C
- 3 C
- 4 a 200 Hz
b $5,0 \times 10^{-3} \text{ s}$
- 5 a $7,5 \times 10^{14} \text{ Hz}$ hingga $4,3 \times 10^{14} \text{ Hz}$
b 1,2 m
- 6 $\frac{1}{4}(0,25)$
- 7 a $5,7 \times 10^{-8} \text{ J}$
b $4,9 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2}$
- 8 $2,0 \times 10^9 \text{ W m}^{-2}$
- 9 b i 0,6 s
ii 4,0 cm
iii $6,7 \text{ cm s}^{-1}$
c ii 3,0
- 10 b ii $6,0 \times 10^{14} \text{ Hz}$

- 11** a i 1 $N\lambda$
2 N/f
b 1300 Hz
c ii 180°
iii 9,1 m
- 12** a 250 Hz
b amplitudo 2,8 cm
- 13** b i 1 1,5 mm
2 $4,2 \times 10^{-2}$ m
ii 0,56 s
- 14** a i 5,5 mV
ii 530 Hz
iii 14 Hz
b 530 ± 10 Hz
- 15** b i P dan T
ii P dan S or Q dan T
c $0,18 \text{ ms}^{-1}$
d 0,44
- 16** a 71°
b intensitas menurun dari 1/9 nilai aslinya
c 55°

8 Superposisi

Latihan Soal

- 1 $6,25 \times 10^{-7}$ m (625 nm)
2 63 m
3 880 Hz; 1320 Hz
4 0,38 m
5 340 Hz
6 128 Hz
7 56°
8 22 cm
9 652 nm
10 $28,2^\circ$; $70,7^\circ$
11 2 (3 jika nilai nol dipertimbangkan)

SOAL PENUTUP

- 1 A
2 D
3 B
4 C
6 c 3,5 mm
9 b 8,5 cm
10 a 108 ms^{-1}
b 45 Hz
11 a $2,5 \times 10^{-6}$ m
b $10,2^\circ$
c 5; 3
13 $0,73^\circ$ ($1,26 \times 10^{-2}$ rad)
14 b 180° (π rad)
c 5:1
d 224 ms^{-1}
15 26,6 cm
17 b 212 mm
c 449 mm
18 c 180 Hz
19 b i $8,0 \times 10^5$
ii $2,5 \times 10^6$ m
20 a i 0,8 m
b ii 1,2 m
21 b 1,1 cm
c i $3,4 \times 10^{-4}$ m
22 b ii 1 360° atau 0°
2 920 nm
iii 3×10^{-4} m
23 b i 1800 Hz
ii $1,0 \times 10^{-4} \text{ s cm}^{-1}$
c i 0,090 m
iii 14 s

9 Listrik

Latihan Soal

- 1 2,0 A
- 2 $4,8 \times 10^5$ s
- 3 a 60 C
b $3,8 \times 10^{20}$
- 4 $3,9 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$
- 5 $1,6 \times 10^{-13}$ J
- 6 a 0,25 C
b 2,2 J
- 7 100Ω
- 8 arus pada keduanya adalah 0,42 A
- 9 a 9,2 A
b 26Ω
- 10 18 m
- 11 0,97 mm

SOAL PENUTUP

- 1 A
- 2 D
- 3 C
- 4 a 760 C
b 1000 W
c 57Ω
- 5 a i 0,20 A
ii 0,60 W
b 5400 J
- 6 $3,5 \times 10^6$ J
- 7 2,0 kW
- 8 6,7 m
- 9 b I/A 0,20 0,40 0,60 0,80 1,00 1,20
1,40
R/ Ω 0,95 1,20 2,45 3,65 4,56
5,47 6,21
- 10 a $0,62 \Omega$
b $4,3 \times 10^{-7} \Omega \text{ m}$
- 11 a i 19Ω
ii 3,5 m

- b i 630 W
ii $\frac{1}{4}$ panjang atau 4 kali daerah yang lebih besar
- 12 b i 3200 W
ii 13 A
iii $3,5 \times 10^7$ C
iv $8,4 \times 10^{19}$
- 13 b iii $2,4 \times 10^{-2} \Omega$
- 14 b i 12,8 A
28,0 A
ii $14,3 \Omega$
21,5 Ω
iii 0,35

10 Rangkaian D.C

Latihan Soal

- 1 a EI
b I^2R atau EI
- 2 $0,56 \Omega$
- 3 a 3,0 A, ketika sel mengalami hubungan pendek
b 1,1 W, ketika resistansi beban sama dengan resistansi internal (hambatan dalam)
- 4 0,25 A
- 5 2,0 A menuju persimpangan
- 6 2,0 V
- 7 $4,3 \Omega$
- 8 25Ω
- 9 koneksi melintasi resistor variabel
 $R = 750 \Omega$
- 10 a 12 V
b 0,57 V
c $5,0 \text{ k}\Omega$
- 11 a 0,82 V
b 7,7 V

SOAL PENUTUP

- 1 C
2 C
3 D
4 a $0,05\Omega$
b $0,3\Omega$
5 a $0,25\text{ A}$
b $1,6\Omega$
c 12 J
7 a 169Ω
b 13Ω
8 a 5Ω
b 3.0 A
9 a 25Ω
10 a $4,5\text{ V}$
b i 50Ω
ii $0,09\text{ A}$
iii $0,90\text{ V}$
12 10 resistor masing-masing resistansi $12\text{ k}\Omega$, peringkat daya $0,5\text{ W}$ terhubung secara paralel
13 a 4Ω
b 8Ω
c 3Ω
d 1.0 A
14 a i $1.6 \times 10^{-2}\Omega$
ii $1.1 \times 10^{-3}\Omega$
iii 27 W
b i 4.4 s
ii 4.4×10^{21}
c i 11.7 V
ii 307 W
15 a $1.02\text{ V}; 1.22\text{ W}$
b ii 7.53 m
iii 1.41 W
16 b i 0.29 A
ii 1.03 V
iii 1.03 V
- 17 c i 5.7 V
ii 1.7Ω
d i 4.64 W
ii 51%
18 b i 1 1.5 A
2 2.5Ω
ii 0.25
19 b i 1 0.15 A
2 0.90 W
3 $2,3 \times 10^{19}$
4 $8,0\Omega$
5 12Ω

11 Fisika Partikel

Latihan Soal

- 1 19, 40, 21
2 $_{90}^{232}\text{Th} \rightarrow _{88}^{228}\text{Ra} + _2^4\text{He} + \text{energi}$
3 $_{88}^{228}\text{Ra} \rightarrow _{89}^{228}\text{Ac} + _{-1}^0\text{e} + \bar{\nu} + \text{energi}$
4 $2,7 \times 10^7\text{ m s}^{-1}$
5 $4,0 \times 10^5\text{ m s}^{-1}$

SOAL PENUTUP

- 1 B
2 A
3 C
4 a 26, 28
b 47, 62
c 79, 117
d 94, 138
6 $_{90}^{231}\text{Y} \rightarrow _2^4\text{He}, _{91}^{231}\text{Z}, _0^0\gamma$
7 a $2.3 \times 10^7\text{ m s}^{-1}$
b $2.7 \times 10^5\text{ m s}^{-1}$
8 a $_{88}^{224}\text{Ra} \rightarrow _{86}^{220}\text{Rn} + _2^4\text{He}$
c $3.0 \times 10^5\text{ m s}^{-1}$
9 b 3 dan 0 untuk nilai superskrip, 2 dan 1 untuk nilai subskrip
c $4,5 \times 10^7\text{ m s}^{-1}$

- 10 a i** proton/neutron
ii elektron
- b i** *up, up, down*
ii *down, down, up*
- c i** proton + elektron + antineutrino
ii *down* berubah menjadi *up*
- 11 b i** $01e^+$ or $01\beta^+ 00v(e)$
ii (Gaya/interaksi) lemah
iii massa-energi
 momentum
 jumlah proton
 jumlah nucleon
 muatan
- c** $\frac{2}{3}e^+$ atau ${}^0_3\beta^+ {}^0_0v_{(e)}$
- 12 a** elektron and quark
- b i** 60, 28
ii (elektron) antineutrino
- 13 b**
- | | proton | β^- partikel | antineutrino |
|--------|--|-----------------------------------|--------------------|
| Muatan | $+1.6 \times 10^{-19}$ (C) / $+e$ | -1.6×10^{-19} (C) / $-e$ | nol/0 |
| Massa | $1,67 \times 10^{-27}$ (kg) / $1,7 \times 10^{-27}$ (kg) | $9.1(1) \times 10^{-31}$ (kg) | Sangat kecil/nol/0 |
- 14 a i** Q ditempatkan pada (82, 210)
ii R diplot pada (83, 210)
- b** lepton(s)
- c** *up down down* \rightarrow *up up down*/
udd \rightarrow *uud* atau *down* \rightarrow *up*/
d \rightarrow *u*
- 15 a i** alpha, neutron and proton
ii neutron
iii β^+
- b** up/u
- 16 b i** $-\frac{1}{3}e$
- 17 b i** 1 to 3×10^{-10} m
ii 1 to 7×10^{-15} m

Latihan AS Level

- 1 a i 0,51J
b 390 m s^{-1}
c i 150J
- 2 b ii 1800Ω
- 3 a i 800 N m^{-1}
b ii $0,96 \text{ m s}^{-1}$
- 4 a i $0,38 \text{ m s}^{-2}$
b 19W
c i 20N
ii 8,5 s
- 5 a i 1 0,16 Ω
2 14 – E
ii 7,3V
- b i $1,8 \times 10^5 \text{ C}$
ii $2,5 \times 10^6 \text{ J}$
iii $3,6 \times 10^5 \text{ J}$
- c 86%
- 6 a i $7,5 \text{ m s}^{-1}$
ii 13 m s^{-1}
b 8,6 m
c i $0,73 \text{ N s}$
- 7 a 250 Hz
c i 630 nm
- 8 b i 0,018 m
- 9 a $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-3}$
b ii $9,4 \text{ m s}^{-1}$
- 10 b i 4,0 Ω
ii 2,0 Ω
c 2,0V
d i 72W
ii 192W
- 11 b i 1 $0,68 \text{ m s}^{-2}$
2 $8,6 \times 10^5 \text{ J}$
iii 9,1 kW

A Level**12 Gerak Melingkar****Latihan Soal**

- 1 60 m
 2 $4,5 \text{ rad s}^{-1}$
 3 a $0,20 \text{ m s}^{-1}$
 b $0,52 \text{ rad s}^{-1}$
 c $0,10 \text{ m s}^{-2}$
 4 4,7 N
 5 a 660 m
 b 5000 N

SOAL PENUTUP

- 2 a $3,32 \text{ rad s}^{-1}$
 b 0,53 revolusi/detik
 3 a $7,8 \text{ km s}^{-1}$
 b 88,7 menit
 4 a ii 1 3 mg
 2 4 mg
 4 b i $6,4 \text{ rad s}^{-1}$
 ii $4,6 \text{ m s}^{-1}$

13 Medan Gravitasi**Latihan Soal**

- 1 $4,6 \times 1016 \text{ N}$
 2 1,4 jam
 3 25 N kg^{-1}
 4 a $-1,4 \times 10^{10} \text{ J}$
 b $1,1 \times 10^4 \text{ m s}^{-1}$

SOAL PENUTUP

- 1 3900 kg m^{-3}
 2 $7,78 \times 10^8 \text{ km}$
 3 $-0,50\%; -0,25\%$
 4 $6,2 \times 10^{-11} \text{ N}$
 5 b ii $8,85 \times 10^4 \text{ km}$
 6 c $1,0 \times 10^{26} \text{ kg}$
 7 c 1330 kg m^{-3}

14 Suhu**Latihan Soal**

- 1 a 423 K
 b 123 K
 2 a $8,3 \times 10^4 \text{ J}$
 b 87 J
 3 $4200 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 4 a i 25 kJ
 ii 172 kJ
 b 6,9
 5 480°C
 6 44 g

SOAL PENUTUP

- 1 -18°C
 2 a 22,6 g
 3 105 g
 4 b 400 W

15 Gas Ideal**Latihan Soal**

- 1 a $2,33 \times 10^{-26} \text{ kg}$
 b $6,24 \times 10^{24}$
 2 $3,3 \times 10^{-9} \text{ m}$
 3 $1,29 \text{ kg m}^{-3}$
 4 1,1 mol; $6,65 \times 10^{23}$; $2,1 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$
 5 $8,0 \times 10^{-5} \text{ m}^3$
 6 $8,7 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
 7 $1,1 \times 10^{-20} \text{ J}$
 8 630 m s^{-1}

SOAL PENUTUP

- 1 212 kPa
 2 1,28
 3 6100 m s^{-1}
 4 c i 500 m s^{-1}
 ii $4,0 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{s}^{-2}$
 5 b ii 360 K
 6 c 580 m s^{-1}

16 Thermodinamika

Latihan Soal

- 1 1800J
- 2 75J
- 3 350J oleh system

LATIHAN SOAL

- 1 0, 250J
- 2 30J meningkat
- 3 7kJ
- 4 **b** **i** 0
ii 240J
iii

Perubahan	Usaha yang dilakukan oleh Gas/J	Kalor yang disediakan oleh gas/J	Peningkatan energi dalam/J
P → Q	240J	-600	-360J
Q → R	0	+720	720J
R → P	-840J	+480	-360J

- 5 **b** **iii** 48J meningkat
iv $1,2 \times 10^{22}$
- 6 **b** **ii** 2270 kJ kg⁻¹

17 Osilasi

Latihan Soal

- 1 **a** $x = 0,20 \sin 4,2t$
b 0,24 s
- 2 **a** 0,166J
b 0,542J
c 0,708J

SOAL PENUTUP

- 1 **a** 400 Hz
b $2,51 \times 10^3 \text{ rad s}^{-1}$
c $10,1 \text{ m s}^{-1}$
d $2,53 \times 10^4 \text{ m s}^{-2}$
e 3,6 mm
f $8,1 \text{ m s}^{-1}$

- 2 a $6,4 \text{ N m}^{-1}$
 b 15 mm
 c 0,53 s
 d 10,8 mm di atas titik kesetimbangan
- 3 3,2
- 4 a i 1 1,7 cm
 ii 2,8 Hz
 c 1,2 mm
- 5 a ii 3,8 Hz
 b ii 17 mm

18 Medan Listrik

Latihan Soal

- 2 a kanan
 b kiri
 c kiri
 d kanan
- 3 $8,8 \times 10^{13} \text{ m s}^{-2}$
- 4 a $5,0 \times 10^4 \text{ V m}^{-1}$
 b $2,4 \times 10^{-12} \text{ C}$
- 5 5,5 mm upwards
- 6 $3,7 \times 10^{-13} \text{ N}$ berlawanan arah
- 7 $7,2 \times 10^{-8} \text{ C}$
- 8 0,45 J

SOAL PENUTUP

- 1 a $3,7 \times 10^{-14} \text{ m}$
- 2 b ii 2 $8,3 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$
- 4 a i 17 N
 ii $7,8 \times 10^{-13} \text{ J}$
 b $1,5 \times 10^7 \text{ m s}^{-1}$

19 Kapasitansi

Latihan Soal

- 1 $450 \mu\text{F}$
- 2 $1,43 \times 10^{-9} \text{ F}$
- 3 a 1,5 mC
 b ii 500 μF

- iii 3,0 V
 iv 0,75 mC
- 4 45 mC
- 5 a $2,4 \times 10^{-4} \text{ C}$
 b $1,5 \times 10^{-4} \text{ C}$
 c 12,5 V

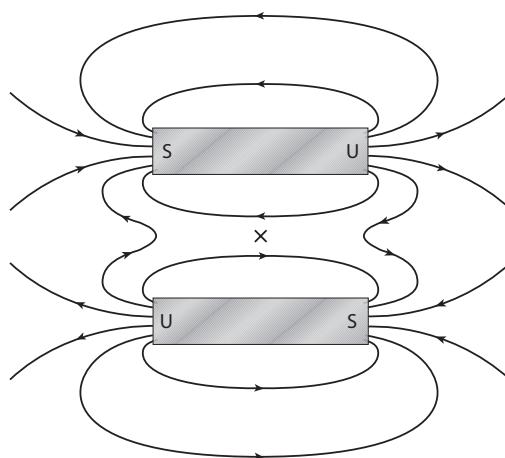
SOAL PENUTUP

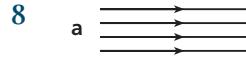
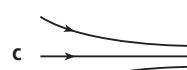
- 1 a $2,0 \mu\text{F}$
 b $1,2 \mu\text{F}$
- 2 a i $2,7 \times 10^{-4} \text{ J}$
 ii $9,0 \times 10^{-5} \text{ C}$
 b i $3,0 \times 10^{-5} \text{ A}$
 ii 3,0 s
 iii 1,2 V
- 3 b i $8 \mu\text{F}$
 ii 6,0
 iii $36 \mu\text{C}$
- 4 a ii 7,0 s
 iii $2,0 \times 10^4 \Omega$
 b i 14 s

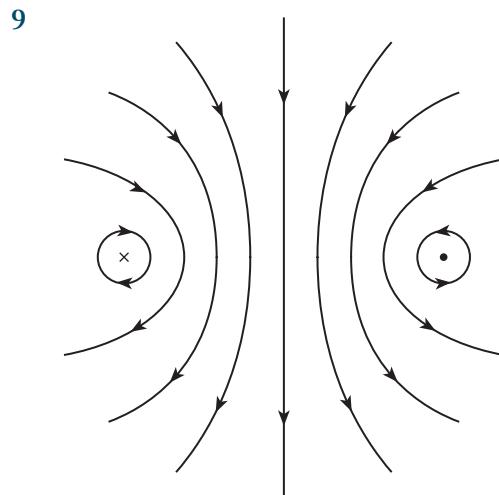
20 Medan magnet

Latihan Soal

- 1 Diagram harus seperti pada Gambar 5.4 tetapi dengan arah garis medan terbalik.



- 3 $5,0 \times 10^{-7} \text{ N}$
 4 a $0,030 \text{ N m}^{-1}$
 b $0,026 \text{ N m}^{-1}$
 5 a $9,4 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$
 b $9,2 \text{ cm}$
 6 $5,0 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}$
 7 $0,40 \mu\text{V}$
 8 a 
 b 
 c 



- 10 arah berlawanan dengan rasio jari-jari / $e^- = 3600$
 11 a 0
 b 15 mWb
 c $8,6 \text{ mWb}$
 12 a i 1360 m^2
 ii $5,44 \times 10^{-2} \text{ Wb}$
 iii $5,44 \times 10^{-2} \text{ V}$
 13 $0,17 \text{ V}$
 14 a $2,0 \text{ m}^2$
 b $0,30 \text{ Wb}$
 c $0,30 \text{ V}$

SOAL PENUTUP

- 1 a ii $3,1 \times 10^4 \text{ A}$
 2 a i $8,0 \times 10^{-5} \text{ T}$
 ii $1,3 \times 10^{-3} \text{ N m}^{-1}$
 3 a $0,15 \text{ T}$
 5 b i 53 mV
 ii $0 \text{ V}; 53 \text{ mV}; -0 \text{ V}$
 0 V; $-0,20 \text{ V}$

21 Arus bolak balik

Latihan Soal

- 1 $V = 325 \sin 314t$
 2 10
 3 28 mV
 4 $19,8 \text{ mV}$
 5 17 V
 6 a i 325 V
 ii $1,5 \text{ kW}$
 b $3,0 \text{ kW}; 0 \text{ kW}$

SOAL PENUTUP

- 1 $20 \text{ V}; 2,4 \text{ A}$
 2 a 340 V
 b 14 mA

22 Fisika Kuantum

Latihan Soal

- 1 a 290 nm
 b $2,3 \times 10^{-27} \text{ N s}$
 2 345 nm
 3 $5,9 \times 10^{14} \text{ Hz}$
 4 a $1,4 \times 015 \text{ Hz}$
 b sodium adan zinc
 5 $9,7 \times 10^{-12} \text{ m}$
 6 $4,8 \times 10^{-11} \text{ m}$
 7 $2,4 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}$
 8 488 nm

9 $3,2 \times 10^{15} \text{ Hz}$ **10** $9,1 \times 10^{-8} \text{ m}$ **SOAL PENUTUP****2** **a** $1,0 \times 10^{11}$ **b** $1,0 \times 10^{-27} \text{ N s}$ **c** $1,0 \times 10^{-16} \text{ N}$ **3** **a** 510 nm**b** **i** $4,1 \times 10^{-19} \text{ J}$ **ii** $9,4 \times 10^5 \text{ ms}^{-1}$ **4** **a** $4,4 \times 10^{-32} \text{ m}$ **b** $2,7 \times 10^{-35} \text{ m}$ **c** $2,4 \times 10^{-11} \text{ m}$ **d** $1,3 \times 10^{-13} \text{ m}$ **5** **b** $4,56 \times 10^{-19} \text{ J}$ **c** **i** 890 nm**23 Fisika Nuklir****Latihan Soal****1** 0,108517 u**2** 101 MeV**3** 7,21 MeV per nukleon**4** **a** 0,6899 u**b** $1,03 \times 10^{-10} \text{ J}$ **c** $1,06 \times 10^{-12} \text{ J}$ **5** **c** 5,0 MeV**6** **a** 1/4**b** 1/1024**c** 3/4**d** 15/16**7** **a** $2,0 \times 10^6 \text{ Bq}$ **b** 3200 Bq**8** 2,8 days**9** **a** 19,8 min**b** 5400 tahun**10** $1,3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ **SOAL PENUTUP****1** **b** 6,0 jam**2** 0,687u; 642 MeV; 6,62 MeV per nukleon**3** **a** 0,214 u**b** 199 MeV**c** $8,2 \times 10^{10} \text{ J}$ **d** 74 g**4** **a** 4,96 MeV**b** 14 MeV**5** $7,8 \times 10^{-11} \text{ kg}$ **6** **a** 2,6 jam**b** $9,1 \times 10^{20}$ **7** **b** **i** $3,6 \times 10^4 \text{ Bq}$ **ii** $8,2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ **24 Fisika Medis****Latihan Soal****1** **b** $9,4 \times 10^{-3}$ **2** 0,2**3** $1,66 \times 10^{-11} \text{ m}$ **5** 20 cm**6** 0,019**9** 1,4 MeV**SOAL PENUTUP****2** 0,908I terjadi pada lemak (batas otot)0,904I ditransmisikan melalui lemak
(batas otot)

0,332I terjadi pada otot batas tulang

0,21I ditransmisikan ke tulang

5 **b** P: 5, Q: 9, R: 7, S: 13**6** **c** 0,512 MeV**25 Astronomi dan Kosmologi****Latihan Soal****1** 600 W m^{-2} **2** **a** $5,5 \times 10^{29} \text{ W}$ **b** $1,8 \times 10^{19} \text{ m}$

- 3 Rigel 12100 K; Betelgeuse 3300 K
- 4 $3,3 \times 10^7$ km
- 5 6500 km s^{-1} jauhnya dari bumi
- 6 $2,9 \times 10^8$ tahun
- 8 2,9 cm

SOAL PENUTUP

- 1 c 490 W
- 2 b i 3000 K
ii $2,6 \times 10^{11}$ m
- 3 b $13,7 \text{ km s}^{-1}$ secara radial terhadap bumi
- 4 b ii $7,5 \times 10^8$ tahun
- 6 a L luminositas, A Luas permukaan (bintang), T suhu permukaan
- 7 5800 K

26 Practical work (kerja praktik)

SOAL PENUTUP

- 1 a x diukur dan dicatat dengan satuan yang sesuai ke milimeter terdekat dan V_1 dan V_2 diukur dan dicatat dengan satuan ‘V’ (volt) hingga 0,01 V terdekat.
besarnya $V_2 >$ besarnya V_1
- b Enam set hasil untuk x , V_1 dan V_2 . Setiap judul kolom harus diberi label dengan jumlah dan satuan, seperti yang ditunjukkan contoh, tidak boleh ada satuan di badan tabel.

x/cm	V_1/V	V_2/V	$(V_2 - V_1)/\text{V}$	$\frac{V_1}{x}/\text{V cm}^{-1}$
---------------	----------------	----------------	------------------------	----------------------------------

Semua nilai x harus diberikan ke milimeter terdekat dan semua nilai V_1 dan V_2 diberikan ke 0,01 V terdekat. Setidaknya satu nilai x harus kurang dari 10,0 cm dan satu nilai lebih besar dari 70,0 cm. Setiap nilai yang dihitung dari $\frac{V_1}{x}$ harus memiliki jumlah angka

penting yang sama (atau satu lebih) dari jumlah angka penting dalam besaran dengan angka penting terkecil $\frac{V_1}{x}$. Misalnya, jika x diukur ke tiga angka penting dan V diukur ke dua angka penting, maka $\frac{V_1}{x}$ harus dicatat menjadi dua (atau tiga) angka penting (tetapi tidak satu atau empat atau lebih).

$\frac{V_1}{x}$ dihitung dengan benar untuk setiap baris.

- c i Setiap sumbu harus diberi label dengan kuantitas dan satuan, misalnya $(V_2 - V_1)/V$ pada sumbu y dan $\frac{V_1}{x}/\text{V cm}^{-1}$ pada sumbu x.

Timbangan ditambahkan ke setiap sumbu setiap 2 cm.

Timbangan harus sederhana misalnya 0; 10,0; 20,0; 30,0; 40,0; dan lain-lain. Skala pada setiap sumbu harus memungkinkan titik-titik yang diplot menempati setidaknya setengah kisi grafik di arah x dan arah y.

Poin harus ditunjukkan dengan tanda silang halus atau titik yang dilingkari. Diameter titik harus kurang dari 1 mm. Semua data harus diplot lebih baik dari 1 mm. Kualitas percobaan dinilai dengan memeriksa bahwa semua titik yang diplot berada dalam 0,040 V dari garis lurus.

- ii Garis lurus yang paling sesuai harus menunjukkan distribusi titik yang merata di kedua sisi garis sepanjang keseluruhannya. Ketebalan garis harus kurang dari 1 mm.

- Jika salah satu titik tidak mengikuti trend, maka titik tersebut harus dilingkari dan diberi label anomali.
- iii** Gradien dihitung dengan mensubstitusi koordinat dua titik data yang berada pada garis lurus dari garis yang paling sesuai ke dalam gradien = $\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$.
- Dua titik pada garis yang dipilih untuk perhitungan harus dipisahkan lebih dari setengah panjang garis yang ditarik. *y-intercept* ditentukan baik dengan membaca sumbu y jika $\frac{V_1}{x}$ adalah nol atau dengan mensubstitusi koordinat titik pada garis lurus yang paling sesuai dan gradien harus disubstitusi ke dalam persamaan garis lurus $y = mx + c$, yaitu $c = y - mx$.
- d** P = gradien dan Q = *y*-intercept. Satuan untuk P : m, cm, atau mm, atau setara dan satuan untuk Q : V .
- 2 a** h_0 diukur dan dicatat ke milimeter terdekat dan satuan yang sesuai diberikan.
- b i** h diukur ke milimeter terdekat.
- ii** y dihitung dengan satuan yang konsisten.
- c** Ketidakpastian persentase = $\frac{\Delta y}{y} \times 100$ dimana Δy adalah 3 atau 4 mm.
- d** Waktu untuk setidaknya lima osilasi.
Pengaturan waktu diulang.
 T rata-rata ditentukan.
- e** Nilai baru h dan y .
Nilai baru T ditentukan.
Nilai baru T lebih besar
- f i** c dihitung dua kali
- ii** Persentase selisih antara kedua nilai dihitung dan dibandingkan dengan persentase ketidakpastian.
- g** g ditentukan dengan satuan yang benar dan kekuatan sepuluh yang benar.
- h**
- | sumber ketidakpastian dan keterbatasan | perbaikan |
|--|---|
| dua set bacaan tidak cukup untuk mendapatkan kesimpulan yang valid | mengambil banyak bacaan dan plot grafik T terhadap y |
| saat mengukur h , aturannya mungkin tidak vertikal | menggunakan satu set persegi diposisikan terhadap lantai dan aturan |
| awalnya pedangnya tidak horizontal jadi h_0 tidak tepat | tandai posisi pusat massa |
| sulit untuk menilai pusat massa untuk mengukur h | ukur h di kedua sisi massa dan rata-rata |
| sulit untuk menilai awal atau akhir dari osilasi | osilasi video dan pengatur waktu dan putar ulang bingkai demi bingkai |
- 3** Tahap 1: Memahami masalah.
Variabel bebas adalah p dan variabel terikat adalah B . Pertahankan arus dalam kumparan konstan. Pertahankan jumlah lilitan kumparan konstan.

Tahap 2: Metode

Diagram dengan semua peralatan ditempatkan di bangku. Semua peralatan diberi label, dengan probe Hall diposisikan pada titik P dengan penggaris yang didukung oleh dudukan retort. Diagram rangkaian menunjukkan kumparan terhubung ke d.c. catu daya dan amperemeter. Sertakan resistor variabel dalam rangkaian sehingga resistor variabel dapat disesuaikan sehingga arusnya konstan. Penggunaan penggaris untuk mengukur jarak p. Informasi rinci tentang mengukur jarak p, misalnya menempatkan penggaris kayu di bagian atas inti besi, merekam pembacaan aturan di bagian atas inti besi dan di titik P.

Detail penggunaan probe Hall, misalnya, putar probe Hall hingga diperoleh pembacaan maksimum, ulangi setiap percobaan untuk nilai p yang sama dan balikkan arah arus/ probe Hall dan rata-ratakan pembacaan dari probe Hall dan kalibrasi kan Hall probe dalam medan magnet yang diketahui. Untuk memperbesar ukuran medan magnet, gunakan jumlah lilitan yang banyak pada kumparan dan gunakan arus yang besar.

Tahap 3: Analisis

karena $B = kNIe^{ap}$

$$\ln B = -\alpha p + \ln kNI$$

Plot grafik $\ln B$ terhadap p . Jika hubungan tersebut valid maka grafiknya akan berupa garis lurus dengan gradien $= -$ dan perpotongan $y = \ln(kNI)$.

$$\alpha = -\text{gradien}$$

$$k = e^{-y_{\text{potongan}}/NI}$$

Tahap 4: Keamanan

Dengan arus yang besar pada kumparan, kumparan dapat menjadi panas sehingga jangan menyentuh kumparan atau mematikan arus saat tidak digunakan.

- 4 a gradien $= R/E$

$$y_{\text{potongan}} = r/E$$

b

1/I / A-1
29 or 29.4 ± 1.7
22 or 21.7 ± 0.9
18 or 17.9 ± 0.6
15 or 15.2 ± 0.5
13 or 13.2 ± 0.3
12 or 11.9 ± 0.3

Catatan: karena semua nilai saat ini diberikan kepada dua angka penting, maka jumlah angka penting dalam $1/I$ harus dua atau tiga.

- c i Keenam titik data diplot pada kisi grafik dengan akurasi lebih baik dari 1 mm. Keenam bilah kesalahan diplot dengan akurasi lebih baik dari 1 mm.
- ii Garis lurus paling sesuai dengan poin seimbang. Garis paling curam atau paling dangkal yang dapat diterima yang ditarik melalui bilah kesalahan dari semua titik data. Garis terjelek yang dapat diterima berlabel atau putus-putus. Jika putus-putus, tanda hubung harus jelas melewati setiap bilah kesalahan.
- iii Gradien dari garis yang paling sesuai ditentukan dengan menggunakan titik-titik dari

garis yang paling sesuai disubstitusikan ke dalam $(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$ dengan titik-titik pada garis yang dipilih untuk perhitungan harus dipisahkan lebih dari setengah panjang garis yang ditarik. Pembacaan titik data harus lebih baik dari 1 mm. Jika perhitungan $1/I$ dan grafiknya benar maka gradiennya harus sekitar 50. Gradien dari garis yang paling dapat diterima ditentukan dengan menggunakan titik-titik dari garis yang paling dapat diterima disubstitusikan ke $(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$ dengan titik-titik pada garis yang dipilih untuk perhitungan harus dipisahkan lebih dari setengah panjang garis yang ditarik. Pembacaan titik data harus lebih baik dari 1 mm. Ketidakpastian dalam gradien = gradien garis yang paling sesuai – gradien garis yang paling jelek yang dapat diterima

- iv perpotongan y dari garis yang paling sesuai ditentukan dengan menggunakan titik-titik dari garis yang paling sesuai dan gradiennya disubstitusikan ke $y = mx + c$. Pembacaan titik data harus lebih baik dari 1 mm. Jika perhitungan grafik $1/I$ dan gradiennya benar maka perpotongan y seharusnya sekitar 5.

Perpotongan garis yang tidak baik ditentukan dengan menggunakan titik-titik dari garis paling tidak baik dan gradien garis tersebut disubstitusikan ke $y = mx + c$.

Pembacaan titik data harus lebih baik dari 1 mm.
ketidakpastian mutlak = perpotongan y dari garis yang paling sesuai – perpotongan y dari garis yang paling tidak sesuai yang dapat diterima

- d i** $E = 470$
 $\text{gradien} = 470$
 $50 = 9.4 V$
 $r = E \times y\text{-perpotongan} = 9.4 \times 5$
 $= 47 \Omega$ OR
 $r = 470$
 $\text{gradien} \times y\text{-perpotongan} = 470$
 $50 \times 5 = 47 \Omega$
- ii** persentase ketidakpastian dalam r = persentase ketidakpastian dalam gradien + persentase ketidakpastian dalam perpotongan y

Glosarium

akar-rata-rata-kuadrat r.m.s. nilai arus atau tegangan bolak-balik r.m.s. adalah nilai arus searah atau tegangan searah yang akan menghasilkan energi panas dengan laju yang sama dalam suatu resistor.

aktivitas Aktivitas sumber radioaktif adalah jumlah peluruhan nuklir yang terjadi per satuan waktu dalam sumber tersebut.

ampere Satuan pokok untuk arus dalam SI.

amplitudo Simpangan maksimum suatu osilasi.

antifase Ketika puncak dan lembah dari dua gelombang sejajar, sehingga gelombang keluar dari fasenya.

antineutrino Antimateri yang setara dengan neutrino, tidak memiliki muatan listrik dan massa kecil atau tidak memiliki massa dan dipancarkan dari nukleus pada saat yang sama dengan partikel β^- .

antinode Sebuah titik dari amplitudo maksimum (istilah “perut”) dalam gelombang berdiri

antipartikel Semua partikel fundamental memiliki partikel antimaterinya dengan massa yang sama tetapi muatannya berlawanan.

antiquark Antipartikel dari quark, yang identik dengan quark yang sesuai kecuali muatan yang berlawanan.

arus bolak-balik arus atau tegangan yang membalik arahnya secara teratur dan biasanya sinusoidal.

arus eddy Arus dengan besar dan arah bervariasi yang diinduksi dalam konduktor oleh medan magnet yang bervariasi.

arus konvensional Gagasan bahwa arus listrik adalah aliran muatan positif dari positif ke negatif, berdasarkan studi awal listrik. Pada kenyataannya arus listrik dalam logam adalah aliran elektron dalam arah yang berlawanan.

arus listrik Aliran pembawa muatan.

arus searah Arus tetap dalam satu arah, seperti pada rangkaian dengan baterai.

A-scan Sebuah teknik yang digunakan untuk menampilkan pemindaian ultrasonik

aturan pegangan tangan kanan Metode yang digunakan untuk mencari arah medan dalam sebuah solenoida, solenoida digenggam di tangan kanan dengan jari-jari menunjuk ke arah arus konvensional; ibu jari menunjukkan arah medan magnet.

Aturan tangan kanan Fleming Metode penentuan arah GGL induksi atau arus dalam kawat yang bergerak melalui medan magnet tegak lurus terhadap medan, dengan menggunakan dua jari pertama dan ibu jari tangan kanan yang dipegang tegak lurus satu sama lain.

Aturan tangan kiri Fleming Metode penentuan arah gaya relatif terhadap arah arus dan medan magnet dalam konduktor pembawa arus yang membentuk sudut terhadap medan magnet, dengan menggunakan dua jari pertama dan ibu jari tangan kiri dipegang tegak lurus satu sama lain.

baryon Partikel yang terdiri dari tiga quark atau tiga antiquark, seperti proton dan neutron.

becquerels Satuan yang digunakan untuk mengukur aktivitas sumber radioaktif, 1 becquerel adalah 1 peluruhan per detik.

beda potensial terminal (tegangan jepit)
beda potensial di kutub elemen atau sumber listrik ketika arus sedang mengalir.

bottom (b) Salah satu dari enam jenis quark.

bridge rectifier (jembatan penyearah)
Rangkaian yang digunakan untuk penyearah gelombang penuh dengan menggunakan empat dioda disusun dalam pola berlian.

B-scan Sebuah teknik yang digunakan untuk menampilkan pemindaian ultrasonik yang terdiri dari serangkaian A-scan, semua diambil dari sudut yang berbeda, sehingga gambar dua dimensi terbentuk.

charm (c) Salah satu dari enam jenis quark.

Computed tomography (CT) Teknik gambar tiga dimensi melalui tubuh dapat diperoleh dengan menggunakan pemindai CT, dengan menggabungkan data dari gambar sinar-X dari irisan individu yang diambil dari sudut yang berbeda.

Coplanar (sebidang) Semua dalam bidang yang sama.

Coulomb Satuan muatan listrik.

deret peluruhan radioaktif Urutan peluruhan radioaktif dari nuklida induk melalui nuklida anak yang tidak stabil berturut-turut, sampai nuklida stabil akhirnya tercapai.

dielektrik Bahan isolator yang ditempatkan di antara pelat kapasitor untuk meningkatkan kapasitansinya.

down (d) Salah satu dari enam jenis quark.

efek bola salju (avalanche) Efek dalam tabung Geiger-Müller ketika partikel dipercepat oleh beda potensial antara anoda kawat pusat dan katoda silinder kemudian menyebabkan ionisasi lebih lanjut.

Efek Doppler Perubahan frekuensi karena gerakan relatif antara sumber suara atau cahaya dan pengamat.

eksponensial Perubahan dengan pecahan yang sama selama interval waktu yang sama.

elektron volt (eV) usaha yang dilakukan (energi yang diperoleh) oleh elektron ketika dipercepat melalui beda potensial satu volt. Satu eV setara dengan $1,60 \times 10^{-19}$ J.

elektromagnet Solenoid melilit inti besi lunak untuk meningkatkan kuat medan magnetnya.

elektron bebas Elektron terluar yang tidak terikat erat dalam inti atom dan karena itu bebas bergerak melalui bahan, seperti logam.

elektron Salah satu dari tiga jenis partikel yang menyusun atom dari semua unsur; elektron memiliki muatan negatif, massa sekitar 1/2000 dari 1 u (1 sma), dan ditemukan mengorbit inti.

emisi fotolistrik Pelepasan elektron dari permukaan logam ketika radiasi elektromagnetik terjadi pada permukaannya.

energi fungsi kerja Jumlah energi minimum yang diperlukan elektron untuk lepas dari permukaan logam selama emisi fotolistrik.

energi ikat Energi yang setara dengan defek massa inti. Energi ikat adalah energi yang dibutuhkan untuk memisahkan hingga tak terhingga semua nukleon inti.

energi ikat per nukleon Total energi yang dibutuhkan untuk memisahkan semua nukleon dalam inti dibagi dengan jumlah nukleon dalam inti.

energi internal (energi dalam) Energi kinetik dan potensial acak dari molekul-molekul dalam suatu benda.

energi potensial Kemampuan suatu benda untuk melakukan usaha sebagai akibat dari posisi atau bentuknya.

energi potensial listrik Energi karena posisi muatan dalam medan listrik.

farad Satuan kapasitansi (simbol F). Satu farad adalah satu coulomb per volt.

Filter polarisator, seperti lembaran Polaroid, yang dapat digunakan untuk menghasilkan cahaya terpolarisasi datar dari cahaya tidak terpolarisasi.

fisi nuklir Pembelahan inti berat menjadi dua inti yang lebih ringan dengan massa yang kira-kira sama.

fluks magnet Hasil kali rapat fluks magnet dan luas bidang yang tegak lurus terhadap garis-garis fluks: $\Phi = BA$.

getaran paksa Getaran pada objek yang memiliki gaya periodik yang bekerja padanya, yang membuat objek bergetar pada frekuensi gaya yang diterapkan, bukan pada frekuensi alami sistem.

fotoelektron Elektron yang dipancarkan oleh emisi fotolistrik.

foton Nama yang diberikan untuk kuantum energi ketika energi itu dalam bentuk radiasi elektromagnetik.

frekuensi ambang Frekuensi minimum peristiwa radiasi yang diperlukan untuk menyebabkan emisi fotoelektron dari permukaan logam tertentu: $hf_0 = \varphi$

frekuensi f Jumlah osilasi (siklus) gelombang per satuan waktu.

frekuensi resonansi Frekuensi ketika resonansi terjadi.

fusi nuklir Ketika dua inti ringan bergabung untuk membentuk inti dengan massa yang lebih besar.

galaxy Sekelompok ratusan juta bintang, sisa-sisa bintang, gas dan materi gelap, disatukan oleh gravitasi.

galvanometer pusat-nol Sebuah alat analog pengukur arus sensitif dengan skala pusat-nol yang menunjukkan arus negatif ketika jarum berada di sisi kiri tanda nol dan arus positif ketika berada di kanan.

garis medan magnet Garis gaya magnet; arahnya adalah arah Ketika kutub utara magnet bebas akan bergerak jika ditempatkan dalam medan dan kerapatannya menunjukkan kuat medan magnet.

gaya elektromagnetik Gaya pada penghantar berarus yang membentuk sudut terhadap medan magnet. Arah gaya dapat diprediksi dengan menggunakan aturan tangan kiri Fleming.

Gaya gerak listrik (GGL); ukuran, dalam volt, energi yang ditransfer per satuan muatan yang melewati catu daya.

gaya gerak listrik Energi yang ditransfer per satuan muatan yang melewati catu daya, diukur dalam volt.

gaya inti Gaya yang menahan nukleon-nukleon dalam inti bersama-sama.

gaya inti nuklir (gaya ikat inti) Istilah lain untuk gaya inti.

gaya lemah Gaya yang bertanggung jawab atas peluruhan dalam inti.

gelombang elektromagnetik Gelombang yang terdiri dari medan listrik dan medan magnet yang berosilasi tegak lurus satu sama lain dan searah dengan arah rambat gelombang.

hadron Partikel sub atom yang dipengaruhi oleh gaya kuat, misalnya proton dan neutron.

Hukum Coulomb menyatakan bahwa gaya antara dua muatan titik sebanding dengan hasil kali muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya.

Hukum Faraday Hukum tentang induksi elektromagnetik yang menyatakan bahwa GGL induksi sebanding dengan laju perubahan hubungan fluks magnet.

Hukum Hubble Kesimpulan bahwa kecepatan radial saat galaksi menjauh dari Bumi sebanding dengan jaraknya dari Bumi.

Hukum I Kirchoff menyatakan bahwa jumlah arus yang memasuki titik cabang dalam suatu rangkaian selalu sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik cabang tersebut.

Hukum kedua Kirchoff menyatakan bahwa jumlah gaya gerak listrik dalam rangkaian tertutup sama dengan jumlah beda potensialnya .

hukum kuadrat terbalik Hukum yang menyatakan bahwa suatu besaran berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari sumber besaran tersebut.

Hukum Lenz Hukum yang menyatakan bahwa arah GGL induksi sedemikian rupa sehingga menimbulkan efek untuk melawan perubahan yang menghasilkannya.

Hukum Malus Intensitas I gelombang elektromagnetik terpolarisasi datar setelah transmisi melalui filter polarisasi atau serangkaian filter, sama dengan $I_0 \cos^2 \Theta$, dengan I_0 adalah intensitas maksimum dan Θ adalah sudut antara arah polarisasi dari dua lembar.

Hukum Ohm menyatakan bahwa, untuk konduktor logam pada suhu konstan, arus dalam konduktor sebanding dengan beda potensial yang melintasinya.

induksi elektromagnetik Induksi GGL oleh medan magnet.

intensitas fluks radiasi Daya pancaran per satuan luas yang melewati secara tegak lurus satuan luas.

interaksi lemah Istilah lain untuk gaya lemah.

inti atom Model atom berdasarkan hasil percobaan hamburan partikel Rutherford, terdapat inti kecil bermuatan positif di pusat atom yang mengandung sebagian besar massanya, dengan elektron negatif mengorbitnya; sebagian besar atom adalah ruang kosong.

ion Partikel bermuatan yang terbentuk ketika sebuah atom memperoleh atau kehilangan satu atau lebih elektron, sehingga tidak mengandung jumlah proton dan elektron yang sama.

ion positif Partikel bermuatan positif terbentuk ketika sebuah atom kehilangan satu atau lebih elektron.

isotop Bentuk berbeda dari unsur yang sama yang memiliki jumlah proton yang sama tetapi jumlah neutron yang berbeda dalam intinya.

kapasitansi perbandingan muatan Q terhadap potensial V untuk sebuah kapasitor

kapasitor elektrolit Jenis kapasitor yang dielektriknya disimpan oleh reaksi elektrokimia. Kapasitor ini harus dihubungkan dengan polaritas yang benar untuk pelatnya, atau kapasitor akan rusak.

kapasitor Komponen rangkaian yang menyimpan muatan dan, oleh karena itu, memiliki kapasitansi.

keadaan dasar Keadaan atom dan elektronnya ketika elektron menempati tingkat energi terendah yang tersedia.

keadaan tereksitasi Keadaan elektron yang telah menyerap energi dan naik ke tingkat energi yang lebih tinggi.

kerapatan fluks magnet Gaya per satuan arus per satuan panjang pada kawat yang ditempatkan tegak lurus terhadap medan magnet seragam.

konstanta Avogadro Jumlah partikel elementer dalam 1 mol zat apa pun, $6,02 \times 10^{23}$.

Konstanta Hubble Konstanta proporsionalitas dalam hukum Hubble, H_0 ; nilai yang diterima saat ini adalah 75 km s^{-1} per Mpc atau $2,4 \times 10^{-18} \text{ ms}^{-1}$ per m.

konstanta peluruhan λ Untuk peluruhan radioaktif, konstanta peluruhan λ adalah peluang peluruhan inti per satuan waktu.

kuat medan listrik Gaya per satuan muatan yang bekerja pada muatan positif stasioner kecil yang ditempatkan pada titik tertentu.

Kumparan Helmholtz Dua kumparan datar identik, dengan arus yang sama di masing-masing, diposisikan sedemikian rupa sehingga bidangnya sejajar dan dipisahkan oleh jarak yang sama dengan jari-jari kedua kumparan.

kurva peluruhan Grafik, seperti yang terlihat pada peluruhan radioaktif, yang menunjukkan penurunan eksponensial – nilainya berkurang dengan bilangan pecahan yang sama selama interval waktu yang sama.

laju akar-rata-rata-kuadrat atau laju r.m.s. Ukuran laju molekul dalam gas, sama dengan akar kuadrat dari kuadrat kecepatan rata-rata molekul.

Laju hanyut (speed drift) Kelajuan pembawa muatan saat mereka bergerak melalui konduktor.

laju hitung terkoreksi Laju penghitungan karena sumber radioaktif dengan laju hitung latar telah dikurangi dari total laju hitung terukur.

lepton Partikel dasar, subatomik yang tidak terpengaruh oleh gaya kuat, misalnya elektron dan positron.

light-dependent resistor (LDR) Sebuah jenis resistor yang resistansinya berkurang karena peningkatan intensitas cahaya di atasnya (fotoresistor).

luminositas Daya total (energi total yang dipancarkan per satuan waktu) dari suatu objek.

medan listrik Sebuah wilayah ruang di sekitar muatan ketika muatan listrik stasioner mengalami gaya.

medan magnet Sebuah wilayah ketika muatan bergerak atau bahan magnetik mengalami gaya (magnet).

meson Sebuah jenis hadron terdiri dari quark dan antiquark; pion (π) dan kappas (K) adalah contoh meson.

moda dasar Istilah lain untuk harmonik pertama.

model quark Model saat hadron terdiri dari partikel dasar yang disebut quark; ada enam 'jenis' quark, masing-masing dengan muatan karakteristik dan keunikannya.

neutron Salah satu dari tiga jenis partikel yang menyusun atom dari semua unsur; mereka tidak memiliki muatan, massanya sekitar 1 u, dan ditemukan di dalam nukleus.

nilai puncak Nilai maksimum (amplitudo) dari arus atau tegangan dari sumber arus bolak-balik.

nomor atom Jumlah proton dalam inti atom.

nomor massa Jumlah total proton ditambah jumlah neutron dalam inti.

nomor nukleon Istilah lain untuk nomor massa.

nomor proton Istilah lain untuk nomor atom.

nukleon Nama yang diberikan untuk proton atau neutron dalam nukleus.

nukleus (inti) Bagian tengah atom yang bermuatan positif, yang mengandung proton dan neutron; hampir semua massa atom terkonsentrasi di sini.

nuklida induk Nuklida asli ketika satu elemen berubah menjadi yang lain, nuklida anak, karena peluruhan radioaktif.

nuklida Sebuah kelas inti yang memiliki nomor nukleon tertentu dan nomor proton tertentu.

Nuklida anak Nuklida baru terbentuk ketika suatu unsur berubah menjadi unsur lain karena peluruhan radioaktif.

osiloskop sinar katoda Instrumen yang digunakan untuk menampilkan, mengukur, dan menganalisis berbagai bentuk gelombang rangkaian listrik.

panjang gelombang ambang Panjang gelombang maksimum yang sesuai dengan frekuensi ambang untuk menimbulkan emisi fotolistrik.

panjang gelombang de Broglie Panjang gelombang yang terkait dengan partikel yang bergerak.

panjar maju Kondisi dioda ketika tegangan memungkinkan untuk mengalirkan arus searah panah pada simbol.

partikel dasar (partikel fundamental) Sebuah partikel yang tidak terbentuk dari partikel lain; contohnya adalah quark dan lepton.

peluruhan eksponensial Penurunan eksponensial – nilai berkurang dengan pecahan yang sama selama interval waktu yang sama.

pemusnahan Terjadi ketika sebuah partikel berinteraksi dengan anti partikelnya, melepaskan massa gabungannya sebagai energi dalam bentuk foton (anihilasi).

penyearahan gelombang penuh Proses yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah dengan membalikkan polaritas setengah siklus negatif input.

penyearah Perangkat yang menggunakan dioda untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah.

Penyearahan setengah gelombang Proses yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah dengan menggunakan dioda untuk menolak bagian negatif dari input; tegangan output hanya terdiri dari setengah siklus positif dari tegangan input.

pergeseran biru Efek garis spektral dalam spektrum serapan dari bintang diamati memiliki penurunan panjang gelombang dibandingkan dengan nilai yang diketahui seperti yang diukur di laboratorium.

permitivitas relatif ϵ_r Kapasitansi kapasitor keping sejajar dengan dielektrik antara pelat dibagi dengan kapasitansi kapasitor ruang hampa di antara pelat.

permitivitas ruang hampa Sebuah konstanta fisis yang digunakan dalam menghitung gaya antara partikel bermuatan dalam ruang hampa; simbolnya ϵ_0 dan nilainya $8,85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$

piksel Dalam pemindaian CT, piksel adalah angka yang diberikan untuk intensitas yang ditransmisikan melalui setiap voxel, yang bersama-sama digunakan untuk membangun gambar dari pengukuran intensitas sinar-X sepanjang arah yang berbeda melalui bagian atau irisan.

pola interferensi Kumpulan dari pola maximum dan minimum yang dihasilkan oleh superposisi dari gelombang yang tumpang tindih.

positron Antipartikel elektron, yang memiliki massa yang sama dengan elektron tetapi muatannya berlawanan.

Positron emission tomography (PET)

Teknik menggunakan pelacak radioaktif yang meluruh dengan memancarkan positron, yang kemudian musnah ketika bertemu dengan elektron dan memancarkan foton; ini dideteksi oleh pemindai PET, yang digunakan dalam pencitraan medis dan diagnosis untuk menentukan seberapa baik fungsi tubuh tertentu beroperasi dan untuk mengidentifikasi kelainan.

potensial listrik Usaha yang dilakukan per satuan muatan positif dalam membawa muatan uji kecil dari tak terhingga ke titik tersebut.

potensiometer Sebuah pembagi potensial variabel terus menerus.

Prinsip Kosmologis Ide bahwa, dalam skala yang cukup besar, Semesta adalah homogen dan isotropik, yang berarti bahwa Semesta akan memiliki penampilan umum yang sama dari tempat lain di Semesta seperti yang muncul dari Bumi.

proses acak Proses seperti peluruhan radioaktif atau pelemparan dadu, ada kemungkinan konstan bahwa sebuah inti akan meluruh dalam waktu tertentu atau sejumlah akan terlempar, tetapi tidak mungkin untuk memprediksi inti mana yang akan meluruh atau yang mana dadu akan menunjukkan nomor.

proton Salah satu dari tiga jenis partikel yang menyusun atom dari semua unsur; mereka memiliki muatan positif, massa sekitar 1 u, dan ditemukan dalam inti.

quanta Paket diskrit atau jumlah energi radiasi elektromagnetik.

quark Partikel fundamental, kombinasi berbeda yang membentuk partikel lain seperti hadron.

quasar Objek yang sangat jauh di alam semesta yang memiliki pergeseran merah yang sangat besar dan luminositas yang sangat besar.

radial Semua garis (gaya) tampak berkumpul menuju pusat.

radiasi latar Radiasi dari sumber alami dan buatan manusia yang ada di lingkungan sepanjang waktu, bukan karena penggunaan sumber radioaktif yang disengaja.

radioaktif Inti yang tidak stabil dan karenanya memancarkan partikel dan/ atau radiasi elektromagnetik untuk meningkatkan stabilitasnya.

radioaktivitas Partikel dan/atau radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh inti radioaktif.

rangkaian paralel Sebuah rangkaian di mana arus dapat mengambil jalur alternatif dalam loop yang berbeda.

rangkaian seri Rangkaian dengan komponen-komponennya dihubungkan satu demi satu, membentuk satu loop lengkap.

reaksi berantai Situasi ketika satu reaksi inti menyebabkan setidaknya satu reaksi inti berikutnya, yang berpotensi memberikan reaksi berantai yang menyebar sendiri.

reaksi termonuklir Reaksi yang membutuhkan kondisi suhu dan tekanan yang sangat tinggi, mirip dengan yang ditemukan di pusat Matahari.

redaman arus eddy Proses ketika arus eddy diinduksi dalam konduktor oleh medan magnet yang bervariasi menyebabkan pemanasan dan menghilangkan energi.

Pergeseran merah Efek garis spektral dalam spektrum serapan dari sebuah bintang terlihat memiliki peningkatan panjang gelombang dari nilai yang diketahui seperti yang diukur di laboratorium.

rektifikasi (penyearahan) Proses yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah.

resistansi internal (hambatan dalam) Resistansi antara terminal catu daya.

resistansi perbandingan beda potensial V melintasi penghantar dengan arus I di dalamnya; penghantar yang baik memiliki resistansi yang rendah karena mereka menawarkan sedikit perlawanan terhadap pergerakan elektron.

resistivitas (hambatan jenis) Sifat bahan tertentu yang menunjukkan seberapa kuat bahan tersebut menahan aliran arus listrik; resistivitas merupakan konstanta untuk bahan pada suhu tertentu.

Resistor Perangkat yang memiliki hambatan terhadap aliran arus listrik.

resistor variabel Istilah lain untuk rheostat.

resonansi Ketika frekuensi alami getaran suatu benda sama dengan frekuensi yang sedang berlangsung, memberikan amplitudo getaran maksimum.

reverse bias (panjar mundur) Kondisi ketika dioda tidak akan bekerja karena resistansinya yang sangat tinggi ketika tegangan (beda potensial, tinggi ke rendah) berlawanan arah dengan panah pada simbol (beda potensial terbalik dibandingkan dengan kondisi panjar maju).

rheostat Sebuah jenis resistor yang dapat menghasilkan tegangan variabel terus menerus.

satuan massa atom (u) / (sma) Satu satuan massa atom (1 u) sama dengan $1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$.

satuan massa atom (u) (sma) Satu satuan massa atom terpadu ($1\text{ u} / 1\text{ sma}$) sama dengan $1,66 \times 10^{-27}\text{ kg}$.

sintilasi (scintillation) Sebuah pulsa kecil cahaya.

skala logaritma Skala non linear yaitu setiap interval ditingkatkan dengan faktor basis logaritma, bukan meningkat dalam peningkatan yang sama seperti pada skala linier.

smoothing (perataan) Penggunaan kapasitor untuk mengurangi fluktuasi output searah yang dihasilkan setelah penyearahan dan untuk memberikan arus searah yang stabil.

solenoid Sebuah kumparan kawat yang digunakan sebagai elektromagnet.

spektrometer Instrumen yang digunakan untuk menyelidiki spektrum dan mengukur panjang gelombangnya.

spektroskopi Ilmu yang mempelajari spektrum.

spektrum absorpsi Spektrum cahaya yang ditransmisikan melalui gas bertekanan rendah, menunjukkan garis-garis gelap karena penyerapan pada panjang gelombang tertentu.

spektrum elektromagnetik Rentang frekuensi (atau panjang gelombang) radiasi elektromagnetik yang kontinu.

spektrum emisi Spektrum radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh suatu sumber.

spektrum garis emisi Karakteristik spektrum radiasi elektromagnetik untuk elemen tertentu, dipancarkan ketika elektron dalam atom tereksitasi kembali ke tingkat energi yang lebih rendah.

spektrum kontinu Spektrum yang memiliki semua warna (dan panjang gelombang) di antara dua batas.

strange (s) Salah satu dari enam jenis atau rasa quark.

strangeness Salah satu properti quark.

supernova objek bintang digunakan sebagai standar cahaya untuk galaksi yang jaraknya sangat jauh dari Bumi.

Tegangan hall beda potensial yang timbul pada suatu penghantar ketika ada arus dalam penghantar yang tegak lurus terhadap medan magnet, karena pembawa muatan bergerak tegak lurus terhadap medan magnet sehingga mengalami gaya yang cenderung membuat mereka bergerak ke satu sisi penghantar.

teori kuantum Teori mengenai radiasi elektromagnetik dianggap terdiri dari paket energi yang disebut foton.

terkuantisasi Hanya ada dalam jumlah diskrit, bukan kontinu.

termistor Perangkat koefisien suhu negatif, yang memiliki resistansi menurun secara signifikan dengan kenaikan suhu.

tidak terpolarisasi Menggambarkan gelombang dengan getaran terjadi di banyak arah dalam bidang yang tegak lurus terhadap arah energi gelombang.

tingkat energi diskrit Tingkat energi spesifik tertentu yang dapat dimiliki elektron dalam atom; elektron tidak dapat memiliki energi di antara tingkat ini.

tingkat energi elektron Tingkat energi spesifik tertentu yang dapat dimiliki elektron dalam atom; elektron tidak dapat memiliki energi di antara tingkat ini.

titik keseimbangan Posisi kontak geser pada kawat saat jarum galvanometer membaca nol; arus yang melalui sumber tegangan adalah nol dan beda potensial melintasi panjang kawat 'seimbang' dengan beda potensial yang melintasi sumber tegangan.

titik netral Titik dalam pola medan magnet antara dua magnet di mana tidak ada medan magnet yang dihasilkan karena kedua medan itu sama besarnya tetapi berlawanan arah.

top (t) Salah satu dari enam jenis quark.

tracers Senyawa kimia dengan satu atau lebih atom telah digantikan oleh inti radioaktif dari unsur yang sama yang kemudian dapat digunakan untuk mencari atau mengikuti perkembangan senyawa dalam jaringan hidup.

transduser piezo-listrik Sebuah perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi ultrasonik dengan menggunakan kristal piezo-listrik seperti kuarsa.

transformator Perangkat listrik yang terdiri dari dua atau lebih kumparan. Kumparan dililitkan di sekitar inti yang sama sehingga memungkinkan transfer energi listrik antar rangkaian.

transisi elektron Pergerakan elektron antara tingkat energi.

transmutasi Proses ketika satu elemen berubah menjadi elemen lain sebagai akibat dari peluruhan radioaktif.

up (u) Salah satu dari enam jenis rasa quark.

variabel Cepheid Bintang yang radiusnya berubah secara periodik; ini menyebabkan suhu bintang berubah dan luminositas juga bervariasi secara berkala.

volt Satuan yang digunakan untuk mengukur beda potensial.

voxels Serangkaian unit kecil, membagi objek yang menjalani CT scan untuk menghasilkan gambar; setiap voxel akan menyerap sinar X-ray pada tingkat yang berbeda.

waktu paruh $t_{1/2}$ Waktu yang diperlukan untuk jumlah inti yang tidak meluruh dalam sampel isotop radioaktif untuk direduksi menjadi setengah dari jumlah aslinya.

watt Satuan daya (simbol W), sama dengan laju usaha 1 joule per detik.

weber (Wb) Satuan fluks magnet; satu weber sama dengan satu tesla meter-kuadrat, yaitu $T\text{m}^2$.

Weber per meter persegi (Wb m^{-2})

Nama alternatif untuk tesla (T), yang merupakan satuan kerapatan fluks magnet.

Indeks

A

aktivitas 205, 219, 220, 221, 222, 223, 226, 227, 228, 253, 279, 337, 338
akurasi 292, 335
Albert Einstein 182, 189, 207
emisi fotolistrik 164, 185, 189, 338
ampere 3, 4, 8, 9, 19, 21, 91, 104, 120, 132, 337
antifase 337
antineutrino xii, 149, 157, 158, 159, 160, 171, 172, 173, 178, 326, 337
antinode 337
antipartikel
pemusnahan 229, 230, 254, 255, 256, 257, 258, 342
Antipartikel 169, 170, 337, 343
antiquark 149, 150, 170, 171, 174, 337, 342
arus bolak-balik 12, 130, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 297, 337, 342, 343, 344
daya xii, 8, 10, 17
Daya 1, 6, 8, 9, 340, 342
osiloskop sinar katoda 238, 342
penyebarahan 142, 143, 146, 343, 344, 345
perataan 135, 145, 148, 345
perataan (smoothing) 148
rms 135, 146
arus konvensional 4, 88, 103, 106, 116, 117, 337
arus listrik 1, 3, 4, 9, 97, 101, 116, 123, 128, 184, 313, 337, 344
konduksi 5, 51, 57
arus searah 12, 120, 136, 142, 145, 146, 337, 342, 343, 344, 345
A-scan 238, 239, 337, 338

atom x, xi, xiv, 2, 3, 12, 13, 54, 55, 68, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 173, 174, 175, 176, 177, 179, 180, 181, 182, 183, 192, 193, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 206, 213, 219, 223, 227, 252, 338, 340, 341, 342, 344, 345, 346

aturan pegangan tangan kanan 117, 129, 131, 337

Aturan tangan kanan Fleming 125, 337

Aturan tangan kiri Fleming 337

B

barium 81, 244

baryon 149, 170, 337

baterai 3, 4, 10, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 37, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 79, 80, 86, 87, 88, 92, 94, 136, 337

becquerel 221, 222, 226, 338

becquerel (Bq) 226

beda potensial 1, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 19, 21, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 48, 49, 50, 51, 60, 61, 62, 64, 69, 70, 71, 77, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 109, 110, 113, 131, 137, 147, 148, 162, 183, 184, 186, 187, 194, 195, 208, 241, 242, 243, 283, 301, 338, 340, 344, 345, 346

hukum kedua Kirchhoff 25, 33, 43, 49

beda potensial terminal (tegangan jepit) 28, 338

Big Bang 259, 268, 274, 275

Bima Sakti 268

bintang xiii, 199, 211, 259, 260, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 275, 276, 333, 339, 343, 344, 345, 346

Jari-jari bintang 262

Lilin standar 262, 264, 275

B-scan 239, 240, 338

C

Charles Coulomb 65

Christian Oersted 101

Computed tomography (CT scan) 257

coulomb (C) 4, 59

D

daya xii, xviii, 4, 8, 10, 17, 20, 21, 22, 23, 30, 31, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 84, 86, 89, 135, 140, 141, 142, 146, 147, 155, 157, 160, 190, 213, 260, 261, 265, 275, 276, 299, 325, 335, 339, 344, 346

arus bolak-balik 12, 130, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 297, 337, 342, 343, 344

Daya Listrik 8

defek massa 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 227, 339

diagram rangkaian 21, 25, 26, 148

dielektrik 80, 81, 338, 343

difraksi elektron x, 181, 193

dioda 9, 12, 19, 23, 135, 143, 144, 146, 147, 338, 342, 343, 345

dosimeter 163

E

Edwin Hubble 271

efek (longsoran) avalanche 338

efek motor 102, 120, 125

elektromagnet 129

elektron x, xi, xii, xiv, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 16, 18, 20, 22, 48, 51, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 64, 68, 74, 79, 88, 106, 108, 109, 110, 113, 116, 121, 129, 133, 136, 140, 149, 150, 151, 152, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 167, 168, 169, 171,

172, 173, 175, 177, 178, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 206, 208, 215, 229, 230, 241, 242, 243, 254, 255, 256, 257, 258, 316, 326, 337, 338, 340, 341, 343, 344, 345, 346

Muatan spesifik 108, 109

elektron bebas 3, 5, 6, 13, 16, 88, 116, 338

elektronvolt (eV) 207

elektroskop daun emas xv, 185

emisi fotolistrik x, xiv, 164, 181, 183, 184, 185, 189, 201, 204, 338, 339, 342

energi fotoelektron 186

energi ikat 205, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 225, 227, 339

energi ikat per nukleon 205, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 225, 339

energi potensial listrik 53, 69, 72, 76, 77, 86, 87, 94, 339

Ernest Marsden 165

Ernest Rutherford 165

F

farad 67, 78, 80, 93, 339

Faraday 98, 123, 124, 126, 131, 133, 340

farad (F) 93

fisi nuklir 205, 211, 214, 216, 339

reaksi berantai 216, 344

fluks magnet 97, 103, 104, 105, 108, 110, 112, 113, 114, 115, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 312, 339, 340, 341, 346

foton x, xii, xiii, xiv, 161, 181, 182, 183, 184, 189, 190, 192, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 230, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 254, 255, 256, 257, 258, 263, 339, 343, 345

frekuensi alami 232, 339, 345

Fusi 212, 213, 225

fusi nuklir 205, 211, 212, 339

G

galaksi 259, 262, 263, 264, 268, 269, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 340, 345

Hukum Hubble 259, 268, 271, 275, 340

galvanometer 25, 40, 41, 43, 339, 346

galvanometer pusat-nol 40, 339

Gambar sinar-X 243, 244, 252, 257

garis medan magnet 99, 100, 101, 121, 130, 339

gaya elektromagnetik 102, 103, 105, 121, 126, 339

gaya gerak listrik (GGL) 23, 44, 50, 51, 58, 123

Hukum kedua Kirchhoff 49

pengukuran 101, 118, 137, 138, 183, 187, 198, 206, 249, 251, 273, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 301, 304, 309, 312, 343

gaya inti 167, 340

gaya pada muatan dalam medan listrik 53

H

hadron 149, 169, 170, 172, 174, 176, 177, 179, 180, 340, 342, 344

Hukum Coulomb 65, 67, 73, 340

hukum induksi elektromagnetik 133

Hukum Kedua Kirchhoff 32

Hukum Ohm 11, 19, 340

Hukum pergeseran Wien 265, 275, 276

Hukum Pertama Kirchhoff 31

Hukum Stefan-Boltzmann 266

I

induksi elektromagnetik 98, 123, 124, 126, 131, 133, 340

intensitas gelombang 233, 236

Inti 150, 152, 153, 154, 155, 161, 178, 180, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 227, 344

defek massa 205, 206, 207, 208, 209, 210, 212, 227, 339

energi ikat 205, 206, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 225, 227, 339

stabilitas 210, 213, 225

ion 2, 3, 13, 112, 113, 151, 155, 157, 162, 164, 172, 173, 200, 205, 231, 232, 340, 341

Ion positif 232

isotop 149, 152, 153, 212, 213, 219, 224, 252, 257, 341, 346

J

jembatan penyearah 135, 144, 338

K

kapasitansi 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 89, 90, 92, 93, 94, 95, 135, 145, 148, 339, 341, 343

kapasitor pelat sejajar 60, 77, 80, 81, 82, 93

Kapasitor variabel 81

Kappa (K) 170

karakteristik arus-tegangan

arus bolak-balik 12, 130, 135, 136, 137, 140, 141, 142, 297, 337, 342, 343, 344

efek pemanasan 12, 141, 236

medan magnet 5, 56, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127,

- 128, 129, 130, 131, 132, 133, 335, 337, 339, 340, 341, 342, 344, 345, 346
- Karakteristik Arus-tegangan** 12
- karakteristik I–V 11, 23
- keadaan dasar 161, 196, 341
- kelajuan hanyut 5, 19, 20, 114
- kerapatan fluks magnet 97, 103, 104, 105, 112, 113, 114, 115, 121, 122, 131, 132, 312, 341, 346
- koefisien penyerapan linier (atenuasi) 236
- konservasi energi 125, 126
- Hukum kedua Kirchhoff 49
- Konstanta Boltzmann 316
- Konstanta Hubble 273, 341
- konstanta peluruhan 89, 205, 221, 222, 224, 225, 226, 228, 341
- Konstanta Planck xiii, 184, 191, 194, 200, 202, 203, 316
- konstanta waktu 77, 90, 91, 92, 94, 96, 145, 146
- kuanta 182, 183
- kuarsa 231, 232, 346
- kuat medan listrik 53, 56, 59, 60, 61, 62, 68, 70, 71, 72, 75, 76, 112, 113, 341
- Kumparan Helmholtz 118, 341
- kurva peluruhan 89, 218, 219, 341
- L**
- lepton 150, 169, 171, 172, 174, 176, 177, 326, 341, 342
- listrik statis 54
- muatan 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 18, 19, 20, 22, 25, 26, 27, 28, 32, 33, 43, 48, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 97, 101, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 112, 113, 114, 119, 121, 126, 130, 133, 145, 149, 151, 155, 156, 157, 161, 162, 163, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 173, 174, 175, 177, 178, 179, 180, 183, 185, 187, 193, 194, 209, 231, 242, 243, 254, 257, 315, 326, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345. *See also* muatan
- luminositas 259, 260, 261, 262, 263, 266, 267, 273, 275, 276, 333, 342, 344, 346
- Hukum Stefan–Boltzmann 275, 277, 315
- M**
- magnet 5, 56, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 312, 330, 335, 337, 339, 340, 341, 342, 344, 345, 346. *See also* medan listrik; medan gravitasi
- elektromagnet 119, 129, 265, 312, 338, 345
- Max Planck 182
- medan xvii, 5, 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 179, 187, 232, 330, 335, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 344, 345, 346
- medan listrik 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 97, 100, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 179, 187, 232, 330, 335, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 344, 345, 346
- medan listrik
- gerak partikel bermuatan 53, 97, 131
- muatan titik 53, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 79, 340

- seragam xi, 40, 49, 53, 59, 60, 64, 65, 71, 73, 77, 97, 103, 104, 106, 109, 111, 115, 118, 121, 123, 127, 128, 341
- Medan listrik 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 97, 100, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 179, 187, 232, 339, 340, 341, 342
- medan listrik seragam 53, 60, 71, 77
- medan magnet 5, 56, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 335, 337, 339, 340, 341, 342, 344, 345, 346
- Gaya pada Muatan Bergerak 105
- medan magnet akibat arus 97
- tegangan Hall 97, 113, 114, 115, 116, 131
- muatan spesifik elektron 108
- muatan titik 53, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 79, 340
- gaya antar muatan 55
- medan listrik 53, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 75, 76, 77, 97, 100, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 179, 187, 232, 339, 340, 341, 342
- potensial listrik 53, 54, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 86, 87, 94, 137, 315, 339, 343
- ## N
- neutrino 149, 150, 157, 158, 159, 160, 171, 172, 173, 174, 230, 254, 337
- neutron 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 157, 158, 161, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 194, 206, 207, 208, 211, 212, 214, 215, 216, 227, 252, 254, 326, 337, 340, 341, 342
- newton (N) 59
- nomor atom Z 151, 152
- nomor massa A 151, 152
- Nomor nukleon A 173
- Nomor proton Z 173
- notasi nuklida 209, 225
- nukleon 149, 151, 152, 153, 156, 157, 158, 161, 167, 168, 169, 173, 178, 179, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 225, 332, 339, 340, 342
- nuklida xii, 149, 152, 153, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 173, 206, 209, 211, 214, 219, 225, 227, 338, 342
- nuklida anak xii, 155, 156, 158, 159, 161, 162, 338, 342
- nuklida induk xii, 155, 156, 157, 159, 161, 162, 338, 342
- ## O
- osiloskop sinar katoda (CRO) 238
- ## P
- parabola 63, 73, 111
- partikel alfa 156, 157, 159, 167
- energi kinetik x, xiv, 7, 62, 156, 159, 160, 175, 176, 181, 186, 187, 189, 190, 191, 201, 202, 210, 241, 255, 320, 321
- percobaan hamburan 165, 167, 180, 340
- partikel bermuatan 3, 53, 60, 62, 63, 97, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 118, 121, 130, 131, 151, 162, 166, 240, 343
- partikel beta 154, 176
- partikel elementer 107, 341
- partikel β 154, 157, 177, 337
- energi kinetik x, xiv, 7, 62, 156, 159, 160, 175, 176, 181, 186, 187, 189, 190, 191, 201, 202, 210, 241, 255, 320, 321

- pelacak 229, 230, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 343
pelacak radioaktif 254, 255, 258, 343
peluruhan eksponensial 89, 91, 223, 226, 342
pelepasan kapasitor 89
radioaktif 89, 126, 149, 150, 153, 154, 156, 159, 160, 161, 162, 163, 175, 176, 205, 206, 217, 218, 219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 245, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 300, 315, 337, 338, 341, 342, 343, 344, 346
Redaman sinar-X 244, 245
peluruhan radioaktif 126, 149, 156, 161, 162, 205, 217, 218, 219, 220, 221, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 245, 252, 256, 338, 341, 342, 343, 346
aktivitas 205, 219, 220, 221, 222, 223, 226, 227, 228, 253, 279, 337, 338
konstanta peluruhan 89, 205, 221, 222, 224, 225, 226, 228, 341
kurva peluruhan 89, 218, 219, 341
sifat acak 205, 217, 220
sifat eksponensial 205, 245
waktu paruh 205, 219, 220, 222, 224, 227, 228, 245, 253, 255, 346
peluruhan α 149, 155, 159
peluruhan β 149, 156, 158, 159, 160, 171, 172, 174, 254
Emisi β^+ 157
pemanasan Joule 9
pembagi potensial 25, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 343
Penggunaan Pembagi Potensial 38
pembangkit listrik tenaga nuklir 153, 211, 216
pemindaian CT 247, 252, 343
pemuatan dengan induksi 73
pengejerman elektromagnetik 129
pengisian muatan
Gaya Antara Muatan Titik 65
Pengisian muatan 58
Muatan spesifik elektron 108
pengosongan kapasitor 88, 89, 90, 96, 146
penyearahan 142, 143, 146, 343, 344, 345
penyearah setengah gelombang 135, 143, 146, 148
pergeseran biru xiii, 269, 270, 343
pergeseran merah xiii, 269, 270, 271, 272, 273, 275, 276, 277, 344
permitivitas relatif 81, 343
permitivitas ruang hampa 80, 343
persamaan fotolistrik 190
persamaan nuklir 205, 215
PET 157, 229, 230, 252, 254, 255, 256, 257, 258, 343
pixsel 249, 251, 258, 343
pion (π) 342
positron 149, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 169, 171, 172, 173, 229, 230, 254, 255, 256, 257, 258, 341, 343
potensial henti 187
potensial listrik 53, 54, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 76, 77, 86, 87, 94, 137, 315, 339, 343
potensiometer 25, 40, 41, 43, 44, 343
Prinsip Kosmologis 273, 343
proses acak 217, 225, 343
proton xii, 3, 68, 70, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 161, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 176, 177, 178, 179, 203, 206, 207, 208, 209, 212, 213, 214, 215, 227, 254, 316, 326, 337, 340, 341, 342, 344

Q

quark 149, 150, 169, 170, 171, 172, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 326, 337, 338, 342, 344, 345, 346

quark down 172, 174

quark strange (s) 179

quark up 170, 172, 174

quasar 270, 273, 344

R

radian 322

radiasi benda hitam 264, 266

radiasi Bremmstrahlung 240

radiasi elektromagnetik xi, xiv, 182, 191, 201, 203, 206, 217, 240, 260, 264, 338, 339, 344, 345

radiasi gamma 154, 253

radiasi latar 154, 344

radioaktivitas 153, 154, 162, 163, 344

partikel alfa 156, 157, 159, 167

partikel β 154, 157, 177, 337

radiasi gamma 154, 253

radiasi latar 154, 344

radiasi γ 158

rangkaian 1, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 12, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 69, 78, 79, 80, 81, 82, 88, 91, 92, 93, 95, 97, 123, 129, 136, 141, 143, 144, 145, 148, 238, 280, 287, 309, 313, 335, 337, 340, 341, 342, 344, 346

Hukum Kirchhoff 25, 31

pembagi potensial 25, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 343

seri dan paralel 77, 82

rangkaian paralel 32, 344

kapasitor 60, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 135, 144, 145, 146, 148, 315, 338, 341, 343, 345

resistor 9, 10, 13, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 77, 84, 88, 89, 91, 92, 94, 95, 96, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 313, 324, 325, 335, 337, 341, 344, 345

rangkaian seri 31, 43, 344

kapasitor 60, 77, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 135, 144, 145, 146, 148, 315, 338, 341, 343, 345

resistor 9, 10, 13, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 77, 84, 88, 89, 91, 92, 94, 95, 96, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 313, 324, 325, 335, 337, 341, 344, 345

reaksi berantai 216, 344

reaksi termonuklir 344

redaman 128, 129, 229, 236, 244, 245, 344

redaman arus Eddy 128

resistansi internal 28, 45, 324, 344

pengukuran 101, 118, 137, 138, 183, 187, 198, 206, 249, 251, 273, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 301, 304, 309, 312, 343

resistansi R 89, 95, 96, 141

internal 22, 23, 28, 45, 165, 229, 321, 324, 339, 344

resistivitas 1, 14, 15, 21, 23, 344

resistor 9, 10, 13, 19, 20, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 77, 84, 88, 89, 91, 92, 94, 95, 96, 135, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 313, 324, 325, 335, 337, 341, 344, 345

LDR 1, 16, 17, 18, 19, 39, 341

pembagi potensial 25, 38, 39, 40, 42, 43, 45, 343

rheostat 29, 39, 44, 344, 345

termistor 1, 17, 18, 19, 25, 38, 39, 346

resonansi 232, 339, 345

Robert Millikan 2

ruang gelembung 132

rumus 41, 77, 167, 193, 270, 271, 273, 274, 275

S

satuan massa atom terpadu (u) 149, 206

satuan massa atom (u) 151, 345

Satuan pokok 337

smoothing 144, 145, 146, 148, 345

solenoida 97, 116, 117, 118, 127, 131, 133, 134, 337

spektrometer 112, 198, 345

spektrometer massa 112

spektroskopi 198, 345

spektrum x, xiii, xiv, 160, 181, 195, 196, 198, 199, 200, 201, 203, 230, 241, 242, 255, 259, 260, 268, 269, 270, 271, 276, 277, 343, 344, 345

emisi x, xii, xiv, 150, 154, 155, 157, 158, 159, 161, 162, 163, 164, 172, 173, 176, 177, 179, 181, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 195, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 204, 210, 218, 229, 241, 242, 254, 259, 268, 269, 338, 339, 342, 345

penyerapan 197, 200, 233, 236, 237, 239, 246, 247, 257, 345

spektrum elektromagnetik 230, 255, 345

spektrum emisi 195, 200, 259, 269, 345

spektrum garis x, xiv, 181, 195, 196, 198, 199, 201, 242, 268, 345

spektrum kontinu 195, 198, 199, 260, 268, 345

spektrum serapan 343, 344

bintang xiii, 199, 211, 259, 260, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 275, 276, 333, 339, 343, 344, 345, 346

spektrum sinar-X 241

T

tabung sinar-X 241, 243

tautan fluks magnet ($N\Phi$) 124

Technetium-99m 253

tegangan Hall 97, 113, 114, 115, 116, 131

tekanan 195, 198, 211, 213, 217, 231, 232, 320, 344

teori kuantum xiv, 168, 188, 193, 201, 345

termistor 1, 17, 18, 19, 25, 38, 39, 346

termometer 280

tesla (T) 104, 130, 346

tingkat energi diskrit 196, 346

Tomografi emisi positron (PET) 254

transduser 229, 231, 232, 233, 235, 238, 239, 346

transduser piezo-listrik 229, 231, 346

V

volt (V) 8

Profil Penyadur



Irma Rahma Suwarma, S.Si, M.Pd, Ph.D

Instansi : Universitas Pendidikan Indonesia (UPI)

Alamat Instansi : Jl. Dr. Setiabudhi No 229 Bandung

Riwayat Pekerjaan (10 Tahun terakhir)

- 1 (2008-sekarang) Dosen di Departemen Pendidikan Fisika, UPI

Riwayat Pendidikan dan tahun Belajar

- 1 (1999-2003), S1 Fisika, Universitas Padjadjaran, Indonesia
- 2 (2004-2006), S2 Pendidikan IPA, Universitas Pendidikan Indonesia, Indonesia
- 3 (2012-2015), S3 Information Science and Technology, Educational Division, Shizuoka University, Japan

Judul Buku dan tahun terbit:

- 1 (2021), Mengenal Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) dalam Pembelajaran di Sekolah Dasar dan Menengah.
- 2 (2020), Unit Pembelajaran STEM: Clean Your Artery and Prevent Heart Attack.
- 3 (2010), Fisika Inti (buku ajar perkuliahan)

Judul Penelitian dan tahun terbit:

- 1 Eja, TR Ramalis, IR Suwarma (2020). Profile of students' critical thinking ability in project based learning integrated science technology engineering and mathematics, Journal of Physics: Conference Series
- 2 A Utami, D Rochintaniawati, IR Suwarma (2020). Enhancement of STEM literacy on knowledge aspect after implementing science, technology, engineering and mathematics (STEM)-based instructional module, Journal of Physics: Conference Series
- 3 IR Suwarma, Y Kumano (2019). Implementation of STEM education in Indonesia: teachers' perception of STEM integration into curriculum, Journal of Physics: Conference Series
- 4 IR Suwarma, I Kaniawati, DS Kaniawati (2019), Engaging students in STEM based learning through media and technology, Journal of Physics: Conference Series.
- 5 N Putri, D Rusdiana, IR Suwarma (2019), The Comparison of Student Creative Thinking Skill Using CBL Implemented in STEM Education and Combined with PSL Worksheet in Indonesian School., Journal of Science Learning.
- 6 Suryana, A., Sinaga, P., Suwarma, I.R. (2018), Analysis of the ability of junior high school students' performance in science in STEM project-based learning, Journal of Physics: Conference Series.
- 7 Puspita, I., Kaniawati, I., Suwarma, I.R (2017), Analysis of Critical Thinking Skills on the Topic of Static Fluid, Journal of Physics: Conference Series, 2017



Lia Laela Sarah, S.Pd., M.T

Instansi : SMAS Laboratorium Percontohan UPI
Alamat Instansi : Jl. Dr. Setiabudi No 229 Bandung
Bidang Keahlian : Pendidikan Fisika

Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir)

- 1 Guru Fisika (2006 s.d. sekarang)
- 2 Wakil Kepala Sekolah (2013 – 2021)

Riwayat Pendidikan dan Tahun Belajar :

- 1 Pendidikan Fisika, Universitas Pendidikan Indonesia (2001 s.d. 2005)
- 2 Teknik Elektro, Opsi TMDG, Institut Teknologi Bandung (2010 s.d. 2012)

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir)

- 1 Paket Unit Program Keprofesian Berkelanjutan Melalui Peningkatan Kompetensi Pembelajaran Berbasis Zonasi : Paket Unit Pembelajaran Listrik Arus Searah dan Listrik Statis, Dirjen GTK Kemdikbud, 2019.
- 2 Unit Pembelajaran Fisika Berbasis Inkuiri : Gerak Lurus dengan Percepatan Tetap, PPPPTKIPA – Dirjen GTK Kemdikbud, 2017.

Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir)

- 1 Automatic Trash bin Arduino Project (ATAP): Enhancing Computational Thinking Skills Through STEM Learning, Seaqis Journal of Education, Vol 1. Tahun 2021
- 2 The implementation of discovery learning using personal site in physics online classroom, Journal of Physics Conference Series, Vol 1957 012042, Tahun 2021
- 3 Measurement of National Education Standards: (Analysis of Achievement of Accreditation Results and Improvement Strategy), International Journal of Information and Education Technology 6, 416-421.
- 4 Analysis of students interaction on technology based Conceptual Change Text (CCT) in physics classroom. Journal of Physics: Conference. Series 1280 (5), 052061 / 2019
- 5 STEM Learning Implementation Using A Simple Arduino Application to Increase Students' Activity dan Learning Result, Science Magazine (Seaqis), 2, April 2020
<https://scholar.google.com/citations?user=sIoikrMAAAAJ&hl=en>



Dra. Theresia Ang Le Tjiem

Instansi : Praktisi

Alamat Instansi : -

Bidang Keahlian : Pendidikan Fisika

Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir)

- 1 Guru Fisika (1990 s.d. sekarang)
- 2 Koordinator Bidang Pendidikan Sekolah Ursulin (20– 2019)

Riwayat Pendidikan dan Tahun Belajar :

- 1 Pendidikan Fisika, IKIP Sanata Dharma Yogyakarta (1984 s.d. 1990)
- 2 Sekolah Tinggi Filsafat Driyarkara Jakarta (2010 s/d 2014)

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir)

- 1 Selamat Pagi Fisika, Modul Pembelajaran Fisika SMP Santa Ursula Jakarta
- 2 E-Book Fisika SMA Santa Ursula BSD.

Profil Penelaah



Surya Darma, S.Si, M.Sc

Instansi : Dept. Fisika FMIPA Universitas Indonesia
Alamat Instansi : Gedung Fisika FMIPA Kampus UI Depok 16424
Bidang Keahlian : Fisika Instrumentasi, Kecerdasan Buatan, Pengolahan Citra, Sistem Kendali

Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir):

- 1 Dosen Tamu di Sekolah Tinggi Sandi Negara, 2004 – 2010.
- 2 Dosen di Fakultas Teknik Universitas Indonesia, 2002 – 2017.
- 3 Dosen di Fakultas Ilmu Komputer Universitas Indonesia, 2010 – 2016.
- 4 Dosen di Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia, 2001 – sekarang.
- 5 Dosen di Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sekarang

Riwayat Pendidikan dan Tahun Belajar:

- 1 Sarjana (S.Si) bidang Fisika, Departemen Fisika FMIPA Universitas Indonesia, 2000.
- 2 Master of Science bidang Fisika Instrumentasi, Sandwich Program Universitas Indonesia and ICTP Italy, 2006.

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

- 1 Buku Panduan Praktikum Sistem Tertanam, Departemen Fisika, 2016.
- 2 Buku Panduan Praktikum Sensor dan Aktuator, Departemen Fisika, 2018.
- 3 Buku Panduan Praktikum Sistem Kendali, Departemen Fisika, 2018.
- 4 Buku Teks Pelajaran Fisika SMA/MA Kelas X, Pusat Kurikulum dan Perbukuan, Kemdikbud, 2019.

Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

- 1 S. Darma, J.L. Buessler, G. Hermann, J.P. Urban, B. Kusumoputro, Visual Servoing Quadrotor Control in Autonomous Target Search, IEEE 3rd International Conf. on System Engineering and Technology (ICSET), 2013.
- 2 Ricky Nauvaldy Putra and Surya Darma, Control System of Hexacopter Using Color Histogram Footprint And Convolutional Neural Network, International Symposium on Current Progress on Mathematics and Sciences 2016, AIP Conf Proceedings 1862(1) 030064, 2017.
- 3 Lanny Catrin Dale, Surya Darma, Prawito, Rancang Bangun dan Kendali Semi-Otomatis Hexacopter dengan Algoritma Genetik A*, Seminar Nasional Fisika, Jakarta, 2016.
- 4 Hanafi Anis, Ahmad Haris Indra Fadhillah, Surya Darma and Santoso Soekirno, Automatic Quadcopter Control Avoiding Obstacle Using Camera with Integrated Ultrasonic Sensor, JPCS 1011 (2018) 012046, IOP Publishing, 2018.
- 5 H Malik, S Darma and S Soekirno, Quadcopter Control Using Speech Recognition, JPCS 1011 (2018) 012049, IOP Publishing, 2018.

- 6 L.C. Dale, Surya Darma and Prawito Prajitno, The Shortest Path Determination on Hexacopter Based RGB Image Processing, AIP Conf. Proceedings 2023(1):020052 , 2018.
 - 7 A Faza and Surya Darma, Histogram of Oriented Gradients as Feedback on Proportional Navigation (PN) Control and Proportional-Integral-Derivative (PID) Control on Quadcopter Platforms, AIP Conf. Proceedings 2168(1):020014, 2019.
 - 8 Akmal Dutasatria and Surya Darma, Automatic Take-Off Landing Quadcopter Control on Dynamics Platform, JPCS 1528:012047, IOP Publishing, 2020.
 - 9 Alfarih Faza and Surya Darma, Implementation of Single Shot Detector for Object Finding in Drone Platform, JPCS 1528:012005, IOP Publishing, 2020.
 - 10 AHI Fadhillah, AT Safrudin and Surya Darma, Unmanned Aerial Vehicle Object Tracking and Following, JPCS 1528:012018, IOP Publishing, 2020.
 - 11 Alfarih Faza, Surya Darma and Santoso Sukirno, The New SSD Image Detection for Quadcopter Platform Control Simulation, AIP Conf Proceedings 2314(1):040016, 2020.
 - 12 AT Safrudin and Surya Darma, Object Detection Cascaded Canny Edge with SURF Method in Quadcopter Drone Simulation, AIP Conf Proceedings 2314(1):040019, 2020.
 - 13 MEC Budiamin, Bambang Soegijono, Surya Darma, Structure and electrochemical behaviour of composite Pb-nano ZnO in sulfuric acid solution for different temperature Structure and electrochemical behaviour of composite Pb- nano ZnO in sulfuric acid solution for different temperature, Journal of Physics CS 1825(1), 2021.
 - 14 Hanan Suryandhito, Bambang Soegijono, Surya Darma, Effects of gold on the structure and electrochemical behavior of lead-gold composite in different temperatures sulfuric acid, Journal of Physics CS 1825(1):012058, 2021.
-



Dr. Ni Ketut Lasmi, M.PFis

Instansi : SMA Santa Maria 2 Bandung
Alamat Instansi : Jl. Sulaksana Baru I no 18 Bandung
Bidang Keahlian : Fisika

Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir):

- 1 Guru SMA Santa Maria
- 2 Penulis Buku Pelajaran Fisika
- 3 Tim Bedah SKL UN Fisika PT Penerbit Erlangga
- 4 Kaprodi PGSD Putra Pajajaran Bandung
- 5 Penyusun Capaian Pembelajaran Fisika SMA Sekolah Penggerak

Riwayat Pendidikan dan Tahun Belajar:

- 1 SD N 3 Ubud, Bali, Tahun 1966
- 2 SMPN Ubud, Bali, Tahun 1971
- 3 SMAN Gianyar, Tahun 1975
- 4 Sarjana Muda (BA) Jurusan Fisika, Universitas Udayana Bali 1978
- 5 Sajana (S-1) Pendidikan Fisika IKIP Bandung, Nopember 1981
- 6 Magister Pengajaran Fisika (S-2) ITB 2010
- 7 Program Doktor Fisika (S-3) ITB 2013

Riwayat Pekerjaan/Profesi (10 Tahun Terakhir)

- 1 1984 - 2015 : Staf Pengajar Fisika dan Praktikum di SMA Santa Maria 1,2 Bandung
- 2 2013 - 2016 : Ketua Prodi PGSD STKIP Pajajaran Bandung
- 3 2017 – sekarang : Praktisi pendidikan

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir)

- 1 Ketut Lasmi, (2014), Mandiri Fisika kelas X, Penerbit Erlangga
- 2 Ketut Lasmi, (2015), Mandiri Fisika kelas XI, Penerbit Erlangga
- 3 Ketut Lasmi, (2015), Mandiri Fisika kelas XII, Penerbit Erlangga
- 4 Ni Ketut Lasmi, (2020), Fisika Kelompok Peminatan MIPA kelas X, Penerbit Erlangga
- 5 Ni Ketut Lasmi,(2020),Fisika Kelompok Peminatan MIPA kelas XI, Penerbit Erlangga
- 6 Ni Ketut Lasmi,(2020),Fisika Kelompok Peminatan MIPA kelas XII, Penerbit Erlangga

Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

- 1 PROSIDING, ISBN : 978 – 602 – 19655 – 1 – 1, Seminar: Kontribusi Fisika dalam Pengajaran, Teknologi dan Penyelesaian Masalah Masyarakat, Bandung 1-2 Desember 2011, Penerbit: Prodi Magister Pengajaran Fisika FMIPA ITB, 2011 Sebagai Materi Dalam Makalah Yang Berjudul Aplikasi Energi Biogas dalam Upaya Pemenuhan Kebutuhan Energi Listrik, Halaman 129.
- 2 PROSIDING, ISBN : 978 – 979 – 96880 – 7 – 1, Seminar Nasional : Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA, Yogyakarta 18 Mei 2013, Penerbit : Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, 2013 Sebagai Materi Dalam Makalah Yang Berjudul Perhitungan Gangguan dan Spektrum Energi Atom Helium Menggunakan Metoda Rayleigh-Ritz Secara Numerik, Halaman F-143
- 3 PROCEEDING, ISBN : 978 – 602 -8817 – 46 -2, Seminar Nasional Energi Indonesia : Green Meals, Green Life, Green World 23 Mei 2013, Penerbit : Universitas Atma Jaya Yogyakarta, 2013 Sebagai Materi Dalam Makalah Yang Berjudul Desain Instrumen Pencampur Biogas Dan Udara Untuk Menghasilkan Daya Listrik, Halaman 111.
- 4 Journal of Physics, Conference Series 739 (2016)012090, doi : 10.1088/1742-6596/739/1/012090, The Increasing of Air and Biogas Mixer Instrument for Genereting Friendly Environmental Electricity Power, 6th Asian Physics Symposium, IOP Publishing, Institut Teknologi Bandung.
- 5 Journal of D2ME 2016 , MATEC Web of Conference 82,01018(2016), DOI: 10.1051/matecconf/20168201018, The Improvement of Carburater Efficiency Using Biogas-based venturi, Auckland University of Technology , New Zealand

Profil Penyunting



Drajat, S.Pd. M.MPd

Instansi : SMP Negeri 1 Cangkuang Kab. Bandung
Alamat Instansi : Jl.Tenjolaya, Ds. Ciluncat
Bidang Keahlian : Matematika

Riwayat pekerjaan/profesi (10 Tahun Terakhir):

- 1 2007 – sekarang: Guru SMP Negeri 1 Cangkuang, Kabupaten Bandung

Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

- 1 S2: Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Ganesha Jakarta
- 2 S1: Pendidikan Fisika UPI Bandung

Judul Buku dan Tahun Terbit (10 Tahun Terakhir):

- 1 Matematika Bikin Ketawa (Dar Mizan, 2008);
- 2 Cara Praktis Jago Matematika untuk SMP & SMA (Dar Mizan, 2008);
- 3 Korek Api Ajaib dan Tabungan ke Surga (Dar Mizan, 2008).
- 4 Sungai di mana Air Mengalir (Pendidikan Dasar dan Menengah Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan, 2019)
- 5 Cara Mudah Membuat PTK (Insan Cendekia Mandiri, 2020)

Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 tahun terakhir):

- 1 Menumbuhkembangkan Minat Siswa Belajar Matematika dengan Menggunakan Metode Quantum Teaching (2017).
- 2 Menumbuhkan Minat Belajar Matematika dengan Metode Cerdas (Cerita dan Aplikasi) (2019)

Kreatifitas yang sudah dilakukan

A Buku yang sudah diterbitkan

- 1 Aku Suka Matematika Kelas I s.d. Kelas VI, Grafindo
- 2 Belajar Mudah Matematika Kelas VII s.d Kelas VIII, Nimas Multima
- 3 Ilmu Pengetahuan Alam Terpadu Kelas VII A dan Kelas VII B, Regina
- 4 Ilmu Pengetahuan Alam Terpadu Kelas VIII A dan Kelas VIII B, Regina
- 5 Ilmu Pengetahuan Alam Terpadu Kelas IX A dan IX B, Regina
- 6 Fisika untuk SMA Kelas X s.d. Kelas XII, Inprasra
- 7 Fisika yang Menajubkan Kelas X s.d Kelas XII, Inprasra

B Buku Nonfiksi/Fiksi

- 1 Bersahabat dengan Matematika, Rosdakarya
- 2 Matematika yang Menajubkan, Komik Anak Sekolah, Dar Mizan

- 3** Matematika Bikin Ketawa, Dar Mizan
- 4** Menghitung Vampir, Dar Mizan
- 5** Math Story, Dar Mizan
- 6** Bakso Ajaib, Dar Mizan
- 7** Cara Praktis Jago Matematika, Dar Mizan
- 8** SuperMath Seri 1 s.d Seri 6, Tinta Emas
- 9** Bunyi, Grafindo
- 10** Cahaya, Grafindo
- 11** Cuaca, Grafindo
- 12** Gelombang, Grafindo
- 13** Magnet dan Listrik, Grafindo
- 14** Suhu dan Kalor, Grafindo
- 15** Zat dan Sifatnya, Grafindo
- 16** Air, Grafindo
- 17** Alam Semesta, Grafindo
- 18** Penemu dan temuannya, Grafindo
- 19** Pengantar Metodologi Pembelajaran, Bintang Cerdas
- 20** Cara Mudah Menulis PTK, Cendekia