

# Serial Mekanika Kuantum Minimalis 2.0

## Kuliah #03-Polarisasi Gelombang Elektromagnetik

Ahmad R. T. Nugraha (@fisikawan.gendeng), Hendry M. Lim

ver. 28 Februari 2026

Polarisasi dari gelombang elektromagnetik (EM) adalah fenomena yang dalam mekanika kuantum dapat menjadi suatu keadaan dengan derajat kebebasan tersendiri. Sebelum membahas polarisasi dalam mekanika kuantum, pemahaman terhadap polarisasi dan representasinya dalam fisika klasik akan sangat bermanfaat. Pada kuliah ini, kita akan mengulas teori klasik dari polarisasi gelombang EM.

### 1 Vektor Polarisasi

Sebuah gelombang EM, seperti gelombang cahaya, tersusun atas medan listrik dan medan magnet yang merambat. Polarisasi gelombang ditentukan oleh arah dari vektor medan listrik. Gelombang EM merupakan gelombang transversal sehingga medan listrik  $\vec{E}$  tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Asumsikan gelombang merambat dalam vakum pada arah sumbu-z sehingga vektor gelombangnya diberikan oleh  $\vec{k} = k\hat{u}_z$ . Magnitudo dari vektor gelombang terkait dengan panjang gelombang  $\lambda$ , frekuensi  $f$ , dan frekuensi sudut  $\omega$  dari gelombang tersebut melalui formula

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{\omega}{c}, \quad (1)$$

dengan  $c$  adalah laju gelombang dalam vakum. Medan listriknya dapat dituliskan sebagai

$$\vec{E} = E_x \hat{u}_x + E_y \hat{u}_y, \quad (2)$$

dengan

$$E_x = E_{0x} \cos(kz - \omega t) \text{ dan } E_y = E_{0y} \cos(kz - \omega t + \phi). \quad (3)$$

$E_{0x}$  dan  $E_{0y}$  pada persamaan di atas adalah amplitudo-amplitudo dari medan listrik arah  $x$  dan  $y$ . Pergeseran fase  $\phi$  merepresentasikan fakta bahwa dua komponen medan ini tidak mesti berosilasi dengan fase yang sama. Polarisasi dari medan ditentukan oleh magnitudo relatif dari  $E_{0x}$  dan  $E_{0y}$  serta pergeseran fasenya.

Pada pers. (3), kita telah menulis medan listrik dalam bentuk fungsi cosinus dengan pertimbangan bahwa medan ini merupakan besaran fisis yang riil. Namun, secara matematis, akan lebih memudahkan bagi kita untuk menuliskannya dalam bentuk

eksponen kompleks, dengan catatan bahwa kita selalu dapat mengambil bagian riilnya ketika hendak mencari medan sesungguhnya. Dengan konvensi ini, komponen-komponen dari medan listrik dapat dituliskan sebagai

$$E_x = E_{0x} e^{(kz - \omega t)} \text{ dan } E_y = E_{0y} e^{(kz - \omega t + \phi)}, \quad (4)$$

sehingga medan totalnya adalah

$$\vec{E} = E_{0x} e^{(kz - \omega t)} \vec{u}_x + E_{0y} e^{(kz - \omega t + \phi)} \vec{u}_y. \quad (5)$$

Amplitudo  $E_0$  dari medan  $\vec{E}$  adalah

$$E_0 = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}. \quad (6)$$

Dalam bentuk amplitudo di atas, medan listrik bisa tuliskan

$$\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \left[ \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} \vec{u}_y e^{i\phi} \right]. \quad (7)$$

Sekarang, kita dapat mendefinisikan vektor polarisasi  $\vec{P}$  sebagai besaran di dalam tanda kurung pada pers. (7):

$$\vec{P} = \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} e^{i\phi} \vec{u}_y \quad (8)$$

Secara umum, vektor polarisasi merupakan vektor kompleks sekaligus vektor satuan:

$$|\vec{P}| = \sqrt{\vec{P}^* \cdot \vec{P}} = \sqrt{\left(\frac{E_{0x}}{E_0}\right)^2 + \left(\frac{E_{0y}}{E_0}\right)^2} = 1 \quad (9)$$

Medan listrik kemudian dapat dituliskan dalam bentuk vektor polarisasi sebagai

$$\vec{E} = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \vec{P} \quad (10)$$

Perhatikan bahwa pada pers. (10) tidak ada kebergantungan terhadap arah  $x$  maupun  $y$ . Medan yang konstan sepanjang sembarang bidang yang tegak lurus dengan arah rambat (sumbu- $z$ ) semacam ini dikenal sebagai gelombang bidang.

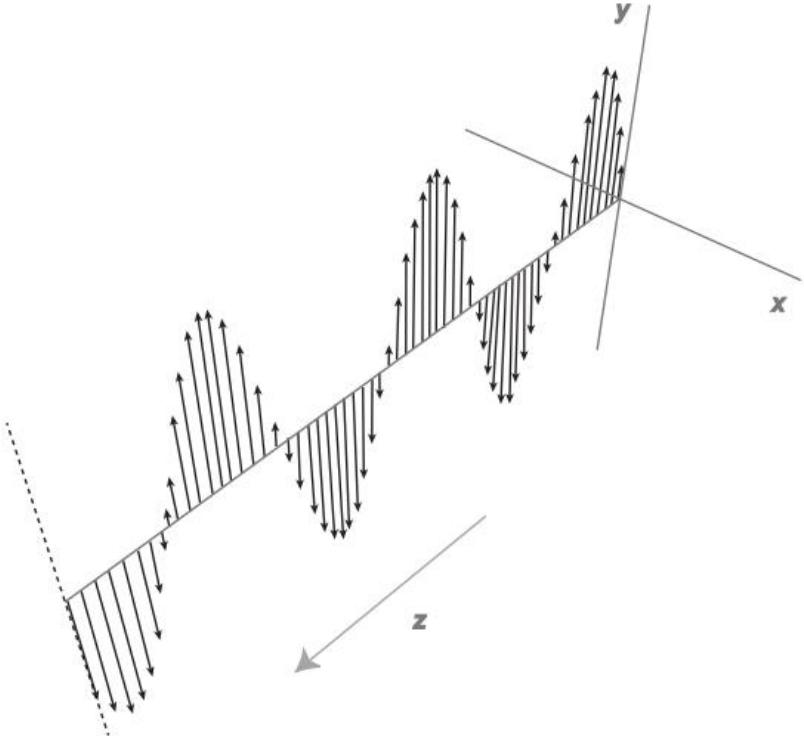
Detektor optik tidak merespons langsung pada medan listrik, melainkan pada daya cahaya yang menghinggapi detektor tersebut. Hal ini dikarenakan medan listrik dari cahaya berosilasi sangat cepat di wilayah optik spektrum cahaya. Detektor tidak dapat mengikuti osilasi ini dan justru terata-ratakan sepanjang banyak perioda osilasi. Daya sebanding dengan intensitas  $I$ , yang akan kita definisikan sama dengan kuadrat magnitudo medan:

$$I \equiv |\vec{E}|^2 = \vec{E}^* \cdot \vec{E} \quad (11)$$

Intensitas tidak berfluktuasi pada frekuensi-frekuensi optik. Fakta ini dapat dilihat melalui penjabaran

$$I = \vec{E}^* \cdot \vec{E} = (E_0 e^{-i(kz - \omega t)} \vec{P}^*) \cdot (E_0 e^{i(kz - \omega t)} \vec{P}) = (E_0)^2, \quad (12)$$

yang tidak memiliki suku osilasi yang bergantung pada waktu. Intensitas ini mengikuti fluktuasi amplitudo medan  $E_0$  yang lambat (relatif terhadap waktu respons detektor) dan tidak mengikuti osilasi medan pada frekuensi optik.



Gambar 1: Sebuah gelombang terpolarisasi linier yang merambat pada arah-z.

## 2 Macam-macam Polarisasi

### Polarisasi linier

Mari kita tinjau kasus khusus pergeseran fase nol ( $\phi = 0$ ) antara komponen-komponen  $x$  dan  $y$  dari medan. Pada kasus ini, vektor polarisasi menjadi riil dan sama dengan

$$\vec{P} = \frac{E_{0x}}{E_0} \vec{u}_x + \frac{E_{0y}}{E_0} \vec{u}_y. \quad (13)$$

Vektor ini menggambarkan suatu garis yang membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu-x, yakni

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{E_{0y}}{E_{0x}} \right). \quad (14)$$

Gambar 1 menunjukkan potret ilustrasi gelombang terpolarisasi linier (sepanjang  $\vec{u}_y$ ) yang merambat pada arah-z. Seiring dengan waktu yang bertambah, seluruh gelombang meluncur pada sumbu-z sehingga pada setiap bidang yang tegak lurus dengan sumbu-z medan listrik berosilasi bolak-balik.

## Polarisasi melingkar (sirkular)

Sekarang tinjau kasus khusus  $\phi = \pi/2$  dan  $E_{0x} = E_{0y} = E_0/\sqrt{2}$ . Vektor polarisasinya adalah

$$\vec{P} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y). \quad (15)$$

Bagaimana kita bisa memahami vektor kompleks ini? Ingat bahwa untuk mendapatkan medan riil kita harus mengambil bagian riilnya. Namun, vektor polarisasi bersifat konstan terhadap ruang dan waktu sehingga pengambilan bagian riilnya hanya meninggalkan sebuah faktor konstanta yang tidak memberikan informasi tentang osilasi medan. Dalam hal ini, kita harus kembali pada bentuk fisis medan yang diberikan oleh pers. (3). Dengan asumsi yang sudah kita buat, komponen-komponen medan ini dapat kita tuliskan sebagai

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(kz - \omega t), \quad (16)$$

$$E_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos\left(kz - \omega t + \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(kz - \omega t). \quad (17)$$

Kedua medan di atas memiliki amplitudo yang sama dengan fase yang tergeser satu sama lain. Untuk melihat bagaimana medan-medan ini berosilasi terhadap waktu, pada suatu bidang yang tegak lurus arah perambatan, kita bisa atur  $z = 0$  untuk memperoleh

$$E_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(-\omega t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \cos(\omega t), \quad (18)$$

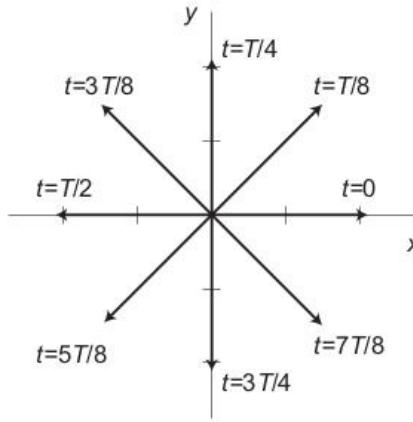
$$E_y = -\frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(-\omega t) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \sin(\omega t) \quad (19)$$

Gambar 2 menunjukkan total vektor medan listrik yang diperoleh dari pers. (18) dan (19) pada waktu yang berbeda. Besaran waktu pada Gambar 2 diekspresikan sebagai fraksi periode osilasi  $T = 2\pi/\omega$ . Medan listrik pada gambar tersebut berputar menyapu suatu lingkaran sehingga medan ini dikatakan terpolarisasi melingkar. Medan listrik ini membuat satu putaran penuh untuk setiap periode osilasi  $T$ .

Polarisasi melingkar memiliki dua ragam, yakni melingkar kiri (*left-circular polarization/LCP*) dan melingkar kanan (*right-circular polarization/RCP*). Dalam konvensi yang akan kita gunakan sepanjang kuliah, Gambar 2 merepresentasikan cahaya yang terpolarisasi melingkar kiri. Walaupun arah rambat cahaya menjauh dari sumber (keluar halaman teks), jika kita mengarahkan jempol kiri ke arah sumber (ke dalam halaman teks), jari-jari kita yang lain akan melengkung berlawanan jarum jam. Gambar 3 menunjukkan representasi 3D dari suatu gelombang terpolarisasi melingkar kiri.

## Polarisasi eliptis dan acak

Polarisasi linier dan melingkar adalah kasus-kasus khusus polarisasi. Jika suatu gelombang memiliki polarisasi yang terdefinisi dengan baik, tetapi tidak termasuk dua kasus khusus



Gambar 2: Arah vektor medan listrik pada waktu-waktu yang berbeda untuk suatu gelombang terpolarisasi melingkar kiri yang merambat keluar halaman teks.

tersebut, gelombang ini mesti terpolarisasi eliptis. Orientasi dan eksentrisitas dari elips ditentukan oleh rasio amplitudo komponen-komponen  $x$  dan  $y$  dari medan listrik serta pergeseran fasenya.

Jika polarisasi berfluktuasi secara acak terhadap waktu, polarisasi gelombang dikatakan acak atau medannya tidak terpolarisasi. Dalam situasi ini, kita tidak dapat melakukan spesifikasi parameter-parameter dari gelombang secara eksak. Namun, kita masih bisa mendeskripsikan statistika fluktuasinya. Salah satu caranya adalah dengan parameter Stokes. Kita tidak akan membahas hal ini lebih jauh pada kuliah, sekadar sebagai pengalaman tambahan.

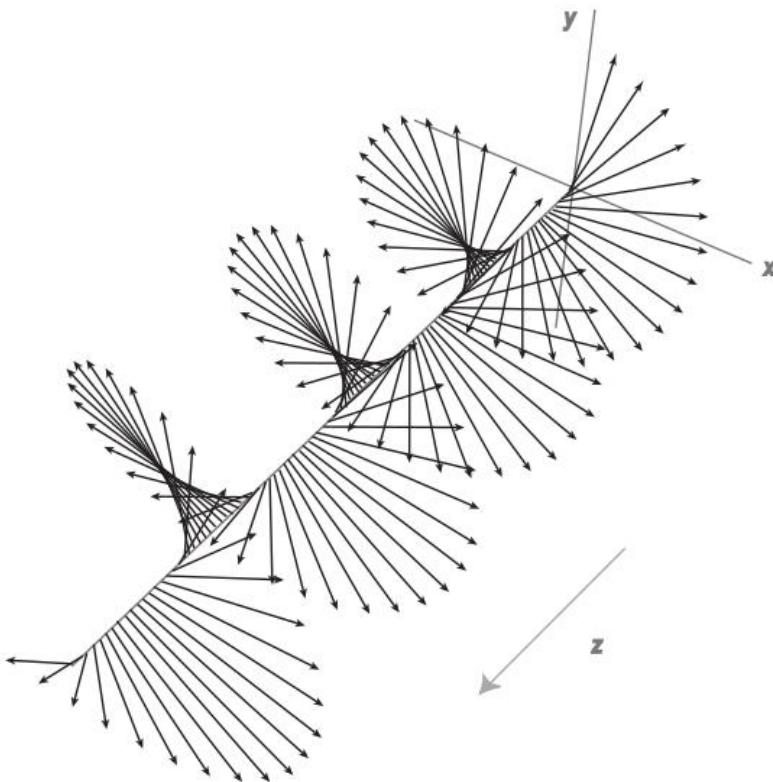
### 3 Material Bias Ganda

Medium perambatan cahaya tidak hanya membiarkan cahaya lewat, tetapi juga berinteraksi dengannya. Material merespons cahaya dengan menghasilkan medan listrik atau magnetnya sendiri, yang kembali memengaruhi cahaya tersebut. Efek paling umum yang dapat kita amati adalah pergeseran fase yang menyebabkan perubahan pada laju rambat cahaya dalam material; ini dikenal sebagai pembiasan. Karena jumlah gelombang yang melewati titik tertentu tidak berubah, frekuensi cahaya tidak dipengaruhi oleh material. Jadi, pembiasan memengaruhi panjang gelombang serta vektor gelombang cahaya. Besaran yang terkait dengan pembiasan adalah indeks bias  $n$  yang didefinisikan sebagai rasio antara cepat rambat cahaya  $c$  dalam vakum terhadap cepat rambatnya  $v$  dalam medium:

$$n = \frac{c}{v} \quad (20)$$

Kita dapat menulis

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega}{c/n} = nk_0 = n \frac{2\pi}{\lambda_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (21)$$



Gambar 3: Gelombang terpolarisasi melingkar kiri yang merambat pada arah-z.

Dapat kita lihat bahwa vektor gelombang  $k$  cahaya di material adalah  $n$  kali nilainya  $k_0$  di vakum, sementara panjang gelombangnya  $\lambda$  adalah  $1/n$  kali nilainya  $\lambda_0$  di vakum. Pada umumnya,  $n > 1$  sehingga gelombang cahaya menjadi lebih rapat dibandingkan dengan dalam vakum.

Proses pembiasan cahaya bergantung pada respons dari medium rambatnya. Pada umumnya, sebuah material dapat memiliki respons yang berbeda tergantung pada arah rambat dan polarisasi cahaya; kedua besaran ini menentukan orientasi osilasi medan listrik/magnet di dalam material. Perbedaan respons ini terjadi karena struktur atom dari suatu material tidak selalu sama pada arah yang berbeda; lebih tepatnya, respons optik sebuah material tergantung pada simetri atom penyusunnya. Beberapa material bersifat “isotropik secara optik”: respons optiknya sama untuk berbagai macam arah rambat. Jika tidak isotropik secara optik, material tersebut kita katakan bersifat “anisotropik secara optik”.

Secara lebih khusus, indeks bias merupakan salah satu jenis respons optik. Material yang indeks biasnya bersifat anisotropik dinamakan “material bias ganda” (*birefringent material*); semua material bias ganda adalah material yang anisotropik secara optik, tapi sebuah material yang anisotropik secara optik belum tentu merupakan material bias ganda.

Jenis material bias ganda yang paling sederhana adalah material “uniaksial”. Material

semacam ini memiliki satu sumbu yang disebut “sumbu optik”. Indeks bias untuk arah sumbu optik berbeda dengan sumbu yang tegak lurus dengan sumbu optik. Bayangkan satu berkas cahaya yang melewati material ini, yang arah rambatnya membentuk suatu sudut  $\theta$  terhadap sumbu optik. Cahaya ini dapat kita uraikan menjadi dua komponen:

- Medan listrik dari komponen pertama berosilasi tegak lurus terhadap arah rambat cahaya dan terhadap sumbu optik. Indeks bias yang dirasakan oleh komponen ini tidak bergantung pada  $\theta$ , sehingga kita punya indeks bias  $n_o$  (*o*: *ordinary*) yang sama untuk komponen ini tidak peduli arah rambat cahaya kita. Komponen ini kita namakan “komponen biasa” (*ordinary component*) karena sifat pembiasannya seperti pembiasaan biasa pada material isotropik: tidak bergantung pada arah rambat cahaya.
- Medan listrik komponen kedua berosilasi dalam bidang yang dibentuk arah rambat dan sumbu optik. Indeks bias yang dirasakan komponen ini bergantung pada  $\theta$ , dan oleh karenanya arah rambat cahaya. Khusus untuk kasus yang medan listriknya berosilasi sejajar terhadap sumbu optik, komponen ini akan merasakan indeks bias sebesar  $n_e$  (*e*: *extraordinary*). Di luar kasus ini, komponen kedua akan merasakan suatu indeks efektif yang bergantung pada  $n_o$  dan  $n_e$ ; ini sifat yang berbeda dibandingkan dengan komponen biasa yang hanya bergantung pada  $n_o$ . Karena sifat pembiasannya yang tidak seperti medium isotropik, komponen ini disebut sebagai “komponen luar biasa” (*extraordinary component*).

Tergantung jenis materialnya, kita dapat punya  $n_e > n_o$  ataupun  $n_e < n_o$ . Biasanya, sumbu dengan indeks bias lebih kecil, sehingga cahaya merambat lebih cepat, dinamakan sumbu cepat (*fast axis*, FA). Sementara itu, sumbu dengan indeks bias lebih besar dinamakan sumbu lambat (*slow axis*, SA).

Selain material uniaksial, terdapat pula material “biaksial”, yang indeks biasnya berbeda untuk ketiga sumbu ( $x, y, z$ , misalnya). Kita tidak akan membahas material biaksial di sini.

## 4 Analisis Vektor Poynting

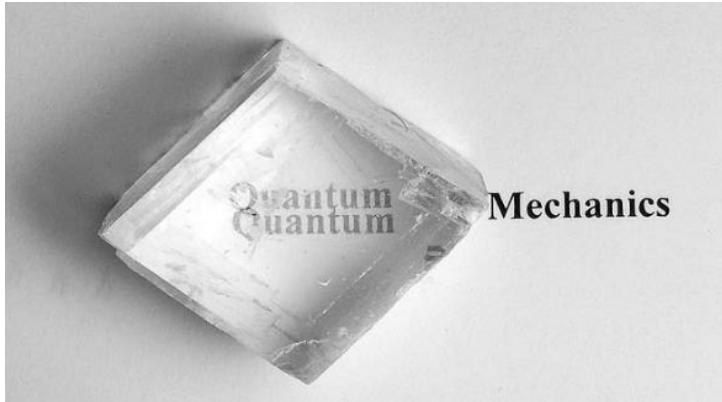
Pada suatu titik dalam kehidupan kita, ada kemungkinan kita pernah menemui sekeping kristal kalsit dan ketika kristal itu ditaruh di atas benda, tampaklah “salinan” citra dari benda tersebut (contoh di Gambar 4). Ini adalah fenomena “pembiasan ganda” yang terjadi pada material bias ganda.

Kita mungkin langsung berpikir bahwa kejadian seperti pada Gambar 4 disebabkan oleh dua indeks bias pada material bias ganda yang membuat sinar-sinar berbelok pada dua sudut berbeda sesuai hukum Snell. Betul demikian, tetapi cerita sepenuhnya belum usai.

Hukum Snell menyatakan bahwa

$$n_i \sin \theta_i = n_r \sin \theta_r, \quad (22)$$

dengan  $i$  merujuk pada berkas datang dan  $r$  merujuk pada berkas yang terbiasakan. Sudut-sudut pada persamaan di atas merujuk pada arah vektor gelombang  $k$  terhadap garis



Gambar 4: Pembiasan ganda pada kalsit menghasilkan dua citra.

tegak lurus (normal) permukaan. Jika berkas datang secara normal terhadap permukaan  $\theta_i = 0$ , kita akan peroleh  $\theta_r = 0$ , tidak tergantung pada indeks bias. Berkas sinar tampaknya akan melewati medium tanpa pembelokan. Namun, pada material bias ganda, cahaya dapat berbelok walaupun hukum Snell tidak mengindikasikannya.

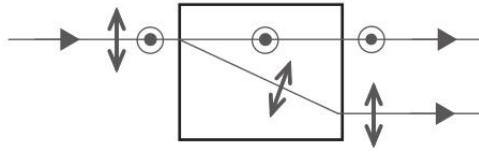
Pertanyaannya, jika vektor gelombang  $\vec{k}$  tidak berbelok, apa lalu yang harus berbelok? Jawabannya, aliran energi yang berbelok. Energi mengalir sepanjang arah vektor Poynting  $\vec{S}$ , yang diberikan oleh medan listrik dan medan magnet sebagai berikut:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu}(\vec{E} \times \vec{B}), \quad (23)$$

dengan  $\mu$  adalah permeabilitas dari medium. Di dalam suatu medium isotropik,  $\vec{k} \parallel \vec{S}$  dan  $\vec{k} \perp \vec{E}$ . Sementara itu, di dalam medium anisotropik, cahaya untuk salah satu polarisasi dapat memenuhi relasi tersebut ( $\vec{k} \parallel \vec{S}$  dan  $\vec{k} \perp \vec{E}$ ), disebut sebagai “gelombang biasa”, tetapi cahaya pada polarisasi satunya lagi yang ortogonal (disebut sebagai “gelombang luar biasa”) tidak mesti memenuhinya.

Untuk suatu gelombang biasa yang datang normal pada perbatasan, vektor  $\vec{k}$  dan  $\vec{S}$  sama-sama diteruskan secara lurus melewati batas tersebut tanpa pembelokan. Untuk gelombang luar biasa,  $\vec{k}$  tidak berbelok, tetapi  $\vec{S}$  (dan berkasnya sendiri) akan berbelok. Fenomena ini dikenal sebagai “Poynting vector walk-off”. Sebuah gelombang umum yang mengandung kedua polarisasi tersebut akan terbagi menjadi dua dan berjalan pada arah yang berbeda seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Jika muka-muka kristal saling sejajar, dua berkas sinar keluar akan muncul paralel yang tergeser pada jarak tertentu.

Dalam seri kuliah ini, kita akan sering merujuk pada polarisator pemindah sinar (“beam displacing polarizer”) seperti pada Gambar 5 sebagai suatu *polarization analyzer* (PA). Pada kasus Gambar 5, berkas sinar terbagi menjadi komponen-komponen vertikal dan horizontal sehingga kita dapat menyebut polarisator tersebut sebagai  $PA_{HV}$ . Andai kita merotasikan perangkat ini dengan sudut  $45^\circ$ , berkas sinar akan teranalisis menjadi komponen-komponen polarisasi linier  $\pm 45^\circ$ , dan kita akan menyebutnya sebagai  $PA_{45}$ .



Gambar 5: Suatu berkas cahaya yang mengandung polarisasi vertikal dan horizontal terbagi menjadi dua berkas oleh fenomena *Poynting vector walk-off*. Simbol titik (dot) di sini menyatakan polarisasi vertikal, sementara simbol panah atas-bawah menyatakan polarisasi horizontal. Jika bingung, kita harus membayangkan melihat gambar boks polarisator ini sebagai “tampak atas” dan kepala kita mendongak miring ke kanan sampai hampir patah (tapi jangan masuk rumah sakit juga). Dengan begitu, garis-garis berpanah akan masuk akal sebagai polarisasi horizontal.

## 5 Manipulasi Polarisasi

Material yang kita temui dalam kehidupan sehari-hari memiliki respons yang berbeda terhadap kedatangan cahaya. Misalnya, sebuah benda yang berwarna merah terbuat dari material yang menyerap seluruh gelombang cahaya tampak kecuali warna merah. Sementara itu, kaca jendela bersifat transparan terhadap cahaya tampak, tetapi menjadi panas di siang hari karena kaca tersebut menyerap cahaya ultraviolet dan inframerah. Hal yang serupa berlaku untuk polarisasi. Setiap material memiliki responsnya sendiri terhadap cahaya tergantung polarisasinya. Material semacam ini digunakan dalam elemen-elemen optik yang berfungsi memanipulasi cahaya berdasarkan polarisasinya.

### Polarisator linier

Beberapa material hanya dapat menyerap komponen cahaya pada arah tertentu yang dapat beresonansi dengan arah getar molekul-molekulnya. Sumbu untuk arah ini, yang berada dalam bidang tegak lurus arah rambat cahaya, dinamakan sumbu penyerapan (*absorption axis*). Lantas, apa yang terjadi dengan komponen cahaya yang tegak lurus dengan sumbu penyerapan? Komponen ini tidak memengaruhi molekul-molekul dalam material sehingga dapat merambat melalui material tersebut. Dengan kata lain, material ini “transparan” dan dapat meneruskan komponen cahaya pada sumbu tegak lurus sumbu penyerapannya, disebut sebagai sumbu transmisi (*transmission axis/TA*).

Gambar 6 menunjukkan sumbu transmisi di dalam bidang yang tegak lurus dengan arah rambat cahaya. Walau tidak ditunjukkan, sumbu penyerapan juga berada di dalam bidang yang sama. Karena satu komponen diserap dan komponen lainnya diteruskan, cahaya akan kehilangan sebagian energinya.

Kita dapat menuliskan secara eksplisit medan listrik yang ditransmisikan oleh polarisator linier. Mari kita tinjau sebuah gelombang EM yang datang pada polarisator semacam itu,

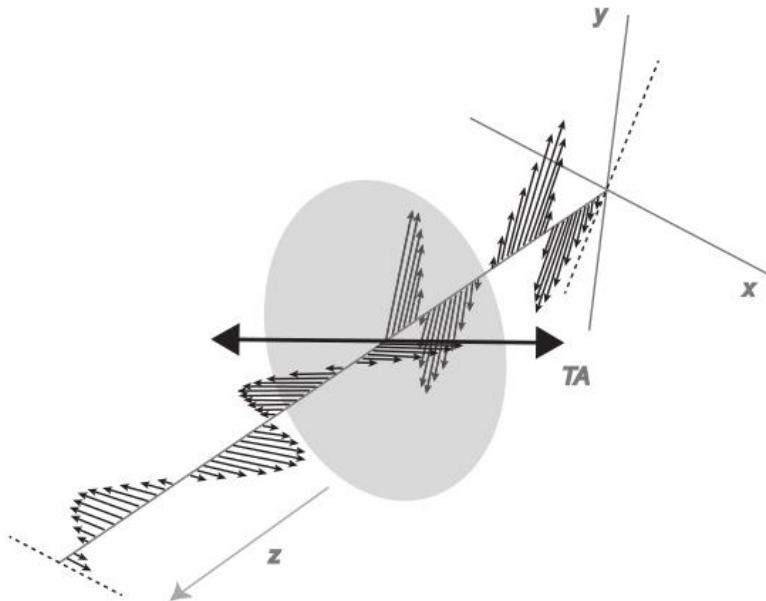
dengan medan listrik berbentuk

$$\vec{E}_i = E_0 e^{i(kz - \omega t)} \vec{P}. \quad (24)$$

$P$  pada persamaan di atas adalah sembarang polarisasi. Sumbu transmisi berada pada arah dari vektor satuan  $\vec{u}_\theta$ , dengan  $\theta$  adalah sudut antara sudut transmisi dan sumbu horizontal. (Catatan: Kita akan biasa merujuk pada arah  $x$  sebagai horizontal dan arah  $y$  sebagai vertikal.) Medan yang ditransmisikan dapat dituliskan sebagai

$$\vec{E}_t = (\vec{E}_i \cdot \vec{u}_\theta) \vec{u}_\theta = E_0 e^{i(kz - \omega t)} (\vec{P} \cdot \vec{u}_\theta) \vec{u}_\theta. \quad (25)$$

Medan output menjadi terpolarisasi linier sepanjang  $\vec{u}_\theta$  dan amplitudonya tereduksi oleh faktor  $\vec{P} \cdot \vec{u}_\theta$  seperti ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Sebuah gelombang terpolarisasi linier merambat melalui suatu polarisator linier. Sumbu transmisi polarisator ini direpresentasikan oleh panah TA.

Untuk cahaya terpolarisasi linier yang membentuk  $\varphi$  dengan sumbu horizontal ( $\vec{P} = \vec{u}_\varphi$ ), amplitudo dari medan ini akan tereduksi oleh faktor  $|\cos(\theta - \varphi)|$ . Intensitasnya proporsional dengan kuadrat medan sehingga intensitas cahaya berkurang dengan faktor  $\cos^2(\theta - \varphi)$ . Kondisi ini adalah hukum Malus. Untuk berkas terpolarisasi melingkar yang datang pada polarisator linier, amplitudo medan tereduksi oleh faktor  $1/\sqrt{2}$  sementara intensitasnya tereduksi oleh faktor  $1/2$ , independen terhadap arah sumbu polarisator.

## Polarisator pembagi berkas

Dalam beberapa aplikasi, kita ingin memisahkan berkas cahaya menjadi dua atau lebih komponen yang merambat terpisah. Sebuah pembagi berkas (*beam splitter*, BS)

dapat membagi berkas cahaya menjadi dua dengan memantulkan sebagian cahaya dan meneruskan sisanya. Sifat dua berkas yang dihasilkan bergantung pada lapisan pemantul yang digunakan. Kita dapat memilih material yang memantulkan polarisasi tertentu (misal, vertikal) dan meneruskan polarisasi yang ortogonal dengannya (misal, horizontal) untuk membuat satu jenis pembagi berkas yang disebut pembagi berkas polarisasi (*polarizing beam splitter*, PBS). Sebuah PBS dapat dibuat dengan memanfaatkan material bias ganda seperti ditunjukkan Gambar 5 ataupun lapisan tipis antara dua prisma.

## Pelat gelombang

Ingat kembali bahwa fase sebuah gelombang elektromagnetik yang merambat pada arah  $z$  pada waktu  $t$  dinyatakan sebagai

$$\phi(z, t) = kz - \omega t + \phi_0 \quad (26)$$

Dalam suatu material yang mampu membiaskan cahaya, kita sudah membahas bahwa  $k = nk_0$ . Mari kita tinjau cahaya yang merambat pada material bias ganda. Fase komponen pada sumbu cepat adalah

$$\phi_f(z, t) = n_f k_0 z - \omega t \quad (27)$$

dengan  $n_f$  ( $f$ : *fast*) adalah indeks bias sepanjang sumbu cepat. Sementara itu, fase komponen pada sumbu lambat adalah

$$\phi_s(z, t) = n_s k_0 z - \omega t + \phi_0 \quad (28)$$

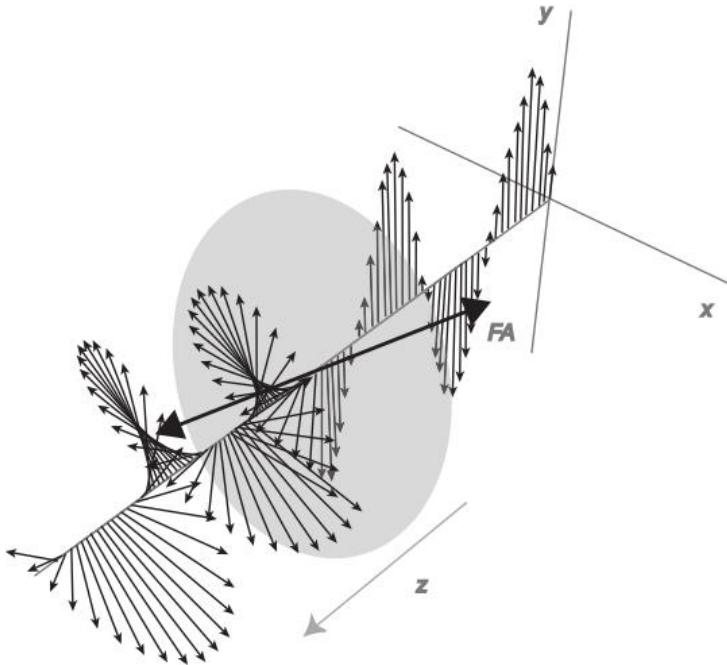
dengan  $n_s$  ( $s$ : *slow*) adalah indeks bias sepanjang sumbu lambat. Kita asumsikan terdapat beda fase  $\phi_0$  antara kedua komponen sebelum melewati material bias ganda, yang menentukan polarisasi awalnya. Dengan demikian, terdapat tambahan perbedaan fase sebesar

$$(\Delta\phi)(l) = \phi_s(l, t) - \phi_f(l, t) - \phi_0 = (n_s - n_f)k_0 l \quad (29)$$

antara kedua komponen akibat merambat sejauh  $z = l$  di dalam material. Setelah melewati bahan, perbedaan fase antara kedua komponen berubah dari  $\phi_0$  menjadi  $\phi_0 + \Delta\phi$ , yang berarti polarisasinya dapat berubah.

Pergeseran fase relatif antara dua komponen polarisasi yang ortogonal merupakan parameter penting yang menentukan polarisasi gelombang. Pelat gelombang adalah sebuah elemen optik yang memanfaatkan pergeseran fase antara komponen-komponen medan ortogonal untuk mengubah polarisasi suatu gelombang. Salah satu tipe paling penting dari pelat gelombang adalah “pelat seperempat gelombang”. Di dalam sebuah pelat seperempat gelombang, pergeseran fase antara sumbu-sumbu cepat dan lambat adalah  $\Delta\phi = 2\pi/4 = \pi/2$ , yang bersesuaian dengan seperempat pergeseran panjang gelombang. Secara umum, pergeseran fase untuk pelat seperempat gelombang adalah  $\Delta\phi = 2\pi j + \pi/2$ , dengan  $j$  suatu bilangan bulat. Pelat gelombang dengan  $j = 0$  disebut juga sebagai pelat gelombang berorde nol.

Pelat gelombang lainnya yang kerap digunakan adalah pelat setengah gelombang. Pada pelat ini, pergeseran fase relatif bersesuaian dengan setengah panjang gelombang. Karena



Gambar 7: Sebuah gelombang terpolarisasi linier berubah menjadi gelombang terpolarisasi melingkar setelah melalui pelat seperempat gelombang. Sumbu cepat dari pelat gelombang ditunjukkan oleh panah FA.

pergeseran fase dan indeks bias bergantung pada panjang gelombang, pelat-pelat gelombang dirancang untuk bekerja secara spesifik pada panjang gelombang tertentu.

Mari kita tinjau berkas sinar terpolarisasi vertikal yang datang pada sebuah pelat seperempat gelombang. Jika sumbu cepat dari pelat gelombang sejajar dengan polarisasi yang masuk, kita hanya akan punya satu indeks bias yang relevan, yakni  $n_f$  sehingga gelombang tersebut memperoleh pergeseran fase tetapi tidak ada perubahan polarisasinya. Namun, jika sumbu cepat dari pelat seperempat gelombang membentuk sudut  $45^\circ$  dari garis horizontal, setengah dari cahaya yang masuk akan terpolarisasi ke sumbu cepat dan setengahnya lainnya terpolarisasi sepanjang sumbu lambat. Dua polarisasi ini memiliki pergeseran fase relatif sebesar  $\pi/2$ .

Pada bagian sebelumnya, kita sudah mengenali bahwa suatu gelombang yang dua komponennya memiliki amplitudo sama dan pergeseran fase relatif sebesar  $\pi/2$  adalah gelombang yang terpolarisasi melingkar. Dengan demikian, pelat seperempat gelombang dapat mengubah berkas terpolarisasi linier menjadi berkas terpolarisasi melingkar seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Sementara itu, pelat setengah gelombang dapat berfungsi merotasikan gelombang masukan terpolarisasi linear untuk keluar menjadi terpolarisasi melingkar pada sembarang arah, dengan sudut rotasi yang ditentukan oleh orientasi pelat gelombang.

## Latihan (Soal-Jawab)

### Soal 1

Sebuah berkas terpolarisasi melingkar kiri datang pada polarisator linier yang sumbu transmisinya membentuk sudut  $\theta$  dari garis horizontal. Tentukanlah faktor ukuran berkurangnya magnitudo medan listrik berkas sinar tersebut.

### Jawaban

Pertama, kita definisikan vektor polarisasi untuk masing-masing komponen. Berkas yang terpolarisasi melingkar kiri (LCP) memiliki vektor polarisasi:

$$\vec{P}_{LCP} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y).$$

Polarisator linier dengan sumbu transmisi yang membentuk sudut  $\theta$  terhadap sumbu horizontal ( $x$ ) memiliki vektor polarisasi:

$$\vec{P}_{pol} = \cos \theta \vec{u}_x + \sin \theta \vec{u}_y.$$

Magnitudo medan listrik yang keluar dari polarisator ( $E_{out}$ ) adalah proyeksi dari medan listrik datang ( $\vec{E}_{in} = E_0 \vec{P}_{LCP}$ ) ke arah sumbu transmisi polarisator:

$$E_{out} = |\vec{E}_{in} \cdot \vec{P}_{pol}| = E_0 |\vec{P}_{LCP} \cdot \vec{P}_{pol}|$$

Hitung hasil kali skalar (*dot product*):

$$\begin{aligned}\vec{P}_{LCP} \cdot \vec{P}_{pol} &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{u}_x + i\vec{u}_y) \cdot (\cos \theta \vec{u}_x + \sin \theta \vec{u}_y) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(\cos \theta + i \sin \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\theta},\end{aligned}$$

sehingga

$$E_{out} = E_0 \left| \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\theta} \right| = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta} = E_0 \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Faktor ukuran berkurangnya magnitudo medan listrik adalah perbandingan magnitudo medan listrik keluar dan medan listrik masuk:

$$\left| \frac{E_{out}}{E_{in}} \right| = \left| \frac{E_0/\sqrt{2}}{E_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Jadi, magnitudo medan listrik berkurang menjadi  $1/\sqrt{2}$  dari magnitudo awalnya.

### Soal 2

Untuk kasus seperti soal sebelumnya, hitunglah faktor ukuran berkurangnya intensitas medan listrik berkas sinar. Apakah ada kebergantungan pada sudut  $\theta$ ?

### Jawaban

Intensitas cahaya ( $I$ ) didefinisikan sebagai kuadrat dari magnitudo medan listrik ( $I \equiv |E|^2$ ). Berdasarkan hasil dari Soal 1, kita telah mendapatkan hubungan antara magnitudo medan listrik keluaran dan masukan:

$$|\vec{E}_{out}| = \frac{1}{\sqrt{2}} |\vec{E}_{in}|$$

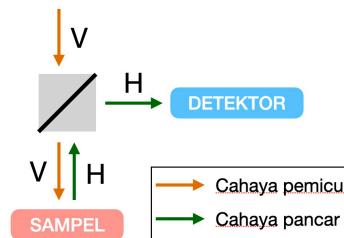
Maka, intensitas cahaya yang keluar ( $I_{out}$ ) adalah:

$$I_{out} = |E_{out}|^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{2}} |E_{in}| \right)^2 = \frac{1}{2} |E_{in}|^2 = \frac{1}{2} I_{in}$$

Faktor ukuran berkurangnya intensitas adalah  $1/2$ . Mengenai kebergantungan pada sudut  $\theta$ , berdasarkan perhitungan di atas, hasil akhirnya adalah nilai konstan  $1/2$  yang tidak mengandung variabel  $\theta$ . Penyebabnya, pada polarisasi melingkar, magnitudo komponen medan listrik pada setiap arah di bidang transversal selalu sama. Oleh karena itu, intensitas yang diteruskan oleh polarisator linier akan selalu setengah dari intensitas datang, tidak peduli ke arah mana sumbu transmisi polarisator tersebut diputar.

### Soal 3

Sebuah polarisator pembagi berkas dapat memisahkan cahaya menjadi dua komponen dengan polarisasi berbeda yang merambat terpisah. Salah satu aplikasi untuk elemen optik ini adalah dalam uji emisi cahaya dari suatu perangkat pemancar, misalnya, pemancar semikonduktor. Uji ini dapat dilakukan dengan menyinari sampel dengan cahaya dengan warna tertentu dan menunggu sampel memancarkan cahaya dengan warna yang sama. Jika cahaya yang kita gunakan pada sampel dan cahaya yang sampel pancarkan kembali memiliki warna yang sama, bagaimana kita dapat mengukur penceran dari sampel saja? Jelaskan bagaimana polarisator pembagi berkas menjadi sebuah solusi, dengan asumsi bahwa penceran sampel berbeda polarisasinya.

**Jawaban**

Bagan di atas menunjukkan solusi soal ini. Asumsikan cahaya yang kita pancarkan memiliki polarisasi  $V$ , sementara cahaya yang dipancarkan kembali oleh sampel memiliki polarisasi  $H$ . Kita dapat menggunakan polarisator pembagi berkas yang memisahkan kedua polarisasi ini sehingga hanya cahaya pancar yang diterima oleh detektor. Elemen optik ini juga dapat menghindari deteksi cahaya dengan polarisasi  $V$  yang mungkin terpantul dari sampel.

**Soal 4**

Tinjau kembali Soal 3. Apa yang bisa kita lakukan jika pancaran sampel memiliki polarisasi yang sama?

**Jawaban**

Kita dapat menambahkan sebuah pelat setengah gelombang antara sampel dan polarisator pembagi berkas untuk mengubah polarisasi pancaran sampel dari  $V$  menjadi  $H$ . Agar ini dapat terjadi, sumbu cepat dari pelat gelombang harus membentuk sudut  $45^\circ$  terhadap arah polarisasi  $H$ .