

PROPOSAL PEKAN KREATIVITAS MAHASISWA (PKM) 2025



Poltek Nuklir

**SISTEM PEMANTAUAN INTERAKTIF KUALITAS UDARA DAN RADIASI
BERBASIS IOT UNTUK EDUKASI NUKLIR**

Diusulkan oleh:

Muhammad Meisandi Baihaqi	(022300009)
Nashwa Lu'lu' Muthmainnah	(022300010)
Fara Ulvia	(022300022)
Gilas Gethar Prawoto	(022300023)
Dimas Darmansyah	(022300037)
Fadhlil Abdulhaq	(022400005)
Misbah Muhamad Giani	(022400014)
Ardranitya Brilian Fery Marchfida	(022400030)
Nailah Qarirah	(022400051)
Arindo Cahyo Wicaksono	(022500007)
Ininka Atalan Zia Akbar	(022500020)

**HIMPUNAN MAHASISWA EINSTEN.COM
POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir

1. Ketua Kelompok

Nama Lengkap : Muhammad Meisandi Baihaqi
NIM. : 022300009
No. Telp. : +62 813-2670-7355

2. Anggota Kelompok

- a. Nama Lengkap : Nashwa Lu'lu Mutmainnah
NIM. : 022300010
No. Telp. : +62 818-0952-5267
- b. Nama Lengkap : Fara Ulvia
NIM. : 022300022
No. Telp. : +62 819-5252-5457
- c. Nama Lengkap : Gilas Gethar Prawoto
NIM. : 022300023
No. Telp. : +62 878-5198-6765
- d. Nama Lengkap : Dimas Darmansyah
NIM. : 022300037
No. Telp. : +62 813-6337-6833
- e. Nama Lengkap : Fadhli Abdulhaq
NIM. : 022400005
No. Telp. : +62 813-3567-8227
- f. Nama Lengkap : Misbah Muhamad Giani
NIM. : 022400014
No. Telp. : +62 813-6999-9818
- g. Nama Lengkap : Ardranitya Brilian Fery Marchfida
NIM. : 022400030
No. Telp. : +62 858-4295-0412

h. Nama Lengkap : Nailah Qarirah
NIM. : 022400051
No. Telp. : +62 852-7464-5715

i. Nama Lengkap : Arindo Cahyo Wicaksono
NIM. : 022500007
No. Telp. : +62 878-7911-4466

j. Nama Lengkap : Ininka Atalan Zia Akbar
NIM. : 022500020
No. Telp. : +62 857-7121-2945

3. Dosen Pembimbing

Nama Lengkap : Rokhmat Arifianto, S.ST., M.Eng.
NIP. : 199511042018011001

4. Anggaran Dana : Rp3,769,500.00

5. Waktu Pelaksanaan : November s/d Desember

Yogyakarta, 10 Oktober 2025

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Rokhmat Arifianto, S.ST., M.Eng.
(NIP. 199511042018011001)

Mengetahui,

Ketua Kelompok



Muhammad Meisandi Baihaqi
(NIM. 022300009)

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	I
DAFTAR ISI.....	III
DAFTAR GAMBAR.....	V
DAFTAR TABEL.....	VI
ABSTRAK.....	1
BAB I PENDAHULUAN.....	2
1.1. Latar Belakang	2
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Internet of Things	5
2.2. <i>Monitoring System</i>	5
2.3. Kualitas Udara	6
2.4. Radiasi dan Keselamatan Nuklir	6
2.5. Mikrokontroler ESP32	7
2.6. Sensor MQ7.....	8
2.7. Sensor DHT22.....	9
2.8. Sensor Tekanan Udara BMP280	10
2.9. ThingSpeak Server	10
2.10. Geiger Counter Kit Module Miller Tube GM Tube Kamjay	11
2.11. Lora Ra-02 Ra02 SX1278 Wireless 433MHz SPI	12
2.12. Baterai lithium-ion 18650.....	13
2.13. Solar Panel 8x11	14

2.14.	TP4056.....	15
2.15.	MT3068	16
2.16.	INA219	17
2.17.	LDR	18
2.18.	GPS NEO-7M.....	19
BAB III METODE PENELITIAN		20
3.1.	Tempat dan Waktu	20
3.1.1.	Tempat Penelitian	20
3.1.2.	Waktu Penelitian.....	20
3.2.	Alat dan Bahan	20
3.2.1.	Alat Penelitian.....	20
3.2.2.	Bahan Penelitian	20
3.3.	<i>Flowchart</i> Penggerjaan	22
3.3.1.	Tahap Persiapan.....	22
3.3.2.	Tahap Pelaksanaan	23
3.3.3.	Tahap Penyelesaian (<i>finishing</i>).....	25
3.3.4.	Tahap Pengumpulan Data	26
3.3.5.	Analisis Data.....	26
3.3.6.	Pengujian Spesifik Alat.....	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1.	Hasil	29
4.2.	Pembahasan.....	30
BAB V ANGGARAN BIAYA.....		33
DAFTAR PUSTAKA		37

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mikrokontroler ESP32	7
Gambar 2.2 Sensor MQ7	8
Gambar 2.3 Sensor DHT22.....	9
Gambar 2.4 Sensor Tekanan Udara BMP280.....	10
Gambar 2.5 Geiger Counter Kit Kamjay	11
Gambar 2.6 LoRa RA-02	12
Gambar 2.7 Baterai lithium-ion 18650	13
Gambar 2.8 Solar Panel 8x11	14
Gambar 2.9 TP4056.....	15
Gambar 2.10 MT3068.....	16
Gambar 2.11 INA219.....	17
Gambar 2.12 LDR.....	18
Gambar 2.13 GPS NEO-7M	19
Gambar 3.1 Flowchart LoRa pengirim (a) Flowchart LoRa Penerima (b)	28
Gambar 4.1 Tampilan pada Web	29

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Anggaran Biaya	33
------------------------------	----

SISTEM PEMANTAUAN INTERAKTIF KUALITAS UDARA DAN RADIASI BERBASIS IOT UNTUK EDUKASI NUKLIR

ABSTRAK

Kualitas udara dan tingkat radiasi lingkungan merupakan dua aspek penting yang berpengaruh langsung terhadap kesehatan dan keselamatan manusia. Namun, kesadaran dan literasi masyarakat terhadap isu tersebut masih tergolong rendah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis Internet of Things (IoT) yang dapat digunakan sebagai sarana edukasi nuklir bagi masyarakat. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali dengan dukungan sensor MQ-7 untuk mendeteksi gas karbon monoksida (CO), DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban, serta Geiger-Muller Counter untuk mendeteksi tingkat radiasi gamma lingkungan. Data hasil pengukuran dikirim secara real-time melalui koneksi Wi-Fi ke platform ThingSpeak, kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik interaktif pada *dashboard* web yang mudah diakses oleh pengguna. Penelitian ini dilakukan di Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia selama tiga minggu, meliputi tahap perancangan, perakitan, pengujian alat, dan analisis data. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan perubahan kualitas udara dan tingkat radiasi lingkungan secara akurat dan stabil, serta memberikan pengalaman edukatif bagi pengguna dalam memahami konsep pemantauan lingkungan berbasis teknologi nuklir dan IoT. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan lingkungan, tetapi juga sebagai media pembelajaran interaktif untuk meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya kualitas udara dan keselamatan radiasi.

Kata Kunci: Internet of Things, kualitas udara, ESP32, ThingSpeak, edukasi nuklir.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kualitas udara dan tingkat radiasi di lingkungan menjadi dua indikator penting yang berkaitan langsung dengan kesehatan, keselamatan, dan keberlanjutan kehidupan manusia. Saat ini, tingkat pencemaran udara semakin meningkat akibat aktivitas industri, transportasi, dan pembakaran bahan bakar fosil. Partikel-partikel polutan seperti karbon monoksida (CO), nitrogen dioksida (NO₂), dan partikel halus (PM2.5) telah terbukti berdampak negatif terhadap sistem pernapasan dan kardiovaskular manusia [2]. Selain pencemaran udara, keberadaan radiasi ionisasi di lingkungan juga menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan, terutama dalam konteks keselamatan nuklir. Radiasi lingkungan dapat berasal dari sumber alami maupun buatan manusia. Meskipun radiasi dalam jumlah kecil umumnya tidak berbahaya, paparan yang berlebihan dapat menimbulkan risiko kesehatan. Oleh karena itu, pemantauan tingkat radiasi perlu dilakukan untuk memastikan lingkungan tetap dalam batas aman. Dalam hal ini, Internasional Atomic Energy Agency [1] menekankan pentingnya pendidikan dan kesadaran masyarakat terhadap keselamatan radiasi, terutama di lingkungan akademik yang berfokus pada teknologi nuklir.

Namun, literasi masyarakat terhadap isu kualitas udara dan radiasi masih tergolong rendah. Banyak orang yang belum memahami bagaimana paparan radiasi lingkungan dapat diukur dan dikontrol, atau seberapa besar hubungan antara aktivitas manusia dengan meningkatnya kadar polutan udara. Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk meningkatkan literasi masyarakat terhadap radiasi melalui edukasi berbasis data lingkungan yang nyata.

Seiring dengan perkembangan teknologi, Internet of Things (IoT) menjadi salah satu inovasi yang mampu menjembatani kebutuhan pemantauan lingkungan secara real-time. Teknologi IoT memungkinkan sensor untuk mengirimkan data secara otomatis ke server berbasis cloud, yang kemudian dapat ditampilkan dalam bentuk visual grafik, peta, atau dashboard digital. Melalui sistem seperti ini, masyarakat dapat mengakses informasi mengenai kualitas udara dan tingkat radiasi lingkungan secara langsung melalui perangkat pribadi, seperti komputer maupun telepon genggam.

Oleh karena itu, dirancang Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir. Sistem ini memanfaatkan kombinasi sensor kualitas udara seperti MQ-7 untuk mendeteksi gas karbon monoksida dan DHT22 untuk suhu serta kelembaban, dan sensor radiasi Geiger-Muller Counter untuk mengukur tingkat radiasi lingkungan. Hasil pengukuran dari seluruh sensor dikirim secara otomatis ke platform ThingSpeak dan ditampilkan dalam bentuk dashboard web interaktif yang mudah diakses oleh masyarakat. Melalui sistem ini, masyarakat dapat memantau kondisi udara dan tingkat tingkat radiasi di lingkungannya secara real-time serta memperoleh pengetahuan dasar tentang radiasi dan keselamatan lingkungan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu memantau kualitas udara dan tingkat radiasi lingkungan secara real-time?
2. Bagaimana mengintegrasikan sistem sensor dengan database berbasis cloud (ThingSpeak) untuk menampilkan data pemantauan secara interaktif dan mudah diakses oleh masyarakat?
3. Bagaimana sistem ini dapat dimanfaatkan sebagai sarana edukasi dan peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya kualitas udara dan pemahaman mengenai radiasi di lingkungan sekitar?
4. Bagaimana efektivitas sistem ini dalam membantu masyarakat memahami kondisi lingkungannya dan mendukung langkah preventif dalam menjaga kesehatan dan keselamatan?

1.3. Batasan Masalah

Untuk menjadi fokus penelitian dan penerapan agar sesuai dengan tujuan, maka batasan masalah dalam kegiatan ini adalah sebagai berikut:

1. Sistem hanya memantau parameter karbon monoksida (CO), suhu, kelembaban, dan radiasi gamma lingkungan alami.

2. Antarmuka data dikembangkan dalam bentuk dashboard web interaktif yang menampilkan data secara real-time.
3. Implementasi dilakukan di lingkungan masyarakat sekitar kampus.
4. Data yang dihasilkan digunakan untuk tujuan edukasi dan sosialisasi, bukan sebagai data resmi pemantauan oleh lembaga lingkungan atau badan regulasi.

1.4. Tujuan

Berdasarkan permasalahan yang telah dirumuskan sebelumnya, pembuatan sistem ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun prototipe alat pemantauan kualitas udara dan radiasi berbasis IoT dengan sensor yang akurat dan efisien.
2. Mengembangkan sistem penyimpanan dan visualisasi data berbasis cloud menggunakan platform ThingSpeak dan dashboard interaktif yang dapat diakses secara daring.
3. Menyediakan sarana edukatif bagi masyarakat dalam memahami data lingkungan, khususnya terkait kualitas udara dan radiasi alami.
4. Meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga kualitas udara serta memahami potensi dan manfaat radiasi di sekitar mereka.
5. Menjadi langkah awal dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan terpadu berbasis teknologi yang dapat diterapkan secara lebih luas di masa mendatang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep dimana berbagai perangkat fisik terhubung ke jaringan internet untuk saling bertukar data dan informasi secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. Menurut Maulana dan Hartoyo (2023) dalam Journal of Applied Electrical Engineering and Informatics, IoT bekerja melalui integrasi antara perangkat sensor, mikrokontroler, koneksi jaringan, dan platform cloud yang memungkinkan proses pemantauan serta kendali jarak jauh secara real-time.

Dalam implementasinya, IoT terdiri dari 3 lapisan utama yaitu lapisan persepsi yang terdiri dari sensor dan aktuator, lapisan jaringan yang mengirimkan data melalui protokol komunikasi (Wi-Fi, MQTT, atau HTTP), dan lapisan aplikasi yang menyajikan data dalam bentuk visual di dashboard atau server [4].

Mikrokontroler ESP32 menjadi salah satu perangkat yang sering digunakan dalam sistem IoT karena memiliki keunggulan berupa konektivitas Wifi dan Bluetooth yang terintegrasi, penggunaan daya rendah, serta didukung program yang fleksibel [5]. ESP32 juga memungkinkan pengiriman data sensor ke server seperti ThingSpeak, Blynk, atau Node-RED untuk penyimpanan dan analisis data.

2.2. Monitoring System

Sistem pemantauan merupakan sistem yang dirancang untuk mengamati kondisi suatu lingkungan atau objek secara terus-menerus dengan tujuan pengendalian dan pengambilan keputusan. Menurut Herts et al. (2023), sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan proses pengumpulan data secara real-time yang kemudian dikirim ke cloud server untuk disimpan, diolah, dan dianalisis.

Salah satu platform cloud yang banyak digunakan dalam pengembangan sistem IoT adalah ThingSpeak, karena menyediakan layanan Realtime Database dan Cloud Firestore yang mampu menyimpan serta menyinkronkan data secara cepat dan efisien. ThingSpeak juga mendukung integrasi dengan berbagai perangkat mikrokontroler seperti ESP32 melalui protokol HTTP dan REST API, sehingga memudahkan proses pengiriman data sensor ke

server [8]. Dengan fitur real-time synchronization dan dukungan pengembangan aplikasi berbasis web maupun Android, sistem pemantauan berbasis ThingSpeak memungkinkan visualisasi data lingkungan secara langsung serta memberikan kemudahan dalam pemantauan jarak jauh. Integrasi antara sensor lingkungan dan modul komunikasi nirkabel menjadikan sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat pengamatan, tetapi juga sebagai media edukasi interaktif dalam memahami kondisi lingkungan sekitar secara kuantitatif.

2.3. Kualitas Udara

Kualitas Udara merupakan ukuran yang menggambarkan tingkat kebersihan udara dari berbagai unsur polutan seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), ammonia (NH₃), nitrogen oksida (NO_x), dan partikel debu (PM2.5). Kualitas udara di Kota Yogyakarta menunjukkan tantangan yang signifikan meskipun masih sering dianggap sebagai kota yang relatif bersih dibandingkan kota-kota besar di Indonesia. Penelitian oleh Gading Leoni Sekartaji dan rekan-rekan (2018) menunjukkan bahwa di kawasan jalan Malioboro kadar karbon monoksida (CO) berdasarkan model estimasi mencapai nilai ISPU sekitar 185, yang berarti berada dalam kondisi tidak sehat. Selanjutnya laporan dari Dinas Lingkungan Hidup Kota Yogyakarta menyebutkan bahwa polusi udara khususnya partikel PM10 pada tahun 2018 di kota Yogyakarta menunjukkan kategori sedang. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun secara umum kondisi kualitas udara tergolong baik, terdapat titik-titik kritis dan memiliki kecenderungan peningkatan beban pencemaran yang patut mendapat perhatian lebih lanjut.

2.4. Radiasi dan Keselamatan Nuklir

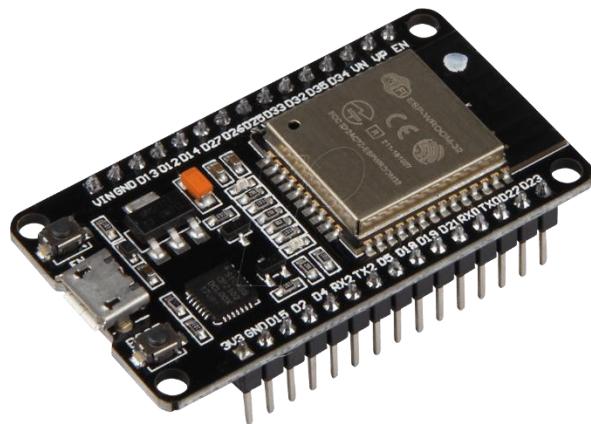
Radiasi merupakan energi yang dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel. Jenis radiasi yang umumnya ditemui antara lain radiasi alfa (α), beta (β), gamma (γ), dan sinar-X. Dalam konteks keselamatan, radiasi harus dipantau secara berkala agar tidak melebihi ambang batas yang direkomendasikan oleh ICRP (International Commission on Radiological Protection).

Penelitian oleh Corzi et al. (2025) menunjukkan bahwa pengembangan detektor gamma berbasis IoT dan sensor CMOS mampu melakukan pemantauan dosis radiasi secara real-time. Sistem seperti ini memiliki potensi besar untuk diaplikasikan di bidang edukasi

nuklir, karena data hasil pemantauan dapat diakses langsung melalui jaringan internet dan divisualisasikan ke dalam bentuk grafik interaktif.

Konsep keselamatan radiasi (radiation safety) menekankan pada prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable), yaitu menjaga agar dosis radiasi yang diterima manusia seminimal mungkin dengan penerapan proteksi, pengawasan, dan edukasi publik. Sistem pemantauan berbasis IoT dapat menjadi alat bantu pembelajaran tentang pentingnya pengendalian paparan radiasi dalam kehidupan sehari-hari.

2.5. Mikrokontroler ESP32



Gambar 2.1 Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler ESP32 merupakan sistem terintegrasi (System on Chip/SoC) yang dirancang oleh Espressif Systems dengan prosesor Xtensa® 32-bit LX6 dual-core yang beroperasi hingga 240 MHz serta telah dilengkapi dengan konektivitas Wifi dan Bluetooth. Dengan dukungan fitur seperti ADC, DAC, PWM, UART, SPI, dan I²C, ESP32 mampu menangani berbagai jenis sensor serta komunikasi data secara efisien.. Kemampuan ini menjadikan ESP32 sangat ideal untuk aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan pengolahan data sensor secara real-time serta konektivitas nirkabel untuk pengiriman informasi ke server atau platform daring. Selain itu, ESP32 juga memiliki mode hemat daya yang memungkinkan alat tetap beroperasi dalam waktu lama meskipun menggunakan sumber daya terbatas.

Dalam alat Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, mikrokontroler ESP32 berperan sebagai pusat kendali utama yang mengintegrasikan berbagai sensor, seperti sensor MQ-135 untuk mendeteksi kualitas udara

dan Geiger Counter untuk mengukur tingkat radiasi. Data yang diperoleh dari sensor-sensor tersebut kemudian diolah oleh ESP32 dan dikirimkan melalui koneksi LoRa pengirim menuju LoRa penerima yang terhubung oleh Wifi dan setelah itu dilanjutkan dikirim ke platform ThingSpeak atau server berbasis web, sehingga dapat ditampilkan secara interaktif kepada pengguna. Dengan demikian, penggunaan ESP32 tidak hanya mendukung sistem pemantauan yang efisien dan akurat, tetapi juga memungkinkan penerapan konsep edukasi nuklir berbasis IoT, di mana mahasiswa atau pengguna dapat memahami dinamika perubahan kualitas udara dan radiasi secara langsung melalui visualisasi data digital.

2.6. Sensor MQ7



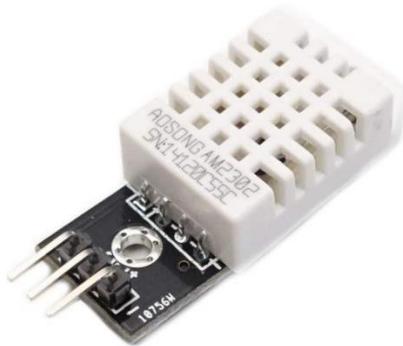
Gambar 2.2 Sensor MQ7

Sensor MQ-7 merupakan jenis sensor gas berbasis semikonduktor yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan gas karbon monoksida (CO) di udara. Sensor ini menggunakan elemen deteksi berupa SnO_2 (tin dioxide), yang memiliki resistansi rendah ketika bereaksi dengan gas CO. Sensor MQ-7 bekerja dengan prinsip perubahan resistansi akibat interaksi antara gas target dan permukaan sensor. Ketika gas CO hadir di udara, molekul gas tersebut bereaksi pada lapisan semikonduktor SnO_2 , menurunkan nilai resistansi sensor, sehingga menghasilkan perubahan tegangan keluaran yang dapat dibaca oleh sistem mikrokontroler. Sensor ini biasanya membutuhkan proses pemanasan siklik dengan dua kondisi suhu berbeda untuk mencapai sensitivitas dan stabilitas pengukuran yang optimal.

Dalam alat Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, sensor MQ-7 berfungsi sebagai komponen utama dalam pemantauan kualitas udara, khususnya untuk mendeteksi tingkat gas karbon monoksida yang berpotensi berbahaya bagi kesehatan. Data dari sensor MQ-7 diolah oleh mikrokontroler ESP32, lalu dikirimkan secara nirkabel ke platform IoT seperti ThingSpeak untuk ditampilkan secara

real-time. Integrasi sensor MQ-7 dengan sistem berbasis IoT memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara efisien, akurat, dan interaktif, sekaligus memberikan nilai edukatif dalam pemahaman tentang pencemaran udara dan dampak paparan gas berbahaya di lingkungan sekitar.

2.7. Sensor DHT22



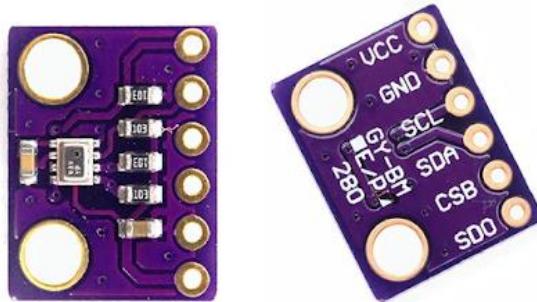
Gambar 2.3 Sensor DHT22

Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara secara simultan. Sensor ini bekerja dengan prinsip kapasitif untuk mendeteksi kelembaban dan termistor untuk mengukur suhu. DHT22 menghasilkan sinyal digital yang mudah diolah oleh mikrokontroler tanpa memerlukan rangkaian tambahan seperti ADC (Analog to Digital Converter). Rentang pengukuran sensor ini cukup luas, yaitu dari -40°C hingga 80°C untuk suhu dan 0% hingga 100% RH untuk kelembaban, dengan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan versi sebelumnya, yaitu DHT11. Selain itu, sensor ini dilengkapi dengan kalibrasi pabrik dan hanya memerlukan satu pin data untuk komunikasi, sehingga sangat efisien dan mudah diintegrasikan dengan berbagai sistem mikrokontroler seperti ESP32.

Dalam penerapan pada alat Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, sensor DHT22 berfungsi untuk memberikan data lingkungan yang mendukung interpretasi hasil pengukuran kualitas udara dan tingkat radiasi. Informasi suhu dan kelembaban ini penting karena dapat mempengaruhi sensitivitas sensor lain seperti MQ-7 atau Geiger Counter dalam sistem. Data yang diperoleh dari DHT22 dikirimkan oleh ESP32 ke platform IoT seperti ThingSpeak untuk divisualisasikan secara real-time, sehingga pengguna dapat memahami hubungan antara kondisi lingkungan dan

tingkat radiasi secara lebih komprehensif. Dengan demikian, sensor DHT22 berperan penting dalam meningkatkan akurasi dan reliabilitas sistem pemantauan berbasis IoT tersebut.

2.8. Sensor Tekanan Udara BMP280



Gambar 2.4 Sensor Tekanan Udara BMP280

Sensor tekanan udara BMP280 merupakan sensor digital buatan Bosch yang menggunakan teknologi Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) untuk mengukur tekanan udara dan suhu dengan tingkat akurasi tinggi serta konsumsi daya yang rendah. Sensor ini bekerja dengan mendeteksi perubahan tekanan pada membran mikro yang terintegrasi, kemudian mengolahnya menjadi data digital melalui antarmuka komunikasi I²C atau SPI, sehingga mudah diintegrasikan dengan mikrokontroler dalam sistem IoT. Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, BMP280 berfungsi sebagai perangkat pemantau kondisi tekanan lingkungan yang dapat digunakan untuk menganalisis perubahan atmosfer dan ketinggian relatif, yang berpengaruh terhadap sirkulasi udara dan distribusi partikel di lingkungan sekitar. Data tekanan dan suhu yang dihasilkan sensor ini dikirimkan secara real-time ke platform IoT untuk ditampilkan dan dianalisis, sehingga mendukung proses pembelajaran edukasi nuklir yang berbasis pemantauan lingkungan secara interaktif dan berbasis data.

2.9. ThingSpeak Server

ThingSpeak merupakan platform *Internet of Things* (IoT) berbasis cloud yang memungkinkan pengguna untuk mengumpulkan, menyimpan, menganalisis, dan menampilkan data sensor secara real-time. ThingSpeak bekerja dengan menyediakan channel yang berfungsi sebagai wadah penyimpanan data, di mana setiap channel dapat

memuat beberapa field untuk menampung data dari berbagai jenis sensor yang terhubung melalui internet. Dengan kemampuan tersebut ThingSpeak memudahkan pengembangan dalam membangun aplikasi IoT tanpa perlu mengelola infrastruktur server secara mandiri.

Dalam sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT, ThingSpeak berperan sebagai platform penyimpanan dan visualisasi data utama. Data dari berbagai sensor seperti MQ-7 untuk pendeksi karbon monoksida, DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembaban, serta Geiger Counter untuk deteksi radiasi, dikirimkan ke channel ThingSpeak melalui mikrokontroler ESP32. Selanjutnya, data tersebut akan ditampilkan dalam bentuk grafik real-time pada dashboard web, sehingga pengguna dapat memantau perubahan kualitas udara, kondisi lingkungan, dan tingkat radiasi secara langsung secara tepat dan responsif.

2.10. Geiger Counter Kit Module Miller Tube GM Tube Kamjay



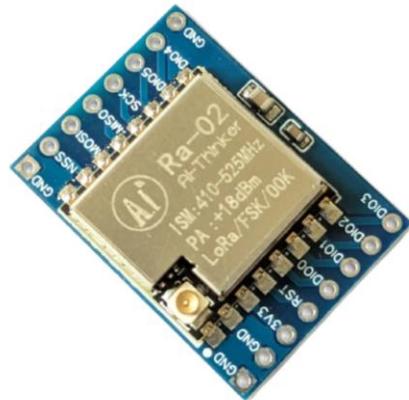
Gambar 2.5 Geiger Counter Kit Kamjay

Geiger Counter Kit Kamjay merupakan perangkat pendeksi radiasi pengion yang bekerja menggunakan tabung Geiger-Müller (GM tube) sebagai komponen utama. GM tube adalah tabung berisi gas mulia bertekanan rendah yang akan terionisasi ketika terkena partikel radiasi, menghasilkan pulsa listrik yang kemudian dihitung sebagai indikasi adanya radiasi. Menurut Knoll (2010), tabung GM menjadi salah satu detektor radiasi paling populer karena konstruksinya sederhana, responsnya cepat, dan mampu mendeksi radiasi beta serta gamma dengan baik. Alat Geiger Counter Kamjay memanfaatkan prinsip tersebut dengan menyediakan rangkaian elektronik lengkap yang mencakup pembangkit tegangan tinggi

(HV), rangkaian deteksi pulsa, buzzer/LED indikator, serta output pulsa yang dapat dihubungkan ke mikrokontroler.

Kit ini biasanya dirancang sebagai modul DIY sehingga mudah digunakan untuk keperluan edukasi, eksperimen, maupun proyek monitoring radiasi berbasis Arduino atau ESP32. Peneliti seperti Farahani (2019) melaporkan bahwa modul Geiger counter modern semakin kompatibel dengan sistem digital, sehingga memungkinkan integrasi data radiasi ke tampilan LCD, data logger, atau aplikasi IoT. Hal ini juga berlaku pada modul Kamjay yang menyediakan sinyal output berupa pulsa digital setiap kali terjadi deteksi radiasi, sehingga pengguna dapat mengonversi jumlah pulsa per menit (CPM) menjadi perkiraan laju dosis radiasi. Selain itu, kit ini dilengkapi komponen pelindung dan rangkaian stabilizer untuk menjaga tegangan GM tube tetap konstan, karena stabilitas tegangan sangat memengaruhi sensitivitas deteksi.

2.11. Lora Ra-02 Ra02 SX1278 Wireless 433MHz SPI



Gambar 2.6 LoRa RA-02

Modul LoRa RA-02 SX1278 merupakan modul komunikasi nirkabel berdaya rendah yang bekerja pada frekuensi 433 MHz dan menggunakan teknik modulasi LoRa (Long Range). Teknologi LoRa memungkinkan pengiriman data jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah, sehingga cocok untuk aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan efisiensi energi dan jangkauan luas. Modul ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui antar muka SPI (Serial Peripheral Interface), yang memungkinkan transfer data berkecepatan tinggi dan stabil. LoRa SX1278 menggunakan teknik modulasi chirp spread spectrum, sehingga memiliki kemampuan penetrasi sinyal yang kuat serta

ketahanan terhadap interferensi. Jangkauan komunikasinya dapat mencapai 5-10 km di area terbuka, bahkan lebih jauh jika kondisi lingkungan mendukung.

Dalam penerapannya pada alat Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, modul LoRa RA-02 berfungsi sebagai media komunikasi jarak jauh untuk mengirimkan data sensor dari node pengukuran ke server. Data yang dikirimkan mencangkup data informasi suhu, kelembaban, kadar CO, hingga tingkat radiasi dari Geiger Counter. LoRa dipilih karena stabil pada lingkungan luar ruangan, hemat energi, serta tetap efektif meskipun sinyal harus melewati penghalang seperti bangunan atau pepohonan. Modul LoRa memastikan bahwa data dapat dikirim secara real-time dan handal, sehingga pengguna dapat memantau kualitas udara dan radiasi dari jarak jauh.

2.12. Baterai lithium-ion 18650



Gambar 2.7 Baterai lithium-ion 18650

Baterai lithium-ion tipe 18650 merupakan salah satu sumber daya listrik yang banyak digunakan pada perangkat elektronik portabel dan sistem tertanam (embedded system) karena memiliki densitas energi yang tinggi, tegangan nominal sekitar 3,6–3,7 V, serta kemampuan pengisian ulang yang baik. Baterai ini bekerja berdasarkan perpindahan ion lithium antara elektroda anoda dan katoda melalui elektrolit selama proses pengisian dan pengosongan daya. Keunggulan utama baterai lithium-ion 18650 meliputi efisiensi energi yang tinggi, laju self-discharge yang rendah, serta umur siklus yang relatif panjang dibandingkan jenis baterai konvensional. Oleh karena itu, baterai ini sangat sesuai digunakan sebagai catu daya pada sistem berbasis IoT yang membutuhkan suplai energi stabil dan berkelanjutan untuk pengoperasian sensor dan modul komunikasi.

Dalam proyek Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, baterai lithium-ion 18650 berperan penting sebagai sumber daya utama yang memungkinkan sistem bekerja secara mandiri dan portabel. Keandalan baterai ini mendukung pengoperasian sensor kualitas udara, sensor radiasi, serta mikrokontroler dan modul komunikasi nirkabel secara kontinu dalam jangka waktu tertentu. Penggunaan baterai lithium-ion juga memungkinkan penerapan sistem monitoring di berbagai lokasi tanpa ketergantungan langsung pada sumber listrik tetap, sehingga mendukung tujuan edukasi nuklir yang bersifat fleksibel dan aplikatif. Dengan manajemen daya yang baik, baterai 18650 mampu menunjang kinerja sistem IoT secara optimal sekaligus meningkatkan efisiensi dan keselamatan operasional perangkat.

2.13. Solar Panel 8x11



Gambar 2.8 Solar Panel 8x11

Panel surya berukuran 8×11 cm merupakan perangkat pembangkit listrik yang memanfaatkan energi cahaya matahari melalui efek fotovoltaik untuk menghasilkan energi listrik searah (DC). Panel surya ini umumnya tersusun dari sel surya berbahan semikonduktor silikon yang mampu mengonversi radiasi matahari menjadi energi listrik dengan tegangan dan arus tertentu. Meskipun memiliki dimensi yang relatif kecil, panel surya 8×11 cm cukup efektif digunakan pada sistem berdaya rendah karena bersifat ramah lingkungan, tidak menimbulkan polusi, serta mampu menyediakan sumber energi terbarukan secara berkelanjutan. Karakteristik tersebut menjadikan panel surya skala kecil banyak diaplikasikan pada perangkat IoT, sistem monitoring, dan alat edukasi yang membutuhkan efisiensi energi tinggi.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, panel surya 8×11 cm berfungsi sebagai sumber energi alternatif untuk mendukung operasional sistem secara mandiri. Energi listrik yang dihasilkan panel surya digunakan untuk membantu pengisian baterai atau langsung menyuplai daya ke rangkaian elektronik seperti mikrokontroler, sensor kualitas udara, sensor radiasi, serta modul komunikasi IoT. Penerapan panel surya pada sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan energi, tetapi juga memberikan nilai edukatif dengan memperkenalkan konsep energi terbarukan yang sejalan dengan pemanfaatan teknologi nuklir secara aman dan bertanggung jawab. Dengan demikian, integrasi panel surya mendukung keandalan sistem monitoring sekaligus memperkuat aspek pembelajaran berbasis teknologi ramah lingkungan.

2.14. TP4056



Gambar 2.9 TP4056

TP4056 merupakan modul pengisi daya (charger) yang dirancang khusus untuk baterai lithium-ion dan lithium-polymer satu sel dengan tegangan nominal 3,7 V. Modul ini bekerja menggunakan metode constant current–constant voltage (CC–CV) yang memungkinkan proses pengisian berlangsung secara aman dan efisien. TP4056 umumnya dilengkapi dengan fitur proteksi seperti pembatasan arus pengisian, pemutusan otomatis saat baterai penuh, serta indikator status pengisian melalui LED. Dengan ukuran yang ringkas dan kebutuhan rangkaian tambahan yang minimal, modul TP4056 banyak digunakan pada sistem elektronik portabel dan perangkat IoT yang memerlukan manajemen pengisian baterai yang andal.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, modul TP4056 berperan sebagai pengatur pengisian baterai lithium-ion 18650 yang digunakan sebagai sumber daya sistem. Modul ini memungkinkan energi listrik dari panel surya atau sumber daya eksternal lainnya digunakan untuk mengisi baterai secara

aman dan terkendali. Keberadaan TP4056 mendukung kontinuitas pengoperasian sensor kualitas udara, sensor radiasi, serta modul komunikasi IoT tanpa risiko kerusakan baterai. Selain meningkatkan keandalan dan keselamatan sistem, penggunaan TP4056 juga memberikan nilai edukatif terkait pentingnya manajemen energi dan keselamatan kelistrikan dalam pengembangan teknologi monitoring berbasis IoT di bidang edukasi nuklir.

2.15. MT3068

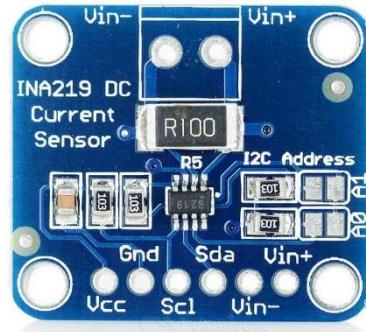


Gambar 2.10 MT3068

MT3608 merupakan modul DC–DC step-up (boost converter) yang berfungsi untuk menaikkan tegangan listrik DC dari level yang lebih rendah ke level yang lebih tinggi dengan efisiensi yang relatif tinggi. Modul ini bekerja dengan prinsip pensaklaran frekuensi tinggi menggunakan induktor, dioda, dan kapasitor untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil dan dapat diatur melalui potensiometer. MT3608 banyak digunakan pada sistem elektronik portabel karena mampu beroperasi pada rentang tegangan input rendah, seperti dari baterai lithium-ion 3,7 V, dan menghasilkan tegangan keluaran yang sesuai dengan kebutuhan beban.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, modul MT3608 berperan penting dalam manajemen daya untuk memastikan setiap komponen sistem mendapatkan suplai tegangan yang sesuai. Tegangan dari baterai lithium-ion 18650 yang relatif rendah dapat dinaikkan menggunakan MT3608 agar sesuai dengan kebutuhan mikrokontroler, sensor kualitas udara, sensor radiasi, serta modul komunikasi IoT. Penggunaan modul ini meningkatkan fleksibilitas dan keandalan sistem, terutama pada kondisi daya terbatas dari panel surya atau baterai. Selain itu, integrasi MT3608 mendukung aspek edukasi dengan memperkenalkan konsep konversi dan pengaturan daya dalam sistem monitoring berbasis IoT yang digunakan untuk pembelajaran teknologi nuklir secara aman dan efisien.

2.16. INA219



Gambar 2.11 INA219

INA219 merupakan sensor arus dan tegangan berbasis high-side current sensing yang digunakan untuk memantau konsumsi daya secara real-time pada suatu sistem elektronik. Sensor ini mampu mengukur tegangan bus hingga sekitar 26 V serta arus dengan resolusi tinggi melalui resistor shunt eksternal, sehingga nilai daya dapat dihitung secara langsung. INA219 berkomunikasi menggunakan protokol I2C, yang memudahkan integrasi dengan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32. Keunggulan utama INA219 adalah akurasi pengukuran yang baik, konsumsi daya rendah, serta kemampuannya melakukan pengukuran tanpa mengganggu jalur ground sistem, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem pemantauan berbasis IoT.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, INA219 berperan penting dalam memantau parameter kelistrikan seperti arus, tegangan, dan daya dari modul sensor kualitas udara, sensor radiasi, serta unit komunikasi IoT. Data kelistrikan yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi efisiensi dan kestabilan sistem catu daya selama proses pemantauan berlangsung. Dengan adanya informasi konsumsi daya yang akurat, sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring lingkungan, tetapi juga sebagai media edukasi nuklir yang memperkenalkan konsep manajemen energi, keandalan sistem instrumentasi, dan keselamatan operasional pada perangkat pemantauan berbasis teknologi nuklir dan IoT.

2.17. LDR

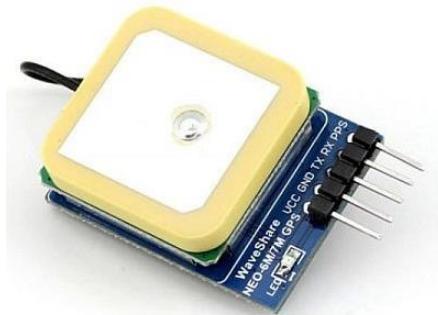


Gambar 2.12 LDR

LDR (Light Dependent Resistor) merupakan sensor cahaya berbasis resistansi yang nilai hambatannya berubah sesuai dengan intensitas cahaya yang diterima. Sensor ini bekerja dengan prinsip fotokonduktivitas, di mana resistansi LDR akan menurun ketika intensitas cahaya meningkat dan meningkat ketika kondisi cahaya rendah atau gelap. LDR umumnya terbuat dari bahan semikonduktor seperti cadmium sulfide (CdS) yang sensitif terhadap cahaya tampak. Sensor ini menghasilkan sinyal analog yang mudah diolah oleh mikrokontroler menggunakan rangkaian pembagi tegangan dan ADC (Analog to Digital Converter). Keunggulan utama LDR adalah rangkaian yang sederhana, biaya yang relatif murah, serta kemampuannya mendeteksi perubahan intensitas cahaya secara bertahap, sehingga cocok digunakan pada berbagai aplikasi monitoring lingkungan.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, modul LDR berperan sebagai sensor pendukung untuk memantau kondisi pencahayaan lingkungan di sekitar alat. Data intensitas cahaya yang diperoleh dapat digunakan untuk mengidentifikasi perbedaan kondisi siang dan malam, serta membantu analisis pengaruh pencahayaan terhadap performa sistem, seperti efisiensi panel surya dan konsumsi daya perangkat. Informasi dari LDR ini juga memiliki nilai edukatif karena memperkenalkan konsep sensor optik, karakteristik cahaya lingkungan, serta integrasinya dalam sistem instrumentasi berbasis IoT, sehingga memperkaya pemahaman pengguna terhadap teknologi monitoring lingkungan yang terpadu.

2.18. GPS NEO-7M



Gambar 2.13 GPS NEO-7M

GPS NEO-7M merupakan modul penerima Global Positioning System (GPS) yang digunakan untuk menentukan posisi geografis suatu objek berdasarkan sinyal satelit. Modul ini bekerja dengan menerima sinyal dari beberapa satelit GPS, kemudian menghitung koordinat posisi berupa lintang (latitude), bujur (longitude), ketinggian (altitude), serta informasi waktu (UTC). NEO-7M dikembangkan oleh u-blox dan memiliki sensitivitas tinggi sehingga mampu memperoleh posisi dengan akurasi yang baik, bahkan pada kondisi sinyal yang relatif lemah. Modul ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui antarmuka serial (UART) dan mengirimkan data dalam format standar NMEA (National Marine Electronics Association) yang mudah diolah menggunakan perangkat lunak dan library pendukung pada Arduino atau ESP32. Keunggulan utama GPS NEO-7M adalah konsumsi daya yang rendah, waktu akuisisi posisi yang cepat, serta kompatibilitas yang baik dengan berbagai sistem tertanam berbasis IoT.

Dalam Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, modul GPS NEO-7M berperan sebagai penentu lokasi pengambilan data kualitas udara dan tingkat radiasi lingkungan. Informasi koordinat yang dihasilkan memungkinkan data sensor dikaitkan dengan lokasi geografis secara akurat, sehingga hasil pemantauan dapat dipetakan dan dianalisis berdasarkan area tertentu. Data lokasi ini juga meningkatkan nilai edukatif sistem karena pengguna dapat memahami keterkaitan antara kondisi lingkungan, posisi geografis, dan variasi parameter yang diukur. Dengan integrasi GPS NEO-7M, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring lingkungan berbasis IoT, tetapi juga sebagai media pembelajaran yang mengenalkan konsep navigasi satelit, pemetaan data lingkungan, dan penerapan teknologi instrumentasi modern dalam konteks edukasi nuklir.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu

3.1.1. Tempat Penelitian

Pembuatan alat Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir dilakukan di *Student Center* Lantai 3 Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia yang berlokasi di Jalan Babarsari, Ngentak, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Sedangkan pengujian alat dilakukan di sekitar area BRIN Yogyakarta.

3.1.2. Waktu Penelitian

Pembuatan alat dan pengujian ini dilakukan dalam rentang waktu 3 minggu, dimulai pada Oktober 2025 hingga awal November 2025.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1. Alat Penelitian

1. Solder Adjustable Temperature 200°C–480°C
2. Lem Tembak 20 Watt
3. Obeng Set
4. Multimeter
5. Laptop
6. 3D Printer

3.2.2. Bahan Penelitian

1. ESP32 DevKitC V4 ESP32-WROOM-32U Wireless Bluetooth WiFi Module
2. Project Board Mini 400 Point
3. MQ-7 Gas Sensor Module
4. MQ-135 Gas Sensor Module
5. DHT22 Sensor Module
6. LCD OLED Biru 1.3 inch 128x64

7. Expansion Terminal Board 38 Pin ESP32
8. Assembled DIY Geiger Counter Kit (Miller Tube Radiation Sensor)
9. GPS GY-NEO6MV2
10. Step Up Converter MT3608 DC-DC 2A
11. Solar Cell Panel 110x80mm 5V 200mA
12. Baterai MOLICEL P30B 18650 (3000mAh 30A)
13. Battery Holder 4x18650
14. Adaptor 5V 2A USB
15. Project Spacer Kuningan M3 (1 box isi 120 pcs)
16. Kabel Data Tipe A to Micro
17. Saklar On-Off 4 Pin KCD4 dengan LED
18. Kabel Male-Male 20 cm
19. Kabel Male-Female 20 cm
20. Kabel Female-Female 20 cm
21. Kabel Pejal Jumper (berbagai jenis)
22. Kabel Silikon Fleksibel 22 AWG dan 24 AWG
23. Pasta Solder CMT-150
24. Timah Solder 0.8mm
25. Heat Shrink (Selang Penyusut Kabel)
26. Cable Ties 3.6×200mm
27. Lem G Korea Serbaguna
28. Filament 3D Printing SUNLU PLA+ 2.0 Neat Winding (untuk pencetakan casing)
29. Modul Lora Ra-02 Ra02 SX1278 Wireless 433MHz SPI include antenna
30. 5V BMP280
31. LDR sensor module
32. TP4056 module
33. MT3068 module
34. INA219 sensor module
35. GPS NEO-7M

3.3. Flowchart Penggerjaan

3.3.1. Tahap Persiapan

Terdapat beberapa hal yang dipersiapkan oleh peneliti sebelum membangun Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir. Tahap persiapan ini sangat penting karena menentukan keberhasilan tahap perancangan dan implementasi sistem. Setiap rencana, strategi, serta pembagian tugas dijabarkan secara rinci pada tahap ini. Adapun hal-hal yang dipersiapkan adalah sebagai berikut:

1. Melakukan brainstorming mengenai permasalahan yang berkaitan dengan kualitas udara dan radiasi di lingkungan sekitar, serta pentingnya edukasi nuklir kepada masyarakat dan pelajar.
2. Menentukan solusi yang akan diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut, yaitu dengan membangun sistem pemantauan interaktif berbasis IoT yang mampu menampilkan data kualitas udara dan tingkat radiasi secara real-time.
3. Menyusun bagian-bagian pekerjaan yang perlu diselesaikan hingga tahap akhir, meliputi penyusunan proposal, perancangan rangkaian alat dan program, desain casing menggunakan 3D printing, pembuatan media edukasi (presentasi atau modul), serta penyusunan laporan hasil penelitian.
4. Menentukan penanggung jawab pada setiap bagian agar proses penggerjaan lebih terarah dan terkoordinasi dengan baik. Penanggung jawab berperan sebagai pengatur dan pengawas, namun seluruh anggota tetap berpartisipasi aktif dalam setiap tahap penggerjaan.
5. Melakukan briefing secara berkala untuk memastikan progres berjalan sesuai rencana. Jika terjadi kendala atau ketidaksesuaian dalam proses perakitan maupun pemrograman, akan dilakukan brainstorming kembali guna mencari solusi terbaik.
6. Menyiapkan seluruh alat dan bahan yang dibutuhkan, mulai dari komponen elektronik, sensor, hingga bahan pendukung seperti filament 3D printing, kabel, dan perangkat lunak pemrograman agar proses pembuatan alat dapat berjalan lancar.

7. Menyusun jadwal kegiatan penelitian secara terstruktur, mulai dari tahap perancangan, perakitan alat, pengujian sistem, hingga tahap analisis dan penyusunan laporan, agar waktu pelaksanaan penelitian dapat dikelola dengan efektif.

3.3.2. Tahap Pelaksanaan

Pada tahap pelaksanaan terdapat berbagai hal yang dilakukan, meliputi: penentuan komponen yang digunakan, perancangan sistem, proses perakitan alat utama, pengujian alat utama, penyusunan alat pada maket, dan proses *finishing* sistem.

a. Penentuan Komponen

Dalam tahap ini dilakukan pemilihan komponen yang akan digunakan berdasarkan fungsi dan spesifikasinya. Mikrokontroler yang digunakan adalah ESP32, karena telah dilengkapi dengan modul WiFi dan Bluetooth sehingga dapat mendukung sistem pemantauan berbasis Internet of Things (IoT) tanpa memerlukan modul tambahan seperti pada Arduino Uno. Pemilihan ESP32 juga mempertimbangkan efisiensi, kemudahan integrasi, serta kemampuannya dalam mengirim data sensor ke platform daring secara real-time.

Sensor MQ-135 digunakan untuk mendekripsi tingkat kualitas udara dengan mengukur konsentrasi gas seperti amonia, karbon dioksida, dan uap kimia berbahaya lainnya. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara sebagai parameter pendukung dalam analisis kualitas udara. Sedangkan sensor Geiger Counter (Miller Tube) digunakan untuk mendekripsi tingkat radiasi lingkungan. Sensor GPS NEO-6M ditambahkan untuk memberikan informasi lokasi pengambilan data radiasi dan kualitas udara secara akurat.

Sebagai penampil data, sistem ini menggunakan LCD OLED 1.3 inch (128x64) yang terhubung langsung ke ESP32 untuk menampilkan data secara lokal, serta platform ThingSpeak sebagai media penyimpanan dan visualisasi

data secara real-time melalui internet. ThingSpeak dipilih karena mampu menampilkan grafik perubahan data sensor secara interaktif dan mudah diakses untuk kepentingan edukasi.

b. Perancangan Sistem Monitoring

Sistem monitoring ini dirancang agar dapat digunakan secara fleksibel dan interaktif untuk tujuan edukasi. Perancangan dilakukan menggunakan aplikasi Proteus untuk simulasi rangkaian elektronik dan Fritzing untuk pembuatan wiring diagram. Sistem diintegrasikan dengan database ThingSpeak agar data hasil deteksi sensor (kualitas udara, suhu, kelembaban, dan radiasi) dapat disimpan dan diakses secara real-time melalui jaringan internet.

Selain itu, sistem juga menampilkan data secara langsung pada LCD OLED, sehingga pengguna dapat melihat hasil pengukuran tanpa harus terhubung ke internet. Data yang dikirim ke ThingSpeak mencakup nilai kadar gas, suhu, kelembaban, tingkat radiasi, serta koordinat lokasi (longitude dan latitude) dari sensor GPS. Sistem akan berfungsi optimal pada area dengan koneksi internet yang stabil.

c. Pembuatan Rangkaian Sistem Utama

Proses pembuatan rangkaian sistem dilakukan setelah desain wiring selesai. Komponen utama seperti ESP32, sensor MQ-135, DHT22, Geiger Counter, dan GPS disusun pada project board, kemudian disolder sesuai dengan diagram yang telah dibuat. Beberapa penyesuaian dilakukan untuk memastikan kestabilan koneksi antar-komponen. Setelah rangkaian berfungsi, dilakukan proses pemrograman menggunakan software Arduino IDE untuk mengatur komunikasi antara sensor, LCD, dan platform ThingSpeak.

d. Pengujian Alat

Tahap pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa alat berfungsi sesuai dengan rancangan. Pengujian sensor MQ-135 dan DHT22 dilakukan dengan membandingkan data pembacaan sensor terhadap data referensi seperti aplikasi cuaca atau alat pengukur lain. Sensor Geiger Counter diuji menggunakan sumber radiasi terkontrol atau area dengan tingkat radiasi lingkungan alami. Hasil pembacaan dibandingkan untuk memastikan akurasi dan stabilitas sistem.

e. Penyusunan Alat pada Maket

Untuk menambah nilai estetika dan memudahkan dalam penyajian edukatif, alat dipasang pada maket 3D yang menggambarkan lingkungan kampus atau area penelitian. Desain casing alat dicetak menggunakan 3D printer dengan bahan filament PLA+, kemudian dipasang pada maket yang juga dilengkapi ilustrasi lokasi sensor dan titik pemantauan.

3.3.3. Tahap Penyelesaian (*finishing*)

Tahap penyelesaian merupakan langkah terakhir dalam proses pembuatan Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir. Pada tahap ini, dilakukan pengecekan secara menyeluruh terhadap seluruh komponen dan rangkaian sistem untuk memastikan semuanya berfungsi dengan baik. Setiap sambungan kabel, konektor, dan modul diuji agar tidak ada yang longgar atau terputus, sehingga sistem dapat berjalan dengan stabil dan tanpa gangguan.

Selanjutnya, dilakukan pengujian koneksi antara sensor, mikrokontroler ESP32, dan platform ThingSpeak guna memastikan data dari sensor dapat dikirim dan diterima secara real-time. Tampilan data pada LCD OLED juga diperiksa kembali agar hasil pengukuran yang muncul sesuai dengan pembacaan aktual dari sensor.

Tahap ini juga mencakup perapian tampilan alat dan penyusunan maket. Maket dirancang agar menarik secara visual serta menggambarkan situasi nyata, seperti lingkungan perkotaan atau area pemantauan radiasi, sehingga alat ini tidak

hanya berfungsi secara teknis tetapi juga memiliki nilai edukatif. Setelah semua komponen diuji dan diperiksa, dilakukan uji coba akhir untuk memastikan sistem benar-benar siap digunakan sebagai media pembelajaran dan pemantauan kualitas udara serta radiasi berbasis IoT.

3.3.4. Tahap Pengumpulan Data

Pada Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir, proses pengumpulan data dilakukan secara otomatis menggunakan beberapa sensor yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Sensor MQ135 digunakan untuk mendeteksi kualitas udara seperti kadar gas berbahaya, sedangkan sensor Geiger Counter berfungsi untuk mengukur tingkat radiasi di lingkungan sekitar. Data dari kedua sensor tersebut kemudian diolah oleh mikrokontroler dan dikirimkan secara real-time ke platform ThingSpeak sebagai media penyimpanan dan visualisasi data. Dengan sistem ini, proses pengumpulan data menjadi lebih efisien tanpa perlu dilakukan secara manual.

Selain itu, hasil pembacaan sensor juga dapat dilihat melalui LCD OLED yang terpasang pada alat sebagai tampilan lokal, sehingga pengguna dapat memantau data secara langsung di tempat. Data yang tersimpan pada ThingSpeak divisualisasikan dalam bentuk grafik yang memudahkan pengguna untuk memahami perubahan kualitas udara dan tingkat radiasi dari waktu ke waktu. Dengan cara ini, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan, tetapi juga sebagai sarana edukatif yang memberikan pemahaman mengenai pentingnya menjaga kualitas udara dan keselamatan lingkungan dari paparan radiasi.

3.3.5. Analisis Data

Data yang diperoleh dari sistem Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir dianalisis berdasarkan hasil pembacaan sensor MQ 135 untuk kualitas udara dan sensor Geiger Counter untuk tingkat radiasi. Nilai-nilai yang diterima dari sensor tersebut dikonversi ke dalam satuan yang sesuai, seperti ppm (part per million) untuk kualitas udara dan $\mu\text{Sv/h}$ (microsievert per jam) untuk radiasi. Setelah itu, data diklasifikasikan menjadi

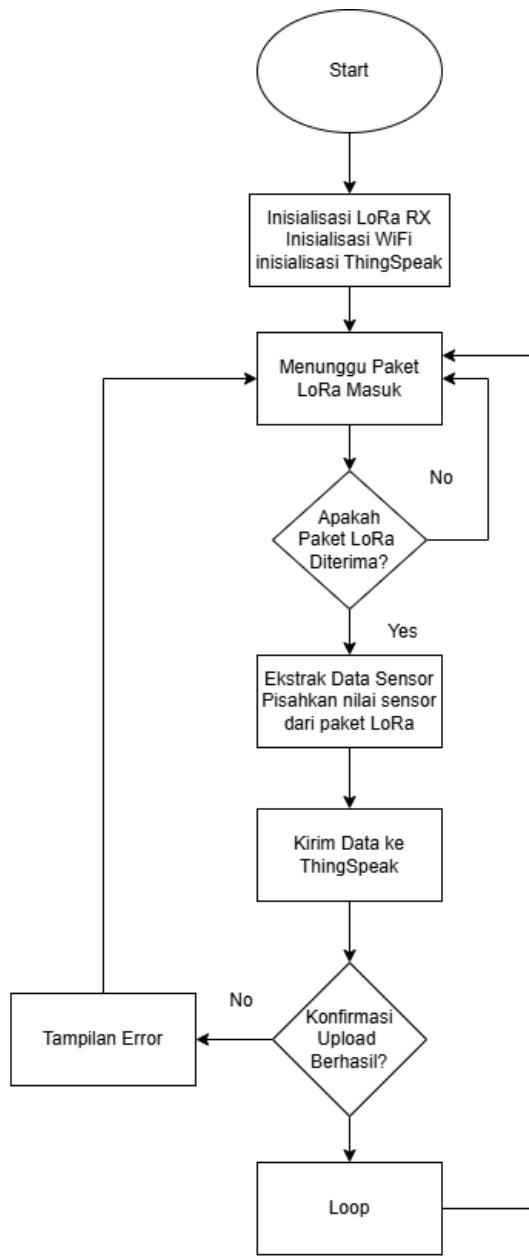
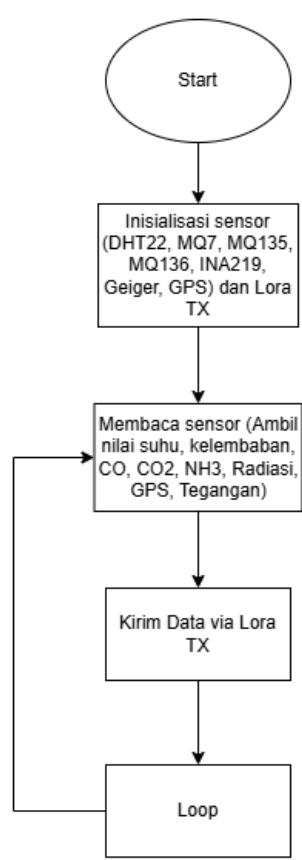
beberapa kategori, seperti baik, sedang, atau buruk untuk udara, serta aman atau berbahaya untuk tingkat radiasi. Klasifikasi ini dilakukan berdasarkan ambang batas standar yang sudah ditentukan sesuai dengan referensi lingkungan dan keselamatan radiasi.

Hasil analisis kemudian ditampilkan secara visual melalui grafik dan indikator warna pada platform ThingSpeak, sehingga pengguna dapat memahami kondisi lingkungan secara cepat dan interaktif. Selain di website, hasil pembacaan juga dapat dilihat secara langsung melalui LCD OLED yang menampilkan nilai sensor secara real-time. Dengan adanya proses analisis ini, sistem dapat memberikan informasi yang mudah dipahami oleh masyarakat serta meningkatkan kesadaran akan pentingnya menjaga kualitas udara dan keselamatan dari paparan radiasi di lingkungan sekitar.

3.3.6. Pengujian Spesifik Alat

Pengujian spesifikasi pada Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir dilakukan untuk memastikan seluruh komponen seperti sensor MQ135, sensor Geiger Counter, mikrokontroler ESP32, dan LCD OLED berfungsi dengan baik. Proses pengujian mencakup pengecekan akurasi pembacaan sensor, kestabilan koneksi WiFi, serta kejelasan tampilan data pada LCD dan platform ThingSpeak, sehingga alat dapat bekerja sesuai spesifikasi yang diharapkan.

Berikut ini merupakan flowchart atau skema pengujian Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT untuk Edukasi Nuklir.

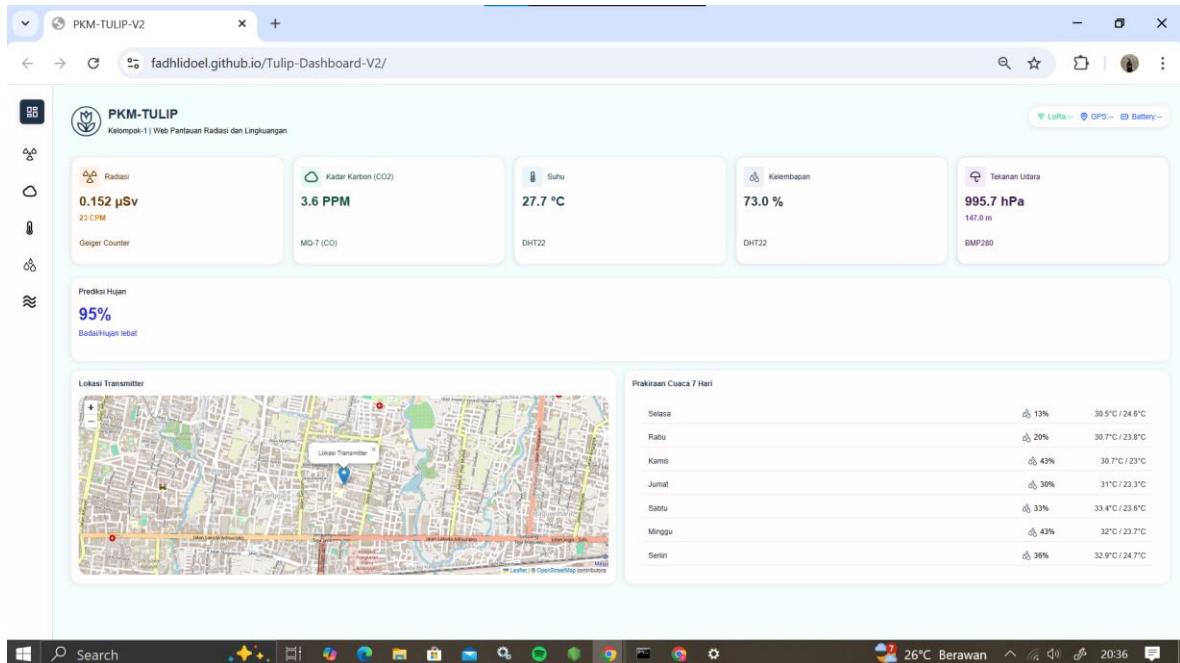


Gambar 3.1 Flowchart LoRa pengirim (a) Flowchart LoRa Penerima (b)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil



Gambar 4.1 Tampilan pada Web

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, Sistem Pemantauan Interaktif Kualitas Udara dan Radiasi Berbasis IoT mampu bekerja sesuai dengan perancangan awal. Sistem berhasil melakukan akuisisi data dari seluruh sensor yang terintegrasi, yaitu sensor MQ-7 dan MQ-135 untuk parameter kualitas udara, sensor DHT22 untuk suhu dan kelembaban, sensor BMP280 untuk tekanan udara, serta Geiger Counter berbasis tabung Geiger-Müller untuk radiasi lingkungan. Data hasil pengukuran dapat ditampilkan secara lokal melalui LCD OLED dan dikirimkan secara real-time ke platform ThingSpeak melalui koneksi WiFi dan LoRa.

Hasil pemantauan menunjukkan bahwa nilai suhu, kelembaban, tekanan udara, dan kadar gas berada pada rentang yang sesuai dengan kondisi lingkungan saat pengujian. Pembacaan tingkat radiasi gamma lingkungan menunjukkan nilai yang relatif stabil dan masih berada dalam batas aman untuk radiasi latar belakang (background radiation). Visualisasi data pada dashboard ThingSpeak memperlihatkan tren perubahan parameter lingkungan yang konsisten terhadap kondisi aktual di lapangan.

4.2. Pembahasan

Secara teoritis, sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) bekerja dengan prinsip akuisisi data lingkungan menggunakan sensor, pengolahan data oleh mikrokontroler, serta pengiriman data ke server berbasis cloud untuk divisualisasikan secara real-time. Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsep tersebut dapat diterapkan dengan baik pada sistem yang dikembangkan.

Sensor MQ-7 dan MQ-135 bekerja berdasarkan prinsip perubahan resistansi material semikonduktor akibat interaksi dengan gas tertentu. Hasil pembacaan sensor menunjukkan adanya variasi nilai ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan, seperti peningkatan aktivitas manusia atau perubahan sirkulasi udara. Hal ini sesuai dengan teori sensor gas semikonduktor yang menyatakan bahwa konsentrasi gas berbanding lurus dengan perubahan resistansi sensor.

Sensor DHT22 dan BMP280 memberikan data pendukung berupa suhu, kelembaban, dan tekanan udara. Secara teori, parameter-parameter ini berpengaruh terhadap karakteristik udara serta dapat memengaruhi sensitivitas sensor gas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan suhu dan kelembaban diikuti oleh fluktuasi kecil pada pembacaan sensor gas, sehingga memperkuat keterkaitan antara teori lingkungan atmosfer dan data yang diperoleh.

Untuk pengukuran radiasi, Geiger Counter berbasis tabung Geiger-Müller bekerja berdasarkan prinsip ionisasi gas akibat radiasi pengion. Setiap kejadian ionisasi menghasilkan pulsa listrik yang dihitung sebagai laju cacah (count). Hasil pengukuran menunjukkan laju cacah yang relatif stabil dan sesuai dengan karakteristik radiasi latar belakang lingkungan, sehingga hasil ini konsisten dengan teori radiasi lingkungan dan keselamatan nuklir.

Pemilihan sensor pada sistem ini didasarkan pada pertimbangan fungsional, edukatif, dan efisiensi sistem. Sensor MQ-7 dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap gas karbon monoksida (CO), yang merupakan salah satu polutan udara berbahaya dan relevan untuk pemantauan kualitas udara di lingkungan perkotaan. Sensor MQ-135 digunakan sebagai pelengkap karena mampu mendeteksi berbagai gas pencemar lain, sehingga memberikan gambaran kualitas udara yang lebih komprehensif. Sensor DHT22 dipilih karena memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan sensor suhu–kelembaban sejenis,

serta keluaran digital yang stabil dan mudah diintegrasikan dengan ESP32. Sensor BMP280 digunakan untuk memperoleh data tekanan udara yang berguna dalam analisis kondisi atmosfer dan mendukung interpretasi data kualitas udara.

Geiger Counter Kamjay berbasis tabung Geiger-Müller dipilih karena konstruksinya sederhana, respons cepat, serta cocok untuk tujuan edukasi nuklir. Sensor ini mampu mendeteksi radiasi gamma lingkungan dan memberikan data yang mudah dipahami oleh pengguna awam. Kombinasi sensor-sensor tersebut menjadikan sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat monitoring, tetapi juga sebagai media pembelajaran yang representatif terhadap konsep fisika lingkungan dan keselamatan radiasi.

Selama proses perancangan dan pengujian sistem, terdapat beberapa hambatan yang ditemui. Salah satu kendala utama adalah stabilitas pembacaan sensor gas MQ-7 dan MQ-135, terutama pada fase awal pemanasan (*warm-up*). Sensor memerlukan waktu tertentu untuk mencapai kondisi kerja optimal, sehingga pada awal pengoperasian data cenderung fluktuatif.

Kendala lain adalah keterbatasan koneksi jaringan, khususnya saat pengiriman data ke ThingSpeak. Pada kondisi sinyal WiFi yang tidak stabil, terjadi keterlambatan pengiriman data (*delay*) atau data tidak terkirim secara kontinu. Selain itu, integrasi beberapa sensor dengan konsumsi daya yang berbeda menuntut perancangan manajemen daya yang lebih cermat agar sistem tetap beroperasi stabil. Dari sisi mekanik dan perakitan, keterbatasan ruang pada casing dan kompleksitas kabel juga menjadi tantangan tersendiri, terutama untuk menjaga kerapian rangkaian dan menghindari gangguan elektromagnetik antar komponen.

Faktor internal yang mempengaruhi kualitas data meliputi karakteristik sensor, kestabilan catu daya, dan pemrograman mikrokontroler. Perubahan tegangan suplai dapat memengaruhi akurasi pembacaan sensor, khususnya sensor analog seperti MQ-7 dan MQ-135. Selain itu, kesalahan kalibrasi dan noise pada sinyal juga berpotensi menimbulkan deviasi data.

Faktor eksternal meliputi kondisi lingkungan sekitar alat, seperti suhu, kelembaban, aliran udara, dan aktivitas manusia. Perubahan suhu dan kelembaban dapat memengaruhi sensitivitas sensor gas, sedangkan pergerakan udara dapat menyebabkan variasi konsentrasi gas di sekitar sensor. Untuk pengukuran radiasi, faktor eksternal berupa radiasi latar belakang alami dan material di sekitar alat turut memengaruhi laju cacah yang terdeteksi. Dengan

mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, hasil pengukuran yang diperoleh pada sistem ini masih dapat diterima untuk tujuan edukasi dan pemantauan awal lingkungan. Sistem ini diharapkan dapat dikembangkan lebih lanjut dengan peningkatan kalibrasi, filtrasi data, dan optimasi desain agar menghasilkan data yang lebih presisi dan andal.

BAB V

ANGGARAN BIAYA

Tabel 1 Anggaran Biaya

No.	Nama Barang	Jumlah	Harga Satuan	Harga Total	Ket.
1.	Assembled DIY Geiger Counter Kit Module Miller Tube GM Tube Kamjay	1	Rp1,300,000.00	Rp1,300,000.00	Tokopedia
2.	ESP32 DevKitC V4 ESP32-WROOM-32U Wireless Bluetooth IOT WROOM ESP-32U - NORMAL	3	Rp90,000.00	Rp270,000.00	jogjarobotika
3.	Kabel data tipe A to Micro	2	Rp12,000.00	Rp24,000.00	jogjarobotika
4.	38 Pin ESP32 ESP-32 ESP32D Expansion Terminal Extension Shield Board Adapter 38pin	2	Rp24,525.00	Rp49,050.00	Tokopedia
5.	Project Board mini 400 point	3	Rp13,000.00	Rp39,000.00	jogjarobotika
6.	MQ-7 Modul Gas Sensor Gas MQ7 Module	2	Rp17,000.00	Rp34,000.00	Tokopedia
7.	GPS GY-NEO6MV2	2	Rp43,000.00	Rp86,000.00	jogjarobotika
8.	DHT22 Sensor Module	2	Rp25,000.00	Rp50,000.00	jogjarobotika
9.	LCD Oled Biru 1.3 inch 128x64	2	Rp65,000.00	Rp130,000.00	jogjarobotika
10.	Solar Cell Panel 110x80mm 5v 200mA Pembangkit Listrik Tenaga Surya	3	Rp50,000.00	Rp150,000.00	jogjarobotika
11.	INA219 / INA219 I2C Sensor Arus Daya Volt DC Untuk Nodemcu Arduino	2	Rp25,000.00	Rp50,000.00	jogjarobotika
12.	1N5819 Dioda 1N5819	20	Rp250.00	Rp5,000.00	Tokopedia

	IN5819 1A Schottky Barrier Rectifier Diode				
13.	Modul Lora Ra-02 Ra02 SX1278 Wireless 433MHz SPI include antenna	2	Rp170,700.00	Rp170,700.00	Tokopedia
14.	MOLICEL P30B 18650 Battery 3000mAh 30A	4	Rp95,000.00	Rp380,000.00	Tokopedia
15.	MQ-135 Modul Sensor Gas	2	Rp17,500.00	Rp35,000.00	Tokopedia
16.	Saklar On-Off 4 Pin KCD4 with LED Rocker Switch AC 220V 31x25MM-Red	2	Rp3,500.00	Rp7,000.00	jogjarobotika
17.	Kabel male-male 20 cm	30	Rp500.00	Rp15,000.00	jogjarobotika
18.	Kabel male-female 20 cm	30	Rp500.00	Rp15,000.00	jogjarobotika
19.	Kabel female-female 20 cm	30	Rp500.00	Rp15,000.00	jogjarobotika
20.	Pasta Solder CMT-150 Soldering Paste	1	Rp20,000.00	Rp20,000.00	jogjarobotika
21.	Kabel Pejal Jumper Bredboard Project Board PCB 1x0.4mm-Hitam	15	Rp1,500.00	Rp22,500.00	jogjarobotika
22.	Kabel Pejal Jumper Bredboard Project Board PCB 1x0.4mm-Hijau	15	Rp1,500.00	Rp22,500.00	jogjarobotika
23.	Kabel Pejal Jumper Bredboard Project Board PCB 1x0.4mm-Merah	15	Rp1,500.00	Rp22,500.00	jogjarobotika
24.	Kabel Pejal Jumper Bredboard Project Board PCB 1x0.4mm-Kuning	15	Rp1,500.00	Rp22,500.00	jogjarobotika
25.	KABEL TIS CABLE TIES 1PACK ISI 100PCS - (3.6*200)MM HITAM	1	Rp10,000.00	Rp10,000.00	jogjarobotika

26.	Kabel Silikon Fleksibel 24 AWG Flexible Silicone Wire AWG 24 - HITAM	1	Rp3,000.00	Rp3,000.00	jogjarobotika
27.	Kabel Silikon Fleksibel 22 AWG Flexible Silicone Wire AWG 22 - MERAH	1	Rp3,500.00	Rp3,500.00	jogjarobotika
28.	PCB Lubang Hole Prototype Protoboard Dot Matrix Single Side Satu Layer Aneka Ukuran 4x6 5x7 6x8 7x9 8x12 10x15 12x18 15x20 Atomation - 7x9	2	Rp8,000.00	Rp16,000.00	Tokopedia
29.	Adaptor 5V 2A Konektor USB (Kepala Adaptor)	1	Rp20,000.00	Rp20,000.00	jogjarobotika
30.	Battery holder 4x 18650	3	Rp12,000.00	Rp36,000.00	Tokopedia
31.	BMS 1S 3.7V 4.2V 10A 15A LI ION LITHIUM 18650 CAS BATRE CHARGER PROTEC - 6MOS 15A	2	Rp12,000.00	Rp24,000.00	Tokopedia
32.	Step Up MT3608 DC-DC 2A Step Up	2	Rp14,624.00	Rp29,248.00	Tokopedia
33.	Heat Shrink Pembungkus Kabel Bakar Selang Konektor Penyambung Kabel Isolasi Bakar	1	Rp18,000.00	Rp18,000.00	Tokopedia
34.	Dioda SMD SS34 1N5822 3A 40V Schottky Diode IN5822 DO-214AC 5822 SS 34	20	Rp780.00	Rp15,600.00	Tokopedia
35.	Fuse Kaca Panjang 20X5mm 1.6A 2A 2.5A 3.15A 4A 5A 6.3A 8A 10A 15A 20A(10PC) - 5A	2	Rp250.00	Rp500.00	Tokopedia
36.	Inline Fuse Holder 5x20mm Copper Wire	2	Rp1,500.00	Rp3,000.00	jogjarobotika

37.	Solder Adjustable Temperature 200°C-480°C Soldering Iron 900 60W	1	Rp70,000.00	Rp70,000.00	jogjarobotika
38.	Timah Solder Tenol Cap Pancing 0.8mm 60/40 Roll Kecil +-10 Meter	1	Rp25,000.00	Rp25,000.00	Tokopedia
39.	GLUE GUN LEM TEMBAK KECIL +SAKLAR 20WATT 100-240VAC	1	Rp22,000.00	Rp22,000.00	Tokopedia
40.	SUNLU 3D Filament PLA+ 2.0 Neat Winding	2	Rp165,000.00	Rp330,000.00	shopee
41.	Lem G Lem Korea Serbaguna	2	Rp6,000.00	Rp12,000.00	jogjarobotika
42.	Obeng HP Set 115 in 1 Torx Kunci Set Alat Service Reparasi HP Full Set	1	Rp45,500.00	Rp45,500.00	shopee
43.	Isi Lem Tembak Glue Gun Lem Bakar 0.7cm x 30CM	10	Rp1,500.00	Rp15,000.00	jogjarobotika
44.	Paket Spacer Kuningan M3 1 BOX isi 120 pcs	1	Rp100,000.00	Rp100,000.00	jogjarobotika
45	Tp 4056	2	Rp4,000.00	Rp8,000.00	jogjarobotika
Jumlah				Rp3,769,500.00	

DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Atomic Energy Agency (IAEA), *Radiation Safety in Educational and Training Facilities*. Vienna: IAEA, 2020. [Online]. Available: <https://www.iaea.org/publications>
- [2] World Health Organization (WHO), *Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. Geneva: WHO, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [3] F. M. Maulana and Hartoyo, “Design and development of an IoT-based electrical disturbance protection and load monitoring system using ESP32 microcontroller,” *Journal of Applied Electrical Engineering and Informatics*, 2023.
- [4] H. Zidni et al., “Developing a scalable IoT-based platform for enhancing air quality monitoring in Yogyakarta,” *Journal of Engineering and Technology*, 2024.
- [5] A. Satria et al., “IoT-based machine condition monitoring simulation using ESP32,” *Jurnal HEXAGON*, 2024.
- [6] MathWorks, *ThingSpeak Documentation*. Natick, MA: MathWorks, 2024. [Online]. Available: <https://thingspeak.mathworks.com/docs>
- [7] J. Corzi, D. Lipovetzky, and M. Gómez Berisso, “Development of an IoT embedded gamma-ray detector using CMOS sensor,” *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2025.
- [8] F. Waworundeng and T. Limbong, “IoT-based environmental monitoring with data analysis of temperature, humidity, and air quality,” *Cogito Journal*, 2022.
- [9] A. Irdayanti, N. Azzahra, and A. Alrasyid, “Sistem monitoring dan pengaturan kualitas udara dalam ruangan berbasis Internet of Things,” *Jurnal Ampere*, 2023. [Online]. Available: <https://jurnal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/ampere/article/download/18193/9801/52825>
- [10] Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan (DLHK) DIY, *Laporan Kualitas Udara Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2023*. Yogyakarta: Pemerintah Daerah DIY, 2023.