

Rancang Bangun Sistem Instrumentasi Uji Efektivitas Perisai Radiasi Berbasis Mikrokontroler ESP32

Fivit Marwita; M.Febriansyah; Akbar Rhamadan

Program Studi Teknik Elektro, FSTT,

Institut Sains dan Teknologi Nasional, Jakarta

Email: pipitsaman@istn.ac.id. Akbarrhamadan2395@gmail.com

Abstrak

Radiasi ionisasi berpotensi menimbulkan dampak biologis sehingga diperlukan perisai radiasi untuk menurunkan tingkat paparan, yang evaluasinya membutuhkan sistem instrumentasi dengan pengukuran akurat, stabil, dan berkelanjutan. Penelitian ini merancang dan merealisasikan sistem uji efektivitas perisai radiasi berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan detektor Geiger-Müller, rangkaian pembangkit tegangan tinggi, serta pembentuk pulsa untuk menghasilkan sinyal digital yang dapat diproses secara real time. Sistem melakukan pencacahan laju radiasi, menampilkan hasil pada LCD, dan mengirimkan data secara nirkabel. Pengujian meliputi penentuan daerah plateau melalui variasi tegangan kerja, verifikasi hukum kuadrat terbalik melalui variasi jarak sumber, serta evaluasi material perisai berupa timbal (Pb), triplek, dan beton. Hasil menunjukkan tegangan optimum detektor berada pada rentang 500–700 V dengan respons stabil, variasi jarak sesuai hukum kuadrat terbalik, serta efektivitas atenuasi timbal dan beton lebih tinggi dibandingkan triplek. Validasi terhadap alat standar menghasilkan galat rata-rata 13,67%, menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja baik sebagai prototipe instrumentasi radiasi portabel dan berpotensi dikembangkan menuju sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT).

Kata kunci: detektor Geiger-Müller, perisai radiasi, ESP32, instrumentasi radiasi, metode Fuzzy

Abstract

Ionizing radiation has the potential to cause harmful biological effects; therefore, radiation shielding is required to reduce exposure levels, and its effectiveness must be evaluated using an instrumentation system capable of accurate, stable, and continuous measurements. This study aims to design and implement a radiation shielding effectiveness testing system based on an ESP32 microcontroller integrated with a Geiger-Müller detector, a high-voltage power supply circuit, and a pulse-shaping circuit to convert radiation events into digital signals for real-time processing. The system performs radiation count rate measurements, displays the results on an LCD, and transmits data wirelessly. Experimental evaluations include determination of the detector plateau region through variation of operating voltage, verification of the inverse square law through distance variation, and assessment of shielding materials including lead (Pb), plywood, and concrete. The results indicate that the optimal detector operating voltage lies within the 500–700 V plateau region with stable response characteristics, the distance variation follows the inverse square law, and lead and concrete exhibit higher attenuation effectiveness compared to plywood. Validation against a standard reference instrument yielded an average error of 13.67%, demonstrating that the developed system performs well as a portable radiation instrumentation prototype and shows strong potential for further development into an Internet of Things (IoT)-based radiation monitoring system.

Keywords: Geiger-Müller detector, ESP32, ionizing radiation, attenuation, radiation shielding, instrumentation system.

1. PENDAHULUAN

Radiasi merupakan fenomena fisika yang memiliki peranan penting dalam berbagai bidang, seperti kedokteran, industri, dan penelitian nuklir. Dalam bidang medis, radiasi dimanfaatkan untuk diagnosis dan terapi, sementara di sektor industri digunakan pada pengujian tak merusak (Non-Destructive Testing/NDT), pengendalian kualitas material, serta berbagai aplikasi teknologi lainnya. Meskipun memberikan manfaat yang signifikan, paparan radiasi yang berlebihan dapat menimbulkan dampak biologis yang merugikan bagi manusia maupun lingkungan (IAEA, 2018). Efek tersebut dapat bersifat deterministik maupun stokastik, tergantung pada besar dosis dan lama paparan. Oleh karena itu, penerapan sistem proteksi radiasi yang efektif menjadi aspek

fundamental dalam setiap aktivitas yang memanfaatkan sumber radiasi pengion.

Di Indonesia, ketentuan mengenai proteksi dan keselamatan radiasi diatur dalam Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 4 Tahun 2020 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Regulasi tersebut menetapkan bahwa batas dosis efektif tahunan bagi pekerja radiasi adalah sebesar 20 mSv per tahun, dihitung sebagai rata-rata selama lima tahun (total 100 mSv), dengan ketentuan tidak melebihi 50 mSv dalam satu tahun berjalan. Sementara itu, batas dosis efektif bagi masyarakat umum adalah sebesar 1 mSv per tahun. Ketentuan ini menegaskan urgensi penerapan sistem proteksi radiasi yang andal, termasuk penggunaan bahan perisai (shielding) yang efektif pada fasilitas

industri, medis, maupun laboratorium penelitian yang memanfaatkan sumber radiasi gamma atau sinar-X.

Material perisai radiasi berfungsi untuk menyerap atau mengurangi intensitas radiasi melalui mekanisme atenuasi sehingga dosis yang diterima di luar perisai berada dalam batas aman. Efektivitas suatu bahan perisai umumnya ditinjau dari kemampuan menurunkan laju dosis atau laju cacahan radiasi, yang secara teoritis mengikuti hukum atenuasi eksponensial. Selain itu, aspek lain seperti stabilitas struktural, ketahanan terhadap lingkungan operasional, serta kemudahan integrasi dengan sistem monitoring juga menjadi pertimbangan penting. Dalam praktiknya, pengujian efektivitas material shielding masih banyak dilakukan menggunakan alat ukur radiasi konvensional yang hanya menampilkan hasil bacaan secara langsung tanpa sistem pencatatan data otomatis. Proses ini cenderung memerlukan pencatatan manual, rentan terhadap kesalahan manusia, serta kurang efisien dalam analisis data jangka panjang (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015). Keterbatasan tersebut menunjukkan perlunya inovasi perangkat ukur radiasi berbasis sistem instrumentasi modern yang mampu menyediakan pengukuran real-time, pencatatan data otomatis, serta pemantauan jarak jauh (Bevington & Robinson, 2003).

Perkembangan teknologi mikrokontroler memberikan peluang besar dalam pengembangan sistem instrumentasi radiasi yang lebih efisien dan terintegrasi. Sistem berbasis mikrokontroler memungkinkan proses akuisisi data dilakukan secara otomatis, terprogram, dan terhubung dengan sistem digital. Secara umum, detektor radiasi nuklir diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu detektor isian gas, detektor sintilasi, dan detektor semikonduktor. Pada penelitian ini digunakan detektor isian gas jenis Geiger-Müller (GM) karena memiliki konstruksi yang relatif sederhana, biaya yang lebih ekonomis, serta pengoperasian yang mudah (Knoll, 2000). Meskipun efisiensi absolutnya lebih rendah dibandingkan detektor sintilasi atau semikonduktor, detektor GM tetap banyak digunakan dalam aplikasi monitoring radiasi lingkungan dan pendidikan karena keandalannya dalam mendeteksi keberadaan radiasi pengion.

Integrasi detektor GM dengan mikrokontroler ESP32 memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan sistem konvensional. ESP32 mendukung kemampuan pemrosesan data secara real-time, pencacahan laju radiasi (count per minute), serta komunikasi nirkabel melalui Wi-Fi atau Bluetooth. Fitur ini memungkinkan data radiasi dikirimkan ke server lokal maupun platform berbasis awan, sehingga sistem dapat dikembangkan menjadi perangkat monitoring radiasi berbasis Internet of Things (IoT) yang portabel dan ekonomis (Espressif Systems, 2020). Selain meningkatkan efisiensi pengolahan data, sistem berbasis ESP32 juga meningkatkan keselamatan operator karena proses pemantauan dapat dilakukan dari

jarak jauh tanpa harus berada langsung di area dengan potensi paparan radiasi tinggi.

Dalam pengembangan perangkat ukur radiasi generasi baru, tahap rancang bangun menjadi aspek penting yang mengintegrasikan sensor radiasi, rangkaian pembangkit tegangan tinggi, sistem pembentuk pulsa, mikrokontroler, serta perangkat lunak pengolahan data. Rangkaian pembangkit tegangan tinggi diperlukan untuk menyediakan tegangan kerja optimal bagi tabung GM, sedangkan rangkaian pembentuk pulsa berfungsi mengonversi sinyal analog hasil deteksi menjadi sinyal digital yang dapat diproses mikrokontroler. Integrasi komponen-komponen tersebut memungkinkan terciptanya sistem monitoring yang tidak hanya mampu mengukur tingkat radiasi, tetapi juga menyimpan data historis, menampilkan tren perubahan radiasi, serta memberikan notifikasi apabila nilai paparan melebihi batas yang ditentukan. Dibandingkan dengan instrumen komersial, sistem berbasis mikrokontroler menawarkan fleksibilitas pengembangan yang lebih tinggi dengan biaya yang relatif lebih rendah. Fitur tambahan seperti kalibrasi digital, integrasi multi-sensor, dashboard berbasis web, hingga algoritma pemantauan adaptif dapat dikembangkan sesuai kebutuhan pengguna. Hal ini membuka peluang bagi institusi pendidikan, laboratorium skala kecil, maupun industri dalam negeri untuk memiliki perangkat ukur radiasi yang andal tanpa investasi biaya yang besar.

Penelitian ini berfokus pada perancangan dan implementasi sistem instrumentasi berbasis mikrokontroler yang mampu mengukur, merekam, dan menganalisis tingkat radiasi untuk menguji efektivitas berbagai material shielding. Sistem yang dikembangkan diharapkan menjadi alternatif solusi yang lebih efisien, ekonomis, dan terintegrasi dalam mendukung kegiatan penelitian, pengujian material, serta proses kalibrasi di laboratorium radiasi, sekaligus menjadi langkah awal menuju pengembangan sistem monitoring radiasi berbasis IoT yang lebih luas.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Instrumentasi

Sistem instrumentasi merupakan sistem terintegrasi yang digunakan untuk mengukur, memproses, dan menampilkan besaran fisik menjadi informasi yang dapat dianalisis. Secara umum, sistem instrumentasi terdiri atas sensor atau transduser, rangkaian pengkondisi sinyal (signal conditioning), sistem akuisisi data, unit pemroses, serta unit tampilan atau komunikasi data (Doebelin & Manik, 2011).

Dalam sistem pengukuran radiasi, proses instrumentasi harus mampu mendeteksi kejadian radiasi yang bersifat acak (random process), menghitung jumlah cacahan dalam interval waktu tertentu, serta menjaga stabilitas pengukuran terhadap variasi tegangan dan gangguan lingkungan (Knoll, 2000). Parameter penting

dalam sistem instrumentasi radiasi meliputi sensitivitas, akurasi, resolusi waktu, presisi, dan stabilitas jangka panjang (Bevington & Robinson, 2003). Integrasi mikrokontroler dalam sistem instrumentasi modern memungkinkan proses akuisisi data dilakukan secara otomatis, real-time, serta mendukung penyimpanan dan transmisi data secara digital sehingga lebih efisien dibandingkan sistem konvensional.

2.2 Teori dasar Radiasi

Radiasi pengion memiliki energi yang cukup untuk melepaskan elektron dari atom atau molekul sehingga menghasilkan pasangan ion, sedangkan radiasi non-pengion tidak memiliki energi yang cukup untuk menyebabkan proses ionisasi (IAEA, 2014). Radiasi pengion meliputi partikel alfa (α), partikel beta (β), sinar gamma (γ), sinar-X, dan neutron. Keberadaan radiasi pengion sangat penting dalam berbagai aplikasi, seperti kedokteran, industri, dan penelitian nuklir, namun juga berpotensi menimbulkan dampak biologis apabila paparan melebihi batas yang diizinkan.

Partikel alfa merupakan inti helium bermuatan positif yang terdiri atas dua proton dan dua neutron. Radiasi ini memiliki daya ionisasi yang tinggi tetapi daya tembus yang rendah, sehingga dapat dihentikan oleh selembar kertas atau lapisan tipis kulit manusia (Knoll, 2000). Radiasi beta berupa elektron atau positron berenergi tinggi yang dipancarkan dari inti atom tidak stabil, memiliki daya tembus lebih besar dibandingkan partikel alfa, dan dapat ditahan oleh lembaran aluminium tipis (Tsoufanidis & Landsberger, 2015). Sementara itu, radiasi gamma dan sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik berenergi tinggi tanpa massa dan muatan listrik, dengan daya tembus sangat besar sehingga memerlukan material berdensitas tinggi seperti timbal atau beton sebagai perisai (Martin, 2006).

Interaksi radiasi gamma dan sinar-X dengan materi terjadi melalui tiga mekanisme utama, yaitu efek fotolistrik, hamburan Compton, dan produksi pasangan. Pada efek fotolistrik, foton diserap sepenuhnya oleh atom dan melepaskan elektron dari kulit dalam atom. Pada hamburan Compton, foton bertumbukan dengan elektron bebas atau lemah terikat sehingga terjadi hamburan disertai penurunan energi foton. Adapun produksi pasangan terjadi ketika foton berenergi lebih dari 1,022 MeV berinteraksi dengan medan inti dan berubah menjadi pasangan elektron-positron (Knoll, 2000). Penurunan intensitas radiasi setelah melewati suatu material mengikuti hukum atenuasi eksponensial yang dinyatakan sebagai $I = I_0 e^{-\mu x}$, di mana I adalah intensitas setelah melewati material, I_0 adalah intensitas awal, μ adalah koefisien atenuasi linear, dan x adalah ketebalan material (Tsoufanidis & Landsberger, 2015). Hubungan ini menjadi dasar dalam perancangan dan evaluasi efektivitas perisai radiasi.

Beberapa besaran penting dalam kajian radiasi meliputi aktivitas, dosis serap, dosis ekuivalen, dan dosis efektif. Aktivitas menyatakan jumlah peluruhan inti radioaktif per satuan waktu dengan satuan Becquerel (Bq), di mana 1 Bq setara dengan satu peluruhan per detik (IAEA, 2014). Dosis serap menyatakan energi radiasi yang diserap per satuan massa dengan satuan Gray (Gy), sedangkan dosis ekuivalen dan dosis efektif dinyatakan dalam Sievert (Sv) karena telah memperhitungkan faktor bobot radiasi dan sensitivitas jaringan tubuh (Martin, 2006). Dalam proteksi radiasi, prinsip yang digunakan secara internasional adalah ALARA (As Low As Reasonably Achievable), yaitu menjaga paparan radiasi serendah mungkin secara rasional untuk meminimalkan risiko biologis (IAEA, 2018).

2.3 Detektor Radiasi Geiger Muller

Detektor Geiger-Müller (GM) merupakan detektor radiasi isian gas yang bekerja berdasarkan proses ionisasi gas akibat interaksi radiasi pengion. Tabung GM terdiri atas katoda berbentuk silinder dan anoda berupa kawat tipis di tengah tabung, yang diberi tegangan tinggi sehingga membentuk medan listrik kuat. Ketika radiasi memasuki tabung dan mengionisasi gas, pasangan ion-elektron yang terbentuk akan mengalami percepatan dan menghasilkan avalanche ionization, sehingga muncul pulsa listrik yang dapat dihitung sebagai satu cacahan (Knoll, 2000).

Karakteristik penting detektor GM adalah kurva plateau, yaitu rentang tegangan kerja di mana laju cacahan relatif konstan meskipun terjadi variasi kecil pada tegangan suplai. Tegangan kerja optimum ditentukan pada daerah plateau untuk memperoleh kestabilan pengukuran (Tsoufanidis & Landsberger, 2015). Selain itu, detektor GM memiliki waktu mati (dead time), yaitu interval waktu setelah satu kejadian deteksi di mana detektor tidak dapat mendeteksi kejadian berikutnya, sehingga diperlukan koreksi pencacahan pada laju radiasi tinggi (Knoll, 2000).

Meskipun tidak mampu mengukur energi partikel secara langsung dan memiliki efisiensi absolut yang lebih rendah dibandingkan detektor sintilasi atau semikonduktor, GM counter tetap banyak digunakan dalam monitoring radiasi lingkungan dan aplikasi pendidikan karena konstruksinya sederhana, biaya relatif rendah, serta pengoperasian yang mudah (Martin, 2006).



Gambar 2.1 Prinsip Kerja Geiger Müller

Detektor ini berupa tabung berisi gas dengan elektroda anoda di bagian tengah dan katoda pada dinding tabung. Ketika radiasi masuk ke dalam tabung, gas akan terionisasi dan menghasilkan pasangan elektron serta ion positif. Muatan listrik ini bergerak akibat medan listrik dan membentuk pulsa listrik singkat.

Pulsa yang dihasilkan kemudian diteruskan ke rangkaian pencacah dan ditampilkan pada layar digital sebagai jumlah radiasi yang terdeteksi. Selain itu, sinyal juga dapat dihubungkan ke indikator suara untuk memberikan peringatan secara langsung. Ilustrasi ini memperlihatkan bagaimana radiasi yang tidak dapat diamati secara langsung dapat dikonversi menjadi sinyal listrik yang terukur.

2.4 Mikrokontroler ESP 32

ESP32 merupakan mikrokontroler berbasis arsitektur Xtensa dual-core 32-bit yang dirancang untuk aplikasi sistem tertanam (embedded system) dan Internet of Things (IoT). Perangkat ini dikembangkan oleh Espressif Systems dan memiliki keunggulan utama berupa integrasi modul Wi-Fi (802.11 b/g/n) dan Bluetooth (Classic dan BLE) dalam satu chip, sehingga memungkinkan komunikasi data nirkabel tanpa memerlukan modul tambahan (Espressif Systems, 2020). ESP32 bekerja pada frekuensi hingga 240 MHz dan dilengkapi dengan SRAM internal, GPIO (General Purpose Input Output) yang fleksibel, serta berbagai antarmuka komunikasi seperti UART, SPI, I2C, dan ADC, yang mendukung integrasi dengan berbagai sensor dan perangkat eksternal. Kombinasi kemampuan pemrosesan yang cukup tinggi dan fitur komunikasi terintegrasi menjadikan ESP32 sangat sesuai untuk sistem monitoring berbasis jaringan (Irmayani, 2025).

Dalam sistem instrumentasi radiasi, ESP32 berfungsi sebagai unit pengolah utama yang menerima sinyal pulsa digital dari detektor Geiger-Müller melalui rangkaian pembentuk pulsa (pulse shaping circuit). Pulsa yang dihasilkan oleh tabung GM memiliki amplitudo tertentu dan durasi sangat singkat, sehingga diperlukan pengkondisian sinyal agar sesuai dengan level logika 3,3 V yang digunakan oleh ESP32. Setelah pulsa diterima melalui pin interrupt atau GPIO tertentu, ESP32 melakukan proses pencacahan berbasis timer internal untuk menghitung jumlah kejadian radiasi dalam interval waktu tertentu, misalnya dalam satuan count per minute (CPM). Penggunaan interrupt hardware memungkinkan pencacahan dilakukan secara presisi tanpa kehilangan pulsa meskipun sistem menjalankan proses lain secara paralel.

Selain fungsi pencacahan, ESP32 juga mampu melakukan pengolahan data lanjutan seperti konversi CPM ke estimasi laju dosis, penyaringan data (filtering), serta perhitungan statistik sederhana untuk meningkatkan stabilitas pembacaan. Dukungan ADC internal 12-bit memungkinkan pembacaan sinyal analog tambahan apabila diperlukan, misalnya untuk memantau tegangan

tinggi catu daya detektor atau parameter lingkungan lainnya. Dari sisi perangkat lunak, ESP32 dapat diprogram menggunakan Arduino IDE maupun ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework), yang menyediakan fleksibilitas dalam pengembangan sistem skala prototipe hingga aplikasi industri.

Dari sisi integrasi sistem, ESP32 mendukung multitasking melalui sistem operasi real-time (FreeRTOS) yang tertanam di dalamnya, sehingga proses pencacahan radiasi, tampilan data pada LCD, dan transmisi jaringan dapat berjalan secara simultan tanpa saling mengganggu. Fitur ini sangat penting dalam sistem instrumentasi radiasi yang menuntut kestabilan pencacahan dan kontinuitas pengiriman data. Dengan kombinasi kemampuan pemrosesan, komunikasi nirkabel, efisiensi daya, serta fleksibilitas pengembangan, ESP32 menjadi platform yang efektif untuk merancang sistem instrumentasi uji efektivitas perisai radiasi yang modern, terintegrasi, dan berpotensi dikembangkan menuju sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) (Irmayani, 2025).

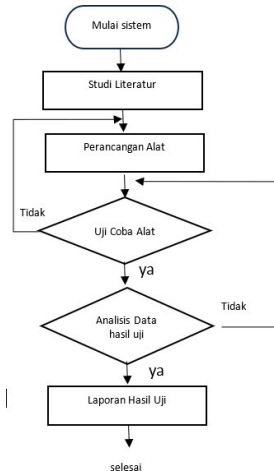
3. METODE PENELITIAN

3.1 Konsep Perancangan

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen untuk merancang dan mengevaluasi sistem instrumentasi pengujian efektivitas perisai radiasi berbasis mikrokontroler ESP32. Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada pengukuran besaran fisik berupa intensitas radiasi yang dinyatakan dalam bentuk data numerik sehingga memungkinkan analisis secara objektif dan terukur.

Sistem yang dikembangkan menggunakan detektor Geiger-Müller sebagai sensor radiasi yang menghasilkan pulsa listrik setiap kali terjadi interaksi radiasi dengan gas di dalam tabung detektor. Pulsa tersebut diproses oleh mikrokontroler ESP32 untuk menghitung laju cacahan radiasi dalam satuan **counts per minute (CPM)**. Data yang diperoleh kemudian digunakan untuk menganalisis efektivitas material perisai radiasi berdasarkan parameter fisika seperti koefisien atenuasi dan **Half Value Layer (HVL)**. Ahapan penelitian dilakukan secara sistematis mulai dari studi literatur, perancangan alat, pengujian sistem, hingga analisis data hasil eksperimen.

Diagram alir penelitian menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis yang dimulai dari tahap studi literatur untuk memperoleh landasan teoritis terkait deteksi radiasi dan sistem instrumentasi. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem instrumentasi yang meliputi desain perangkat keras dan perangkat lunak. Setelah proses perancangan selesai, sistem diuji melalui serangkaian eksperimen untuk memastikan kinerja alat. Apabila hasil pengujian belum memenuhi kriteria yang diharapkan, maka dilakukan evaluasi dan perbaikan sistem. Data hasil pengujian kemudian dianalisis untuk memperoleh kesimpulan mengenai kinerja alat dan efektivitas material perisai radiasi.



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

3.2 Perancangan Alat

Perancangan sistem instrumentasi dilakukan untuk menghasilkan perangkat yang mampu mendeteksi radiasi pengion serta mengevaluasi efektivitas material perisai radiasi. Sistem dirancang berbasis mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat pengendali dan pengolahan data.

Komponen utama sistem meliputi detektor Geiger-Müller sebagai sensor radiasi, rangkaian pembangkit tegangan tinggi untuk mengoperasikan detektor, rangkaian pengkondisi sinyal untuk membentuk pulsa digital, serta modul LCD sebagai media tampilan hasil pengukuran.



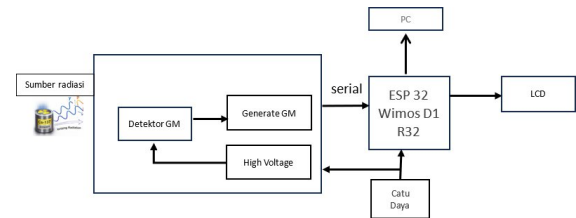
Gambar 4. Diagram Alur Kerja Sistem

Alur kerja sistem berlangsung dalam rangkaian proses yang terstruktur mulai dari penerimaan radiasi oleh sensor, pengolahan data oleh mikrokontroler, hingga penyajian hasil dalam bentuk informasi numerik. Integrasi yang baik antara perangkat keras dan perangkat lunak memastikan bahwa sistem mampu menghasilkan data pengujian yang reliabel, akurat, dan mendukung analisis ilmiah mengenai karakteristik attenuasi radiasi pada berbagai material pelindung yang diteliti.

3.3 Perancangan sistem instrumentasi geiger Muller Berbasis Mikrokontroler ESP 32

Sistem instrumentasi yang dirancang merupakan integrasi antara rangkaian catu daya, konverter tegangan tinggi DC-to-DC, detektor Geiger-Muller, rangkaian pengkondisi sinyal, mikrokontroler ESP32, serta modul LCD I2C sebagai media tampilan data. Perancangan ini bertujuan untuk menghasilkan sistem pengukuran radiasi yang mampu membaca pulsa dari detektor secara akurat,

kemudian mengolah dan menampilkan hasil pengukuran secara real-time.

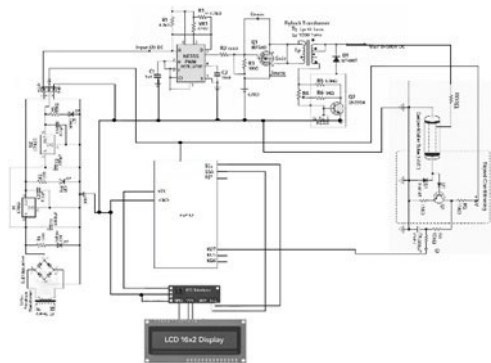


Gambar 5. Diagram Blok Rancangan Alat

Pada diagram blok berikut menggambarkan arsitektur instrumentasi sistem deteksi radiasi yang dikembangkan dalam penelitian ini, mulai dari proses deteksi radiasi hingga penyajian informasi kepada pengguna. Sistem diawali dari sumber radiasi yang memancarkan partikel radiasi menuju detektor Geiger-Müller (GM). Radiasi yang masuk ke dalam detektor akan berinteraksi dengan gas di dalam tabung GM dan menghasilkan pulsa listrik sebagai respons dari setiap kejadian ionisasi.

Detektor Geiger-Müller dioperasikan menggunakan tegangan tinggi yang disuplai oleh modul *high voltage*. Tegangan tinggi ini diperlukan agar proses ionisasi berantai (*avalanche*) dapat terjadi secara optimal sehingga pulsa radiasi dapat dihasilkan secara jelas dan terpisah. Pulsa keluaran dari detektor GM kemudian dilewatkan ke rangkaian *generator GM*, yang berfungsi untuk membentuk dan menyesuaikan sinyal pulsa agar sesuai dengan level logika yang dapat dibaca oleh mikrokontroler.

Sinyal pulsa yang telah dibentuk selanjutnya dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 Wemos D1 R32 sebagai pusat pengolahan data (Abrianto, 2021). Mikrokontroler ini bertugas untuk menghitung jumlah pulsa radiasi yang diterima dalam interval waktu tertentu, mengonversinya menjadi nilai laju cacah radiasi, serta melakukan pengolahan lanjutan sesuai dengan algoritma yang telah dirancang. Selain itu, ESP32 juga mengelola komunikasi data dan pengendalian perangkat keluaran sistem.



Gambar 6. Rangkaian keseluruhan sistem Instrumentasi

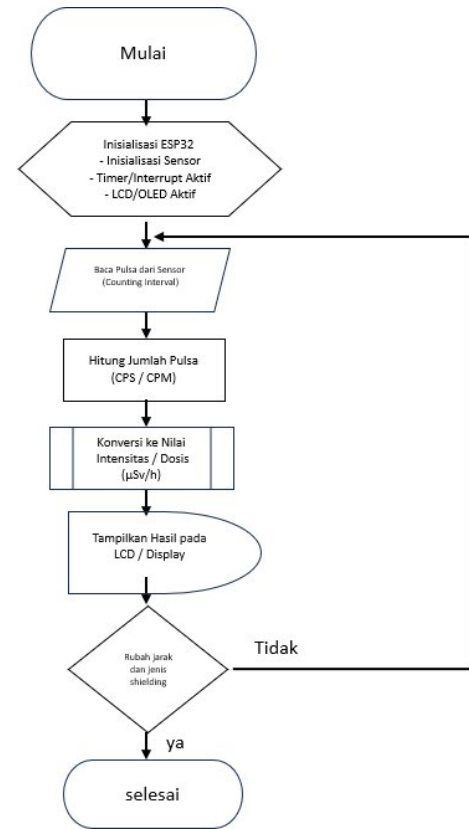
Hasil pengolahan data radiasi ditampilkan secara lokal melalui layar LCD, sehingga pengguna dapat memantau nilai radiasi secara langsung di lokasi pengukuran. Di sisi lain, data juga dikirimkan secara nirkabel ke perangkat *IoT mobile* melalui koneksi jaringan, sehingga memungkinkan pemantauan jarak jauh dan pencatatan data secara real-time. Seluruh rangkaian sistem memperoleh suplai energi dari catu daya yang menyediakan tegangan yang sesuai untuk modul tegangan tinggi, rangkaian pengkondisi sinyal, serta mikrokontroler ESP32. Dengan konfigurasi ini, sistem mampu bekerja secara terintegrasi untuk mendeteksi, mengolah, dan menyajikan informasi radiasi secara akurat dan efisien (Irmayani, 2025).

3.4 Perancangan perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak pada sistem instrumentasi uji efektivitas perisai radiasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap proses mulai dari penerimaan sinyal radiasi, pengolahan data, hingga penyajian informasi dapat berjalan terstruktur, akurat, dan stabil.

Algoritma perangkat lunak yang diimplementasikan pada mikrokontroler ESP32 untuk proses pengukuran radiasi secara real-time. Algoritma diawali dengan tahap *mulai*, di mana program utama dieksekusi setelah sistem memperoleh catu daya. Selanjutnya dilakukan proses inisialisasi ESP32 yang sesuai dengan kode program, meliputi pengaturan pin input untuk detektor Geiger-Müller, inisialisasi variabel penghitung pulsa, pengaktifan *interrupt service routine* (ISR) untuk mendeteksi setiap pulsa radiasi, pengaturan timer sebagai interval penghitungan, serta inisialisasi perangkat tampilan LCD atau display. Setelah inisialisasi selesai, algoritma memasuki tahap pembacaan pulsa sensor, di mana setiap pulsa dari detektor diterima melalui mekanisme interrupt dan disimpan dalam variabel penghitung selama interval waktu tertentu (*counting interval*). Ketika interval waktu tercapai, algoritma menghitung jumlah pulsa untuk memperoleh nilai laju cacahan radiasi dalam satuan CPS atau CPM sesuai dengan perhitungan yang tertanam dalam kode program. Nilai laju cacahan tersebut kemudian diproses lebih lanjut melalui algoritma konversi untuk menghasilkan nilai laju dosis radiasi dalam satuan $\mu\text{Sv/h}$ dengan menggunakan faktor kalibrasi yang telah ditentukan. Hasil perhitungan selanjutnya ditampilkan ke layar LCD sebagai output sistem.

Pada tahap berikutnya, pengguna dapat mengubah jarak atau jenis bahan perisai radiasi, sehingga algoritma kembali mengulangi proses pembacaan pulsa, perhitungan, dan penampilan data. Proses ini berlangsung secara berulang hingga seluruh variasi pengujian selesai dilakukan, kemudian algoritma diakhiri pada tahap *selesai*. Dengan demikian, diagram alir ini secara langsung merepresentasikan struktur algoritma dan alur eksekusi kode program yang berjalan pada ESP32.



Gambar 7. Alur Perangkat Lunak

3.5 Bahan dan Shielding yang digunakan

Material perisai (*shielding*) yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari timbal, beton cor, dan triplek dengan ketebalan masing-masing sebesar 0,5 cm, 6 cm, dan 2 cm. Pemilihan ketiga material tersebut didasarkan pada perbedaan sifat fisis, terutama densitas dan nomor atom efektif, yang mempengaruhi kemampuan atenuasi radiasi gamma dari sumber Cs-137.



Gambar 8. Jenis bahan shielding yang digunakan

Pengumpulan data dilakukan dengan dua cara utama, yaitu pengukuran langsung menggunakan alat yang dirancang, dan dokumentasi pendukung dari literatur serta hasil kalibrasi standar.

Data utama diperoleh dengan mengoperasikan sistem instrumentasi yang telah dibuat. Sistem terdiri dari

detektor Geiger-Müller yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler mengolah sinyal pulsa dari detektor, menghitung laju dosis radiasi, dan mengirimkan data ke antarmuka tampilan LCD serta ke sistem monitoring berbasis IoT (misalnya melalui koneksi Wi-Fi ke laptop atau smartphone).

Pengukuran dilakukan pada tiga kondisi utama:

- Tanpa bahan pelindung (referensi dasar),
- Dengan bahan pelindung (variasi jenis dan ketebalan),
- Pada jarak tetap antara sumber radiasi dan detektor (misalnya 10 cm).

Semua data pengukuran disimpan dalam format digital untuk memudahkan analisis.

Persentase efektivitas bahan pelindung dihitung dengan rumus:

$$\text{Efektivitas Shielding (\%)} = \frac{I_{00}-I}{I_{00}} \times 100$$

I_0 = laju radiasi tanpa pelindung, I = laju radiasi dengan pelindung.

1. Analisis Kurva Eksponensial Reduksi Radiasi

Data juga dianalisis untuk melihat hubungan antara ketebalan bahan pelindung (x) dan intensitas radiasi yang tersisa (I), menggunakan model:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

di mana μ adalah koefisien atenuasi linier. Nilai μ dapat ditentukan dari regresi logaritmik hasil pengukuran.

2. Evaluasi Kinerja Sistem Instrumentasi

Kinerja sistem diukur dari sensitivitas detektor, stabilitas pembacaan, dan kesalahan relatif dibandingkan alat standar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

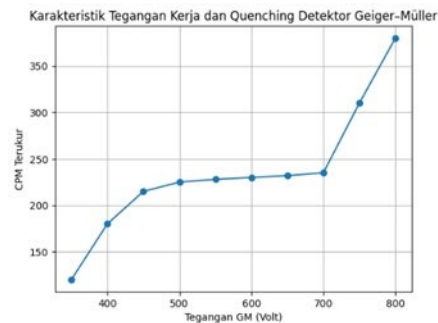
4.1 Pentuan Nilai HV Tegangan Detektor

Penentuan tegangan kerja detektor Geiger-Müller merupakan tahap penting untuk memastikan sistem instrumentasi bekerja pada kondisi operasi yang stabil. Berdasarkan hasil pengujian yang ditunjukkan pada tabel berikut

Tabel 1. Tegangan Kerja dengan Nilai CPM

Tegangan GM (V)	CPM Terukur
350	120
400	180
450	215
500	225
550	228
600	230
650	232
700	235
750	310
800	380

Tabel 1 terlihat bahwa nilai cacahan radiasi yang terukur dalam satuan counts per minute (CPM) mengalami peningkatan signifikan pada rentang tegangan rendah antara 350 V hingga 450 V. Peningkatan ini menunjukkan bahwa proses ionisasi gas di dalam tabung detektor belum berlangsung secara optimal sehingga kenaikan tegangan masih memberikan pengaruh besar terhadap jumlah pulsa yang dihasilkan. Hubungan antara tegangan kerja dan nilai CPM tersebut divisualisasikan lebih jelas.



Gambar 9. Grafik karakteristik GM

Gambar 9 yang memperlihatkan adanya daerah plateau pada rentang tegangan sekitar 500 V hingga 700 V. Pada daerah plateau ini, peningkatan tegangan tidak lagi menyebabkan perubahan nilai CPM yang signifikan, sehingga detektor bekerja pada kondisi stabil. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme quenching di dalam tabung Geiger-Müller mampu menghentikan proses ionisasi berantai secara efektif sehingga setiap kejadian radiasi menghasilkan satu pulsa yang terpisah. Namun demikian, ketika tegangan dinaikkan di atas 700 V, nilai CPM kembali meningkat secara tajam sebagaimana terlihat pada grafik karakteristik detektor. Kondisi ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya pelepasan muatan berkelanjutan (continuous discharge) yang dapat menyebabkan kesalahan pencacahan. Oleh karena itu, tegangan kerja detektor pada sistem yang dikembangkan ditetapkan berada pada daerah plateau, yaitu sekitar 500–700 V, untuk menjamin kestabilan pulsa yang dihasilkan serta keandalan data pengukuran radiasi.

4.2 Integrasi terhadap Metode Fuzzy

Nilai CPM yang diperoleh dari detektor radiasi selanjutnya diproses oleh mikrokontroler ESP32 untuk menentukan tingkat bahaya radiasi menggunakan metode logika fuzzy. Pendekatan ini dipilih karena nilai cacahan radiasi yang dihasilkan oleh detektor Geiger-Müller bersifat fluktuatif akibat karakteristik statistik radiasi. Oleh karena itu, penggunaan batas tegas dalam klasifikasi tingkat bahaya berpotensi menghasilkan keputusan yang tidak stabil. Dalam sistem yang dikembangkan, nilai CPM yang diperoleh dari proses pencacahan selama interval

waktu tertentu digunakan sebagai variabel masukan (crisp input) pada sistem fuzzy. Nilai masukan tersebut kemudian dipetakan ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu rendah, sedang, dan tinggi, menggunakan fungsi keanggotaan linier. Rentang nilai fungsi keanggotaan ini dirancang agar mampu merepresentasikan perubahan tingkat radiasi secara gradual sehingga sistem dapat memberikan keputusan yang lebih adaptif terhadap variasi nilai CPM. Setelah proses fuzzifikasi dilakukan, sistem melanjutkan proses inferensi untuk menentukan tingkat kondisi radiasi berdasarkan derajat keanggotaan masing-masing himpunan. Tahap akhir adalah proses defuzzifikasi yang menghasilkan satu nilai keluaran numerik sebagai indikator tingkat bahaya radiasi. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk menentukan status akhir sistem, yaitu aman, waspada, atau bahaya, yang ditampilkan melalui layar LCD dan indikator visual pada perangkat.

```
float fuzzyRendah(float x) {
    if (x <= 30) return 1;
    else if (x < 50) return (50 - x) / 20;
    else return 0;
}

float fuzzySedang(float x) {
    if (x <= 30 || x >= 100) return 0;
    else if (x < 60) return (x - 30) / 30;
    else return (100 - x) / 40;
}

float fuzzyTinggi(float x) {
    if (x <= 80) return 0;
    else if (x < 120) return (x - 80) / 40;
    else return 1;
}
```

Gambar 10 Penerapan metode fuzzy

4.3 Hasil Pengujian Alat

Pengujian dilakukan melalui beberapa tahap sebagai berikut:

1. Pengujian respon alat terhadap sumber radiasi
 Untuk memastikan sensor radiasi dan sistem akuisisi data mampu mendeteksi radiasi dan memberikan respon yang sesuai.
2. Pengujian variasi jarak antara sumber radiasi dan detektor
 Untuk melihat perubahan nilai intensitas radiasi terhadap jarak sesuai teori pelemahan radiasi.
3. Pengujian variasi jenis perisai radiasi
 Untuk mengetahui efektivitas material perisai dalam menurunkan intensitas radiasi.
4. Perbandingan hasil bacaan dengan alat standar
 Untuk mengetahui tingkat akurasi alat yang dirancang dibandingkan alat ukur radiasi yang telah terkalibrasi.

Seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi lingkungan terkendali dengan memperhatikan faktor keselamatan

radiasi.

Dalam pengujian ini sumber radiasi yang digunakan adalah Cs 137 dengan aktivitas awal 23,1 Mbq +/- 3% per tanggal 6 february 2013

Dari tahun 2013 hingga tahun 2026 berarti terjadi peluruhan nilai aktivitas sumber radiasi sebesar

$$A = A_0 \times 2^{-t/T_{1/2}}$$

$$= 23,1 \times 2^{-13/30}$$

$$= 16,71 \text{ Mbq}$$

Dimana ;

A_0 = aktivitas awal sumber radioaktif

A = aktifitas sekarang

$T_{1/2}$ = waktu zat radioaktif menjadi nilai setengahnya (cs 137 30 tahun)

1. Pengujian Respon Alat terhadap Sumber Radiasi

Pengujian respon alat terhadap sumber radiasi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang mampu mendeteksi keberadaan radiasi secara akurat.

Tabel 2. Pengujian Respon Alat

No	Material Perisai	CPM Terukur	Keterangan
1	Tanpa sumber radiasi	40	background
2	Dengan sumber radiasi	241035	Radiasi terdeteksi
3	Sumber dijauhkan jarak 20 cm	49654	Bacaan menurun

Berdasarkan data pada tabel pengukuran, diperoleh nilai cacah radiasi sebesar 40 CPM pada kondisi tanpa sumber radiasi, yang merepresentasikan radiasi latar belakang (*background radiation*). Ketika sumber radiasi ditempatkan dekat dengan detektor tanpa perisai, nilai CPM meningkat secara signifikan menjadi 241.035 CPM. Nilai ini digunakan sebagai acuan intensitas radiasi maksimum pada jarak terdekat antara sumber dan detektor.

Pada saat sumber radiasi dijauhkan sejauh 20 cm dari detektor, nilai CPM yang terukur menurun menjadi 49.654 CPM. Secara kuantitatif, penurunan nilai cacahan ini dapat dihitung sebagai berikut:

$$\text{Penurunan CPM} = \frac{241.035 - 49.654}{241.035} \times 100\% \approx 79,4\%$$

Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan jarak sumber radiasi sebesar 20 cm menyebabkan penurunan intensitas radiasi yang terdeteksi oleh sistem sebesar sekitar 79,4%. Selain itu, perbandingan intensitas radiasi antara kondisi jarak dekat dan jarak 20 cm dapat dinyatakan sebagai rasio:

$$\frac{241.035}{49.654} \approx 4,86$$

Artinya, intensitas radiasi yang terdeteksi pada jarak dekat

hampir lima kali lebih besar dibandingkan pada jarak 20 cm. Fenomena ini sesuai dengan *Hukum Kuadrat Terbalik*, yang menyatakan bahwa intensitas radiasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak terhadap sumber, sehingga semakin besar jarak antara sumber dan detektor, maka intensitas radiasi yang diterima akan menurun secara signifikan. Meskipun jarak awal tidak dinyatakan secara eksplisit, tren penurunan nilai CPM yang tajam menunjukkan bahwa sistem pengukuran yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku fisik radiasi sesuai dengan teori kuadrat terbalik.

Dengan demikian, hasil pengukuran ini tidak hanya menunjukkan kepekaan sistem terhadap perubahan jarak sumber radiasi, tetapi juga mengonfirmasi bahwa data yang dihasilkan konsisten dengan prinsip dasar fisika radiasi, sehingga sistem layak digunakan untuk analisis lanjutan, termasuk pengujian efektivitas bahan perisai radiasi.

2. Pengujian Dengan Sistem Variasi Jarak

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jarak terhadap intensitas radiasi yang diterima oleh detektor. Sumber radiasi ditempatkan pada beberapa jarak tertentu dari detektor, misalnya 0 cm, 5 cm, 10 cm, 15 cm, dan 20 cm, kemudian nilai radiasi dicatat pada setiap jarak tersebut. Secara umum dapat dinyatakan bahwa:

- Pada jarak sangat dekat (0–5 cm), nilai radiasi yang terbaca relatif tinggi.
- Pada jarak menengah (10–15 cm), intensitas mulai menurun secara signifikan.
- Pada jarak lebih jauh (>20 cm), nilai yang terbaca mendekati nilai background.

Hasil bacaan pengaruh jarak terhadap intensitas radiasi pada alat yang penulis rancang .

Tabel 3. Pengujian Terhadap Variasi Jarak

No	Jarak (cm)	CPM	Keterangan
1	0	240500	Dekat
2	5	185200	Radiasi tinggi
3	10	128400	menurun
4	15	82300	menurun
5	20	48700	menurun

Hasil pengukuran yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai CPM menurun secara signifikan seiring dengan bertambahnya jarak antara sumber radiasi dan detektor. Pola penurunan ini dapat diamati lebih jelas melalui grafik hubungan jarak terhadap intensitas radiasi yang ditampilkan pada Gambar 11.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa intensitas radiasi yang diterima detektor mengikuti kecenderungan hukum kuadrat terbalik (*inverse square law*), di mana intensitas radiasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak terhadap sumber. Dengan bertambahnya jarak, radiasi menyebar ke

area yang lebih luas sehingga jumlah radiasi yang mencapai detektor menjadi lebih kecil. Analisis regresi terhadap data eksperimen menghasilkan nilai koefisien determinasi yang menunjukkan kesesuaian yang cukup baik antara hasil pengukuran dan teori fisika radiasi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem instrumentasi yang dikembangkan mampu merepresentasikan fenomena fisika radiasi secara konsisten.



Gambar 11. Grafik variasi jarak

3. Pengujian Variasi Jenis Perisai Radiasi

Pengujian variasi jenis perisai radiasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan berbagai material dalam mereduksi intensitas radiasi yang diterima oleh detektor. Pada pengujian ini, beberapa material digunakan sebagai perisai radiasi yang ditempatkan di antara sumber radiasi dan detektor Geiger–Müller. Material yang diuji meliputi timbal (Pb), triplek, dan beton dengan ketebalan yang berbeda. Pengukuran dilakukan dengan mencatat nilai cacahan radiasi dalam satuan counts per minute (CPM) baik pada kondisi tanpa perisai maupun dengan adanya material perisai.

Tabel 4. Pengaruh Variasi Jenis Perisai Radiasi

No	Material Perisai	Ketebalan (cm)	CPM Tanpa Perisai (Rata-Rata)	CPM Dengan Perisai (rata-rata)	Penurunan (%)	Keterangan
1	Tanpa perisai	-	1034	1034	0	Nilas awal
2	Timbal (Pb)	0,5	1034	30	84,70	Efektif tinggi
3	Triplek	2,0	1034	987	17,42	Efektif rendah
4	Beton	6,0	1034	30	53,27	Efektif tinggi

Hasil pengukuran pengaruh variasi material perisai terhadap intensitas radiasi ditunjukkan pada Tabel 4.4. Berdasarkan tabel tersebut, nilai CPM tanpa perisai sebesar 1034 CPM digunakan sebagai intensitas awal radiasi (I_0). Ketika material perisai ditempatkan di antara sumber radiasi dan detektor, nilai CPM mengalami penurunan dengan besaran yang berbeda-beda tergantung pada jenis dan ketebalan material yang digunakan.

Material timbal (Pb) dengan ketebalan 0,5 cm menghasilkan nilai CPM sebesar 30 CPM, yang menunjukkan penurunan intensitas radiasi yang sangat signifikan dibandingkan kondisi tanpa perisai. Sementara itu, penggunaan triplek dengan ketebalan 2,0 cm hanya menurunkan nilai CPM menjadi 987 CPM, yang menunjukkan kemampuan redaman yang relatif rendah. Pada material beton dengan ketebalan 6,0 cm, nilai CPM yang terukur juga sebesar 30 CPM, menunjukkan kemampuan redaman yang tinggi meskipun membutuhkan ketebalan material yang lebih besar.

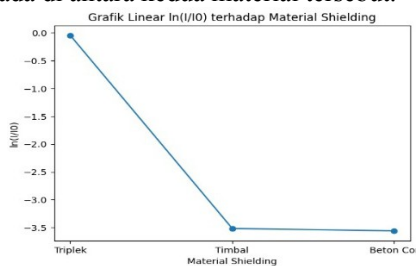
Untuk menganalisis kemampuan redaman material secara kuantitatif, dilakukan perhitungan koefisien

atenuasi linear menggunakan persamaan hukum atenuasi radiasi.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

I merupakan intensitas radiasi setelah melewati material perisai, I_0 adalah intensitas awal radiasi, μ adalah koefisien atenuasi material, dan x adalah ketebalan material perisai. Hasil perhitungan koefisien atenuasi serta efektivitas masing-masing material dirangkum pada Tabel 4

Berdasarkan Tabel 4, material timbal memiliki nilai koefisien atenuasi linear paling besar yaitu sekitar $7,03 \text{ cm}^{-1}$, yang menunjukkan bahwa timbal memiliki kemampuan peredaman radiasi paling tinggi. Hal ini disebabkan oleh densitas dan nomor atom timbal yang tinggi sehingga probabilitas interaksi antara radiasi gamma dan material menjadi lebih besar. Sebaliknya, triplek memiliki nilai koefisien atenuasi yang sangat kecil yaitu sekitar $0,0234 \text{ cm}^{-1}$, sehingga kemampuan redamannya terhadap radiasi sangat rendah. Beton menunjukkan nilai koefisien atenuasi sebesar $0,593 \text{ cm}^{-1}$, yang berada di antara kedua material tersebut.



Gambar 12. Grafik variasi jenis perisai radiasi

Hubungan antara nilai $\ln(I/I_0)$ dan ketebalan material ditampilkan pada Gambar 4. Grafik tersebut menunjukkan kecenderungan hubungan linier menurun yang merupakan karakteristik dari hukum atenuasi eksponensial radiasi. Nilai $\ln(I/I_0)$ yang paling negatif diperoleh pada material timbal, yang menandakan bahwa material ini mampu mereduksi intensitas radiasi secara signifikan meskipun dengan ketebalan yang relatif kecil.

Selain itu, dilakukan pula perhitungan Half Value Layer (HVL) untuk menentukan ketebalan material yang diperlukan untuk menurunkan intensitas radiasi hingga setengah dari nilai awal. Perhitungan HVL menggunakan persamaan:

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

Hasil perhitungan HVL ditunjukkan pada Tabel 4.6, di mana timbal memiliki nilai HVL sebesar $0,099 \text{ cm}$, beton sebesar $1,17 \text{ cm}$, dan triplek sebesar $29,62 \text{ cm}$. Nilai HVL yang sangat kecil pada timbal menunjukkan bahwa material ini sangat efektif sebagai perisai radiasi. Sebaliknya, triplek membutuhkan ketebalan yang jauh lebih besar untuk menghasilkan efek redaman yang sama sehingga kurang efektif digunakan sebagai bahan perisai radiasi. Dengan demikian, berdasarkan hasil eksperimen

dapat disimpulkan bahwa urutan kemampuan material dalam meredam radiasi adalah:

Timbal > Beton > Triplek.

4. Pengujian Alat dengan Pembanding Alat Standar

Untuk mengevaluasi tingkat akurasi sistem instrumentasi yang dikembangkan, dilakukan pengujian perbandingan dengan alat ukur radiasi standar yang telah terkalibrasi. Pengujian dilakukan dengan menempatkan kedua alat pada posisi yang sama terhadap sumber radiasi sehingga keduanya menerima intensitas radiasi yang identik. Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Bacaan perbandingan dengan alat standart

No	Alat Rancang Bangun (CPM)	Alat Standar (CPM)	Selisih	Error (%)
1	2404772	2970000	565228	19,03
2	2439317	2840000	400683	14,11
3	2408517	2120000	288517	13,61
4	2401111	2642000	240889	9,11
5	2404857	2748000	343143	12,49

Berdasarkan data pada tabel tersebut, terlihat bahwa nilai cacahan radiasi yang dihasilkan oleh alat rancang berada pada rentang sekitar $2,40 \times 10^6$ CPM untuk setiap pengukuran. Hal ini menunjukkan bahwa alat rancang memiliki kestabilan pembacaan yang cukup baik pada kondisi pengujian yang sama. Sebaliknya, nilai bacaan alat standar memiliki variasi yang lebih besar dengan rentang nilai antara $2,12 \times 10^6$ hingga $2,97 \times 10^6$ CPM, yang mengindikasikan bahwa alat standar memiliki sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan kondisi radiasi.

Jika dibandingkan secara langsung, seluruh nilai bacaan alat rancang berada sedikit di bawah nilai bacaan alat standar. Hal ini menunjukkan adanya kecenderungan galat sistematis berupa underestimation, di mana alat rancang menghasilkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai referensi dari alat standar.

Untuk mengetahui tingkat penyimpangan tersebut, dilakukan perhitungan galat relatif menggunakan persamaan:

$$Galat(\%) = \frac{CPM_{standar} - CPM_{rancang}}{CPM_{standar}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan galat ditampilkan pada Tabel 5 yang menunjukkan bahwa nilai galat pengukuran berada pada rentang 9,11% hingga 19,03%, dengan nilai rata-rata sebesar 13,67%. Nilai galat terbesar terjadi pada pengukuran pertama, sedangkan galat terkecil terjadi pada pengukuran keempat.

Untuk mengevaluasi konsistensi pengukuran, dilakukan pula perhitungan simpangan baku galat menggunakan persamaan statistik standar. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa simpangan baku galat sebesar sekitar 3,57%, yang menunjukkan bahwa sebaran galat relatif kecil sehingga presisi alat dapat dikatakan cukup baik.

Selain itu, tingkat akurasi alat dapat dihitung menggunakan pendekatan:

$$Akurasi = 100\% - Galat_{rata-rata}$$

Sehingga diperoleh nilai akurasi sebesar:

$$Akurasi = 100\% - 13,67\% = 86,33\%$$

Nilai akurasi ini menunjukkan bahwa sistem instrumentasi yang dikembangkan memiliki tingkat kesesuaian yang cukup baik terhadap alat standar. Menurut Fraden (2016) dalam *Handbook of Modern Sensors*, sistem pengukuran pada tahap prototipe umumnya memiliki tingkat akurasi antara **80–90%**, sehingga nilai akurasi yang diperoleh pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk penelitian eksperimental.

5. Pengujian Efektivitas Shielding dengan Pembeding Alat Standar

Pengujian selanjutnya dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas material perisai radiasi dengan membandingkan hasil pengukuran alat rancang dengan alat standar pada berbagai kondisi material perisai. Data hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Bacaan pebandingan dengan alat standart

Material	CPM Alat	CPM Standar
Tanpa perisai	1034	1192
Timbal (Pb)	30	35
Triplek	987	1137
Beton	30	34
Rata-rata		

yang memuat nilai CPM yang diukur oleh kedua alat pada kondisi tanpa perisai serta dengan material perisai timbal, triplek, dan beton.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sistem deteksi radiasi berbasis mikrokontroler ESP32 mampu merespons perubahan intensitas radiasi secara konsisten pada berbagai kondisi pengujian. Meskipun terdapat perbedaan nilai absolut antara alat rancang dan alat standar, pola perubahan nilai CPM yang dihasilkan oleh kedua alat menunjukkan tren yang serupa. Hal ini menunjukkan bahwa sistem instrumentasi yang dikembangkan mampu merepresentasikan perubahan intensitas radiasi dengan cukup baik.

Untuk mengevaluasi tingkat penyimpangan hasil pengukuran, dilakukan analisis galat relatif pada setiap kondisi material perisai sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Galat bacaan

Material	Galat (%)
Tanpa perisai	13,25
Timbal	14,29
Triplek	13,19
Beton	14,29
Rata-rata	13,67

Nilai galat berada pada rentang sekitar 13% hingga 15% dengan nilai rata-rata sebesar 13,67%. Rentang galat yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat konsistensi yang baik dalam berbagai kondisi pengujian.

Selanjutnya, nilai galat tersebut dikonversi menjadi parameter efektivitas alat yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Efektivitas alat

Material	Efektivitas (%)
Tanpa perisai	86,75
Timbal	85,71
Triplek	86,81
Beton	85,71
Rata-rata	≈86,3

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa efektivitas rata-rata sistem berada pada kisaran 86%, yang menunjukkan bahwa alat yang dikembangkan mampu menghasilkan pembacaan yang mendekati nilai referensi dari alat standar. Perbedaan nilai efektivitas antar material tidak terlalu besar, yang mengindikasikan bahwa sistem memiliki performa yang stabil dalam berbagai kondisi pengujian.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem deteksi radiasi berbasis mikrokontroler ESP32 yang dikembangkan mampu melakukan pengukuran intensitas radiasi dengan tingkat akurasi dan konsistensi yang cukup baik, sehingga layak digunakan sebagai prototipe sistem instrumentasi untuk evaluasi efektivitas material perisai radiasi.

5.Kesimpulan

Sistem deteksi radiasi berbasis mikrokontroler ESP32 dan detektor Geiger–Müller berhasil dikembangkan dan mampu mendeteksi radiasi secara real-time dengan respon yang stabil terhadap perubahan intensitas radiasi. Detektor bekerja optimal pada tegangan 500–700 V (daerah plateau) sehingga menghasilkan pulsa yang stabil. Sistem juga mampu merepresentasikan hukum kuadrat terbalik terhadap jarak serta hukum atenuasi eksponensial pada material perisai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa material berdensitas tinggi seperti timbal dan beton memiliki kemampuan atenuasi radiasi lebih baik dibandingkan triplek, sehingga sistem dapat digunakan untuk mengevaluasi efektivitas material shielding secara eksperimental.

Selain itu, sistem mampu melakukan akuisisi, penyimpanan, dan pengolahan data radiasi secara otomatis dengan satuan CPM, menampilkan hasil secara real-time, serta memungkinkan pemantauan jarak jauh. Hasil perbandingan dengan alat standar menunjukkan galat rata-rata 13,67%, yang masih dalam batas toleransi untuk prototipe alat ukur radiasi berbasis mikrokontroler.

Dengan demikian, sistem ini menyediakan metode pengukuran radiasi yang lebih sistematis, konsisten, dan mudah dianalisis dibandingkan metode manual.

DAFTAR PUSTAKA

- Rakhman, A., & Putra, D. (2023). *Pengembangan Sistem Pengukuran Dosis Radiasi Berbasis Sensor Geiger-Müller untuk Aplikasi Pendidikan Fisika Nuklir*. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Instrumentasi Elektronika*, 9(2), 45–52. [Open Access]
- Siregar, H., et al. (2022). *Rancang Bangun Alat Ukur Intensitas Radiasi Gamma Berbasis Arduino Uno dengan Sensor Geiger-Müller SBM-20*. *Jurnal Instrumentasi dan Kontrol Indonesia (JIKI)*, 8(1), 11–18. <https://jiki.ft.ums.ac.id>
- Ain, N., & Hassan, M. (2021). *Design of Radiation Monitoring System Using IoT and Arduino for Safety Applications*. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering (IJAREEIE)*, 10(4), 231–239. DOI: 10.15662/IJAREEIE.2021.100403
- Rahardjo, E., & Nurhadi, M. (2020). *Analisis Efektivitas Bahan Pelindung Radiasi (Shielding) terhadap Paparan Gamma dari Cs-137*. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 21(3), 112–120. [BATAN Repository – Open Access]
- Kumar, P., & Sharma, N. (2021). *Development of Portable Radiation Detection and Shielding Efficiency Measurement System*. *Radiation Physics and Chemistry*, 185, 109–114. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2021.109514
- Suhartono, Y. (2022). *Instrumentasi Elektronika untuk Pengukuran Radiasi dan Kalibrasi Dosis*. *Jurnal Elektronika dan Instrumentasi Indonesia*, 7(2), 67–74.
- Alam, M. A., et al. (2020). *Microcontroller-based Radiation Detection and Data Acquisition System for Laboratory Applications*. *Journal of Physics: Conference Series*, 1497, 012005. DOI: 10.1088/1742-6596/1497/1/012005
- Abrianto, H.H., Kumala Sari, Irmayani (2021). *Sistem Monitoring dan Pengendalian Data Suhu Ruang Navigasi Jarak Jauh Menggunakan WEMOS D1 Mini*. *Jurnal Nasional Komputasi dan Teknologi Informasi (JNKTI) Vol 4, No 1*. DOI: [10.32672/jnkti.v4i1.2687](https://doi.org/10.32672/jnkti.v4i1.2687)
- Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). (2021). *Panduan Keselamatan Radiasi untuk Laboratorium Pendidikan dan Industri*. Jakarta: Pusat Standardisasi dan Keselamatan Nuklir (PSKN).
- Permatasari, N. & Widodo, T. (2024). *Simulasi Efektivitas Shielding Radiasi dengan Pendekatan Monte Carlo Berbasis Python*. *Jurnal Teknologi Nuklir Terapan*, 12(1), 25–34.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022). *Radiation Protection and Shielding in Laboratory Environments*. Vienna: IAEA Technical Report Series No. 482. [Open Access at <https://www.iaea.org/publications/>]
- Capan, I. (2024). *Wide bandgap semiconductors for radiation detection: A review*. *Radiation Physics and Chemistry*, 214, 111251. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111251>
- International Atomic Energy Agency. (2021). *Radiation detection and measurement systems*. Vienna: IAEA.
- I. Irmayani, F. Marwita, I. Newton, and L. Hakim. (2025). *Prototipe Sistem Komunikasi Data Text Wireless Topologi Mesh Untuk meningkatkan area Cakupan Berbasis ESP 32*. *Sinusoida J. Penelit. dan Pengkaj. Elektro*, vol. 27, no. 1, pp. 1–12, doi: 10.37277/s.v27i1.2417.
- I. Irmayani, E. Nadine, and M. F. Abdillah. (2025). *Perancangan dan Implementasi Sistem Monitoring Peminjaman Arsip Berbasis ESP32 Menggunakan Komunikasi LoRa*. *Sinusoida J. Penelit. dan Pengkaj. Elektro*, vol. 27, no. 2, pp. 1–11, doi: 10.37277/s.v27i2.2606.
- Michail, C., Liapinos, P., Kalyvas, N., Kandarakis, I., Fountos, G., & Valais, I. (2024). *Radiation detectors and sensors in medical imaging*. *Sensors*, 24(19), 6251. <https://doi.org/10.3390/s24196251>
- Patel, A., & Mazumdar, H. (2023). *A review on radiation detectors for various radiation detection applications*. *Journal of Radiation and Nuclear Applications*, 8(2), 93–111. <https://doi.org/10.18576/jrna/080204>
- Tsoufanidis, N., & Landsberger, S. (2022). *Recent advances in radiation measurement and detection techniques*. *Measurement*, 195, 111083. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111083>
- Zadeh, L. A. (1965). *Fuzzy sets*. *Information and Control*, 8(3), 338–353.
- Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). *An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller*. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 5(1), 7–13.
- Ross, T. J. (2010). *Fuzzy logic with engineering applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley & Sons.