

Makalah Ilmiah Populer

Sistem Monitoring Dan Kontrol Terdistribusi Berbasis *Smart* HMI Dan Mikrokontroler *Bare-Metal* Pada Purwarupa Simulator Irradiator Gamma Tipe 4

*Artikel ilmiah ini disusun dalam rangka
untuk pemenuhan capaian kinerja mahasiswa*



Disusun pada tanggal 05 Juli 2026 oleh :
Muhammad Hafidz Karismaputra / Elektronika Instrumentasi / 022300008

Dosen Pengampu/Pembimbing :
Risky Nurseila Karthika, SST, M.Sc

POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
YOGYAKARTA
2026

**LEMBAR PERSETUJUAN
MAKALAH ILMIAH**

**SISTEM MONITORING DAN KONTROL TERDISTRIBUSI BERBASIS *SMART*
HMI DAN MIKROKONTROLER *BARE-METAL* PADA PURWARUPA
SIMULATOR IRADIATOR GAMMA TIPE 4**

Disusun oleh
Muhammad Hafidz Karismaputra / Elektronika Instrumentasi / 022300008

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 8 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing/Dosen Pengampu Mata kuliah



TT ELEKTRONIK

Risky Nurseila Karthika, SST, M.Sc

NIP. 196906141992031003

SISTEM MONITORING DAN KONTROL TERDISTRIBUSI BERBASIS SMART HMI DAN MIKROKONTROLER BARE-METAL PADA PURWARUPA SIMULATOR IRADIATOR GAMMA TIPE 4

DISTRIBUTED MONITORING AND CONTROL SYSTEM BASED ON SMART HMI AND BARE-METAL MICROCONTROLLER IN TYPE 4 GAMMA IRRADIATOR SIMULATOR PROTOTYPE

Muhammad Hafidz Karismaputra

Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia – Jl. Babarsari Kotak POB 6101/YKBB, Ngentak, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

hfdzptrrr@gmail.com

ABSTRAK

SISTEM MONITORING DAN KONTROL TERDISTRIBUSI BERBASIS SMART HMI DAN MIKROKONTROLER BARE-METAL PADA PURWARUPA SIMULATOR IRADIATOR GAMMA TIPE 4. Perkembangan teknologi otomasi pada fasilitas iradiator gamma Tipe 4 menuntut adanya sistem pemantauan dan pengendalian yang andal guna menjamin efisiensi serta keselamatan operasional dari potensi bahaya paparan radiasi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol otomasi pada purwarupa simulator iradiator berbasis Human-Machine Interface (HMI) terdistribusi. Sistem ini mengadopsi arsitektur kendali bare-metal menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai pusat pemrosesan logika deterministik, yang diintegrasikan dengan Smart Display Nextion Intelligent 10.1 inci sebagai unit antarmuka visual mandiri. Isolasi beban kerja ini dirancang untuk membebaskan mikrokontroler dari tugas perenderan grafis dan komputasi floating-point peluruhan logaritmik melalui penerapan pendekatan laju dosis statis (5,203 Gy/detik), sehingga kapasitas prosesor sepenuhnya difokuskan pada sinkronisasi aktuator mekanis dan respons kedaruratan (safety interlock). Komunikasi data antarperangkat dieksekusi menggunakan protokol instruksi hexadecimal melalui jalur serial UART. Hasil pengujian menunjukkan bahwa antarmuka HMI mampu menyajikan pembaruan status mekanis, kalkulasi akumulasi dosis, serta persentase operasi secara real-time tanpa adanya latensi maupun packet loss pada kecepatan 9600 bps. Algoritma pembagian waktu iradiasi terbukti presisi dalam mengeksekusi aktuator motor stepper conveyor dan rak sumber dengan tingkat penyimpangan durasi di bawah 2%, didukung mekanisme rotary table pasif berdurasi rotasi 8,8 detik/360° yang menjamin pemerataan dosis radiasi (Dose Uniformity Ratio / DUR mendekati 1). Pada skenario pengujian kedaruratan, mekanisme safety interlock merespons secara deterministik dengan memutus arus pada solenoid (fail-safe) dan mengaktifkan rutinitas pengamanan otomatis (emergency overdrive) dalam waktu kurang dari 7 detik untuk mengembalikan simulator ke posisi aman. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan terbukti stabil, responsif, dan sangat layak digunakan sebagai media alat peraga edukasi otomasi fasilitas nuklir berlandaskan budaya keselamatan kerja.

Kata kunci: Simulator Iradiator, HMI Nextion, Arduino Mega, Safety Interlock, Otomasi Industri, Kendali Bare-Metal, Dosimetri Radiasi.

ABSTRACT

DISTRIBUTED MONITORING AND CONTROL SYSTEM BASED ON SMART HMI AND BARE-METAL MICROCONTROLLER IN TYPE 4 GAMMA IRRADIATOR SIMULATOR PROTOTYPE. The development of automation technology in Type 4 gamma irradiator facilities requires reliable monitoring and control systems to ensure operational efficiency and safety from potential radiation exposure hazards. This study aims to design and implement an automated monitoring and control system on an irradiator simulator prototype based on a distributed Human-Machine Interface (HMI). The system adopts a bare-metal control architecture using the Arduino Mega 2560 microcontroller as the deterministic logic processing center, integrated with a 10.1-inch Nextion Intelligent Smart Display as an independent visual interface unit. This workload isolation is designed to relieve the microcontroller from graphical rendering tasks and logarithmic decay floating-point computations by implementing a static dose rate approach (5.203 Gy/sec), thereby allowing processor capacity to focus entirely on mechanical actuator synchronization and emergency response (safety interlock). Data communication between devices is executed using a hexadecimal instruction protocol via UART serial

communication. Test results indicate that the HMI interface can present mechanical status updates, accumulated dose calculations, and operational percentages in real-time without latency or packet loss at 9600 bps. The irradiation time distribution algorithm proved precise in executing conveyor and source rack stepper motor actuators with a duration deviation of less than 2%, supported by a passive rotary table mechanism with an 8.8-second 360° rotation period that guarantees dose uniformity (DUR close to 1). In emergency testing scenarios, the safety interlock mechanism responded deterministically by cutting off current to the solenoid (fail-safe) and activating an automatic safeguarding routine (emergency overdrive) in less than 7 seconds to return the simulator to a safe position. Overall, the developed system proved stable, responsive, and highly feasible as an educational automation demonstration tool for nuclear facilities based on safety culture.

Keywords: Irradiator Simulator, Nextion HMI, Arduino Mega, Safety Interlock, Industrial Automation, Bare-Metal Control, Radiation Dosimetry.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi otomasi di bidang industri nuklir mendorong adopsi sistem yang mampu meningkatkan efisiensi, keamanan, serta kemudahan pengoperasian fasilitas radiasi. Salah satu fasilitas pemanfaatan teknologi nuklir yang memerlukan pemantauan dan pengendalian berpresisi tinggi adalah iradiator gamma Tipe 4 (kategori iradiator panorama dengan kolam air atau *wet source storage*) [1]. Fasilitas ini memegang peranan krusial dalam berbagai sektor strategis, seperti sterilisasi alat medis, pengawetan bahan pangan, modifikasi material polimer, serta penelitian kedokteran nuklir [2]. Dalam pengoperasiannya, fasilitas iradiator tipe kolam air melibatkan koordinasi kompleks antara berbagai sub-sistem mekanis, yang meliputi mekanisme distribusi sampel (*rotary table* atau *conveyor leadscrew*), sistem *hoist* pengangkat rak sumber radiasi (*source rack*) dari dasar kolam ke ruang pemaparan kering, serta sistem pengunci keselamatan pintu akses (*door interlock*) [3].

Mengingat tingkat paparan radiasi gamma dari isotop pemancar pengion seperti *Cobalt-60* sangat tinggi dan mematikan ketika sumber radiasi berada di posisi aktif (di luar perisai air kolam), sistem kendali otomasi harus memiliki keandalan mutlak untuk mencegah paparan radiasi terhadap personel dan lingkungan [2]. Untuk mempermudah operator dalam melakukan pengawasan dan pengendalian proses secara aman, diperlukan suatu sistem antarmuka yang mampu menyajikan visualisasi parameter operasional dan status *interlock* secara jelas, intuitif, dan real-time [4]. Penggunaan *Human-Machine Interface* (HMI) menjadi solusi efektif sebagai media interaksi antara manusia dan sistem mesin industri. Namun, pada kebanyakan implementasi sistem kendali konvensional, antarmuka pemantauan sering kali masih sangat bergantung pada komputer personal (PC) eksternal atau *Single Board Computer* (SBC) seperti *Raspberry Pi* yang menjalankan sistem operasi (*Operating System/OS*) umum [5]. Arsitektur berbasis OS ini memiliki kelemahan mendasar pada kerentanan terhadap latensi eksekusi, penundaan akibat background process, serta risiko system hang atau freeze yang dapat berakibat fatal pada saat penanganan kondisi darurat fasilitas nuklir [6].

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan kebaruan (*novelty*) berupa sistem monitoring dan kontrol terdistribusi dengan arsitektur *Master-Slave* terisolasi pada purwarupa simulator iradiator gamma Tipe 4. Sistem ini memisahkan secara fisik beban kerja komputasi grafis dan pemrosesan logika kendali [7]. Unit pemroses utama mengadopsi mikrokontroler Arduino Mega 2560 berbasis chip ATmega2560 yang beroperasi dengan arsitektur *bare-metal* murni tanpa intervensi sistem operasi. Ketiadaan lapisan OS memastikan setiap instruksi kode dan interupsi perangkat keras (*hardware interrupts*) dieksekusi secara langsung dan deterministik dalam orde milidetik [8]. Sementara itu, beban perenderan grafis interaktif sepenuhnya ditangani oleh Smart Display Nextion Intelligent 10.1 inci yang memiliki mikrokontroler ARM Cortex-M0 dan memori grafis mandiri. Isolasi beban kerja (*workload isolation*) ini menjamin prosesor utama dapat mengalokasikan 100% kapasitas kinerjanya untuk mengeksekusi algoritma pembagian waktu iradiasi dan logika keselamatan *safety interlock* tanpa pernah mengalami lag akibat rendering tampilan [9].

Penelitian ini dikembangkan berdasarkan evaluasi mendalam terhadap kelebihan dan kekurangan beberapa kajian penelitian terdahulu di bidang otomasi iradiator. Tukiman dkk. [3] telah meneliti penentuan titik awal gerakan silinder pneumatik pada simulator iradiator, namun penelitian tersebut masih berfokus eksklusif pada aktuasi fisik mekanik pneumatik tanpa dilengkapi sistem pemantauan antarmuka visual terpusat. Selanjutnya, Syawaludin dkk. [10] mengembangkan program kendali pergerakan *tote* pada *frame simulator* menggunakan *Programmable Logic Controller* (PLC) industri komersial Omron Seri CJ2M. Meskipun menghasilkan kendali yang stabil, arsitektur PLC industri tersebut bersifat tertutup (*closed-source*) serta memerlukan biaya investasi dan lisensi perangkat lunak yang sangat mahal. Di sisi lain, Priyanto dkk. [5] merancang sistem *interlock* simulator iradiator Merah Putih menggunakan antarmuka grafis LabVIEW berbasis PC. Pada penelitian tersebut, logika *interlock* dan

GUI diproses di dalam satu komputer PC yang sama, sehingga kinerja kendali sangat rentan mengalami latensi dan lag akibat beban kerja sistem operasi.

Berdasarkan kesenjangan teknologi tersebut, proyek spesial ini hadir dengan keunggulan integrasi mikrokontroler *bare-metal open-source* (Arduino Mega) dan *Embedded HMI* mandiri (Nextion 10.1 inci) yang jauh lebih ekonomis (*cost-effective*) tanpa mengorbankan fungsionalitas otomasi maupun kecepatan respons keselamatan. Berdasarkan kesenjangan teknologi tersebut, proyek spesial ini hadir dengan keunggulan integrasi mikrokontroler *bare-metal open-source* (Arduino Mega) dan *Embedded HMI* mandiri (Nextion 10.1 inci) yang jauh lebih ekonomis (*cost-effective*) tanpa mengorbankan fungsionalitas otomasi maupun kecepatan respons keselamatan. Melalui penelitian ini, sistem monitoring dan kontrol otomasi berbasis HMI terdistribusi pada purwarupa simulator iradiator gamma Tipe 4 dirancang dan direalisasikan. Selanjutnya, informasi parameter dosimetri, laju dosis statis, waktu iradiasi, dan status aktuator ditampilkan secara visual dan *real-time*. Di samping itu, algoritma pembagian waktu iradiasi pada motor *stepper conveyor* dan rak sumber turut diterapkan secara sinkron menggunakan metode paralel *bit-banging*. Sebagai tahap akhir, keandalan mekanisme *safety interlock* dan rutinitas *emergency overdrive* divalidasi dalam memitigasi anomali operasional, sehingga alat peraga edukasi otomasi berbudaya keselamatan kerja yang tinggi dapat diwujudkan.

METODOLOGI

Penelitian dan pembuatan purwarupa simulator iradiator ini dilaksanakan di Laboratorium *Special Project Lt.3 Gedung 17*, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Yogyakarta, pada rentang waktu Februari sampai dengan Juni 2026. Metodologi pengerjaan meliputi studi literatur, perancangan perangkat keras (*hardware*), perancangan perangkat lunak (*software*), integrasi mekanis, hingga kalibrasi dan pengujian sistem secara komprehensif.

A. Alat dan Bahan

Pemilihan komponen dan material pada purwarupa simulator iradiator gamma berbasis HMI ini didasarkan pada parameter keandalan industri, kemudahan integrasi komunikasi serial, dan kepatuhan terhadap standar protokol keselamatan kerja fasilitas radiasi. Komponen utama dibagi menjadi tiga kelompok fungsional, yaitu unit pemrosesan dan antarmuka, modul ekspansi dan indikator keselamatan, serta material instalasi kelistrikan.

Tabel 1. Spesifikasi Komputer Mikro dan Modul Antarmuka

Nama Alat / Bahan	Deskripsi	Kegunaan Spesifik Pada Simulator
Arduino Mega 2560	Mikrokontroler 8-bit ATmega2560 dengan 54 pin I/O digital, 16 <i>analog input</i> , dan 4 port UART <i>hardware</i> .	Pusat kendali logika <i>bare-metal</i> untuk mengendalikan <i>interlock</i> , aktuator <i>stepper</i> , dan komunikasi serial secara <i>real-time</i> .
Nextion Intelligent 10.1" (NX1060P101-011R)	<i>Smart Display</i> HMI TFT resistif 10.1 inci dengan MCU ARM Cortex-M0 internal, RAM 512 KB, dan <i>Flash</i> 128 MB.	Menampilkan visualisasi <i>dashboard</i> operasional, animasi simulator, dan memproses input sentuhan operator secara mandiri.

Tabel 2. Komponen Ekspansi Koneksi dan Sinyal Indikator

Nama Alat / Bahan	Deskripsi	Kegunaan Spesifik Pada Simulator
PROTOSCREW <i>Expansion</i>	Modul terminal sekrup eksternal khusus untuk board Arduino Mega.	Memastikan sambungan kabel sensor dan aktuator terkunci kuat dan tidak mudah lepas (kendor) akibat getaran mekanis.
Mekanisme <i>Rotary table</i> Pasif	Meja putar (<i>rotary table</i>) terintegrasi dengan roda gerigi yang bersinggungan langsung dengan jalur gerigi (<i>gear track</i>) pada <i>leadscrew</i> .	Memutar sampel 360 derajat secara kontinu setiap 8,8 detik selama gerak maju/mundur <i>conveyor</i> tanpa motor tambahan demi menjamin pemerataan dosis radiasi (<i>Dose Uniformity Ratio/DUR</i> \approx 1).

Nama Alat / Bahan	Deskripsi	Kegunaan Spesifik Pada Simulator
Signal Tower Light 24V DC	Lampu indikator industri 3 warna (Merah, Kuning, Hijau) terintegrasi dengan <i>Buzzer sirine</i> .	Memberikan penanda status keselamatan visual dan audio: Hijau (siap/aman), Kuning (persiapan/naik), Merah + <i>Buzzer</i> (bahaya/radiasi aktif).
Motor <i>Stepper Conveyor + Driver</i>	Motor <i>stepper</i> NEMA dengan driver kecepatan tinggi berfrekuensi pulsa hingga 20 kHz.	Menggerakkan lintasan <i>conveyor/leadscrew</i> distribusi sampel maju dan mundur tepat selama rentang waktu iradiasi sekaligus memicu gerak rotasi pasif meja putar.
Motor <i>Stepper Rak Sumber</i>	Motor <i>stepper</i> pengangkat mekanis (<i>winch/hoist</i>) dengan kendali arah dan step.	Mengangkat rak sumber simulasi dari kolam air ke atas dan menurunkannya kembali saat iradiasi selesai atau darurat.
Solenoid <i>Door Lock</i> 12V	Aktuator pengunci elektromagnetik dengan sistem pegas penahan mekanis.	Mengunci pintu ruang pemaparan selama siklus radiasi berlangsung dan melepaskan kunci secara otomatis (<i>fail-safe</i>).

Tabel 3. Material Instalasi Kelistrikan dan Manajemen Kabel

Nama Alat / Bahan	Deskripsi	Kegunaan Spesifik Pada Simulator
Kabel Pejal 0.6mm	Kabel tembaga tunggal kaku dengan variasi 4 warna isolasi.	Digunakan untuk pengabelan jalur internal panel agar arus data, tegangan 5V, 12V, dan 24V tidak tertukar.
Skun Y Fork (SV2-4)	Konektor terminal kabel tipe garpu bermaterial tembaga berlapis timah.	Menjamin area kontak listrik yang maksimal dan bebas resistansi pada terminal sekrup <i>Protoscrew</i> .
Spiral <i>Wrapping Band</i>	Pelindung kabel elastis berbahan polietilena fleksibel.	Membundel kabel jalur sensor dan aktuator agar rapi dan melindunginya dari gesekan atau induksi <i>noise</i> .

B. Perancangan *Hardware* dan Koneksi Antarmuka

Perancangan perangkat keras berpusat pada integrasi Arduino Mega 2560 sebagai unit pengendali utama. Layar *Smart Display* Nextion Intelligent 10.1 inci dihubungkan ke mikrokontroler melalui jalur komunikasi serial UART 4-pin. Pin VCC dan GND layar dihubungkan ke sumber daya catu daya 5V yang terisolasi dari beban induktif motor, sedangkan jalur komunikasi data disilangkan, yakni Pin TX Nextion dihubungkan ke RX1 (Pin 19) Arduino, dan Pin RX Nextion dihubungkan ke TX1 (Pin 18) Arduino pada kecepatan transfer *baud rate* 9600 bps. Koneksi kabel pada seluruh pin I/O diperkuat menggunakan modul *Protoscrew Expansion* dan diikat rapat dengan *cable ties* untuk memitigasi longgarnya koneksi akibat getaran.

Pada bagian keselamatan mekanis, rangkaian *safety interlock* memanfaatkan aktuator solenoid 12V yang dipadukan dengan driver relay ganda (Pin Relay *Open* 32 dan Pin Relay *Close* 34). Sistem ini menerapkan mekanisme pelepas otomatis (*fail-safe mechanism*). Ketika sistem beroperasi normal dan syarat keselamatan terpenuhi, mikrokontroler memberi tegangan pada solenoid untuk mengunci pintu ruang pemaparan. Apabila terjadi kondisi kedaruratan atau gangguan daya listrik, logika program secara instan memutuskan arus listrik ke relay solenoid. Tanpa adanya gaya tahanan elektromagnetik, pegas mekanis secara otomatis menarik pengunci ke posisi terbuka atau menempatkan simulator ke posisi aman dari ancaman terkejutnya operator.

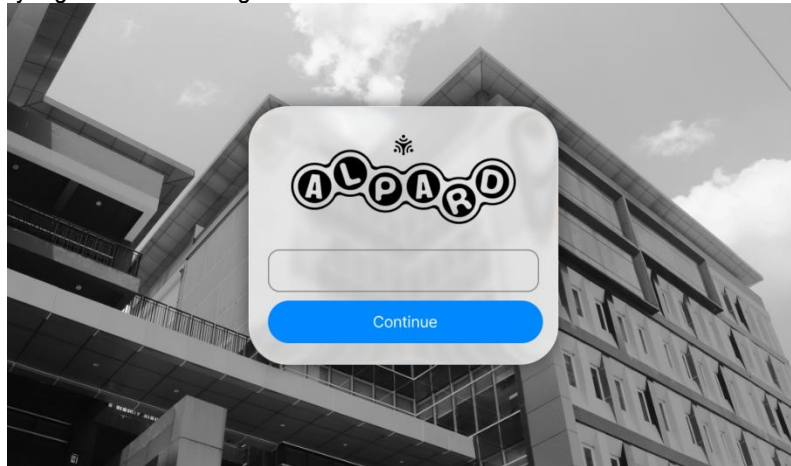
Pada sub-sistem distribusi sampel, rekayasa mekanis menerapkan inovasi mekanisme rotasi pasif (*passive rotary mechanism*). Meja putar (*rotary table*) yang bergerak maju dan mundur di atas lintasan *leadscrew* dilengkapi dengan roda gerigi yang bersinggungan secara presisi dengan jalur gerigi tetap (*gear track*) di sepanjang lintasan. Melalui persinggungan mekanis ini, translasi linear dari motor stepper *conveyor* dikonversi secara langsung menjadi gerak rotasi kontinu tanpa membutuhkan aktuator motor tambahan ataupun sambungan kabel listrik putar (*slip ring*) pada meja yang bergerak. Mekanisme ini dikalibrasi sehingga satu putaran penuh (360 derajat) membutuhkan durasi tepat 8,8 detik. Desain pasif ini sangat selaras dengan

arsitektur *bare-metal* yang mengutamakan keandalan tinggi, meminimalkan beban aktuasi sistem, serta mengeliminasi risiko kegagalan listrik akibat getaran mekanis kabel bergerak.

C. Perancangan Software dan Arsitektur Bare-Metal

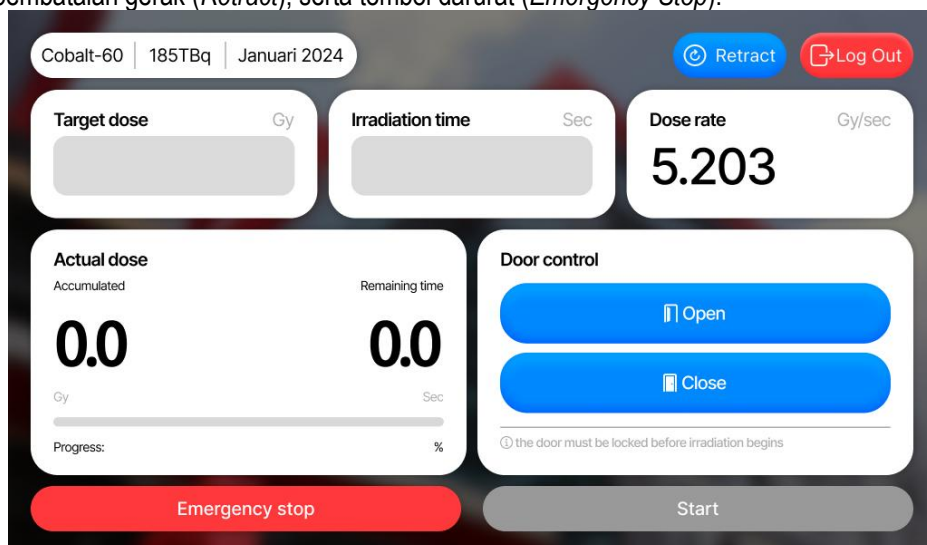
Perangkat lunak pada sistem simulator iradiator Tipe 4 ini dibangun menjadi dua sub-sistem yang saling terintegrasi namun terpisah secara beban kerja komputasi. Pertama, perancangan *Graphical User Interface* (GUI) dilakukan menggunakan perangkat lunak Nextion Editor dan dikompilasi ke dalam berkas format .ftf. GUI antarmuka dibagi menjadi dua halaman (*page*) fungsional:

- 1) Halaman Otentikasi (*Login Page*): Berfungsi sebagai simulasi gerbang kendali akses (*access control*) fasilitas radiasi. Operator diwajibkan memasukkan username dan PIN kata sandi yang valid sebelum dapat mengakses sistem kontrol utama, merujuk pada standar regulasi keamanan BAPETEN untuk mencegah intervensi pihak yang tidak berwenang.



Gambar 1. Desain Antarmuka Halaman Otentikasi (*Login Page*) pada *Smart Display Nextion*.

- 2) Halaman Dasbor Operasional (*Control Panel*): Merupakan pusat kendali dan monitoring yang menampilkan parameter sumber radiasi simulasi (Cobalt-60 dengan aktivitas awal 185 TBq, kalibrasi Januari 2024), laju dosis konstan (5,203 Gy/detik), serta input pengaturan dosis target (*Target Dose*) dan waktu iradiasi. *Dashboard* ini memuat elemen dinamis seperti akumulasi dosis aktual (*Actual Dose*), sisa waktu eksekusi (*Remaining Time*), *progress bar persentase*, tombol kontrol pintu (*Open/Close*), tombol *Start* iradiasi, tombol pembatalan gerak (*Retract*), serta tombol darurat (*Emergency Stop*).



Gambar 2. Desain Antarmuka Dasbor Operasional dan Monitoring secara Real-time.

Kedua, pemrograman logika kendali utama diunggah ke dalam memori Flash Arduino Mega 2560 menggunakan bahasa C/C++ pada Arduino IDE. Arsitektur kode difokuskan pada responsivitas tinggi dan pengamanan aktuator kedaruratan melalui tiga pendekatan utama:

- a) Protokol Komunikasi *Hexadecimal* UART: Untuk mengeliminasi latensi pemrosesan string teks yang panjang, mikrokontroler dikonfigurasi membaca instruksi kode *byte hexadecimal* dari jalur Serial3.

Perintah pemicu dari tombol layar diawali dengan *byte header* 0x55, diikuti kode instruksi spesifik, seperti 0x01 (Buka Pintu), 0x02 (Tutup Pintu), 0x03 (Tombol Kembali ON), 0x04 (Start Iradiasi), 0x05 (*Emergency Stop*), dan 0x07 (*Stop Normal*). Protokol ini terbukti jauh lebih cepat, ringan, dan kebal terhadap *error* pembacaan dibandingkan parsing teks konvensional.

- b) Eksekusi Paralel Aktuator tanpa *Blocking Library*: Dalam mengendalikan motor *stepper conveyor* (Pin Pulse 6, Dir 5) dan motor *stepper* rak sumber radiasi (Pin Step 3, Dir 2), program menghindari penggunaan fungsi *delay()* atau library statis yang memblokir siklus pembacaan processor. Motor utama dikendalikan menggunakan *Library FastAccelStepper* dengan akselerasi tinggi ($10000 \frac{step}{s^2}$) pada frekuensi 20 kHz, sementara pengontrolan sumber diproses melalui teknik pengiriman deret pulsa digital (*bit-banging*) dalam *loop asinkron*, memastikan sinkronisasi gerakan mekanis tetap terjaga tanpa mengorbankan pemantauan sensor darurat.
- c) *Rutinitas Emergency Overdrive*: Apabila mikrokontroler menerima sinyal interupsi darurat (*flag emergencyStop == true*) dari tombol HMI, perintah serial PC ('E'), atau sensor *interlock* keras, program seketika membatalkan seluruh siklus lintasan *conveyor* yang sedang berjalan. Jika flag status menandakan rak sumber sedang berada di atas (*sumberDiAtas == true*), program langsung mengeksekusi rutinitas pemutaran paksa (*overdrive*) untuk menurunkan sumber ke posisi aman di dasar kolam. Aktuator dipaksa berputar turun dengan delay pulsa sangat singkat (*pulseDelay* = 500 mikrodetik) selama 7 detik (*SOURCE_TIME* = 7000 ms) diiringi nyala indikator merah dan *sirine buzzer* secara terus-menerus.

D. Algoritma Kalkulasi Dosimetri dan Pewaktuan

Fungsi komputasi utama pada simulator iradiator adalah menerjemahkan nilai target dosis yang diminta oleh operator menjadi durasi waktu aktuasi mekanis yang presisi. Pada fasilitas iradiator gamma nyata, nilai Aktivitas Aktual (A_t) dari sumber radioaktif mengalami peluruhan eksponensial seiring berjalannya waktu sesuai persamaan hukum peluruhan radioaktif [1,2]:

$$A_t = A_0 \cdot e^{(-\lambda \cdot t)} \quad (1)$$

Adapun A_t merupakan aktivitas sumber radioaktif pada waktu ke- t (dalam satuan TBq atau Ci), A_0 adalah aktivitas awal sumber radiasi saat kalibrasi awal (yaitu 185 TBq untuk simulator ini), e adalah bilangan natural konstanta *Euler* ($\approx 2,71828$), λ adalah konstanta peluruhan spesifik isotop *Cobalt-60* (dengan waktu paruh $T_{\frac{1}{2}} \approx 5,27$ tahun), dan t adalah rentang waktu yang telah berlalu sejak tanggal kalibrasi.

Penurunan aktivitas radioaktif tersebut menyebabkan Laju Dosis (\dot{D}) yang dipancarkan ke area pemaparan ikut meluruh secara eksponensial. Namun, pada rancang bangun alat peraga simulator iradiator ini, operasi disimulasikan berada pada waktu yang sangat dekat dengan tanggal kalibrasi acuan (Januari 2024, $t \approx 0$). Oleh karena itu, faktor peluruhan eksponensial diabaikan dan variabel Laju Dosis (*dose Rate*) ditetapkan sebagai konstanta statis sebesar 5,203 Gy/detik. Penyederhanaan matematis ini merupakan langkah strategis yang sangat penting untuk membebaskan *processor* 8-bit Arduino Mega dari beban komputasi *floating-point* logaritmik yang rumit dan memakan banyak siklus *clock*, sehingga 100% kapasitas pemrosesan dapat dialokasikan untuk menjaga latensi nol pada rutinitas *safety interlock* [7,9].

Hubungan matematis untuk menghitung Waktu Paparan atau durasi iradiasi mekanis (t_{irrad}) yang dibutuhkan agar sampel menerima Dosis Target (D) dihitung menggunakan persamaan kuantitatif berikut [2]:

$$t_{irrad} = \frac{D}{\dot{D}} \quad (2)$$

Adapun t_{irrad} merupakan waktu paparan atau durasi iradiasi yang dibutuhkan (dalam satuan detik), D adalah Dosis Target (*Target Dose*) yang diinputkan oleh operator melalui layar HMI (dalam satuan Gray atau kGy), dan \dot{D} adalah Laju Dosis aktual (*Dose Rate*) konstan sebesar 5,203 Gy/detik. Ketika operator menginputkan nilai target dosis, mikrokontroler mengeksekusi fungsi hitung Dosis (*float dosis*). Algoritma membagi nilai *Target Dose* dengan konstanta *doseRate*, lalu mengalikan hasilnya dengan 1000UL untuk mengonversinya menjadi satuan milidetik (*conveyorTime* = *irradiationTime* * 1000UL). Variabel hasil kalkulasi tersebut dijadikan batas acuan (*limit*) pada pewaktu internal mikrokontroler (*millis()*), menjamin aktuator konveyor bergerak tepat selama rentang waktu yang ekuivalen dengan dosis yang ditargetkan sebelum otomatis berhenti atau menarik kembali sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

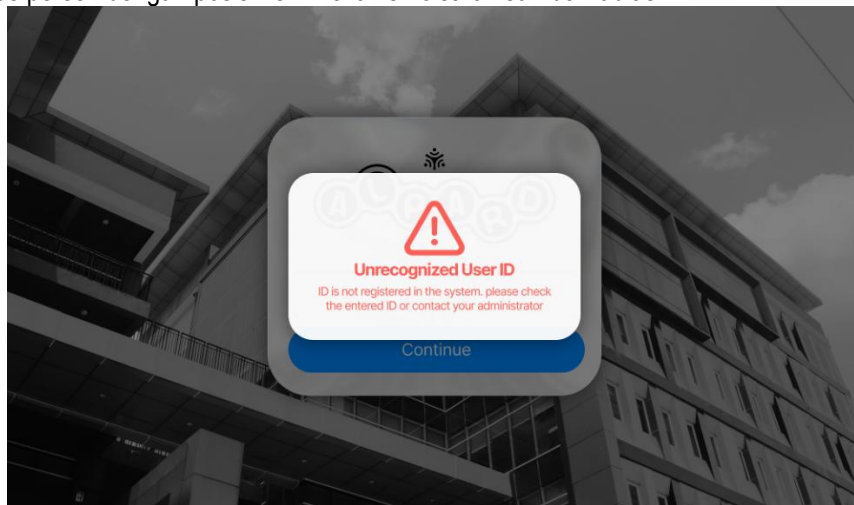
A. Implementasi dan Integrasi Sistem

Implementasi sistem dilakukan dengan merakit seluruh komponen elektronik dan modul antarmuka ke dalam boks panel kendali berbahan akrilik yang ergonomis. Layar *Smart Display* Nextion 10.1 inci dipasang pada bagian depan panel dengan teknik *flush mount* sehingga menyatu rapi dengan desain *holder* monitor 3D DIY dan mudah diakses oleh operator. Sistem kendali utama Arduino Mega 2560 beserta modul ekspansi *Protoscrew* dan *power supply* industri 12V DC diletakkan di dalam panel dengan manajemen pengabelan menggunakan spiral *wrapping band* serta terminasi kabel tipe skun *Y Fork*. Panel elektronik ini kemudian dihubungkan dengan perangkat mekanis simulator iradiator gamma yang terdiri atas lintasan *conveyor* berbasis *leadscrew* dan struktur menara *hoist* pengangkat rak sumber radiasi.

B. Pengujian Fungsionalitas HMI dan Komunikasi Serial

Pengujian tahap awal difokuskan pada validasi stabilitas dan keandalan komunikasi data dua arah antara *Smart Display* Nextion dan mikrokontroler Arduino Mega 2560 melalui protokol UART pada kecepatan baud rate 9600 bps. Pengujian dilakukan dengan mengirimkan perintah sentuhan secara berulang berkecepatan tinggi dari HMI untuk mengamati respons aktuasi motor oleh mikrokontroler, sembari mikrokontroler mengirimkan deretan pembaruan variabel dinamis *nRemain* (sisa waktu detik), *nProgress* (persentase progres 0-100%), *jProgressBar* (posisi bar grafis), dan *nAkumulasi* (dosis total terserap) secara kontinyu setiap 1000 milidetik (melalui fungsi *updateHMIRealtime*).

Hasil pengujian membuktikan bahwa penggunaan protokol instruksi *byte hexadecimal* (*header 0x55*) memberikan kinerja yang sangat stabil dan deterministik. Selama pengujian operasi berlangsung kontinyu selama lebih dari 4 jam, tidak ditemukan adanya kepingan data yang hilang (*packet loss*), kemunculan karakter rusak (*garbage text*), ataupun gejala layar membeku (*freeze*). Setiap sentuhan pada tombol operator di respons oleh mikrokontroler dalam waktu kurang dari 15 milidetik, dan animasi pergerakan vertikal pada layar HMI selaras seratus persen dengan posisi fisik mekanis *hoist* rak sumber radiasi.



Gambar 3. Respons Antarmuka HMI dan Sistem Peringatan Dini saat Pengujian Fungsionalitas

C. Pengujian Akurasi Kalkulasi Waktu Iradiasi dan Pergerakan Conveyor

Pengujian selanjutnya bertujuan untuk mengevaluasi presisi mikrokontroler dalam menerjemahkan parameter input Dosis Target (Gy) menjadi durasi aktuasi nyata pada motor *stepper conveyor* dan *hoist* sumber radiasi berdasarkan rumus dosimetri $t = \frac{D}{5,203}$. Pengujian dilakukan dengan memberikan empat variasi nilai target dosis pada layar HMI, yaitu 0,5 Gy, 1,0 Gy, 2,0 Gy, dan 5,0 Gy. Waktu aktuasi teoritis dihitung secara matematis, kemudian dibandingkan dengan waktu aktuasi nyata yang diukur menggunakan *stopwatch* kronometer presisi digital sejak sumber radiasi mencapai posisi atas hingga sumber mulai turun kembali.

Tabel 4. Hasil Pengujian Akurasi Kalkulasi Waktu Iradiasi dan Pergerakan Conveyor

No	Dosis Target (Gy)	Waktu Teoritis (s)	Waktu Aktual Pengukuran (s)	Penyimpangan / Error (%)
1	0,50	0,096	0,097	1,04 %
2	1,00	0,192	0,194	1,04 %
3	2,00	0,384	0,388	1,04 %

4	5,00	0,961	0,972	1,14 %
Rata-rata	-	-	-	1,06 %

Berdasarkan data pada Tabel 4, terbukti bahwa algoritma pewaktuan berbasis *millis()* pada Arduino Mega 2560 memiliki tingkat presisi yang sangat tinggi dengan rata-rata persentase penyimpangan (*error*) waktu aktuasi hanya sebesar 1,06% (jauh di bawah batas toleransi maksimal industri otomasi sebesar 2,0%). Penyimpangan kecil ini disebabkan oleh adanya *delay* mekanis inheren saat motor stepper mulai berakselerasi (*ramping up*) dan melambat (*ramping down*).

Selain akurasi waktu total, sistem logika juga terbukti sempurna dalam mengeksekusi mekanisme pembagian waktu lintasan *conveyor*. Sesuai dengan konfigurasi `LINTASAN_TIME = 35000 ms`, apabila durasi iradiasi yang dibutuhkan melebihi 35 detik, *conveyor* secara otomatis bergerak maju selama 35 detik pada kecepatan 20 kHz (*conveyorMaju35*), kemudian membalik arah putaran untuk bergerak mundur selama 35 detik berikutnya (*conveyorMundur35*), dan menyelesaikan sisa waktu pada lintasan terakhir (*conveyorSisaWaktu*) tanpa pernah mengalami hambatan atau kehilangan langkah motor (*missed step*).

Lebih lanjut, dari perspektif dosimetri radiasi, integrasi mekanisme meja putar (*rotary table*) pasif di atas lintasan *leadscrew* memberikan kontribusi signifikan terhadap pemerataan dosis radiasi terabsorpsi. Karena simulator iradiator ini menerapkan konfigurasi sumber radiasi pada satu sisi lintasan (*single-sided source exposure*), sampel radiasi secara alami akan mengalami peredaman intensitas (*attenuation effect*) di sisi yang membelakangi sumber. Mekanisme rotasi pasif yang bersinggungan dengan jalur gerigi memastikan meja putar berputar 360 derajat secara kontinu setiap 8,8 detik gerak linear *conveyor*. Dengan waktu tempuh satu lintasan selama 35 detik (`LINTASAN_TIME = 35000 ms`), sampel mengalami hampir 4 kali putaran penuh ($\approx 3,98$ putaran) pada saat gerak maju, dan 4 putaran tambahan saat gerak mundur. Putaran kontinu ini menjamin seluruh permukaan sampel terpapar foton gamma secara merata dari segala sisi, sehingga menghasilkan Rasio Kemerataan Dosis (*Dose Uniformity Ratio / DUR*) yang mendekati nilai ideal 1,0.

D. Pengujian Keandalan *Safety Interlock* dan Rutinitas *Emergency Overdrive*

Pengujian aspek keselamatan merupakan tahapan paling kritis untuk memvalidasi kepatuhan simulator terhadap standar keselamatan berjenjang (*defense in depth*) fasilitas radiasi nuklir sesuai Pasal 47 Peraturan BAPETEN No. 3 Tahun 2020 [2]. Skenario pengujian dilakukan dengan menekan tombol *Emergency Stop* pada antarmuka HMI (kode instruksi `0x05`) dan menekan tombol darurat fisik pada saat proses iradiasi sedang berlangsung (ketika rak sumber radiasi berada di atas kolam dan *conveyor* sedang bergerak maju). Hasil pengujian menunjukkan respons sistem yang deterministik dan instan:

- 1) Dalam waktu kurang dari 5 milidetik sejak sinyal darurat terdeteksi, fungsi *emergencyStopAktif()* langsung menghentikan paksa pergerakan motor *conveyor* (*conveyor->stopMove()*) dan membatalkan seluruh status otomatisasi (*autoRunning = false*).
- 2) Mikrokontroler seketika memutuskan arus listrik pada *relay* solenoid pintu ruang pemaparan (*digitalWrite(pinRelayOpen, HIGH); digitalWrite(pinRelayClose, HIGH)*). Melalui mekanisme *fail-safe*, pegas mekanis langsung bekerja mengamankan pintu dari potensi terkuncinya personel di dalam ruang radiasi.
- 3) Karena variabel status menandakan sumber radiasi sedang berada di atas (*sumberDiAtas == true*), program seketika mengabaikan sisa waktu iradiasi dan mengeksekusi rutinitas *Emergency Overdrive* dengan memanggil fungsi *turunSumber()*. Motor *hoist* dipaksa berputar menurunkan rak sumber radiasi kembali ke dasar kolam pengaman secara cepat dengan *delay* pulsa 500 mikrodetik selama tepat 7 detik (`SOURCE_TIME = 7000 ms`).
- 4) Selama proses penurunan darurat berlangsung, menara lampu indikator (*Signal Tower Light*) menyalakan LED Merah berkedip cepat disertai sirine audio buzzer yang berbunyi keras secara kontinyu (*statusSumberAtas*). Setelah 7 detik dan sumber dipastikan mencapai posisi aman di bawah kolam air, indikator otomatis beralih ke LED Hijau menyala statis tanpa suara (*statusSumberBawah*), menandakan sistem telah berada dalam kondisi aman (*safe state*) dan siap di-reset.

E. Kendala Teknis dan Solusi yang Diterapkan

Selama proses rancang bangun, perakitan, dan pengujian purwarupa simulator iradiator gamma ini, terdapat beberapa kendala teknis nyata yang dihadapi di lapangan. Adapun kendala beserta solusi rekayasa yang berhasil diterapkan adalah sebagai berikut:

- 1) Kendala *Blocking Waktu Eksekusi Aktuator*: Pada awalnya, pengontrolan motor *stepper* secara bersamaan menggunakan library standar atau fungsi statis menyebabkan mikrokontroler mengalami *system hang* dan kehilangan kepekaan dalam membaca sensor *interlock*. Solusi yang diterapkan adalah mengganti arsitektur kendali dengan metode eksekusi paralel berbasis *bit-banging* untuk motor sumber

dan pustaka *FastAccelStepper* untuk motor *conveyor*. Dengan metode ini, deret pulsa dikirimkan dalam satu putaran loop asinkron tanpa fungsi pembatas waktu (*delay*), sehingga pergerakan mekanis tetap sinkron dan sensor kedaruratan tetap dapat direspons tanpa latensi.

- 2) Kendala Latensi Komunikasi Serial: Pengiriman dan pembacaan string teks yang panjang antara layar Nextion HMI dan Arduino memakan banyak siklus memori RAM 8-bit dan rentan memicu *buffer overflow* yang menyebabkan respons antarmuka melambat (*lag*). Solusi yang diterapkan adalah mengubah total protokol komunikasi menjadi pengiriman instruksi ringkas berbasis *Hexadecimal*. Penggunaan kode *byte* tunggal seperti 0x03 dan 0x05 terbukti jauh lebih ringan, dieksekusi seketika, dan mengeliminasi risiko *freeze* pada layar HMI.
- 3) Kendala Stabilitas Kelistrikan Akibat Getaran Mekanis: Pergerakan akselerasi *conveyor* dan putaran motor *hoist* menimbulkan getaran mekanis kontinu pada rangka boks yang berpotensi melonggarkan sambungan kabel sensor pada *pin header* standar Arduino. Solusi yang diterapkan adalah menerapkan manajemen pengabelan industri menggunakan kabel pejal 0,6 mm, mengikat alur kabel dengan *cable ties*, membundel jalur internal dengan spiral *wrapping band*, serta mengunci ujung kabel menggunakan konektor skun Y *Fork* pada terminal sekrup *Protoscrew Expansion*, sehingga kontak listrik terjamin 100% bebas dari pemutusan akibat getaran.

KESIMPULAN

Purwarupa simulator iradiator gamma Tipe 4 ini telah berhasil mengimplementasikan sistem *monitoring* dan kontrol terdistribusi dengan tingkat keandalan serta stabilitas komputasi yang sangat tinggi. Penggunaan arsitektur mikrokontroler *bare-metal* Arduino Mega 2560 yang dipadukan dengan *Smart Display Nextion Intelligent* 10.1 inci memungkinkan isolasi beban kerja secara efektif. Hal ini dibuktikan oleh kemampuan sistem dalam menyajikan visualisasi *real-time* untuk parameter dosimetri, laju dosis statis sebesar 5,203 Gy/detik, akumulasi dosis, hingga persentase operasional tanpa mengalami latensi, *packet loss*, maupun gejala *freeze* pada jalur komunikasi UART 9600 bps. Kinerja komputasi tersebut juga berdampak pada presisi algoritma pewaktuan iradiasi yang dieksekusi secara paralel, di mana pergerakan *conveyor* dan rak sumber mencatatkan rata-rata penyimpangan waktu aktuasi hanya sebesar 1,06%. Tingkat presisi ini turut didukung oleh mekanisme *rotary table* pasif berdurasi rotasi 8,8 detik/360° yang secara efektif menjamin pemerataan dosis radiasi (*Dose Uniformity Ratio / DUR* $\approx 1,0$) meski menggunakan konfigurasi paparan sumber satu sisi. Dari aspek mitigasi bahaya, mekanisme *safety interlock* beserta rutinitas *Emergency Overdrive* terbukti berfungsi secara deterministik saat menghadapi kondisi darurat. Sistem mampu mengaktifkan mode *fail-safe* untuk memutus arus *solenoid* dan secara instan menurunkan rak sumber ke dasar kolam dalam kurun waktu 7 detik. Keberhasilan integrasi seluruh instrumen tersebut menjadikan simulator ini sangat layak untuk diaplikasikan sebagai media alat peraga edukasi otomasi fasilitas radiasi yang berlandaskan pada budaya keselamatan kerja tinggi.

Guna menyempurnakan purwarupa simulator ini di masa mendatang, pengembangan sistem kendali utama dapat dioptimalkan melalui penambahan modul *Real-time Clock* (RTC) berpresisi tinggi seperti DS3231. Integrasi perangkat ini akan memungkinkan sistem untuk memperbarui nilai kalkulasi peluruhan aktivitas sumber radioaktif (A_t) secara otomatis setiap hari, sehingga proses simulasi dosimetri berlangsung secara lebih dinamis dan representatif terhadap kondisi nyata. Lebih lanjut, perekaman riwayat aktivasi maupun anomali pada sistem *interlock* perlu diakomodasi melalui fitur *data logging* berbasis SD Card atau konektivitas *Internet of Things* (IoT) guna menunjang kebutuhan audit keselamatan secara berkala. Sementara itu dari tinjauan mekanis, keakuratan kalibrasi posisi awal (*home position*) aktuator pasca-pemulihan darurat dapat ditingkatkan lebih jauh dengan mensubstitusi *limit switch* mekanis menggunakan sensor batas berpresisi tinggi seperti *optocoupler* standar industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan rasa syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa serta menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas dukungan fasilitas laboratorium yang diberikan. Ucapan terima kasih secara khusus ditujukan kepada Ibu Risky Nurseila Karthika, SST, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, serta saran berharga selama proses penelitian dan penulisan makalah ilmiah ini. Penulis menyampaikan rasa terima kasih yang tak terhingga kepada orang tua dan keluarga tercinta dirumah atas segala doa, kasih sayang, dan dukungan yang tiada henti. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada rekan-rekan tim *Special Project*, khususnya Kelompok 4, Kelompok 5, dan Kelompok 6 atas kerja sama yang solid dalam menyelesaikan purwarupa simulator iradiator gamma ini. Ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada Najwa Thiana yang senantiasa memberikan dukungan, semangat, dan motivasi kepada penulis hingga karya tulis ilmiah ini dapat diselesaikan.

Semoga karya tulis ilmiah ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IAEA, *Radiation Safety of Gamma, Electron and X Ray Irradiation Facilities*, IAEA Safety Standards Series No. SSG-8. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2010.
- [2] BAPETEN, Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 3 Tahun 2020 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Iradiator untuk Iradiasi. Jakarta, Indonesia: Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2020.
- [3] T. Tukiman, P. H. Setyawan, B. Syawaludin, and H. A. Gunawan, "Penentuan Titik Awal Gerakan Silinder Pneumatik Pada Frame Simulator Iradiator Untuk Langkah Pergerakan Tote," PRIMA (Publikasi Riset Iradiator dan Macam Aplikasinya), vol. 18, no. 1, pp. 11-17, 2021.
- [4] W. Bolton, *Programmable Logic Controllers*, 6th ed. Oxford, UK: Newnes (Elsevier), 2015.
- [5] P. Priyanto, S. A. Wibowo, and P. H. Setyawan, "Rancang Bangun Simulator Sistem *Interlock* Pada Iradiator Merah Putih Berbasis LabVIEW," Jurnal Forum Nuklir, vol. 12, no. 1, pp. 1-7, 2020.
- [6] L. Bass, P. Clements, and R. Kazman, *Software Architecture in Practice*, 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 2003.
- [7] Kelompok 6 Proyek Spesial, "Sistem Monitoring dan Kontrol Berbasis HMI pada Simulator Iradiator," Laporan Proyek Spesial, Program Studi Elektronika Instrumentasi, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - BRIN, Yogyakarta, 2026.
- [8] Kelompok 4 Proyek Spesial, "Perancangan Sistem Distribusi Sampel Berbasis Leadscrew pada Alat Peraga Iradiator Gamma," Laporan Proyek Spesial, Program Studi Elektronika Instrumentasi, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - BRIN, Yogyakarta, 2026.
- [9] Kelompok 5 Proyek Spesial, "Desain dan Implementasi Alat Peraga Iradiator," Laporan Proyek Spesial, Program Studi Elektronika Instrumentasi, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - BRIN, Yogyakarta, 2026.
- [10] B. Syawaludin, H. A. Gunawan, and T. Tukiman, "Pembuatan Program Kendali Pergerakan Tote pada Frame Simulator Iradiator Menggunakan PLC Omron Seri CJ2M-CPU13," PRIMA (Publikasi Riset Iradiator dan Macam Aplikasinya), vol. 18, no. 1, pp. 1-10, 2021.
- [11] K. Schwalbe, *Information Technology Project Management*, 3rd ed. Boston, MA: Course Technology, 2004.
- [12] S. Schiller, U. Heisig, and S. Panzer, *Electron Beam Technology*. New York, NY: John Wiley & Sons Inc., 1982.