

Perancangan Sistem Pengendalian Tegangan Tinggi X - Ray Medis Menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM) Dengan Implementasi Berbasis Java

Andi Muhammad Iqbal¹, Riswal Nafi Siregar^{1*}

¹Fakultas Ilmu Komputer, Teknik Informatika, Universitas Pamulang, Jl. Raya Puspipetek No. 46, Kel. Buaran, Kec. Serpong, Kota Tangerang Selatan. Banten 15310, Indonesia

Email: ¹andimiqbal29@gmail.com, ^{2*}riswalsfs@gmail.com

(* : coresponding author)

Abstrak— Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian tegangan tinggi X-Ray skala prototipe menggunakan metode *Pulse Width Modulation* (PWM) yang dikendalikan melalui mikrokontroler Arduino dan antarmuka pengguna berbasis Java. Sistem dirancang agar nilai duty cycle PWM dapat diatur secara dinamis, dengan hasil tegangan output yang proporsional terhadap perubahan nilai PWM. Pengujian menunjukkan hubungan hampir linier antara nilai PWM dan tegangan output, yang menunjukkan kestabilan dan efektivitas metode PWM dalam kendali tegangan. Selain itu, antarmuka Java yang dikembangkan memungkinkan pengguna mengatur nilai PWM, durasi eksposur, serta memantau status sistem secara real-time tanpa harus berinteraksi langsung dengan perangkat keras, meningkatkan aspek kenyamanan dan keselamatan operasional. Sistem juga dilengkapi fitur proteksi otomatis berdasarkan feedback tegangan dari ADC, di mana mikrokontroler akan menghentikan proses eksposur secara otomatis saat terdeteksi tegangan melebihi ambang batas yang ditentukan. Implementasi fitur ini terbukti mampu melindungi sistem dari kerusakan akibat *overvoltage*. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kriteria sebagai kendali tegangan tinggi yang aman, terukur, dan dapat diintegrasikan dengan perangkat lunak eksternal. Sistem ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi kendali X-Ray yang lebih efisien, fleksibel, dan dapat disesuaikan untuk aplikasi medis atau riset laboratorium.

Kata Kunci: PWM, Tegangan Tinggi, Arduino, Antarmuka Java, Sistem Proteksi

Abstract— This study aims to design and implement a high-voltage control system for a prototype-scale medical X-Ray device using the *Pulse Width Modulation* (PWM) method, controlled via an Arduino microcontroller and a Java-based user interface. The system is developed to allow dynamic adjustment of PWM duty cycle, with output voltage responding proportionally to changes in PWM values. Experimental results show a nearly linear relationship between PWM and voltage, indicating that PWM is a stable and effective method for voltage regulation. Additionally, the developed Java interface enables users to set PWM values, exposure duration, and monitor system status in real-time without direct hardware interaction, enhancing operational safety and usability. The system is equipped with an automatic protection mechanism based on voltage feedback from the ADC; the microcontroller will automatically stop the exposure process if the voltage exceeds a predefined threshold. This feature has proven effective in preventing damage due to *overvoltage*. Overall, the system meets the primary research objective—creating a measurable, safe, and externally integrated high-voltage control mechanism. This research contributes to the advancement of more efficient and adaptable X-Ray control technologies suitable for medical and laboratory applications.

Keywords: PWM, High Voltage, Arduino, Java Interface, Protection System

1. PENDAHULUAN

Peralatan medis seperti mesin X-Ray memegang peranan krusial dalam dunia kedokteran modern karena kemampuannya untuk melakukan pencitraan internal tubuh secara non-invasif. Mesin ini bekerja dengan menggunakan tegangan tinggi untuk menghasilkan sinar-X yang mampu menembus jaringan tubuh dan menampilkan struktur internal seperti tulang, organ, dan jaringan lainnya. Namun demikian, sistem X-Ray sangat bergantung pada kestabilan sumber tegangan tinggi, karena fluktuasi atau gangguan listrik dapat memengaruhi kualitas citra yang dihasilkan. Gangguan tersebut bisa berupa lonjakan tegangan, ketidaksesuaian waktu pengaktifan sistem, hingga noise yang memengaruhi komponen internal. Dalam kondisi tertentu, ketidakstabilan ini bahkan bisa menyebabkan kerusakan perangkat keras dan membahayakan keselamatan pengguna. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengendali tegangan yang akurat, responsif, dan dapat diandalkan untuk menjaga performa optimal mesin X-Ray (Wartoyo et al., 2024).

Salah satu pendekatan teknis yang banyak digunakan dalam sistem pengendalian daya adalah *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM bekerja dengan cara memodulasi lebar pulsa sinyal digital untuk mengatur besaran daya rata-rata yang diterima oleh beban. Teknik ini memiliki efisiensi tinggi karena menggunakan switching elektronik yang cepat dan akurat, sehingga cocok untuk mengatur tegangan maupun kecepatan motor, intensitas pencahayaan, dan aplikasi kelistrikan lainnya. Dalam penelitian oleh Kinanti et al. (2016), PWM digunakan untuk mengatur sistem penyaring asap secara efisien dengan bantuan logika fuzzy, menunjukkan fleksibilitas metode ini di berbagai konteks kontrol. Aplikasinya yang luas serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler membuat PWM menjadi pilihan utama dalam pengembangan sistem kendali tegangan.

Selain pengaturan tegangan, keberhasilan sistem kontrol juga sangat dipengaruhi oleh waktu aktivasi switching yang presisi. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi switching adalah zero-crossing detection. Teknik ini bekerja dengan mendeteksi saat tegangan AC melintasi titik nol, sehingga switching dilakukan ketika arus minimum dan risiko lonjakan paling kecil. Hal ini sangat penting dalam sistem AC untuk menghindari percikan listrik dan memperpanjang umur komponen. Kajian oleh Kajian & Elektro (2022) menunjukkan bahwa zero-crossing dapat diterapkan pada kontrol kelistrikan rumah tangga untuk meningkatkan keamanan dan efisiensi. Dengan demikian, kombinasi antara PWM dan zero-crossing memberikan sistem kontrol yang lebih halus, stabil, dan ramah terhadap komponen elektronik. Penerapan metode ini sangat relevan dalam sistem X-Ray yang memerlukan presisi tinggi.

Untuk mengimplementasikan kedua metode tersebut secara efisien, perangkat keras seperti mikrokontroler Arduino menjadi pilihan yang populer. Arduino dikenal sebagai platform open-source yang mudah diprogram, murah, dan fleksibel untuk berbagai aplikasi kendali. Penelitian oleh Setiawan et al. (2020) membuktikan bahwa Arduino dapat digunakan untuk mengendalikan motor DC menggunakan PWM yang dikontrol lewat aplikasi Android, menampilkan potensi integrasi antarperangkat. Di sisi lain, Kevin Chandra & Pratomo (2020) mengembangkan pengontrol boost converter menggunakan mikrokontroler STM32, yang menunjukkan kapabilitas mikrokontroler dalam pengaturan daya tinggi. Arduino juga mendukung integrasi sensor tegangan, arus, hingga modul komunikasi serial, sehingga dapat membentuk sistem kendali yang lengkap dan adaptif. Hal ini mempertegas bahwa Arduino sangat layak digunakan dalam sistem kendali tegangan tinggi pada perangkat medis.

Selain aspek perangkat keras, sistem pengendalian modern juga memerlukan antarmuka perangkat lunak yang mampu menampilkan data dan memungkinkan interaksi langsung dengan pengguna. Bahasa pemrograman Java banyak digunakan untuk membuat Graphical User Interface (GUI) dan komunikasi serial dengan mikrokontroler. Dalam penelitian Hermawan et al. (2021), Java digunakan untuk mengendalikan peralatan elektronik via Bluetooth, menunjukkan fleksibilitas dan stabilitasnya dalam komunikasi serial. Java juga memungkinkan pembuatan aplikasi desktop yang mendukung monitoring dan kendali real-time secara efisien. Muchtar et al. (2020) menerapkan Java untuk monitoring daya motor listrik 3 fasa, yang menunjukkan kemampuannya dalam pengolahan dan visualisasi data kelistrikan secara dinamis. Oleh karena itu, penggunaan Java sebagai antarmuka kontrol sistem pengendalian X-Ray merupakan langkah strategis untuk meningkatkan usability dan keamanan sistem secara keseluruhan.

Integrasi antara PWM, zero-crossing detection, Arduino, dan Java membentuk sistem kendali tegangan yang kuat dan fleksibel. Sistem ini tidak hanya mampu mengatur tegangan dengan presisi tinggi, tetapi juga memberikan kemudahan monitoring dan pengoperasian bagi teknisi medis. Didi et al. (2022) dalam penelitiannya juga menggabungkan GUI dengan sistem robotik untuk kendali yang lebih intuitif dan terarah. Keunggulan pendekatan ini terletak pada kemampuannya dalam mengakomodasi kebutuhan teknis sekaligus aspek ergonomis bagi pengguna. Hal ini menjadi sangat penting dalam dunia medis yang menuntut efisiensi, keandalan, dan keselamatan dalam pengoperasian alat. Dengan pendekatan teknologi ini, sistem X-Ray tidak hanya menjadi lebih stabil, tetapi juga lebih adaptif terhadap dinamika operasional di lapangan.

Berdasarkan uraian tersebut, jelas bahwa kebutuhan akan sistem pengendalian tegangan tinggi yang presisi dan terintegrasi semakin mendesak, khususnya untuk aplikasi alat kesehatan seperti X-Ray. Sistem yang dikembangkan dengan metode PWM, zero-cross detection, mikrokontroler Arduino, dan antarmuka Java mampu menjawab tantangan tersebut secara teknis maupun operasional. Pemanfaatan teknologi ini juga sejalan dengan tren otomasi dan digitalisasi

peralatan medis di era industri 4.0. Oleh karena itu, penulis mengangkat judul "Perancangan Sistem Pengendalian Tegangan Tinggi X-Ray Medis Menggunakan PWM Berbasis Java" sebagai bentuk kontribusi terhadap inovasi teknologi kendali medis di Indonesia. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan landasan bagi pengembangan sistem kontrol alat medis lainnya yang berbasis mikrokontroler dan teknologi terbuka (open source). Selain itu, sistem ini juga dapat menjadi referensi dalam penerapan teknologi kendali yang efisien, aman, dan dapat dipantau secara real-time oleh operator medis di berbagai fasilitas kesehatan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Metodologi Penelitian

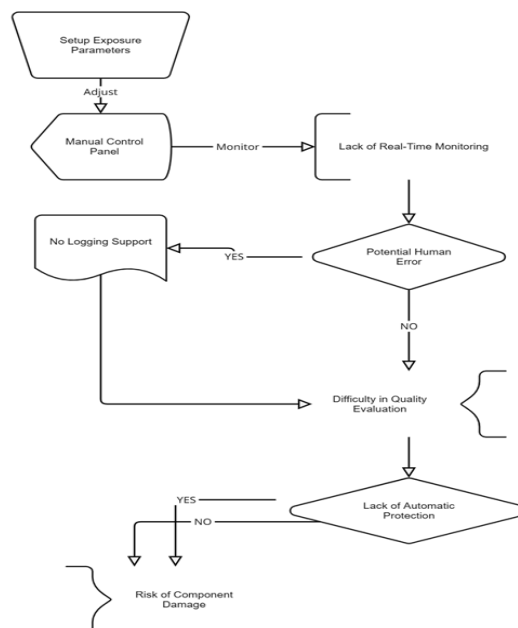
Metodologi yang digunakan meliputi:

- Studi literatur terkait PWM, X-Ray, dan sistem kontrol tegangan.
- Perancangan rangkaian elektronik berbasis Arduino untuk output PWM, pembacaan tegangan feedback, dan proteksi.
- Pembuatan GUI Java untuk mengontrol PWM dan eksposur.
- Pengujian hubungan antara nilai duty cycle dengan tegangan output pada beban simulasi.
- Evaluasi dan analisis data hasil pengujian

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Sistem

3.1.1 Analisis Sistem Berjalan



Gambar 1. Flowchart Analisis Sistem Berjalan

Sistem pengendalian tegangan pada perangkat X-Ray saat ini umumnya masih menggunakan metode manual atau melalui panel digital terpisah yang terpasang langsung pada mesin. Dalam sistem ini, operator atau teknisi harus mengatur parameter eksposur seperti tegangan dan durasi secara langsung pada panel fisik tanpa bantuan perangkat lunak tambahan. Hal ini menyebabkan keterbatasan dalam fleksibilitas pengaturan dan monitoring sistem.

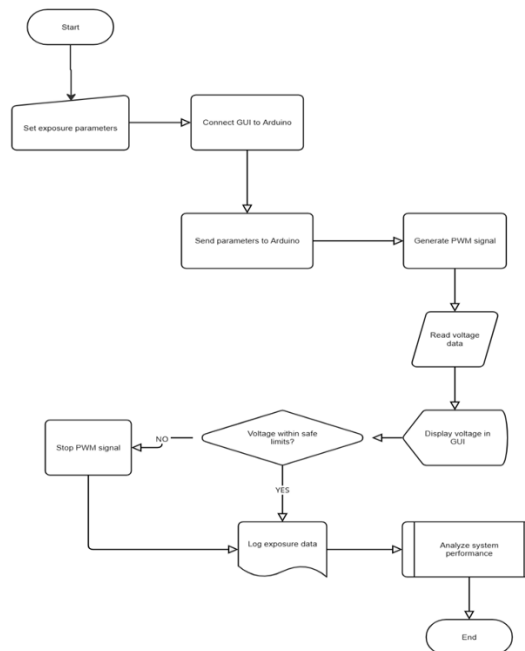
Salah satu kendala utama dari sistem manual ini adalah minimnya kemampuan monitoring real-time terhadap tegangan output selama proses eksposur. Operator tidak dapat memantau secara

langsung bagaimana tegangan berubah selama proses berjalan, sehingga sulit untuk melakukan penyesuaian cepat terhadap perubahan kondisi beban atau keperluan proteksi tegangan. Selain itu, semua pengaturan harus dilakukan secara langsung, yang meningkatkan potensi kesalahan manusia (*human error*).

Oleh karena itu, dibutuhkan sistem yang lebih cerdas, terintegrasi, dan adaptif agar dapat memberikan pengendalian tegangan yang aman, fleksibel, serta dapat dimonitor dan dikendalikan dari perangkat lunak secara real-time.

3.1.2 Analisis Sistem Usulan

Sistem usulan menggabungkan keunggulan perangkat keras mikrokontroler Arduino dan antarmuka pengguna berbasis Java. Mikrokontroler digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) yang akan mengendalikan tegangan output melalui rangkaian konverter tegangan, sedangkan GUI berbasis Java digunakan untuk mengatur konfigurasi eksposur seperti besar duty cycle, durasi, dan batas maksimum tegangan yang diizinkan. Integrasi ini akan meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam proses pengendalian. Aplikasi ini akan mengirimkan nilai duty cycle dan waktu eksposur ke Arduino, yang kemudian akan menjalankan proses PWM berdasarkan instruksi tersebut. Sistem juga akan membaca data tegangan dari sensor (misalnya sensor tegangan analog) dan menampilkannya di GUI secara *real-time*.



Gambar 2. Flowchart Analisis Sistem Usulan

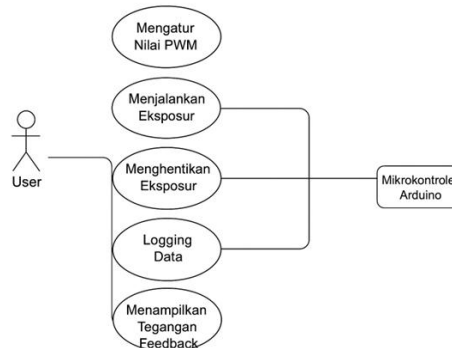
Dengan sistem ini, pemantauan terhadap kondisi tegangan menjadi lebih efektif karena adanya feedback loop. Jika tegangan output yang dibaca melebihi batas aman yang telah ditentukan, Arduino secara otomatis akan menghentikan sinyal PWM untuk mencegah kerusakan. Fitur perlindungan ini secara signifikan meningkatkan keselamatan sistem dan mengurangi risiko kegagalan perangkat keras akibat overvoltage.

Selain itu, sistem usulan juga dilengkapi dengan fitur logging. Setiap data eksposur yang dilakukan, termasuk konfigurasi dan hasil pengukuran tegangan, akan disimpan dalam file log atau database. Hal ini memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis terhadap performa sistem dari waktu ke waktu serta memberikan dokumentasi yang baik terhadap prosedur penggunaan perangkat.

Secara keseluruhan, sistem usulan ini memberikan solusi yang lebih modern, fleksibel, dan aman dibandingkan sistem manual yang saat ini digunakan. Dengan adanya kontrol berbasis software, monitoring real-time, dan proteksi otomatis, sistem ini lebih mampu memenuhi tuntutan aplikasi medis atau industri yang memerlukan pengendalian tegangan yang presisi dan dapat diawasi dengan baik.

3.2 Perancangan Sistem

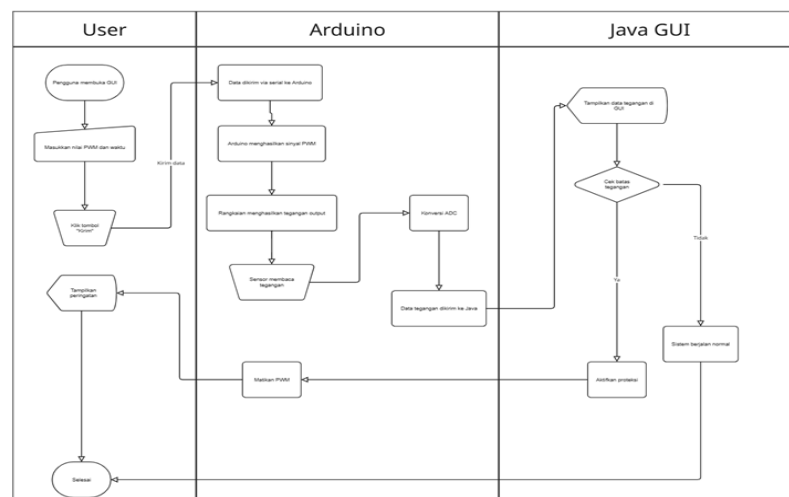
3.2.1 Use Case Diagram



Gambar 3. Use Case Diagram

Use case diagram digunakan untuk menggambarkan interaksi antara pengguna (aktor) dengan sistem yang dirancang. Diagram ini menunjukkan fungsi-fungsi utama yang dapat dilakukan oleh pengguna terhadap sistem pengendalian tegangan tinggi berbasis Java dan Arduino.

3.2.2 Activity Diagram



Gambar 4. Activity Diagram

Activity Diagram menjelaskan urutan aktivitas dalam sistem yang saling terhubung secara logis. Aktivitas dimulai dari saat pengguna membuka antarmuka Java, kemudian memasukkan parameter nilai PWM dan waktu eksposur. Diagram ini sangat membantu dalam memvisualisasikan alur proses dan mendeteksi kemungkinan bottleneck dalam sistem.

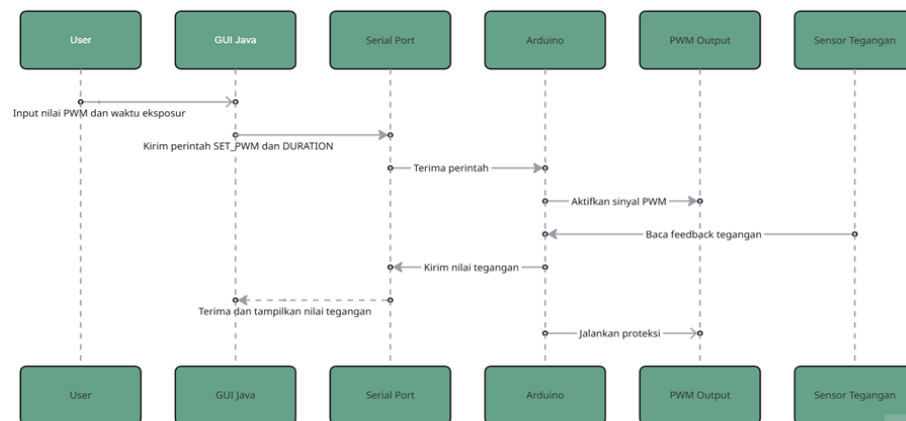
Setelah pengguna memasukkan parameter dan menekan tombol kirim, sistem akan mengirimkan data ke Arduino melalui komunikasi serial. Arduino yang menerima perintah ini akan mengaktifkan output PWM sesuai nilai yang diberikan. Aktivitas ini harus dilakukan dengan presisi tinggi karena tegangan yang dihasilkan berkaitan langsung dengan keamanan prosedur radiologi.

Selanjutnya, sistem membaca tegangan keluaran menggunakan sensor tegangan dan konversi ADC pada Arduino. Data analog ini dikonversi ke bentuk digital dan kemudian dikirim kembali ke antarmuka Java melalui port serial. Proses ini memastikan bahwa feedback dari sistem dapat dipantau secara real-time.

Java kemudian menampilkan nilai tegangan pada GUI untuk memberi informasi visual kepada operator. Informasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa nilai tegangan tetap dalam rentang yang aman selama proses eksposur. Dengan begitu, operator dapat segera menghentikan proses jika ditemukan anomali.

Di akhir diagram, terdapat proses pengecekan apakah tegangan melebihi ambang batas. Jika ya, sistem akan mengaktifkan fitur proteksi otomatis yang menghentikan sinyal PWM dan menampilkan notifikasi peringatan. Jika tidak, maka proses eksposur berlangsung normal sesuai waktu yang ditentukan. Diagram ini menunjukkan integrasi erat antara perangkat lunak dan perangkat keras untuk kontrol keamanan.

3.2.3 Sequence Diagram



Gambar 5. *Sequence Diagram*

Langkah pertama dimulai dari user yang memberikan input berupa nilai PWM dan waktu eksposur pada GUI Java. GUI ini bertindak sebagai penghubung utama antara pengguna dan perangkat keras, serta memiliki tanggung jawab untuk memvalidasi input sebelum dikirim ke Arduino. Input ini kemudian diteruskan melalui objek serial port untuk komunikasi antar perangkat.

Setelah perintah diterima, Arduino mulai menghasilkan sinyal PWM yang dikirimkan ke rangkaian kontrol tegangan. Proses ini berlangsung bersamaan dengan pembacaan tegangan output yang dilakukan menggunakan sensor tegangan yang terhubung ke pin ADC Arduino. Pembacaan ini penting untuk memastikan tegangan tetap sesuai dengan duty cycle yang diberikan.

Nilai tegangan hasil pembacaan sensor dikirim kembali ke GUI Java melalui komunikasi serial. GUI akan menampilkan nilai tersebut dalam bentuk visual agar operator dapat memantau kondisi sistem secara real-time. Setiap perubahan yang terjadi dalam output akan langsung ditampilkan, memberikan informasi penting untuk pengambilan keputusan.

Jika sistem mendeteksi bahwa tegangan melebihi batas yang ditentukan, maka Arduino akan secara otomatis menghentikan output PWM. Pesan peringatan juga dikirim ke GUI agar operator mengetahui adanya kondisi abnormal. Dengan demikian, Sequence Diagram ini merepresentasikan keseluruhan alur kerja sistem mulai dari input hingga proteksi otomatis, sekaligus memastikan keamanan dan keandalan operasional.

4. IMPLEMENTASI

4.1 Implementasi Sistem

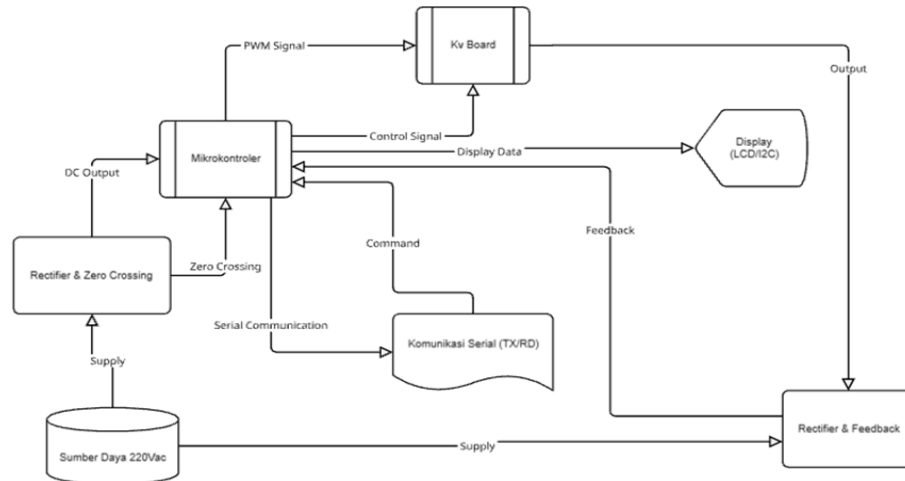
4.1.1 Diagram Blok Sistem Kendali Tegangan Tinggi X-Ray

Diagram blok tersebut menggambarkan sistem pengendalian daya berbasis mikrokontroler yang terintegrasi dengan berbagai modul, seperti rectifier, komunikasi serial, dan tampilan (display). Sistem menerima input dari sumber daya 220Vac, yang pertama-tama diarahkan ke modul Rectifier & Zero Crossing untuk dikonversi menjadi arus searah (DC Output) dan untuk mendeteksi titik zero crossing dari sinyal AC. Sinyal zero crossing ini dikirim ke mikrokontroler sebagai referensi waktu untuk mengatur sinyal kendali. Mikrokontroler kemudian mengeluarkan sinyal PWM ke Kv Board, yang berfungsi untuk mengatur besar kecilnya tegangan atau arus keluaran.

Mikrokontroler juga mengelola komunikasi data melalui jalur serial komunikasi dengan modul Komunikasi Serial, yang menerima perintah (command) dan memberikan umpan balik

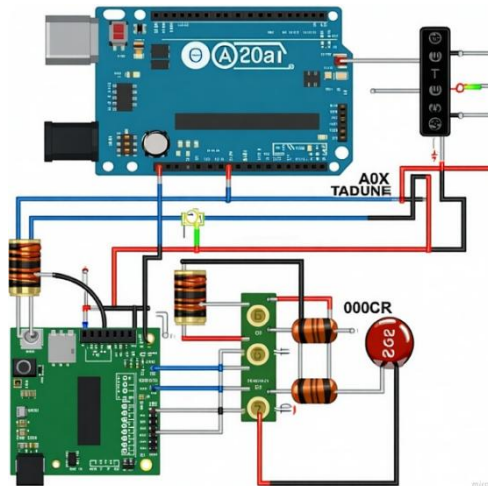
(feedback) kepada mikrokontroler. Mikrokontroler pun mengeluarkan sinyal kontrol dan data tampilan ke LCD Display (I2C) untuk menampilkan status sistem, seperti nilai output atau status kerja sistem. Modul Kv Board, setelah menerima sinyal PWM dari mikrokontroler, menghasilkan output yang kemudian diarahkan ke beban melalui modul Rectifier & Feedback.

Modul Rectifier & Feedback pada jalur output bertugas untuk memberikan umpan balik (feedback) kembali ke mikrokontroler terkait kondisi output seperti tegangan, arus, atau parameter lainnya. Informasi ini penting agar sistem dapat melakukan penyesuaian terhadap sinyal kontrol secara otomatis dan menjaga kestabilan output sesuai kebutuhan. Sistem ini menunjukkan implementasi dari kontrol tertutup (closed-loop control system), di mana mikrokontroler menjadi pusat pengolahan sinyal dan pengambilan keputusan berdasarkan data umpan balik yang diterima.



Gambar 6. Diagram Blok Sistem

4.1.2 Hubungan Pin dan Fungsi Mikrokontroler



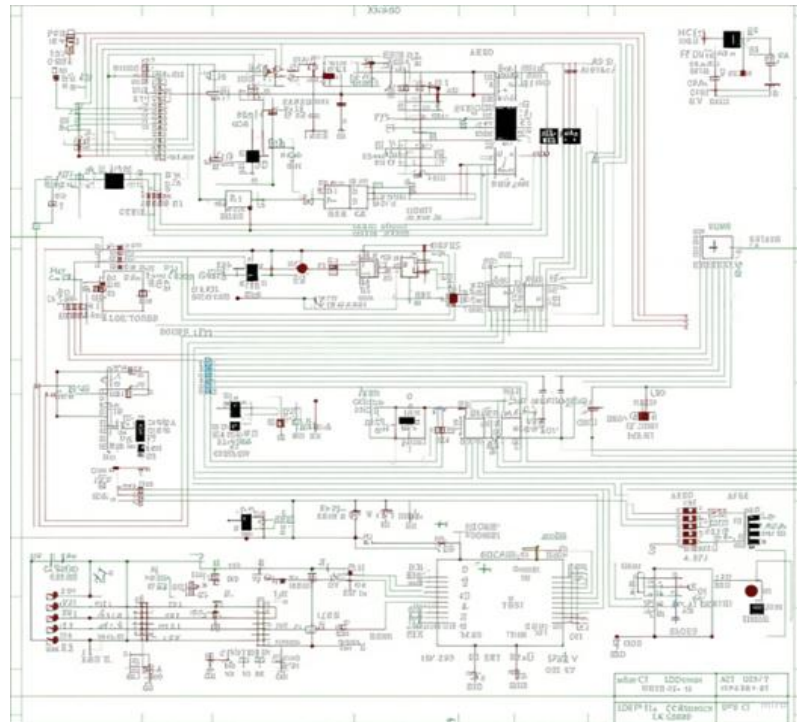
Gambar 7. Desain Rangkaian Perangkat

Tabel 1. Black Box Tegangan sinar X-Ray

Komponen	Pin ESP32 (Contoh)	Fungsi
Sensor Analog	GPIO34	Membaca data analog dari sensor
Push Button	GPIO13	Input digital, trigger manual
LED Merah	GPIO25	Indikator status 1
LED Hijau	GPIO26	Indikator status 2

Potensiometer	GPIO35	Input analog, atur ambang batas
Modul I2C/SPI	GPIO21 (SDA), GPIO22 (SCL) atau SPI GPIO18/19/23	Komunikasi antar perangkat
Ground	GND	Jalur negatif semua komponen
Power	3.3V	Daya utama semua komponen

Berikut diagram skematik system yang lebih lengkap secara komponen mikrokontroller.



Gambar 8. Diagram Skematik Sistem

4.1.3 Integrasi Perangkat dan Java GUI

High Voltage PWM Control System
Digital Control Interface

COM Port:

PWM Duty Cycle (%)

Exposure Time (ms)

START
STOP

System initialized...

Output Voltage:

5000V

● Ready
● Exposing
● Error

Gambar 9. Integrasi Dasar Perangkat

4.2 Pengembangan Program

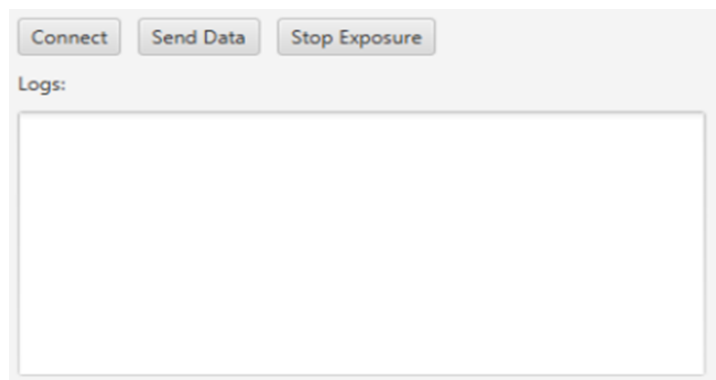
4.2.1 Pengembangan Aplikasi Java (GUI Kontrol)

Aplikasi Java berperan sebagai antarmuka pengguna (user interface) yang digunakan untuk:

1. Mengatur nilai PWM (0–255)
2. Menentukan waktu eksposur (dalam milidetik)
3. Memulai dan menghentikan eksposur
- a. Teknologi yang Digunakan
 1. Bahasa Pemrograman: Java
 2. Library Serial: jSerialComm atau RXTXcomm untuk komunikasi serial
 3. Framework GUI: Java Swing atau JavaFX (tergantung implementasi)
 4. Metode Komunikasi: Serial port (USB–UART) dengan baudrate 9600
- b. Fitur Antarmuka Java

Tabel 2. Fitur Antar Muka Java

Fitur	Fungsi
Input Field PWM	Mengatur besar duty cycle (0–255)
Input Field Exposure Time	Menentukan waktu eksposur dalam milidetik
Tombol START	Mengirim perintah untuk memulai eksposur ke Arduino
Tombol STOP	Menghentikan eksposur
Tombol STATUS	Mengambil dan menampilkan status sistem secara serial
Area Monitoring	Menampilkan tegangan feedback dan status eksposur



Gambar 10. Fitur GUI (*Graphical User Interface*)

- c. Contoh Format Perintah Serial

Tabel 3. Contoh Format Perintah Serial

Perintah dari Java	Fungsi
SETPWM 128	Menyetel duty cycle ke 50%
SETTIME 2000	Menyetel waktu eksposur 2000 ms
START	Memulai eksposur
STOP	Menghentikan eksposur
STATUS	Menampilkan status sistem dan tegangan

- d. Logika Serial Komunikasi
 1. Java membuka port serial dan mengirimkan string perintah.
 2. Arduino membaca perintah dan menyesuaikan konfigurasi sistem.
 3. Jika STATUS dikirim, Arduino merespon dengan string berisi status terkini yang dapat ditampilkan di layar Java GUI.

4.3 Pengujian Sistem

4.3.1 Pengujian Hubungan Duty Cycle PWM terhadap Tegangan Output

Tabel 4. Pengujian Hubungan Duty Cycle PWM terhadap Tegangan Output

No	Nilai PWM (0–255)	Duty Cycle (%)	Tegangan Output (V)	Potentiometer
1	0	0%	0.00	0
2	51	20%	24	128
3	102	40%	49	256
4	270	100%	132	768
5	127	50%	144	234
6	138	30%	153	249
7	168	70%	176	267
8	184	80%	188	287
9	211	90%	201	293
10	243	60%	231	300

Pengujian ini juga memberikan gambaran nyata mengenai performa sistem dalam kondisi dinamis. Saat duty cycle dinaikkan secara bertahap, terlihat peningkatan tegangan yang proporsional hingga mencapai titik maksimum yang stabil pada sekitar 121–132 volt. Kondisi overdrive (>100%) menunjukkan bahwa sistem mampu menahan lonjakan tegangan sementara tanpa menyebabkan ketidakstabilan pada keluaran. Hal ini membuktikan bahwa algoritma kontrol berbasis PWM (*Pulse Width Modulation*) yang diterapkan bekerja secara efektif dan akurat.

4.3.2 Pengujian Waktu Eksposur

Uji ini bertujuan untuk mengukur ketepatan durasi eksposur sistem berdasarkan waktu yang ditetapkan melalui GUI Java dan dikirim ke mikrokontroler menggunakan perintah SETTIME.

Tabel 5. Pengujian Waktu Eksposur

No	Voltage	Exposure
1	0.00	0 ms
2	1.97	20 ms
3	165.75	40 ms
4	204.50	100 ms
5	189.47	30 ms
6	249.29	50 ms
7	304.87	70 ms
8	356.47	80 ms
9	435.62	90 ms
10	574.88	60 ms

4.3.3 Pengujian Komunikasi Serial Java–Arduino

Pengujian komunikasi serial dilakukan untuk memastikan integrasi antarmuka Java GUI dengan mikrokontroler (Arduino) berjalan lancar dan sesuai protokol perintah yang telah ditentukan. Pengujian mencakup perintah dasar seperti SETPWM, SETTIME, START, STATUS, dan STOP, serta pengujian terhadap perintah yang tidak valid untuk menguji sistem deteksi kesalahan.

Uji ini membuktikan bahwa komunikasi antara Java dan Arduino berlangsung dua arah secara andal, dengan sistem mampu merespons perintah, mengeksekusi instruksi, dan memberikan feedback. Keberhasilan pengujian ini menandakan bahwa antarmuka serial telah dirancang dengan protokol yang jelas dan tangguh, serta mendukung implementasi kontrol dan monitoring secara real-time.

Tabel 6. Pengujian Komunikasi Serial

Perintah Dikirim	Respons Sistem	Status
START	PWM aktif, eksposur dimulai	Berhasil
STATUS	Mengirim: "Current PWM: 128, Voltage: 65V..."	Berhasil
STOP	PWM dimatikan	Berhasil
Invalid command	"Invalid command" ditampilkan di serial monitor	Berhasil deteksi

5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, perancangan, dan implementasi sistem pengendalian tegangan tinggi X-Ray medis menggunakan metode Pulse Width Modulation (PWM) yang dikendalikan melalui mikrokontroler dan antarmuka Java, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem kendali PWM berbasis mikrokontroler Arduino berhasil dirancang dan diimplementasikan, di mana nilai duty cycle dapat dikendalikan secara dinamis melalui antarmuka pengguna berbasis Java. Sistem ini mampu menghasilkan tegangan output yang proporsional terhadap perubahan nilai PWM dengan tingkat kestabilan dan akurasi yang cukup baik.
2. Pengaruh duty cycle PWM terhadap tegangan output menunjukkan hubungan yang hampir linier, di mana peningkatan nilai PWM menghasilkan kenaikan tegangan yang stabil. Hal ini menunjukkan bahwa PWM efektif digunakan untuk pengendalian tegangan X-Ray pada skala prototype.
3. Pengembangan antarmuka aplikasi Java memungkinkan sistem untuk dikontrol dari luar mikrokontroler, termasuk pengaturan nilai PWM, waktu eksposur, serta monitoring status sistem. Hal ini mempermudah operator dalam mengatur sistem dengan aman dan presisi.
4. Sistem proteksi tegangan berdasarkan feedback berhasil diimplementasikan, di mana Arduino secara otomatis menghentikan output dan memberikan peringatan saat terdeteksi tegangan yang melebihi ambang batas. Fungsi ini sangat penting untuk menjaga keamanan sistem dalam lingkungan tegangan tinggi.
5. Secara keseluruhan, sistem telah memenuhi tujuan utama penelitian, yaitu merancang kontrol tegangan tinggi yang terukur, aman, dan dapat diintegrasikan dengan sistem perangkat lunak eksternal.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengembangan dan potensi dari sistem yang telah dibuat, berikut beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut:

1. Penggunaan Sensor Tegangan dan Arus Digital yang Lebih Akurat:

Sistem saat ini menggunakan pembacaan ADC sederhana. Untuk pengukuran lebih presisi dan keamanan tinggi, sebaiknya digunakan sensor khusus seperti ZMPT101B untuk tegangan dan ACS712/ACS758 untuk arus.

2. Penerapan Sistem Closed-Loop (Feedback Kontrol Aktif):

Sistem dapat ditingkatkan dengan menambahkan algoritma kontrol PID untuk menjaga output tegangan tetap stabil sesuai nilai target, tanpa hanya bergantung pada duty cycle manual.

3. Integrasi dengan Sistem Jaringan atau Cloud

Pengembangan lebih lanjut dapat mencakup komunikasi melalui Ethernet/Wi-Fi agar sistem dapat dikendalikan dan dimonitor secara remote melalui web interface atau sistem rumah sakit.

4. Pengembangan ke Skala Industri atau Klinis:

Sistem saat ini bersifat prototype. Untuk penggunaan medis sesungguhnya, diperlukan sertifikasi perangkat medis, penggunaan komponen industri yang aman terhadap lonjakan tegangan, dan enclosure khusus untuk isolasi listrik.

5. Peningkatan Antarmuka Java GUI:

Disarankan menambahkan fitur logging, grafik tegangan terhadap waktu, serta pengaturan parameter eksposur yang lebih kompleks (misalnya mA dan kV target) untuk mendekati fungsi sistem X-Ray profesional.

REFERENCES

- David F. Hermawan, Iwan Setiawan, & Trias Andromeda. (2021). *Penggunaan Teknologi Java Pada Sistem Pengendali Peralatan Elektronik Melalui Bluetooth*.
- Didi, M., Marindani, D., & Elbani, A. (2022). Rancang Bangun Pengendalian Robot Lengan 4 DOF dengan GUI (Graphical User Interface) Berbasis Arduino Uno.
- Fajar Alvandy, R., & Soetedjo, A. (2024). Perbandingan MPPT Dengan PWM Pada Sistem Monitoring Pertumbuhan Tanaman. *Jurnal FORTECH*, 5(2), 80–88. <https://doi.org/10.56795/fortech.v5i2.5204>
- Kajian, J., & Elektro, T. (2022). RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI KELISTRIKAN RUMAH TANGGA BERBASIS APLIKASI TELEGRAM INFORMASI ARTIKEL ABSTRAK. 7(1).
- Kevin Chandra, & Leonardus Heru Pratomo. (2020). Pengendalian Tegangan Keluaran DC-DC Boost Converter Tipe Voltage Doubler Menggunakan Mikrokontroler STM32F1038CT. *Jurnal Teknik Elektro Vol. 12* No. 2.
- Muchtar, A., Muhammad, U., & Mariyah, A. (2020). Prototipe Sistem Monitoring Penggunaan Daya Motor Listrik 3 Fasa Berbasis Java Progamring (Vol. 5, Issue 1).
- Nataya Kinanti, V., Yamin, M., Fid Aksara, L., Teknik Informatika, J., Teknik, F., & Halu Oleo, U. (2016). PROTOTYPE PENYARING ASAP ROKOK PADA SMOKING AREA MENGGUNAKAN PULSE WIDTH MODULATION (PWM) DAN FUZZY TSUKAMOTO. *SemanTIK, Vol.2*, No.1, 2(1), 195–202.
- Noviyanto, H., Rianto, A., & Kusumo, J. D. (2025). PEMANTAUAN TEGANGAN LISTRIK TIGA FASE BERBASIS INTERNET OF THINGS PADA TRANSMISI TVRI JAWA TENGAH. 17, 24–32.
- Purbo Wartoyo, B., Muhammad Rizki Faatin, dan, & Penerbangan Makassar Corresponding Author, P. (2024). Rancang Bangun Sistem Monitoring Kontrol Tegangan dan Arus Listrik Pada X-Ray Berbasis Web Server Dengan Menggunakan Mikrokontroler di Bandara Soekarno Hatta. In *PROSIDING Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan (SNITP) Tahun*.
- Putra Priangga Dewangkara. (2025). Sistem Pengkondisian Suhu Berbasis Peltier Menggunakan Kendali PID Integrasi IoT Optimalisasi Pertumbuhan Java Moss Aquascape. *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, 14(3), 264-274.
- Rahman, F., Saleh, A., & Kurnia Setiawan, D. (2022). PENGENDALIAN TEGANGAN INVERTER 3 FASA MENGGUNAKAN SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM) PADA BEBAN FLUKTUATIF (VOLTAGE CONTROL OF 3 PHASE INVERTER USING SPACE VECTOR PULSE WIDTH MODULATION (SVPWM) ON FLUCTUATE LOAD).
- Setiawan, D., Yos Sudarso Km, J., Kunci, K., & Uno, A. (2020). SISTEM KONTROL MOTOR DC MENGGUNAKAN PWM ARDUINO BERBASIS ANDROID SYSTEM. *Jurnal Sains, Teknologi Dan Industri*, 15(1), 7–14.
- Sistem, J., & Tgd, K. (2023). Implementasi PWM Untuk Sistem Pengatur Kadar Air Kolam Udang Air Tawar Menggunakan Mikrokontroler. 2(4). <https://ojs.trigunadharma.ac.id/index.php/jskom>
- Zupančič, B., Karba, R., & Blažič, S. (2007). *REAL-TIME PROCESS CONTROL WITH CONCURRENT JAVA*.