

OA06

PENGEMBANGAN PENGATUR PARAMETER PESAWAT SINAR-X MEDIK BERBASIS ARDUINO

Bimo Saputro¹, I Putu Susila², Muhtadan³

¹Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional

²Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional

³Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional

e-mail: bimo-saputra@batan.go.id, putu@batan.go.id, muhtadan@batan.go.id

ABSTRAK

PENGEMBANGAN PENGATUR PARAMETER PESAWAT SINAR-X MEDIK BERBASIS ARDUINO. Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik yang tidak memiliki massa dan muatan listrik. Sinar-X telah diaplikasikan pada berbagai bidang, diantaranya pada bidang kesehatan dimana sinar-X dihasilkan dari pesawat sinar-X medis yang dimanfaatkan untuk tujuan diagnostik. Pada pemanfaatan untuk diagnostik, sinar-X yang dihasilkan dari pesawat sinar-X harus presisi agar dosis yang dipaparkan pada objek sesuai dan menghasilkan citra yang sesuai. Selain itu, diperlukan kemandirian teknologi dalam bidang rekayasa pesawat sinar-X sehingga dapat memenuhi kebutuhan pesawat sinar-X bagi industri kesehatan. Maka pada penelitian ini dilakukan pengembangan pengatur parameter pesawat sinar-X menggunakan sistem digital dimaksudkan untuk meningkatkan performa dari pengatur parameter pesawat sinar-X menggunakan sistem analog. Sistem digital memiliki beberapa keunggulan diantaranya memiliki kemampuan memproduksi sinyal yang akurat serta memiliki reliabilitas yang baik. Pada penelitian ini, pengembangan generator sinar-X berbasis Arduino sebagai pengendali parameter pesawat sinar-X meliputi tegangan tinggi, arus filamen dan waktu penembakan (*time exposure*). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pada pengaturan tegangan tinggi dilakukan menggunakan modul berbasis PWM (*Pulse Width Modulation*) untuk mengatur nilai tegangan tinggi (kV) pada pesawat sinar-X, membuat penyesuaian tegangan terhadap fluktuasi tegangan PLN ($\pm 10\%$) serta menilai kualitas kVp dari berkas sinar-X yang dihasilkan pada modul berbasis PWM dengan modul berbasis VARIAC. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan hasilnya diperoleh bahwa pada modul berbasis PWM nilai eror RMSE kVp mencapai 3,26 sedangkan pada modul berbasis VARIAC nilai eror RMSE kVp sebesar 9,26. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pengaturan tegangan tinggi (kV) berbasis PWM memiliki tingkat presisi yang lebih baik dibandingkan dengan berbasis VARIAC.

Kata Kunci : Arduino, Pesawat Sinar-X Digital, PWM, Sinar-X, VARIAC

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF MEDICAL X-RAY TUBE PARAMETERS CONTROLLER BASED ON ARDUINO. X-rays are an electromagnetic waves that have no mass and electric charge. X-rays have been applied to various fields, such as in the health field whereas X-rays are produced from medical X-ray tube used for diagnostic purposes. X-rays that utilize for diagnostic, generated from X-ray tube should be precision so that the doses exposed to object are appropriate and produce an image corresponding to the object. In addition, technological independence is required in a fields of X-ray tube engineering so the need of X-ray tube for health industry can be completed. So on the research has been development of X-ray tubes parameters controlled using a digital system is intended to enhance the performance of X-ray tubes parameters using a analog system. Digital system has been several advantages including the ability to produce an accurate signal and has a good reliability. In this research, developed the X-ray generator based Arduino as a control X-ray tubes parameters such as high voltage, filament current and exposure time. The methods are used in this research are the high voltage regulator is done using a module-based PWM (*Pulse Width Modulation*) for setting the value of high voltage (kV) on X-ray tubes, making the adjustment voltage against PLN voltage fluctuation ($\pm 10\%$) as well as assessing the kVp as a X-ray quality generated in module-PWM based with module-VARIAC based. Based on the research the result showed that the module-PWM based on RMSE error value of kVp value reached 3,26 while the module-VARIAC based on RMSE error value of kVp amount of 9,26. Then can be concluded that the module-PWM based better than module-VARIAC based on the precision performance.

Keywords : Arduino, Digital X-Ray Tubes, PWM, VARIAC, X-Ray

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik yang tidak memiliki massa dan muatan listrik. Sinar-X pertama kali ditemukan oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada tahun 1895 dan telah diaplikasikan di berbagai bidang seperti bidang

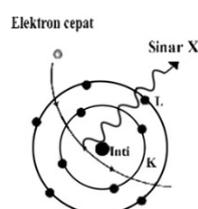
industri, keamanan dan bidang kesehatan. Pada bidang kesehatan terdapat pesawat sinar-X medis yang dimanfaatkan untuk tujuan diagnostik^[2]. Menurut data yang dikeluarkan oleh BAPETEN, penggunaan perangkat sinar-X untuk radiologi dan intervensional di Indonesia mencapai 5.403 dari jumlah tersebut masih banyak penggunaan perangkat

sinar-X konvensional, dimana pada umumnya pesawat sinar-X konvensional masih menggunakan sistem analog. Beberapa kelemahan sistem analog adalah tidak memiliki kemampuan yang akurat, sehingga berdampak terhadap paparan radiasi yang diterima oleh pasien serta dapat mempengaruhi kualitas berkas sinar-X. Meskipun begitu, beberapa Rumah Sakit di Indonesia telah menggunakan sistem pesawat sinar-X digital, dimana pemenuhan kebutuhan pesawat sinar-X digital masih dilakukan secara impor sehingga ketergantungan terhadap produk luar negeri akan tinggi. Selain itu, penelitian mengenai rekayasa sistem pesawat sinar-X digital dalam negeri tidak terlalu banyak, maka dari itu penguasaan dalam hal pesawat sinar-X digital penting dilakukan dalam rangka untuk mencapai kemandirian teknologi Indonesia.

Pada dasarnya sistem digital menggunakan kombinasi sistem logika benar dan salah. Cara tersebut digunakan untuk menyelesaikan sebuah masalah dalam sistem elektronik dengan langkah berpikir logis dan berurutan. Penerapan metode digital pada sistem pengendali pesawat sinar-X memungkinkan pengaturan tegangan tinggi, arus filamen maupun waktu penyinaran (*timer*) secara presisi, sehingga didapatkan berkas sinar-X dan dosis yang presisi. Pada penelitian ini dilakukan pengembangan pengatur tegangan tinggi (kV), waktu penyinaran (*exposure timer*) dan *start/stop* secara digital dengan berbasis Arduino serta memperhitungkan dampak perubahan tegangan PLN $\pm 10\%$ (Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 atau PUIL 2000) terhadap keluaran untuk pengaturan tegangan tinggi (kV), sehingga sistem ini akan memiliki kemampuan kompensasi secara otomatis apabila terjadi perubahan tegangan PLN sehingga tidak mempengaruhi perubahan nilai keluaran tegangan tinggi tabung sinar-X (kV).

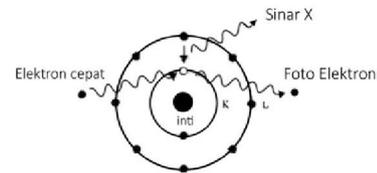
DASAR TEORI Sinar-X

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik yang tidak mempunyai massa dan muatan listrik. Sinar-X dihasilkan dari tumbukan elektron dengan materi. Terdapat 2 sinar-X yang dihasilkan, yaitu sinar-X kontinyu (Bremsstrahlung) dan sinar-X karakteristik^[6]. Sinar-X kontinyu atau bremsstrahlung dihasilkan dari perlambatan sebuah elektron yang mendekati inti atom kemudian mengalami perlambatan dan berbelok arah. Pada saat mengalami perlambatan, elektron memancarkan sinar-X. Gambar 1. menunjukkan terjadinya sinar-X bremsstrahlung^[4].



Gambar 1. Sinar-X Bremsstrahlung^[7].

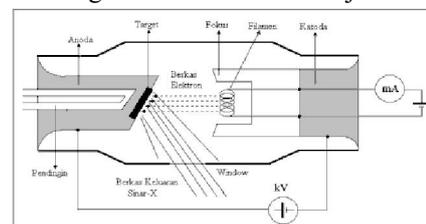
Gambar 2. menunjukkan terjadinya sinar-X karakteristik, dimana sinar-X karakteristik dihasilkan dari sebuah elektron cepat yang menumbuk elektron dari kulit atom hingga elektron terlepas. Elektron yang berada pada kulit diluarnya mengisi kekosongan elektron di kulit dalamnya. Pada saat pengisian elektron (proses eksitasi) diikuti dengan pancaran sinar-X karakteristik^[4].



Gambar 2. Sinar-X Karakteristik^[7]

Pesawat Sinar-X

Pesawat sinar-X adalah pesawat yang digunakan untuk memproduksi sinar-X. Skema tabung sinar-X dapat dilihat pada Gambar 3. Sinar-X berasal dari elektron yang dibangkitkan dengan memberi daya pada filamen, kemudian dipercepat menggunakan tegangan tinggi (HV) agar mempunyai energi kinetik yang besar. Selanjutnya elektron berenergi tinggi ditembakkan pada sebuah target. Pada saat menumbuk target, elektron-elektron ini akan melepaskan energi kinetiknya, kemudian energi tersebut berubah menjadi sinar-X^[5].



Gambar 3. Skema Tabung Sinar-X^[10].

A. Pengaruh arus tabung

Arus tabung dalam besaran mA merupakan arus yang mempengaruhi pemanasan filamen, jika arus tabung semakin tinggi maka panas filamen semakin meningkat. Peningkatan arus tabung akan menambah intensitas sinar-X dan sebaliknya, sehingga semua intensitas sinar-X atau derajat terang/ *brightness* dipengaruhi oleh arus tabung^[12].

B. Pengaruh tegangan tinggi

Tegangan tinggi (HV) dalam besaran kV akan berpengaruh pada daya tembus sinar-X terhadap obyek.

Semakin besar tegangan masukan maka semakin besar energi yang dihasilkan, sehingga dosis serap sinar-X yang dihasilkan juga semakin meningkat. Maka tegangan tinggi tabung berpengaruh pada pembentukan gambar, karena perubahan tegangan menyebabkan perubahan pada intensitas berkas sinar-X. Hal ini terjadi tanpa adanya perubahan arus tabung^[12].

Arduino

Arduino merupakan rangkaian elektronik dengan sebuah *board* mikrokontroler yang berbasis ATmega328 yang memiliki perangkat keras dan lunak. Arduino memiliki kelebihan dibanding *board* mikrokontroler yang lain, yaitu modul Arduino murah, *software* dapat dioperasikan pada Windows, Macintosh OSX, Linux, serta sistem perangkat lunak dan keras yang sudah terintegrasi dalam *board* Arduino. Modul *board* Arduino seperti pada Gambar 4.

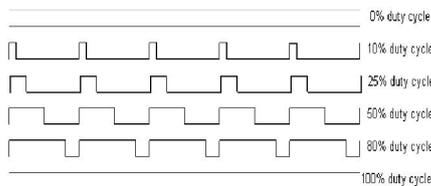


Gambar 4. *Board* Arduino Uno^[1].

Pada Arduino memiliki fitur timer, dimana timer pada arduino dengan ATmega 328 memiliki 3 modul timer yang terdiri atas 2 buah timer/counter 8-bit dan 1 buah timer/counter 16 bit. Masing-masing timer memiliki register tertentu yang digunakan untuk mengatur mode dan cara kerjanya. Nilai maksimal untuk 8 bit sebesar 255 dan 16 bit sebesar 65535^[1].

PWM (Pulse Width Modulation)

Pulse Width Modulation (PWM) adalah sebuah cara memanipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam satu periode, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* (lebar sinyal) bervariasi antara 0% hingga 100%. Pada PWM, perubahan tegangan yang berbeda dilakukan dengan mengubah periode pulsa. Periode pulsa dapat diubah menggunakan fasilitas dari mikrokontroler ataupun Arduino, dengan menentukan nilai luasan tertentu pada nilai periode pulsa. Pada PWM teknik pengontrolan digital dilakukan dengan membuat gelombang kotak dengan sinyal yang terhubung *on* dan *off*. Gambar 5. menunjukkan durasi atau periode dari kondisi *on-off* pulsa PWM^[1].



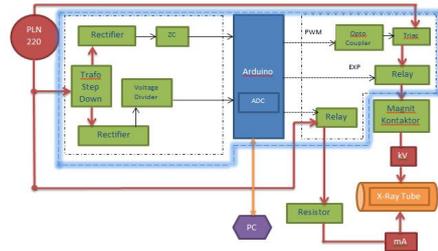
Gambar 5. Perubahan *Duty Cycle* pada Pulsa PWM^[1].

METODOLOGI

Perancangan Sistem

Gambar 56. menunjukkan rancangan modul pengatur parameter pesawat sinar-X berbasis PWM. Tegangan PLN digunakan sebagai masukan nilai

tegangan yang akan diatur menggunakan PWM, relay, serta magnet kontaktor.



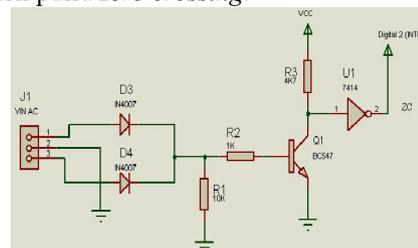
Gambar 6. Blok Diagram Rangkaian Modul Pengendali Pesawat Sinar-X Berbasis PWM.

Tegangan PLN sebagai tegangan masukan untuk *trafo step down* CT dari 220 diturunkan tegangannya hingga 12 volt dan disearahkan dengan 4 buah diode. Dioda digunakan sebagai pendeteksi pulsa *zero crossing*. Cara kerja pulsa *zero crossing* dengan memanfaatkan kinerja dari transistor. Ketika tegangan PLN berada pada tegangan $\geq 0,7$ VAC hingga 220 VAC maka kondisi di basis transistor akan *high*, hal tersebut menyebabkan kondisi pada kolektor transistor akan *low*. Ketika tegangan PLN berada pada $< 0,7$ VAC maka akan terjadi sebaliknya, sehingga pada kondisi tersebut kolektor transistor mendeteksi titik nol dari pulsa sinus.

Tegangan searah masuk ke *voltage divider* sehingga didapatkan tegangan referensi untuk nilai bit ADC sebesar 10 bit (1023) yang akan digunakan sebagai masukan Arduino. Tegangan referensi digunakan pada modul Arduino untuk pembacaan perubahan tegangan PLN sebagai penyesuaian fluktuasi tegangan dengan model persamaan yang telah dimasukkan pada program. Terakhir, setelah Arduino mendapat perintah dari PC, kemudian pulsa PWM diinterupsi oleh pulsa *zero crossing* agar permulaan pulsa dapat “seragam” dari titik nol pulsa sinus. Pulsa PWM terhubung dengan komponen triac untuk digunakan sebagai saklar tegangan AC. Triac tersambung dengan relay sebagai *start/stop exposure* kemudian terhubung dengan magnet kontaktor sebagai suplai tegangan tinggi (kV) pada tabung sinar-X. Sedangkan arus filamen tabung sinar-X (mA) mendapat suplai dari tegangan PLN untuk mengaktifkan relay pada modul.

Perancangan Modul Pengatur Parameter

Pulsa *zero crossing* merupakan suatu pulsa yang digunakan untuk mendeteksi titik nol suatu gelombang sinus. Gambar 7. menunjukkan rangkaian penghasil pulsa *zero crossing*.



Gambar 7. Rangkaian Pulsa *Zero Crossing*.

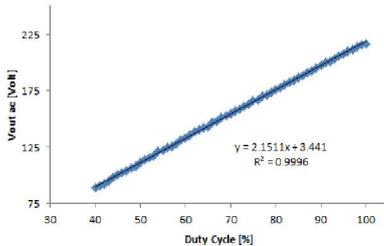
geser terhubung dengan kabel yang terkoneksi dengan bagian filamen pesawat sinar-X.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Modul Berbasis PWM

Setelah dilakukan perancangan modul elektronik dilakukan pengujian terhadap modul. Pengujian *duty cycle* dilakukan untuk menghasilkan tegangan keluaran berdasar nilai *duty cycle* seperti ditunjukkan pada

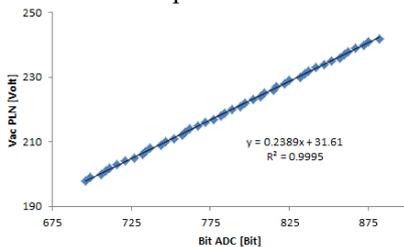
Gambar 12.



Gambar 12. *Duty Cycle* vs V_{out_ac} .

Hasil pengujian menunjukkan nilai *duty cycle* linier dengan hasil tegangan keluar. Selanjutnya nilai tegangan keluaran digunakan sebagai representasi nilai kV pada tabung pesawat sinar-X.

Berikutnya dilakukan pengujian untuk *reliability* jika terjadi fluktuasi tegangan pada tegangan suplai PLN. Variasi tegangan dilakukan pada 198 VAC hingga 242 VAC, pengaturan *range* tersebut didasarkan pada aturan Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000) yang menyatakan bahwa fluktuasi perubahan tegangan PLN sebesar $\pm 10\%$ dari nilai V_{rms} 220 VAC. Hasil Pengujian didapatkan linieritas seperti Gambar 13.



Gambar 13. Nilai ADC vs V_{ac} PLN.

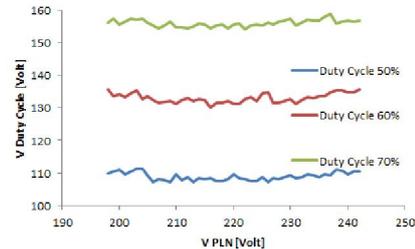
Hasilnya diperoleh linieritas sebesar 0,9995 serta didapatkan persamaan:

$$y = 0.2389x + 31.61 \quad (2)$$

Persamaan tersebut kemudian digunakan sebagai permodelan pengkompensasi pada proses program Arduino jika terjadi fluktuasi tegangan PLN dengan nilai x adalah hasil pembacaan nilai ADC.

Pengujian selanjutnya pada modul berbasis PWM yaitu dengan melakukan pengujian kestabilan VAC dengan variasi *duty cycle* pada 50%, 60% dan 70% yang digunakan sebagai representasi nilai *setting* tegangan tinggi (kV) pada nilai 50 kV, 60 kV dan 70 kV. Pengujian ini kondisi program telah diberi kompensator sebagai pengkompensasi fluktuasi tegangan PLN. Selain itu, sebagai simulasi fluktuasi tegangan PLN diubah-ubah menggunakan VARIAC

(*variable transformer*) pada nilai range 198 V hingga 242 V dengan interval 1 V. Data hasil pengujian didapatkan seperti Gambar 14.

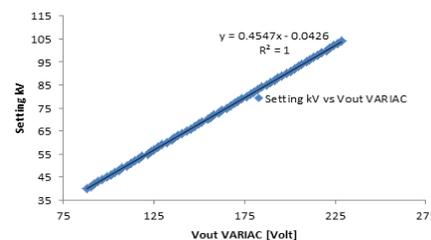


Gambar 14. $V_{Duty Cycle}$ vs V_{PLN} .

Pada percobaan tersebut didapatkan nilai standar deviasi masing-masing 1,205 untuk *duty cycle* 50 ; 1,403 untuk *duty cycle* 60 ; serta 1,044 untuk *duty cycle* 70. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pengkompensasi telah berhasil bekerja dengan mengeluarkan tegangan keluaran yang stabil meskipun terjadi fluktuasi tegangan PLN.

Pengujian Tegangan Keluaran V_{out_ac} Analog Berbasis VARIAC (*Variacble Transforator*)

Pada pengujian pada modul berbasis VARIAC dilakukan untuk mendapatkan data primer sebagai pembandingan performa modul digital berbasis PWM. Dari hasil pengujian didapatkan nilai *setting* tegangan tinggi (kV) pada *range* 40kV-100kV dengan menghasilkan tegangan VAC tertentu. Pada kondisi tersebut tegangan keluaran digunakan untuk membangkitkan tegangan tinggi pada tabung sinar-X. Kemudian dinilai kesesuaiannya dengan metode linieritas antara *duty cycle* dengan V_{out_ac} seperti Gambar 15.



Gambar 15. *Setting* kV vs V_{out} VARIAC

Hasil pengujian tersebut didapatkan nilai linieritas 1 artinya bahwa *setting duty cycle* telah sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan. Pada pengujian tersebut terbukti bahwa tegangan keluaran VARIAC tidak terpengaruh oleh fluktuasi tegangan dari PLN.

Pengujian *Setting* tegangan tinggi (kV) terhadap Keluaran kVp Pesawat Sinar-X Berbasis Arduino

Pengujian kualitas kVp dari berkas sinar-X berbasis Arduino dilakukan pada tegangan tinggi (kV) 50 dan arus filamen (mA) 50. Spesifikasi tabung sinar-X yang digunakan adalah F50-100 dengan tegangan kerja 100 kV/70 mA. Pada pengujian tersebut digunakan X-ray multimeter merk RaySafe sebagai pembaca nilai dosis efektif. Probe dari X-ray multimeter dipasang tepat dibawah *focal spot* dengan waktu penembakan selama 0,5

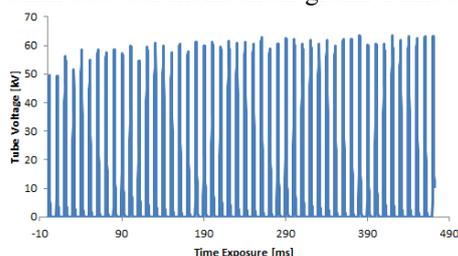
detik pada jarak 1,5 meter dari focal spot. Dari 3 kali pengujian didapatkan hasil seperti Tabel 1.

Tabel 1. Hasil kVp, Dosis dan Jumlah Pulsa pada Modul Berbasis PWM

No	Tegangan (kV)	Dosis (μGy)
1	67	0,1237
2	66,9	0,1228
3	67,4	0,1236

Tabel 1 menunjukkan bahwa secara nilai akurasi masih belum sesuai dengan *setting* awal, dimana ketika dilakukan *setting* tegangan tinggi 50 kV justru dihasilkan nilai dari pembacaan X-ray multimeter sebesar 67 kV ; 66,9 kV serta 67,4 kV. Meskipun jika ditinjau dari segi pembacaan kVp atau akurasi terhadap nilai yang diinginkan belum sesuai dengan *setting* awal yaitu pada nilai kV 50, namun analisis pada penelitian ini difokuskan terhadap nilai presisi dari nilai tegangan tinggi (kVp) yang terbaca oleh X-ray multimeter. Ketidaksesuaian akurasi tersebut disebabkan karena belum diketahuinya kondisi dalam tabung sinar-X. Kondisi dalam tabung sinar-X yang digunakan belum diketahui secara detail mengenai perbandingan lilitan serta pembangkitan tegangan tinggi (HV) dalam tabung. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa kondisi tabung ideal, yaitu ketika dilakukan pada catu daya tertentu maka pelipatgandaan menjadi tegangan tinggi (HV) akan sesuai dengan catu daya pada modul. Contohnya, ketika diinginkan pada *setting* tegangan tinggi 50 kV maka akan menghasilkan keluaran kVp sebesar 50. Meskipun demikian, penelitian ini telah mencapai tujuan awal penelitian dimana hasil yang dituju adalah melihat performa tingkat presisi modul berbasis Arduino dengan melihat dari kualitas kVp dari berkas sinar-X. Kekurangan yang terdapat dalam penelitian ini dapat dijadikan saran untuk pengembangan lebih lanjut dari pengatur parameter pesawat sinar-X secara digital.

Penilaian tingkat presisi dilakukan dengan metode RMSE (*Root Mean Square Error*), dimana jika nilai yang dihasilkan semakin mendekati nol maka semakin kecil eror dari nilai tersebut. Setelah dilakukan penembakan dengan 3 kali pengujian didapatkan data dan membentuk grafik Gambar 16.



Gambar 16. *Exposure Time vs kV*.

Meskipun belum tepat hasilnya pada 50 kV, akan tetapi performa tingkat presisi atau kestabilan berbasis Arduino telah stabil. Performa kestabilan tersebut didapatkan karena pengaturan dilakukan melalui

sistem digital dimana pengaturan tegangan (catu daya) bisa dilakukan lebih presisi karena sistem digital hanya dapat dikondisikan pada dua hal yaitu *high* atau *low* atau biasa disebut diskret.

Dari perhitungan RMSE yang dilakukan kemudian digunakan sebagai penentuan analisis performa tingkat presisi kVp dari hasil pengaturan berbasis PWM, dimana hasilnya didapatkan nilai RMSE kVp sebesar 3,26 yang berarti bahwa nilai kVp hasil pembacaan memiliki nilai eror sebesar 3,26% dari *setting* awal. Nilai RMSE tersebut menunjukkan tingkat presisi sinar-X hasil pengaturan dari modul berbasis PWM. Meskipun belum tepat hasilnya pada 50 kV, akan tetapi performa tingkat presisi telah dapat dilakukan penilaian.

Pengujian *Setting* tegangan tinggi (kV) terhadap Keluaran kVp Pesawat Sinar-X Berbasis VARIAC

Pengujian kualitas kVp dari berkas sinar-X berbasis VARIAC dilakukan pada kondisi yang sama dengan pengujian kualitas sinar-X berbasis Arduino yaitu pada tegangan tinggi (kV) 50 dan arus filamen (mA) 50. Spesifikasi tabung sinar-X yang digunakan adalah F50-100 dengan tegangan kerja 100 kV/70 mA. Hanya saja pengujian dilakukan dengan waktu penembakan selama 1 detik pada jarak 1 meter dari focal spot dikarenakan ketika pengujian pada kondisi 0,5 detik dengan jarak 1,5 meter dari focal spot alat X-ray multimeter belum dapat membaca keluaran kVp dari tabung sinar-X karena berkas sinar-X yang dihasilkan terlalu rendah sehingga tidak tertangkap oleh X-ray multimeter. Dari 3 kali pengujian didapatkan hasil seperti Tabel 2.

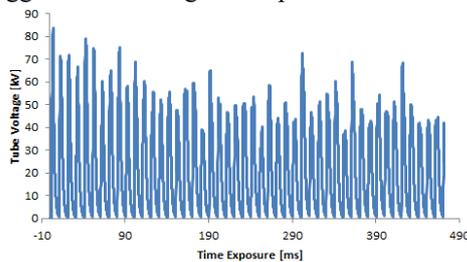
Tabel 2. Hasil kVp, Dosis dan Jumlah Pulsa pada Modul Berbasis VARIAC

No	Tegangan (kV)	Dosis (μGy)
1	0	0,0399
2	39,4	0,08665
3	40,1	0,1045

Tabel 2 menunjukkan bahwa secara nilai akurasi masih belum sesuai dengan *setting* awal, dimana ketika dilakukan *setting* tegangan tinggi 50 kV justru dihasilkan nilai dari pembacaan X-ray multimeter sebesar 0 kV ; 39,4 kV serta 40,1 kV. Meskipun jika ditinjau dari segi pembacaan kVp atau akurasi terhadap nilai yang diinginkan belum sesuai dengan *setting* awal yaitu pada nilai kV 50, namun analisis pada penelitian ini difokuskan terhadap nilai presisi dari nilai tegangan tinggi (kVp) yang terbaca oleh X-ray multimeter. Ketidaksesuaian akurasi tersebut disebabkan karena masalah yang hampir serupa dengan modul berbasis PWM bahwa belum diketahuinya kondisi tabung sinar-X. Meskipun demikian, penelitian ini bertujuan untuk menilai tingkat presisi dengan membandingkan performa modul berbasis PWM dan berbasis VARIAC.

Penilaian tingkat presisi dilakukan menggunakan metode yang sama yaitu metode RMSE

(*Root Mean Square Error*). Setelah dilakukan penembakan dengan 3 kali pengujian didapatkan data sehingga membentuk grafik seperti Gambar 17.



Gambar 17. *Exposure Time vs kV* Berbasis VARIAC.

Dari perhitungan RMSE yang dilakukan kemudian digunakan sebagai penentuan analisis performa tingkat presisi kVp dari hasil pengaturan berbasis PWM, dimana hasilnya didapatkan nilai RMSE kVp sebesar 9,26, yang berarti bahwa nilai kVp hasil pembacaan memiliki nilai eror sebesar 9,26 % dari *setting* awal. Nilai RMSE tersebut menunjukkan tingkat presisi sinar-X hasil pengaturan dari modul berbasis VARIAC. Meskipun belum tepat hasilnya pada 50 kV, akan tetapi performa tingkat presisi telah dapat dilakukan penilaian. Performa tingkat presisi tersebut didapatkan untuk kemudian dibandingkan sehingga akan didapatkan kualitas tingkat presisi antara modul berbasis PWM dengan modul berbasis VARIAC.

Jika dinilai dari nilai RMSE kVp maka performa metode berbasis PWM lebih baik dibanding berbasis VARIAC. Pada penelitian ini, metode berbasis PWM memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan metode berbasis VARIAC dengan nilai perbandingan RMSE 3,26 berbanding 9,26 dengan metode penilaian menggunakan RMSE. Hasil tersebut didapatkan dari analisis bahwa dengan kondisi menggunakan tipe tabung yang sama tipe F50-100 diperoleh dua grafik masing-masing grafik dari modul berbasis PWM dan berbasis VARIAC. Dari kedua grafik tersebut dapat dinilai tingkat presisi dari kualitas kVp hasil dari catu daya PWM serta VARIAC. Tingkat presisi adalah suatu ukuran kemampuan untuk mendapatkan pengukuran yang serupa. Artinya dengan memberikan suatu harga tertentu bagi sebuah variabel, tingkat presisi merupakan suatu ukuran tingkatan yang menunjukkan perbedaan hasil pengukuran pada pengukuran-pengukuran secara berurutan. Hal ini berbeda pengetahuan dengan akurasi, bahwa akurasi adalah harga terdekat dari suatu pembacaan instrumen yang mendekati harga sebenarnya dari variabel yang diukur. Maka dari itu pada penelitian ini dilakukan penilaian performa modul berbasis PWM dan berbasis VARIAC dari tingkat presisi kVp.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat diperoleh kesimpulan bahwa telah berhasil dilakukan pembuatan modul pengatur

parameter pesawat sinar-X berbasis Arduino dengan metode PWM dan diperoleh hasil yang presisi. Penilaian performa presisi modul dinilai dengan metode kuantitas nilai kVp dari berkas sinar-X. Menggunakan rumusan RMSE maka didapatkan nilai RMSE kVp pada modul digital berbasis Arduino sebesar 3,26 serta pada modul analog berbasis VARIAC nilai RMSE kVp sebesar 9,26. Hal ini mengindikasikan bahwa secara kemampuan presisi modul digital berbasis Arduino berkerja lebih baik sehingga dapat berdampak terhadap dosis efektif yang diterima.

Meskipun begitu penelitian ini masih memerlukan perbaikan kembali diantara perlu dilakukan pendalaman terhadap tabung yang digunakan untuk mengetahui perbandingan lilitan dan pembangkitan tegangan tinggi (HV) pada tabung pesawat sinar-X. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan nilai akurasi guna melengkapi nilai presisi yang telah didapatkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini diucapkan terima kasih untuk peneliti dan tim pendukung di Pusat Rekayasa dan Fasilitas Nuklir. Tak lupa pula untuk segenap akademisi Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir yang telah mendukung guna terlaksananya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arduino, 2015, *Board Arduino Uno*, Dipetik Agustus 21, 2015, dari <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>.
- [2] BAPETEN, 2011, *Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 9: Uji Kesesuaian Pesawat Sinar-X Radiologi Diagnostik dan Intervensional*, Jakarta.
- [3] BAPETEN, 2014, *Data Ijin Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif*, http://www.bapeten.go.id/index.php?modul=info&menu=izin_tujuandiakses_pada_5_Juni_2016.
- [4] IAEA, 2014, *Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students*, Vienna.
- [5] Kardiawarman., 1996, *Sinar-X*. Jurusan Pendidikan Fisika, IKIP Bandung.
- [6] Maryanto D, Solichin, Abidin Z., 2008, *Analisis Keselamatan Kerja Radiasi Pesawat Sinar-X di Unit Radiologi RSU Kota Yogyakarta*. Seminar Nasional IV SDM Teknologi Nuklir, STTN-BATAN, Yogyakarta 25-26 Agustus.
- [7] Pratiwi, Umi., 2006, *Aplikasi Analisis Citra Detail Phanom dengan Metode Konversi Data Digital ke Data Matrik untuk Meningkatkan Kontras Citra Menggunakan Film Imaging Plate*. Skripsi, Solo: FMIPA Universitas Sebelas Maret.
- [8] Reza, A., 2010, *Rancang Bangun Pengendali Kecepatan Motor Induksi Satu Phase*. Depok: Skripsi Universitas Indonesia.

- [9] Rudi, Pratiwi, Susilo., 2012, *Pengukuran Paparan Radiasi Pesawat Sinar-X di Instalasi Radiodiagnostik untuk Proteksi Radiasi*. Semarang, Republik Indonesia: Universitas Negeri Semarang, Unnes Physics Journal 2012.
- [10] Suparno dan Baskan, 2009, *Teori Radiografi Industri 9 Pemilihan Teknik*, Jakarta: Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN.
- [11] Suyatno F, Istofa, Yuniarsari L., 2007, *Rekatasa Sistem Pengatur Parameter Pesawat Sinar-X Diagnostik Berbasis Mikrokontroler Keluarga MCS 51*. Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir, STTN-BATAN, Yogyakarta 21-22 November.
- [12] Yufita, E dan Safitri, R., 2012, *Analysis Output Tolerance Limits X-Ray Machine Diagnostik*. Jurnal Natural Vol.12, No.1.