



Desain dan Pengembangan Prototipe Chamber Zat Radioaktif Otomatis sebagai Alat Eksperimen Spektroskopi Gamma Menggunakan Mikrokontroler Arduino Uno R3

Cipto Driyo¹, Adinandra Caesar Fahrudin¹, Yan Hendra Kurniawan¹, Muhammad Riswan¹, Eri Widianto²

Universitas Gadjah Mada¹, Universitas Singaperbangsa Karawang²

Info Artikel

Sejarah Artikel:

Diterima Agustus 2023

Disetujui Oktober 2023

Dipublikasikan Desember 2023

Keywords: *Experiment, microcontroller, prototype, radiation protection, robotics*

Abstrak

Prototipe chamber zat radioaktif otomatis dilengkapi dengan sistem robotik telah berhasil dikembangkan dan diimplementasikan sebagai alat penunjang eksperimen fisika nuklir pada spektroskopi gamma. Prototipe ini terdiri dari chamber otomatis yang digunakan untuk mengukur spektrum zat radiasi, dinding chamber yang berfungsi sebagai penahan bahaya radiasi serta robot pemindah barang yang dipasang di dalam chamber. Mikrokontroler arduino uno R3 digunakan sebagai kontroler utama yang digunakan untuk mengatur pergerakan robot, fleksibilitas dan kemudahan dalam mengendalikan seluruh sistem di dalam chamber. Robot pemindah barang diprogram untuk memindahkan detektor dan sampel zat radioaktif secara presisi sesuai dengan posisi yang diinginkan. Selama praktikum menggunakan spektroskopi gamma, prototipe ini memudahkan mahasiswa dalam pengaturan sampel, efisiensi waktu praktikum dan biaya pembelian alat penunjang, meminimalisir bahaya paparan zat radioaktif serta menghilangkan resiko bahaya mekanik akibat terjepit shieldir pembatas pada chamber manual. Penggunaan prototipe ini memberikan pengalaman praktikum yang lebih interaktif, efisien serta pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip spektroskopi gamma sambil mengembangkan keterampilan pemrograman dan pengendalian sistem bagi mahasiswa. Selain itu, pengembangan sistem lebih lanjut dari prototipe ini dapat melibatkan peningkatan fungsionalitas sistem robotik untuk mengakomodasi praktikum yang lebih kompleks dan variasi pengaturan eksperimen.

Abstract

A prototype chamber for an automatic radioactive substance equipped with a robotic system has been successfully developed and implemented as a tool to support nuclear physics experiments in gamma spectroscopy. This prototype consists of an automatic chamber that measures the spectrum of radioactive substances, a chamber wall that functions as a barrier to radiation hazards, and a goods-moving robot installed in the chamber. The Arduino uno R3 microcontroller is the main controller to regulate the robot's movement, flexibility, and convenience in controlling the entire system in the chamber. The goods moving robot is programmed to move the detector and samples of radioactive substances precisely according to the desired position. During practicums using gamma spectroscopy, this prototype makes it easier for students to arrange samples, is efficient in practicum time and the cost of purchasing supporting equipment, minimizes the danger of exposure to radioactive substances, and eliminates the risk of mechanical hazards due to being pinched to the shielding barrier in the manual chamber. This prototype provides a more interactive, efficient practical experience and an in-depth understanding of gamma spectroscopy principles while developing programming and system control skills for students. In addition, further system development of this prototype may involve increasing the functionality of the robotic system to accommodate more complex lab work and a variety of experimental setups.

©2023 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:

E-mail: cipto_driyo@ugm.ac.id, adinandra.c.f@mail.ugm.ac.id,
yan.hendra.k@ugm.ac.id, muhammadriswan1997@mail.ugm.ac.id,
eri.widianto@ft.unsika.ac.id

ISSN

PENDAHULUAN

Radiasi dan zat radioaktif adalah fenomena yang telah dipelajari dalam berbagai bidang ilmu, termasuk fisika, kedokteran, dan teknik nuklir. Pemanfaatan energi radiasi pada era industri 4.0 ini sudah sangat banyak seperti sinar gamma. Sinar Gamma merupakan gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh peluruhan sebuah radioisotop dengan energi ± 100 KeV-1 MeV lebih dengan panjang gelombang (λ) antara 0,01-0,001 Angstrom (\AA). Satu elektron Volt (eV) ini berarti jumlah energi yang dipancarkan oleh sebuah elektron saat melewati beda potensial 1 Volt (Baskan-Suparno, 2018). Pembelajaran ilmu fisika memiliki sebuah teknik penting dalam bidang ilmu fisika nuklir dan ilmu radiasi, yaitu spektroskopi gamma. Spektroskopi gamma dimanfaatkan untuk mengukur energi sinar gamma dari sumbernya, mengidentifikasi sumbernya, serta menghitung jumlah foton sinar gamma yang meninggalkan sumber per satuan waktu. Jumlah ini sebanding dengan aktivitas sumber (A Metek 4th ed-1987).

Dalam praktikum spektroskopi gamma, penggunaan zat radioaktif memerlukan sistem yang aman dan akurat untuk meminimalkan risiko paparan radiasi bagi pengguna dan lingkungan sekitar. Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) adalah organisasi yang bertugas melaksanakan pengawasan terhadap segala kegiatan pemanfaatan tenaga nuklir melalui peraturan, perizinan, dan inspeksi. Tujuan pengawasan adalah untuk menjamin keselamatan dan kesehatan pekerja dan anggota masyarakat serta perlindungan

terhadap lingkungan hidup (Republik Indonesia, 1997). Pemanfaatan sumber radiasi pengion, yang merupakan bagian dari pemanfaatan tenaga nuklir, berkembang cukup pesat di berbagai bidang. Penggunaan zat radioaktif sebagai salah satu sumber radiasi pengion memainkan peran yang cukup penting baik di bidang industri maupun kesehatan (Republik Indonesia, 2007). Peraturan Pemerintah No. 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir mengatur tentang persyaratan izin dalam pemanfaatan sumber radiasi pengion. Di dalam peraturan ini terdapat klasifikasi atau zat radioaktif terbungkus kategori I, II, III, dan IV (Republik Indonesia, 2008).

Laboratorium Fisika Atom Inti, FMIPA Universitas Gadjah Mada memiliki sistem Spektroskopi Gamma yang telah digunakan untuk kegiatan belajar mengajar dan praktikum dalam jangka waktu yang lama. Peralatan spektroskopi gamma ini terdiri dari kontainer zat radioaktif, detektor NaI(Tl), tegangan tinggi HV power supply, pre-Amplifier, linear-Amplifier, dan Single Channel Analyzer (SCA) Easy Multi-Channel Analyzer (MCA) dan zat radioaktif. Zat radioaktif dalam eksperimen digunakan sebagai sampel untuk mempelajari karakteristik dan perilaku partikel gamma yang dihasilkan. Sehingga dalam praktikum eksperimen spektroskopi gamma, proteksi radiasi, keamanan zat radioaktif, dan pengendalian zat radioaktif menjadi faktor yang sangat penting untuk disampaikan sebagai bahan edukasi kepada mahasiswa dan

masyarakat umum (IAEA-2020; Utami, A.P., 2019).

Sistem Spektroskopi Gamma berfungsi untuk menganalisis sumber radiasi gamma atau isotop dengan mengukur distribusi energi dan aktivitasnya. Jika dilihat menggunakan osiloskop, energi sumber radiasi akan berbanding lurus dengan tinggi pulsa, sedangkan aktivitas sumber radiasi berbanding lurus dengan intensitas radiasi. Sedangkan jika dilihat spektrum dengan SCA dan MCA, energinya sebanding dengan nomor kanal, dan aktivitasnya ditunjukkan dengan angka chopping rate (Sumanto, et al., 2013). Praktikum Spektroskopi Gamma ini menggunakan chamber terbuat dari balok penghalang (shielding) dari Pb (ukuran $16 \times 8 \times 4$ cm dan berat ± 5 kg). Pada saat praktikum, mahasiswa melakukan proses pengambilan sampel secara manual dari kontainer penyimpanan menggunakan pinset di tempat terpisah. Praktikan meletakkan sumber radioaktif di holder sumber yang disediakan dan membuka/menutup shielding kontainer secara manual. Sehingga tampak jelas bahwa hal ini dapat menimbulkan dampak bahaya berlebih dari paparan radiasi, serta dapat menimbulkan bahaya mekanis akibat terjepit oleh balok Pb (IAEA-2020). Dari kegiatan tersebut, terdapat beberapa situasi, manipulasi, dan pemindahan sampel radioaktif secara manual yang dapat berpotensi meningkatkan risiko paparan radiasi bagi operator. Untuk mengatasi masalah ini, pengembangan prototipe kontainer radioaktif otomatis dengan robot pemindah barang diperlukan (Tsitsimpelis et al., 2021). Seperti dalam dunia industri yang mengembangkan

sistem robot, salah satu jenis dari robot yang sedang dikembangkan dalam dunia industri adalah robot mini manual industri (Saefullah et al., 2016). Robot mini manual industri adalah robot pengantar yang sangat membantu pekerjaan manusia untuk mengangkat dan memindahkan barang (Amrillah, A.H. et al., 2015). Robot dalam kontainer ini ada kemiripan dengan sistem kerja robot mini industri yang dikendalikan dengan joystick karena menggunakan sistem pengakabelan dengan saklar push-button (Tabroni dan Munir, 2017).

Dalam artikel ini, kami memperkenalkan prototipe chamber zat radioaktif otomatis yang dirancang sebagai alat penunjang praktikum eksperimen spektroskopi gamma. Chamber ini sekaligus sebagai tempat penyimpanan zat radioaktif (container) yang dilengkapi dengan robot mini industri yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino Uno R3 untuk mengatur dan memantau proses penggunaan zat radioaktif dengan aman dan efisien. Arduino Uno R3 adalah papan mikrokontroler yang populer dan mudah diprogram, yang memungkinkan pengontrolan dan pemantauan perangkat secara akurat. Dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3, dapat menjadi solusi yang efektif dan aman. Tujuan dari prototipe ini adalah untuk mempermudah pengelolaan sampel radioaktif dalam chamber, meminimalkan risiko paparan radiasi bagi pengguna, meningkatkan keakuratan pengukuran spektroskopi gamma, dan efisiensi waktu pengambilan data praktikum. Dengan menggunakan robot pemindah barang yang terkontrol oleh Arduino Uno R3, sampel radioaktif dapat dipindahkan dengan presisi

dan keamanan yang tinggi sehingga mengurangi intervensi manual yang berpotensi membahayakan (Rezki Setiawan dan Rachmat Ramdani, 2020).

Chamber ini terdiri dari 2 komponen utama, yaitu hardware (mekanik dan elektronik) dan software (desain, program, dan simulasi). Pada tahap awal hardware, dilakukan desain kontainer, penyiapan bahan yang tahan terhadap bahaya radiasi, aktuator robot, serta perancangan dan perhitungan. Casing chamber terbuat dari akrilik yang dilapisi dengan plat Pb setebal 2 cm sebagai perisai dari paparan radiasi zat radioaktif. Aktuator robot menggunakan motor stepper sebagai penggerak untuk mengambil bahan zat radioaktif dan mengembalikannya ke tempat penyimpanan di dalam kontainer. Motor stepper dipilih sebagai aktuator karena memiliki torsi yang besar sehingga kuat dan presisi yang dapat dikontrol menggunakan driver (Salahudin Muis, 2011). Bagian elektronik meliputi catu daya dan mikrokontroler. Sedangkan software yang digunakan adalah Arduino IDE, C++, dan EAGLE untuk memberikan informasi Input/output hardware untuk melakukan simulasi apa yang harus dilakukan dan Bagaimana melakukannya (Badamasi, 2014).

Pada prototipe ini, Arduino Uno R3 berfungsi sebagai otak kendali yang mengendalikan gerakan robot pemindah barang. Arduino Uno R3 terhubung dengan motor penggerak menggunakan motor stepper NEMA 17, sensor jarak menggunakan inductive proximity sensor, limit switch, dan saklar push-button. Sensor jarak digunakan untuk

mendeteksi jarak antara sumber radioaktif yang berada di dalam kontainer, sedangkan limit switch digunakan untuk membatasi gerakan motor stepper yang memindahkan detektor ke sumber radioaktif. Saklar push-button digunakan untuk memilih jenis zat radioaktif di dalam kontainer. Dalam praktikum spektroskopi gamma, operator dapat menggunakan antarmuka pengguna melalui layar LCD yang terhubung dengan mikrokontroler Arduino Uno R3 untuk mengatur tujuan pemindahan sampel, memantau sensor jarak, jenis sampel yang diukur, dan sampel uji.

Keuntungan utama dari prototipe ini adalah meningkatkan keamanan dan keakuratan praktikum spektroskopi gamma. Dengan menggunakan robot pemindah barang yang dikendalikan oleh Arduino Uno R3, manipulasi dan pemindahan sampel radioaktif dapat dilakukan dengan lebih efisien, presisi, dan mengurangi risiko paparan radiasi bagi operator. Prototipe kontainer radioaktif otomatis dengan robot pemindah barang menggunakan Arduino Uno R3 sebagai alat penunjang praktikum spektroskopi gamma merupakan solusi yang inovatif dan aman untuk mengurangi risiko paparan radiasi dalam pengelolaan sampel radioaktif. Prototipe ini memiliki potensi untuk meningkatkan keamanan, efisiensi, dan akurasi dalam praktikum spektroskopi gamma serta memberikan pengalaman praktikum yang lebih positif bagi mahasiswa dan pengguna lainnya di bidang nuklir dan radiasi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadaptasi model ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation) yang dikembangkan oleh Robert Branch (Branch, 2009). Penelitian di lakukan di Lab. Fisika Atom Inti, UGM dengan tahapan sebagai berikut:

a. Tahap Analisis

Tahap persiapan diantaranya melakukan studi pustaka, survei kondisi perangkat praktikum sistem spektroskopi gamma, serta persiapan alat dan bahan. Peralatan eksperimen Spektroskopi Gamma di Lab. Fisika Atom Inti, UGM terdiri atas *chamber* dari balok Pb yang berisi berisi PMT dan detektor scintillator NaI(Tl), sumber tegangan tinggi (HV), pre amplifier, Linear amplifier, Single Channel Analizer (SCA), Osiloskop, Timer dan Counter, Power supply + Nim Bin,

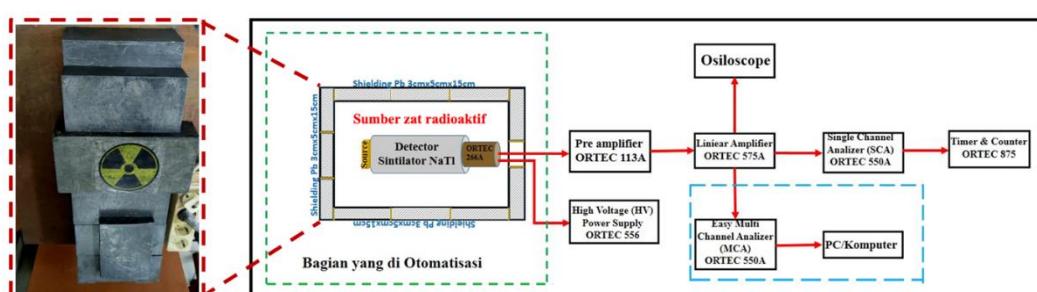
dan zat radioaktif seperti ditunjukkan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 1. Peralatan eksperimen Spektroskopi Gamma di Lab. Fisika Atom Inti, UGM

b. Tahap desain

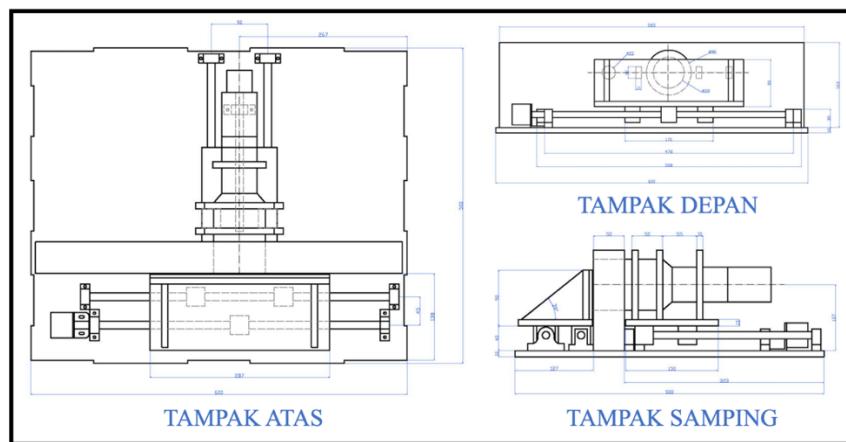
Pada tahapan ini, dilakukan desain dan pembuatan kontainer zat radioaktif pada sistem spektroskopi gamma.



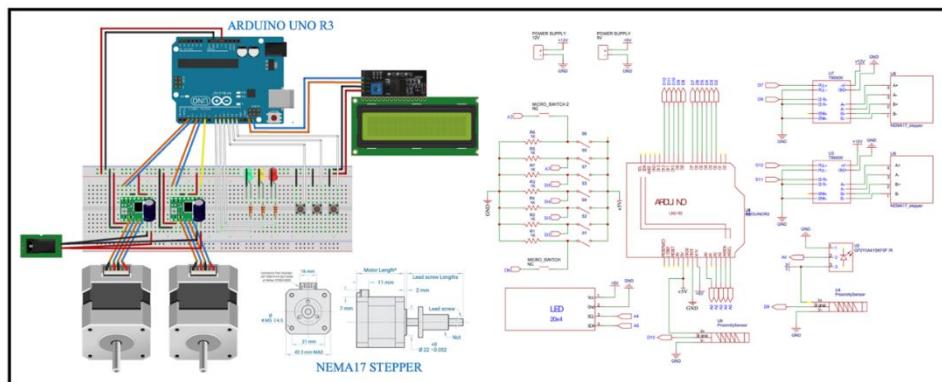
Gambar 2. Skema eksperimen Spektroskopi Gamma awal di Lab. Fisika Atom Inti, UGM

Tahap awal yaitu desain kontainer zat radioaktif yang ditunjukkan pada Gambar 3,

dan desain elektronik ditunjukkan pada Gambar 4 berikut:



Gambar 3. Desain kontainer zat radioaktif



Gambar 4. Diagram blok dan skema sistem kendali

c. Tahap Pengembangan

Pengembangan prototipe ini dengan otomatisasi pergerakan sampel dengan melakukan pemrograman Arduino menggunakan IDE. Pemilihan hardware dan software yang sesuai pada bagian robotik dan implementasi penerapannya untuk disimulasikan (Jalden et.al, 2018).

d. Tahap pengujian

Pengujian yang dilakukan sesuai dengan ruang lingkup kegiatan, dan menggunakan alat standar dan metode yang dapat tertelusur sesuai dengan standar yang berlaku (BSN, 2018). Pengujian keamanan dari bahaya

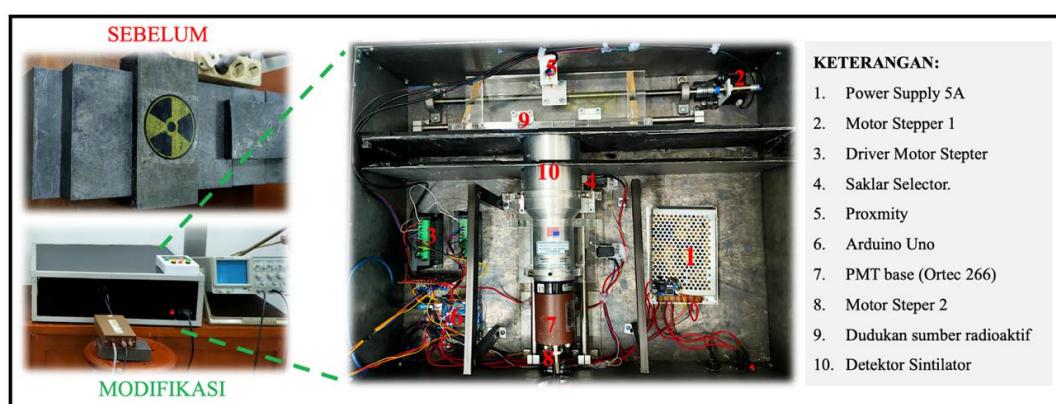
paparan radiasi dilakukan pada semua sisi sekat dinding penahanan (shielding) baik di dalam ataupun di luar box chamber. Sekat pelindung antara tempat penyimpanan zat radioaktif ke detektor, ruang kendali dilakukan pengujian kebocoran paparan radiasi untuk memastikan keamanan pengguna saat melakukan penelitian/praktikum. Catu daya juga diuji untuk memastikan input dan output tegangan yang sesuai yang dibutuhkan. Sedangkan untuk pengujian robot otomatisasi dilakukan dari sistem kontrol dengan melakukan uji gerakan motor, akurasi pergeseran sampel sumber zat radioaktif dengan sampel pengganti sumber radiasi. Pengujian uji kebocoran paparan radiasi

menggunakan surveymeter "RANGER". Selain itu, dilakukan dilakukan pengujian eksperimen spektroskopi gamma dengan menggunakan sampel zat radioaktif ^{137}Cs , ^{60}Co dan ^{22}Na .

HASIL DAN PEMBAHASAN

Chamber zat radioaktif otomatis untuk pengembangan eksperimen spektroskopi gamma, seperti pada Gambar 5 telah berhasil dibuat. Bahan dinding terbuat dari akrilik setebal 10 mm dan 5 mm, dilapisi lembaran timbal 1 mm pada bagian dalam. Dimensi ukuran chamber luar $610 \times 500 \times 200$ mm. Bagian dalam chamber meliputi ruang penyimpanan zat radioaktif/kontainer $600 \times 130 \times 200$ mm sekaligus untuk ruang pergantian sumber radiasi (^{137}Cs , ^{60}Co dan ^{22}Na). Ruang penyimpanan dilengkapi robot pemindah barang dengan system penggerak motor stepper NEMA 17 sebagai pengganti kerja manusia. Ruang selanjutnya pembatas

(shielding) antara ruang penyimpanan dengan ruang lainnya berukuran $600 \times 70 \times 200$ mm bahan akrilik 5 mm dilapisi Pb setebal 2 mm sebagai pembatas dan penyangga tutup kontainer. Ruang kontrol berukuran $310 \times 160 \times 200$ mm terdapat mikrokontroler (Arduino Uno dan driver motor). Bagian detektor berukuran $310 \times 230 \times 200$ mm ntuk meletakan detektor scintillator NaTl dilengkapi dengan prototipe robot pemindah barang sebagai otomatisasi pergeseran detektor. Bagian catu daya berukuran $310 \times 210 \times 200$ mm sebagai tempat meletakan power supply dan kabel kontrol yang dihubungkan ke sumber control dan rangkaian bok kendali. Bagian terakhir ruang kendali berukuran $140 \times 110 \times 30$ mm sebagai tempat meletakan sistem kendali sekaligus pengirim sinyal untuk penggantian sumber radiasi dan pergeseran detektor serta layar LCD sebagai penampil jarak serta posisi sampel.



Gambar 5. Kontainer zat radioaktif sebelum (kiri) dan sesudah dimodifikasi (kanan)

Prinsip kerja perpindahan sumber radiasi dan pergeseran detektor di dalam kontainer ini menggunakan teknologi prototipe robot pemindah barang dengan otomatisasi

mikrokontroler Arduino uno R3. Terpasang 2 sensor proximity sebagai pengatur batas posisi sumber yang akan diuji, posisi awal dan penetuan jarak antar sumber sebagai acuan

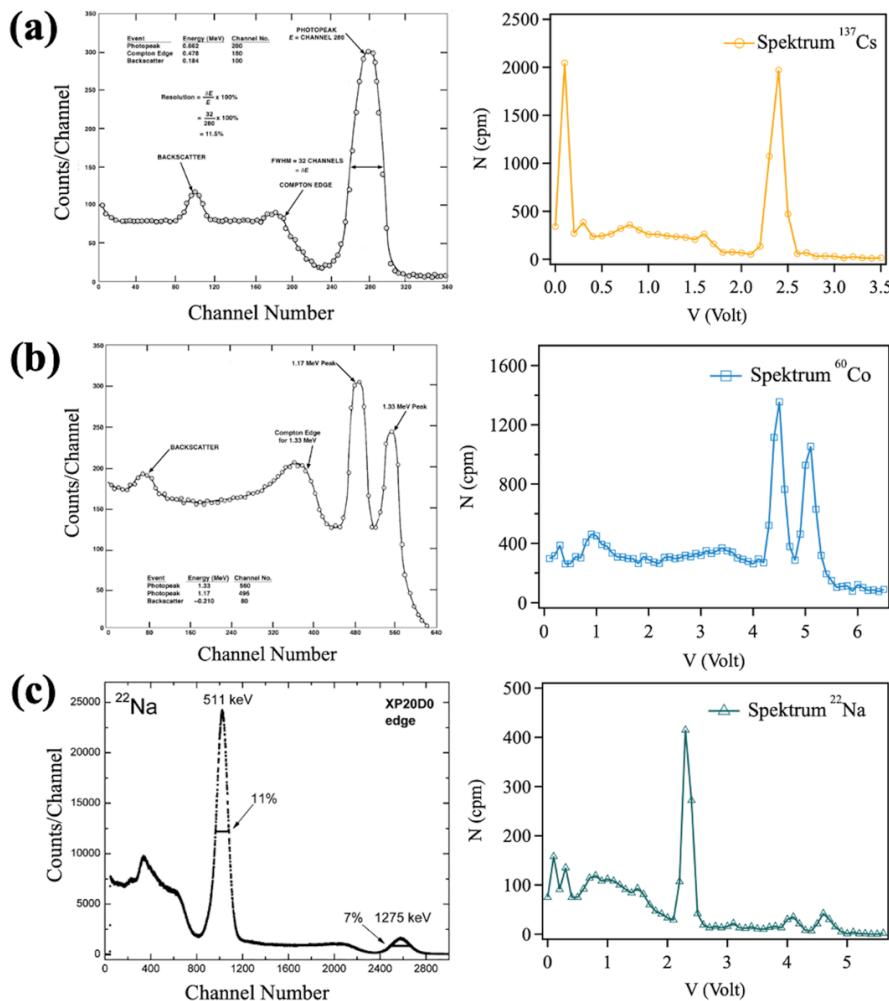
perpindahan (Tsui dan Kahuma, 2020). Saklar limit switch yang dipasang pada prototipe robot pemindah barang di ruang detektor berfungsi sebagai pembatas jarak pergeseran detektor. Aktuator robot menggunakan 2 unit motor stepper NEMA 17 yang dikendalikan oleh 1 chip mikrokontroler Arduino uno R3. Dimana fungsi motor stepper 1 digunakan untuk mengambil dan menyimpan sumber radiasi di dalam ruang penyimpanan bagian dari ruang kontainer, kemudian motor stepper 2 difungsikan sebagai pengatur jarak permukaan detektor scintillator (NaI(Tl)) dengan sumber radiasi yang akan diuji. Tombol kontrol pada luar cassing digunakan untuk memberi perintah/sinyal untuk menggerakan motor selain tombol juga dipasang LCD sebagai tampilan informasi sumber yang akan diuji dan jarak pergeseran detektor.

Pengujian laju paparan radiasi disekitar kontainer dilakukan pada berbagai posisi untuk membandingkan kebocoran bahaya radiasi diantara kedua kontainer yang ditampilkan

pada Tabel 1. Pengujian dilakukan di Lab. Fisika Atom dan Inti, UGM dengan menggunakan 3 jenis surveymeter gamma (Ranger SN 05126; No. sertifikat kalibrasi: 4932/KN 04 02/KMR 5.1/10/2021; faktor kalibrasi: 0,93 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ dan ketidakpastian: 7,9%) yang telah terkalibrasi oleh Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) untuk memastikan hasil pengujian yang lebih baik dan akurat. Dapat ditunjukkan bahwa kontainer baru dapat mengurangi kebocoran bahaya radiasi sekitar 70 - 77% dengan nilai dibawah 0,22 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ dibandingkan kontainer lama yang masih dapat menyentuh nilai 0,98 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ pada jarak 1 m atau lebih dari kontainer. Hal ini menunjukkan bahwa kontainer baru dapat memastikan keamanan pengguna (mahasiswa, laboran, dosen) dan masyarakat umum yang berada disekitar kontainer maupun di dalam ruang eksperimen dikarenakan laju paparan radiasi serupa dengan cacaht latar dan memenuhi nilai batas yang telah ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).

Tabel 1. Uji kebocoran bahaya radiasi oleh sumber bahan zat radioaktif

Posisi	Laju Paparan Radiasi ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)			
	Kontainer Lama		Kontainer Baru	
	Menempel	Jarak 1 m	Menempel	Jarak 1 m
Atas	0,56	0,56	0,56	-
Bawah	0,66	0,66	0,66	0,20
Depan	0,98	0,98	0,98	0,22
Belakang	0,46	0,46	0,46	0,14
Kanan	0,81	0,81	0,81	0,19
Kiri	0,60	0,60	0,60	0,18



Gambar 6. Spektrum zat radioaktif referensi (kiri) dan hasil pengujian (kanan) untuk bahan: (a) ^{137}Cs , (b) ^{60}Co dan (c) ^{22}Na

Pengujian pengambilan data dilakukan untuk memastikan bahwa bahan sumber zat radioaktif telah berada pada posisi yang semestinya dari detektor scintillator NaI(Tl). Pengujian memerlukan keakuratan dalam pembacaan data sehingga dilakukan uji validasi dengan membandingkan spektrum yang dibaca menggunakan kontainer baru dengan spektrum referensi. Perbandingan antara kedua spektrum untuk bahan Cesium (^{137}Cs), Cobalt (^{60}Co) dan Natrium (^{22}Na) ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa

spektrum yang dibaca telah menunjukkan pola yang serupa jika dibandingkan dengan spektrum referensi untuk ketiga bahan sumber zat radioaktif (Meijer et.al, 2019). Adanya sedikit perbedaan diantara kedua spektrum diakibatkan oleh sifat paparan radiasi yang acak dan menyebar. Spektrum diperoleh dari x kali pengulangan untuk setiap bahan sumber zat radioaktif dengan x kali variasi jarak terhadap detektor scintillator NaI(Tl). Spektrum pada bahan ^{137}Cs memiliki satu puncak tenaga utama sedangkan pada bahan ^{60}Co dan ^{22}Na memiliki

dua puncak tenaga jika menyesuaikan spektrum referensi untuk tenaga yang sesuai dengan banyak energi yang dimilikinya.

Hasil pengujian menunjukkan adanya noise yang cukup besar untuk bahan ^{137}Cs yang menyebabkan seolah muncul satu puncak tenaga lainnya pada posisi awal spektrum. Namun, noise tersebut masih dapat dikatakan dalam batas wajar dikarenakan tidak mengurangi secara signifikan intensitas dari puncak tenaga utama. Secara keseluruhan, spektrum yang dibaca menggunakan kontainer baru dengan detektor scintillator NaI(Tl) mampu menampilkan jumlah puncak tenaga yang cukup baik dikarenakan perbandingan jumlah noise terhadap jumlah cacah spektrum tenaga yang relatif kecil. Hal ini juga menunjukkan bahwa spektrum yang dihasilkan memiliki ralat yang cukup kecil sehingga dapat diasumsikan sebagai tempat penyimpanan yang aman untuk bahan sumber zat radioaktif dalam jangka waktu yang panjang serta memenuhi syarat standar keamanan dan keselamatan dari BAPETEN.

Pengujian efisiensi juga dilakukan untuk memastikan bahwa pembuatan prototipe kontainer zat radioaktif lebih efektif dan efisien yaitu mengurangi waktu dalam pemindahan (pengambilan dan pengembalian) sampel bahan sumber zat radioaktif. Pengujian dilakukan pada eksperimen Spektroskopi Gamma. Selama ini, waktu yang disediakan untuk pelaksanaan praktikum adalah 180 menit (3 jam) dimana sekitar 20 menit dari total waktu tersebut digunakan untuk proses pemindahan sampel bahan sumber zat radioaktif. Penggunaan

kontainer baru yang telah dilengkapi dengan prototipe teknologi robot lengan mampu meningkatkan efisiensi waktu sekitar 11% dari total alokasi waktu yang diberikan jika menggunakan kontainer lama. Hal ini menjadi nilai tambah dalam penggunaan kontainer baru selain juga tentunya turut mengurangi resiko kecelakaan kerja serta kebocoran bahaya radiasi ketika proses pemindahan sampel bahan sumber zat radioaktif. Efisiensi waktu yang dihasilkan oleh kontainer baru dapat menjadi tambahan waktu untuk proses lain ketika praktikum berlangsung, seperti pengulangan ataupun analisa data.

SIMPULAN

Telah berhasil dilakukan pembuatan kontainer zat radioaktif otomatis untuk pengembangan eksperimen Spektroskopi Gamma secara efektif dan efisien menggunakan mikrokontroler. Hasil pengujian paparan radioaktif terbukti mengurangi kebocoran bahaya radiasi sekitar 70 - 77% dengan nilai dibawah $0,22 \mu\text{Sv h}^{-1}$ dibandingkan kontainer lama yang masih dapat menyentuh nilai $0,98 \mu\text{Sv h}^{-1}$ pada jarak 1 m atau lebih dari kontainer. Estimasi efisiensi waktu praktikum 11% lebih cepat dari sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Baskan, H., Suparno. 2019. *Nondestructive Testing Handbook Uji Radigrafi*. BATAN. Jakarta.
- [2] AN34 Experiments in Nuclear Science Laboratory Manual Fourth Edition. 1987. EG &G. USA.

- [3] Republik Indonesia. (1997) Undang-undang Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Setneg, Jakarta.
- [4] Republik Indonesia. (2007). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2007 tentang Keselamatan radiasi pengion dan keamanan sumber radioaktif. Jakarta.
- [5] Republik Indonesia. (2008) Peraturan Pemerintah Nomor 29 Tahun 2008 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir, Setneg, Jakarta.
- [6] IAEA. (2020). Standards Series No. SSG.58, Safety standards for protecting people and the environment- Radiation Safety in the Use of Nuclear Gauges. Viena.
- [7] A.P. Utami. (2019). Implementasi Manajemen Keselamatan Radiasi Sinar-X Di Laboratorium Radiologi Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta. Jurnal Imejing Diagnostik. Vol.5 No.1.
- [8] Sumanto, J., Bachtiar, S., & Jalil, A. (2013). Kajian Kinerja Sistem Deteksi Antara Detektor NaI(Tl) Dan CsI(Tl) untuk Perangkat Renograf Portabel Jinjing. PRIMA-Aplikasi Dan Rekayasa Dalam Bidang Iptek Nuklir, 8(2), 63-72.
- [9]. Tsitsimpelis, Ioannis, dkk. (2021). Simultaneous, Robot-Compatible γ -Ray Spectroscopy and Imaging of an Operating Nuclear Reactor. IEEE Sensors Journal. Vol. 21. No. 4.
- [10] A. Saefullah, D. Immaniar dan R.A. Juliansah. 2015. Sistem Kendali Robot Pemindah Barang Menggunakan Aplikasi Android Berbasis Arduino Uno. Vol.8 No. 2.A
- [11] H. Amrillah, H. Sunardi dan Zulkifli. (2015). Sitem Kendali Robot Pengintai Menggunakan Kontrol Komputer Berbasis Mikrokontroller Arduino. Jurnal Informatika Global, Vol.6 No.
- [12] I. Tabroni dan M. Munir. (2017). Prototype Omnidirectional Wheel And Robot Arm Based Microcontroller Atmega 1284 And Joystick. E-JPTE (Jurnal Elektronik Pendidikan Teknik Elektronika), Vol. 6, halaman 24-32.
- [13] Rezki Setiawan dan Rachmat Ramdani. (2020). Prototype Switch Otomatis pada Kamera Gamma dengan Pengendali Jarak Jauh Berbasis Arduino. Jurnal Teknologi Industri Vol.9.
- [14] Muis, Saludin. (2011). *Prinsip Dasar Cara Kerja Robot*, Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [15] Badamasi, Y.A. (2014). The Working Principle Of An Arduino, IEEE Explore.
- [16] Branch, R. M. (2009). *Instructional Design : The ADDIE Approach*. Springer.
- [17] Jalden, Joachim, dkk. (2018). Using The Arduino Due For Teaching Digital Signal Processing. IEEE Explore.

- [18] BSN. (2018). SNI ISO IEC 17025:2017 Persyaratan Umum Kompetensi Laboratorium Pengujian dan Kalibrasi. Jakarta.
- [19] Tsuji dan Kahuma, (2020). Proximity and Contact Sensor for Human Cooperative Robot by Combining Time-of-Flight and Self-Capacitance Sensors. IEEE Sensors Journal. Vol. 20. No. 10.
- [20] Robert J. de Meijer, dkk. (2019). Measured and simulated spectra for a ^{22}Na source in a well counter. Springer.