



KL-013

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANTAU RADIASI KONTAMINASI UDARA RADON DAN THORON *ONLINE*

DEVELOPMENT OF ONLINE RADIATION MONITORING SYSTEM ON RADON (^{222}Rn) AND THORON (^{220}Rn) AIR CONTAMINATION

Adi Wijayanto

ABSTRAK

Kebanyakan orang menghabiskan waktu di dalam ruangan kerja di mana tingkat polutan berbahaya sering kali jauh lebih tinggi daripada di dalam rumah. Radon (^{222}Rn) dan thoron (^{220}Rn) adalah polutan radioaktif. Radioisotop ini merupakan sumber utama radiasi pengion. Radon (^{222}Rn) termasuk dalam kelompok gas mulia dan radioaktif. Paparan radon jangka panjang dapat meningkatkan risiko kanker paru-paru. Untuk mengetahui tingkat kontaminasi udara radon (^{222}Rn) dan thoron (^{220}Rn) diperlukan sistem pemantau radiasi kontaminasi *online* agar dapat dipantau setiap saat sebelum pekerja memasuki ruang kerja. Di samping itu, pemantauan *online* juga untuk mengetahui dampak sistem ventilasi udara terhadap tingkat konsentrasi radon dan thoron yang berkontribusi terhadap dosis efektif bagi pekerja. Alat yang digunakan dalam pengukuran radon adalah RAD7. RAD7 diintegrasikan ke dalam sistem pemantau radiasi *online* yang ada di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3). Hasil integrasi didapatkan hasil yang sesuai dengan pengukuran secara manual. Hasil pengukuran radon (indoor) menunjukkan A - Radon Sniffer Mode Counts (Po-218) 60%, B - Thoron 1 Windows (Po-216) 40%, C - Radon Counts (Po-214) 0%, D - Thoron 2 Windows (Po-212) 0%, konsentrasi radon $96 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$. Hasil pengukuran radon di udara, menunjukkan bahwa konsentrasi radon di ruang perkantoran di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) di bawah 300 Bq/m^3 sehingga masih aman untuk bekerja.

Kata Kunci: Radon (^{222}Rn); Thoron (^{220}Rn); Kontaminasi Udara; RAD7; Sistem *Online*.

ABSTRACT

Most people spend time indoors, where levels of harmful pollutants are often much higher than staying at home. Radon (^{222}Rn) and Thoron (^{220}Rn) are radioactive pollutants. These radioisotopes are major source of ionizing radiation. Radon (^{222}Rn) belongs to the group of noble and radioactive gases. Long-term exposure to radon can increase the risk of lung cancer. To determine the level of air contamination

A. Wijayanto

*Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN, e-mail: adiw004@brin.go.id

@ Penerbit BRIN"

A. Wijayanto, "Pengembangan sistem pemantau radiasi kontaminasi udara radon dan thoron *online*," Dalam *Prosiding Seminar APISORA 2021 "Peran Isotop dan Radiasi untuk Indonesia yang Berdaya Saing,"* T. Wahyono, A. Citraresmini, D. P. Rahayu, Oktaviani, dan N. Robifahmi, Eds. Jakarta: Penerbit BRIN, November 2023, ch. 27, pp. 273–282, DOI: 10.55981/brin.690.c668, E-ISBN: 978-623-8372-02-7



of radon (^{222}Rn) and thoron (^{220}Rn), an online radiation contamination monitoring system is needed so that it can be monitored at any time before workers enter the workspace. In addition, the online system are also for determining the impact of the air ventilation system on the level of radon and thoron concentrations that contribute to the effective dose for workers. The tool used in measuring radon is RAD7. RAD7 is integrated into the online radiation monitoring system at the Radioactive Waste Installation (RWI) and the Transfer Channel-Interim Storage for Spent Fuel (KH-IPSB3). The result of the integration was obtained in accordance with manual measurements. Radon measurement results show A - Radon Sniffer Mode Counts (Po-218) 60%, B - Thoron 1 Windows (Po-216) 40%, C - Radon Counts (Po-214) 0%, D - Thoron 2 Windows (Po -212) 0%, radon concentration $96 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$. The result of measurements in the air shows that the concentration of radon in the office space at PTLR is below 300 Bq/m^3 , so it is still safe to work.

Keywords: Radon (^{222}Rn); Thoron (^{220}Rn); Air Contamination; RAD7; Online System.

PENDAHULUAN

Berdasarkan Undang-Undang No. 10/1997 tentang Ketenaganukliran dan Peraturan Pemerintah No. 61 Tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif, kegiatan pengelolaan limbah radioaktif di Indonesia dilaksanakan oleh Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN) yang selanjutnya menjadi Tugas dan Fungsi **Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR)** yang saat ini menjadi Pusat Riset dan Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTL-RBRIN) [1]. Pengelolaan limbah radioaktif merupakan kegiatan yang mencakup pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan sementara, dan penyimpanan lestari. Pengelolaan limbah radioaktif tersebut memiliki potensi kontaminasi udara, untuk itu perlu dilakukan kegiatan pengukuran tingkat kontaminasi atau konsentrasi udara terutama radon dan thoron [2].

Setiap tempat kerja selalu mengandung berbagai potensi bahaya yang dapat memengaruhi kesehatan tenaga kerja atau dapat menyebabkan timbulnya penyakit akibat kerja. Potensi bahaya adalah segala sesuatu yang berpotensi menyebabkan terjadinya kerugian, kerusakan, cedera, sakit, kecelakaan, atau bahkan dapat mengakibatkan kematian yang berhubungan dengan proses dan sistem kerja. Undang-Undang No 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja pada Pasal 1 menyatakan bahwa tempat kerja adalah tiap ruangan atau lapangan, tertutup atau terbuka, bergerak atau tetap, di mana tenaga kerja, atau yang sering dimasuki tenaga kerja untuk keperluan suatu usaha, dan di mana terdapat sumber-sumber bahaya. Salah satu potensi bahaya yang dapat mengakibatkan masalah kesehatan adalah keberadaan gas radon di udara pada tempat kerja [3].

Radon adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang Rn dan nomor atom 86. Radon ditemukan pertama kali oleh Friedrich Ernst Dorn (27 Juli 1848–16 Desember 1916) yang merupakan seorang fisikawan dari Jerman. Radon juga termasuk dalam kelompok gas mulia dan radioaktif. Radon terbentuk dari penguraian radium. Radon juga gas yang paling berat dan berbahaya bagi kesehatan. ^{222}Rn



mempunyai waktu paruh 3,8 hari dan dapat digunakan dalam radioterapi. Radon dapat menyebabkan kanker paru-paru, dan sebagai penyebab atas 20.000 kematian di Uni Eropa setiap tahunnya [4]. Keberadaan radon di lingkungan tidak bisa dipisahkan dari thoron [5]. Selain banyak berasal dari lingkungan, gas radon juga dapat berasal dari bangunan yang ada di sekitar ruangan, di mana konsentrasi radon di dalam ruangan tersebut dapat dipengaruhi oleh kondisi, bentuk dan material/bahan bangunan. Konsentrasi radon dan thoron dalam ruangan dipengaruhi oleh sistem tata udara, baik sistem ventilasi atau *VAC off gas*. Efek dari dosis radiasi serendah apapun selalu terdapat kemungkinan untuk menimbulkan perubahan pada sistem biologik, baik pada tingkat molekul maupun sel. Dengan demikian, radiasi dapat pula tidak membunuh sel, tetapi mengubah sel. Sel yang mengalami modifikasi atau sel yang berubah ini mempunyai peluang untuk lolos dari sistem pertahanan tubuh atau malah menjadi lebih kuat. Modifikasi sel ini akan terjadi secara acak dan tanpa dosis ambang dan akan muncul setelah melewati waktu yang cukup lama. Jalur radon yang masuk ke tubuh manusia yang akan meradiasi paru-paru [5].

Pengendalian keselamatan dalam pengelolaan limbah radioaktif dilakukan melalui pemantauan parameter operasi dengan peralatan yang terpasang di IPLR salah satunya dengan monitor tingkat kontaminasi udara radon dan thoron. Sistem pemantau tingkat kontaminasi udara radon dan thoron ini menggunakan perangkat RAD7 untuk pemantauan di IPLR dan KH-IPSB3. Data dari RAD7 tersebut perlu diintegrasikan ke dalam sistem pemantau radiasi *online* terpusat sehingga data tersebut dapat ditampilkan dalam display secara *realtime* dan dapat diakses secara langsung oleh pekerja radiasi. Data dari pemantauan radon dan thoron ini dapat dijadikan informasi dini (*Early Warning System*) kepada pekerja radiasi [6].

Oleh karena itu, pengendalian radon di ruang kerja perlu dilakukan, guna mencegah peluang terjadinya masalah kesehatan akibat radiasi dari gas radon. Pengendalian radon di dalam ruangan sebaiknya dimulai dari perencanaan pembangunan suatu gedung atau bangunan. Selain itu, diperlukan sistem pemantau radiasi secara *online* yang dapat dipantau setiap saat. Dalam makalah ini dibahas tentang pengembangan sistem pemantau radiasi radon dan thoron *online* dengan menggunakan Raspberry PI 3B+. Pengukuran radon dan thoron *online* ini suatu hal yang baru dengan mengikuti perkembangan teknologi *Internet of Things* pada era Revolusi Industri 4.0. Selain itu, juga dibahas Integrasi data ke dalam Radiation Monitoring Sistem (Radmon) dan cara mengestimasi dosis efektif terhadap pekerja dari pengukuran konsentrasi radon dan thoron tersebut.

METODE

Bahan dan Alat

Alat yang digunakan dalam pengukuran radon adalah RAD7 Radon Thoron Monitor. RAD7 diintegrasikan ke dalam sistem pemantau radiasi *online* yang ada di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan



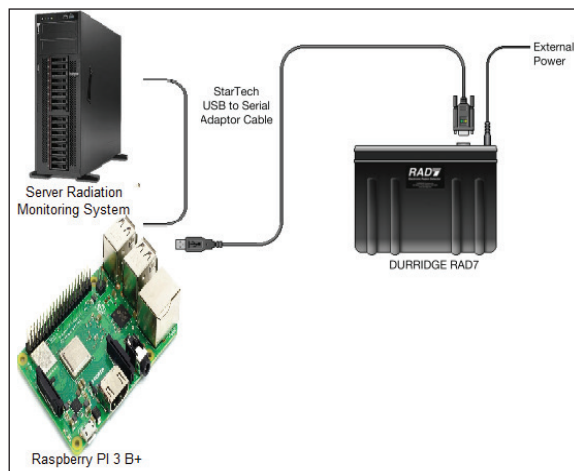
Sementara Bahan Bakar Bekas (KH-IPSB3) [7]. Pengukuran konsentrasi radon dan thoron dapat dilakukan *indoor* maupun *outdoor*. RAD7 Radon Thoron Monitor ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. RAD 7 Radon Thoron Monitor [8]

Tata Kerja

Salah satu cara untuk mengetahui tingkat konsentrasi radon dan thoron yang berkontribusi terhadap dosis efektif pada Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dilakukan dengan metode aktif, yaitu dilakukan dengan menggunakan alat yang secara langsung dapat membaca konsentrasi radon dan thoron yang diukur secara *realtime* dan *online*. RAD7 mengirimkan data serial ke Raspberry PI 3B+ sebagai *node*, kemudian data dikirim ke server *Radiation Monitoring Sistem* (Radmon) secara *realtime*. Data tersebut diintegrasikan ke dalam tampilan *Radiation Monitoring Sistem* (Radmon). Teknik antar muka untuk pengambilan data RAD7 yang terintegrasi dengan Server Radmon dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Teknik Antarmuka Pengambilan Data RAD7 Terintegrasi dengan Server Radmon [8]



Dengan memberikan perintah pada komunikasi serial “Special ComAll”, dengan baudrate 9600 bps, data bits 8 bits, parity bit none, stop bits 1 bit. Data yang diterima dengan format 009,99,10,29,04,18,4823.,337.8,45.4, 2.9,46.6,0.3, 2201,14, 23.7, 5, 7, 7.09, 00, 125, 28.32743, .8500846, 255. Mengartikan nilai-nilai yang dimaksud, dijelaskan dalam Gambar 3.

ID	Field Name	Notes
1	Record Number	Ranges from 001 to 999
2	Year	2 digit value
3	Month	2 digit value
4	Day	2 digit value
5	Hour	2 digit value
6	Minute	2 digit value
7	Total Counts	Integer indicating total counts recorded during test
8	Live Time	Expressed in minutes
9	Percent of total counts in win. A	These 4 windows will not always add up to 100% since counts can come into channels below or above these windows.
10	Percent of total counts in win. B	
11	Percent of total counts in win. C	
12	Percent of total counts in win. D	
13	High Voltage Level	Ranges from 2200V to 2300V
14	High Voltage Duty Cycle	Ranges from 0-100%; typically 10-20%
15	Temperature	Measured in °C or °F depending on RAD7 setup
16	Relative humidity of sampled air	Should be kept below 10% for most accurate test
17	Leakage Current	Ranges from 0 to 255. Above 20 is cause for concern.
18	Battery Voltage	Below 6.00V is a discharged battery. Does not affect accuracy of test but indicates need for recharge.
19	Pump Current	Ranges from 0-260mA. Typically 40-80mA; Above 100mA possible clogged filter or obstruction.
20	Flags Byte	This is a number between 0 and 255 which represents one data byte consisting of eight individual bits: Bits 0 and 1 indicate the pump state: either Off (0,0), On (0,1), Timed (1,0), or Grab (1,1). Bit 2 is not defined. Bit 3 indicates whether Thoron is On, in which case the thoron reading appears on the end-of-cycle printout. Bits 4 and 5 indicate the measurement type: either Radon in Air (0,0), Wat-40 (1,0), or WAT250 (1,1). Bit 6 indicates whether the RAD7 is in Auto mode, meaning it changes from SNIFF to NORMAL after the first 3 hours. Bit 7 indicates whether the RAD7 is in SNIFF mode.
21	Radon concentration	Expressed in pCi/L, Bq/m ³ , cpm, or # counts, depending on the units the RAD7 has been set to use.
22	Radon concentration uncertainty	The two-sigma uncertainty of the radon concentration, expressed in the same units as the base value.
23	Units Byte	This is a number between 0 and 255 which represents one data byte consisting of eight individual bits: Bits 0 and 1 indicate the concentration unit: either Bq/m ³ (0,1), pCi/L (1,1), counts per minute (0,0), or total number of counts (1,0). Bit 2 through Bit 6 are not defined. Bit 7 indicates the temperature unit used on printer output, either Celsius (1) or Fahrenheit (0).

Gambar 3. RAD7 Data Record Content [8]



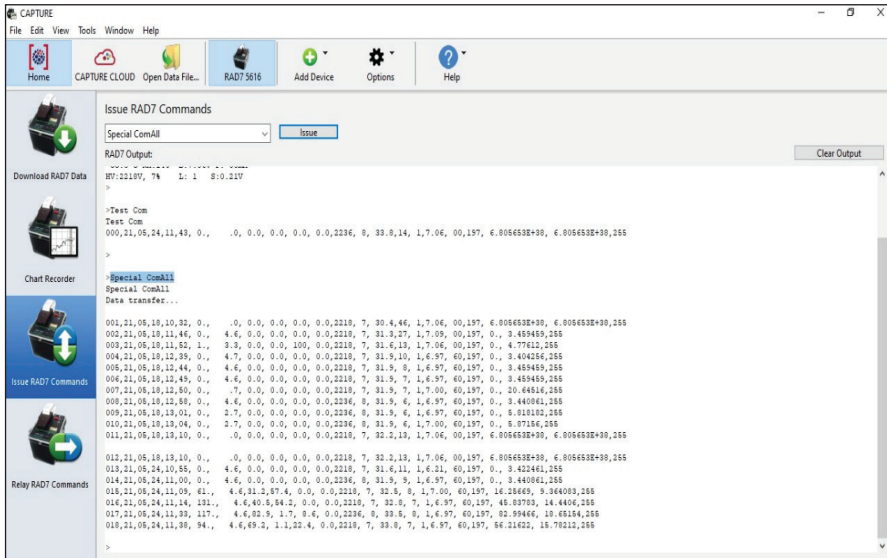
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data RAD7 yang telah diintegrasikan dipanggil dengan memberikan perintah pada komunikasi serial "Special ComAll" data yang dihasilkan sebagai berikut.

```
Special ComAll
Special ComAll
Data transfer...
R01,21,05,18,10,32, 0., 0, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 30,4,46, 1,7,06, 00,197, 6,805653E+38, 6,805653E+38,255
R02,21,05,18,11,46, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,3,27, 1,7,09, 00,197, 0., 3,459459,255
R03,21,05,18,11,52, 1., 3,3, 0,0, 0,0, 1000, 0,0,2218, 7, 31,6,13, 1,7,06, 00,197, 0., 4,77612,255
R04,21,05,18,12,39, 0., 4,7, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,9,10, 1,6,97, 60,197, 0., 3,404256,255
R05,21,05,18,12,44, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,9, 8, 1,6,97, 60,197, 0., 3,459459,255
R06,21,05,18,12,49, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,9, 7, 1,6,97, 60,197, 0., 3,459459,255
R07,21,05,18,12,50, 0., 7, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,9, 7, 1,7,00, 60,197, 0., 20,64516,255
R08,21,05,18,12,58, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2236, 8, 31,9, 6, 1,6,97, 60,197, 0., 3,440861,255
R09,21,05,18,13,01, 0., 2,7, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2236, 8, 31,9, 6, 1,6,97, 60,197, 0., 5,818182,255
R10,21,05,18,13,04, 0., 2,7, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2236, 8, 31,9, 6, 1,7,00, 60,197, 0., 5,87154,255
R11,21,05,18,13,10, 0., 0, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 32,2,13, 1,7,06, 00,197, 6,805653E+38, 6,805653E+38,255
R12,21,05,18,13,10, 0., 0, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 32,2,13, 1,7,06, 00,197, 6,805653E+38, 6,805653E+38,255
R13,21,05,24,10,55, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2218, 7, 31,6,11, 1,6,21, 60,197, 0., 3,422461,255
R14,21,05,24,11,00, 0., 4,6, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0,2236, 8, 31,9, 9, 1,6,97, 60,197, 0., 3,440861,255
R15,21,05,24,11,09, 61., 4,6,31,3,57,4, 0,0, 0,0,2218, 7, 32,5, 8, 1,7,00, 60,197, 15,25469, 9,364887,255
R16,21,05,24,11,14, 131., 4,6,69,5,54,2, 0,0, 0,0,2218, 7, 32,8, 7, 1,6,97, 60,197, 45,83783, 14,4406,255
R17,21,05,24,11,33, 117., 4,6,82,9, 1,7, 8,6, 0,0,2236, 8, 33,5, 8, 1,6,97, 60,197, 82,99466, 18,65154,255
R18,21,05,24,11,38, 94., 4,6,69,2, 1,1,22,4, 0,0,2218, 7, 33,0, 7, 1,6,97, 60,197, 56,21622, 15,78212,255
```

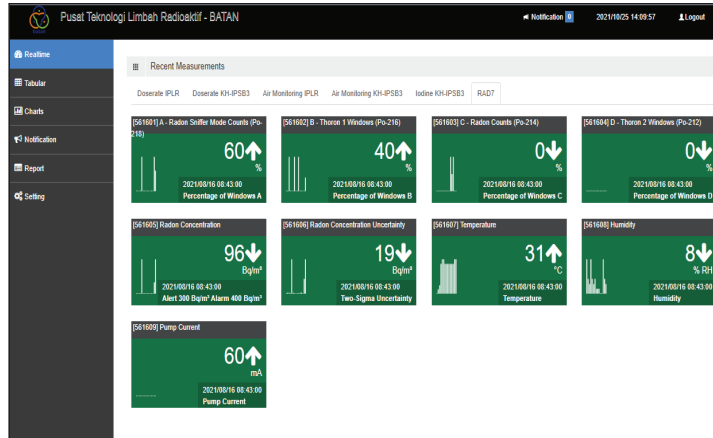
Gambar 4. Pengambilan Data RAD7 Menggunakan Com Port

Kemudian, data tersebut diverifikasi dengan software aplikasi bawaan alat RAD7, yaitu *CAPTURE*. Setelah diverifikasi hasil tersebut adalah sama. Data RAD7 pada saat pengambilan menggunakan *CAPTURE* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengambilan Data RAD7 Menggunakan Aplikasi *CAPTURE*

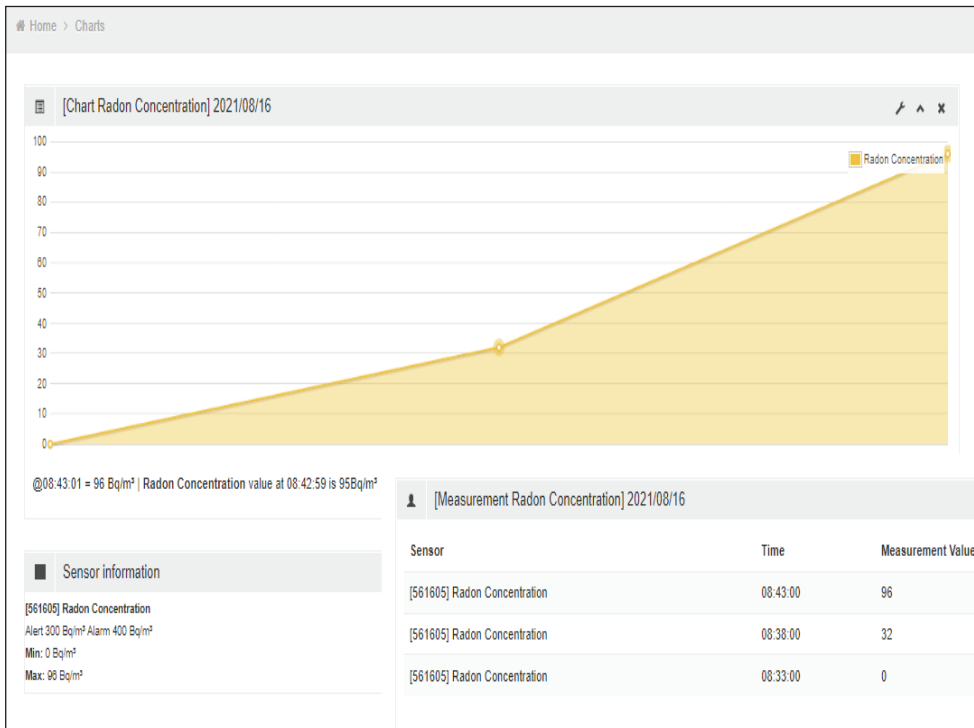
Pengambilan data dilakukan menggunakan Raspberry PI 3 B+ dengan menggunakan metode RESTful API JSON. Data yang dihasilkan ditampilkan ke dalam Radiation Monitoring System (Radmon) pada Gambar 6 sebagai berikut.



Gambar 6. Pengambilan Data RAD7 Menggunakan Raspberry PI 3B+

Hasil integrasi didapatkan hasil yang sama pengukuran secara manual. Hasil pengukuran radon menunjukkan *A - Radon Sniffer Mode Counts (Po-218) 60%*, *B - Thoron 1 Windows (Po-216) 40%*, *C - Radon Counts (Po-214) 0%*, *D - Thoron 2 Windows (Po-212) 0%*, *Radon Concentration $96 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$* .

Data pengukuran radon dapat dilihat secara grafik sebagai berikut.



Gambar 7. Pengambilan Data RAD7 menggunakan Raspberry PI 3B+ secara Grafik



Dari hasil pengukuran radon *indoor* berdasarkan grafik pada Gambar 7, konsentrasi radon berkisar antara 0 Bq/m³–96 Bq/m³. Batasan yang ditetapkan ICRP dan IAEA untuk radon di sajikan dalam Tabel 1. Oleh karena itu, ORTN mengikuti peraturan terbaru, yaitu IAEA GSR Part 3 (2014) dan ICRP 126 (2014) dengan batasan radon *indoor* 300 Bq/m³, *outdoor* 1000 Bq/m³. Dari hasil pengukuran radon di udara, menunjukkan bahwa konsentrasi radon di ruang perkantoran di PTLR sekitar 96 Bq/m³ di bawah 300 Bq/m³ sehingga masih aman untuk bekerja.

Tabel 1. Batasan Radon *Indoor* dan *Outdoor* Sesuai Rekomendasi Peraturan Internasional

Rekomendasi Internasional	Batasan Radon <i>Indoor</i>	Batasan Radon <i>Outdoor</i>
ICRP 103(2007)	600 Bq/m ³ [9]	1500 Bq/m ³ [9]
ICRP 126 (2014) revision of ICRP 103(2007)	300 Bq/m ³ [10]	1000 Bq/m ³ [10]
IAEA GSR Part 3 (2014)	300 Bq/m ³ [11]	1000 Bq/m ³ [11]

Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi radon di ruang perkantoran (*indoor*) di PTLR – BATAN di bawah 300 Bq/m³ sehingga masih aman untuk bekerja dan risiko akibat pengaruh radon relatif kecil. Jika diketahui hasil pengukuran konsentrasi radon atau thoron di udara dalam bentuk konsentrasi maka untuk memperkirakan dosis efektif dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [12].

$$DR_n = F_k R_n \times FR_n \times T \times CR_n \text{ [mSv/tahun]} \quad (1)$$

dengan:

DR_n = Dosis efektif akibat menghirup Radon dan atau anak luruhnya [mSv/tahun]

$F_k R_n$ = Faktor kesetimbangan Radon dengan anak luruhnya (0.4) atau Thoron (0.02)

$F_k R_n$ = Faktor kesetimbangan Radon dengan anak luruhnya (0.4) atau Thoron (0.02)

FR_n = Faktor konversi dosis Radon $[9 \frac{nSv}{Bq} \cdot \frac{jam}{m^3}]$

FR_n = Faktor konversi dosis Radon $[9 \frac{nSv}{Bq} \cdot \frac{jam}{m^3}]$ atau Thoron $[40 \frac{nSv}{Bq} \cdot \frac{jam}{m^3}]$

Thoron $[40 \frac{nSv}{Bq} \cdot \frac{jam}{m^3}]$

T = Lama tinggal di dalam ruangan $[\frac{jam}{tahun}]$ T = Lama tinggal di dalam ruangan $[\frac{jam}{tahun}]$, jumlah jam kerja efektif 2000 jam dalam 1 tahun

CR_n = Konsentrasi gas Radon di dalam ruangan $[\frac{Bq}{m^3}]$

Besarnya nilai $F_k R_n$ tergantung dari laju ventilasi udara:



$F_k R_n$ Radon *Indoors* ≈ 0.4 , Thoron *Indoors* = 0.02 Sirkulasi alamiah

$F_k R_n$ Tambang ≈ 0.2 Sirkulasi dengan *blower*

$F_k R_n$ *Outdoors* $\approx 0.1 - 0.6$ Tergantung laju udara

Dari hasil pengukuran konsentrasi radon di udara dalam bentuk konsentrasi, maka untuk memperkirakan dosis dosis efektif dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut [12].

$$DR_n = F_k R_n \times FR_n \times T \times CR_n \text{ [mSv/tahun]} \quad (1)$$

Hasil estimasi dosis efektif tingkat konsentrasi radon menggunakan konsentrasi radon maksimal sebagai berikut.

$$DR_{n \text{ max}} = 0.4 \times 9 \frac{\text{nSv}}{\text{Bq}} \cdot \frac{\text{jam}}{\text{m}^3} \times 2000 \text{ jam} \times 30 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$$

$$DR_{n \text{ max}} = 0.4 \times 9 \frac{\text{nSv}}{\text{Bq}} \cdot \frac{\text{jam}}{\text{m}^3} \times 2000 \text{ jam} \times 96 \left[\frac{\text{Bq}}{\text{m}^3} \right]$$

$$DR_{n \text{ max}} = 0.216 \quad DR_{n \text{ max}} = 0.69 \text{ mSv/tahun}$$

Hasil estimasi dosis efektif dari konsentrasi radon (*indoor*) akibat pengaruh radon sekitar 0.69 mSv/ tahun, dengan jumlah jam kerja efektif 2000 jam dalam 1 tahun. Radon merupakan salah satu kontributor dosis dari radiasi alam yang cukup besar maka untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan, yaitu kanker paru-paru maka perlu dilakukan minimalisasi konsentrasi radon di dalam ruangan [13],[14]. Usaha yang paling memungkinkan dan yang dapat dilakukan adalah dengan mengoperasikan dan mengatur sistem ventilasi atau ventilasi udara *VAC off gas* sebaik mungkin [15],[16].

KESIMPULAN

Pengembangan sistem pemantau radiasi kontaminasi udara radon dan thoron *online* dilakukan dengan Raspberry PI 3B+ sebagai antarmuka dan dintegrasikan ke dalam *Radiation Monitoring System (Radmon)*. Hasil integrasi didapatkan hasil yang sesuai dengan pengukuran secara manual. Hasil pengukuran radon (*indoor*) menunjukkan A - Radon Sniffer Mode Counts (Po-218) 60%, B - Thoron 1 Windows (Po-216) 40%, C - Radon Counts (Po-214) 0%, D - Thoron 2 Windows (Po-212) 0%, Radon Concentration $96 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$. Dari hasil pengukuran radon di udara, menunjukkan bahwa konsentrasi radon di ruang perkantoran di PTLR di bawah 300 Bq/m^3 sehingga masih aman untuk bekerja.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Kepala Pusat Teknologi Limbah Radioaktif dan Kepala Bidang Keselamatan Kerja dan Operasi yang memberikan izin kepada Penulis dalam melakukan penelitian ini.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 1997 Nomor 23, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 3676, Jakarta, 10 April 1997.
- [2] Peraturan Pemerintah No 61 tahun 2013 tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif.
- [3] Undang-Undang No 1 Tahun 1970 tentang Keselamatan Kerja
- [4] ICRU Report No.88, Measurement and Reporting of Radon Exposures, vol. 12, no. 2. Oxford University Press, 2012.
- [5] H. Sofyan, "Pengukuran thoron di udara dalam ruangan secara kontinu menggunakan pylon model Wlx," *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, Vol 12, No 2, pp. 51–62, Agu. 2011.
- [6] Peraturan Pemerintah No 33 tahun 2007 tentang Keselamatan dan Kesehatan terhadap Pemanfaatan Radiasi Pengion.
- [7] A. Wijayanto, dkk., "Instalasi dan integrasi sistem pemantauan kontaminasi udara cerobong IPLR berbasis Iot (*internet of things*)," *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan Tahun 2018*, pp. 197–207, 2021, [Online]. https://www.researchgate.net/publication/332971382-Instalasi_dan_Integrasi_Sistem_Pemantauan_Kontaminasi_Udara_Cerobong_Instalasi_Pengolahan_Limbah_Radioaktif_IPLR_berbasis_IoT_Internet_of_Things
- [8] Manual Operation iCAM Alpha/Beta Air Monitor of Canberra UK Ltd., 2010.
- [9] ICRP 103 (2007) The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological.
- [10] ICRP 126 (2014) revision of ICRP 103(2007). Radiological Protection against Radon Exposure.
- [11] IAEA GSR Part 3 (2014). Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards.
- [12] A. C. Syuryavin dkk., "Indoor radon and thoron from building materials: Analysis of humidity, air exchange rate, and dose assessment," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 10, pp. 2370–2378, Okt. 2020, doi: 10.1016/J.NET.2020.03.013.
- [13] Ratiko dkk., "Quantification of the impact of temperature difference between two connected indoor spaces on 222Rn concentration," *Build. Environ.* vol. 149, pp. 322–329, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2018.12.006.
- [14] N. S. Syam dkk., "Determination of radon leakage from sample container for gamma spectrometry measurement of 226Ra," *J. Environ. Radioact.*, vol. 220–221, p. 106275, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.JENVRAD.2020.106275.
- [15] R. M. Amin, "A study of radon emitted from building materials using solid state nuclear track detectors," *J. Radiat. Res. Appl. Sci.*, vol. 8, no. 4, pp. 516–522, Okt. 2015, doi: 10.1016/J.JRRAS.2015.06.001.
- [16] K. Ivanova dkk., "Analysis of the spatial distribution of the indoor radon concentration in school's buildings in Plovdiv province, Bulgaria," *Build. Environ.* vol. 204, p. 108122, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.108122.