

Kemajuan Teknologi Terbaru dalam Prosedur Deteksi Radiasi Nuklir: Tinjauan Literatur Sistematis

Azka Nabila Putri Susanto¹, Ikhsan Muhammad Siddiq², dan Winda Muliyawati³

windamuliyawati57@gmail.com

¹²³Program Studi Pendidikan Kimia, Fakultas Tarbiyah dan Keguruan, UIN Sunan Gunung Djati Bandung

Abstrak

Dalam prosedur deteksi radiasi nuklir, terdapat beragam metode dan instrumen yang digunakan dalam pendeteksian eksposur nuklir, bergantung pada status radiasi nuklir yang hendak diidentifikasi. Proses ini melibatkan penggunaan berbagai metode dan instrumen yang disesuaikan dengan karakteristik radiasi yang diamati. Dalam penentuan metode yang tepat, faktor-faktor seperti tingkat radiasi, sumber radiasi, jenis partikel yang terlibat, serta lingkungan yang terlibat menjadi pertimbangan penting. Dengan mempertimbangkan berbagai faktor ini, dapat diaplikasikan metodologi yang sesuai dan menggunakan instrumen yang relevan untuk mendeteksi radiasi nuklir dengan presisi dan keandalan yang optimal. Diantaranya: kamera CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) yang digunakan dalam pengambilan gambar merespons sinar-X dan sinar gamma secara langsung, pengembangan detektor radiasi CZT untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga nuklir, Deteksi sintilasi yang telah menarik minat yang signifikan dalam berbagai bidang, seperti kedokteran nuklir, deteksi radiasi nuklir, fisika energi tinggi, dan inspeksi non-destruktif, Sebuah pendekatan baru telah diusulkan untuk mendeteksi ledakan nuklir bawah tanah (UNEs) dengan memantau perpindahan isotop radon alami (^{222}Rn dan ^{220}Rn).

Kata kunci: prosedur deteksi, radiasi nuklir, teknologi terbaru

Abstract

In nuclear radiation detection procedures, there are various methods and instruments used to detect nuclear exposure, depending on the status of the nuclear radiation to be identified. This process involves the use of various methods and instruments adapted to the characteristics of the radiation being observed. In determining the appropriate method, factors such as radiation levels, radiation sources, types of particles involved, and the environment involved are important considerations. By considering these various factors, appropriate methodologies and relevant instruments can be applied to detect nuclear radiation with optimal precision and reliability. Among them: CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) cameras used in image capture respond directly to X-rays and gamma rays, development of CZT radiation detectors for nuclear power plant applications, scintillation detection which has attracted significant interest in various fields, such as nuclear medicine, nuclear radiation detection, high energy physics, and non-destructive inspection, A new approach has been proposed to detect underground nuclear explosions (UNEs) by monitoring the movement of natural radon isotopes (^{222}Rn and ^{220}Rn).

Keywords: *detection procedures, nuclear radiation, latest technology*

1. PENDAHULUAN

Banyak orang merasa takut dan khawatir terhadap radiasi karena mereka tidak memiliki kemampuan indra yang dapat mendeteksi keberadaannya. Radiasi itu sendiri tidak dapat terlihat, dirasakan, atau diketahui secara langsung. Namun, nyatanya, radiasi tersebar di sekitar kita, baik di rumah, kantor, maupun tempat-tempat umum dalam jumlah yang banyak. Radiasi dapat ada diruangan tertutup maupun di lingkungan terbuka tanpa adanya perlindungan khusus terhadap radiasi. Oleh karena itu, penting untuk melakukan pendeteksian mengenai radiasi, baik melalui survei radiasi maupun pemantauan personal (Swamardika, 2009). Pengembangan energi nuklir telah mengalami perkembangan pesat dan menjadi sumber energi penting yang dipromosikan di seluruh dunia, serta memainkan peran penting dalam industri modern. Namun, kejadian seperti kebocoran nuklir, kehilangan bahan dan peralatan nuklir, serta penggunaan mineral radioaktif sebagai bahan pemberian hadiah, mengingatkan kita bahwa deteksi dan pemantauan radiasi nuklir tetap penting untuk menjaga keselamatan publik. (Yan et al., 2022). Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui beberapa cara atau teknik teknik modern dalam mendeteksi paparan radiasi yang diterima manusia, baik di dalam maupun di luar. Berikut beberapa teknik deteksi dalam prosedur deteksi radiasi nuklir.

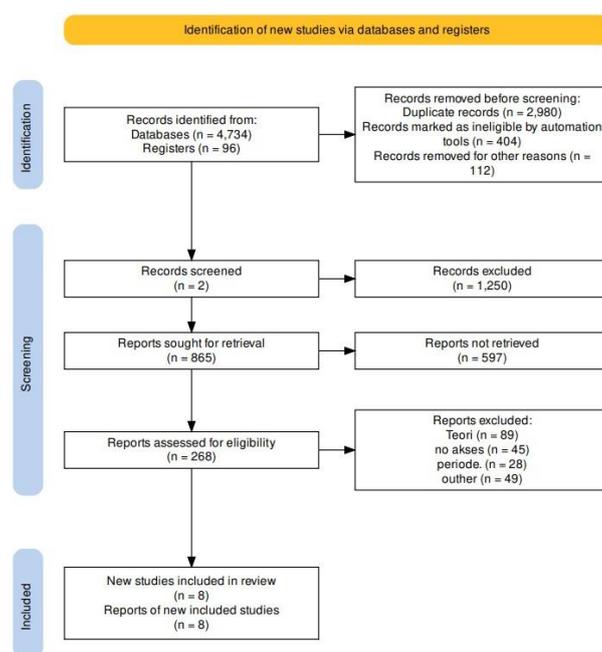
2. METODE PENELITIAN

Tinjauan literatur sistematis (SLR) digunakan di sini, yang merupakan tinjauan literatur itu menemukan, menilai, dan menafsirkan semua data tentang masalah studi untuk menjawab yang telah ditentukan sebelumnya pertanyaan penelitian. Judul dan kata kunci "Nuclear Radiation Detection". Radiasi digunakan untuk mencari publikasi dalam database penelitian di Scencedirect, Pubmed, dan Researchgate. Item Pelaporan Pilihan untuk Tinjauan Sistematis dan Meta-Analitik (PRISMA) teknik itu dimanfaatkan. Seluruh publikasi yang lolos seleksi diperiksa dan dirangkum berdasarkan tujuan, tahun publikasi, jenis dokumen, publikasi tahap, kata kunci, dan jenis sumber. Kriteria inklusi adalah (1) studi tentang radiasi deteksi inti sebagai aplikasi dan (2) artikel penelitian yang diterbitkan dalam jurnal peer-review. Kriteria eksklusi meliputi (1) studi umum yang dilakukan pada dan (2) artikel berisi tinjauan literatur atau meta-analisis. Pencarian dimulai dengan menganalisis judul dan abstrak dari semua hasil pencarian dan membandingkannya dengan kriteria yang telah ditentukan

Result

Pencarian database penelitian menghasilkan seluruh hasil pencarian kata kunci diperoleh 257 penelitian artikel secara total, dari database 4.734 artikel, registers 96.

Setelah memindai judul, artikel yang sama ada di tiga database berbeda. Hasil setelah dikurangi duplikatnya adalah 2.980 artikel. Sebanyak 404 hasil dikeluarkan karena mereka tidak memenuhi kriteria, sebanyak 112 dihapus karena alasan lain, 1.250 artikel dikecualikan, artikel dicari untuk pengambilan 865 artikel, artikel tidak diambil 597 artikel, artikel dinilai untuk kelayakan 268 artikel, artikeldikecualikan karena teori 89 artikel, tidak ada akses 45 artikel, periode 28 artikel, dan luar 49 artikel. Ada 8 artikel yang termasuk dalam tinjauan literatur akhir. Itu pencarian literatur dijelaskan lebih rinci pada Gambar:



Gambar 1. Metode Penelusuran Kajian Pustaka

Deteksi Radiasi Nuklir

Energi nuklir adalah salah satu bentuk energi yang bersih dan populer, namun kebocoran dan kehilangan bahan nuklir dapat menimbulkan ancaman terhadap keselamatan publik. Oleh karena itu, deteksi radiasi di ruang publik sangat penting untuk keamanan nuklir. Kamera keamanan yang umumnya dilengkapi dengan sensor semikonduktor oksida logam (CMOS) komplementer dapat digunakan untuk mendeteksi radiasi. Namun, pekerjaan sebelumnya menggunakan kamera ini membutuhkan pemrosesan frame-by-frame yang lambat dan rumit. Berdasarkan penelitian sebelumnya, telah diusulkan metode baru untuk mendeteksi radiasi nuklir menggunakan jaringan saraf konvolusi (CNN) (Yan et al., 2022). Metode ini dapat mendeteksi radiasi nuklir dalam gambar dengan kompleksitas komputasi yang lebih rendah. Dalam penelitian ini, dilakukan penggunaan gambar video aktual yang diambil dengan menggunakan sumber radioaktif Tc-99m yang umum. Sebuah perangkat pelatihan dan pengujian telah dibuat untuk melatih CNN dan menguji kinerjanya. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa metode ini memiliki kinerja yang tinggi dan efektif dalam mendeteksi radiasi nuklir. Dengan demikian, metode

deteksi radiasi nuklir menggunakan CNN ini menawarkan pendekatan yang lebih cepat dan efisien dalam mendeteksi radiasi dalam gambar, serta berpotensi meningkatkan keamanan nuklir di ruang publik. (Yan et al., 2022)

Deteksi radiasi nuklir lainnya yaitu Deteksi sintilasi, deteksi ini telah menarik minat yang signifikan dalam berbagai bidang, seperti kedokteran nuklir, deteksi radiasi nuklir, fisika energi tinggi, dan inspeksi non-destruktif (Nikl et al., 2013). Untuk memenuhi kebutuhan ini, kristal elpasolite dengan dopan Ce^{3+} telah menjadi pilihan menjanjikan. Kristal ini memiliki sifat cahaya yang sederhana dan proporsionalitas yang sangat baik saat terkena sinar gamma. Selain itu, keberadaan isotop 6Li dan ^{35}Cl dalam kristal elpasolite memberikan kemampuan deteksi neutron yang sangat baik. Kombinasi fitur-fitur ini memungkinkan deteksi dengan resolusi energi tinggi dan sensitivitas yang tinggi. Scintillator elpasolite juga memungkinkan deteksi ganda yang akurat dari sinyal gamma/neutron melalui metode diskriminasi ketinggian pulsa (PHD) atau diskriminasi bentuk pulsa (PSD). Dalam penelitian ini, dilakukan tinjauan terhadap penelitian terbaru mengenai penggunaan sintilator elpasolite khas, termasuk Cs_2LiYCl_6 (CLYC) yang didoping Ce^{3+} , $Cs_2LiLaCl_6$ (CLLC), dan $Cs_2LiLaBr_6$ (CLLB), untuk pemantauan sinar gamma dan neutron. Sifat sintilasi, mekanisme deteksi, dan struktur kristal elpasolite juga dibahas dengan tujuan meningkatkan kemampuan deteksi dalam mendeteksi sinar energi tinggi (Jin et al., 2022).

$CdZnTe$ (CZT) telah menjadi subjek perhatian yang signifikan dalam deteksi radiasi suhu ruangan karena kemampuannya memenuhi persyaratan yang beragam dan ketat, serta keunggulannya dibandingkan dengan bahan semikonduktor tradisional. Studi ini melakukan tinjauan menyeluruh terhadap kemajuan dalam penelitian deteksi dan spektroskopi radiasi nuklir suhu kamar berbasis CZT. Properti fisik dan elektronik dari detektor modern dievaluasi, berbagai metode pertumbuhan, geometri, dan platform deteksi dibandingkan, dan hasil evaluasi kinerjanya disajikan untuk memberikan gambaran tentang perkembangan teknologi detektor $CdZnTe$ dalam aplikasi pembangkit listrik tenaga nuklir dalam dekade terakhir (Alam, 2021).

Sebuah pendekatan baru telah diusulkan untuk mendeteksi ledakan nuklir bawah tanah (UNEs) dengan memantau perpindahan isotop radon alami (^{222}Rn dan ^{220}Rn). Setelah terjadinya ledakan, diduga bahwa gangguan dan tekanan di bawah permukaan akan memfasilitasi pergerakan radon dari kedalaman UNE ke permukaan, yang menyebabkan peningkatan aktivitas gas tanah (Burnett, 2021).. Sinyal yang dihasilkan dapat diperbesar dengan faktor 2,0-4,9 melalui peluruhan radon menjadi isotop pendek umur. Peningkatan aktivitas latar belakang dapat berguna dalam mengidentifikasi lokasi ledakan untuk pengukuran tambahan, atau sebagai sinyal yang dapat terdeteksi di stasiun pemantauan. Untuk memvalidasi hipotesis ini, instrumen deteksi radon digunakan di situs Dry Alluvium Geology (DAG) dari Source Physics Experiment (SPE) di Nevada National Security Site (NNSS). Namun, fluktuasi alami dalam aktivitas gas tanah akibat perubahan tekanan

atmosfer dan hasil yang lebih rendah dari ledakan kimia membuat sulit untuk mengonfirmasi perpindahan radon akibat ledakan (Burnett, 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Energi nuklir telah mengalami perkembangan yang pesat dan menjadi sumber energi yang penting serta memainkan peran krusial dalam industri modern di seluruh dunia. Namun, kekhawatiran terkait kebocoran, hilangnya bahan dan peralatan nuklir, serta penggunaan mineral radioaktif sebagai hadiah peringatan, menekankan pentingnya deteksi dan pemantauan radiasi nuklir untuk menjaga keselamatan publik (Peterson & Derby, 2017).

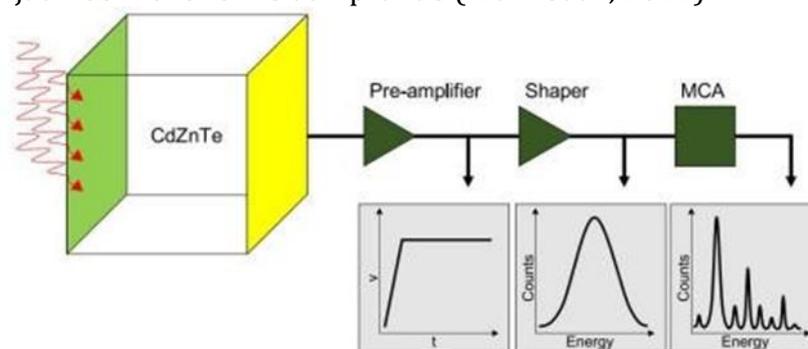


Gambar 2 Kamera CMOS
TTC-JW-02 dan sumber

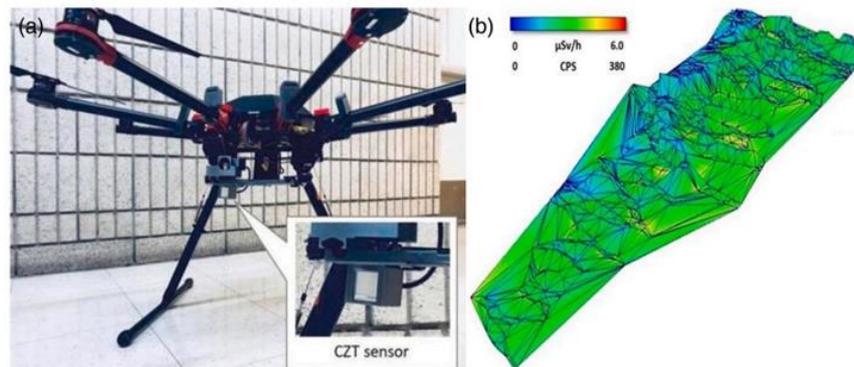
Sensor kamera CMOS (Complementary Metal- Oxide-Semiconductor) yang digunakan dalam pengambilan gambar merespons sinar-X dan sinar gamma secara langsung. Karena harganya semakin terjangkau dan ketersediaannya yang luas, sensor CMOS telah menarik minat penelitian yang signifikan dalam bidang deteksi radiasi. Penggunaan kamera CMOS untuk mendeteksi radiasi nuklir memungkinkan pengumpulan data gambar dalam jumlah besar (Peterson & Derby, 2017). Hal ini menginspirasi peneliti untuk mengembangkan algoritma pembelajaran mendalam yang efisien dalam memproses data gambar tersebut untuk mendukung deteksi radiasi nuklir. Meskipun jaringan saraf konvolusi (CNN) telah banyak digunakan dalam deteksi target citra medis nuklir dan pencitraan radiasi nuklir, deteksi langsung peristiwa radiasi nuklir umumnya masih dilakukan secara manual menggunakan instrumen deteksi. Untuk mengurangi kompleksitas komputasi dan meningkatkan efisiensi deteksi, kami mengusulkan metode deteksi radiasi nuklir yang menggunakan model CNN dan kamera CMOS yang tersedia untuk lingkungan pengawasan publik. Peneliti mengambil rekaman video pengawasan menggunakan kamera CMOS dengan menggunakan sumber radiasi medis umum yaitu netium-99m (Tc-99m) (Yan et al., 2022). Selanjutnya, peneliti menerapkan metode fusi gambar untuk membangun set pelatihan dan pengujian. CNN kemudian dilatih menggunakan set data ini untuk menguji kinerja metode yang diusulkan dalam mendeteksi radiasi nuklir. Peneliti juga melakukan

serangkaian eksperimen untuk memverifikasi kecocokan dan efektivitas metode yang telah peneliti usulkan (Yan et al., 2022).

Dalam pengembangan detektor radiasi CZT untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga nuklir, terjadi kemajuan terbaru berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh para ilmuwan di seluruh dunia. Dalam studi ini, sifat-sifat material detektor radiasi CZT dibahas serta alasan mengapa material ini cocok digunakan dalam aplikasi tersebut. Selain itu, teknik pertumbuhan CZT dan tantangan yang terkait dengan material ini, serta proses fabrikasi dan karakterisasi detektor sinar gamma CZT dengan konfigurasi dan ukuran yang berbeda, juga menjadi fokus penelitian ini. Selain itu, penelitian ini juga mengulas berbagai platform detektor yang sedang dikembangkan dalam karya terbaru di bidang ini. Detektor radiasi suhu ruangan berbasis CZT merupakan alat yang krusial untuk mendeteksi keberadaan bahan radioaktif. Saat ini, penelitian mengenai detektor radiasi suhu ruangan berbasis CZT yang dilakukan oleh (Alam et al., 2021) telah mencapai kemajuan signifikan, yang terkait dengan pengembangan bahan aktif dan sistem deteksi yang secara efektif dirancang (Peterson & Derby, 2017). Pertumbuhan kristal tunggal CZT dengan karakteristik deteksi yang ditingkatkan menjadi landasan bagi pengembangan sistem pemantauan radiasi. Metode pertumbuhan Bridgman cocok untuk aplikasi di mana kecepatan pertumbuhan menjadi faktor penting, sedangkan metode perjalanan pemanasan terbukti menghasilkan kristal tunggal CZT dengan kualitas yang lebih baik. Dalam konteks detektor radiasi suhu ruangan berbasis CZT, geometri pixelated dan VFG adalah yang paling umum digunakan, dengan volume yang lebih besar dan resolusi energi yang lebih baik (Alam et al., 2021). Selama beberapa tahun terakhir, platform detektor ini telah mengalami perkembangan signifikan, memungkinkan pemantauan radiasi yang efektif baik di darat maupun di udara. Detektor CZT berbasis posisi sensitif 3D telah diperbaiki dan ditingkatkan untuk pengukuran radiasi dan pencitraan yang lebih efisien. Meskipun detektor radiasi suhu ruangan berbasis CZT memiliki sifat fisik dan spektroskopi yang luar biasa, tantangan lain muncul akibat hasil produksi kristal tunggal CZT yang besar, yang perlu diatasi agar detektor ini menjadi lebih ekonomis dan praktis (Alam et al., 2021).



Gambar 4 Diagram blok sistem deteksi radiasi CZT standar



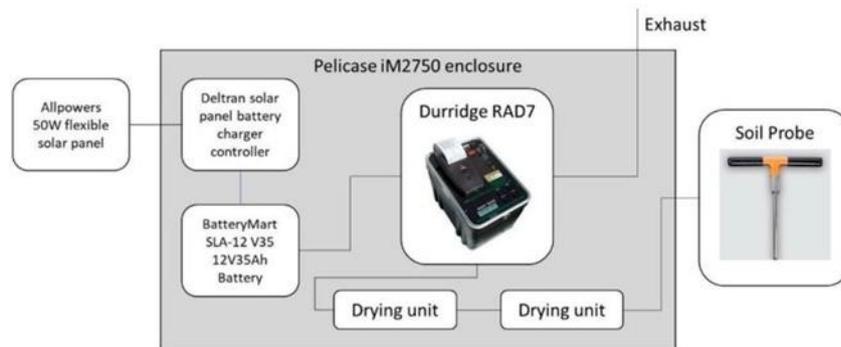
Gambar 3 Platform UAV dengan sensor CZT

Detektor radiasi suhu ruangan berbasis CZT merupakan alat penting dalam deteksi bahan radioaktif. Saat ini, penelitian mengenai detektor ini telah mengalami kemajuan yang signifikan, terutama dalam pengembangan bahan aktif dan sistem deteksi yang efektif. Pertumbuhan kristal CZT tunggal dengan kemampuan deteksi yang ditingkatkan menjadi dasar untuk pengembangan sistem pemantauan radiasi. Metode pertumbuhan Bridgman cocok untuk aplikasi yang membutuhkan tingkat pertumbuhan yang cepat, sementara metode pemanasan perjalanan telah terbukti menghasilkan kristal CZT tunggal dengan kualitas yang lebih tinggi (Mandal et al., 2011). Dalam detektor radiasi suhu kamar berbasis CZT, terdapat beberapa geometri yang umum digunakan, seperti pixelated dan VFG, yang memiliki volume yang lebih besar dan resolusi energi yang lebih baik. Selama beberapa tahun terakhir, platform detektor ini telah mengalami perkembangan yang signifikan, terutama dalam pemantauan radiasi berbasis darat dan udara. Detektor CZT sensitif terhadap posisi 3D telah mempermudah pengukuran radiasi dan pencitraan. Namun, meskipun detektor radiasi suhu kamar berbasis CZT memiliki sifat fisik dan spektroskopi yang luar biasa, produksi kristal CZT tunggal yang memadai masih menjadi tantangan yang perlu diatasi agar detektor ini menjadi lebih ekonomis praktis (Alam et al., 2021).

Deteksi kilau memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi, seperti kedokteran nuklir, deteksi radiasi nuklir, fisika energi tinggi, dan kontrol perbatasan. Hal ini disebabkan oleh kemampuannya untuk secara akurat memantau berbagai jenis sinar. Detektor kilau terdiri dari dua komponen utama, yaitu kristal kilau dan konverter fotolistrik. Konverter fotolistrik ini berfungsi untuk mengubah sinar (termasuk sinar ultraviolet) yang diterima menjadi sinyal listrik yang dapat diukur dan diinterpretasikan. Dengan menggunakan detektor kilau, informasi yang berhubungan dengan radiasi dapat dideteksi dengan akurasi dan sensitivitas yang tinggi (Jin, 2022). Tinjauan ini menggambarkan kemajuan terbaru dalam sifat kilau, mekanisme deteksi, struktur kristal, dan aplikasi sintilator elpasolit dalam deteksi energi tinggi. Inovasi dalam strategi deteksi terus didorong oleh pengembangan ilmu material dengan sifat yang baru dan unik. Sintilator elpasolit, seperti kristal $\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6$ (CLYC), $\text{Cs}_2\text{LiLaCl}_6$ (CLLC), dan $\text{Cs}_2\text{LiLaBr}_6$ (CLLB), menawarkan peluang besar dalam deteksi sinar gamma dan neutron. Untuk

mencapai kinerja optimal, konsentrasi Ce^{3+} dalam kristal, seperti 0,5% dalam Cs_2LiYCl_6 dan 2% dalam $Cs_2LiLaBr_6$, telah ditentukan untuk meningkatkan resolusi energi dan output cahaya (Loutchanski et al., 2020). Meskipun terdapat kemajuan signifikan, masih terdapat tantangan yang perlu diatasi. Misalnya, pengembangan bahan elpasolit baru dengan struktur pita yang kurang terlokalisasi diperlukan untuk mengatasi waktu peluruhan yang lambat pada sintilator elpasolit yang ada. Kristal CLLC menunjukkan resolusi energi yang lebih baik dan kemampuan diskriminasi bentuk pulsa, tetapi kualitas kristal yang buruk perlu ditingkatkan secara signifikan. Selain itu, perlu dilakukan eksplorasi terhadap teknologi pertumbuhan kristal elpasolit yang efisien guna menghilangkan inklusi dan meningkatkan kualitas optik (Jin et al., 2022).

Deteksi emisi radionuklida dari ledakan nuklir bawah tanah (UNEs) merupakan sebuah tantangan yang bergantung pada pelanggaran penahanan. Hal ini terkait dengan berbagai parameter, termasuk hasil ledakan, kedalaman penimbunan, dan faktor geologis seperti kekuatan batuan, porositas, kandungan air, kandungan karbonat dan besi, serta kemampuan batuan untuk mengompresi dan membentuk penahanan di sekitar rongga setelah ledakan



Gambar 5 Skema modul detektor radon

Setelah terjadinya ledakan nuklir bawah tanah (UNEs), diduga bahwa ledakan tersebut akan menyebabkan perpindahan isotop radon alami (^{222}Rn dan ^{220}Rn) ke permukaan. Hal ini terjadi akibat gangguan dan tekanan di bawah permukaan yang disebabkan oleh rongga ledakan, dan dalam batas tertentu, wilayah yang dipengaruhi oleh gelombang tekanan di luar rongga. Tanda-tanda dari perpindahan ini dapat signifikan, dan berdasarkan data yang dipublikasikan mengenai UNE, perpindahan radon dapat mencapai 0,4 GBq–7,4 GBq untuk ledakan dengan kekuatan 3,1 kt – 61,0 kt. Sinyal ini juga dapat diperbesar dengan faktor 2,0–4,9 karena peluruhan isotop radon menjadi isotop pendek umur setelah radon dilepaskan dari tanah (Burnett et al., 2021).

Untuk menguji hipotesis ini, instrumen pendeteksi radon digunakan selama ledakan kimia bawah tanah DAG di NNS pada tahun 2018–2019 (Lee et al., 2018). Namun, hasil yang lebih rendah dari ledakan kimia ini (1–50 ton) kemungkinan tidak menghasilkan sinyal perpindahan radon yang dapat diamati terhadap fluktuasi alami yang terjadi sebagai respons terhadap perubahan tekanan atmosfer. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut direkomendasikan untuk memvalidasi hipotesis ini. Penelitian tersebut harus mencakup

pemodelan gangguan dan tekanan dalam aliran bawah permukaan yang terjadi setelah UNE. Berbagai kondisi geologis harus dipertimbangkan, termasuk transportasi radon dan turunannya ke bawah permukaan. Selain itu, data dari stasiun pemantauan harus dianalisis untuk mencari adanya anomali radon yang menunjukkan perpindahan radon lainnya, termasuk yang disebabkan oleh gempa bumi, karena ini dapat menjadi indikator yang berguna untuk UNE (Burnett et al., 2021).

4. SIMPULAN

Artikel ini menjelaskan beberapa metode serta prosedur dalam menentukan adanya radiasi diantaranya penggunaan kamera CMOS untuk mendeteksi radiasi nuklir dengan menggunakan radiasi medis umum yaitu netium-99m (Tc-99m). Detektor radiasi CZT merupakan aplikasi pembangkit listrik tenaga nuklir untuk mendeteksi radiasi nuklir dengan cara mendeteksi yang ditingkatkan menjadi dasar untuk pengembangan sistem pemantauan radiasi. Dengan bantuan pertumbuhan Bridgman cocok untuk diaplikasikan yang membutuhkan tingkat pertumbuhan yang cepat, sementara metode pemanasan perjalanan telah terbukti menghasilkan kristal CZT tunggal dengan kualitas yang lebih tinggi. Detektor kilau terdiri dari dua komponen utama, yaitu kristal kilau dan konverter fotolistrik. Konverter fotolistrik ini berfungsi untuk mengubah sinar (termasuk sinar ultraviolet) yang diterima menjadi sinyal listrik yang dapat diukur dan diinterpretasikan. Dengan menggunakan detektor kilau, informasi yang berhubungan dengan radiasi dapat dideteksi dengan akurasi dan sensitivitas yang tinggi. Dan terakhir fdeteksi emisi radionuklida dari ledakan nuklir bawah tanah (UNEs) merupakan keterkaitan tedengan berbagai parameter, termasuk hasil ledakan, kedalaman penimbunan, dan faktor geologis seperti kekuatan batuan, porositas, kandungan air, kandungan karbonat dan besi. namun, berbagai metode deteksiradiasi memiliki keunggulan tersendiri dan juga kekurangannya dan metode ini digunakan hanya untuk pemcegahan dari radiasi yang terjadi.

REFERENSI

- Alam, M. D., Nasim, S. S., & Hasan, S. (2021). Recent progress in CdZnTe based room temperature detectors for nuclear radiation monitoring. *Progress in Nuclear Energy, 140*(February), 103918. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103918>
- Burnett, J. L., Stewart, T. L., Keillor, M. E., & Ely, J. H. (2021). Investigating the detection of underground nuclear explosions by radon displacement. *Journal of Environmental Radioactivity, 229–230*(August 2020), 106541. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106541>
- Jin, T., Hao, S., Shang, Y., Lei, Z., & Yang, C. (2022). Recent Trends in Elpasolite Single Crystal Scintillators for Radiation Detection. *Crystals, 12*(7), 1–16. <https://doi.org/10.3390/cryst12070887>
- Lee, M. S., Shy, D., Whittaker, W. R., & Michael, N. (2018). Active Range and Bearing-based Radiation Source Localization. *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1389–1394*. <https://doi.org/10.1109/IROS.2018.8593625>
- Loutchanski, A., Fjodorovs, V., Ivanov, V., & Ogorodniks, V. (2020). Application of CdZnTe

- Quasi-Hemispherical Detectors in Strong Gamma-Radiation Fields. *EPJ Web of Conferences*, 225, 07004. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022507004>
- Mandal, K. C., Muzykov, P. G., Krishna, R. M., & Hayes, T. C. (2011). Characterization of Cd_{0.9}Zn_{0.1}Te Schottky diodes for high resolution nuclear radiation detectors. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 59(4), 4578–4583. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154738>
- Nikl, M., Yoshikawa, A., Kamada, K., Nejezchleb, K., Stanek, C. R., Mares, J. A., & Blazek, K. (2013). Development of LuAG-based scintillator crystals - A review. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 59(2), 47–72. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2013.02.001>
- Peterson, J. H., & Derby, J. J. (2017). *Understanding growth rate limitations in production of single-crystal cadmium zinc telluride (CZT) by the traveling heater method (THM)*. <http://hdl.handle.net/11299/188912S>
- Swamardika, I. B. A. (2009). PENGARUH RADIASI GELOMBANG ELEKTROMAGNETIK TERHADAP KESEHATAN MANUSIA (Suatu Kajian Pustaka). *Pengaruh Radiasi Gelombang Elektromagnetik Terhadap Kesehatan Manusia*, 8(1), 1–4.
- Yan, Z., Zhang, Z., Xu, S., Ma, J., Hou, Y., Ji, Y., Sun, L., Dai, T., & Wei, Q. (2022). Nuclear radiation detection based on the convolutional neural network under public surveillance scenarios. *Open Physics*, 20(1), 49–57. <https://doi.org/10.1515/phys-2022-0006>