



Identifikasi kebutuhan sarana-prasarana pemantauan radiasi nirawak dalam pengawasan radiasi reaktor riset di Indonesia

Muhammad Rifqi Harahap ¹

¹Pusat Pengkajian Sistem dan Teknologi Pengawasan Instalasi dan Bahan Nuklir, BAPETEN, Jakarta

E-mail: m.harahap@bapeten.go.id

Artikel Tinjauan

Menyerahkan

28 September 2021

Diterima

23 November 2021

Terbit

15 Desember 2021

ABSTRAK

IDENTIFIKASI KEBUTUHAN SARANA-PRASARANA PEMANTAUAN RADIASI NIRAWAK DALAM PENGAWASAN RADIASI REAKTOR RISET DI INDONESIA. Pemantauan radiasi lingkungan pada fasilitas pemanfaatan tenaga nuklir dilakukan pemegang izin fasilitas antara lain guna memantau paparan radiasi di lingkungan fasilitas. Kegiatan tersebut dilakukan untuk memantau lepasan radiasi akibat operasional reaktor. Selain itu, pemantauan juga dapat berfungsi sebagai salah satu perangkat untuk memonitor lepasan radioaktif apabila terjadi kedaruratan nuklir. Oleh sebab itu, sistem pemantauan radiasi merupakan salah satu sistem penting dalam keselamatan fasilitas pemanfaatan tenaga nuklir untuk mengetahui jumlah paparan radiasi ke lingkungan. Sistem pemantauan stasioner yang sudah terpasang memiliki risiko tidak dapat berfungsi apabila sistem rusak akibat terjadinya bencana alam. Salah satu cara untuk memitigasi hal ini adalah dengan memobilisasi sistem pemantauan radiasi nirawak untuk memantau paparan radiasi tanpa membahayakan personel. Untuk mengetahui sistem pemantauan radiasi nirawak yang sesuai, dilakukan identifikasi sarana dan prasarana apa saja yang dibutuhkan dalam merancang sistem pemantauan radiasi nirawak untuk reaktor riset di Indonesia. Sarana dan prasarana yang dibutuhkan untuk sistem pemantauan radiasi nirawak yakni kendaraan udara nirawak, detektor radiasi, modul kontrol dan komunikasi, sistem navigasi, serta perangkat lunak kendali sistem. Dari kebutuhan sarana dan prasarana ini kemudian dispesifikasi lagi sehingga memenuhi kebutuhan pemantauan reaktor riset di Indonesia. Spesifikasi sarana dan prasarana adalah tipe kendaraan udara nirawak yang menggunakan sayap rotari, penggunaan detektor CdZnTe, dan sistem navigasi berbasis GPS/GLONASS. Dalam hal prasarana modul kontrol dan komunikasi serta perangkat lunak kendali, spesifikasi tidak secara rinci menyatakan persyaratan perangkat, melainkan bagaimana sistem dapat memenuhi performa yang disyaratkan. Dengan demikian sistem disyaratkan dapat memberikan dan memproses data pengukuran secara real-time sehingga dapat ditampilkan dalam peta panas radiasi.

Kata Kunci: Identifikasi, Pemantauan Radiasi, Nirawak.

ABSTRACT

The facility's licensee conducts environmental radiation monitoring in nuclear facilities to monitor radiation exposure in the facility's vicinity. This activity is carried out also to monitor radiation release as a result of nuclear reactor operation. Aside from that, monitoring also works as a device to monitor radioactive release in a nuclear emergency. Therefore, the radiation monitoring system is crucial in nuclear utilization facilities to determine the number of radiation exposure to the surrounding environment. However, the existing stationary monitoring system has a risk of being unable to work if the system is down in case of natural disaster occurs. One way to mitigate this risk is to deploy an unmanned radiation monitoring system to monitor radiation exposure without putting personnel at risk. To define a suitable unmanned radiation monitoring system, identification of facilities and infrastructure required to design an unmanned radiation

monitoring system for a research reactor in Indonesia is carried out. Facilities and infrastructure needed for unmanned radiation monitoring systems are unmanned aerial vehicles, radiation detector, control and communication module, navigation system, and software for the control system. These required facilities and infrastructure are then specified to determine the necessary specification for monitoring research reactor in Indonesia. The facilities' required specifications are unmanned aerial vehicles with rotary-wing type, CdZnTe Detector, and GPS/GLONASS based navigation system. For infrastructure specification, control and communication module and software for the control system is not specified in how the system could meet the expected required performance rather than in detail. However, the system must provide and process measurement data in real-time to be presented in a radiation heatmap.

Keywords: Identification, Radiation Monitoring, Unmanned

1. PENDAHULUAN

Pemantauan radiasi lingkungan pada fasilitas pemanfaatan tenaga nuklir merupakan salah satu kegiatan kesiapsiagaan nuklir yang wajib dilakukan pemegang izin fasilitas guna memastikan tersedianya kesiapan dan kemampuan penanggulangan kedaruratan nuklir. Pemasangan alat pemantauan radiasi wajib dilakukan di lingkungan sekitar fasilitas secara langsung maupun melalui pengambilan sampel udara. Hasil dari pemantauan ini kemudian dilaporkan ke Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) sebagai salah satu pertanggungjawaban pemegang izin [1].

Sistem pemantauan radiasi merupakan salah satu sistem penting dalam keselamatan fasilitas pemanfaatan tenaga nuklir untuk mengetahui jumlah paparan radiasi ke lingkungan apabila terjadi lepasan radioaktivitas ke lingkungan. Hal ini penting karena dengan mengetahui nilai paparan dan sebarannya melalui sistem pemantauan, dapat ditentukan mitigasi kesiapsiagaan nuklir yang efektif. Oleh karena itu, diharapkan sistem pemantauan ini dapat selalu diandalkan dalam setiap keadaan [2].

Sistem pemantauan radiasi yang tersedia di Indonesia untuk fasilitas-fasilitas nuklir di Kawasan Nuklir Serpong, Bandung, Pasar Jumat, dan Yogyakarta menggunakan pemantauan stasioner yang terpasang pada radius tertentu dari reaktor.

Sistem pemantauan stasioner ini memiliki performa cukup baik dan dapat dipantau sewaktu-waktu. Namun, sistem pemantauan ini masih dapat terganggu apabila terjadi disrupsi daya listrik yang diakibatkan oleh bencana alam seperti pengalaman yang terjadi di Yogyakarta pada 2006 silam [3]. Salah satu cara untuk memitigasi hal ini adalah dengan memobilisasi sistem pemantauan radiasi nirawak yang berfungsi untuk mengukur paparan radiasi dengan cakupan wilayah yang luas tanpa membahayakan personel.

Berangkat dari permasalahan tersebut, makalah ini berusaha untuk menyusun kebutuhan penggunaan dalam sistem pemantauan radiasi nirawak untuk pemantauan reaktor riset yang terdapat di Indonesia dan mengkaji praktik-praktik pengembangan sistem pemantauan radiasi nirawak. Identifikasi ini dilakukan dengan membandingkan sarana dan prasarana dari beberapa sistem pemantauan radiasi nirawak baik yang sudah ada maupun yang sedang dikembangkan, diantaranya sistem pemantauan radiasi nirawak yang dikembangkan oleh EBO NPP di Slovakia [4], *School of Science, University of Bristol* [5], *FRIENDS (Fleet of dRones for radIological inspEction, commuNication anD reScue)* [6], Fukushima Dai-ichi [7] [8], BATAN [9], dan *European Metrology Programme for Innovation and Research (EMPIR)* [10].



Gambar 1: Kendaraan udara nirawak sayap rotari



Gambar 2: kendaraan udara sayap tetap

Tabel 1: Perbandingan kemampuan kendaraan udara nirawak

Tipe Kendaraan Udara	Durasi waktu terbang (jam)	Daya jelajah maksimal (km)	Ketinggian jelajah maksimal (m)
Sayap rotari	0,5	~5	330
Sayap tetap	10	~10	4500

Identifikasi ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi pemegang izin maupun BAPETEN dalam menyusun dokumen persyaratan pengguna dalam pembuatan dan perancangan sistem pemantauan radiasi nirawak apabila di kemudian hari sistem pemantauan radiasi nirawak menjadi salah satu kewajiban pemegang izin.

2. POKOK BAHASAN IDENTIFIKASI SARANA DAN PRASARANA

Sebelum adanya kebutuhan dalam merancang dan mengembangkan sistem pemantauan radiasi nirawak, beberapa lembaga internasional yang memiliki tanggungjawab dalam melakukan deteksi dan proteksi radiasi telah mengembangkan sistem pemantauan radiasi bergerak. Sistem ini biasanya dirancang dengan memasang detektor radiasi pada sebuah kendaraan baik kendaraan darat maupun kendaraan udara. Dalam perancangan sistem pemantauan radiasi nirawak memiliki dua sarana yang hampir sama dengan sistem pemantauan radiasi bergerak, yakni kendaraan nirawak dan detektor radiasi [4].

Penggunaan kendaraan nirawak dalam hal ini diutamakan menggunakan kendaraan udara. Hal ini dimaksudkan pergerakan moda pemantauan radiasi tidak terhambat dan dapat mencapai titik-titik yang tidak dapat digapai kendaraan darat. Dengan menggunakan kendaraan udara juga dimaksudkan agar mobilisasi sistem pemantauan menjadi lebih cepat dan sekaligus melindungi personel dengan mengoperasikan sistem dari jarak jauh [4].

Detektor radiasi yang dibutuhkan dalam sistem pemantauan radiasi nirawak harus memiliki kemampuan untuk mendeteksi radiasi dan melakukan spektrometri guna mengidentifikasi sumber radiasi. Detektor radiasi dalam perancangan dan pengembangan sistem pemantauan umumnya digunakan detektor *geiger muller* (GM) guna mengetahui besaran kontaminan radiasi gama

yang terdeteksi. Selain menggunakan detektor GM, sedang dikembangkan juga penggunaan detektor sintilasi untuk mengidentifikasi sumber kontaminan radiasi [4].

Selain dua sarana utama berupa kendaraan nirawak dan detektor radiasi, dibutuhkan juga beberapa prasarana lainnya untuk mendukung interaksi dan antarmuka sistem pemantauan radiasi. Sistem pemantauan radiasi nirawak dalam hal ini harus memiliki dua sisi, yakni sisi depan di mana kendaraan udara nirawak dan detektor radiasi memonitor daerah terdampak radiasi dan sisi belakang di mana operator mengoperasikan sistem pemantauan sekaligus menerima dan memproses secara langsung data pemantauan yang dilakukan oleh sisi depan dalam bentuk nilai dosis, lokasi, dan luasan area pengukuran [4].

Untuk memenuhi hal ini, dalam suatu sistem pemantauan radiasi nirawak dibutuhkan modul kontrol dan komunikasi antara sisi sistem pemantauan dengan stasiun pemantauan, sensor navigasi untuk mengetahui lokasi terbang dan lokasi pengukuran sistem pemantauan, dan perangkat lunak kontrol untuk memproses data pengukuran pada stasiun pemantauan. Terdapat juga beberapa prasarana opsional seperti sampling udara untuk mengambil sampel udara pada titik-titik pengukuran [4].

A. Kendaraan Udara Nirawak

Kendaraan udara nirawak merupakan satu-satunya jenis kendaraan nirawak yang memiliki kemampuan yang dibutuhkan dalam sistem pemantauan radiasi nirawak, tanpa hambatan dan dapat menjangkau titik-titik yang tak terjangkau kendaraan lain. Kendaraan udara nirawak sendiri kemudian diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, kendaraan udara sayap rotari dan kendaraan udara sayap tetap [11].

Kendaraan nirawak tipe sayap rotari memiliki kelebihan yakni memiliki kebebasan manuver vertikal maupun horizontal, memiliki kemampuan mengambang di udara, dan membutuhkan area lepas landas yang kecil. Namun penggunaan kendaraan

sayap rotari juga memiliki beberapa kekurangan, diantaranya memiliki area jelajah, waktu terbang, serta kapasitas beban yang lebih sedikit dibandingkan dengan sayap tetap [11].

Walaupun kendaraan udara sayap tetap memiliki kelebihan dalam area jelajah, waktu terbang, dan kapasitas beban yang lebih tinggi, kendaraan nirawak sayap tetap hanya dapat terbang dalam satu trajektori tertentu sehingga tidak memiliki kebebasan manuver terbang layaknya kendaraan udara sayap rotari. Kendaraan udara sayap tetap juga tidak memiliki kemampuan mengambang di udara dan membutuhkan area lepas landas yang cukup luas [11]. Penggunaan kendaraan nirawak di satu sisi memiliki kekurangan di mana durasi jam terbang yang cukup singkat terutama pada kendaraan nirawak sayap rotari. Salah satu cara untuk mengantisipasi hal ini adalah dengan menambah kapasitas baterai untuk menambah durasi waktu terbang dari kendaraan nirawak atau menambah armada kendaraan nirawak. Penambahan kapasitas baterai berdampak pada bertambahnya muatan beban sehingga mengurangi porsi sistem lainnya dalam sistem pemantauan radiasi yang diajukan [12].

Dari beberapa studi, untuk memitigasi kelemahan pada baterai terdapat beberapa opsi, diantaranya menggunakan manajemen baterai sistem navigasi untuk efisiensi baterai [12], menggunakan teknik suplai baterai melalui stasiun darat maupun menggunakan teknik *tethering* dengan kabel, serta menggunakan kombinasi daya dari sel bahan bakar, baterai, dan kapasitor [13].

Dalam melakukan pemantauan radiasi, kedua tipe kendaraan nirawak memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Kendaraan sayap rotari dalam hal ini mampu melakukan pengukuran untuk titik-titik tertentu yang ditentukan secara lebih efektif, namun tidak dapat melakukan pengukuran dalam wilayah yang luas dalam waktu yang lama. Dalam hal penggunaannya dalam melakukan pemantauan untuk dapat menjadi pengganti sistem pemantauan stasioner yang sudah ada, kendaraan sayap rotari memiliki kegunaan yang dapat menggantikan sistem pemantauan stasioner yang ada.

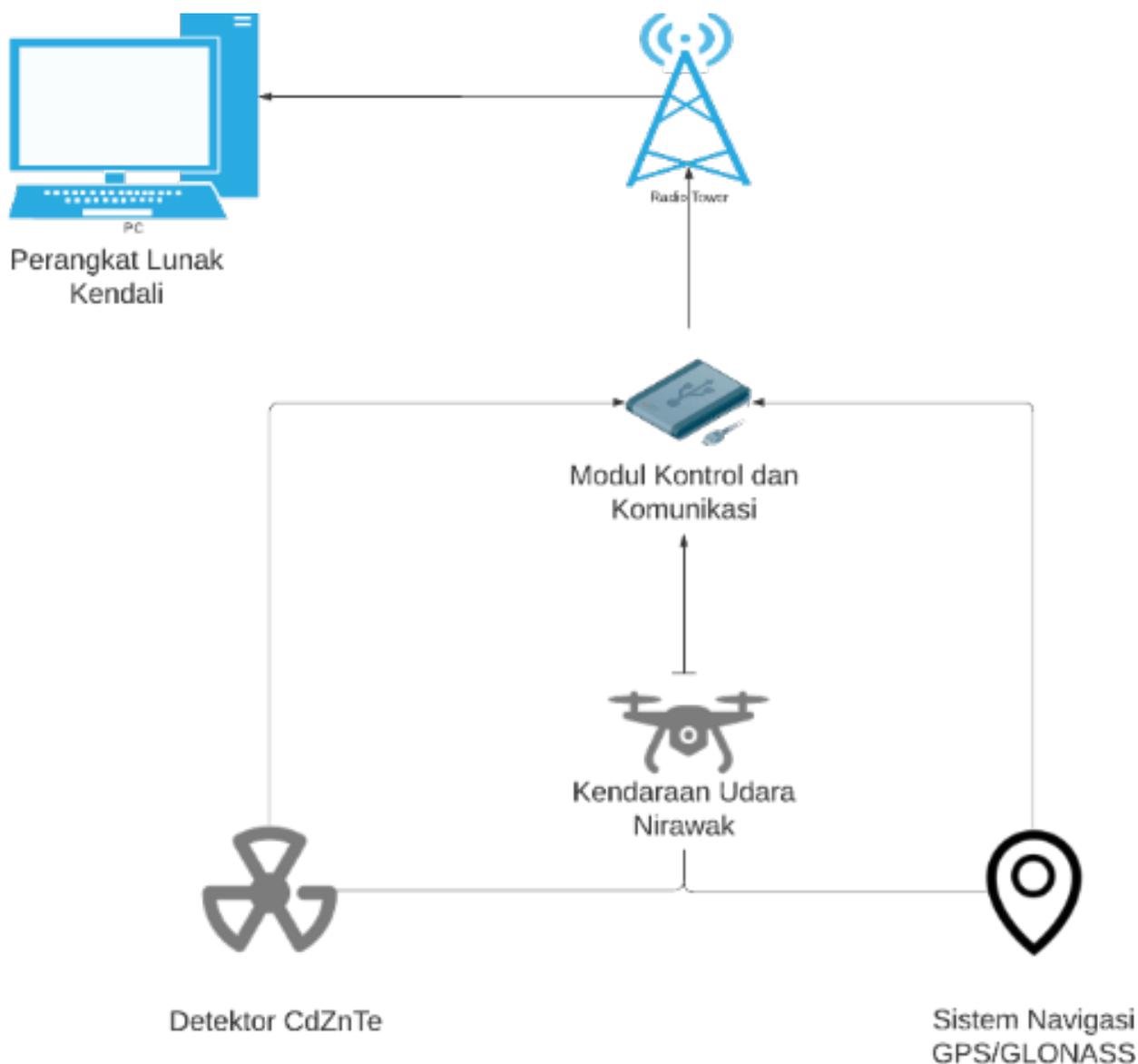
B. Detektor Radiasi

Idealnya, detektor radiasi yang digunakan untuk mengukur sekaligus memantau paparan radiasi pada suatu daerah memiliki densitas material yang

tinggi agar memiliki laju cacah yang tinggi. Hal ini tentu saja tidak bisa diaplikasikan pada sistem pemantauan radiasi nirawak karena memiliki kapasitas beban yang terbatas. Perlu diingat juga, pada sistem pemantauan radiasi juga dibutuhkan beberapa perangkat lain seperti modul kontrol dan komunikasi serta sistem navigasi. Kapasitas beban yang akan diterima oleh kendaraan udara nirawak apabila menerima kapasitas beban melebihi standard akan berakibat pada berkurangnya waktu terbang dan melambatnya kecepatan jelajah. Untuk mengantisipasi hal ini, biasanya digunakan metode pemantauan dengan memobilisasi beberapa unit sistem pemantauan radiasi. Dengan demikian dapat meminimalkan potensi hilangnya cacah inheren akibat *stopping power* yang dialami detektor [14].

Detektor GM merupakan salah satu detektor yang dikembangkan pada awal perkembangan sistem pemantauan radiasi nirawak. Hal ini dikarenakan sistem detektor GM yang cukup sederhana, di mana hanya membutuhkan kamar isian gas *inert* dengan elektroda positif dan negatif. Radiasi yang masuk ke dalam detektor kemudian menyebabkan ionisasi pada gas sehingga ion positif yang tercipta kemudian bergerak ke elektroda positif, begitu halnya dengan elektron negatif yang dihasilkan juga bergerak ke elektroda negatif. Hal ini kemudian menghasilkan pulsa listrik yang kemudian diproses menjadi besaran radiasi atau dosis. Detektor ini memiliki berat yang ringan dengan volume yang cukup tinggi, namun memiliki sensitivitas yang cukup rendah dibandingkan detektor tipe lainnya [5].

Detektor sintilasi dalam perkembangan sistem pemantauan radiasi nirawak cukup banyak digunakan. Pada penerapannya, terdapat tiga jenis material yang cukup sering digunakan, yakni $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$, NaI, dan CsI. Detektor CsI dan NaI memiliki beberapa kesamaan karakteristik, di mana keduanya merupakan campuran alkali halida yang memiliki properti sintilasi yang baik ketika kristal murni disisipkan dengan impuritas tertentu. Detektor NaI dalam hal ini lebih murah dibandingkan CsI, karena memiliki kelimpahan yang lebih banyak di alam, namun bersifat higroskopik di mana material menjadi mudah rapuh apabila menyerap air. Hal ini membuat NaI membutuhkan kedap udara untuk tempat dudukan sehingga menambah berat sistem. Material CsI di sisi lain memiliki higroskopik yang lebih rendah dan tidak serapuh NaI sehingga



Gambar 3: Diagram sistem pemantauan radiasi nirawak

memiliki ketahanan mekanik yang lebih baik. Ketika kristal teraktivasi, CsI dalam hal koefisien absorpsi gama per ukuran detektor memiliki nilai yang lebih tinggi daripada NaI. Namun NaI menghasilkan foton yang lebih terang dari CsI sehingga interaksi radiasi pada detektor lebih mudah terdeteksi [5].

Selain NaI dan CsI, digunakan juga $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$ sebagai material sintilasi. $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$ menghasilkan resolusi energi yang lebih baik dari NaI dan CsI, namun memiliki material yang bersifat higroskopik sehingga memerlukan ruang kedap udara. Detektor $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$ dalam studi Sanada dan Torii 2015 menunjukkan *full width at half maximum* (FWHM) yang lebih rendah daripada NaI dan CsI pada energi 662 keV [14]. Namun spektra dari $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$ tidak memiliki bentuk diskriminasi sebaik NaI dan CsI. Pembentukan sinyal yang buruk dari $\text{LaBr}_3[\text{Ce}]$ tidak menunjukkan masalah ketika digunakan

untuk memetakan zona paska bencana, di mana radioaktivitas yang terlepas sebagian besar terasosiasi dengan produk fisi.

Digunakan juga beberapa pengembangan sistem monitoring radiasi nirawak menggunakan CdZnTe. Varian detektor ini memanfaatkan ionisasi dari semikonduktor dari radiasi gama yang datang yang menghasilkan gerakan dari pasangan elektron-hole ke arah elektroda yang berlawanan untuk menghasilkan pulsa listrik. Material CdZnTe memiliki nomor massa yang tinggi sehingga memiliki efisiensi cacah yang baik. Salah satu kelebihan CdZnTe adalah materialnya yang dapat dimanufaktur menjadi bentuk-bentuk tertentu untuk mengoptimasi aplikasi deteksi yang akan dilakukan [5]. Selain itu, detektor CdZnTe memiliki ketahanan terhadap temperatur dan kelembaban yang cukup baik [15] serta cukup teruji dalam pengukuran in situ [16]. Dalam aplikasi

Tabel 2: Spesifikasi dasar kebutuhan sarana dan prasarana sistem pemantauan radiasi nirawak

Sistem Pemantauan Radiasi Nirawak	
Sarana	Persyaratan dan Spesifikasi
Kendaraan udara nirawak	<ul style="list-style-type: none"> - Kendaraan udara sayap rotari <ul style="list-style-type: none"> ▫ Cakupan jelajah: minimal 3–5 km ▫ Waktu terbang: minimal 30 menit ▫ Kapasitas beban: minimal 2 kg
Detektor radiasi	<ul style="list-style-type: none"> - Detektor CdZnTe <ul style="list-style-type: none"> ▫ Berat sistem detektor: maksimal 2 kg ▫ Resolusi energi: <2,5% pada 662 keV [5] [12] [20]
Modul kontrol dan komunikasi	- Mikrokontroler terintegrasi dengan sistem RF telemetri
Sistem navigasi	- Berbasis GPS/GLONASS
Perangkat lunak kendali	<ul style="list-style-type: none"> - Berbasis bahasa pemrograman atau dari platform yang sudah tersedia - Dapat mendukung analisis dan proses data dalam bentuk peta panas radiasi - Tampilan pengukuran terintegrasi dengan perangkat lunak pemetaan.

pengukuran radiasi menggunakan kendaraan nirawak, memiliki waktu akuisisi spektrum pada rentang 1 sampai 30 menit dengan rentang 59–1173 keV. Semakin tinggi energi, maka waktu akuisisi yang dibutuhkan akan semakin lama [6].

Dari berbagai jenis detektor yang disebutkan, detektor GM memiliki kekurangan tidak dapat melakukan spektroskopi, yang cukup dibutuhkan dalam pemantauan untuk mengetahui sumber radiasi. Hal ini kemudian dapat diampu oleh detektor sintilasi, yakni NaI, CsI, dan La LaBR₃[Ce], namun material sintilasi NaI dan LaBR₃[Ce] bersifat higroskopik, sehingga dibutuhkan pengungkung untuk menjaga material tidak terpapar dengan uap air di udara. CsI di sisi lain memiliki material yang tidak higroskopik, namun memiliki sensitivitas yang lebih rendah dari material sintilasi lainnya. Detektor semikonduktor CdZnTe di sisi lain memiliki ketahanan material terhadap lingkungan ambien yang cukup baik dan waktu akuisisi spektrum yang lebih baik dari pada detektor GM dan detektor sintilasi. Detektor CdZnTe dalam hal ini memiliki kemampuan yang disyaratkan dalam merancang sistem pemantauan radiasi nirawak. Persyaratan teknis lebih lanjut dalam penggunaan detektor CdZnTe kemudian akan dibahas pada pembahasan.

C. Modul Kontrol dan Komunikasi

Data yang diakuisisi oleh detektor radiasi kemudian harus ditransmisikan ke stasiun darat untuk kemudian diolah dan diinterpretasikan. Komunikasi

data selain untuk mentransmisikan data pengukuran, juga dibutuhkan untuk menavigasikan sistem pemantauan untuk melakukan pengukuran dari satu titik ke titik yang lainnya. Pada pengembangannya, metode mentransmisikan data pengukuran dan navigasi sistem memanfaatkan frekuensi radio UHF (*Ultra High Frequency*) antara 300–3.000 MHz [17].

Dalam beberapa pengembangan sistem pemantauan radiasi nirawak, untuk transmisi data memanfaatkan frekuensi radio berbasis telemetri [9]. Penggunaan frekuensi radio ini ditujukan untuk menghindari menggunakan transmisi menggunakan frekuensi seluler. Hal ini dilakukan guna mengantisipasi terjadinya *overload* apabila terjadi bencana alam sehingga pemantauan tetap bisa dilaksanakan [4]. Dalam beberapa pengembangan sistem juga digunakan transmisi data dengan menggunakan frekuensi seluler dengan memanfaatkan modem wifi. Penggunaan modem wifi untuk transmisi data biasanya dilakukan apabila kemungkinan terjadinya *overload* pada frekuensi seluler dapat diantisipasi sehingga transmisi data dapat berjalan dengan lancar [8].

Untuk sistem navigasi sendiri, dalam beberapa perkembangan kendaraan nirawak memanfaatkan frekuensi 2,4 GHz atau 5,0 GHz sesuai dengan peraturan pada masing-masing negara [18]. Pada peraturan di Indonesia, sistem pemantauan radiasi nirawak, termasuk dalam perangkat *Short Range Device* (SRD) di mana sistem memiliki pemancar dan penerima berdaya rendah serta dalam penggunaan

frekuensinya tidak terdapat perlindungan dan tidak boleh menimbulkan gangguan yang merugikan [19].

Alokasi SRD di Indonesia sendiri berada pada frekuensi 2,4 GHz–2,4835 GHz dan 5,725 GHz–5,825 GHz. Pada alokasi ini umumnya digunakan untuk alarm, sistem identifikasi, deteksi radio, sistem radar kendaraan, pengendali jarak jauh, perintah jarak jauh, pengukuran jarak jauh, dan sistem pemanggilan setempat [20].

Dalam merancang sistem pemantauan radiasi nirawak, dibutuhkan modul kontrol dan komunikasi untuk mengkomunikasikan data pengukuran dari detektor ke operator di stasiun darat dan melakukan navigasi jarak jauh sistem dari satu titik ke titik lainnya. Modul kontrol dan komunikasi dalam hal ini digunakan modul telemetri dengan frekuensi radio dalam rentang frekuensi 2,4 GHz atau 5,0 GHz sesuai dengan regulasi yang berlaku di Indonesia. Penggunaan frekuensi ini ditujukan untuk menghindari terjadinya *overload* apabila menggunakan modem wifi yang biasanya terjadi saat kejadian bencana alam.

D. Sistem Navigasi

Sistem navigasi yang digunakan dalam merancang sistem pemantauan radiasi nirawak, diharuskan memiliki akurasi yang cukup baik dan mampu merepresentasikan lokasi sistem pemantauan radiasi saat melakukan pengukuran. Sehingga lokasi dapat dilihat dari sisi operator di stasiun darat. Selain lokasi, pergerakan dari sistem pemantauan sendiri harus dapat terbaca perpindahannya secara *real-time*, sehingga pengukuran dapat dilakukan dengan akurat.

Sistem navigasi yang digunakan pada pengembangan sistem pemantauan radiasi nirawak terdapat beberapa ragam. Pada beberapa sistem yang memanfaatkan kendaraan sayap rotari, sistem navigasi biasanya sudah diakomodir oleh sistem GPS/GLONASS *built-in* pada kendaraan sayap rotari. Hal ini dikarenakan pada perkembangan kendaraan udara nirawak sayap rotari dewasa ini sudah memperhitungkan presisi dan otomasi sistem sehingga tidak jarang ditemukan sistem navigasi GPS/GLONASS dengan akurasi di bawah tiga meter [18].

E. Perangkat Lunak Kendali

Perangkat lunak kendali sistem pemantauan radiasi nirawak merupakan salah satu prasarana sistem untuk menerima, memproses, menganalisis, dan menampilkan data pemantauan radiasi yang dihasilkan dari sistem pemantauan radiasi. Data yang diterima pada perangkat lunak kendali merupakan data pengukuran radiasi dan data lokasi pengukuran yang didapat melalui detektor radiasi dan sistem navigasi. Data yang diterima ini kemudian diproses dan dianalisis menggunakan perangkat lunak kendali untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk peta panas radiasi.

Perangkat lunak kendali ini pada perkembangan sistem pemantauan radiasi nirawak, biasanya merupakan kustomisasi dari platform perangkat lunak yang tersedia. Penggunaan LABVIEW 2016 dalam studi yang dilakukan Martin et al 2016 [21] dengan beberapa kustomisasi untuk menggabungkan peta dengan hasil pengukuran detektor. Dalam studi Cerba et al 2020 [4], perangkat lunak kendali dikembangkan dalam ECLIPSE menggunakan bahasa C++ dengan WxWidgets *Multiplatform libraries* untuk membuat antarmuka grafis pengguna. Data hasil pengukuran diperlakukan secara *real-time* dan dapat divisualisasikan dalam peta paparan radiasi. Hasil pengukuran ini terproses dengan jenis file “kml” yang dapat divisualisasikan dengan software QGIS–*Open Street Map*, *Google Earth*, atau perangkat lunak pemetaan lainnya. Dalam studi oleh Luchkov et al 2020 perangkat lunak kendali sendiri ditulis secara mandiri dengan menggunakan Phyton 3.5 [10].

Untuk dapat mengakomodir sistem pemantauan radiasi nirawak, dibutuhkan program perangkat lunak yang dapat menerima data pemantauan untuk kemudian diproses dan dilakukan analisis perhitungan radiasi per luas wilayah. Penerimaan data dan analisis ini kemudian dapat dikembangkan melalui bahasa pemrograman yang tersedia dan dipresentasikan ke dalam peta panas radiasi dalam perangkat lunak pemetaan seperti yang dijelaskan sebelumnya. Penggunaan perangkat lunak analisis data dan tampilah data akhir, tidak terdapat spesifikasi khusus secara rinci. Dalam hal ini lebih ditekankan bagaimana penggunaan perangkat lunak-perangkat lunak tersebut dapat memberikan hasil analisis dan peta panas radiasi yang komprehensif.

3. PEMBAHASAN

Dalam Peraturan Kepala BAPETEN No. 1 tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir, diatur tentang pemasangan alat deteksi dan pemantauan radiologis di daerah tapak maupun di batas tapak pada delapan penjuror mata angin. Pemasangan pemantauan kemudian menyesuaikan dengan zona kedaruratan dan radius yang ditetapkan [1].

Zona kedaruratan ini kemudian terbagi ke dalam tiga kategori, yakni zona tindakan pencegahan, zona perencanaan, dan zona pengawasan bahan pangan. Zona tindakan pencegahan diterapkan untuk fasilitas atau instalasi merupakan tempat dilakukannya tindakan perlindungan segera sebelum atau segera setelah terjadi lepasan zat radioaktif. Zona perencanaan diterapkan pada fasilitas merupakan tempat yang dipersiapkan untuk tempat berlindung, melakukan pemantauan lingkungan dan melaksanakan tindakan perlindungan segera berdasarkan hasil pemantauan dalam beberapa jam setelah terjadi lepasan. Zona pengawasan bahan pangan dipersiapkan untuk pelaksanaan tindakan perlindungan yang efektif dalam mengurangi risiko terjadinya efek stokastik akibat mengkonsumsi makanan lokal [1].

Reaktor riset yang ada di Indonesia dalam peraturan di atas termasuk dalam fasilitas nuklir kategori bahaya radiologi II. Dalam klasifikasi pada Lampiran II Perka BAPETEN No. 1 tahun 2010, reaktor riset di Indonesia masuk pada rentang 2–10 MWt untuk 2 MWt reaktor TRIGA, 100 kWt daya reaktor Kartini, dan rentang daya 10–100 MWt untuk 30 MWt daya reaktor serbaguna G.A. Siwabessy [1]. Dari rentang daya ini maka, zona tindakan pencegahan minimal pada dinding terluar fasilitas dan zona perencanaan pada 0,5–5 km. Berdasarkan zona ini kemudian dapat ditentukan kebutuhan dan spesifikasi sistem pemantauan radiasi nirawak yang sesuai [1].

Dalam menentukan kendaraan udara nirawak yang sesuai, dapat digunakan radius zona perencanaan sebagai acuan jelajah kendaraan udara nirawak. Dengan kebutuhan jelajah dalam radius 0,5–5 km, kendaraan udara sayap rotari menjadi pilihan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan sayap tetap. Hal ini dikarenakan kendaraan sayap rotari memiliki cakupan jelajah yang sesuai. Waktu

terbang yang hanya 30 menit untuk 1 perangkat, dalam pemantauan radiasi reaktor riset layak. Namun apabila dibutuhkan pemantauan lebih lanjut secara kontinu, dapat dilakukan pergantian baterai di stasiun darat [11].

Untuk penentuan detektor pemantauan, diutamakan menggunakan detektor sintilasi ataupun semikonduktor yang memiliki kemampuan untuk melakukan spektrometri radiasi gama. Hal ini dibutuhkan karena dengan detektor jenis ini dapat dilakukan pengukuran dosis sekaligus mengidentifikasi jenis radionuklida lepasan dari fasilitas reaktor riset. Dari detektor sintilasi dan semikonduktor yang dijabarkan di muka, penggunaan detektor CdZnTe menjadi pilihan yang cukup sesuai dengan kebutuhan monitoring radiasi nirawak di Indonesia. Hal ini karena detektor CdZnTe dapat beroperasi optimal pada temperatur ambien dan memiliki resolusi energi yang lebih baik apabila dibanding detektor sintilasi. Penggunaan CdZnTe tidak memerlukan energi yang besar sehingga dapat terintegrasi dengan mudah dengan sistem. Dalam hal melakukan spektroskopi, detektor CdZnTe memerlukan waktu rata-rata 10 menit untuk mendapatkan spektrum energi radionuklida yang dipantau. Salah satu tantangan penggunaan detektor CdZnTe adalah meningkatkan efisiensi deteksi akibat ukuran kristal yang kecil sehingga dapat meningkatkan analisis spektrum agar dapat mendekati performa detektor HPGe [6] [9] [22] [23].

Dalam modul kontrol dan komunikasi yang dibutuhkan untuk mentransmisikan data pengukuran dan data lokasi pengukuran, penggunaan frekuensi radio telemetri merupakan pilihan yang tepat. Hal ini untuk mengantisipasi hilangnya sinyal ponsel apabila terjadi pemadaman daya listrik di sekitar wilayah terdampak bencana [24]. Modul kontrol ini kemudian diintegrasikan dalam arsitektur mikrokontroler yang akan dipasang pada kendaraan nirawak yang terintegrasi dengan sistem detektor dan sistem navigasi. Salah satu pengembangan modul kontrol dan komunikasi, yakni menggunakan arsitektur mikrokontroler, seperti menggunakan arduino atau ROS. Selain itu diintegrasikan juga modul RF untuk komunikasi data [9]. Pada penggunaannya, modul kontrol dan modul komunikasi dalam sistem pemantauan radiasi nirawak diharapkan dapat memberikan perintah misi pengukuran pada daerah

pengukuran dalam delapan penjuror mata angin dari fasilitas [25].

Sistem navigasi pada sistem pemantauan radiasi nirawak dalam kebutuhan pemantauan di Indonesia dapat memanfaatkan sistem GPS/GLONASS. Sistem GPS/GLONASS dalam hal ini pada beberapa pilihan *brand* kendaraan nirawak sudah termasuk dalam satu kesatuan sistem kendaraan nirawak [18]. Apabila dalam perancangan sistemnya, kendaraan nirawak yang digunakan belum termasuk sistem navigasi, maka sistem navigasi ini harus dapat terpasang dari pihak ketiga minimal berbasis GPS.

Perangkat lunak kendali dalam perancangan sistem pemantauan radiasi nirawak dibutuhkan sebagai pusat penerimaan, proses, analisis, dan penampilan data pemantauan radiasi. Sistem ini harus bersifat *real-time* sehingga hasil pemantauan yang dilakukan oleh perangkat pemantauan dapat segera terbaca dan tampil dalam peta panas radiasi sehingga kebijakan mitigasi dapat diputuskan dengan cepat dan tepat. Perangkat lunak kendali dalam perkembangannya kebanyakan merupakan perangkat lunak kustomisasi dengan menggunakan bahasa pemrograman atau dari *platform* yang sudah tersedia [4] [10] [21]. Kebutuhan sistem pemantauan radiasi nirawak akan hal ini tidak terlalu spesifik teknologi yang digunakan, melainkan lebih ke arah performa dari perangkat lunak kendali dapat memproses data secara *real-time* dan dapat divualisasikan berupa peta panas radiasi pada perangkat lunak pemetaan.

Dari kebutuhan-kebutuhan sistem tersebut, kemudian dapat dibentuk diagram kebutuhan sistem pemantauan radiasi nirawak. Dari sistem ini seluruh sistem terintegrasi pada kendaraan nirawak yang kemudian akan mentransmisikan data dan lokasi pengukuran ke dalam perangkat lunak kendali. Diagram sistem dapat dilihat pada Gambar 3.

Dari penjelasan dan pilihan teknologi pada pembahasan, sistem pemantauan radiasi nirawak di Indonesia kemudian dapat diidentifikasi dan dijabarkan persyaratannya. Persyaratan-persyaratan ini merupakan syarat umum apabila ke depannya sistem pemantauan radiasi nirawak akan dibakukan dan diwajibkan terhadap pemegang izin reaktor riset di Indonesia. Beberapa persyaratan tersebut disajikan dalam Tabel 2.

4. SIMPULAN

Telah dibahas identifikasi kebutuhan sarana prasarana untuk sistem pemantauan radiasi nirawak dalam pemantauan radiasi reaktor riset di Indonesia yang membutuhkan, hal sebagai berikut: kendaraan udara nirawak, detektor radiasi, modul kontrol dan komunikasi, sistem navigasi, dan perangkat lunak kendali.

Kendaraan udara nirawak dalam perancangan dan pengembangannya digunakan tipe sayap rotari yang memiliki cakupan jelajah minimal sejauh 5 km. Digunakan detektor CdZnTe yang dapat bekerja optimal pada temperatur dan kelembaban ambien dengan bentuk kristal yang dapat disesuaikan dengan berat detektor. Modul kontrol dan komunikasi berbasis mikrokontroler dan terintegrasi dengan modul RF sehingga dapat mentransmisikan data dengan memanfaatkan sinyal radio.

Sistem navigasi berbasis GPS/GLONASS guna mengetahui lokasi titik pengukuran dengan akurasi di bawah tiga meter. Kemudian untuk perangkat lunak kendali diharapkan dapat menerima, memproses, menganalisis, dan menampilkan data pemantauan radiasi secara *real-time* dalam bentuk peta panas radiasi di dalam perangkat lunak pemetaan yang tersedia.

Spesifikasi umum ini dibuat apabila sistem pemantauan radiasi nirawak akan dibakukan dan diberlakukan untuk pemegang izin reaktor riset di Indonesia, maka sistem yang dibuat dapat mengacu pada spesifikasi tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] BAPETEN, *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 1 Tahun 2010 tentang Kesiapsiagaan dan Penanggulangan Kedaruratan Nuklir*. Jakarta: Badan Pengawas Tenaga Nuklir, 2010.
- [2] M. Dragusin, D. Stanga, D. Gurau, and E. Ionescu, "Radiation monitoring under emergency conditions," 2014. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/272483483>.
- [3] Supartoyo, O. Abdurahman, and Kurnia A, "Gempa Yogyakarta 10 Tahun," *Geomagz*, vol. 6, no. 2, pp. 18–23, 2016.

- [4] S. Cerba, J. Luley, B. Vrban, F. Osusky, and V. Necas, "Unmanned Radiation-Monitoring System," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 67, no. 4, pp. 636–643, Apr. 2020, doi: 10.1109/TNS.2020.2970782.
- [5] D. Connor, P. G. Martin, and T. B. Scott, "Airborne radiation mapping: overview and application of current and future aerial systems," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 37, no. 24. Taylor and Francis Ltd., pp. 5953–5987, Dec. 16, 2016, doi: 10.1080/01431161.2016.1252474.
- [6] J. Borbinha *et al.*, "Performance analysis of geiger-müller and cadmium zinc telluride sensors envisaging airborne radiological monitoring in NORM sites," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 5, Mar. 2020, doi: 10.3390/s20051538.
- [7] Y. Sanada and T. Torii, "Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter," *J. Environ. Radioact.*, vol. 139, pp. 294–299, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.027.
- [8] Y. Nishizawa, M. Yoshida, Y. Sanada, and T. Torii, "Distribution of the $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio around the Fukushima Daiichi nuclear power plant using an unmanned helicopter radiation monitoring system," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 53, no. 4, pp. 468–474, Apr. 2016, doi: 10.1080/00223131.2015.1071721.
- [9] S. Widodo, A. Abimanyu, and R. Apribra, "Development of drone mounted aerial gama monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1436, p. 012126, Jan. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012126.
- [10] M. Luchkov, S. Neumaier, and A. Vargas, "Unmanned Aircraft Based Gama Spectrometry System for Radiological Surveillance," in *Sensor and Measurement Science International Conference Proceedings*, 2020, pp. 311–312, doi: 10.5162/SMSI2020/E6.2.
- [11] C. Lee and H. R. Kim, "Optimizing UAV-based radiation sensor systems for aerial surveys," *J. Environ. Radioact.*, vol. 204, pp. 76–85, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.jenvrad.2019.04.002.
- [12] J. Kim, S. Kim, J. Jeong, H. Kim, J. S. Park, and T. Kim, "CBDN battery management," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, vol. 20, no. 11, pp. 4174–4191, Accessed: Nov. 01, 2021. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8574043>.
- [13] M. N. Boukoberine, Z. Zhou, and M. Benbouzid, "Power Supply Architectures for Drones-a Review," *IECON 2019-45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 1, pp. 5826–5831, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/IECON.2019.8927702>.
- [14] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Michigan: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [15] R. Rahman, A. J. Plater, P. J. Nolan, and P. G. Appleby, "Assessing czr detector performance for environmental radioactivity investigations," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 154, no. 4, pp. 477–482, May 2013, doi: 10.1093/rpd/ncs253.
- [16] M. Kowatari *et al.*, "Application of a CZT detector to in situ environmental radioactivity measurement in the Fukushima area," *Radiat. Prot. Dosimetry*, vol. 167, no. 1–3, pp. 348–352, Nov. 2015, doi: 10.1093/rpd/ncv277.
- [17] ITU, "Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications V Series Vocabulary and related subjects," Geneva, 2015. [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.
- [18] DJI, "MATRICE 600 PRO USER MANUAL," 2017. <http://www.dji.com/matrice600-pro/info#downloads>.
- [19] Kominfo, *Peraturan Menteri Komunikasi dan Informatika Nomor 35 Tahun 2015 tentang Persyaratan Teknis Alat dan Perangkat Telekomunikasi Jarak Dekat*. Jakarta: Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2015.
- [20] S. P. Gunawan, "PENERAPAN PITA FREKUENSI KHUSUS UNTUK LSU: KAJIAN DARI SISI REGULASI ALOKASI SPEKTRUM FREKUENSI," in *Seminar Nasional Iptek Penerbangan dan Antariksa XXI-2017*, 2017, pp. 67–81.
- [21] P. G. Martin, J. Moore, J. S. Fardoulis, O. D. Payton, and T. B. Scott, "Radiological assessment on interest areas on the sellafield nuclear site via unmanned aerial vehicle," *Remote Sens.*, vol. 8, no. 11, 2016, doi: 10.3390/rs8110913.
- [22] M. Kazemini, Z. Cook, J. Lee, A. Barzilov, and W. Yim, "Plug-and-play radiation sensor components for unmanned aerial system platform," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 318, no. 3, pp. 1797–1803, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10967-018-6233-2.

- [23]P. P. Falciglia, L. Biondi, R. Catalano, G. Immè, S. Romano, and F. G. A. Vagliasindi, "Preliminary investigation for quali-quantitative characterization of soils contaminated with ^{241}Am and ^{152}Eu by low-altitude unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with small size γ -ray spectrometer: detection efficiency and minimum detectable activity (MDA) concentration assessment," *J. Soils Sediments*, vol. 18, no. 6, pp. 2399–2409, Jun. 2018, doi: 10.1007/s11368-017-1720-6.
- [24]K. R. Pratama and K. R. Nisianto, "Mati Listrik Bikin Sinyal Ponsel Hilang, Ini Penjelasan Operator," 2020. <https://tekno.kompas.com/read/2020/11/01/17164287/mati-listrik-bikin-sinyal-ponsel-hilang-ini-penjelasan-operator?page=all> (accessed May 11, 2021).
- [25]N. Paula, B. Areias, A. B. Reis, and S. Sargento, "Multi-Drone Control with Autonomous Mission Support," in *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, 2019, pp. 918–923.