

GAMAWINGS: Sistem Drone Pintar Fotovoltaik untuk Deteksi Radiasi dan Monitoring Lingkungan guna Mewujudkan Kawasan yang Inklusif, Aman, dan Berkelanjutan

Jalalludin Mukhtafi¹, Marchelino Chrisrichy Cosmo Hutama², Panji Dewandaru³

¹) Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Corresponding Author: Jalalludin Mukhtafi (Email: jalalludin.mukhtafi@mail.ugm.ac.id)

Abstract

The discovery of radioactive substances at the Batan Indah housing complex in 2020 provided clear evidence of radioactive material dispersion within residential areas. Therefore, there is a pressing need for a practical, unmanned aerial vehicle (UAV) capable of detecting environmental radioactivity with minimal contact with the material in commercial locations – specifically, a drone. This drone will execute three simultaneous missions, powered by an integrated battery system supplemented by solar panels covering its surface. The drone's payload will include a data logger utilizing IoT, a radiation detector, and GNSS (Global Navigation Satellite Systems). The first mission is scouting. The drone will follow a "boustrophedon" path, integrated with GNSS. A LiDAR (Light Detection and Ranging) sensor within the payload will be used to create a 3D Contour Map using the SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algorithm. The second mission is monitoring. A Geiger-Müller detector and light sensor devices will continuously visualize a radioactivity heatmap overlaid onto the 3D contour map. Once the scouting and monitoring missions are complete, the radiation and contour data of the location will be visualized using an AoI (Radiological Area of Interest). To identify hotspots from the highest heatmap readings, a third mission will be executed using the TSP (Traveling Salesman Problem) to land the drone, equipped with a scintillation detector, within the AoI. This allows for the identification of radionuclide types, enabling appropriate follow-up actions by radiation protection officers. All collected data will be integrated into a website system managed by the authorized agency. This agency will then transmit real-time information as an early warning system regarding radioactivity levels to a mobile application, accessible to both the public and commercial sectors. Hence, GAMAWINGS is envisioned as a Minimum Viable Product (MVP) to address various radioactive issues. The ultimate goal is to foster inclusive, safe, and sustainable commercial locations, contributing to the achievement of net-zero emissions by 2060.

Keyword- CZT, Drone, GMC, radioactivity, sensor

1. Latar Belakang

Temuan limbah radioaktif di Perumahan Batan Indah, Serpong, Tangerang Selatan

pada Januari 2020 menyoroti kelemahan dalam pengawasan dan penanganan limbah radioaktif di Indonesia. Insiden ini didasari oleh Bapeten pada tanggal 30-

31 Januari 2020, ketika melakukan uji fungsi rutin pemantauan radioaktivitas secara berkala wilayah Pamulang, Perumahan Dinas Puspiptek, Daerah Muncul, Kampus ITI, Perumahan Batan Indah, dan Stasiun KA Serpong dengan menggunakan mobil detektor (Moni). Dari hasil *monitoring* ini, detektor menunjukkan anomali di sepenulsi perumahan BATAN Indah. Kemudian dilakukan penyisiran kembali, namun detektor tetap menunjukkan data anomali. BATAN dan BAPETEN kemudian berkoordinasi secara informal untuk pengukuran secara teknis, dengan izin RT/RW setempat. Ditemukan paparan radiasi tinggi di satu space kebun kosong (Nugraha dkk., 2020).

Dalam menanggapi temuan ini, Pekerja Proteksi Radiasi (PPR) dan petugas lainnya dikerahkan untuk menanganinya dan mencegah dampak kontaminasi radioaktif terhadap masyarakat. Dalam penanganan tersebut, sebagian petugas menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) secara lengkap, termasuk pakaian khusus, sementara beberapa tidak mematuhi prosedur keselamatan. Ini menjadi perhatian serius karena jenis radiasi yang berlebih dapat menyebabkan reaksi dan penyakit pada kulit berupa kerontokan rambut dan kerusakan kulit, gangguan fungsi normal (seperti pneumonitis radiasi), efek karsinogenesis, efek genetik, hingga kematian (Simanjuntak dkk., 2013). Temuan ini mencerminkan belum sepenuhnya tercapainya fungsi Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 33 Tahun 2007 tentang keselamatan radiasi pengion dan keamanan sumber radioaktif. Berdasarkan peraturan tersebut setiap instansi yang menggunakan radiasi pengion wajib menerapkan Keselamatan Radiasi sebagai usaha pencegahan dan penanggulangan kecelakaan radiasi. Selain masalah di masyarakat, kegiatan

penambangan juga menjadi sumber kekhawatiran terkait radiasi.

Radionuklida, dikenal sebagai TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*), dapat meningkat akibat aktivitas penambangan. Penelitian yang dilakukan Doyi dkk., (2016) pada tahun 2015 di lokasi pengeboran minyak dan gas di anjungan lepas pantai Bacia de Campos di Brasil dan ladang minyak Azeri-Chirag-Gunashli di Kazakhstan, menunjukkan terdapat bahan radioaktif ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{238}U , ^{232}Th , dan peluruhannya masing-masing terakumulasi pada pipa dan peralatan permukaan dalam bentuk kerak dan lumpur. Sedangkan di Indonesia, terdapat penelitian yang dilakukan di PT Petrokimia Gresik, menunjukkan bahwa kandungan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K yang terdapat di dalam fosfat pada umumnya lebih tinggi dari pada di dalam tanah maupun batuan lainnya. Banyak radionuklida yang masuk ke dalam pupuk yang dihasilkan sehingga memungkinkan pupuk untuk mendistribusikan radionuklida alami ke lingkungan menjadi penyebabnya.

Dalam menghadapi tantangan ini, sistem *monitoring* radiasi jarak jauh merupakan salah satu cara untuk meminimalkan resiko tersebut. Penggunaan *Drone* dalam *monitoring* radiasi menjadi sangat krusial. *Drone* memiliki keunggulan akses ke area yang sulit dijangkau, seperti medan yang sulit dan terpencil, serta memberikan pemetaan area dengan kecepatan tinggi. *Drone* dapat dilengkapi dengan sensor dan teknologi *imaging*, sehingga dapat memberikan data pemantauan radiasi yang akurat dan memberikan respons *real-time* terhadap perubahan kondisi lingkungan. Penggunaan *Drone* dalam *monitoring* radiasi lebih hemat biaya dan meningkatkan fleksibilitas operasional sehingga efektif dalam mitigasi

bahaya radiasi di lingkungan yang dinamis. Seiring teknologi terus berkembang, penggunaan *Drone* di bidang *monitoring* radiasi menjadi semakin vital untuk memastikan keamanan masyarakat, pekerja, dan lingkungan.

2. Tinjauan Pustaka

Morichi dkk., (2013) mengembangkan solusi spesifik menggunakan pengukuran laju dosis, G.P.S (*Geo Positioning System*) dan G.I.S (*Geographic Information System*) untuk visualiasi. Penerapan teknologi tersebut telah terintegrasi dengan platform yang dikembangkan oleh AREVA CANBERRA. Pengukuran radiasi gamma dengan spektrometri gamma dilakukan dengan detektor CZT (Cadmium Zinc Tellurium). Penggunaan CZT juga dilakukan oleh L. R. Pinto dkk. (2021) untuk mengidentifikasi radionuklida dengan spektroskopi gamma dan Geiger-Muller Counter (GMC) diterapkan untuk menentukan laju cacah ketika *Drone* terbang. Untuk visualisasi, P. G. Martin dkk. (2016) menggunakan sensor LiDAR agar terbentuk *cloud points* di lokasi sehingga terbentuk peta 3D. Liu dkk., (2023) mengembangkan algoritma *Direct LiDAR-Aerial Fusion Network* (DLAFnet) sehingga LiDAR dapat melakukan segmentasi objek.

Adapun jalur *Drone* (*Drone-path*) digunakan sebagai pemandu *Drone* dalam menjalankan misi. Tian dkk. (2009) dan Kriegel dkk. (2010) mengembangkan jalur *skyline* berdasarkan variasi parameter jalur, seperti panjang jalur atau waktu tempuh jalur. Kemudian Y.-C. Chen & Lee (2016) mengembangkan algoritma jalur *skyline query* yang akan memperhitungkan semua titik dan hubungan antara dua titik di jalur. Y.-R. Yang dkk. (2017) mengembangkan algoritma untuk *skyline query* dalam kondisi terkoneksi seluruhnya dengan

grafik sembari mempertimbangkan nilai dari segala sisi sembarang dan titik sembarang di waktu yang bersamaan. Y.-R. Chen & Chen (2018) mengadopsi algoritma terbaru dengan menggabungkannya dengan algoritma Dijkstra (1959). Algoritma ini terbagi menjadi 3 proses, fase 1: *pre-processing*, fase 2: pencarian jalur *skyline* pertama, dan fase 3: pencarian jalur *skyline* sisa pengamatan. Algoritma tersebut akan penulis integrasikan dengan struktur data, termasuk *max heap* dan *list*, di mana *max heap* digunakan untuk menyimpan jalur pengamatan yang akan diproses, dan *list* digunakan untuk menyimpan jalur final *skyline* pengamatan. Tahap *pre-processing* dimulai dengan memuat dan melakukan anotasi semua data dimensi dari titik peluncuran, serta *max heap* diinisialisasi. Setelahnya, data dimensi akan dinormalisasi menjadi yang semakin kecil semakin baik pada jalur pengamatan, dan juga menormalisasi kebalikan dari data dimensi yang semakin besar semakin baik. Fase 1 meliputi pencarian jalur *skyline* pertama menggunakan algoritma Dijkstra untuk mencari jalur pengamatan dengan jarak tempuh terpendek. Fase 2 akan meneruskan proses fase 1 saat di jalur pertama di *max heap*.

Untuk mendukung *monitoring* lingkungan, maka digunakan *Drone*. Radiansyah dkk. (2017) menggunakan *Drone* tipe *quadcopter* yang dirancang khusus untuk pemetaan dan pemantauan satwa liar, yang memuat berbagai jenis kamera sesuai kebutuhan, serta dapat diatur daya terbangnya sesuai berat baterai dan jenis sistem kamera. Mereka menggunakan *quadcopter* dengan spesifikasi sebagai berikut: lebar 700 mm, tinggi 415 mm (dengan *landing skids* dipasang), *ground clearance* 80 mm, berat kosong 1800 g, dilengkapi dengan baterai LiPo iP3 8000

mAh (850 g) atau 6200 mAh (600 g) sebagai cadangan, dan mampu membawa *payload* hingga 1200 g. *Quadcopter* ini dilengkapi dengan kamera yang dipasang di bagian depan dan menghadap ke bawah dengan sudut 90°. *Quadcopter* dapat diterbangkan secara manual menggunakan pengendali radio atau secara otomatis menggunakan mode otonom. Secara teknis *payload*, Yadav dkk. (2017) telah melakukan analisis mengenai efisiensi daya angkat *quadcopter* dengan berbagai baling-baling dan kapasitas beban yang berbeda. Hasil analisis menunjukkan bahwa *propeller* 9443 memberikan *thrust* sebesar 706 gram pada *throttle* 100%, sementara *propeller* 1045 memberikan *thrust* sebesar 737 gram pada *full throttle*. Sementara *propeller* 1045 memberikan 31gram *thrust* lebih banyak dengan konfigurasi motor yang sama.

Sementara, untuk fasilitas telekomunikasi *Drone* dan *base-station* telah diteliti oleh Alexandris dkk. (2021) dengan menerapkan *Ground Micrometeorological Station* (GMS) untuk mengobservasi *Crop Water Stress Index* (CWSI) dalam sistem akulturasi. Mil dkk. (2022) mengembangkan GCS yang terhubung dengan laptop sebagai pengendali otomatis UAV, untuk melakukan *take-off* dibutuhkan *software* tambahan yaitu Python, *library Dronekit-python*, sistem telemetri dan GPS. Dari hasil pengujian *takeoff quadcopter* dengan menggunakan GCS, diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 93.3% dan kegagalan 6.7%. *Drone* yang dibuat bisa terbang maksimal selama 10.2 menit dengan kapasitas baterai 5400 mAh.

Sementara itu, baterai pada *Drone* ini dapat diisi ulang menggunakan *Wireless Power Transmission* (WPT) yang tidak memerlukan koneksi fisik. Sistem transmisi WPT terdiri dari *transmitter* dan

receiver Rohan, M. Rabah, M. Talha, dan S.-H. Kim (2018). Ketika diimplementasikan ke *Drone*, sistem WPT dapat menghemat penggunaan daya menggunakan mode *sleep/active* seperti yang diusulkan Jawad dkk. (2019) tentang WPT menggunakan *magnetic resonant coupling* (MRC) *Drone* mengisi daya di GCS. Studi ini mengatasi tantangan seperti waktu penerbangan *Drone*, konsumsi daya, dan jarak komunikasi. Sistem WPT yang mereka teliti mencapai transfer daya sebesar 20,46 W dengan efisiensi 85,25% dalam kondisi setara. Hal tersebut juga memperpanjang umur baterai *Drone* menjadi 851 menit menggunakan mode *sleep/active*, menghasilkan penghematan daya baterai hingga 96,9% dibandingkan dengan mode tradisional. J.-F. Chen dkk. (2017) mengembangkan sistem metamaterial berbasis sistem WPT berefisiensi tinggi di kisaran 13,56 MHz untuk aplikasi berdaya rendah. Rittiplant & Pijitrojana (2015) melakukan studi tentang WPT berfrekuensi rendah menggunakan resonansi paralel untuk menyamakan impedansi, di mana C. Yang dkk., (2019) menganalisis, merancang, dan mengimplementasikan sistem WPT untuk UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*). Studi-studi tersebut menunjukkan potensi WPT untuk UAV di bidang *smart agriculture*, dengan kemajuan dalam transfer daya, efisiensi, dan perpanjangan masa pakai baterai.

Baterai tersebut nantinya akan terintegrasi dengan *Photovoltaik* (PV) yang mengandung bahan Perovskite, sehingga dinamakan *Solar Perovskite Cell* (PSC) atau sel surya perovskit. PSC terdiri dari oksida logam yang memiliki struktur perovskit, yang sebagian besar diklasifikasikan sebagai bahan feroelektrik atau piezoelektrik. Perovskit oksida logam memiliki sifat semikonduktor yang cocok

untuk aplikasi PV (Rohan dkk., 2018).

Agar sebuah sistem *monitoring* radiasi terpadu dapat dipahami manusia, diperlukan platform *website* untuk memvisualisasi hasil pengukuran alat deteksi. Prasetya dkk., (2018) mengembangkan Sistem Pantau Lingkungan Online Lokasi Instalasi Nuklir yang disebut dengan RAMONA (Radiation and Meteorological *Monitoring* Analysis System). Sistem ini terdiri dari komputer dan sistem deteksi. Untuk pengiriman datalog, dapat melewati *database* seperti yang dilakukan Muhtadan dkk. (2020) dalam visualisasi laju paparan & identifikasi radionuklida.

Dalam penelitian ini, penulis mengintegrasikan beberapa arsitektur seperti LiDAR untuk visualisasi peta kontur 3D dengan algoritma *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), serta CZT (Detektor Cadmium- Zinc Telluride) dan GMC (Geiger-Muller Counters) untuk analisis radiologi. Konsep operasi misi dilakukan untuk mencari *Radiological Area of Interest* (AoI) dengan asumsi radiasi berada di *ground* atau permukaan tanah. Terdapat tiga permasalahan utama yang harus diselesaikan, antara lain: (1) menghasilkan peta kontur 3D akurat yang merepresentasikan segmentasi lokasi dan objek berada, (2) menyediakan cacah radioaktivitas secara akurat di segala titik lokasi yang telah ditentukan mengidentifikasi area hotspot radiasi di lokasi (nilai maksimum), serta (3) identifikasi jenis radionuklida berdasarkan titik hotspot.

3. Gagasan Penelitian

Konsep Misi

Terdapat tiga misi *Drone* yang akan dilakukan, antara lain: (1) *scouting* area dengan LiDAR untuk membuat peta kontur 3D, (2) *monitoring* cacah radiasi area

radioaktif menggunakan GMC di ketinggian yang rendah untuk menghasilkan radiological heatmap yang akan melengkapi peta kontur 3D, dan (3) **inspeksi** atau identifikasi radiation hotspot dengan menurunkan *Drone* ke target menggunakan CZT supaya radionuklida dapat diidentifikasi.

Misi *Scouting*

Misi ini memiliki tujuan untuk mendapatkan titik *cloud map* dari LiDAR pada lokasi yang ditentukan. Setelah terkonstruksi, *ground* dan *obstacle* akan tersegmentasi. *Ground* dan *obstacle* akan digunakan di fase selanjutnya untuk memvisualisasi *heatmap*, dan juga menghasilkan grid okupansi yang akan dilalui *Drone* menggunakan jalur *obstacle-free*.

Mekanisme Terbang

Penulis menggunakan *Drone-1* untuk fase ini. Di dalamnya terdapat sensor LiDAR. Sensor tersebut ditempatkan di bawah *Drone* seperti yang terlihat pada **Gambar 1** untuk memaksimalkan data yang diterima dari *ground* selama penerbangan. GNSS *receiver* yang terpasang di *payload* bertujuan untuk mengetahui lokasi *Drone* di *Radiological Area of Interest* (AoI) dan untuk georeferensi peta tersebut. Ketika *Drone* siap terbang, algoritma sistem akan mengirimkan perintah *ready* ke kanopi, kemudian kanopi akan terbuka secara otomatis. Inisialisasi dan kendali *Drone* sepenuhnya diatur lewat algoritma yang terinstall di modul NVIDIA Jetson Nano *single-board computer* yang terpasang di *Drone*. *Drone* kemudian melintasi jalur *Drone* yang diberikan, yaitu dengan bergerak bolak-balik melintasi AoI. Jalur tersebut harus sesuai dengan jangkauan baterai *Drone* dan LiDAR. Selama penerbangan, *frame* LiDAR dikumpulkan secara lokal bersama dengan GNSS dan *Inertial Measurement Unit* (IMU).

Pemrosesan data

Setelah *Drone* mendarat. Data kemudian dianalisis dan diproses. Data yang terekam oleh sensor (LiDAR, GNSS, IMU) kemudian di-download oleh *server cloud*. Pemrosesan data menggunakan algoritma SLAM. Peta kontur diambil ulang jika tidak memenuhi parameter seperti point *cloud* kurang, minimnya area yang tercover, resolusi rendah, dan *gap* terlalu tinggi. Algoritma kemudian akan menentukan titik mana yang perlu diambil ulang. Kemudian data tersebut dapat digabungkan. Dengan menggunakan data IMU, peta 3D yang terkonstruksi akan diatur pada arah sumbu-z sebagai ketinggian, peta tersebut juga akan di-georeferensikan dengan data GNSS yang didapat selama penerbangan.

Proses selanjutnya adalah *Segment Floor*, yakni klasifikasi titik *ground*. Data berupa titik yang terkumpul, akan terklasifikasi sebagai objek (pohon, batuan, mobil, rumah, dll). Di tahap ini administrator akan menginisialisasi daerah mana yang bisa dilalu dan tidak bisa dilalui. Kemudian daerah tersebut akan di-*slice*, menghasilkan peta okupansi 2D dengan objek yang terklasifikasi oleh kontur berdasarkan ketinggian permukaan tanah dan okupansi.peta 3D.

Misi Inspeksi

Objektif dari misi ketiga ini adalah mendaratkan *Drone* di hotspot yang teridentifikasi, analisis radiasi gamma, dan identifikasi radionuklida potensial di sumber radiasi.

Terbang

Di misi ini tetap menggunakan *Drone-2* dengan *payload* yang sama. Pertama, karena *Drone* sudah tau *obstacle* & objek apa saja

yang akan dilewati, secara otomatis penulis mengetahui ketinggian minimum *Drone* pada semua *obstacle*. Rute yang ditentukan dioptimasi untuk mengefisiensikan waktu terbang. Pertama, *Drone* akan terbang dan naik ke ketinggian minimum. Kemudian bergerak menuju hotspot pertama, dan mendarat. Saat mendarat, sensor CZT mulai mencatat tergantung seberapa lama keinginan administrator. Setelah itu terbang lagi dan menuju hotspot kedua, mendarat, langkah diulang sampai semua hotspot selesai.

Pemrosesan data

Setelah *Drone* mendarat, data CZT di *download*. Radionuklida diidentifikasi menggunakan data spektroskopi. Hasilnya akan terintegrasi dengan Peta Kontur 3D dengan *Heatmap* & lokasi Hotspot. Identifikasi radionuklida bisa dilakukan otomatis dengan algoritma klasifikasi otomatis. Nama dan energi tiap radionuklida di save dalam bentuk *list*. Di tahap ini, Administrator bisa membuka *heatmap visualizer*, *import list*, kemudian pilih titik hotspot manapun untuk melihat sumber dan energi radionuklida tersebut.

Ground Control Station (GCS)

Drone ini menggunakan Ground Control Station (GCS) yang terhubung dengan laptop sebagai pengendali otomatis UAV. GCS dilengkapi dengan sel surya perovskit atau Solar Perovskite Cell (PSC) yang terintegrasi dengan baterai yang terdapat pada GCS sebagai media suplai daya. Sel surya dirancang sebagai sebuah kanopi pada GCS, sehingga memungkinkan adanya perlindungan terhadap drone dengan cara menutup kanopi saat diperlukan.



Gambar 1. Desain *Drone* dengan *payload*. **Kiri:** Konfigurasi *Drone-1*. **Kanan:** Ilustrasi terbang misi *scouting*.
Desain dilakukan menggunakan *software* CAD Inventor-3D.

Pada *landing pad* GCS terdapat coil berupa Wireless Power Transmission (WPT) yang terdiri dari transmitter dan receiver, di mana hal tersebut memungkinkan baterai pada drone dapat diisi ulang menggunakan sistem WPT tersebut tanpa memerlukan koneksi fisik. Adapun dalam melakukan take-off, sistem membutuhkan *software* tambahan yaitu Python, library Dronekit-python, sistem telemetri dan GPS.

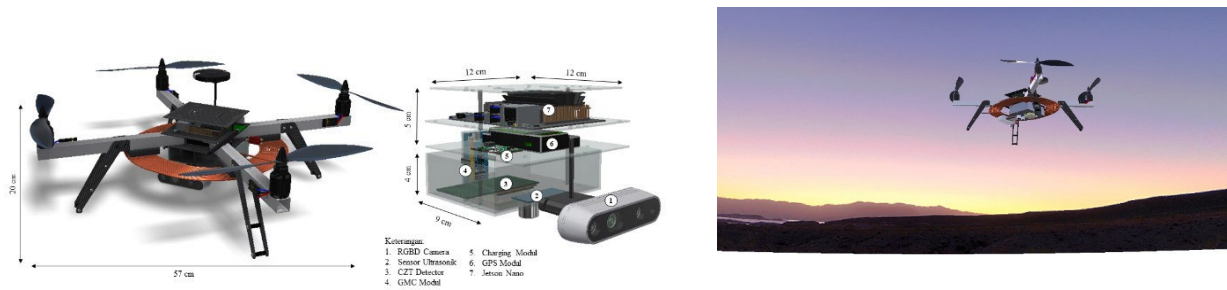
Arsitektur Fungsional

Arsitektur Hardware

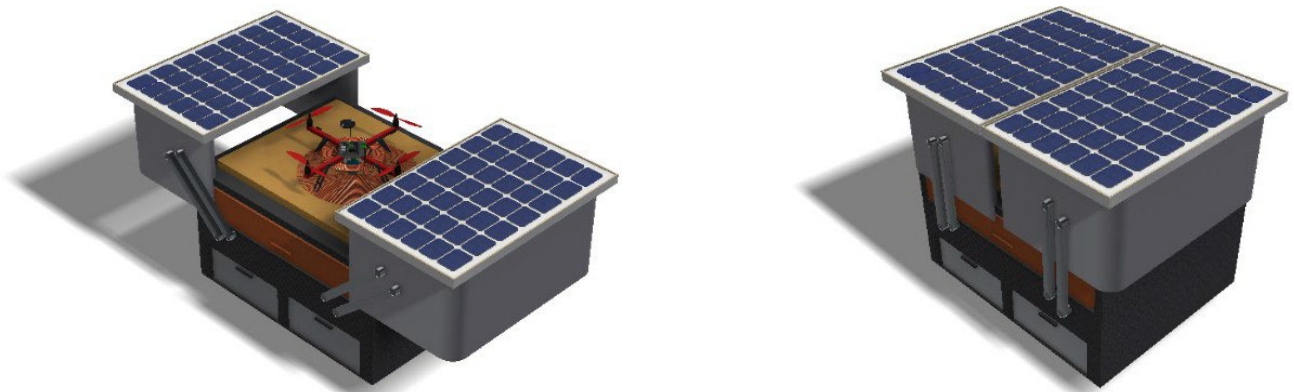
Drone ini ditenagai oleh baterai yang disalurkan oleh *Power Distribution Board* (PDB) ke *Electronic Speed Controllers* (ESC) dari Motor. Kecepatan setiap motor ditentukan oleh Autopilot, yakni sebuah komponen yang menutup *loop* melalui *Inertial Measurement Unit* (IMU) dan GNSS. Autopilot dapat digunakan dalam beberapa mode, seperti kontrol ketinggian dan posisi.

Untuk *autocontrol*, GNSS digunakan untuk menavigasikan *way-point* dan ultrasound untuk pengukuran dan kontrol ketinggian. *Sensorbox* memiliki *single-board computer* yang akan mengatur kinerja dari berbagai sensor yang terhubung padanya, yakni LiDAR, GMC, dan CZT.

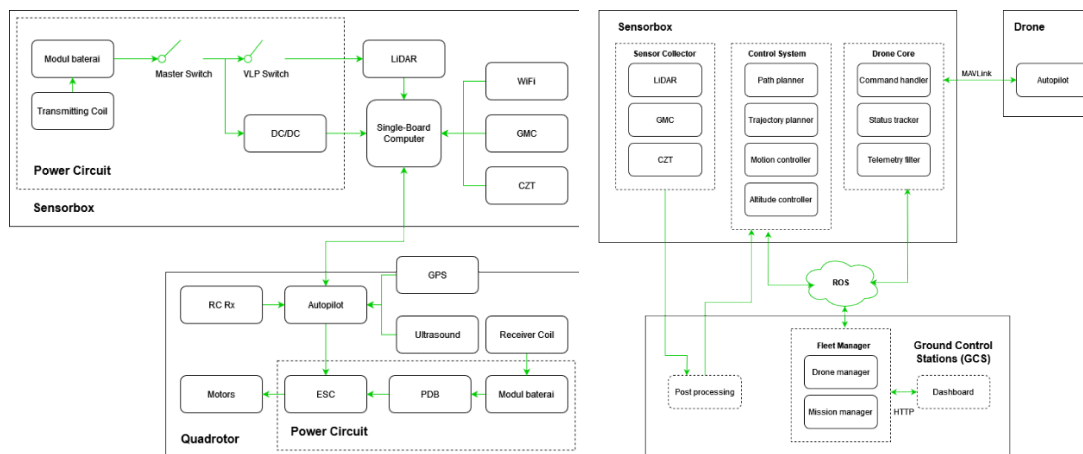
Single-board computer ini juga dapat memproses data selama penerbangan. Terdapat juga modul WiFi untuk komunikasi dengan GSC. Sistem LiDAR dan *single-board computer* umumnya beroperasi pada tegangan yang berbeda, oleh karena itu satu atau lebih konverter DC/DC biasanya ditambahkan. Selain terdapat *master switch*, terdapat VLP *switch* untuk LiDAR menghemat energi ketika tidak digunakan. *Sensorbox* dapat mengeluarkan perintah gerakan ke *Drone* melalui koneksi data antara Komputer dan Autopilot. Baterai digunakan sebagai sumber daya listrik dalam *quadcopters*. Baterai ini dapat diisi ulang menggunakan *Wireless Power Transmission* (WPT) yang tidak memerlukan koneksi fisik. Sistem transmisi WPT terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. Baik *transmitter* maupun *receiver* dilengkapi dengan *coils* untuk mentransfer daya dari sumber ke *Drone*. Baterai dengan *receiver coils* dipasang pada *quadcopter* dan *transmitter coil* berada di tempat pendaratan *Drone* (*landing pad*) di GSC.



Gambar 2. Desain Drone dengan payload. **Kiri:** Konfigurais Drone-2. **Kanan:** Ilustrasi terbang misi monitoring & inspeksi. Desain dilakukan menggunakan software CAD Inventor-3D



Gambar 3. Desain Ground Control Station (GCS). **Kiri:** GCS (terbuka). **Kanan:** GCS (tertutup). Desain dilakukan menggunakan software CAD Inventor-3D.



Bagan 1. Arsitektur fungsional dari Drone, sensorbox, dan GCS. **Kiri:** Arsitektur Hardware **Kanan:** Arsitektur Software.

Arsitektur Software

Arsitektur ini terdiri dari tiga komponen utama: (1) *Drone*, (2) *sensorbox*, dan (3) GCS, seperti yang ditunjukkan pada **Bagan 1** dengan *Drone* menggunakan protokol MAVLink. Dengan protokol ini, penulis dapat bertukar pesan dengan autopilot, antara lain, menerima sinkronisasi telemetri dan eksekusi perintah.

Sensorbox Software

Sensorbox software memiliki modul yang dieksekusi di *single-board computer* dan memberikan komponen GCS untuk berinteraksi dengan sensor dan *flight controller*. Modul *Drone* memiliki tanggung jawab sebagai penghubung komunikasi autopilot dengan modul eksternal. Data telemetri yang diambil dapat diupload ROS oleh *Telemetry Filter*. Sisanya, yakni *Fleet Manager* dan *Control System* dapat mengambil data dari ROS tersebut. Modul ini tidak mempublikasikan semua data yang tersedia, tetapi memfilter data untuk memuat parameter yang paling relevan. Diantaranya, level baterai, mode penerbangan, posisi GNSS, arah, dan kecepatan. *Command Handler* akan mengikuti ROS, di mana modul lain dapat memberikan perintah, seperti mengaktifkan/menonaktifkan *Drone*, mode *active/sleep*, lepas landas, mendarat, dan bergerak ke lokasi yang ditentukan. Setelah validasi, perintah dikirim ke autopilot untuk dilaksanakan. Terakhir, *tracker status* akan memberi tahu modul lain tentang peristiwa yang relevan, termasuk status perintah atau mendeteksi peristiwa terkait sistem lainnya.

GCS Software

GCS *software* dijalankan lewat komputer dan memungkinkan pengguna berinteraksi dengan sistem dan memproses data yang diambil. Modul *Fleet Manager* adalah komponen GCS *software* yang memungkinkan pemantauan status *Drone*

dan pengendalian *Drone* secara remote. Data telemetri terbaru disimpan di *Drone Manager*, bersama informasi relevan lainnya, seperti perintah eksekusi, bahkan *errors* atau *warnings* untuk *Drone*. Pengguna dapat memeriksa data ini kapan saja dengan mengirim permintaan HTTP untuk mengambil data satu atau beberapa *Drone*. Perintah yang dikirim dalam permintaan HTTP ke *Fleet Manager* akan diteruskan ke *Drone* yang sesuai. Misi dapat diserahkan ke Mission Manager, yang akan menjalankan tindakan yang diberikan sesuai. Melalui *dashboard*, pengguna dapat mengirim perintah ke *Drone* dalam platform yang intuitif. Pada tingkat rendah, GCS dapat berkomunikasi dengan *Sensorbox* melalui SSH untuk mengeluarkan perintah seperti memulai atau menutup proses dan misi baru, melihat penggunaan *disk* dan memori, daftar file, dll. Semua data sensor yang tersimpan akhirnya diunduh melalui *scp*, diproses secara offline, dan ditampilkan di komputer di darat pada akhir setiap fase *scouting*, *monitoring*, dan inspeksi sesuai dengan konseptualisasi yang disajikan di III.1. Konsep Misi.

Pemrosesan Data dan Visualisasi

Berikut ini merupakan implementasi algoritma utama yang digunakan untuk pemrosesan data dan visualiasasi yang hendak diterapkan ke sistem, antara lain:

- **Georeferensi:** Di fase ini, penulis menghasilkan fungsi transformasi yang dibentuk dari tiga input, yakni peta konstruksi 3D LiDAR *Odometry and Mapping* (LOAM), jalur *Drone*, dan jalur GNSS *Drone*. Fungsi transformasi ini disebut sebagai fungsi georeferensi yang membuat koordinat GNSS *matching* dengan lokasi di peta LOAM.
- **Segmentasi ground obstacle:** Di fase ini, penulis menghasilkan klasifikasi *ground* dan *non-ground* pada semua titik dengan

menginput peta 3D yang mengandung berbagai titik dari tiap skenario. Klasifikasi pertama adalah *ground*, yakni permukaan tanah. Klasifikasi kedua adalah *non-ground*, yakni objek/*obstacle* diatas permukaan tanah.

- **Grid Okupansi 2D:** Di fase ini, penulis menghasilkan *bitmap* 2D yang menggambarkan area yang dapat dilalui *Drone* dengan menginput citra LiDAR pada ketinggian konstan.
- **Peta Radiologi 3D:** Di fase ini, penulis menghasilkan peta 3D berwarna (RGB) dengan menginput peta 3D, fungsi georeferensi, dan *datalogger* GMC + GNSS. Peta ini dapat mengestimasi besaran radiasi di lokasi yang penulis inginkan.
- **Deteksi Hotspot:** Fase terakhir, penulis menghasilkan *Heatmap* Radiologi 3D yang memberi informasi area mana saja yang harus diinspeksi lebih lanjut pada misi inspeksi karena memiliki besaran dosis tidak wajar.

Setup Eksperimen

Pengisian Daya

Menggunakan WPT (*Wireless Power Transfer*) dengan MRC (*Magnetic Resonator Coupling*) dan mode *sleep/active*. Proses desain *transmitter coil* dimulai dengan memilih *coil* tipe 18 AWG (1.02 mm) dan melilitnya sebanyak 150 kali, menghasilkan diameter setara 40 cm. *Receiver coil* memiliki diameter yang sama, tetapi dengan 60 lilitan, sesuai dengan panjang baterai. Konfigurasi lingkaran dipilih karena minim area terbuka sehingga meningkatkan efisiensi dibandingkan dengan konfigurasi persegi atau lainnya. Dengan konfigurasi ini, *transmitter* menghasilkan induktansi (L) sebesar 0.29317 mH untuk mencapai frekuensi resonansi sebesar 12 kHz ketika dihubungkan dengan kapasitor paralel 0.6 uF.

Tabel 1. Spesifikasi dan parameter *transmitter & receiver coils* [20]

Spesifikasi <i>coils</i>	<i>Transmitter coil</i> (T)	<i>Receiver coil</i> (R)
Jumlah lilitan (N)	150 T	60 T
Tebal kawat (mm)	1	0.5
Induktansi (mH)	0.3	4.1
<i>Quality Factor</i> (QF)	24.3	13.7
Berat (gr)	720	290
Resistansi induktor (Ω)	1.3	4.3
Diameter <i>coil</i> (cm)	40	
Frekuensi kerja (kHz)	12	
Daya kerja	24 V / 1A	

Spesifikasi Drone

Drone yang digunakan dalam karya ini adalah tipe quadrotor, dirancang untuk membawa DJI Zenmuse L1 LiDAR. Massa *Drone* ini tanpa *payload* adalah 1.13 kg,

oleh karena itu penulis menggunakan Hobbypower F450 ATF *Quadcopter* Frame Kit dengan propeller berukuran 33 cm dengan kapasitas *payload* 1.5~2.5 Kg. Untuk motor, penulis menggunakan Tarot 5008/340 kV dan Hobbywing Xrotor Pro

40A *Electronic Speed Controller* (ESC). *Flight Controller* menggunakan Pixhawk 4. *Flight Controller* atau *autopilot* ini terintegrasi dengan akselerometer, giroskop, magnetometer, serta input untuk *receiver* GNSS. Sementara untuk *receiver* GNSS menggunakan modul u-blox Neo-M8N yang terintegrasi dengan magnetometer. *Drone* memiliki kapasitas baterai $4 \times 3,800 \text{ mAh } 2\text{S}$ ($4 \times 7.4 \text{ V}$) Graphene LiPo battery. Berdasarkan spesifikasi diatas, *Drone* dapat mengudara dengan waktu maksimum selama 35 menit termasuk *payload*, dan 45 menit ketika tanpa *payload*. Ketika ada misi yang harus dilakukan namun baterai tidak cukup, *Drone* akan melakukan misi tersebut sesuai kapasitas baterainya dan kembali ke *landing pad* untuk melakukan pengisian daya, misi akan dilanjutkan begitu baterai

penuh dan cukup untuk mengudara kembali.

Isi Payload

Payload *Drone* dinamakan *sensorbox*. *Sensorbox* mengandung sensor, mikrokontroler, dan sistem elektronik *Drone*. *Sensorbox* dipasang dibawah *Drone*. Otak *Drone* akan disuplai dari NVIDIA Jetson Nano single-board computer. Selama misi scouting, komputer akan terhubung dengan sensor DJI Zenmuse L1 lewat kabel ethernet. LiDAR akan mengambil data dari ketinggian 50 m. Sensor menghasilkan penyimpanan 300 MB data setiap menit. Selama misi *monitoring*, *sensorbox* terhubung dengan Sparkfun 11345 GMC lewat USB. Sensor GMC memiliki berat 50 g dengan dimensi ($105 \times 44 \times 25$) mm^3 . Sensor ini terdiri dari SBM-20 Geiger-Muller tube yang terhubung dengan

mikrokontroler ATmega328p. Mikrokontroler nantinya akan mengirimkan datalogger laju cacah setiap t waktu. Selama misi inspeksi, *sensorbox* terhubung dengan $\mu\text{SPEC500 CZT}$. Sensor CZT ini memiliki berat 80 g dengan dimensi ($25 \times 25 \times 72$) mm^3 . Nantinya *output datalogger* dari sensor ini akan disimpan dan diimpor untuk menghasilkan spektrum energi area hotspot.

Lokasi Testing

Penulis menggunakan sumber dari *OpenTopography* untuk visualisasi lokasi. *OpenTopography* adalah *website open-source* yang menyediakan data topografi berkualitas tinggi dan alat-alat untuk peneliti, pendidik, dan masyarakat umum. Tujuan *website* ini adalah memudahkan akses ke berbagai set data topografi, termasuk data LiDAR yang dikumpulkan dari media udara dan darat. *OpenTopography* dihosting oleh San Diego Supercomputer Center di *University of California*, San Diego, dan didukung oleh *National Science Foundation* (NSF) dan mitra lainnya.

Lokasi Komersial

Aktivitas manusia yang tinggi membuat potensi paparan radiasi lebih besar. Radiasi dari kegiatan industri atau perdagangan di lokasi komersial dapat memiliki dampak lingkungan yang signifikan. Penggunaan *Drone* dapat meningkatkan keamanan pekerja dan masyarakat dengan mendeteksi potensi kebocoran radiasi. Lokasi komersial sering kali memiliki struktur bangunan yang kompleks dan sulit diakses. Dengan menggunakan *Drone*, pengukuran radiasi dapat dilakukan dengan lebih efisien dan aman, terutama di area yang sulit dijangkau oleh manusia.



Gambar 4. Kiri: Lokasi komersial yang menggunakan sampel dataset XEOLXELEX – Elk Lake Fault, Mei 2021. **Kanan:** Lokasi pertambangan yang menggunakan sampel dataset Gloss Mountain State Park, Oklahoma, 7 November 2021.

Lokasi Pertambangan

Pertambangan sering kali melibatkan material yang berpotensi mengandung *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material* (TENORM), seperti batuan atau tanah yang mengandung konsentrasi radioaktif yang tinggi akibat proses pertambangan. Selain itu, *Drone* dapat membantu mengoptimalkan proses penambangan dengan memberikan informasi mengenai konsentrasi TENORM di berbagai lokasi. Hal ini penting untuk keberlanjutan pertambangan dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan yang mengatur pengelolaan material radioaktif.

3. Hasil dan Pembahasan

Peta 3D

Untuk menghasilkan peta 3D, fase scouting dilakukan untuk masing-masing lokasi. Estimasi jalur *Drone* (flight path) dapat dilihat pada **Gambar 5**, dengan warna merah adalah data GNSS dan biru adalah data LOAM. Setiap misi menghabiskan waktu 3 sampai 5 menit dengan total jarak tempuh 100 hingga 400 m. *Drone* terbang di atas 10 meter di atas permukaan tanah. Secara umum, kecepatan pemrosesan LiDAR dan LOAM hampir sama. Kecepatan LiDAR berkisar 3 sampai 5 mB/s tiap data. Algoritma LOAM didesain

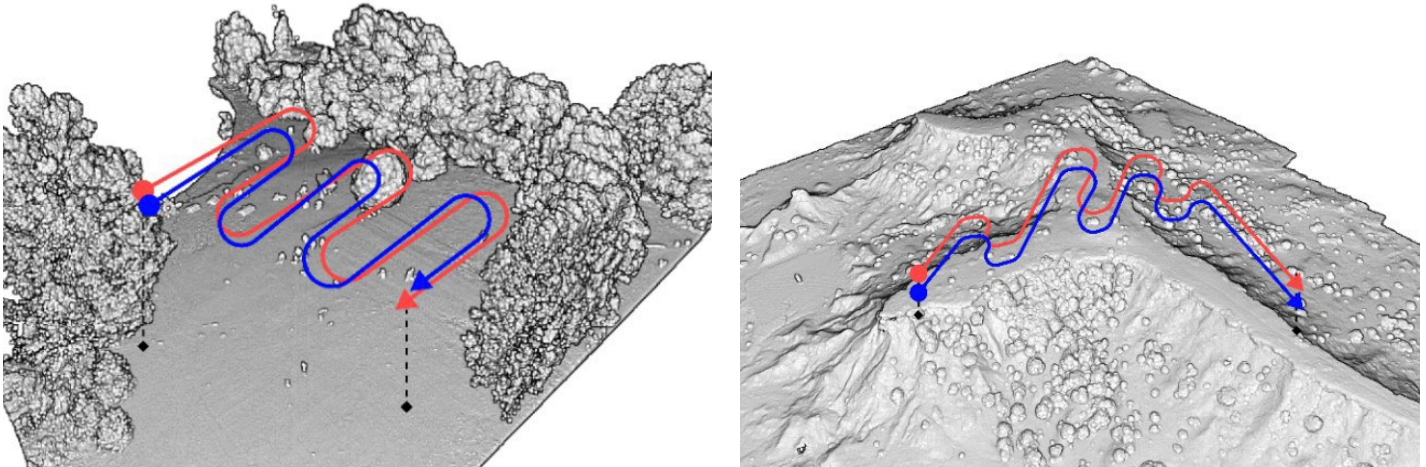
sedemikian rupa mengimbangi LiDAR memperoleh data. Agar hasil yang lebih baik, data sebaiknya di *re-run* 50% dari kecepatan misi.

Segmentasi Semantik

Setelah peta 3D di proses, algoritma segmentasi dieksekusi untuk mengklasifikasikan data ground dan non-ground. Dataset yang penulis gunakan berasal dari [26] yang mengandung lebih dari 20 objek rumah dari sudut pandang atas (*top view*) yang diperoleh pada ketinggian 5~30 meter di atas permukaan tanah. Kamera beresolusi tinggi digunakan untuk memperoleh gambar dengan ukuran 6000×4000 px (24Mp). *Training set* berisi 400 gambar yang tersedia untuk publik dan *test set* yang terdiri dari 200 gambar *private*. Untuk mendeteksi objek manusia, dilakukan anotasi menggunakan *LabelImg* sebagai tools pelabelan gambar yang umumnya digunakan dalam bidang *deep learning*. *Tools* ini memudahkan pemrosesan klasifikasi karena cepat melabeli area dan kelas objek target dalam sebuah gambar. Anotasi dilakukan dengan akurasi piksel untuk *training set* dan *test set* yang sama. Kompleksitas dataset dibatasi hingga 20 kelas yang terdiri dari: pohon, rumput, vegetasi lain, kotoran, kerikil, batuan, air, area beraspal, kolam, orang, anjing, mobil, sepeda, atap,

dinding, pagar, tiang pagar, jendela, pintu, *obstacle*. Setelah peta 3D di proses, algoritma

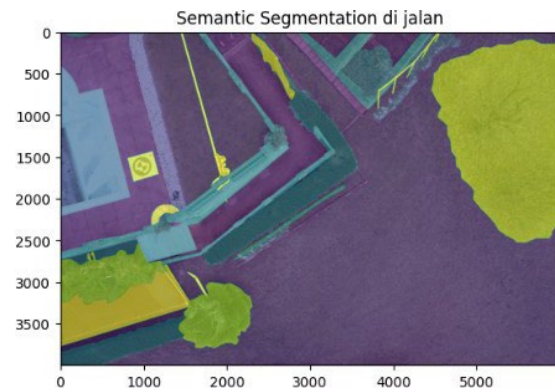
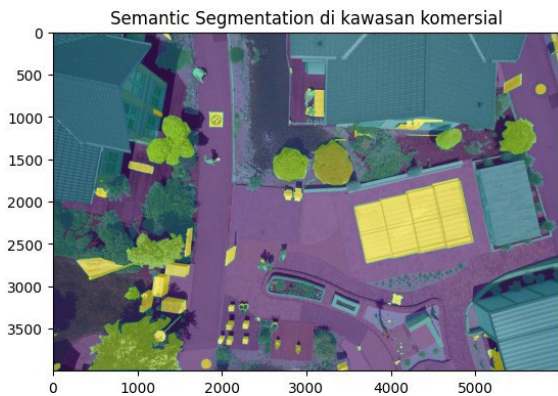
segmentasi di-run untuk mengklasifikasikan data sebagai *ground* dan *non-ground*.

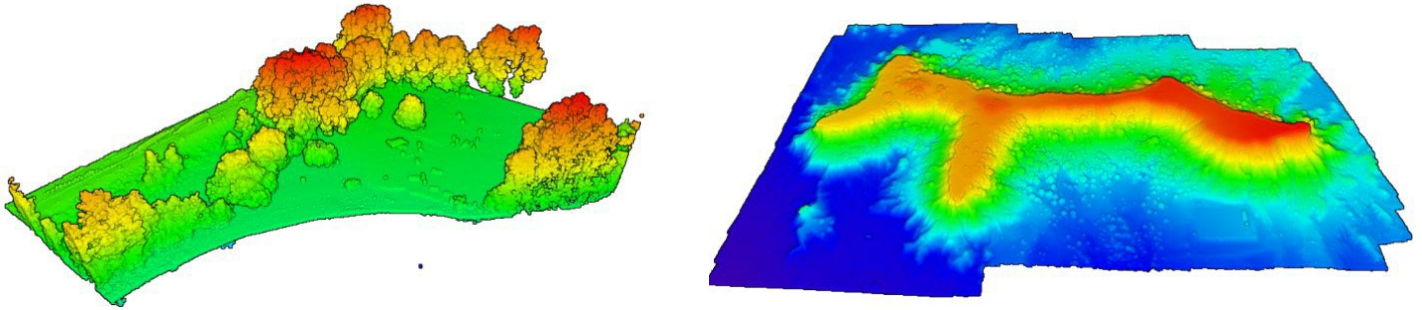


Gambar 5. Jalur GNSS pada peta 3D LiDAR dengan algoritma ALOAM. **Kiri:** Lokasi komersial. **Kanan:** Lokasi pertambangan.

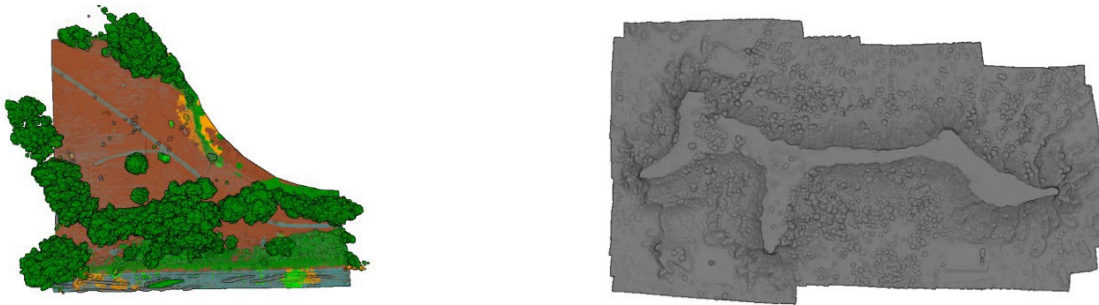
Dalam **Gambar 6**, terdapat hasil segmentasi, di mana titik *ground* akan diwarnai ungu, dan *non-ground* akan diwarnai palet kuning-hijau, tergantung dari berapa ketinggiannya diatas *ground*. Algoritma segmentasi mampu membedakan *ground*, pepohonan, dan *obstacle* lainnya di semua kondisi. Ketika diujikan ke lokasi di **Gambar 7**, tampak bahwa daerah *ground* ditandai dengan warna oranye kecoklatan, dan *non-ground* ditandai dengan palet warna kuning tergantung ketinggiannya dari permukaan

tanah. Terdapat pengecualian pada lokasi pertambangan karena sistem klasifikasi tidak bisa mendeteksi *ground* dan *non-ground* sehingga dicitrakan warna abu-abu, menandakan *unclassified*. Hal ini terjadi karena ketersediaan data LiDAR mungkin tidak mencukupi untuk menghasilkan klasifikasi yang akurat di seluruh area. Bagian tertentu dari data mungkin tidak memiliki informasi yang cukup untuk diklasifikasikan sehingga algoritma membaca *unclassified*.





Gambar 6. Pengujian dataset *semantic segmentation*



Gambar 7. Segmentasi peta 3D menjadi data *ground* dan *non-ground*. **Kiri:** lokasi komersial. **Kanan:** lokasi pertambangan

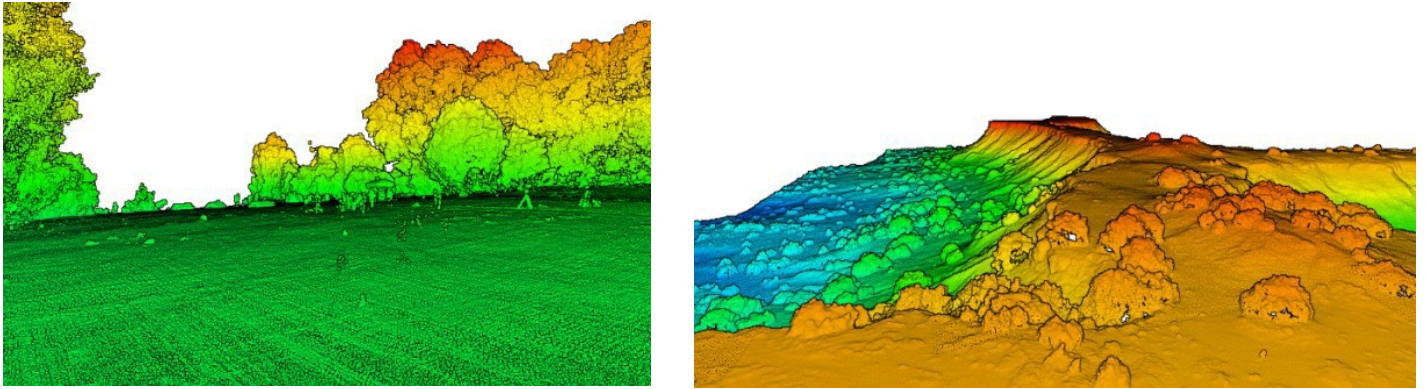
Bitmap

Grid okupansi 2D + *Octomap* dalam LiDAR dapat digunakan untuk melakukan pemetaan dan navigasi dalam lingkungan yang tidak diketahui atau berubah-ubah. Dengan menginput citra LiDAR pada ketinggian konstan, penulis dapat menghasilkan bitmap 2D yang menggambarkan area yang dapat dilalui *Drone*, yaitu area yang tidak memiliki hambatan atau okupansi tinggi. Bitmap 2D ini dapat digunakan untuk merencanakan jalur terbaik untuk *Drone* agar dapat mencapai tujuan dengan aman dan efisien.

Heatmap

Drone monitoring (Drone-2) melakukan penerbangan dengan ketinggian 1.5 meter di

atas permukaan tanah, dan mengukur laju cacah menggunakan sensor GMC setiap interval 4 detik (cp4s). Data yang terkumpul kemudian diakumulasi dalam cacah per menit (CPM) dengan mengalikan cacah cp4s dengan faktor 15 detik. Untuk representasi visual, peta 3D disajikan dengan menempa heatmap. **Gambar 9** menunjukkan peta 3D yang telah diberikan data oleh *Drone* pemantauan; semakin terang (berwarna merah), semakin tinggi laju cacah pada area tersebut. Dalam pengujian lokasi komersial, terdeteksi satu hotspot yang ditandai dengan warna merah yang sangat kontras. Sementara itu, di lokasi pertambangan, terdapat aktivitas radiasi, meskipun tidak sebesar yang terlihat di lokasi komersial.



Gambar 8. Bitmap 2D dari masing-masing lokasi. **Atas:** Menampilkan tampak jauh. **Bawah:** Tampak detail

Identifikasi Hotspot

Penerbangan *Drone-2* yang membawa sensor CZT setelah mengidentifikasi hotspot di *Radiological Area of Interest (AoI)* adalah tahap akhir dalam misi ini. Setelah *Drone* mengenali hotspot yang memiliki laju cacah di luar batas *As Low As Reasonably Achievable (ALARA)* dan ketentuan di wilayah tersebut, pendaratan dilaksanakan untuk melakukan pencocokan dan verifikasi data sehingga memastikan keakuratan informasi dan mengurangi potensi kesalahan dalam interpretasi data radiologi. Pasca-pendaratan, data dari CZT dianalisis untuk memverifikasi keberadaan radiasi dan tingkat radiasi yang terdeteksi

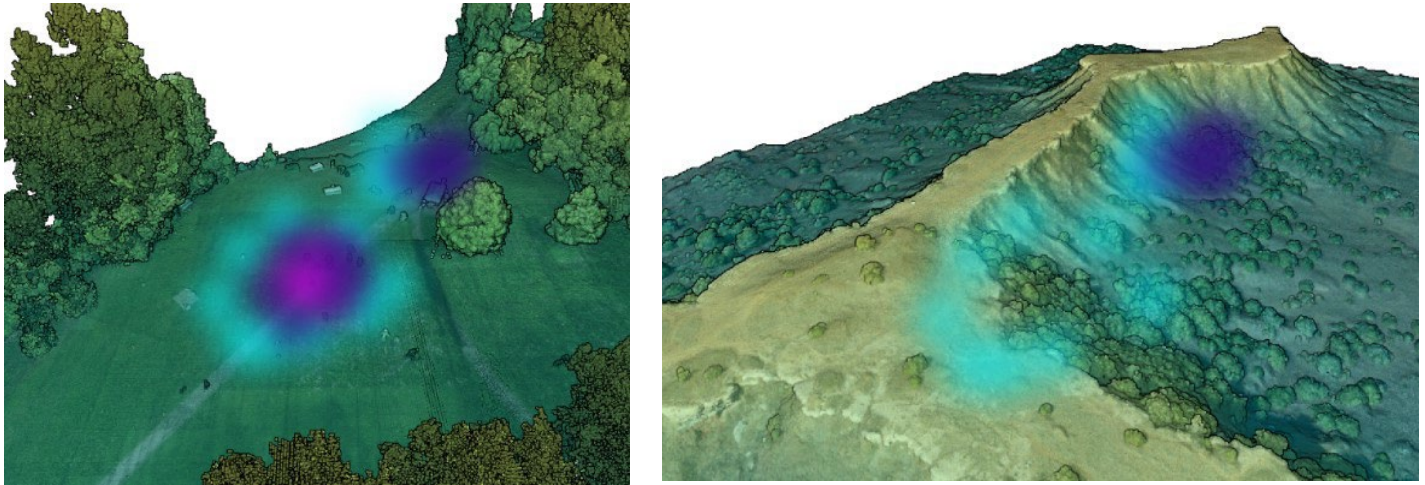
Analisis ini memberikan pemahaman spesifik mengenai sumber radiasi, dan hasilnya disampaikan kepada tim analisis (dalam hal ini Administrator) untuk ditindaklanjuti seperti pengiriman tim investigasi ke lokasi, penilaian tingkat radiasi, identifikasi sumber potensial, dan pengembangan strategi mitigasi yang berkelanjutan, dilakukan oleh pihak berwenang (dalam hal ini PPR) berdasarkan hasil analisis dan informasi yang diperoleh dari *Drone*. Analisis ini memberikan pemahaman spesifik mengenai sumber radiasi, dan hasilnya disampaikan kepada tim analisis (dalam hal ini

Administrator) untuk ditindaklanjuti seperti pengiriman tim investigasi ke lokasi, penilaian tingkat radiasi, identifikasi sumber potensial, dan pengembangan strategi mitigasi yang berkelanjutan, dilakukan oleh pihak berwenang (dalam hal ini PPR) berdasarkan hasil analisis dan informasi yang diperoleh dari *Drone*.

Monitoring Website

Sebagai *Platform as a Service (PaaS)*, penulis mengintegrasikan layanan berupa *software & hardware* dalam satu platform, yakni *GMAWINGS Monitoring Website*. Data-data yang dapat terlihat di *website* merupakan data olahan yang didapat dari *dashboard GSC*. *Dashboard GCS* akan memberikan data waktu, tanggal, dan keterangan kepada sistem. Alat *monitoring* radiasi pada *sensorbox* akan memberikan data laju dosis kepada sistem. Admin akan menginput ID Number dan *password* kepada sistem untuk verifikasi administrator yang berwenang. Sistem akan memberikan data laju dosis, data *monitoring* secara *real-time*, dan arsip data *monitoring* kepada *website*, supervisor, dan admin.

Berdasarkan rencana tersebut, maka dapat dibuat sebuah *Data Flow Context Diagram* seperti **Bagan 2**, diagram ini menggambarkan hubungan sistem dengan *environment*.



Gambar 9. Peta 3D dan Heatmap (Peta Radiologi 3D)

Terdapat lima terminator dalam sistem ini, yakni *Website*, *Alat monitoring radiasi*, *Dashboard GCS*, *supervisor*, dan *admin*. Untuk tampilan UI/UX *website*, penulis merancang *Information Architecture* (IA) yang berguna untuk mengorganisir informasi, merancang navigasi yang efektif, memberikan label yang tepat, memastikan pencarian yang efisien, dan mengelola konten secara sistematis. Dengan fokus pada pengalaman pengguna, IA juga bertanggung jawab untuk meningkatkan UX melalui penyusunan informasi yang intuitif dan konsisten, serta memperhitungkan pertimbangan skala dan aksesibilitas.

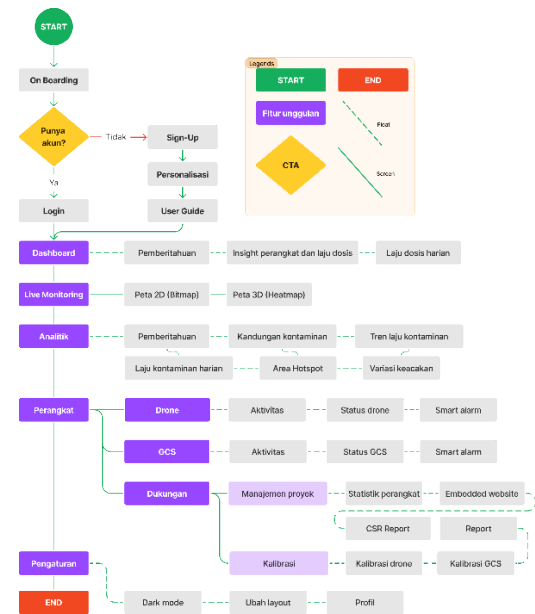
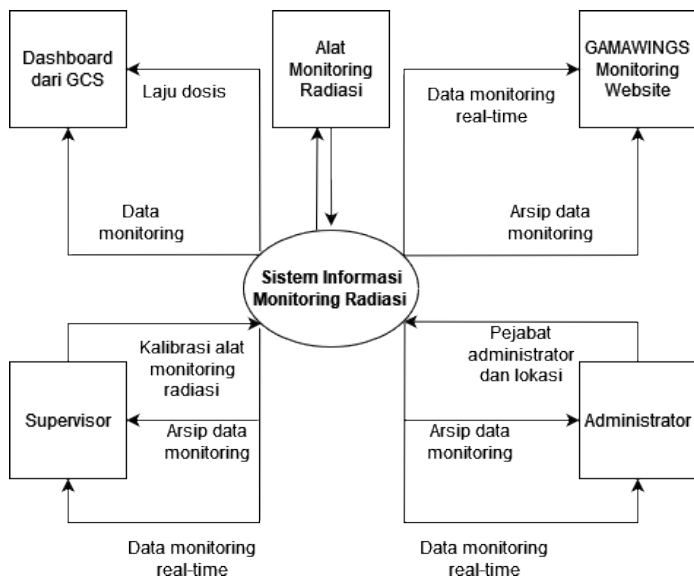
4. Hasil dan Pembahasan

Penggunaan *Drone* dalam *monitoring radiasi* memiliki peluang besar dalam meningkatkan efektivitas mitigasi risiko paparan radiasi lingkungan dan penanganan limbah radioaktif. *Drone* mampu menjangkau area sulit diakses, memberikan pemetaan area dengan kecepatan tinggi, dan meningkatkan

keselamatan pekerja dengan mengurangi risiko paparan radiasi. Penerapan WPT pada *Drone* menghilangkan kebutuhan untuk kembali ke pangkalan pengisian daya secara manual, meningkatkan waktu operasional, dan memberikan fleksibilitas dalam survei dan pemetaan area. Implementasi *website monitoring* sebagai antarmuka untuk menampilkan data secara real-time kepada pemangku kepentingan, seperti *supervisor*, *admin*, dan masyarakat umum, juga sangat penting. Dengan demikian, integrasi teknologi WPT pada *Drone* dan pemanfaatan *website monitoring* dapat meningkatkan efisiensi, akurasi, dan keselamatan kerja dalam kegiatan *monitoring radiasi lingkungan*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada seluruh pihak yang terlibat dalam penulisan naskah akademik ini.



Bagan 2. Kiri: Data flow context diagram. **Kanan:** Information Architecture (IA)

DAFTAR PUSTAKA

- A. R. Nugraha, E. Novianti, Dan L. K. Erdinaya, *Tantangan Dan Peluangnya Dalam Pengembangan Sumber Daya Manusia Di Era Globalisasi*. Dalam Bunga Rampai: Media, Komunikasi, Teknologi Informasi Dan Komunikasi. Bandung: Halima (Anggota Ikapi), 2020.
- J. Simanjuntak, A. Camelia, Dan I. G. Purba, "Penerapan Keselamatan Radiasi Pada Instalasi Radiologi Di Rumah Sakit Khusus (Rsk) Paru Provinsi Sumatera Selatan Tahun 2013," *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*, Vol. 4, Nov 2013.
- I. Doyi, D. K. Esumang, S. Dampare, Dan E. T. Glover, "Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials (Tenorm) In The Oil And Gas Industry: A Review," Dalam *Reviews Of Environmental Contamination And Toxicology Volume 238*, Vol. 238, P. De Voogt, Ed., Dalam *Reviews Of Environmental Contamination And Toxicology*, Vol. 238. , Cham: Springer International Publishing, 2016, Hlm. 107–119. Doi: 10.1007/398_2015_5005.
- R. G. Hatika, "Penentuan Bahan Radioaktif Alami (Norm) Dalam Pupuk Kimia Menggunakan Spektrometri Sinar Gama," 2018.
- M. Morichi, H. Toubon, F. Bronson, R. Venkataraman, J. Beaujoin, Dan P. Dubart, "Nuclear Measurement Technologies & Solutions Implemented During Nuclear Accident At Fukushima," Dalam *2013 3rd International Conference On Advancements In Nuclear Instrumentation, Measurement Methods And Their Applications (Animma)*, Marseille, France: Ieee, Jun 2013, Hlm. 1–8. Doi: 10.1109/Animma.2013.6727908.
- L. R. Pinto Dkk., "Radiological Scouting,

- Monitoring And Inspection Using Drones,” *Sensors*, Vol. 21, No. 9, Hlm. 3143, Apr 2021, Doi: 10.3390/S21093143.
- P. G. Martin *Dkk.*, “3d Unmanned Aerial Vehicle Radiation Mapping For Assessing Contaminant Distribution And Mobility,” *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, Vol. 52, Hlm. 12–19, Okt 2016, Doi: 10.1016/J.Jag.2016.05.007.
- W. Liu, H. Wang, Y. Qiao, B. Liang, J. Yang, Dan H. Zhang, “Dlafnet: A Direct Fusion Method Of 2d Aerial Image And 3d Lidar Point Cloud For Semantic Segmentation,” Dalam *Igarss 2023 - 2023 Ieee International Geoscience And Remote Sensing Symposium*, Pasadena, Ca, Usa: Ieee, Jul 2023, Hlm. 5922– 5925. Doi: 10.1109/Igarss2108.2023.10282837.
- Y. Tian, K. C. K. Lee, Dan W.-C. Lee, “Finding Skyline Paths In Road Networks,” *Sigspatial Gis*, Hlm. 444–479, Nov 2009, Doi: 10.1145/1653771.1653840.
- H.-P. Kriegel, M. Renz, Dan M. Schubert, “Route Skyline Queries: A Multi-Preference Path Planning Approach,” Dalam *2010 Ieee 26th International Conference On Data Engineering (Icde 2010)*, Long Beach, Ca, Usa: Ieee, 2010, Hlm. 261–272. Doi: 10.1109/Icde.2010.5447845.
- Y.-C. Chen Dan C. Lee, “Skyline Path Queries With Aggregate Attributes,” *Ieee Access*, Vol. 4, Hlm. 4690–4706, 2016, Doi: 10.1109/Access.2016.2602702.
- Y.-R. Yang *Dkk.*, “Skyline Inspection Route Planning Query For Management Team,” Dalam *2017 International Conference On Applied System Innovation (Icasi)*, Sapporo, Japan: Ieee, Mei 2017, Hlm. 1654– 1657. Doi: 10.1109/Icasi.2017.7988252.
- Y.-R. Chen Dan Y.-C. Chen, “Path Planning In Large Area Monitoring By Drones,” Dalam *2018 Tenth International Conference On Advanced Computational Intelligence (Icaci)*, Xiamen: Ieee, Mar 2018, Hlm. 295–299. Doi: 10.1109/Icaci.2018.8377472.
- E. W. Dijkstra, “A Note On Two Problems In Connexion With Graphs,” *Proceeding On Numerische Mathematik*, Hlm. 269–271, 1959.
- S. Radiansyah, M. D. Kusriani, Dan L. B. Prasetyo, “Quadcopter Applications For Wildlife Monitoring,” *Iop Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Vol. 54, Hlm. 012066, Jan 2017, Doi: 10.1088/1755-1315/54/1/012066.
- S. Yadav, M. Sharma, Dan A. Borad, “Thrust Efficiency Of Drones (Quad Copter) With Different Propellers And There Payload Capacity,” *International Journal Of Aerospace And Mechanical Engineering*, Vol. 4, No. 2, Apr 2017.
- S. Alexandris *Dkk.*, “Integrating Drone Technology Into An Innovative Agrometeorological Methodology For The Precise And Real-Time Estimation Of Crop Water Requirements,” *Hydrology*, Vol. 8, No. 3, Hlm. 131, Sep 2021, Doi: 10.3390/Hydrology8030131.
- M. Mil, H. Haryanto, D. Rahmawati, Dan M. Ulum, “Pengembangan Sistem Kendali Drone Berbasis Gcs (Ground Control Station), Stabilize And Object Detection Menggunakan Metode Color Filtering Hsv,” *Teknika*, Vol. 6, No. 1, Hlm. 6, Jul 2022, Doi: 10.25124/Teknika.V6i1.2671.
- A. Rohan, M. Rabah, M. Talha, Dan S.-H. Kim, “Development Of Intelligent Drone Battery Charging System Based On Wireless Power Transmission Using Hill Climbing Algorithm,” *Asi*, Vol. 1, No. 4, Hlm. 44, Nov 2018, Doi: 10.3390/Asi1040044.

- A. M. Jawad, H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, N. F. Abdullah, Dan M. J. Abu-Alshaeer, "Wireless Power Transfer With Magnetic Resonator Coupling And Sleep/Active Strategy For A Drone Charging Station In Smart Agriculture," *Ieee Access*, Vol. 7, Hlm. 139839–139851, 2019, Doi: 10.1109/Access.2019.2943120.
- J.-F. Chen *Dkk.*, "Metamaterial-Based High-Efficiency Wireless Power Transfer System At 13.56 Mhz For Low Power Applications," *Pier B*, Vol. 72, Hlm. 17–30, 2017, Doi: 10.2528/Pierb16071509.
- A. Rittiylang Dan W. Pijitrojana, "A Low Frequency Wireless Power Transfer Using Parallel Resonance Under Impedance Matching," *Amm*, Vol. 781, Hlm. 410–413, Agu 2015, Doi: 10.4028/Www.Scientific.Net/Amm.781.410.
- C. Yang *Dkk.*, "Analysis, Design And Implement Of Asymmetric Coupled Wireless Power Transfer Systems For Unmanned Aerial Vehicles," *Aip Advances*, Vol. 9, No. 2, Hlm. 025206, Feb 2019, Doi: 10.1063/1.5080955.
- F. Prasetya, I. P. Susila, L. Yuniarsari, Dan Istofa, "Desain Web Aplikasi Pada Radiation And Meteorological Monitoring Analysis System (Ramona)," *Prima*, Vol. 15, No. 2, Nov 2018.
- Muhtadan, A. Abimanyu, R. Akmalia, Dan M. Salam, "Design Of Iot-Based Radiation Monitor Area For Nuclear And Radiological Emergency Preparedness System In Yogyakarta Nuclear Area," *J. Phys.: Conf. Ser.*, Vol. 1428, No. 1, Hlm. 012050, Jan 2020, Doi: 10.1088/1742-6596/1428/1/012050.
- C. Mostegel, M. Maurer, N. Heran, J. P. Puerta, Dan F. Fraundorfer, "Icg - Dronedataset." Diakses: 28 Desember 2023. [Daring]. Tersedia Pada: <https://www.tugraz.at/index.php?id=22387>