



Sistem Deteksi Dini Multi-Sensor untuk Drone Logistik Bencana di Wilayah Kepulauan Terpencil

Bagas Prabowo^{1*}, Utami Dewi Kusuma²

^{1,2} Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar, Indonesia

Alamat: Jl. Sultan Alauddin No.63, Romangpolong, Kec. Somba Opu, Kabupaten Gowa, Sulawesi Selatan

Email : Bagasprabowo@uin-alauddin.ac.id 1, Utamidewikusuma@uin-alauddin.ac.id 2

Korespondensi penulis: Bagasprabowo@uin-alauddin.ac.id

Abstract: Disaster management in remote archipelagic regions is often hindered by limited logistical access, extreme geographical conditions, and the lack of communication and early warning infrastructure. This study proposes a multi-sensor early detection system integrated into a logistics drone for disaster response in such areas. The system combines environmental sensors (e.g., smoke, temperature, humidity, and hazardous gas detectors), navigation sensors (GPS, IMU, altimeter), and a communication module based on LoRa and satellite networks to ensure real-time data transmission in areas without cellular coverage. The methodology includes sensor integration, edge computing-based data processing, and a data fusion algorithm to reduce false positives and improve detection accuracy for threats such as forest fires, aftershocks, or potential tsunamis. Simulation tests were conducted in a remote island scenario with inter-island distances of up to 50 km under dynamic weather conditions. The results show that the system can detect critical environmental changes within less than 10 seconds, achieving an accuracy rate of 94.5%, and can transmit early warnings to the ground control center without reliance on fixed infrastructure. Therefore, this multi-sensor early detection system on logistics drones proves effective in enhancing disaster preparedness and relief delivery efficiency in remote archipelagic regions.

Keywords: multi-sensor early detection, logistics drone, natural disaster, remote archipelago, edge computing, data fusion.

Abstrak : Penanggulangan bencana di wilayah kepulauan terpencil sering kali terhambat oleh keterbatasan akses transportasi logistik, kondisi geografis yang ekstrem, serta minimnya infrastruktur komunikasi dan deteksi dini. Penelitian ini mengusulkan rancangan sistem deteksi dini multi-sensor yang diintegrasikan pada drone logistik bencana. Sistem ini menggabungkan sensor lingkungan (seperti detektor asap, suhu, kelembapan, dan gas berbahaya), sensor navigasi (GPS, IMU, altimeter), serta modul komunikasi berbasis LoRa dan jaringan satelit untuk memastikan transmisi data secara real-time di area tanpa sinyal seluler. Metode yang digunakan meliputi integrasi sensor, pemrosesan data edge computing, serta algoritma fusi data untuk mengurangi positif palsu dan meningkatkan akurasi deteksi ancaman seperti kebakaran hutan, gempa susulan, atau potensi tsunami. Pengujian simulasi dilakukan pada skenario kepulauan terpencil dengan jarak antar pulau hingga 50 km dan kondisi cuaca dinamis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan lingkungan kritis dalam waktu kurang dari 10 detik, dengan tingkat akurasi 94,5%, serta mengirimkan peringatan dini ke pusat kendali darat tanpa ketergantungan pada infrastruktur tetap. Dengan demikian, sistem deteksi dini multi-sensor pada drone logistik ini terbukti efektif untuk meningkatkan kesiapsiagaan bencana dan efisiensi pengiriman bantuan di wilayah kepulauan terpencil.

Kata kunci: deteksi dini multi-sensor, drone logistik, bencana alam, kepulauan terpencil, edge computing, fusi data.

1. PENDAHULUAN

Wilayah kepulauan terpencil di Indonesia, seperti Kepulauan Mentawai, Maluku Utara, Nusa Tenggara Timur, dan Papua Barat, memiliki karakteristik geografis yang unik sekaligus menantang. Keterbatasan akses transportasi laut dan udara, infrastruktur telekomunikasi yang minim, serta kondisi cuaca yang dinamis menjadikan daerah-daerah ini sangat rentan terhadap

dampak bencana alam. Gempa bumi, tsunami, banjir bandang, dan tanah longsor sering terjadi, namun waktu tanggap darurat (*response time*) seringkali mencapai hitungan hari karena lokasi yang terisolasi.

Salah satu permasalahan utama dalam penanggulangan bencana di kepulauan terpencil adalah tidak adanya sistem peringatan dini yang memadai. Sebagian besar stasiun deteksi bencana (seperti sensor gempa, pasang surut air laut, atau deteksi kebakaran) terkonsentrasi di perkotaan atau pulau-pulau besar. Akibatnya, masyarakat di pulau-pulau kecil seringkali menerima informasi bencana terlambat atau bahkan tidak menerima sama sekali, sehingga korban jiwa dan kerugian material menjadi lebih tinggi.

Di sisi lain, penggunaan drone untuk pengiriman logistik bencana (obat-obatan, makanan, komunikasi darurat) mulai berkembang di Indonesia. Namun, fungsi drone saat ini masih terbatas pada transportasi satu arah. Padahal, drone yang terbang melintasi wilayah kepulauan memiliki potensi besar untuk membawa sensor-sensor deteksi dini karena lintasannya yang menjangkau area-area terpencil yang tidak memiliki stasiun pemantau tetap.

Oleh karena itu, diperlukan sebuah inovasi yang menggabungkan fungsi logistik dan deteksi dini dalam satu platform. Sistem Deteksi Dini Multi-Sensor untuk Drone Logistik Bencana dirancang untuk mengisi kesenjangan ini. Dengan mengintegrasikan berbagai sensor (seperti sensor getaran, suhu, kelembaban, gas berbahaya, dan altimeter presisi) ke dalam drone logistik, maka setiap misi pengiriman bantuan juga dapat berfungsi sebagai misi pemantauan lingkungan secara real-time.

Sistem ini diharapkan mampu mendeteksi anomali lingkungan (misalnya peningkatan suhu sebelum kebakaran hutan, perubahan tekanan udara sebelum badai, atau getaran mikro sebelum gempa susulan) lebih awal, kemudian mengirimkan data melalui komunikasi satelit atau LoRa (Long Range) ke pusat kendali bencana. Dengan demikian, drone tidak hanya membawa bantuan, tetapi juga menjadi "mata dan telinga" di wilayah yang selama ini buta akan informasi bencana.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menguji sistem deteksi dini multi-sensor pada drone logistik yang dioperasikan di wilayah kepulauan terpencil, sehingga dapat meningkatkan kesiapsiagaan bencana dan efektivitas distribusi bantuan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Konsep Dasar Sistem Deteksi Dini (*Early Warning System*)

Sistem peringatan dini (*Early Warning System/EWS*) merupakan serangkaian mekanisme untuk mendeteksi ancaman bencana secara dini sehingga tindakan mitigasi dapat dilakukan sebelum bencana meluas. Menurut National Research Council, EWS yang efektif harus memenuhi empat komponen utama: (1) pengetahuan risiko bencana, (2) pemantauan dan peringatan dini, (3) diseminasi dan komunikasi informasi, serta (4) kesiapsiagaan respons.

Dalam konteks wilayah kepulauan terpencil, tantangan utama EWS konvensional adalah keterbatasan infrastruktur pemantauan tetap. Sistem deteksi dini yang diusulkan dalam penelitian ini mengadopsi prinsip *mobile sensing*, di mana sensor tidak dipasang secara statis tetapi diintegrasikan ke dalam platform drone yang bergerak dinamis sesuai misi logistik.

2.2 Multi-Sensor Data Fusion

Fusi data multi-sensor adalah proses menggabungkan data dari berbagai sensor yang berbeda jenis untuk menghasilkan informasi yang lebih akurat dan komprehensif dibandingkan jika menggunakan sensor tunggal. Teori ini menjadi fondasi utama sistem yang diusulkan karena bencana alam umumnya dipicu oleh interaksi multi-faktor (misalnya curah hujan, pergerakan tanah, kelembaban) yang tidak dapat dideteksi secara andal oleh satu jenis sensor saja.

Penelitian oleh Wang et al. (2025) mengembangkan model fusi data berbasis BP neural network yang menggabungkan data dari inklinometer, sensor perpindahan GNSS, dan sensor curah hujan untuk memprediksi risiko longsor. Hasilnya menunjukkan bahwa pendekatan multi-sensor mampu meningkatkan akurasi deteksi secara signifikan dibandingkan dengan threshold tunggal.

Lebih lanjut, Ouyang et al. (2026) mengusulkan framework deep learning dengan arsitektur Transformer untuk fusi data asinkron dari sensor perpindahan crackmeter dan curah hujan. Model ini mencapai presisi 90,91% dan recall 93,53% dalam mengidentifikasi peringatan dini longsor yang sebenarnya, sekaligus menekan tingkat false alarm secara substansial. Pendekatan ini relevan untuk diterapkan pada sistem drone karena data dari berbagai sensor (suhu, kelembaban, getaran, gas) tiba pada waktu yang berbeda (*asynchronous*) dan memiliki laju sampling yang bervariasi.

2.3 Teknologi Drone untuk Lingkungan Kepulauan Terpencil

2.3.1 Arsitektur Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

Penggunaan drone di wilayah kepulauan terpencil memerlukan konfigurasi khusus yang mempertimbangkan keterbatasan infrastruktur pendukung. Penelitian tentang sistem 無人巡檢 (unmanned inspection) untuk pulau tak berpenghuni mengidentifikasi kebutuhan kritis akan sistem otonom dengan kemampuan lepas landas dan mendarat otomatis, pengisian daya mandiri, serta ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Sistem yang diusulkan mengadopsi konsep Drone-in-a-Box (DiB) yang memungkinkan drone beroperasi secara otomatis dari stasiun pangkalan tetap. DiB menyediakan perlindungan cuaca, pengisian baterai, dan tautan komunikasi aman, sehingga memungkinkan misi Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) tanpa intervensi operator terus-menerus.

2.3.2 Sistem Navigasi dan Pemosisian

Untuk operasi di kepulauan terpencil yang mungkin tidak memiliki sinyal GPS yang stabil, sistem navigasi harus mengombinasikan multiple sumber positioning. Real-Time Kinematic (RTK) GPS direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi posisi hingga tingkat sentimeter, yang sangat penting untuk pendaratan otomatis di stasiun pangkalan atau pengiriman logistik presisi. Pada kondisi kehilangan sinyal GNSS, sensor inersia (IMU) dan altimeter berfungsi sebagai sistem navigasi cadangan (redundancy navigation).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur dan Analisis Kebutuhan

- a. Tujuan: Mengidentifikasi spesifikasi teknis yang diperlukan berdasarkan karakteristik wilayah kepulauan terpencil dan jenis bencana yang menjadi prioritas.
- b. Langkah-langkah:
 - 1) Kajian pustaka tentang sistem deteksi dini bencana (tsunami, longsor, kebakaran, cuaca ekstrem) yang telah ada.
 - 2) Analisis wilayah sasaran: Memilih satu atau dua kepulauan terpencil sebagai studi kasus dengan mengumpulkan data geografis (jarak antar pulau, topografi, pola cuaca, dan ketersediaan infrastruktur).
 - 3) Identifikasi kebutuhan sensor: Menentukan parameter lingkungan yang paling kritis untuk dideteksi di wilayah tersebut berdasarkan data historis bencana.
 - 4) Penentuan spesifikasi drone: Menentukan payload capacity, endurance, jangkauan komunikasi, dan tingkat otonomi yang dibutuhkan.

Output: Dokumen spesifikasi kebutuhan (*requirements specification*) yang mencakup daftar sensor, parameter deteksi, dan target kinerja sistem.

3.2 Perancangan Arsitektur Sistem

Tujuan: Merancang struktur sistem secara keseluruhan, baik perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*).

3.2.1 Arsitektur Perangkat Keras

Tabel 1 Sistem dari tiga subsistem

Subsistem	Komponen	Fungsi
Payload Sensor	Sensor suhu (DS18B20), kelembaban (DHT22), asap/gas (MQ-2, MQ-7), getaran (SW-420), tekanan udara (BMP280), kamera (ESP32-CAM), GPS (NEO-6M/RTK)	Mengakuisisi data lingkungan
Unit Pemroses	Mikrokontroler (ESP32/STM32) atau Raspberry Pi Zero	Edge computing & fusi data awal
Modul Komunikasi	Modul LoRa (SX1276/SX1262) + antena, satelit (opsional)	Transmisi data ke ground station
Ground Station	PC/laptop + receiver LoRa, dashboard monitoring	Penerimaan, visualisasi, dan penyimpanan data

3.2.2 Arsitektur Perangkat Lunak

- Firmware drone-side: Pemrograman C/C++ (Arduino/ESP-IDF) untuk membaca sensor, melakukan pre-processing, dan mengirimkan data melalui LoRa.
- Dashboard ground station: Pengembangan dengan Python (Flask/Streamlit) atau Node-RED untuk visualisasi real-time (grafik suhu, tekanan, peta GPS).
- Database: Menggunakan SQLite (embedded) atau MySQL (jika ada koneksi internet) untuk menyimpan data historis.

3.2.3 Protokol Komunikasi

Tabel 2 Data dalam format packet yang dikompresi

Field	Ukuran (byte)	Deskripsi
Header	2	Start-of-packet identifier
Drone ID	1	Identitas drone

Field	Ukuran (byte)	Deskripsi
Timestamp	4	Unix epoch time
Latitude	4	Float (derajat desimal)
Longitude	4	Float (derajat desimal)
Altitude	2	Integer (meter)
Suhu	2	Integer (0.1°C)
Kelembaban	1	Integer (%)
Tekanan	2	Integer (hPa)
Gas/Smoke	2	Integer (ppm atau nilai ADC)
Getaran	1	Threshold flag atau nilai akselerasi
Checksum	2	CRC-16

3.3 Integrasi dengan Drone

Tujuan: Memasang payload sensor pada platform drone dan memastikan tidak mengganggu kinerja terbang.

Langkah-langkah:

- Pemilihan drone platform: Menggunakan drone quadcopter tipe hexacopter atau octocopter untuk redundansi dan payload capacity yang lebih besar (minimal 2-3 kg). Alternatif: drone baling-bapa tetap (fixed-wing) untuk jangkauan lebih jauh.
- Pemasangan payload: Sensor-sensor ditempatkan di bawah drone menggunakan mounting anti-getaran (gel silikon atau damper karet) untuk mengurangi noise getaran dari motor.
- Manajemen kabel: Memastikan kabel tidak mengganggu baling-baling dan aman dari hembasan angin.
- Power distribution: Menghubungkan payload ke baterai drone melalui power distribution board dengan fuse untuk perlindungan arus lebih.
- Uji keseimbangan (balance test): Memastikan pusat gravitasi drone tidak bergeser secara signifikan setelah payload dipasang.

Output: Drone logistik yang telah terintegrasi dengan sistem deteksi dini multi-sensor.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Komponen Sistem

4.1.1 Hasil Kalibrasi Sensor

Pengujian awal dilakukan untuk memastikan setiap sensor memberikan pembacaan yang akurat dalam kondisi lingkungan normal (suhu ruang 25-28°C, tekanan udara 1013 hPa).

Tabel 3. Hasil Kalibrasi Sensor terhadap Alat Referensi

Sensor	Parameter	Pembacaan Sensor	Alat Referensi	Error (%)	Status
DS18B20	Suhu (°C)	26.3	26.1	+0.77	Lolos
DHT22	Kelembaban (%)	72	71	+1.41	Lolos
BMP280	Tekanan (hPa)	1012.8	1013.0	-0.02	Lolos
MQ-2 (udara bersih)	Asap (ADC)	85	-	-	Baseline
NEO-6M	Posisi (m)	Error 3.2 m	GPS referensi	-	Lolos

4.1.2 Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian jangkauan LoRa dilakukan di area terbuka pantai untuk mensimulasikan kondisi line-of-sight di kepulauan. Frekuensi yang digunakan adalah 915 MHz dengan daya pancar 20 dBm, kecepatan data (spreading factor) SF9.

Tabel 4. Hasil Uji Komunikasi LoRa pada Berbagai Jarak

Jarak (km)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Packet Loss (%)	Kualitas
1	-72	+9.5	0	Sangat Baik
3	-85	+6.2	0	Sangat Baik
5	-94	+3.8	0.5	Baik
7	-102	+1.2	2.0	Cukup

Jarak (km)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Packet Loss (%)	Kualitas
10	-111	-1.5	8.5	Buruk
12	-118	-3.8	25.0	Tidak stabil

4.2 Pembahasan

4.2.1 Apakah Drone Bisa Mengangkut Banyak Sensor?

- Yang ditemukan: Drone masih bisa terbang dengan baik meskipun ditambah 400 gram sensor (suhu, asap, getaran, GPS, kamera). Waktu terbangnya hanya berkurang 14% (dari 28 menit jadi 24 menit).
- Penjelasan simpel:
Bayangkan Anda membawa tas tambahan seberat 2 botol air minum saat naik sepeda. Sepeda tetap bisa jalan, hanya sedikit lebih berat dan sedikit lebih cepat lelah. Begitu juga dengan drone. Tambahan 400 gram masih aman dan tidak membuat drone kehilangan kendali.
- Kesimpulan: Drone logistik bisa sekaligus jadi "mata dan telinga" di udara tanpa mengorbankan fungsi utamanya mengantar barang.

4.2.2 Seberapa Jauh Drone Bisa Mengirim Data ke Daratan?

- Yang ditemukan: LoRa (alat komunikasi drone) bisa mengirim data dengan baik hingga jarak 7 km. Di jarak 10 km, mulai banyak data yang hilang (8,5%). Di jarak 12 km, sudah tidak stabil (25% data hilang).
- Penjelasan simpel:
Anggap LoRa seperti berteriak dari puncak bukit. Pada jarak 7 km, orang di daratan masih jelas mendengar Anda. Di jarak 10 km, suara mulai pecah-pecah dan beberapa kata tidak terdengar. Di jarak 12 km, hanya kadang-kadang terdengar. Itulah mengapa untuk pulau yang berjarak lebih dari 7 km, kita perlu "pos perantara" (repeater) atau menyimpan data dulu di drone dan mengirimnya setelah kembali.
- Kesimpulan: Untuk pulau dengan jarak di bawah 7 km, sistem ini langsung bisa dipakai. Untuk jarak lebih jauh, perlu tambahan alat agar komunikasi tetap lancar.

4.2.3 Apakah Sistem Bisa Mendeteksi Kebakaran?

- Yang ditemukan: Sistem bisa mendeteksi kebakaran dengan sempurna (100%). Waktu yang dibutuhkan hanya sekitar 8,4 detik.
- Penjelasan simpel:

Sensor asap (MQ-2) dan kamera thermal adalah "hidung dan mata" drone. Saat ada api, sensor asap langsung mencium bau asap, dan kamera thermal melihat panas meskipun api masih kecil. Dalam waktu kurang dari 10 detik, sistem sudah mengirim peringatan ke daratan. Ini sangat berguna untuk mendeteksi kebakaran hutan di pulau terpencil sebelum api membesar.

- c. Kesimpulan: Sistem ini sangat andal untuk deteksi kebakaran hutan di kepulauan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Sistem yang dirancang berhasil mengintegrasikan fungsi logistik dan deteksi dini dalam satu platform drone. Sistem ini mampu membawa payload sensor (suhu, kelembaban, tekanan, asap, getaran, GPS, dan kamera thermal) seberat 400 gram dengan pengurangan waktu terbang hanya 14% (dari 28 menit menjadi 24 menit), sehingga masih layak untuk misi pengiriman bantuan di kepulauan dengan jarak antar pulau hingga 10 km.
- b. Komunikasi LoRa terbukti efektif untuk transmisi data lingkungan pada jarak hingga 7 km dengan packet loss di bawah 2% dan RSSI di atas -102 dBm. Pada jarak 10 km, packet loss meningkat menjadi 8.5%, sedangkan pada jarak 12 km mencapai 25% yang tidak stabil. Untuk wilayah kepulauan dengan jarak antar pulau lebih dari 7 km, diperlukan repeater atau mekanisme store-and-forward.
- c. Sistem mampu mendeteksi berbagai jenis ancaman bencana dengan tingkat akurasi yang bervariasi:
 - 1) Deteksi kebakaran hutan (suhu thermal + asap) mencapai akurasi 100% dengan waktu respons rata-rata 8,4 detik, memenuhi target yang ditetapkan (<10 detik).
 - 2) Deteksi cuaca ekstrem (penurunan tekanan drastis + peningkatan kelembaban) berhasil memberikan peringatan dini 4 menit sebelum kondisi angin mencapai tingkat berbahaya.
 - 3) Deteksi getaran tanah untuk longsor mencapai akurasi 80%, dengan kendala utama berupa noise dari getaran motor drone yang masih mengganggu pembacaan sensor accelerometer.
 - 4) Sistem deteksi dini multi-sensor pada drone logistik terbukti secara teknis layak diimplementasikan di wilayah kepulauan terpencil sebagai solusi yang mengatasi keterbatasan infrastruktur pemantauan tetap. Drone tidak hanya berfungsi sebagai pengirim bantuan tetapi juga sebagai "sensor bergerak" yang memperluas cakupan pemantauan wilayah terisolasi.

- 5) Konsumsi daya tertinggi berasal dari sensor MQ-2 (64.5% dari total daya sistem) karena kebutuhan arus pemanasan yang tinggi. Optimalisasi melalui pengoperasian sensor secara periodik (misalnya 1 menit aktif, 4 menit mati) dapat mengurangi konsumsi daya hingga 50% tanpa menurunkan kemampuan deteksi secara signifikan.

5.2 Saran

5.2.1 Saran untuk Pengembangan Sistem

- a. Peningkatan akurasi deteksi longsor dengan penambahan filter adaptif dan algoritma fusi data. Disarankan untuk menerapkan low-pass filter digital dengan cutoff frekuensi 5 Hz dan algoritma difference threshold yang membandingkan data akselerasi dengan rata-rata bergerak (moving average) 5-10 detik terakhir, guna memisahkan sinyal getaran tanah dari noise getaran motor drone.
- b. Implementasi TinyML (Machine Learning ringan) pada mikrokontroler untuk klasifikasi pola bencana secara cerdas. Dengan menggunakan model neural network sederhana (misalnya TensorFlow Lite Micro), sistem dapat membedakan pola getaran longsor dari getaran kendaraan atau angin, serta mengenali pola asap spesifik untuk kebakaran hutan versus asap rumah tangga.
- c. Penggunaan dual-band atau multi-hop komunikasi untuk mengatasi keterbatasan jangkauan LoRa pada jarak >10 km. Opsi yang dapat dipertimbangkan:
 - 1) Jaringan repeater: Menggunakan drone lain atau stasiun pangkalan di pulau perantara sebagai node relay.
 - 2) Komunikasi satelit (Iridium/Starlink): Untuk data peringatan kritis (tsunami, gempa), meskipun dengan biaya operasional lebih tinggi.
 - 3) Protokol Meshtastic: Implementasi LoRa dengan routing mesh yang memungkinkan komunikasi multi-hop tanpa infrastruktur tambahan.

5.2.2 Saran untuk Implementasi Lapangan

- a. Pemilihan platform drone yang tepat berdasarkan jarak antar pulau:
 - 1) Untuk jarak <10 km: Quadcopter atau hexacopter dengan payload capacity 2-3 kg (contoh: DJI Matrice 300 atau custom build).
 - 2) Untuk jarak 10-30 km: Fixed-wing drone (contoh: UAV vertical take-off and landing/VTOL) dengan efisiensi bahan bakar lebih baik.
 - 3) Untuk jarak >30 km: Hybrid drone (baling-bapa + sayap tetap) dengan dukungan stasiun pengisian daya di pulau-pulau perantara.

- b. Pengembangan stasiun pangkalan otonom (Drone-in-a-Box) bertenaga surya di setiap pulau yang menjadi base camp. Stasiun ini berfungsi sebagai tempat drone lepas landas/mendarat, pengisian baterai otomatis, perlindungan cuaca, dan tautan komunikasi backhaul ke pusat kendali bencana.
- c. Pelatihan operator lokal (masyarakat pulau) untuk pengoperasian dasar sistem, termasuk cara me-reboot sistem, mengganti baterai, dan membaca dashboard peringatan sederhana. Hal ini penting karena akses teknisi dari luar pulau seringkali lambat.

5.2.3 Saran untuk Penelitian Lanjutan

- a. Pengembangan swarm drone (multi-drone) koordinatif di mana beberapa drone berbagi tugas: drone A mengirim logistik, drone B bertindak sebagai repeater komunikasi, dan drone C melakukan pemetaan area terdampak secara real-time.
- b. Integrasi dengan sistem peringatan dini berbasis masyarakat (community-based EWS) melalui pengeras suara (loudspeaker) di drone yang dapat menyiarkan peringatan langsung kepada warga pulau ketika ancaman terdeteksi.
- c. Studi komparatif biaya-manfaat (cost-benefit analysis) antara pengoperasian sistem drone multi-sensor versus pembangunan stasiun pemantau tetap di setiap pulau, untuk meyakinkan pemangku kepentingan (BPBD, BNPB, Kementerian Kominfo) tentang efisiensi solusi yang diusulkan.

DAFTAR REFERENSI

- Wang, H. M., Liu, Z. M., He, N., & Zhu, X. (2025). Intelligent sensing and data transmission key technology for monitoring mountain hazards in complex environments. *Science Technology and Engineering*, 25(2), 640-648.
- Jia, Y., & Ji, Y. (2025). Research progress and application of UAV multi-sensor data fusion technology. *MATEC Web of Conferences*, 410, 04009.
- Duffy, J. (2025). *Coastal Eye: Monitoring coastal environments using lightweight drones* (Doctoral dissertation). University of Exeter.
- Kongsberg Geospatial. (2025, September 4). Kongsberg Geospatial deploys IRIS for medical drone delivery programme in Maryland. *Unmanned Airspace*.
- CSA Ocean Sciences Inc. (2025, July 10). CSA boosts disaster response with new UAV for rapid post-storm assessment. *Health, Safety and Environment Review*.
- PLOTO Project. (2026). PLOTO Use Case B – Budapest: Advanced monitoring and risk simulation. PLOTO Project.
- RescueNav: AI-Powered AAV trajectory planning with LoRa connectivity for IoT-based disaster communications. (2025). *IEEE Internet of Things Journal*, 13(9), 18239-18246.
- Kim, Y. Y. (2026). Advanced InSAR-UAV-LiDAR flood-deformation risk monitoring for efficient mobility. *National Academies* (University Transportation Centers Program).
- Papakonstantinou, A. (2025, May 21). Drones in the Arctic Mapping and monitoring coastal marine litter from the skies. *ICEBERG Project*.
- Ascent AeroSystems & Arete. (2025, October 29). Ascent advances all-weather autonomy with Arete's AIMS sensor. *Inside Unmanned Systems*.

- Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana. Lembaran Negara Republik Indonesia.
- Peraturan Kepala BNPB Nomor 4 Tahun 2012 tentang Pedoman Sistem Peringatan Dini Berbasis Masyarakat.
- Twigg, J. (2015). Disaster risk reduction: Good practice review of early warning systems. Humanitarian Practice Network, Overseas Development Institute.
- Chen, X., et al. (2022). LoRa-based UAV communication system for disaster-affected remote areas. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(15), 13456-13468.
- Sanchez-Garcia, J., et al. (2021). Multi-sensor data fusion for UAV-based environmental monitoring. *Sensors*, 21(12), 4123.
- Giordan, D., et al. (2018). The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology applications. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77, 161-184.
- Razi, A., et al. (2019). UAV-enabled early warning system for wildfire detection. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1-6.