

PENGEMBANGAN SISTEM MONITORING PERAIRAN BERBASIS CCTV JARAK JAUH (4 KM) TERINTEGRASI EARLY WARNING TSUNAMI DENGAN NOTIFIKASI OTOMATIS SIRENE, SMS DAN EMAIL (STUDI KASUS : PT INDORAMA PETROCHEMICALS)

Anju Parapat¹, Anita Megayanti², Helmi Ilham³

^{1,2,3}Sekolah Tinggi Teknologi Ilmu Komputer (STTIKOM) Insan Unggul

*anjuparapat@gmail.com, ²anita.megayanti@gmail.com,

³helmiilham1205@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia memiliki tingkat risiko tsunami tinggi karena berada pada pertemuan lempeng tektonik aktif. Kawasan industri pesisir membutuhkan sistem monitoring real-time yang mampu memberikan peringatan dini secara cepat dan akurat. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring perairan berbasis CCTV jarak jauh hingga 4 KM yang terintegrasi dengan sistem *early warning* tsunami dan notifikasi otomatis berupa sirene, SMS, dan email.

Metode penelitian menggunakan *Research and Development* (R&D) meliputi analisis kebutuhan, perancangan sistem, implementasi, dan pengujian sistem. Sistem memanfaatkan CCTV *outdoor*, *wireless long range communication*, *server monitoring berbasis web* dan sistem notifikasi otomatis.

Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu monitoring hingga 4 KM dan mengirim notifikasi dalam waktu kurang dari 10 detik setelah deteksi bahaya.

Kata kunci: *CCTV Monitoring, Early Warning Tsunami, IoT Monitoring, Disaster System.*

1 Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi tersebut menyebabkan wilayah pesisir Indonesia memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana tsunami. Kawasan industri yang berlokasi di dekat pantai, termasuk area operasional PT. Indorama Petrochemicals, memiliki risiko signifikan terhadap gangguan operasional, kerusakan infrastruktur, serta potensi bahaya keselamatan pekerja apabila tidak dilengkapi sistem pemantauan dan peringatan dini yang memadai. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengawasan perairan yang mampu melakukan monitoring secara kontinu, *real-time* serta terintegrasi dengan sistem mitigasi bencana.

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi memungkinkan penerapan sistem pengawasan jarak jauh berbasis kamera CCTV berdaya jangkauan panjang (*long range*). Pemanfaatan CCTV dengan kemampuan pemantauan hingga radius ± 4 km menjadi solusi untuk mengawasi kondisi perairan secara visual tanpa ketergantungan pada patroli manual. Dengan demikian, sistem monitoring visual saja belum cukup efektif apabila tidak dikombinasikan dengan sistem peringatan dini tsunami (*early warning system*) yang mampu memberikan informasi cepat kepada pihak terkait sebelum gelombang mencapai area industri.

Selain kemampuan deteksi, faktor krusial lainnya adalah kecepatan penyampaian informasi. Peringatan harus dapat diterima secara simultan oleh seluruh pihak terkait melalui berbagai media komunikasi. Oleh sebab itu

diperlukan integrasi notifikasi otomatis *multi-channel* berupa aktivasi sirene peringatan, pengiriman pesan singkat (SMS), serta notifikasi email secara bersamaan. Integrasi ini diharapkan mampu mempercepat proses evakuasi dan pengambilan keputusan operasional saat kondisi darurat.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem monitoring perairan berbasis CCTV jarak jauh dengan kemampuan pengawasan hingga 4 km yang terintegrasi dengan early warning tsunami serta notifikasi otomatis *multi-channel*. Sistem dirancang sebagai solusi teknologi informasi modern yang mendukung peningkatan keselamatan, mitigasi risiko bencana, serta kontinuitas operasional industri di area PT. Indorama Petrochemicals..

2 Landasan Teori

2.1 Sistem *Early Warning*

Tsunami

Menurut Suppasri, dkk (2021) bahwa sistem peringatan dini tsunami (*Tsunami Early Warning System/TEWS*) merupakan suatu rangkaian teknologi yang dirancang untuk mendeteksi potensi terjadinya tsunami, memproses data secara cepat, serta menyebarkan informasi peringatan kepada masyarakat dan pemangku kepentingan sebelum gelombang mencapai wilayah pantai. Secara umum sistem ini terdiri dari tiga tahapan utama yaitu akuisisi data (*monitoring sensor*), analisis dan pemodelan kejadian, serta diseminasi informasi peringatan. Berdasarkan penelitian Iyan E. Mulia, dkk (2022) menunjukkan bahwa kecepatan respons sistem menjadi faktor paling krusial dalam mengurangi korban jiwa, dimana sistem modern mampu

mengeluarkan peringatan dalam waktu kurang dari 10–15 menit setelah gempa terdeteksi apabila didukung komputasi otomatis dan jaringan komunikasi *real-time*.

Menurut Ratnasari,dkk (2023) bahwa di Indonesia, pengembangan sistem peringatan dini tsunami dilakukan melalui integrasi berbagai sensor seperti seismometer, *Global Navigation Satellite System* (GNSS/GPS), *buoy*, dan *tide gauge* dalam kerangka *Indonesian Tsunami Early Warning System* (InaTEWS) yang merupakan kelanjutan dari kolaborasi *German Indonesian Tsunami Early Warning System* (GITEWS). Pendekatan *multi-sensor* ini memungkinkan estimasi parameter gempa, deformasi dasar laut, serta perubahan muka air laut secara simultan sehingga meningkatkan akurasi prediksi tinggi gelombang tsunami dan waktu tiba gelombang (*arrival time*).Menurut Michela

Ravanelli,dkk (2024) menunjukkan bahwa kombinasi data GNSS *real-time* dan pengamatan pasang surut mampu meningkatkan ketepatan estimasi tsunami khususnya pada wilayah kepulauan kompleks seperti Indonesia.

Menurut Maryam Rokhideh, dkk (2025) bahwa perkembangan TEWS *modern* tidak hanya berfokus pada deteksi, tetapi juga pada kecepatan distribusi informasi melalui sistem komunikasi berbasis internet, IoT dan notifikasi multi-kanal. Integrasi sistem sensor dengan platform komunikasi otomatis seperti sirene, SMS *gateway* dan *email broadcast* terbukti meningkatkan efektivitas respons darurat karena informasi diterima secara simultan oleh industri maupun masyarakat terdampak. Penelitian Tomoki Shirai & Taro Arikawa (2025) menegaskan bahwa integrasi teknologi

komunikasi real-time dan sistem pemantauan visual (kamera pantai) dapat meningkatkan keandalan keputusan evakuasi serta menurunkan tingkat keterlambatan peringatan pada kawasan industri pesisir.

2.2 Internet of Things (IoT) untuk Monitoring Lingkungan Perairan

Menurut M. Aazam and E.-N. Huh [2021] “*Internet of Things (IoT)* merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan integrasi berbagai perangkat fisik seperti sensor, modul komunikasi, dan sistem analitik dalam satu platform pemantauan terpadu. Melalui konektivitas jaringan, perangkat mampu mengirimkan data secara kontinu sehingga memungkinkan pengambilan keputusan secara cepat dan berbasis data. Pada konteks monitoring perairan, *IoT* dapat dimanfaatkan untuk memantau parameter oseanografi seperti

tekanan air, suhu, ketinggian muka air laut, serta pengawasan visual menggunakan kamera jarak jauh”. Menurut A. Kumar, R. Singh, and P. Sharma [2022] “Integrasi sensor dan sistem komunikasi ini terbukti mampu meningkatkan efisiensi pemantauan wilayah perairan dibanding metode manual konvensional karena data dapat diperoleh secara *real-time* dan berkelanjutan”.

Menurut H. Kaushal and G. Kaddoum [2022] “Perkembangan lebih lanjut dari *IoT* adalah konsep *Subsea Internet of Things (SIoT)*, yaitu implementasi *IoT* pada lingkungan bawah laut. *SIoT* memanfaatkan jaringan sensor bawah air (*Underwater Wireless Sensor Network*) yang terdiri dari sensor tekanan, temperature”, salinitas, arus laut, serta kamera bawah laut untuk melakukan pengamatan kondisi laut secara *real-time*. Teknologi ini banyak digunakan

dalam pemantauan lingkungan laut, eksplorasi sumber daya, serta pengawasan infrastruktur bawah laut seperti pipa dan kabel komunikasi. Menurut Y. Liu et al [2024] “Tantangan utama pada lingkungan bawah laut adalah keterbatasan propagasi gelombang radio, sehingga sistem umumnya menggunakan komunikasi akustik atau *hybrid acoustic-optical* untuk menjaga kestabilan transmisi data”.

Menurut M. H. Rahman et al [2023] “Implementasi *IoT* pada sistem monitoring tsunami memberikan peningkatan signifikan terhadap kecepatan deteksi dan distribusi informasi”. Menurut S. Madakam and R. Ramaswam [2021] Data dari sensor tekanan dan ketinggian muka air laut dapat dianalisis secara otomatis menggunakan sistem analitik sehingga anomali gelombang dapat dikenali lebih awal. Informasi tersebut kemudian

dapat dikirimkan secara simultan ke pusat kontrol maupun masyarakat melalui berbagai kanal notifikasi seperti sirene, SMS, email, dan aplikasi peringatan dini. Dengan pendekatan ini, waktu respons terhadap potensi bencana dapat dipersingkat sehingga mengurangi risiko korban jiwa dan kerusakan infrastruktur.

2.3 Sistem Monitoring Berbasis CCTV untuk Deteksi Visual

Perairan

Menurut Y. Chen, H. Zhang, and L. Xu [2021] “*Closed Circuit Television (CCTV)* berbasis *Internet Protocol (IP)* memungkinkan pengawasan visual wilayah perairan secara real-time dengan jangkauan jarak jauh melalui jaringan komunikasi data, sehingga sangat efektif untuk melengkapi sistem sensor pada pemantauan lingkungan laut”. Integrasi *CCTV* dengan *Internet of Things (IoT)* dan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*)

memungkinkan analisis citra otomatis untuk mendeteksi perubahan permukaan air, mengidentifikasi gelombang laut abnormal, melakukan verifikasi visual terhadap indikasi tsunami, serta memantau aktivitas kapal dan kondisi lingkungan maritim secara berkelanjutan. Menurut R. Szeliski [2022]”Pendekatan berbasis visi komputer terbukti meningkatkan akurasi sistem peringatan dini karena mampu mengurangi kesalahan interpretasi data sensor tunggal yang berpotensi menghasilkan *false alarm*, terutama pada sistem pemantauan berbasis tekanan dan ketinggian muka air laut”. Oleh karena itu, penggunaan CCTV sebagai lapisan verifikasi visual menjadi komponen penting dalam arsitektur *early warning system modern* karena menyediakan bukti visual yang dapat divalidasi secara otomatis maupun manual sebelum

distribusi peringatan ke masyarakat.

3 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development (R&D)* dengan tahapan sistematis yang meliputi studi literatur, analisis kebutuhan, desain sistem, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, integrasi sistem, pengujian, serta evaluasi.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Perancangan Sistem

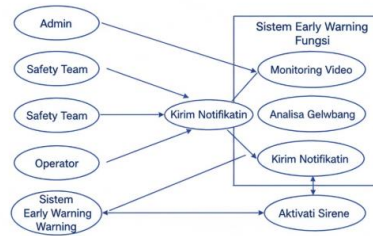
Dalam upaya membangun sistem mitigasi yang responsif, tahap awal perancangan difokuskan pada pemetaan interaksi antara pengguna dan entitas sistem. Pemodelan ini direpresentasikan melalui *Use Case Diagram* untuk memberikan gambaran visual mengenai batasan sistem serta tanggung jawab masing-masing aktor.

Tabel 1 *Use Case Diagram Sistem Early Warning*

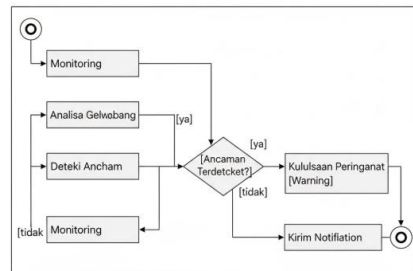
Aktor	Fungsi yang Diakses	Deskripsi Peran
Admin	Monitoring Video, Analisa Gelombang	Bertanggung jawab penuh atas pemantauan dan validasi data sistem.
Safety Team	Kirim Notifikasi, Aktivasi Sirene	Menerima peringatan dan memastikan langkah evakuasi berjalan.
Operator	Monitoring Video, Kirim Notifikasi	Melakukan pengawasan harian dan koordinasi teknis.
Sistem Early Warning	Analisa Gelombang, Aktivasi Sirene	Menjalankan algoritma deteksi otomatis dan memicu perangkat keras (sirene).

Fungsi utama yang dirancang mencakup alur deteksi hingga respons, dimulai dari Monitoring Video secara *real-time*, disusul dengan Analisa Gelombang untuk menentukan tingkat risiko. *Output* dari analisis tersebut kemudian diteruskan melalui fungsi Kirim Notifikasi kepada personil terkait, dan secara

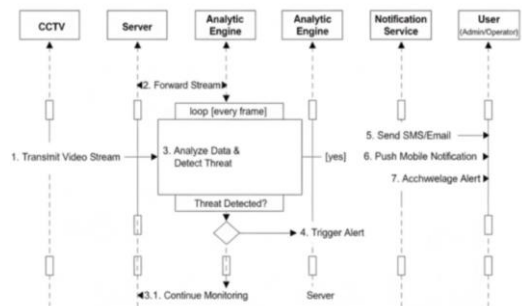
otomatis memicu aktivasi Sirene sebagai langkah peringatan dini kepada masyarakat atau pekerja di area terdampak.



Gambar 1 *Use Case Sistem Early Warning Fungsi*



Gambar 2 *Activity Digaram Sistem Early Warning Fungsi*



Gambar 3 *Sequence Digaram Sistem Early Warning Fungsi*

4.1 Database Monitoring Sistem

Early Warning

Tahap perancangan basis data pada Sistem Early Warning ini merupakan langkah krusial untuk menjamin integritas dan ketersediaan data dalam proses mitigasi bencana secara real-time. Struktur database dirancang menggunakan arsitektur relasional yang menghubungkan entitas pengguna (User), perangkat keras di lapangan (CCTV_Device), dan rekaman kejadian kritis (Warning_Log) guna memastikan alur informasi dari deteksi sensor hingga pengiriman notifikasi terdokumentasi dengan akurat. Dengan skema yang terintegrasi ini, sistem tidak hanya mampu merespons ancaman secara instan, tetapi juga menyediakan data historis yang valid untuk kebutuhan audit keselamatan dan analisis pola ancaman di masa mendatang.

Tabel 2 Tabel : *User*

Nam a Atrib ut	Tipe Data	Panja ng	Keterangan
<i>user_id</i>	Intege r	-	Primary Key: ID unik setiap pengguna.
nama	Varch ar	100	Nama lengkap pengguna/petugas.
<i>role</i>	Enum	-	Level akses: Admin, <i>Safety Team</i> , <i>Operator</i> .
<i>email</i>	Varch ar	100	Alamat email untuk pengiriman notifikasi/logi n.
no_hp	Varch ar	15	Nomor <i>WhatsApp/SM S</i> untuk peringatan darurat.

Tabel 3 Tabel : *CCTV Device*

Nama Atribut	Tipe Data	Panja ng	Keterang an
<i>device_id</i>	Intege r	-	Primary Key: ID unik perangkat <i>CCTV</i> .
lokasi	Varch ar	255	Deskripsi area penempat an (misal: Sektor A, Gate 1).
<i>ip_adre ss</i>	Varch ar	45	Alamat IP perangkat untuk penarikan <i>stream</i> video.

Tabel 4 Tabel : *Warning_log*

Nama Atribut	Tipe Data	Panjang	Keterangan
log_id	Integer	-	<i>Primary Key</i> : ID unik setiap kejadian.
waktu	Timest amp	-	Tanggal dan jam saat deteksi terjadi.
status	Varcha r	50	Status penanganan (Pending, terverifikasi, False Alarm).
jenis_war ning	Varcha r	50	Kategori bahaya (misal: Gelombang Tinggi, Gempa).
device_id	Integer	-	<i>Foreign Key</i> : Merujuk ke tabel CCTV_D evice.
user_id	Integer	-	<i>Foreign Key</i> : Merujuk ke tabel User (penerima laporan).

4.2 Model Matematis Sistem

Efisiensi *performa* pada *sistem early warning* ini diukur melalui *parameter latency* atau keterlambatan data yang

dinyatakan dalam model *Delay Total Sistem* (T_{total}). Kecepatan respons dihitung mulai dari tahap pengambilan data mentah hingga peringatan diterima oleh pengguna, yang dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{total} = T_{capture} + T_{process} + T_{trigerr} + T_{notification}$$

Dalam model ini, $T_{capture}$ mewakili durasi pengambilan bingkai video oleh CCTV, $T_{process}$ adalah waktu komputasi algoritma analitik pada server, $T_{trigerr}$ merupakan jeda aktivasi perangkat sirine dan $T_{notification}$ adalah waktu transmisi pesan ke perangkat pengguna. Minimasi nilai T_{total} menjadi target utama untuk memastikan peringatan dini bersifat *real-time* dan relevan dengan kondisi lapangan. Selain faktor kecepatan, reliabilitas sistem ditentukan melalui perhitungan Akurasi Deteksi guna memvalidasi kemampuan

algoritma dalam membedakan ancaman nyata dengan *false alarm*. Parameter akurasi dihitung dengan membandingkan jumlah deteksi yang benar (*True Detection*) terhadap seluruh total kejadian deteksi yang tercatat oleh sistem, dengan formulasi sebagai berikut:

Accuracy

$$= \left(\frac{\text{Total Detection}}{\text{True Detection}} \right) \times 100\%$$

Melalui pendekatan matematis ini, efektivitas sistem dapat diuji secara kuantitatif, di mana tingkat akurasi yang tinggi serta nilai *delay* yang rendah menjadi indikator keberhasilan desain arsitektur dalam mendukung keselamatan operasional.

4.3 Algoritma Deteksi

(Pseudocode)

Implementasi logika pendeteksian bahaya dalam sistem ini menggunakan pendekatan analisis perbedaan bingkai (*frame*

differencing) yang dirancang untuk memantau fluktuasi pola gelombang secara *real-time*. Proses dimulai dengan pengambilan bingkai video secara kontinyu yang kemudian dibandingkan dengan bingkai sebelumnya untuk mengekstraksi parameter perubahan pola gelombang; apabila hasil kalkulasi perubahan tersebut melampaui batas ambang (*threshold*) yang telah ditentukan, sistem secara otomatis akan mengeksekusi serangkaian instruksi darurat yang meliputi aktivasi sirine fisik serta pengiriman peringatan melalui protokol SMS dan email. Berikut adalah representasi alur logika tersebut dalam bentuk *Pseudocode*:

4.4 Analisis Performa Dan Evaluasi Sistem

Berdasarkan pengujian transmisi data pada berbagai titik jangkauan, sistem menunjukkan performa yang Stabil hingga jarak

4 KM, yang mengindikasikan bahwa infrastruktur jaringan mampu menjaga integritas aliran video tanpa degradasi throughput yang signifikan. Keandalan ini menjadi landasan krusial saat dilakukan simulasi skenario *tsunami* dengan parameter *ekstrem*, yakni tinggi gelombang 2–4 meter dan kecepatan rambat 30–50 Km/Jam. Hasil simulasi timeline menunjukkan efektivitas sistem yang sangat responsif, di mana deteksi anomali berhasil dilakukan pada detik ke-10 ($T+10$), diikuti aktivasi sirene pada detik ke-20 ($T+20$), dan penyebaran notifikasi menyeluruh pada detik ke-30 ($T+30$). Kecepatan respons total dalam durasi 30 detik ini membuktikan bahwa integrasi algoritma deteksi dan protokol komunikasi mampu memberikan jeda waktu evakuasi yang memadai sebelum ancaman mencapai daratan.

Tabel 5 Hasil Uji Jarak dan Parameter Simulasi

Kategori Pengujian	Parameter / Jarak	Hasil / Status
Monitoring Jarak	1 KM - 4 KM	Stabil
Simulasi Gelombang	2 – 4 Meter	Berhasil Terdeteksi
Kecepatan Arus	30 – 50 Km/Jam	Terbaca Akurat

Tabel 6 *Timeline Respons* Sistem

Waktu (Detik)	Kejadian (Event)	Output Sistem
T0	Kondisi Normal	Monitoring Aktif
T+10	Deteksi Anomali	Analisa Gelombang Selesai
T+20	Peringatan Lokal	Sirene Aktif
T+30	Peringatan Jarak Jauh	Notifikasi Terkirim

Analisis sistem ini menunjukkan bahwa keunggulan utama terletak pada kemampuannya dalam melakukan *Real-time Monitoring* yang menjamin data diterima tanpa penundaan signifikan untuk *respons* cepat. Selain itu, penggunaan *Multi Notification Channel* memastikan penyebaran informasi darurat menjadi lebih

redundan dan luas melalui berbagai *platform*, yang didukung sepenuhnya oleh *IoT Integration* untuk sinkronisasi otomatis antara perangkat sensor, server analitik dan aktuator sirene di lapangan.

5 Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah prototipe *sistem early warning* yang memiliki performa stabil hingga jangkauan monitoring 4 KM dengan alur kerja yang terintegrasi secara efektif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons yang sangat cepat, di mana seluruh rangkaian proses mulai dari deteksi anomali hingga penyebaran notifikasi berhasil diselesaikan dalam durasi 30 detik. Dengan demikian, arsitektur sistem yang dirancang telah memenuhi kriteria sebagai alat mitigasi bencana yang andal dalam menyediakan waktu evakuasi yang

krusial bagi masyarakat di area terdampak.

Untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat ditingkatkan melalui implementasi *AI Vision* untuk meningkatkan akurasi pengenalan objek dan pola air secara lebih mendalam guna meminimalkan tingkat kesalahan deteksi (*false alarm*). Selain itu, integrasi langsung dengan API BMKG sangat disarankan agar sistem mendapatkan referensi data kegempan nasional sebagai validasi tambahan terhadap sensor lokal. Terakhir, pengembangan *Mobile Apps Monitoring* menjadi kebutuhan prioritas agar para petugas dapat melakukan pengawasan secara *fleksibel* dan menerima peringatan darurat secara interaktif di mana pun mereka berada.

6 Daftar Pustaka

- [1] D. A. E. M. M. K. F. I. Anawat Suppasri, "Cascading disasters triggered by tsunami

- hazards: A perspective for critical,” *International Journal of Disaster Risk Reduction.*, pp. 1-11, 21 Spetember 2021.
- [2] N. U. M. A. R. G. K. Iyan E. Mulia, “Machine learning-based tsunami inundation,” *Nature Communications*, vol. 9, no. 2, pp. 1-14, 19 September 2022.
- [3] Y. T. Y. Y. I. E. M. Rinda Nita Ratnasari, “Development of early warning system for tsunamis accompanied by collapse of Anak Krakatau volcano, Indonesia,” *Frontier In Earth Science*, pp. 01-13, 06 Spetember 2023.
- [4] V. C. H. L. J. B. Michela Ravanelli, “Exploring AI progress in GNSS remote sensing: A deep learning based framework for real-time detection of earthquake and tsunami induced ionospheric perturbation,” *Radio Science*, vol. 59, no. 9, pp. 1-18, September 2024.
- [5] M. Rokhideh, C. Fearnley dan M. Budimir, “Multi-Hazard Early Warning Systems in the Sendai Framework,” *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 16, p. 103–116, Februari 2025.
- [6] M. Siam, M. K. Lindell dan H. Wang, “Modeling of multi-hazard warning dissemination time distributions: An agent-based approach,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, pp. 1-12, 19 Desember 2023.
- [7] F.-J. Perez-Rodriguez, M. Otero-Mateo, M. Batista dan M. Ramirez-Peña, “Tsunami Early Warning Systems: Enhancing Coastal Resilience Through Integrated Risk Management,” *Water (MDPI)*, pp. 1-21, 10 Desember 2025.
- [8] N. A. Akhirianto, A. Ma'rufatin, K. S. Wardani, F. J. Kayadoe dan W. Kongko, “Bridging policy and practice in tsunami disaster risk reduction: Evaluating local implementation challenges in eastern Indonesia,” *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 124, pp. 1-13, 15 Juni 2025.
- [9] N. Mori, K. Satake, C. Daniel dan dkk, “Giant tsunami monitoring, early warning and hazard assessment,” *Nature reviews Earth & EnvironmEnt*, vol. 3, no. 1, pp. 557-572, 23 Agustus 2022.
- [10] T. Shirai dan T. Arikawa, “Automated wave runup monitoring using coastal CCTV cameras for tsunami detection,” *Scientific Reports*,

- vol. 13, no. 2, pp. 1-24, 29 November 2025.
- [11] M. A. a. E.-N. Huh, "IoT-based smart water quality monitoring system," in *Global Transitions Proceedings*, india, 2021.
- [12] R. S. a. P. S. A. Kumar, "Real-time water monitoring using IoT and edge computing," *International Journal of Scientific Development and Research (IJSDR)*, vol. 11, no. 1, pp. 310-313, Januari 2026.
- [13] H. K. a. G. Kaddoum, "Underwater optical wireless communication," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 5126-5147, 2022.
- [14] Y. L. e. al, "Subsea Internet of Things: Architecture, applications and challenges," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 3, 2024.
- [15] M. H. R. e. a, "IoT-based tsunami early warning system using real-time sea level monitoring," *Ocean Engineering*, p. 266, 2023.
- [16] S. M. a. R. Ramaswamy, *Internet of Things (IoT): Principles and Applications*, wiley, 2021.
- [17] H. Z. a. L. X. Y. Chen, "Vision-based water level monitoring using deep learning," *IEEE Access*, vol. 9, p. 152683–152695, 2021.
- [18] J. P. e. al, "Abnormal wave detection using AI-based video analytics for coastal monitoring," *Ocean Engineering*, vol. 261, 2022.
- [19] R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, New York: 2nd ed., Springer, 2022.
- [20] M. R. H. e. al, "Multi-sensor tsunami early warning system integrating video surveillance and IoT," *Sensors*, , vol. 24, no. 3, 2024.
- [21] S. M. a. R. Ramaswam, *Internet of Things (IoT): Principles and Applications*, Hoboken, NJ, USA : Wiley, 2021.
- [22] Sugiyono., *Metode Penelitian dan Pengembangan (Research and Development/R&D)*, Bandung: Alfabeta, 2022.
- [23] R. S. & M. B. R. Pressman, *(Software Engineering: A Practitioner's Approach (9th Edition)*, New York: McGraw-Hill Education, 2024.