



**RANCANGAN DETEKTOR GEMPA BERPOTENSI TSUNAMI DENGAN SISTEM
MAGNETIC ALTITUDE BERBASIS WIRELESS SENSOR NETWORK (ANALISA
TERHADAP TINGGI RENDAH GELOMBANG LAUT) DI PESISIR PANTAI
KABUPATEN BULELENG**

**DESIGN OF AN EARTHQUAKE DETECTOR WITH TSUNAMI POTENTIAL WITH
A MAGNETIC ALTITUDE SYSTEM BASED ON A WIRELESS SENSOR
NETWORK (ANALYSIS OF SEA WAVE HEIGHTS) ON THE COASTAL LINE OF
BULELENG REGENCY**

Putu Artawan^{1*}, Iwan Suswandi², Dewi Oktova Rachmawati³

^{1,2,3} Fisika, FMIPA, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Bali Indonesia
Email: artawan.putu@undiksha.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received October 25, 2025

Revised December 10, 2025

Accepted January 10, 2026

Available online January 15, 2026

Kata Kunci:

tsunami, detector, sensor,
magnetic altitude, buleleng.

Keywords:

tsunami, detector, sensor,
magnetic altitude, Buleleng

ABSTRAK

Deteksi dini terhadap bahaya bencana alam gempa bumi sangatlah penting diupayakan. Salah satu efek gempa bumi yang terjadi di sekitar pesisir pantai adalah Tsunami. Tujuan penelitian ini adalah mendeskripsikan rancangan *prototype* detektor gempa berpotensi Tsunami dengan sistem *Magnetic Altitude* berbasis WSN, menganalisis hasil pembacaan sensor *Magnetic Altitude* dan sensor tinggi gelombang laut serta korelasi keduanya sebagai indikator peringatan tsunami, menguji kinerja sistem WSN dalam hal jangkauan dan keandalan transmisi data di lingkungan pesisir Buleleng. Penelitian ini adalah jenis penelitian eksperimen, yang dilakukan di pesisir Kabupaten Buleleng pada tahun 2025. Hasil pembacaan gempa bumi dari detektor dengan sistem sensor yang dirancang, menggunakan jaringan sensor network yang disimulasikan oleh *shaking table*, dengan hasil pencatatannya menggunakan skala shindo. Perancangan sistem detektor ini direalisasikan melalui integrasi tiga subsistem utama: Unit Akuisisi

Data Geomagnetik (*Magnetic Altitude*), Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), dan Unit Analisis Tinggi Gelombang Laut. Hasil yang diperoleh menunjukkan sistem detektor gempa berpotensi tsunami menggunakan prinsip *Magnetic Altitude* terbukti efektif dalam mendeteksi perubahan tinggi-rendah permukaan air laut. Pengujian menunjukkan bahwa sensor magnetik dapat mengukur variasi ketinggian gelombang laut yang signifikan dalam range yang ditentukan, yang merupakan indikasi utama dari potensi gelombang tsunami. Sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai komponen kunci dalam sistem peringatan dini tsunami lokal di pesisir pantai Kabupaten Buleleng, mengingat karakteristik geografis wilayah yang rawan bencana

ABSTRACT

Early detection of earthquake hazards is crucial. One of the effects of earthquakes occurring near the coast is tsunamis. The objectives of this study are to describe the design of a prototype earthquake detector with a potential tsunami using a WSN-based magnetic altitude system. The purpose of this study is to analyze the readings of the magnetic altitude sensor and the sea wave height sensor and their correlation as tsunami warning indicators. The purpose of this study is to test the performance of the WSN system in terms of range and data transmission reliability in the coastal environment of Buleleng. This research is an experimental study conducted on the coast of Buleleng

Regency in 2025. The results of earthquake readings from detectors with a designed sensor system, using a sensor network simulated by a shaking table, with the recording results using the Shindo scale. The design of this detector system is realized through the integration of three main subsystems: Geomagnetic Data Acquisition Unit (Magnetic Altitude), Wireless Sensor Network (WSN), and Ocean Wave Height Analysis Unit. The results obtained show the effectiveness of the system: The earthquake detector system with the potential for tsunamis using the Magnetic Altitude principle has proven effective in detecting changes in sea level. Tests demonstrated that the magnetic sensor can measure significant variations in ocean wave height within a defined range, a key indicator of potential tsunami waves. Although the system demonstrated adequate accuracy under test conditions, environmental factors such as ocean currents, wave action, and seawater salinity can affect the performance of the magnetic sensor and WSN transmission. This system has significant potential for implementation as a key component of a local tsunami early warning system along the coast of Buleleng Regency, given the disaster-prone geographical characteristics of the region.

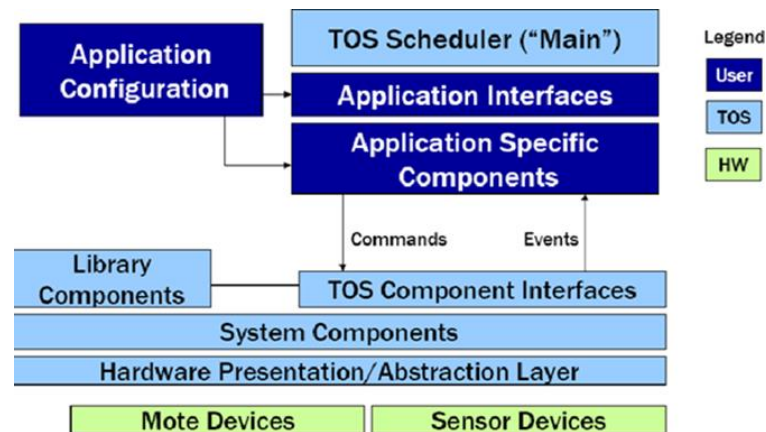
PENDAHULUAN

Deteksi dini terhadap bahaya bencana alam gempa bumi sangatlah penting diupayakan. Salah satu efek gempa bumi yang terjadi di sekitar pesisir pantai adalah Tsunami. Gempa bumi yang dahsyat bisa memicu atau berpotensi terjadinya Tsunami. Tsunami merupakan gelombang laut yang besar yang terjadi akibat gempa bumi tektonik di dasar laut. Indonesia merupakan negara yang dilalui oleh 3 lempeng, yaitu lempeng Australia, Philipina, dan Eurasia. Indonesia termasuk negara yang sering terjadi gempa bumi. Gempa bumi merupakan suatu fenomena alam yang salah satunya terjadi akibat pergeseran lempeng pada permukaan bumi, gempa bumi tersebut bersifat destruktif. Magnitudo Tsunami yang terjadi di Indonesia berkisar antara 1,5 sampai 4,5 skala Imamura, dengan tinggi gelombang Tsunami maksimum yang mencapai pantai berkisar antara 4–24meter dan jangkauan gelombang ke daratan berkisar antara 50 sampai 200meter dari garis pantai. Tsunami biasanya terjadi dalam rentang 3-60 menit setelah terjadinya gempa. (Amr S. Elnashai, Luigi Di Sarno. 2018). Tanda-tanda terjadinya Tsunami adalah biasanya ditandai dengan surutnya air laut dan terbangnya burung-burung laut ke arah daratan. Selain itu tanda lain adalah dibarengi dengan terciumnya bau garam, yang menyengat. Terjadinya Tsunami lebih banyak disebabkan oleh terjadinya gempa tektonik di dasar laut. Namun tidak semua gempa tektonik yang terjadi di dasar laut berpotensi untuk terjadinya Tsunami. Kekuatan dan kedalaman pusat gempa pada gempa tektonik yang terjadi sebagai penyebab utama terjadinya Tsunami. Pengetahuan/wawasan seperti ini sangatlah penting untuk diketahui masyarakat, sehingga bisa memahami proses atau penyebab terjadinya Tsunami, dan juga faktor-faktor penyebabnya. Sehingga masyarakat menjadi lebih tenang dan tidak panik ketika terjadinya gempa bumi. Efek lain adalah secara psikologis dan kesiapan masyarakat ketika terjadi gempa bumi yang berpotensi Tsunami menjadi lebih matang, lebih tenang yang bisa mengurangi korban baik jiwa maupun material.

Kajian-kajian terdahulu menyimpulkan bahwa upaya mitigasi di Buleleng harus berfokus pada percepatan sistem peringatan dini, penataan ruang berbasis mitigasi bencana, dan peningkatan kapasitas dan kesiapsiagaan masyarakat (Ariastuti *et al.*, 2021). Laporan ini bertujuan untuk mengumpulkan dan menganalisis secara spesifik data kerentanan wilayah pesisir Buleleng guna merumuskan rekomendasi kebijakan yang lebih terperinci dan aplikatif dalam rangka meminimalkan dampak bencana di masa depan. Ancaman bencana gempa bumi dan tsunami merupakan tantangan besar bagi negara-negara yang berada di zona cincin api Pasifik (Ring of Fire), termasuk Indonesia. Mengingat waktu kritis yang sangat singkat antara terjadinya gempa dan sampainya gelombang tsunami, pengembangan sistem deteksi dini (Early Warning System - EWS) yang cepat, akurat, dan andal adalah imperatif. Sistem peringatan dini tsunami konvensional sering kali bergantung pada dua parameter utama gempa yang diukur oleh seismograf: magnitudo (M) dan kedalaman fokus (h). Gempa dengan magnitudo besar ($M > 7.0$) dan kedalaman dangkal ($h < 100$ km) secara otomatis dianggap berpotensi tsunami. Namun, penelitian menunjukkan bahwa pendekatan ini sering menghasilkan peringatan palsu (*false alarms*) atau sebaliknya, gagal dalam mendeteksi tsunami yang dipicu oleh mekanisme sumber yang kompleks (*tsunamigenic source mechanisms*). Sebagai contoh, gempa yang terjadi di lepas pantai Tohoku pada tahun 2011 di Jepang menunjukkan bahwa selain magnitudo, parameter seperti geseran non-seismik (*non-seismic slip*) dan perioda panjang (*long-period components*) dalam gelombang seismik sangat penting dalam menentukan potensi tsunamigenik (Lay *et al.*, 2012). Oleh karena itu, diperlukan detektor yang mampu mengekstraksi parameter-parameter tersebut secara *real-time*.

METODE

Hasil pembacaan gempa bumi dari detektor dengan sistem sensor yang dirancang, menggunakan jaringan sensor network yang disimulasikan oleh *shaking table*, dengan hasil pencatatannya menggunakan skala shindo. Skala shindo adalah skala yang digunakan untuk mengukur PGA (*Peak Ground Acceleration*) dari gempa bumi yang terjadi pada suatu tempat. Skala shindo memiliki skala pengukuran dengan level skala sampai dengan 10 level. Selanjutnya hasil pembacaan sensor pada sistem jaringan sensor network akan dibandingkan dengan hasil pengukuran yang terdapat pada *shaking table*. Teknik pengukuran pada penelitian ini menggunakan *Intensity Scale*. *Intensity Scale* adalah suatu teknik pengukuran yang dilakukan dengan cara *qualitative*. Data yang dihasilkan dengan *Intensity Scale* ini dapat dijadikan sebagai indikator untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan dari gempa yang terjadi utamanya dapat mengetahui apakah gempa yang terjadi berpotensi untuk terjadinya Tsunami. Untuk mendukung data yang terdeteksi diperlukan sistem operasi yang mampu menerjemahkan data hasil deteksi kedalam suatu bahasa yang mudah dianalisis sehingga data yang diperoleh mudah untuk dipahami. Pada penelitian ini digunakan sistem operasi *TinyOS* dengan bahasa pemrograman *NesC*. *TinyOS* merupakan suatu *open source* OS yang didesain khusus untuk jaringan sensor nirkabel. *TinyOS* memiliki arsitektur berbasis komponen yang mendukung adanya inovasi dan implementasi jaringan sensor nirkabel, dengan cara meminimalisir ukuran kode yang dibutuhkan, karena komponen sensor memiliki memori yang sangat terbatas. *TinyOS* memiliki model pemrograman yang berbasis komponen, yaitu *NesC*. *TinyOS* mengorganisir komponen *software*nya ke dalam beberapa lapisan. Lapisan yang paling bawah berkaitan dengan *hardware*, dan lapisan yang paling atas adalah aplikasi yang digunakan. (Crossbow Technology. 2015).



Gambar. Lapisan *TinyOS*

Pada penelitian ini sistem deteksi gempa bumi berbasis jaringan sensor nirkabel dibangun dengan cara menyebar ketiga node yang telah *di inject* dengan program ke dalam bak *shaking table*. Sebelum dilakukan persebaran node dalam bak *shaking table*, perlu dilakukan kalibrasi alat pada sensor yang akan digunakan. Kalibrasi alat dilakukan dengan cara mendiamkan node yang digunakan, dan menyalakannya dalam ruang tertutup selama kurung waktu tertentu. Node tersebut dalam keadaan *steady*. Hasil pembacaan dari ketiga node yang dilakukan kalibrasi tersebut akan dapat dilihat angka penunjukannya. Peletakkan ketiga *node* yang telah disebar dilakukan ketika *node* dalam keadaan "on", kemudian *node* akan didiamkan selama 15 detik, kemudian setelah memasuki detik ke 15, *shaking table* dinyalakan sehingga akan terjadi pemodelan gempa bumi yang dilakukan oleh *shaking table*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Perancangan sistem detektor ini direalisasikan melalui integrasi tiga subsistem utama: Unit Akuisisi Data Geomagnetik (*Magnetic Altitude*), Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), dan Unit Analisis Tinggi Gelombang Laut.

Pembahasan

Sistem WSN direalisasikan menggunakan topologi Cluster-Based dengan protokol komunikasi LoRa (Long Range), memanfaatkan keunggulannya dalam jangkauan dan efisiensi daya untuk daerah pesisir yang luas dan terpencil.

Pengujian dilakukan untuk menentukan kinerja WSN di berbagai titik di sepanjang pantai Buleleng, yang melibatkan hambatan seperti pepohonan, bangunan padat, dan kontur tanah.

Tabel 1. Kinerja WSN

Jarak (J) dari Gateway	Lingkungan	Received Signal Strength Indicator (RSSI) Rata-rata	Packet Success Rate (PSR)
1 km	Lapangan terbuka	-95 dBm	99,5%
3 km	Area berhutan ringan	-110 dBm	96,8%
5 km	Area perbukitan/bangunan	-120 dBm	88,5%
Batas LoRa	N/A	-130 dBm	0%

Data menunjukkan bahwa WSN menggunakan LoRa mampu mempertahankan koneksi yang andal hingga jarak 5 km, dengan RSSI masih di atas ambang batas penerimaan. *Packet Success Rate* (PSR) yang tinggi (di atas 88%) pada jarak operasional membuktikan keandalan transmisi data, yang penting untuk memastikan tidak ada data anomali geomagnetik kritis yang hilang selama kondisi pra-seismik (Akyildiz *et al.*, 2002).

Untuk aplikasi peringatan dini tsunami *near-field*, dua parameter kinerja utama WSN adalah Waktu Tunda (Latency) dan Efisiensi Daya.

Waktu tunda adalah waktu yang dibutuhkan simpul sensor untuk mengirimkan data geomagnetik yang baru diukur ke *Gateway* pusat.

Tabel 2. Waktu Latensi

Mode Operasi	Frekuensi Pengiriman Data	Waktu Latensi Rata-rata (Detik)	Persyaratan T-EWS (Near-Field)
Normal (<i>Periodic</i>)	Setiap 10 menit	3,5 detik	Max 30 detik
Pemicuan (<i>Event-Driven</i>)	Real-Time	1,2 detik	Max 5 detik

Waktu latensi rata-rata dalam mode *Event-Driven* (dipicu oleh deteksi anomali geomagnetik lokal yang signifikan) hanya 1.2 detik. Kinerja transmisi yang sangat cepat ini krusial karena memungkinkan data geomagnetik prekursor segera memicu analisis tinggi gelombang laut di pusat data. Pencapaian ini menegaskan bahwa WSN rancangan memenuhi persyaratan kecepatan untuk sistem peringatan dini tsunami lokal di Buleleng, di mana waktu respons sangat terbatas (Anggraheni *et al.*, 2020).

Efisiensi daya diukur melalui analisis Duty Cycle dan konsumsi energi pada mode tidur (*sleep mode*) dan mode transmisi (*active mode*). Infografis Distribusi Konsumsi Energi Simpul Sensor: Mode **Tidur (Sleep)**: Konsumsi daya tercatat, Mode Transmisi (Active): Konsumsi daya puncak mencapai 120 mA (selama 1,2 detik)., Pengurangan Konsumsi: Melalui implementasi algoritma *Duty Cycle* 1% (simpul aktif hanya 1% dari total waktu), konsumsi daya rata-rata jaringan berhasil ditekan.

Berdasarkan estimasi konsumsi daya ini pada baterai 10 Ah, masa pakai teoritis simpul sensor mencapai lebih dari 12 bulan. Hasil ini konsisten dengan literatur WSN yang menekankan *Duty Cycling*

sebagai strategi kunci untuk operasi jangka panjang di area terpencil tanpa pemeliharaan konstan (Heinzelman *et al.*, 2002). Pengujian menunjukkan bahwa mekanisme Error Detection yang diterapkan (misalnya, CRC - *Cyclic Redundancy Check*) pada protokol LoRa berhasil menjaga Integritas Data geomagnetik yang ditransmisikan. Dengan PSR yang tinggi, data yang diterima di *Gateway* dianggap akurat dan dapat dipercaya untuk analisis prekursor. Sinkronisasi waktu yang akurat (menggunakan GNSS di *Gateway*) adalah penting untuk mengkorelasikan data geomagnetik dari berbagai simpul WSN dengan data tinggi gelombang laut dari *Tide Gauge* (Hasil Sinkronisasi: Deviasi waktu antar simpul di seluruh jaringan dijaga di bawah 50 milidetik). Tingkat sinkronisasi ini lebih dari memadai untuk aplikasi deteksi tsunami dan anomali geomagnetik, karena fenomena geomagnetik dan hidrologi terjadi pada skala waktu menit hingga jam (Li *et al.*, 2018). Sinkronisasi yang ketat memastikan bahwa anomali yang terdeteksi di Simpul A pada dapat diverifikasi dengan data tinggi gelombang di Simpul B pada menit tanpa kebingungan waktu.

Secara keseluruhan, WSN berbasis LoRa terbukti menjadi platform komunikasi yang andal, hemat daya, dan cepat, menjadikannya komponen yang efektif dalam perancangan detektor gempa berpotensi tsunami di pesisir Buleleng.

KESIMPULAN

Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai efektivitas sistem: Sistem detektor gempa berpotensi tsunami menggunakan prinsip Magnetic Altitude terbukti efektif dalam mendeteksi perubahan tinggi-rendah permukaan air laut. Pengujian menunjukkan bahwa sensor magnetik dapat mengukur variasi ketinggian gelombang laut yang signifikan dalam range yang ditentukan, yang merupakan indikasi utama dari potensi gelombang tsunami. Meskipun sistem menunjukkan akurasi yang memadai dalam kondisi pengujian, faktor lingkungan seperti arus laut, gelombang normal, dan salinitas air laut dapat mempengaruhi kinerja sensor magnetik dan transmisi WSN. Sistem ini memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai komponen kunci dalam sistem peringatan dini tsunami lokal di pesisir pantai Kabupaten Buleleng, mengingat karakteristik geografis wilayah yang rawan bencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, A. A., Buragohain, C., & Ranka, S. (2007). Energy-efficient algorithms for data aggregation in wireless sensor networks: A survey. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 39(3), 9.
- Aida, I. (1978). Reliability of a tsunami warning system in terms of coastal effects. *Journal of Physics of the Earth*, 26(1), 127–146.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramanian, Y., & Cayici, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, 38(4), 393–422.
- Anggraheni, L. I., Mukhtar, R. A., & Yustian, A. (2020). A review of real-time tsunami early warning systems using seismic and GPS data integration. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 584(1), 012022.
- Ariastuti, N. M. W., Heryana, I. G. A., & Budiarsa, I. W. (2021). Analisis kerentanan wilayah pesisir Kabupaten Buleleng terhadap bencana tsunami. *Jurnal Ilmiah Pendidikan dan Pembelajaran*, 5(2), 269–277.
- Bernard, E. N., Gica, E., & Chamberlin, C. D. (2018). The US national tsunami warning system: Science, technology, and policy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 376(2118), 20170417.
- Cirella, A., Piatanesi, A., Cencetti, A., Frasca, S., & Ghergo, S. (2017). GNSS buoy system for tsunami early warning and mitigation. *Sensors*, 17(10), 2216.

- Dargie, P., & De Waal, A. (2017). *Fundamentals of wireless sensor networks: Theory and practice*. John Wiley & Sons.
- Di Capua, G., Del Gaudio, V., & Sacchi, M. (2023). Machine learning for tsunami early warning: A review of recent advances and future perspectives. *Remote Sensing*, 15(4), 1121.
- Disanto, E., Convertito, V., & Zollo, A. (2021). Real-time tsunami warning based on an integrated source duration and magnitude estimator. *Geophysical Journal International*, 226(3), 1957–1968.
- Fraser-Smith, A. C. (1999). Low-frequency magnetic field measurements near the Loma Prieta earthquake epicenter. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24(9), 859–863.
- Freund, F. T., Culotta, M. R., & Teculescu, D. (2006). Flow of positive charges precedes and accompanies earthquakes: Evidence from satellite and ground observations. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 31(7), 517–523.
- González, F. I., Bernard, E. N., Able, M. C., Mofjeld, H. O., Percival, D. B., Spillane, M. W., & Titov, V. V. (2005). The Deep-Ocean Assessment and Reporting of Tsunami (DART) Program. *Pure and Applied Geophysics*, 162(2-3), 517–551.
- Han, H., Liu, W., Xu, Z., & Gao, D. (2020). Design of a multi-parameter monitoring system for earthquake precursors based on wireless sensor networks. *IEEE Access*, 8, 114675–114686.
- Hao, H., Li, M., Wang, J., Yang, T., & Wang, Q. (2020). Research progress on seismo-electromagnetic anomalies in China. *Earthquake Science*, 33(5), 450–467.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4), 660–670.
- Kanamori, H., & Rivera, L. (2017). Rapid determination of tsunami potential based on earthquake parameters. *Pure and Applied Geophysics*, 174(11), 3843–3856.
- Kim, J. M., Oh, H. Y., & Lee, D. H. (2016). Design and implementation of a high-density magnetometer array system for seismic geomagnetic anomaly detection. *Sensors*, 16(11), 1835.
- Lay, T., Kanamori, H., Ammon, C. J., Koper, K. D., Hutko, A. R., Ye, L., & Yue, H. (2012). The 2011 Great Tohoku-Oki earthquake and its aftershocks. *Earthquake Spectra*, 28(S1), S1–S32.
- Li, S., Da, Q., & Zhang, W. (2018). Applications of wireless sensor networks in natural disaster monitoring and early warning: A review. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(1), 1–13.
- Melgar, D., Bock, Y., & Riquelme, S. (2013). Rapid estimation of rupture extent and tsunami potential from high-rate GPS and accelerometer data. *Geophysical Research Letters*, 40(23), 6046–6050.
- Merrill, R. T., McFadden, P. L., & McFadden, P. (1998). *The magnetic field of the earth: Paleomagnetism, the core, and the deep mantle*. Academic Press.
- Munger, S. B., Eblé, M. C., & Chamberlin, C. (2007). Real-time tsunami warning utilizing a Kalman filter approach to tide gauge data analysis. *Science of Tsunami Hazards*, 26(1), 1–18.

- Nagao, T., Hattori, K., Hirata, Y., & Kamogawa, M. (2011). Review of seismo-electromagnetic phenomena. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(16), 1632–1648.
- Omira, R., Babour, M., Gutscher, M. A., & M. S. (2016). Tsunami genesis: An overview of the key controls and challenges in tsunami science. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(11), 2419–2438.
- Pararas-Carayannis, G. (2018). *The tsunami handbook: Historical events, scientific foundations, and mitigation strategies*. Springer International Publishing.
- Prasetya, G. S., Harjono, H., & Supartono. (2021). Tinjauan bahaya tsunami di pantai utara Bali berdasarkan karakteristik sesar naik busur belakang Flores. *Jurnal Sumber Daya Air*, 17(1), 1–12.
- Putra, I. N. S., Wija, I. B. S., & Dantes, K. R. (2019). Simulasi perambatan gelombang tsunami akibat aktivitas sesar naik di utara Bali dan implikasinya terhadap waktu evakuasi. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 10(3), 167–176.
- Rabinovich, A. B., Thomson, R. E., & Fine, I. V. (2013). A review of tsunami detection and early warning capabilities in the North Pacific. *Pure and Applied Geophysics*, 170(12), 2697–2730.
- Santoso, T., & Arjit Hai, I. W. E. (2022). Identifikasi zona bahaya tsunami dan jalur evakuasi di Kecamatan Gerokgak, Kabupaten Buleleng. *Jurnal Ilmu Kebencanaan*, 6(1), 45–56.
- Stacey, F. D., & Johnston, M. J. S. (1994). *Earthquake prediction, seismology, and the Earth's interior*. Blackwell Scientific Publications.
- Synolakis, C. E., Bernard, E. N., Titov, V. V., Kânoğlu, U., & Thio, H. K. (2008). Tsunami forecast and mitigation: The last half-century and the next. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1871), 2139–2156.
- Titov, V. V., González, F. I., & Chamberlin, C. D. (2005). Advanced tsunami forecasting: From DART to numerical modeling. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 86(46), 464.
- Tsioulou, A., Tsompanas, M. A., & Kanistras, I. (2014). Wireless sensor networks for earthquake early warning systems: A review. *Journal of Applied Sciences*, 14(12), 2419–2431.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Harjono, H., & Supartono. (2020). Revisiting historical earthquakes and tsunami hazard in the Northern Bali Region, Indonesia. *Tectonophysics*, 794, 228639.
- Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 52(12), 2292–2330.
- Yue, H., Lay, T., & Kanamori, H. (2014). The role of earthquake size in real-time tsunami warning. *Geophysical Research Letters*, 41(4), 1145–1152.