

Kajian Karakteristik dan *Run-Up* Gelombang Tsunami Berdasarkan Pemodelan Hidrodinamika 2D di Perairan Selatan Bali

Rafa Fahrezi Tagore¹, Muhammad Helmi^{1*}, Alfi Satriadi¹, Hanah Khoirunnisa²,
Aris Ismanto¹

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

²Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Jl. Grafika No.2, Sekip, Yogyakarta, 55284 Indonesia
Email: muhammadhelmi69@gmail.com

Abstrak

Pulau Bali merupakan wilayah yang memiliki potensi bencana alam seperti gempa bumi dan tsunami karena terletak di zona subduksi pertemuan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia dan zona sesar belakang Flores. Kejadian tsunami telah terjadi di wilayah selatan Bali akibat dari bencana gempa Sumbawa (1977) dan gempa Banyuwangi (1994). Kajian terkait karakteristik dan *run-up* gelombang tsunami masih jarang dilakukan. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik dan *run-up* gelombang tsunami menggunakan pemodelan hidrodinamika 2D. Simulasi dilakukan menggunakan skenario gempa terburuk dengan kekuatan magnitudo 9,0 melalui model TUNAMI F1 dan TUNAMI N3. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa gelombang tsunami yang menjalar dari episenter menuju pesisir selatan Bali memiliki karakteristik waktu tempuh berkisar antara 16 menit 5 detik hingga 30 menit 35 detik dengan tinggi gelombang maksimum berkisar antara 11,113 – 34,446 m. Waktu tempuh penjalaran tercepat dengan tinggi gelombang tertinggi terdapat pada titik observasi Uluwatu dan Pandawa karena jarak yang dekat dengan episenter. Limpasan gelombang yang masuk ke daratan pesisir selatan Pulau Bali mampu menjangkau daratan hingga kisaran 257 – 3140 m dengan limpasan terjauh pada titik observasi Kuta karena morfologi pantai berpasir yang landai, sedangkan Uluwatu dan Pandawa menerima limpasan yang paling sedikit karena morfologi pantai yang berbatu dan tebing curam.

Kata kunci : pemodelan, tsunami, TUNAMI, perairan selatan Bali

Abstract

Study of Tsunami Wave Characteristics and Run-Up Based on 2D Hydrodynamic Modeling in the Southern Waters of Bali

Bali Island is an area that has the potential for natural disasters, such as earthquakes and tsunamis, because it is situated in the subduction zone of the Indo-Australian plate convergence with the Eurasian plate and the Flores fault zone. Tsunami events have occurred in the southern region of Bali because of the Sumbawa earthquake (1977) and the Banyuwangi earthquake (1994). Studies related to the characteristics and run-up of tsunami waves are still limited. This study aims to determine the characteristics and run-up of tsunami waves using 2D hydrodynamic modeling. The simulation was performed using a worst-case earthquake scenario with a magnitude of 9.0 as indicated by the TUNAMI F1 and TUNAMI N3 models. The results of this study show that tsunami waves propagating from the epicenter to the south coast of Bali have travel time ranging from 16 minutes 5 seconds to 30 minutes 35 seconds with maximum wave heights ranging from 11,113 – 34,446 m. The fastest travel time with the highest wave height is observed at the Uluwatu and Pandawa observation points because of the close distance to the epicenter. The wave runoff entering the southern coast of Bali could invade the mainland up to a range of 257 – 3140 m with the farthest runoff at the Kuta observation point, characterized by the morphology of declivous sandy beaches, while Uluwatu and Pandawa receive the least runoff due to the morphology of rocky beaches and steep cliffs.

Keywords : modelling, tsunami, TUNAMI, south Bali waters

PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia merupakan negara dengan tingkat kerawanan bencana alam

yang tinggi karena letaknya yang berada diantara tiga lempeng tektonik aktif (*triple junction convergent*) atau *ring of fire*, sehingga rentan

*Corresponding author

DOI:10.14710/buloma.v14i1.62777

<http://ejournal.undip.ac.id/index.php/buloma>

Diterima/Received : 22-03-2024

Disetujui/Accepted : 03-01-2025

terdampak bencana geologi, seperti gempa bumi, gunung meletus, tanah longsor, dan tsunami (Setyadi et al., 2015; Widada et al., 2022; Yuniartanti, 2021). Tiga lempeng tektonik tersebut mengelilingi perairan barat Sumatera, perairan selatan Jawa, sepanjang perairan selatan Nusa Tenggara Barat dan Timur, Papua Utara, Sulawesi/Sulawesi, dan Maluku (Hartoko et al., 2016). Ketika lempeng-lempeng tersebut mengalami pergerakan dan bertabrakan maka akan terjadi berbagai peristiwa alam, seperti terbentuknya gunung api atau palung dan gempa bumi (Wijanarko et al., 2022). Peristiwa gempa bumi merupakan aktivitas seismik yang dapat memberikan dampak kerugian besar pada kawasan pesisir dan wilayah daratan di sekitarnya (Usman et al., 2021). Apabila aktivitas seismik ini terjadi di dasar laut, maka akan menimbulkan bencana lain, seperti gempa bumi dan gelombang tinggi yang disebut tsunami (Isdianto et al., 2021).

Pulau Bali merupakan salah satu dari beberapa wilayah di Indonesia dengan potensi terhadap bencana alam yang tinggi, seperti gempa bumi dan tsunami karena berada di zona seismik yang aktif dan kompleks (Oktaviana et al., 2020). Zona pertama, zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia yang terletak di selatan Pulau Bali. Zona ini sering menimbulkan gempa bumi untuk perairan dengan kedalaman yang dangkal. Selain itu, di bagian utara terdapat zona *arc back thrust* Bali yang merupakan bagian dari perpanjangan sesar naik busur belakang Flores (*Flores arc back thrust*) (Budiman et al., 2023; Purnama et al., 2019). Salah satu sejarah tsunami yang telah melanda wilayah Bali adalah tsunami Bali pada tanggal 19 Agustus 1977 dengan kekuatan M 8,3. Wilayah sekitar pusat gempa, seperti Nusa Tenggara, juga terkena dampak yang besar akibat dari gempa bawah laut tersebut (Kurniawan dan Laili, 2019). Wilayah Bali rentan terdampak bencana tsunami karena memiliki jumlah penduduk yang tinggi dan aktivitasnya yang beragam, mulai dari kegiatan industri, pemukiman, perdagangan, jasa, dan pariwisata (Pramudya et al., 2019).

Bencana tsunami tergolong ke dalam jenis bencana alam yang belum dapat diprediksi secara eksplisit, baik lokasi maupun waktu terjadinya bencana tersebut. Tarigan *et al.* (2015) menyatakan bahwa sebagian besar tsunami disebabkan oleh gempa tektonik yang tidak dapat diprediksi kejadiannya. Selain itu, bencana ini dapat dikatakan tidak dapat dihindari karena masifnya

cakupan area yang terdampak sehingga dapat menimbulkan kerugian bagi masyarakat (Endarwati et al., 2021). Maka dari itu, perlu dilakukan beberapa langkah-langkah persiapan dan pengembangan strategi kesiapsiagaan lokal guna meminimalisir dampak yang diberikan dari bencana tsunami. Salah satu contoh dasar acuan dalam menentukan strategi pengembangan evakuasi adalah dengan menyimulasikan kejadian tsunami melalui pemodelan hidrodinamika 2D untuk mengetahui karakteristik gelombang dan limpasan (*run-up*) tsunami berdasarkan skenario gempa terburuk.

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji karakteristik gelombang dan *run-up* tsunami berdasarkan pemodelan hidrodinamika 2D menggunakan persamaan linier dan non-linier di perairan selatan Bali. Karakteristik gelombang tsunami meliputi tinggi gelombang dan waktu tempuh penjaralan gelombang tsunami. Kedua parameter tersebut dapat dijadikan acuan dalam penentuan lokasi dan waktu evakuasi penduduk sehingga korban dapat diminimalkan (Muchlian et al., 2009). Hasil dari kajian ini dapat digunakan sebagai data informasi bagi pemerintah daerah, peneliti, pemerhati bencana, dan masyarakat terkait karakteristik gelombang dan *run-up* tsunami serta data informasi pendukung dalam perencanaan pembangunan keberlanjutan di wilayah penelitian.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di wilayah daratan dan perairan selatan Bali dengan koordinat batasan wilayah pemodelan pada 7°39'16,783" - 11°24'12,287" LS dan 111°9'21,102" - 116°42'27,029" BT (**Gambar 1**). Lokasi penelitian tersebut meliputi wilayah pesisir barat, selatan, dan timur Kabupaten Badung dan pesisir timur Kota Denpasar, Provinsi Bali. Titik observasi tersebar di wilayah pesisir penelitian sebanyak 42 titik untuk mengetahui tinggi gelombang dan waktu tempuh penjaralan ketika gelombang tsunami mencapai titik tersebut.

Penelitian ini menggunakan beberapa input data pemodelan tsunami, yaitu data batimetri perairan selatan Bali yang diterbitkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan resolusi 6 *arc-second* melalui situs <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/batnas>, data penggunaan lahan yang diperoleh melalui hasil *processing* data citra satelit sentinel-2 oleh Environment Science dan Research Institute (ESRI) dengan resolusi 10 meter melalui situs

<https://livingatlas.arcgis.com/landcover/>, dan data parameter gempa *megathrust* M 9,0 yang diperoleh melalui Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PUSGEN) (2017).

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan yakni metode kuantitatif. Hardani *et al.* (2020) menyatakan bahwa metode kuantitatif menjadi metode yang dapat mengembangkan dan menggunakan model matematis, teori, dan/atau hipotesis sebagai solusi dari permasalahan yang berkaitan dengan fenomena alam. Penelitian ini menggunakan model TUNAMI F1 dan TUNAMI N3 untuk menentukan karakteristik gelombang dan *run-up* tsunami di wilayah selatan Bali. Model ini merupakan pengembangan model numerik oleh Imamura (2006) berbasis teori gelombang perairan dangkal dan dimodifikasi kembali oleh Kongko (2020). Pemodelan ini menggunakan persamaan hukum kekekalan massa yang diaplikasikan pada fluida yang tidak dimampatkan dan persamaan momentum pada arah x dan y (Wibowo *et al.*, 2021). Kedua persamaan tersebut dapat disederhanakan dalam bentuk di bawah ini:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

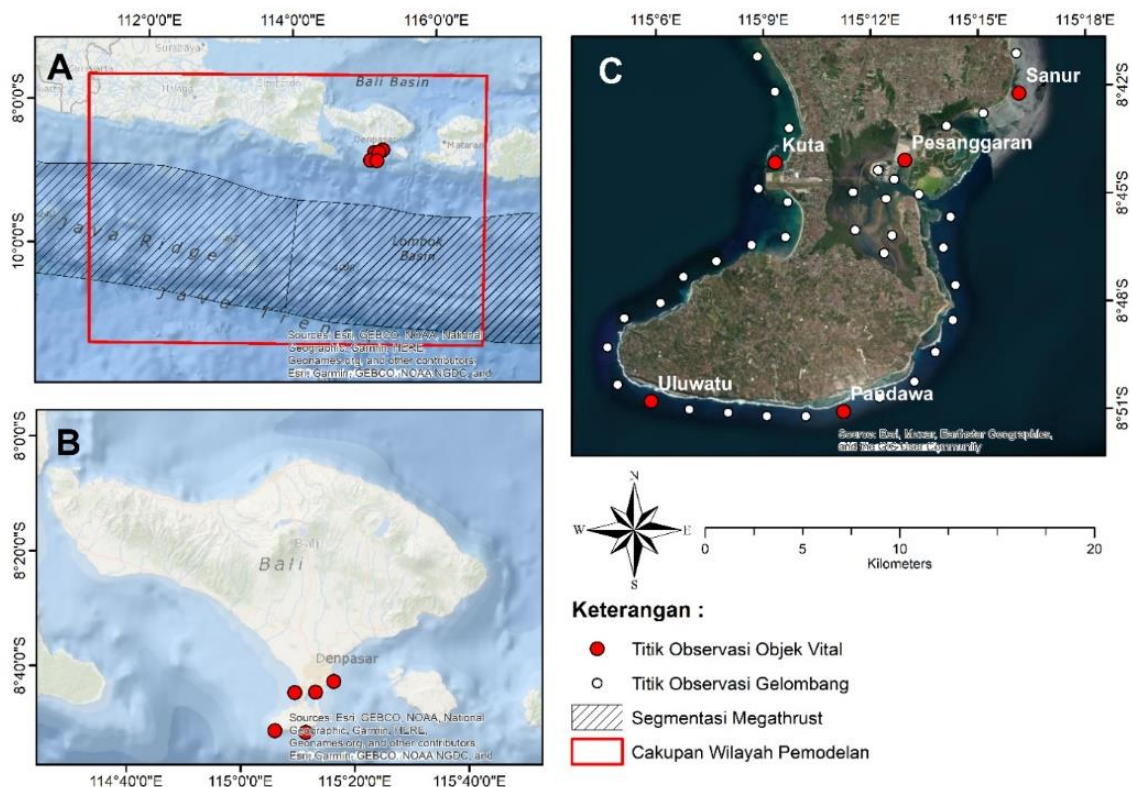
$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = A \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Dimana η adalah elevasi permukaan air, D adalah total kedalaman perairan yang diberikan oleh $h + \eta$, τ_x dan τ_y adalah gesekan dasar perairan parax dan y, A adalah viskositas pusaran horizontal, sedangkan M dan N adalah fluks pelepasan pada arah x dan y.

Pembangkitan Sumber Gempa (Initial Wave Generation)

Penelitian ini menggunakan skenario gempa bumi terburuk dengan kekuatan M 9,0 berdasarkan data parameter gempa yang diperoleh melalui PUSGEN dan perhitungan *Scaling Law* dengan pendekatan *reverse* (Wells dan Coppersmith, 1994). Besar magnitudo tersebut ditentukan berdasar pada asumsi kejadian terburuk dan tidak berdasar pada kejadian historis sehingga data yang dihasilkan perlu divalidasi dan diverifikasi dengan kejadian



Gambar 1. Lokasi penelitian pemodelan tsunami di perairan selatan Bali

historis yang telah terjadi sebelumnya. Tabel 1 menunjukkan hasil dari penentuan skenario tersebut sedangkan Tabel 2 dan Gambar 2 menunjukkan batasan area yang digunakan dalam pemodelan. Skenario dan batasan area pemodelan ini selanjutnya digunakan dalam simulasi pembangkitan kondisi awal gempa (*initial condition*) menggunakan *Multi Deformation Model* untuk mengetahui tinggi gelombang awal ketika terjadinya gempa pada episenter bawah laut.

TUNAMI F1

Simulasi penalaran gelombang menggunakan model TUNAMI F1 dilakukan untuk menentukan karakteristik penalaran gelombang tsunami yang meliputi waktu tempuh penalaran dan tinggi gelombang maksimum. Simulasi ini dijalankan melalui *software Microsoft Developer Studio*. Data yang digunakan pada simulasi ini adalah data batimetri yang telah

terkonversi dengan *spacing grid* satu meter ($1 \text{ m} = 0,016667 \text{ arc degrees}$), data *source*, dan titik observasi dengan sistem koordinat *geographic (longitude/latitude)*. Simulasi tersebut dijalankan menggunakan *time simulation* 7200 detik (2 jam) dengan interval 30 detik.

TUNAMI N3

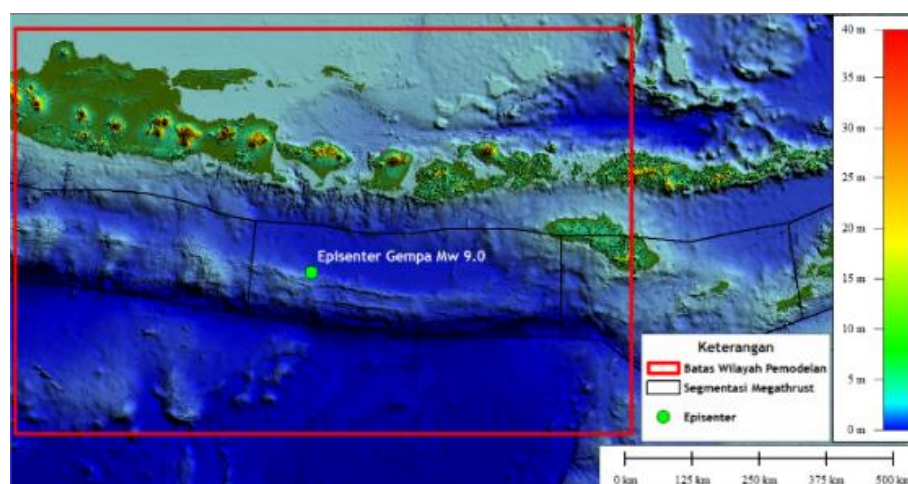
Perbedaan simulasi model TUNAMI F1 dan TUNAMI N3 terletak pada sistem koordinat yang digunakan dan penambahan hasil pengolahan data penggunaan lahan menjadi data kekasaran (*roughness*) pada TUNAMI N3. Sistem koordinat model TUNAMI F1 menggunakan *geographic (longitude/latitude)* sedangkan model TUNAMI N3 menggunakan *Universal Transverse Mercator (UTM)*. Masukan data yang digunakan dalam simulasi model *run-up* tsunami menggunakan lima grid (Tabel 3) dengan konsep *nested grid* (Gambar 3)

Tabel 1. Skenario Gempa M 9,0 (PUSGEN, 2017; Wells dan Coppersmith, 1994)

M	Episenter		Depth (km)	Focal Mechanism			Dimension		D (m)
	Longitude	Latitude		Strike	Dip	Slip	L (km)	W (km)	
9,0	115,03 BT	10,282 LS	18,2	277	12	90	630,39	120,23	45

Tabel 2. Batas Area Pemodelan

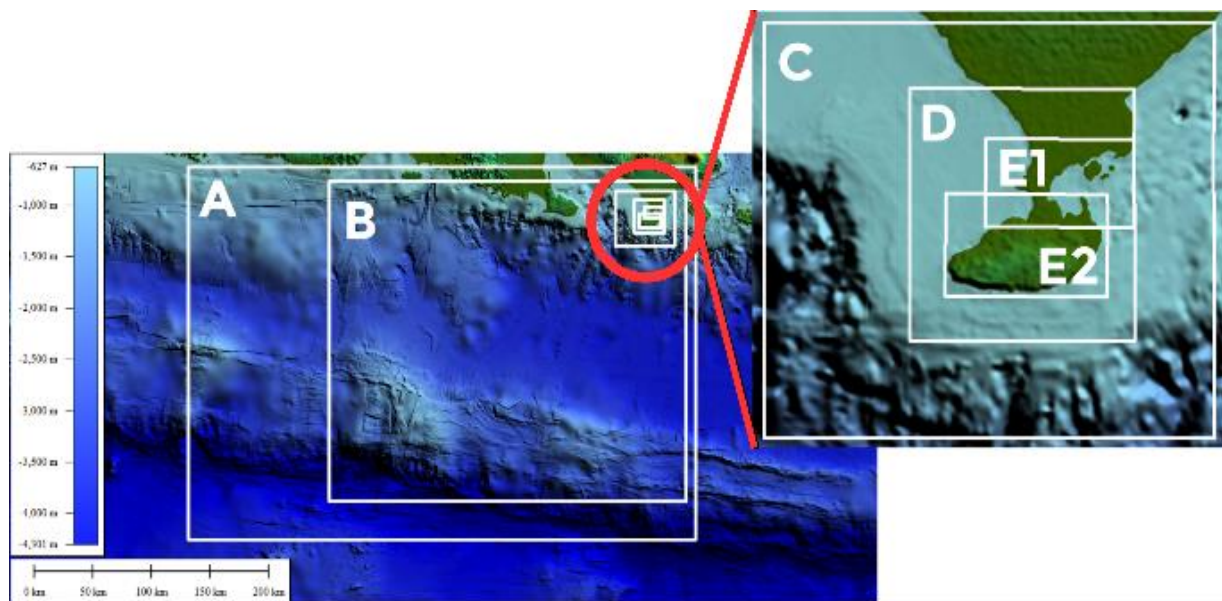
Bujur	Lintang
110.06071496 BT	6.20107695 LS
120.37664016 BT	12.97902326 LS



Gambar 2. Episenter dan Batas Area Pemodelan TUNAMI F1

Tabel 3. Spesifikasi Grid pada Setiap Domain

Nama Grid	Ukuran		Spacing Grid (m)	Jumlah Grid		dt
	Panjang (km)	Lebar (km)		ncols	nrows	
Domain A	427	303	1815	237	170	2
Domain B	300	223	617	490	426	1
Domain C	50	35	205.667	244	217	1
Domain D	28	23	68.556	367	396	0
Domain E1	16,5	9,5	22.852	725	414	0
Domain E2	18	11	22.852	788	481	0

**Gambar 3.** Nested Grid dengan Lima Domain Model TUNAMI N3

Data penggunaan lahan yang diperoleh melalui hasil pengolahan citra sentinel-2 oleh ESRI perlu diberikan nilai *manning number* untuk masing-masing klasifikasi tutupan lahan yang berdasar pada Chow (1959) sehingga data tersebut akan menjadi data kekasaran (*roughness*). Data batimetri, data *initial condition*, dan data kekasaran diekstraksi dalam format ASCII dengan sistem koordinat UTM sesuai dengan ukuran domain *nested grid*.

Simulasi *run-up* tsunami dijalankan menggunakan model TUNAMI N3 melalui *software Microsoft Developer Studio*. Data yang digunakan pada simulasi ini adalah data batimetri, data *source*, data *roughness*, dan titik observasi dengan sistem koordinat UTM. Simulasi ini dijalankan selama 10800 detik (3 jam) dengan interval 30 detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi kondisi awal gempa (*initial condition*) dengan skenario gempa berkekuatan M 9,0 menunjukkan tinggi gelombang tertinggi mencapai 17,82 m dan mengalami surut hingga -9,06 m (Gambar 4). Tinggi rendahnya muka air laut pasca terjadinya gempa bawah laut ditentukan oleh nilai parameter gempa tersebut, seperti besar magnitudo dan kedalaman episenter (Lowrie, 2007). Arah pergerakan gelombang yang menuju ke daratan Indonesia disebabkan karena peristiwa pertumbukan lempeng tersebut terjadi akibat jenis patahan berupa *reverse fault*. Jenis patahan tersebut memiliki potensi yang paling tinggi dalam memindahkan volume air sehingga berpotensi terjadi tsunami di daratan terdekat. Sedangkan besar magnitudo suatu gempa ditentukan berdasarkan besaran dislokasi dan dimensi sesar

yang meliputi panjang sesar dan lebar sesar (Wells dan Coppersmith, 1994). Selain itu, tinggi muka air laut akibat gempa juga diperkuat dengan gerakan patahan lempeng yang menjadi bagian dari parameter pembangkit gempa, seperti *strike*, *dip*, dan *slip* (Wibowo, 2022). Karakteristik zona subduksi dengan kemiringan lempeng curam ke arah darat dan *megathrust* bersudut rendah memberikan dampak signifikan terhadap perubahan tinggi muka air laut (Sugawara, 2021).

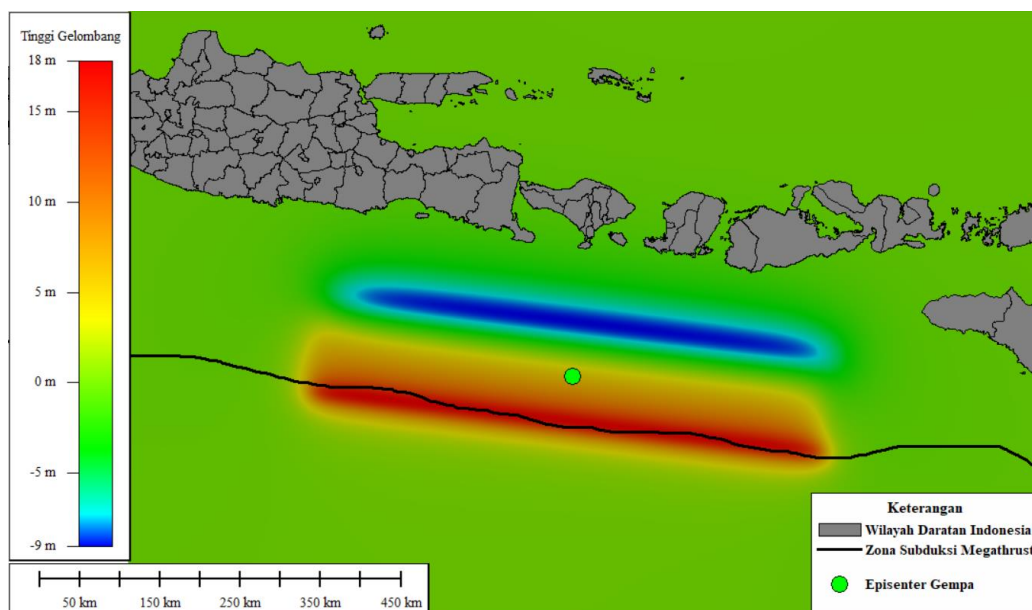
Tinggi Gelombang Maksimum dan Waktu Tempuh Penjalaran Gelombang

Hasil simulasi waktu tempuh dan tinggi gelombang maksimum dengan model TUNAMI F1 untuk menentukan karakteristik penjalaran gelombang tsunami dapat dilihat pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7. Berdasarkan grafik tersebut, titik observasi Uluwatu dan Pandawa menjadi titik yang rentan terdampak tsunami dengan ditandainya kotak berwarna merah. Hal ini dapat terjadi karena titik observasi Uluwatu memiliki tinggi gelombang maksimum tertinggi yang mencapai 34,446 m dengan waktu tempuh penjalaran yang relatif cepat, yaitu 16 menit 5 detik. Tinggi gelombang maksimum di titik observasi Pandawa mencapai 33,679 m dengan waktu tempuh penjalaran 16 menit 48 detik. Sementara itu, tinggi gelombang tsunami di titik observasi Kuta mencapai 28,476 m dengan waktu tempuh selama 30 menit 8 detik. Pada titik

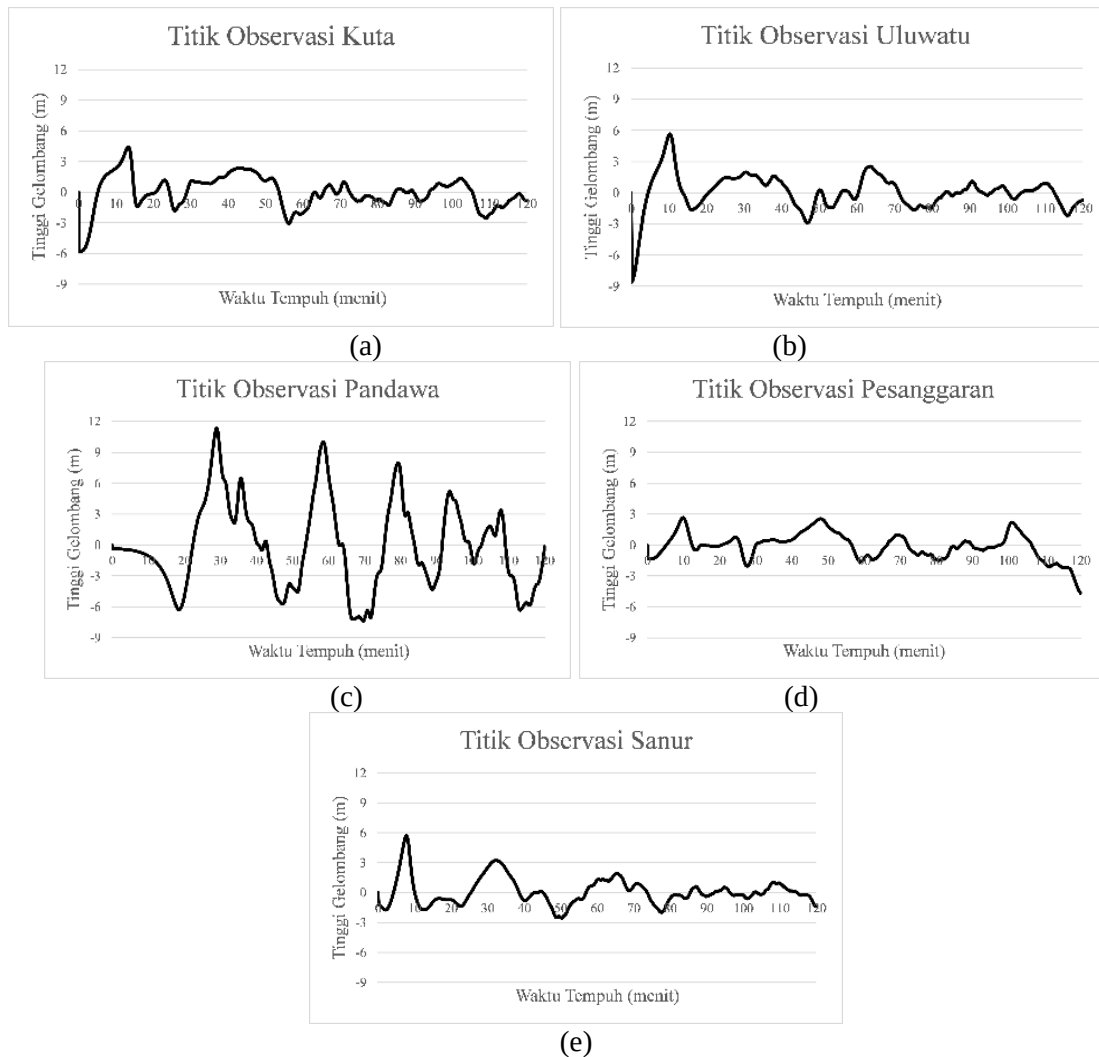
observasi Pesanggaran, gelombang tsunami datang mengalami penurunan dengan tinggi gelombang setinggi 11,113 m dan waktu tempuh penjalaran selama 29 menit 48 detik. Gelombang tsunami di titik observasi Sanur menjalar dari perairan dalam menuju daratan selama 30 menit 35 detik dengan tinggi gelombang mencapai 20,390 m.

Tinggi rendahnya gelombang tsunami yang mencapai daratan dipengaruhi oleh faktor kedalaman dasar perairan. Gelombang tsunami yang menjalar di perairan laut dalam memiliki panjang gelombang melebihi panjang gelombang yang ditimbulkan oleh angin. Pada saat mencapai dasar perairan yang lebih dangkal menuju pantai, panjang gelombang tsunami akan memendek dan tinggi gelombang akan meningkat hingga pada level curam karena terjadi peningkatan energi gelombang ketika gelombang tsunami mencapai dasar laut yang lebih dangkal (Röbke dan Vött, 2017). Sementara itu, cepat lambatnya waktu tempuh penjalaran gelombang untuk mencapai daratan ditentukan oleh jarak antara titik sumber gempa (episenter) dengan daratan tersebut.

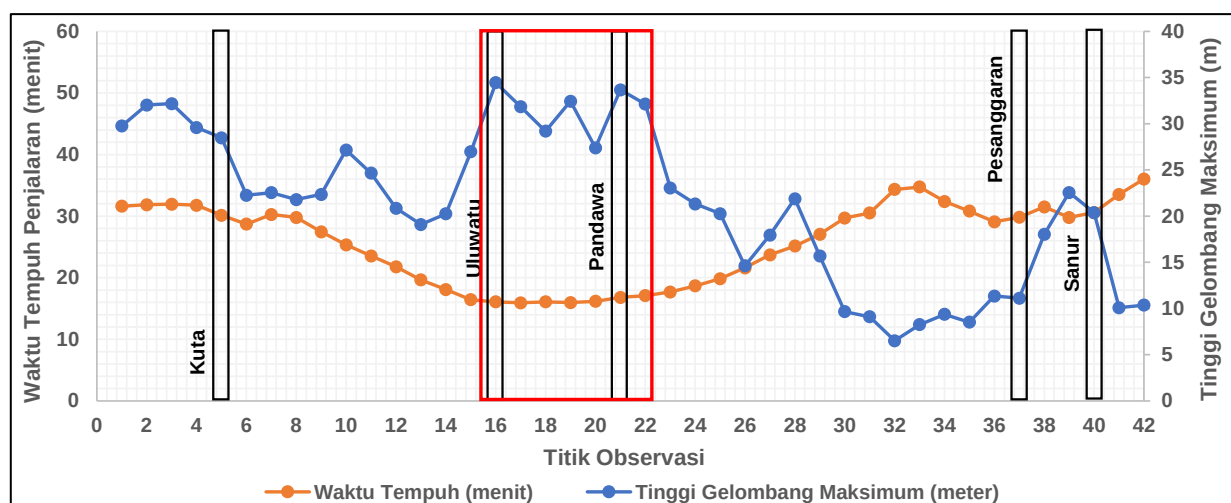
Berdasarkan kondisi geografis, titik observasi Uluwatu dan Pandawa menjadi titik terdekat dengan episenter dibandingkan titik observasi Kuta, Pesanggaran, dan Sanur sehingga waktu tempuh yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai daratan cenderung lebih cepat. Selain itu, kondisi geomorfologi pantai selatan Bali juga memengaruhi durasi waktu tempuh penjalaran



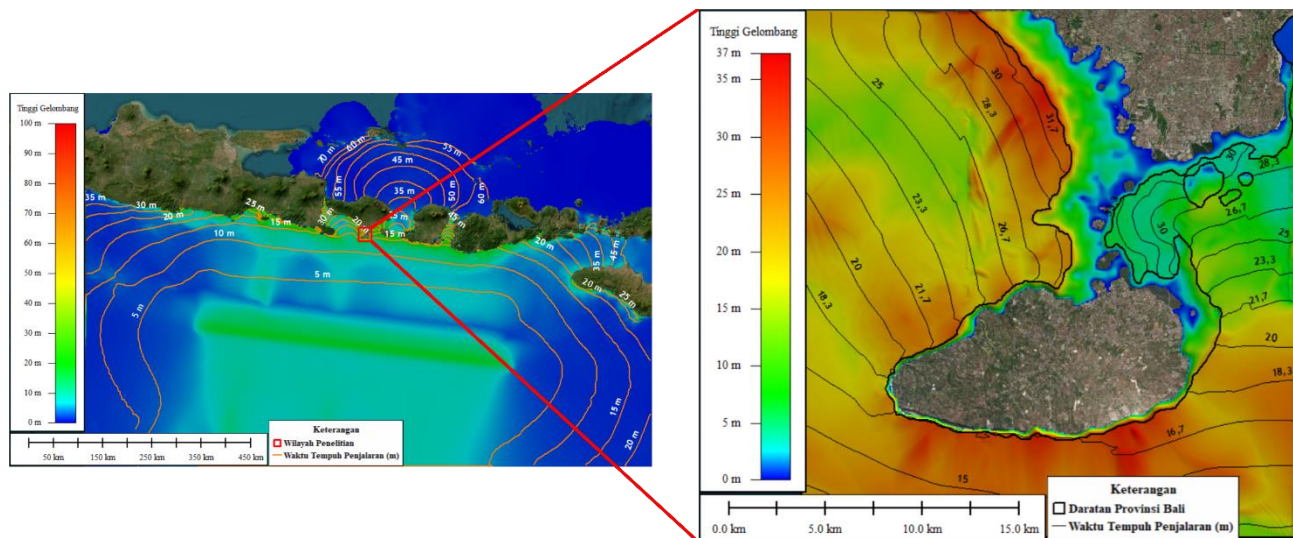
Gambar 4. Kondisi Awal Gempa (*Initial Condition*) Berdasarkan Skenario Gempa M 9.0



Gambar 5. Grafik Tinggi Gelombang dan Waktu Tempuh Gelombang Tsunami pada Skenario Gempa M 9,0 di Titik Observasi (a) Kuta, (b) Uluwatu, (c) Pandawa, (d) Pesanggaran, dan (e) Sanur



Gambar 6. Grafik Perbandingan Tinggi Gelombang Maksimum dengan Waktu Tempuh Penjalaran Gelombang Tsunami Berkekuatan M 9,0



Gambar 7. Waktu Tempuh dan Tinggi Gelombang Maksimum Berdasarkan Skenario Gempa M 9,0

gelombang. Pantai dengan geomorfologi yang lebih cekung membutuhkan waktu yang lebih lama bagi gelombang untuk sampai ke daratan dibandingkan dengan pantai dengan bentuk yang cembung (Syamsidik et al., 2015), seperti halnya pada wilayah Kuta dan Pesanggaran yang memiliki kondisi pantai cekung.

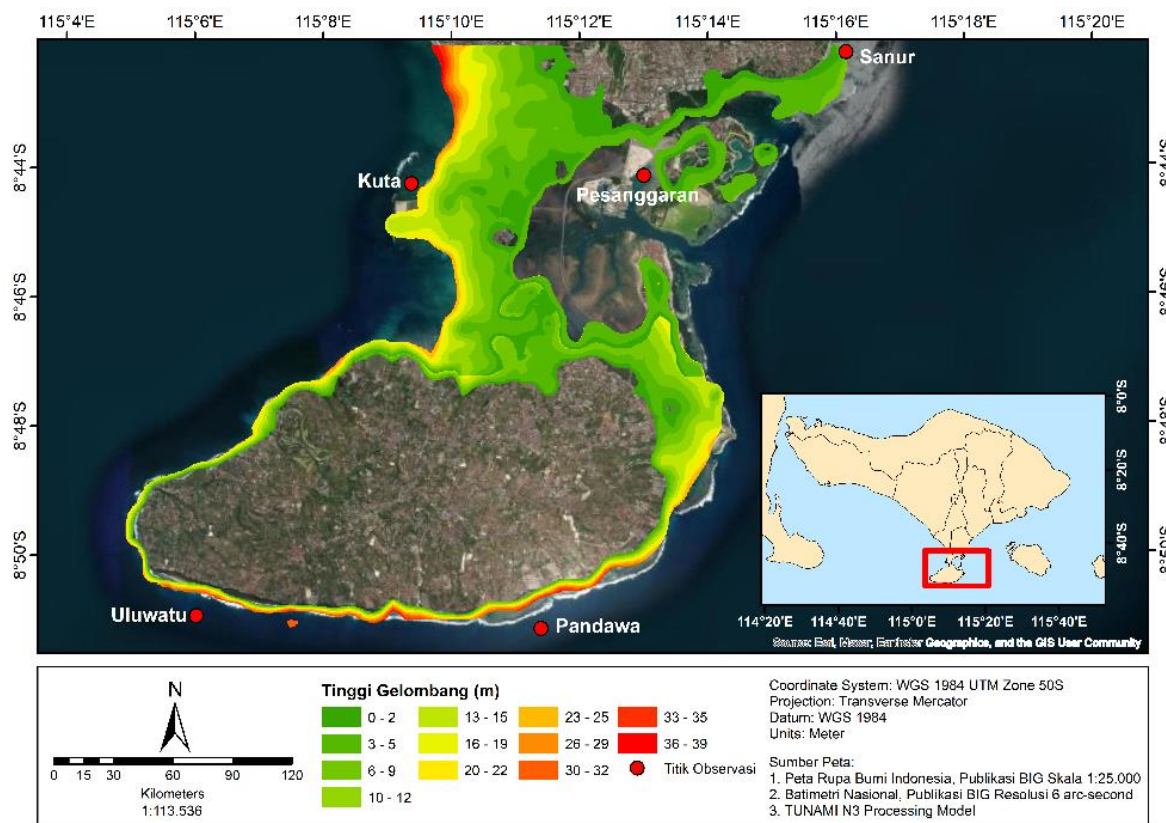
Run-Up Gelombang Tsunami

Hasil simulasi limpasan (*run-up*) gelombang tsunami menggunakan TUNAMI N3 ditunjukkan pada Gambar 8. Limpasan gelombang di titik observasi Kuta dapat menjangkau daratan hingga sejauh 3140 m. Pada titik observasi Uluwatu, limpasan gelombang tsunami yang terjadi dapat menjangkau wilayah daratan sejauh 257 m. Pada titik observasi Pandawa, gelombang tsunami yang datang dapat menjangkau wilayah daratan sejauh 298 m. Pada titik observasi Pesanggaran, gelombang tsunami yang datang dapat memasuki daratan hingga sejauh 588 m. Pada titik observasi Sanur, gelombang tsunami yang datang dari laut dapat menjangkau wilayah daratan hingga jarak 432 m.

Wilayah Kuta menerima limpasan gelombang terjauh karena kondisi morfologi pantai yang cenderung landai sehingga menerima banyak masukan limpasan gelombang (Sfarliana et al., 2021). Kondisi pantai yang landai juga dimiliki oleh pantai di Pesanggaran dan Sanur dengan kemiringan lahan dominan antara 0–5% tetapi pada bagian tepi dapat memiliki kemiringan 15%, sedangkan titik observasi Uluwatu dan Pandawa

memiliki tinggi gelombang tertinggi dan waktu tempuh penjalaran gelombang yang relatif cepat tetapi jarak limpasan gelombang yang menuju daratan tidak sejauh wilayah lainnya. Hal ini dapat terjadi karena kedua titik tersebut memiliki karakteristik garis pantai berbatu dan tebing yang curam sehingga mampu menahan limpasan gelombang yang masuk ke daratan (FOSI, 2012; Hastuti et al., 2022). Sunarya (2012) memperkuat pendapat tersebut yang menyatakan bahwa kawasan perbukitan selatan Kabupaten Badung merupakan perbukitan karst bergelombang dengan kemiringan berkisar antara 8–33%. Kontur alam tersebut mengalami penurunan kemiringan sehingga lebih landai yang mengarah ke utara dengan ketinggian 40–211 m di atas permukaan laut (mdpl).

Jika dilihat dari Gambar 8, walaupun wilayah Kuta, Pesanggaran, dan Sanur memiliki morfologi pantai yang landai, luas wilayah yang tergenang tetap memiliki jarak dan luasan yang berbeda. Hal ini dapat dikaitkan juga dengan kondisi litologi pesisir dan jenis penggunaan lahan yang berbeda. Pada kondisi tertentu, kedua faktor tersebut dapat meredam atau mengurangi luasan wilayah yang tergenang dengan mengurangi laju kecepatan gelombang tsunami yang memberikan dampak kerusakan pada wilayah tersebut (Kaiser et al., 2011). Sebagai contoh, wilayah Pesanggaran dan Sanur menerima limpasan gelombang yang lebih pendek dan sedikit dibandingkan wilayah Kuta karena kedua wilayah tersebut dikelilingi oleh ekosistem mangrove (Sunarya, 2012).



Gambar 8. *Run-Up Gelombang Tsunami*

Menurut Riyandari (2019), ekosistem mangrove dapat menahan terjangan ombak, angin, bahkan gelombang tsunami sehingga dapat memberikan perlindungan terhadap wilayah yang diterjang oleh gelombang tsunami. Sedangkan wilayah Kuta tidak terlindungi oleh ekosistem pelindung seperti mangrove ataupun karang dan memiliki kondisi pantai yang berpasir sehingga wilayah yang tergenang lebih banyak dibandingkan wilayah penelitian lainnya (Yusiana et al., 2023).

Selain dipengaruhi oleh kondisi geomorfologi dan penggunaan lahan, luas wilayah yang tergenang oleh limpasan gelombang tsunami dipengaruhi juga oleh besarnya energi gelombang tsunami, kemiringan lereng, dan topografi wilayah. Besar kecilnya energi gelombang tsunami terbentuk dari panjang pendeknya gelombang akibat terjadinya gempa bawah laut. Semakin panjang dan tinggi suatu gelombang yang menjalar dari episenter menuju daratan, energi gelombang yang terbentuk akan semakin besar. Energi gelombang yang besar akan meningkatkan volume air dan memperluas genangan di daratan (Röbke

dan Vött, 2017). Gelombang tsunami yang besar tidak hanya menyebabkan genangan yang luas di daratan, tetapi juga mampu memakan banyak korban jiwa, merusak pemecah gelombang, dinding penahan gelombang, bangunan pemukiman, dan wilayah pantai (Sugawara, 2021).

KESIMPULAN

Berdasarkan pemodelan hidrodinamika 2D, gelombang tsunami yang menjalar dari episenter gempa menuju pesisir selatan Bali dengan waktu tempuh berkisar antara 16 menit 5 detik hingga 30 menit 35 detik dengan tinggi gelombang maksimum berkisar antara 11,113–34,446 m. Waktu tempuh penalaran tercepat dengan tinggi gelombang tertinggi terdapat pada titik observasi Uluwatu dan Pandawa karena jarak yang dekat dengan episenter. Limpasan gelombang yang masuk ke daratan pesisir selatan Pulau Bali mampu menjangkau daratan hingga kisaran jarak 257–3140 m dengan limpasan terjauh pada titik observasi Kuta karena faktor geomorfologi yang landai sehingga mendapat banyak masukan air laut. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan

analisis dampak gelombang tsunami bagi kehidupan masyarakat pesisir, baik dari aspek infrastruktur maupun aspek ekologis, yang dapat dijadikan acuan penentuan rencana strategis dan mitigasi bencana

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Riset Teknologi Hidrodinamika KKB Mlati BRIN atas fasilitas yang diberikan melalui kegiatan MBKM BRIN periode 2023/2024 dalam pengambilan dan pengolahan data penelitian serta penggunaan model TUNAMI modifikasi terbaru oleh Widjo kongko (2020).

DAFTAR PUSTAKA

- Budiman, T., Gunawan, D., Budiyo, S., & Gultom, R.A.G., 2023. Pemanfaatan Citra Satelit dan SIG Guna Menentukan Jalur Evakuasi Tsunami di Wilayah Pulau Bali Bagian Selatan. *Journal on Education*, 5(3): 9774–9787.
- Chow, V.T. 1959. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- Endarwati, M.C., Widodo, W.H.S., & Imaduddin, A.H., 2021. Identifikasi Zona Kerentanan Penggunaan Lahan Terhadap Bencana Tsunami di Kabupaten Banyuwangi. *Jurnal Manajemen Bencana*, 7(2): 99–108.
- FOSI. 2012. Berita Sedimentologi: Indonesian Journal of Sedimentary Geology. The Indonesian Sedimentologists Forum (FOSI).
- Hardani, Andriani, H., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Istiqomah, R. R., Fardani, R. A., Sukmana, D. J., & Auliya, N. H., 2020. *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif*. CV. Pustaka Ilmu Group.
- Hartoko, A., Helmi, M., & Sukarno, M., 2016. Spatial Tsunami Wave Modelling for the South Java Coastal Area, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 11(25): 2455–2460.
- Hastuti, A.W., Nagai, M., & Suniada, K.I., 2022. Coastal Vulnerability Assessment of Bali Province, Indonesia Using Remote Sensing and GIS Approaches. *Remote Sensing*, 14(17): 4409.
- Isdianto, A., Kurniasari, D., Subagiyo, A., Haykal, M.F., & Supriyadi, S., 2021. Pemetaan Kerentanan Tsunami untuk Mendukung Ketahanan Wilayah Pesisir. *Jurnal Permukiman*, 16(2): p.90.
- Kaiser, G., Scheele, L., Kortenhaus, A., Løvholt, F., Römer, H., & Leschka, S. 2011., The Influence of Land Cover Roughness on the Results of High Resolution Tsunami Inundation Modeling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(9): 2521–2540.
- Kurniawan, T., & Laili, A.F., 2019. Penentuan Area Terdampak Ketinggian Maksimum Tsunami di Pulau Bali Berdasarkan Potensi Gempabumi Pembangkit Tsunami pada Segmen Megathrust Sumba. *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 10(1): 93–104.
- Lowrie, W. 2007. Fundamentals of Geophysics. Cambridge University Press.
- Muchlian, M., Pujiastuti, D., & Khusnul., 2009. Penentuan Tinggi dan Waktu Tempuh Penjalaran Gelombang Tsunami Menggunakan Model Numerik Linier TUNAMI F1 di Pantai Kabupaten Padang Pariaman dan Kota Pariaman Sumatera Barat. *Jurnal Ilmu Fisika*, 1(1): 17–25.
- Oktaviana, Dewi, P.U., Wahdini, M., Prasiamratri, N., Alghifarry, M.B., & Utami, N.A., 2020. Aplikasi SIG Untuk Pemetaan Zona Tingkat Bahaya Dan Keterpaparan Pemukiman Terhadap Tsunami Kota Denpasar. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 1(2): 80–88.
- Pramudya, I., Rauf, A., & Asbar, A., 2019. Analisis Kerentanan Pengelolaan Wilayah Pesisir Ditinjau dari Perspektif Mitigasi Bencana di Kabupaten Badung Provinsi Bali. *Journal of Indonesian Tropical Fisheries*, 2(2): 174–191.
- Purnama, A.A.D.S., Alit Paramarta, I.B., & Rahman, Muh. S.S., 2019. Estimasi Run Up dan Waktu Tiba Tsunami di Daerah Bali Berdasarkan Simulasi TOAST. *Buletin Fisika*, 20(1): 29–35.
- Riyandari, R., 2019. Peran Mangrove dalam Melindungi Daerah Pesisir Terhadap Gelombang Tsunami. *Jurnal Sains dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 12(1): 74–80.
- Röbke, B.R., & Vött, A. 2017. The Tsunami Phenomenon. *Progress in Oceanography*, 159: 296–322.
- Setyadi, R.G., Sugianto, D.N., Diposaptono, S., & Kongko, W., 2015. Potensi Kerawanan Gelombang Tsunami di Pesisir Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Oseanografi*, 4(4): 691–699.
- Sfarliana, F., Zidany, N.A., Prameswara, B., & Pratiwi, W.D., 2021. Pengelolaan Wisata Pantai Berdasarkan Karakteristik dan

- Dampak: Studi Kasus Pantai Ancol dan Pantai Kuta. *Jurnal Sosioteknologi*, 20(3): 383–394.
- Sugawara, D., 2021. Numerical Modeling of Tsunami: Advances and Future Challenges After the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami. *Earth-Science Reviews*, 214: 103498.
- Sunarya, I.N., 2012. Tinggalan Arkeologi di Wilayah Badung Selatan, Wujud Peradaban dalam Pengelokaan Lingkungan. *Forum Arkeologi*, 25(3): 216–236.
- Syamsidik, Rasyif, T.M., & Kato, S., 2015. Development of Accurate Tsunami Estimated Times of Arrival for Tsunami-Prone Cities in Aceh, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14: 403–410.
- Tarigan, T.P., Subardjo, P., & Nugroho, D., 2015. Analisa Spasial Kerawanan Bencana Tsunami di Wilayah Pesisir Kabupaten Kulon Progo Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Oseanografi*, 4(4): 700–705.
- Usman, F., Hariyani, S., & Shoimah, F., 2021. Perencanaan Partisipatif Tanggap Darurat Bencana Tsunami di Pesisir Selatan Watulimo, Trenggalek. *Tataloka*, 23(1): 138–150.
- Wells, D.L., & Coppersmith, K.J., 1994. New Empirical Relationships Among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4): 974–1002.
- Wibowo, M., 2022. Modeling the Potential of Tsunami Hazard in Labuan Bajo Towards a Disaster-Resilient Tourism Area. *Indonesian Journal of Geography*, 54(1): 83–91.
- Wibowo, M., Kongko, W., Hendriyono, W., & Karima, S., 2021. Tsunami Hazard Potential Modeling as Tourism Development Considerations in the North of Lombok Strait. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 832(1): 012047.
- Widada, S., Darda, I.M., & Satriadi, A., 2022. Identifikasi Wilayah Terdampak Tsunami Berdasarkan Peta Ancaman Tsunami di Kabupaten Lumajang, Jawa Timur. *Buletin Oseanografi Marina*, 11(3): 291–305.
- Wijanarko, T., Tondobala, L., & Siregar, F.O.P., 2022. Mitigasi Bencana Tsunami di Wilayah Pesisir Kabupaten Bolaang Mongondow Timur. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 9(1): 117–126.
- Yuniartanti, R.K., 2021. Konsep Penataan Ruang Kawasan Rawan Bencana (KRB) Tsunami di Kabupaten Karangasem, Pulau Bali: Spatial Planning Concept of Tsunami Disaster Prone Area in Karangasem Regency, Bali Island. *Journal of Regional and Rural Development Planning*, 5(1): 1–14.
- Yusiana, L.S., Lanya, I., Mahendra, M.S., & Kumbara, A.A.N.A., 2023. Visual Assessment of Landscapes at the South Kuta Coast, Bali. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 58(3): 660–672.