

KAJIAN BAHAYA TSUNAMI DI WILAYAH PESISIR KOTA DENPASAR MENGGUNAKAN PEMODELAN NUMERIK

Ana Budi Noviyanti^{1,2*)}, Ni Nyoman Pujianiki³⁾, Syamsul Alam Paturosi³⁾

¹⁾ Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Pascasarjana, Universitas Udayana

²⁾ Stasiun Geofisika Denpasar, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

³⁾ Fakultas Teknik, Universitas Udayana

*Email: noviana4179@gmail.com

ABSTRACT

Tsunami Hazard Assessment in the Coastal Area of Denpasar City Using Numerical Modelling

Bali Island has a high vulnerability to earthquakes and tsunamis due to its location between three major tectonic zones: the Flores Back Arc Thrust, the Lombok Strait Strike-Slip Fault, and the Sumba Megathrust. One of the high-risk areas is the southern coast of Bali, including Denpasar City, which has the potential to experience a Megathrust earthquake with a maximum magnitude of Mw 8.5. As the economic and administrative center of Bali, Denpasar City has a high population density and geographical conditions that increase the risk of tsunami impacts. This study aims to provide information on tsunami inundation heights and tsunami arrival times using the Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model version 1.7 (COMCOT v1.7). The research was conducted in three stages: pre-modeling (processing bathymetric, topographic, and earthquake source data), tsunami modeling (using earthquake scenarios of Mw 8.0 and Mw 8.5), and post-modeling (analysis of tsunami arrival time and spatial analysis of flowdepth). The simulation results indicate that the Mw 8.5 scenario generates higher tsunami waves (4.79–7.42 m) and wider inundation coverage (294,100 ha or 23.01% of the Denpasar area) compared to the Mw 8.0 scenario. The earliest tsunami arrival occurs along the eastern coast of Serangan Village, approximately 21 minutes after the earthquake. Coastal areas are predominantly inundated by 3–6 m of water, with limited areas experiencing inundation exceeding 9 m. The Mw 8.5 scenario shows more severe impacts and shorter evacuation times. Therefore, more comprehensive mitigation strategies are required, including the provision of vertical evacuation facilities and the implementation of risk-based spatial planning.

Keywords: Tsunami; flowdepth; Megathrust; COMCOT

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerawanan tinggi terhadap bencana gempabumi dan tsunami. Posisi geografisnya yang berada di antara tiga lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Lempeng Pasifik, menjadikan wilayah ini rentan terhadap aktivitas seismik.

Berdasarkan pemutahiran Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia tahun 2017 (Pusgen, 2017), zona Megathrust pertemuan lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia terbagi kedalam 10 segmen. Pulau Bali masuk dalam zona rawan gempa Megathrust segmen Sumba (Pusgen, 2017). Kondisi ini menjadikan Pulau Bali tidak hanya rawan akan

kejadian gempabumi, tetapi juga potensi bencana tsunami.

Seiring dengan isu Megathrust perlunya penelitian di wilayah pesisir Kota Denpasar. Kota Denpasar, sebagai pusat administratif dan ekonomi di Provinsi Bali, memiliki kepadatan penduduk tertinggi, mencapai 660.980 jiwa dengan tingkat pertumbuhan ekonomi sebesar 5,69% pada tahun 2023 (BPS, 2024). Perekonomian Bali berkembang pesat dalam sektor perdagangan, perhotelan serta pariwisata. Namun kondisi geografisnya yang memiliki topologi laut landai meningkatkan resiko dampak tsunami terutama dikawasan pesisir (BPBD, 2024). Pemodelan berbasis numerik menggunakan perangkat lunak COMCOT v1.7 bertujuan untuk memperkirakan potensi bahaya tsunami, termasuk estimasi tinggi gelombang tsunami, jarak landaan tsunami, ketinggian genangan tsunami, dan waktu tiba gelombang tsunami.

COMCOT v.1.7 sudah banyak digunakan dalam memodelkan penjalaran gelombang tsunami dengan validasi dari hasil model COMCOT dan survey BMKG di wilayah pesisir Prikokal, Lalisaluran, Besusu Barat menunjukkan korelasi tinggi dengan nilai korelasi untuk ketinggian tsunami 0.986 (Hutasoit dkk., 2024). Validasi data hasil pemodelan dan lapangan akibat tsunami Pangandaran menghasilkan kesamaan dalam pola distribusi tinggi tsunami (Uyun dkk., 2024). Hasil model mendekati data lapangan yaitu validasi rasio K 0.9 dan standar deviasi k 0,16 untuk kejadian tsunami Mentawai 25 Oktober 2010 (Ratuluhain, dkk., 2022). COMCOT mampu mensimulasikan penjalaran tsunami dengan tingkat akurasi tinggi tanpa *seawell* (Windujati, 2023).

Peta bahaya tsunami yang saat ini secara luas digunakan untuk wilayah Kota Denpasar merupakan peta bahaya tsunami hasil kerjasama Jerman-Indonesia untuk

Sistem Peringatan Dini Tsunami yang dikeluarkan tahun 2010 (GITEWS, 2010). Zonasi tingkat bahaya tsunami pada peta ini didasarkan pada pendekatan probabilistik sama dengan penelitian sebelumnya. BNPB dan pemerintah Provinsi Bali telah memiliki peta resiko bencana tsunami untuk wilayah Provinsi Bali yang dikeluarkan tahun 2022. Peta tersebut berdasarkan skala indeks resiko yang sudah mempertimbangkan bahaya, kerentanan dan kapasitas. Sedangkan dalam penelitian ini, pemodelan peta bahaya tsunami didasarkan pada pendekatan deterministik yaitu dampak maksimum tsunami terhadap skenario terburuk di wilayah pesisir Kota Denpasar. Zonasi tingkat bahaya tsunami didasarkan pada ketinggian genangan (*flowdepth*) tsunami hasil pemodelan numerik. Dalam konteks mitigasi bencana tsunami, metode ini dapat memberikan gambaran potensi terburuk dampak tsunami.

2. METODOLOGI

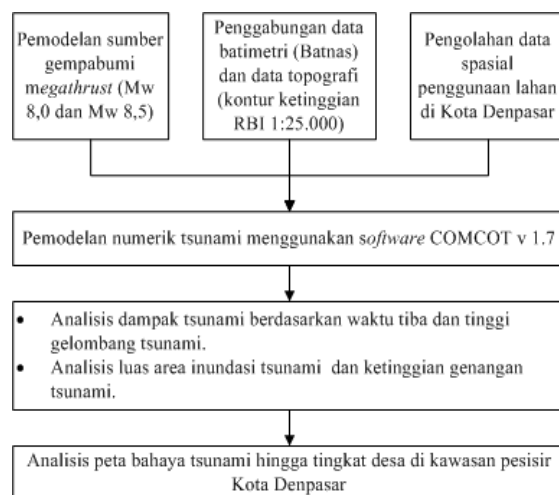
Secara umum penelitian ini dibagi dalam tiga tahapan (Gambar 1), yaitu:

1. Pra-pemodelan, yaitu pengolahan data masukan, seperti data batimetri, data topografi, dan data tutupan lahan agar sesuai dengan format yang diinginkan oleh perangkat lunak COMCOT v1.7. Selain itu juga dilakukan penyusunan model sumber gempabumi dan penentuan titik *tide gauge* virtual (Gambar 5).
2. Pemodelan tsunami, yaitu melakukan pemodelan numerik tsunami menggunakan perangkat lunak COMCOT v 1.7 berdasarkan skenario gempabumi yang telah ditentukan. Keluaran dari proses ini berupa data spasial rendaman dan waktu tiba gelombang tsunami dalam format ASCII. Selain itu, dihasilkan juga data rekaman tinggi gelombang tsunami

terhadap waktu pada *tide gauge* virtual.

3. Pasca pemodelan, yaitu proses penyajian data hasil pemodelan tsunami dalam bentuk informasi

geografis dan analisis terkait tingkat bahaya dan luas area rawan bencana menggunakan perangkat lunak QGIS 3.16.9.



Gambar 1.

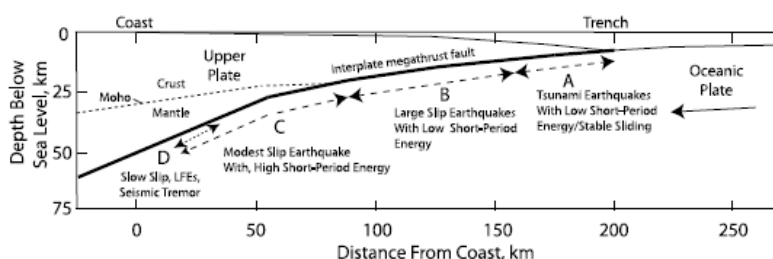
Diagram Alir Penelitian

2.1. Model Sumber Gempabumi

Megathrust dapat didefinisikan sebagai bidang kontak kedalaman dangkal (kurang dari 50 km) antara pertemuan dua lempeng pada zona subduksi yang menghasilkan patahan naik pada skala besar (Kanamori, 1986; Bileks, 2018). Berdasarkan perbedaan model slip, bidang kontak tersebut dapat diklasifikasikan menjadi tiga domain seperti tampak pada Gambar 2 (Kanamori, 1986; Lay dkk., 2012).

Domain A merupakan daerah terdangkal pada zona *Megathrust* yang membentang dari palung hingga

kedalaman 15 km di bawah permukaan laut. Daerah ini dapat mengalami deformasi *aseismic* atau juga deformasi *coseismic* yang dicirikan dengan slip lambat (*slow rupture*) yang sering dikenal dengan istilah *tsunami earthquake*. Meskipun getaran gempa yang dirasakan tidak begitu kuat, umumnya kurang dari Mw 8,0, *tsunami earthquake* dapat membangkitkan kejadian tsunami yang cukup besar. Contoh gempabumi jenis ini adalah gempa Banyuwangi 1994 (Mw 7.7), gempa Pangandaran 2006 (Mw 7.8), dan gempa Mentawai 2010 (Mw 7.8) (Lay dkk., 2012).



Gambar 2.

Domain Megathrust pada bidang kontak lempeng zona subduksi (Lay dkk., 2012)

Gempa besar pada domain B, kedalaman 15 km hingga 35 km di bawah permukaan air laut, menghasilkan slip yang besar dan memancarkan energi pada periode pendek yang lebih kecil dibanding gempa pada domain C (kedalaman 35 – 55 km). Namun gempa besar yang terjadi pada domain C umumnya menghasilkan slip sedang. Sedangkan domain D hanya ditemukan pada zona subduksi muda dengan sudut penunjaman yang landai. Karakteristik dari gempa pada domain D yaitu slip lambat dan memancarkan energi pada periode panjang (Lay dkk., 2012).

Dalam penelitian ini akan dilakukan pemodelan tsunami berdasarkan dua model sumber gempabumi. Skenario pertama, identik dengan domain A, menggunakan magnitudo M_w 8,0 dengan kedalaman hiposenter sebesar 15 km. Sedangkan skenario kedua, identik dengan domain B, menggunakan potensi magnitudo maksimum Megathrust segmen Sumba M_w 8,5 dengan kedalaman hiposenter sebesar 30 km (Pusgen, 2017).

Kekuatan gempabumi secara fisis dapat dinyatakan dalam bentuk momen seismik (M_o) (Hanks dan Kanamori, 1979). Hubungan antara magnitudo momen (M_w) dan momen seismik (M_o) dapat dilihat (Persamaan 1). Momen seismik menggambarkan kekuatan gempa dengan mempertimbangkan luas area patahan, pergeseran pada patahan, dan kekuatan batuan (Persamaan 2) seperti berikut:

$$M_w = 2/3 \log_{10} M_o - 6,07 \quad (1)$$

$$M_o = \mu \bar{D} A \quad (2)$$

Keterangan:

M_o = Momen Seismik (Nm)

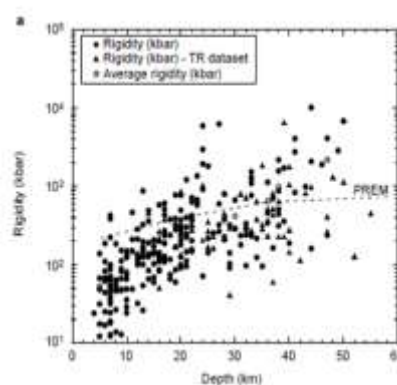
μ = rigiditas (Nm^{-2})

$\bar{D}$ = slip rata-rata (m)

A = rupture area (m^2)

Rigiditas merupakan salah satu sifat material yang menggambarkan kekakuan atau ketahanan batuan terhadap deformasi

geser yang mempengaruhi kecepatan gelombang seismik dan cepat rambat patahan gempabumi. Studi tentang estimasi rigiditas batuan berdasarkan kejadian gempabumi pada zona subduksi menunjukkan bahwa nilai rigiditas cenderung meningkat seiring dengan kedalaman (Lay dkk., 2012). Gambar 3 menunjukkan hubungan antara rigiditas (kbar) terhadap kedalaman (km). Pada penelitian ini nilai rigiditas pada kedalaman 15 km diasumsikan sebesar 150 kbar atau setara 15 Gpa, dan 300 kbar atau 30 Gpa untuk kedalaman 30 km.



Gambar 3.

Grafik estimasi rigiditas terhadap kedalaman pada 291 kejadian gempabumi di zona Megathrust (Bileks dkk., 1999)

Selain rigiditas, luas bidang patah juga menjadi salah satu penentu besaran energi gempa yang dilepaskan. Luas bidang patahan bisa diestimasi dengan metode inversi gelombang seismik. Dalam penelitian ini, dimensi panjang dan lebar patahan didapatkan dari persamaan matematis (*scaling-law*) yang diturunkan dari 283 dataset gempabumi untuk semua mekanisme sumber gempa (*reverse*, *normal*, *strike-slip*) pada zona subduksi (Blaser dkk, 2010). Persamaan 3 dan 4 menunjukkan *scaling-law* untuk gempa dengan mekanisme patahan naik (*reverse*) seperti berikut,

$$\log_{10} L = -2,37 + 0,57 \times M_w \quad (3)$$

$$\log_{10} W = -1,86 + 0,46 \times Mw \quad (4)$$

Keterangan:

L = panjang bidang patahan (km)

W = lebar bidang patahan (km)

Mw = magnitude momen

Slip rata-rata (D) merupakan nilai perpindahan relatif antara dua blok batuan di sepanjang bidang patahan saat terjadi gempa bumi. Dalam penelitian ini nilai slip rata-rata didapatkan dari Persamaan 2. Tabel 1 menunjukkan parameter sumber gempa bumi dari dua skenario gempa bumi Mw 8,0 dan Mw 8,5. Parameter-parameter tersebut merupakan parameter inputan pada pemodelan tsunami menggunakan COMCOT v 1.7. Model patahan pada skenario gempa bumi terbagi menjadi beberapa sub-fault (Gambar 4). Hal ini bertujuan agar model sumber gempa bumi dapat mengikuti orientasi bentuk patahan pada zona subduksi selatan Bali. Model orientasi patahan ditunjukkan oleh parameter *strike*, *dip*, dan *slip* didapatkan dari data *slab* model dari USGS (Hayes dkk., 2018).

2.2. Batimetri, Topografi, dan Tutupan Lahan

Data batimetri menggunakan sumber dari Batimetri Nasional (BATNAS). Data BATNAS merupakan data dengan resolusi paling tinggi saat ini untuk wilayah Indonesia yaitu 6 arc-second atau sekitar 180 meter. Pemilihan data batimetri cukup penting mengingat penjalaran gelombang tsunami sangat dipengaruhi oleh data batimetri. Sedangkan untuk data topografi

menggunakan data kontur ketinggian Peta Rupa Bumi (RBI) skala 1:25.000. Data kontur RBI skala 1:25.000 memiliki interval ketinggian 6,25 meter untuk wilayah Bali.

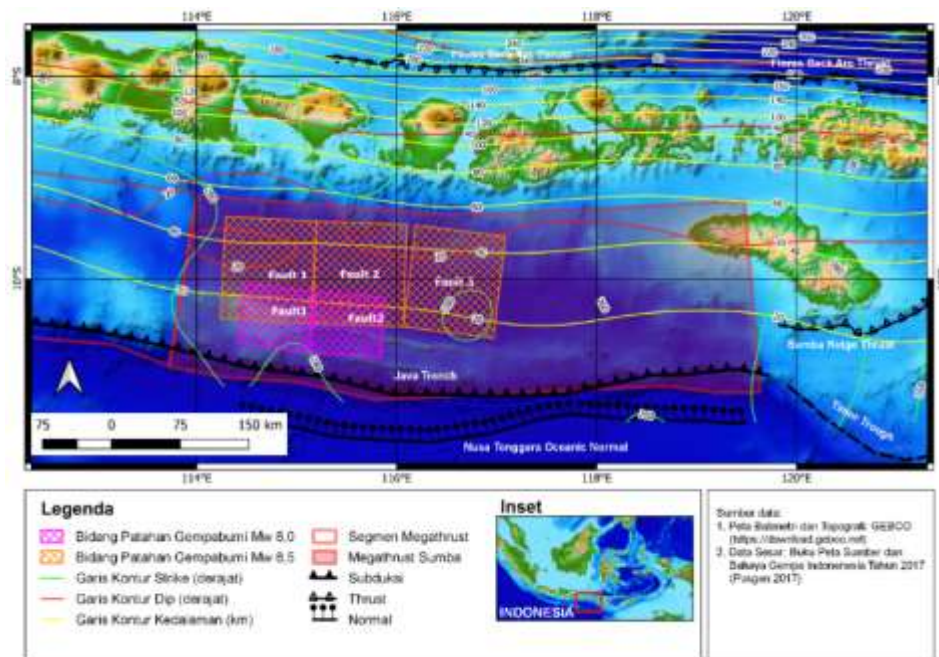
Meskipun secara spasial resolusi data kontur RBI skala 1:25.000 berada di bawah data Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dengan resolusi 0,27 *arc-second* atau setara ~ 8 meter. Data RBI skala 1:25.000 dipilih karena data DEMNAS dihasilkan dari data berbasis satelit (IFSAR, TERRASAR-X, dan ALOS PALSAR) yang lebih menyerupai data DSM (Digital Surface Model) yang dapat terkandung data ketinggian bangunan dan vegetasi tinggi Sulistiana, dkk., 2019). Kedua data tersebut, BATNAS dan RBI skala 1:25.000 dikeluarkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) (Gambar 5).

Selain itu, dalam penelitian ini digunakan data tutupan lahan dari Kementerian Kehutanan dan Lingkungan Hidup (KLHK) dalam statistik KLHK 2019. Berdasarkan data KLHK 2019 sebagian besar tutupan lahan Kota Denpasar merupakan daerah pemukiman, sisanya berupa sawah dan lahan terbuka (Gambar 5). Jenis tutupan lahan menentukan tingkat kekasaran permukaan (koefisien *mannings*) yang berkaitan dengan gaya gesek dasar permukaan (*bottom friction*) seperti tampak pada Tabel 2. Nilai kekasaran *mannings* menjadi salah satu parameter penting pada penjalaran gelombang tsunami menggunakan Persamaan Air Dangkal (*Shallow Water Equation*) non-linear.

Tabel 1. Parameter sumber gempabumi megathrust Mw8,0 dan Mw8,5

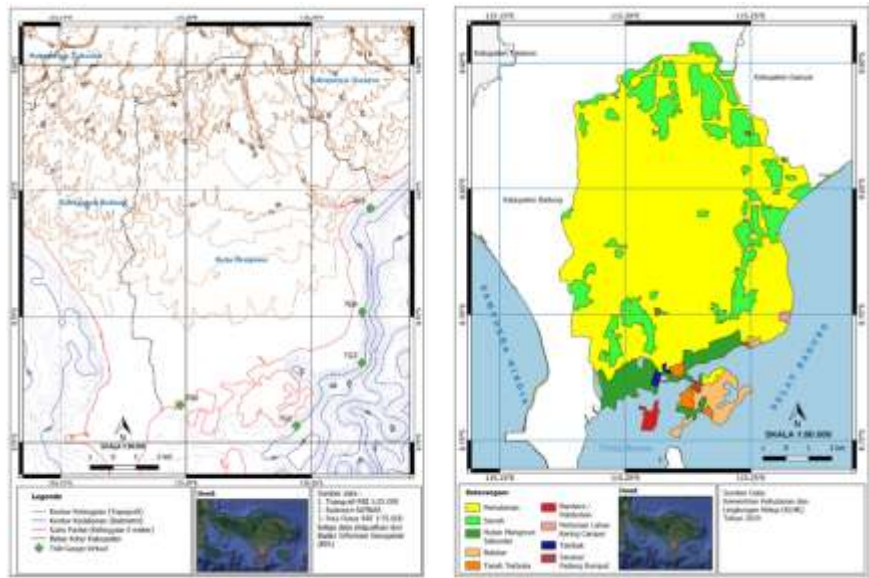
Sumba Megathrust Mw 8,0										
Subfault	Epicenter (deg)		Depth (km)	Focal Mechanism			Dimension		Disloc. (m)	Rigidity (GPa)
	Lon	Lat		Strike	Dip	Rake	L (km)	W (km)		
Fault 1	114.7887	-10.373	15	277	9.6	90	77.5	66.0	8.2	15
Fault 2	115.4997	-10.4407	15	274	8.9	90	77.5	66.0	8.2	15

Sumba Megathrust Mw 8,5										
Subfault	Epicenter (deg)		Depth (km)	Focal Mechanism			Dimension		Disloc. (m)	Rigidity (GPa)
	Lon	Lat		Strike	Dip	Rake	L (km)	W (km)		
Fault 1	114.7125	-9.8991	30	273	19.4	90	99.5	112	7.1	30
Fault 2	115.6182	-9.9413	30	272	17.4	90	99.5	112	7.1	30
Fault 3	116.5747	-10.026	30	278	15.9	90	99.5	112	7.1	30



Gambar 4.

Peta model bidang patahan gempabumi Mw 8,0 dan Mw 8,5, dan model *slab* USGS zona subduksi Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia.



Gambar 5.

(Kiri) Peta topografi dan batimetri wilayah Bali dari Badan Informasi Geospasial (BIG, 2019) <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh> dan lokasi sebaran *tide gauge* virtual di sepanjang pesisir Kota Denpasar. (Kanan) peta tutupan lahan tahun 2019 dari Kementerian Lingkungan Hidup dan kehutanan (KLHK).

Tabel 2. Nilai koefisien kekasaran Manning berdasarkan jenis tutupan lahan (Wang dkk., 2009)

No	Jenis Tutupan Lahan	Manning (n)
1	Laut, Sungai	0.013
2	Lahan beraspal (kawasan industri, kota/kawasan perkotaan, jalan)	0.015
3	Lahan pertanian (lahan tandus, lahan terbuka)	0.016 – 0.022
4	Lahan hutan (kebun, semak, hutan kerapatan rendah)	0.025-0.027
5	Kawasan perumahan kerapatan rendah (kerapatan bangunan < 30%)	0.028
6	Kawasan perumahan kerapatan sedang (kerapatan dari 30%-50%)	0.03
7	Kawasan perumahan kerapatan tinggi (kerapatan > 50%)	0.032
8	Bangunan	0.2

2.3. Pemodelan Tsunami

Persamaan air dangkal atau dikenal dengan *Shallow Water Equation* (SWE) merupakan persamaan matematis yang sering digunakan untuk menggambarkan pergerakan fluida yang tidak termampatkan (*incompressible fluid*) dan mengabaikan variasi densitas terhadap kedalaman. SWE diturunkan dengan asumsi bahwa skala horizontal jauh lebih

besar dibandingkan dengan skala vertikal. Asumsi ini sesuai dengan karakteristik gelombang tsunami dimana panjang gelombang tsunami dapat mencapai hingga ratusan kilometer, sementara kedalaman lautan umumnya hanya beberapa kilometer saja.

Secara umum persamaan linear SWE 2D dengan memperhitungkan kemiringan lantai samudera (batimetri) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan

kekalkan masa (Persamaan 5) dan persamaan kekalkan momentum pada arah sumbu-x (Persamaan 6) dan arah sumbu-y (Persamaan 7) sebagai berikut,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial b}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -gh \frac{\partial b}{\partial y}, \quad (7)$$

Keterangan:

h = kedalaman air,

u = kecepatan fluida ke arah sumbu-x,

v = kecepatan fluida ke arah sumbu-y

g = percepatan gravitasi

b = batimetri

Sesuai karakteristik gelombang tsunami, panjang gelombang menjadi lebih pendek dan amplitudo semakin besar ketika sampai pada perairan dangkal di wilayah pesisir. Sehingga persamaan SWE linear secara perlahan menjadi kurang sesuai dan efek non-linear seperti gaya gesek dasar permukaan (*bottom friction*) menjadi sangat penting untuk diperhitungkan (Wang dan Power, 2011). Dengan memperhitungkan gaya gesek dasar permukaan, F_x dan F_y , Persamaan 8 dan Persamaan 9 dapat dimodifikasi menjadi persamaan berikut,

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial b}{\partial x} - F_x, \quad (8)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = -gh \frac{\partial b}{\partial y} - F_y, \quad (9)$$

COMCOT merupakan salah satu perangkat lunak yang menawarkan solusi numerik untuk persamaan air dangkal. COMCOT telah dikembangkan dan divalidasi di Cornell University sejak awal 1990-an. Versi terbarunya v1.7 dikembangkan oleh Dr. Xiaoming Wang di GNS Science, Selandia Baru, berdasarkan penelitian sebelumnya di Cornell University dan kontribusi dari peneliti lain (Wang dan Power, 2011). Untuk mendapatkan hasil resolusi tinggi tanpa harus membebani biaya komputasi, COMCOT menerapkan metode grid-bersarang (*nested-grid*), sehingga dapat menghasilkan pemodelan tsunami dengan resolusi tinggi hanya pada daerah target. Pada penelitian ini digunakan lima tingkatan grid bersarang (lima layer) dengan parameter yang diterapkan pada tiap layer seperti tampak pada Tabel 3.

2.4. Analisis Bahaya Tsunami

Skenario terburuk dari hasil dua pemodelan tsunami, skenario gempabumi Mw 8,0 dan Mw 8,5, ditentukan dengan membandingkan beberapa parameter antara lain:

1. Tinggi gelombang tsunami pada rekaman *tide gauge* virtual yang diatur di sepanjang pesisir Kota Denpasar (Gambar 5).
2. Luas daerah rawan tsunami berdasarkan tingkat bahaya tsunami sesuai klasifikasi seperti pada Tabel 4.
3. Waktu tiba gelombang tsunami di wilayah pesisir dari dua skenario gempabumi pemicu tsunami Mw 8,0 dan Mw 8,5.

Tabel 3. Tabel Parameter Pemodelan Tsunami Menggunakan COMCOT v1.7

Keterangan	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Batas lintang (derajat)	6,2 LS - 11,8 LS	8,0 LS - 9,4 LS	8,2 LS - 9,2 LS	8,4 LS - 9,0 LS	8,606 LS - 8,764 LS
Batas bujur (derajat)	111,2 BT - 118,8 BT	114,5 BT - 115,9 BT	114,7 BT - 115,7 BT	114,9 BT - 115,5 BT	115,170 BT - 115,284 BT
Jumlah grid	457 x 341	249 x 249	537 x 543	969 x 981	696 x 1.032
Ukuran grid (detik busur)	60	20	6,67	2,22	0,56
Ukuran grid (meter)	1.834	611	204	68	17
Time step (detik)	4,75	1,58	0,53	0,26	0,26
Sistem koordinat	<i>spherical</i>	<i>spherical</i>	<i>spherical</i>	<i>spherical</i>	<i>spherical</i>
Tipe SWE	linear	linear	linear	linear	non-linear
Kekasaran permukaan	0,013	0,013	0,013	0,013	Koef. Manning

Tabel 4. Klasifikasi tingkat bahaya tsunami berdasarkan ketinggian genangan tsunami (Martinez dkk, 2017)

Jangkauan	Keterangan	Tingkat Bahaya
0-0,5	Setinggi lutut atau lebih rendah	Rendah
0,5-2	Setinggi lutut hingga setinggi kepala	Sedang
>2	Lebih dari tinggi kepala	Tinggi

Skenario dengan dampak tsunami terburuk digunakan acuan dalam analisis bahaya tsunami hingga tingkat desa di pesisir Kota Denpasar. Peta bahaya tsunami disajikan dengan klasifikasi seperti pada Tabel 5, berdasarkan pertimbangan strategi evakuasi vertikal

pada bangunan gedung bertingkat. Klasifikasi ketinggian genangan tsunami mempertimbangkan acuan jarak dari lantai ke plafon pada bangunan gedung yang ideal antara 2,6-2,8 m (PP No. 16 Tahun 2021).

Tabel 5. Klasifikasi ketinggian genangan tsunami

No	Warna	Ketinggian Genangan(m)	Strategi Evakuasi
1	Hijau	< 0,5	Evakuasi horizontal keluar dari zona bahaya
2	Kuning	0,5 – 3	Evakuasi ke bangunan dua lantai atau lebih terdekat
3	Oranye	3-6	Evakuasi ke bangunan tiga lantai atau lebih terdekat
4	Oranye Tua	6-9	Evakuasi ke bangunan empat lantai atau lebih terdekat
5	Merah	> 9	Keluar dari zona bahaya

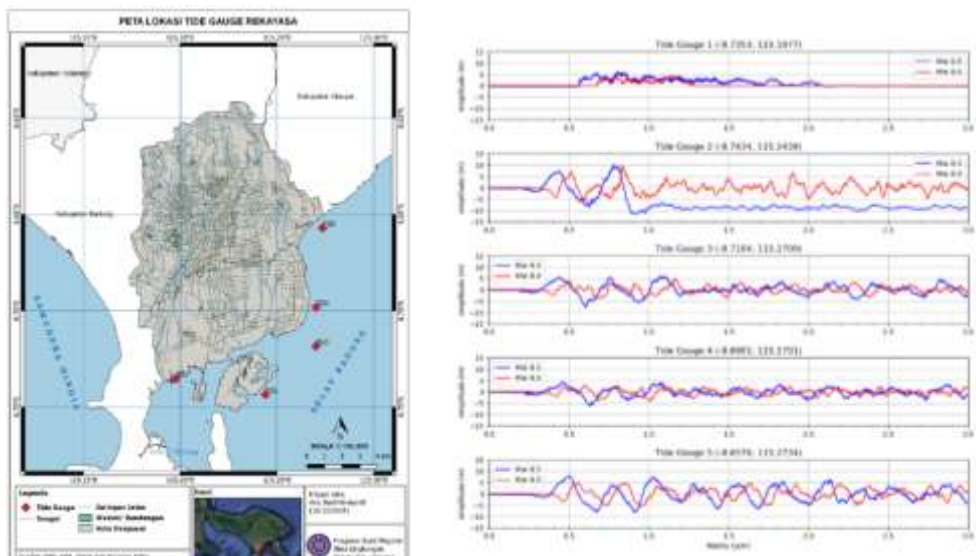
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisis Rekaman Tide Gauge Virtual

Berdasarkan hasil pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak COMCOT versi 1.7 menunjukkan adanya variasi

ketinggian gelombang tsunami pada rekaman *tide gauge* virtual yang terpasang disepanjang pesisir Kota Denpasar (Gambar 5). Variasi ketinggian gelombang tsunami terjadi baik pada skenario gempabumi Mw 8,0 maupun skenario gempabumi Mw 8,5. Skenario dengan magnitudo Mw 8,5 menghasilkan

ketinggian gelombang yang lebih besar dibandingkan dengan Mw 8,0 di setiap titik pengamatan (Tabel 6 dan Gambar 6).



Gambar 6.
Lokasi Sebaran Tide Gauge dan Grafik Rekaman Tide Gauge Virtual

Tabel 6. Rekaman Tide Gauge Virtual

No	Kode	Lokasi		Ketinggian Gelombang Tsunami (m)	
		Lintang	Bujur	Mw 8,5	Mw 8,0
1	TG1	-8,7353	115,1977	6,09	4,37
2	TG2	-8,7435	115,2440	6,29	5,20
3	TG3	-8,7184	115,2700	4,98	2,71
4	TG4	-8,6982	115,2702	4,79	2,52
5	TG5	-8,6571	115,2735	7,42	5,55

Hasil pemodelan dari dua skenario gempabumi menunjukkan hasil yang sama dimana gelombang tsunami terendah terekam pada *tide gauge* TG4 dan tertinggi terekam pada *tide gauge* TG5. Tinggi gelombang tsunami berdasarkan skenario gempabumi magnitudo Mw 8,0 berkisar antara 2,52 - 5,55 meter. Sedangkan skenario gempabumi magnitudo Mw 8,5 menghasilkan gelombang tsunami yang lebih tinggi yaitu berkisar antara 4,79 – 7,42 meter. Skenario Mw 8,5 lebih berdampak karena berdasarkan posisi sumber gempanya yang berada di kedalaman dangkal dan magnitudonya yang lebih besar. Topografi pesisir yang landai dengan kekuatan

magnitudo yang besar saat sampai di daratan amplitudo akan tinggi dan inundasinya akan lebih luas. Hasil penelitian ini ditentukan dari inputan sumber gempa, data batimetri dan topografi yang sudah ada.

3.2. Analisis Tingkat Bahaya Tsunami

Hasil dari pemodelan numerik menunjukkan luas genangan tsunami berdasarkan skenario gempabumi Mw 8,0 sebesar 231.800 ha atau 18,14% dari luas Kota Denpasar. Sedangkan skenario gempabumi Mw 8,5 menghasilkan dampak tsunami yang lebih luas yaitu sebesar 294.100 ha atau sebesar 23,01% dari luas

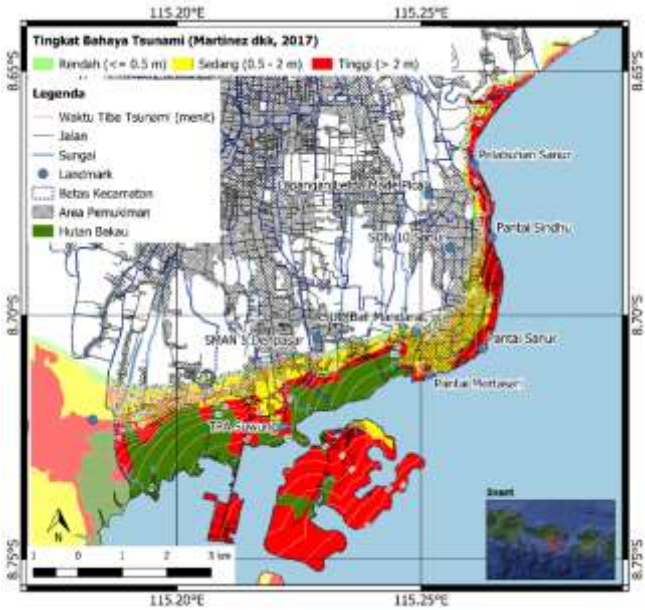
Kota Denpasar (Tabel 7). Luas Kota Denpasar yaitu sebesar 1.277.800 ha, mengacu data dari laman resmi Pemerintah Kota Denpasar (<https://www.denpasarkota.go.id/wisata/sejarah-kota-denpasar>).

Tabel 7. Luas Inundasi Berdasarkan Tingkat Bahaya Tsunami (Martinez dkk., 2017)

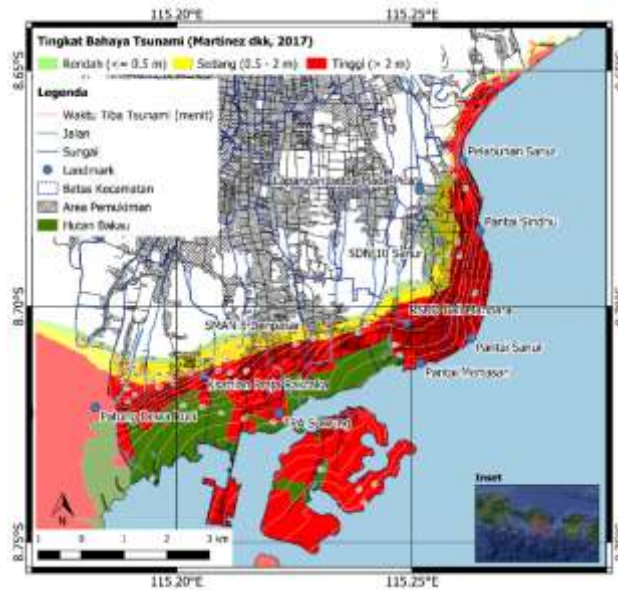
No	Tingkat Bahaya	Luas Area Inundasi (ha)	
		Mw 8.5	Mw 8.0
1	Rendah (< 0.5 m)	18.700	14.700
2	Sedang (0.5-2 m)	39.800	63.100
3	Tinggi (> 2 m)	235.600	154.000
Total Area Inundasi		294.100	231.800

Jika diklasifikasikan berdasarkan tingkat bahaya tsunami (Martinez dkk., 2017), keduanya didominasi area dengan tingkat bahaya tinggi yaitu sebesar 154.000 ha untuk gempabumi Mw 8,0 dan 235.600 ha untuk gempabumi Mw 8,5. Area dengan tingkat bahaya tinggi ditunjukkan dengan warna merah pada

Gambar 7 dan Gambar 8. Area dengan tingkat bahaya sedang (warna kuning) pada skenario gempabumi Mw 8,0 lebih luas dibandingkan skenario gempabumi Mw 8,5. Sedangkan luas area dengan tingkat bahaya rendah (warna hijau) hampir sama pada kedua skenario yaitu 147.000 ha dan 187.000 ha (Tabel 7).



Gambar 7.
Peta Tingkat Bahaya Tsunami Kota Denpasar Skenario Gempabumi Mw 8.0



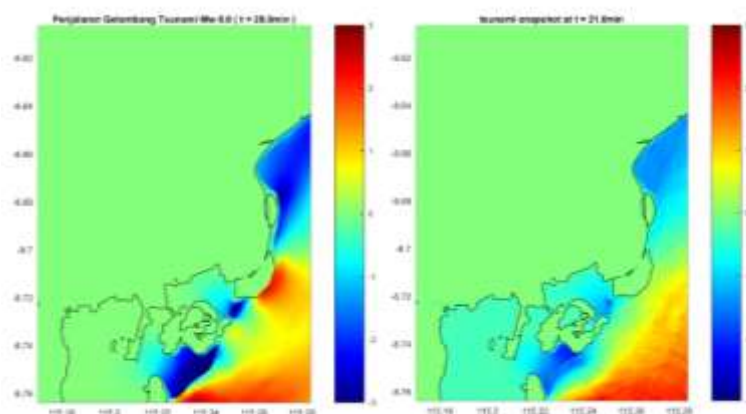
Gambar 8.

Peta Tingkat Bahaya Tsunami Kota Denpasar Skenario Gempabumi Mw 8,5

Model penjarangan gelombang tsunami menunjukkan bahwa wilayah pesisir timur Kelurahan Serangan merupakan wilayah pesisir Kota Denpasar yang paling awal diterjang gelombang tsunami. Gambar 9 menunjukkan gelombang tsunami akibat gempabumi Mw 8,5 tiba di wilayah pesisir timur Kelurahan Serangan pada menit ke-21 setelah gempabumi. Sedangkan gelombang tsunami akibat gempabumi Mw 8,0 tiba tujuh menit lebih lambat yaitu 28 menit setelah gempabumi. Hasil ini selaras dengan lokasi sumber gempabumi Mw 8,5 yang

memang relatif lebih dekat dengan pesisir selatan Pulau Bali dibanding lokasi sumber gempabumi Mw 8,0.

Berdasarkan parameter-parameter hasil pemodelan tsunami di atas, skenario gempabumi Mw 8,5 menunjukkan dampak yang lebih parah dibanding skenario gempabumi Mw 8,0. Tidak hanya gelombang tsunami yang lebih tinggi dan area genangan yang lebih luas, skenario gempabumi Mw 8,5 berpotensi medatangkan gelombang tsunami yang lebih cepat sehingga memperpendek waktu evakuasi.



Gambar 9.

(kiri) *Snapshot* penjalaran gelombang tsunami akibat gempabumi Mw 8,0 pada menit ke-28 dan (kanan) gempabumi Mw 8,5 pada menit ke-21.

3.3. Peta Bahaya Tsunami

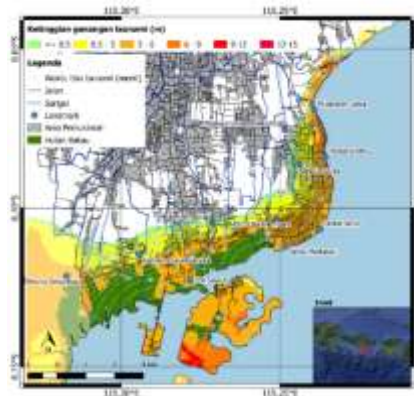
Hasil pemodelan tsunami berdasarkan skenario terburuk gempabumi Mw 8,5 menunjukkan tujuh desa dan empat kelurahan berada pada daerah rawan bencana tsunami di Kota Denpasar (Tabel 8). Hasil analisis potensi ketinggian genangan tsunami (Gambar 10) menunjukkan bahwa sebagian besar area pemukiman di pesisir Kota Denpasar didominasi ketinggian genangan sebesar 3-6 meter (setara bangunan dua lantai). Area ini ditandai warna oranye. Sedangkan daerah dengan potensi ketinggian genangan tsunami 6-9 meter

(setara bangunan tiga lantai) mendominasi sebagian kecil wilayah pesisir pantai Kelurahan Serangan, Kelurahan Sanur, Desa Sanur Kaja, Desa Kesiman Petilan, dan Desa Kesiman Kerthalangu. Area ini ditunjukkan dengan warna oranye tua pada Gambar 10. Terdapat area dengan potensi ketinggian genangan lebih dari 9 meter di wilayah Kelurahan Serangan, Desa Kesiman Petilan, dan Desa Kesiman Kerthalangu yang ditunjukkan dengan area warna merah dan merah tua. Namun luasannya sangat kecil dan bukan merupakan area pemukiman.

Tabel 8. Potensi dampak tsunami di Kota Denpasar akibat gempabumi Mw 8,5

No	Desa/Kelurahan	Luas Wilayah* (ha)	Luas Area Inundasi (ha)	Waktu Tiba Tsunami (menit)	Potensi Genangan Maksimum Tsunami
1	Desa Pemecutan Kelod	45.000	2.000 (4,41%)	39	0,5 – 3 m
2	Desa Pemogan	97.100	57.300 (59,04%)	29	3 – 6 m
3	Kel.Pedungan	74.900	40.200 (53,69%)	29	3 – 6 m
4	Kel.Sesetan	73.900	21.500 (29,16%)	28	3 – 6 m
5	Kel.Serangan	48.100	48.100 (100%)	21	9 – 12 m
6	Desa Sidakarya	38.900	26.900 (69,24%)	25	3 – 6 m
7	Desa Sanur Kauh	38.600	32.000 (82,92%)	25	3 – 6 m
8	Kel.Sanur	40.200	40.200 (100%)	22	6 – 9 m
9	Desa Sanur Kaja	26.900	12.900 (48,15%)	25	6 – 9 m
10	Desa Kesiman Petilan	29.000	6.800 (23,30%)	25	9 – 12 m
11	Desa Kesiman Kertalangu	40.500	4.300 (10,53%)	25	9 – 12 m
Total		294.100			

*data dari laman resmi Pemerintah Kota Denpasar (https://dota.denpasarkota.go.id/?page=Data-Detail&language=id&domain=&data_id=1530591515)



Gambar 10.

Peta Bahaya Tsunami Kota Denpasar akibat Gempabumi Mw 8,5

4. SIMPULAN DAN SARAN

Hasil pemodelan COMCOT untuk wilayah pesisir Kota Denpasar menunjukkan bahwa dampak tsunami yang ditimbulkan dari gempabumi Mw 8,5 lebih buruk dibandingkan gempa bumi Mw 8,0. Hal itu dapat dilihat dari luas inundasi wilayah berdampak yang tergenang tsunami di wilayah Kota Denpasar. Hasil rekaman *tide gauge* virtual menunjukkan bahwa jika terjadi gempabumi berpotensi tsunami di selatan Bali, desa-desa di Kota Denpasar dengan wilayah pantai menghadap Teluk Benoa memiliki waktu evakuasi yang sedikit lebih panjang dibanding desa-desa dengan wilayah pantai menghadap laut lepas Selat Badung. Hal ini disebabkan kondisi geografis Teluk Benoa yang terhubung ke perairan lepas timur Pulau Bali oleh celah sempit antara Pelabuhan Benoa dan Tanjung Benoa. Kondisi ini sedikit menghambat gelombang tsunami sekitar 1-2 menit. Kondisi geografis berupa teluk juga perlu diwaspadai karena dapat menimbulkan amplifikasi gelombang tsunami. Namun keberadaan hutan bakau di wilayah Teluk Benoa mampu sedikit meredam gelombang tsunami. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa potensi genangan maksimum di

pesisir kota Denpasar dapat mencapai ketinggian 6-9 meter dari permukaan tanah atau setara bangunan tiga lantai.

Diperlukan bangunan bertingkat empat atau lebih di wilayah pesisir yang dapat digunakan sebagai TES vertikal tsunami. Berdasarkan pemodelan, waktu tiba gelombang tsunami di wilayah pesisir Kota Denpasar berkisar antara 21-29 menit setelah gempabumi terjadi. Penulis berharap bahwa penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk para pemangku kebijakan baik pemerintah daerah maupun institusi di bidang kebencanaan dalam menyusun strategi mitigasi pengurangan risiko bencana tsunami di Kota Denpasar. Diharapkan perlunya penelitian lanjutan dari peta bahaya yang dihasilkan untuk penentuan jalur evakuasi dan tempat evakuasi sementara.

DAFTAR PUSTAKA

- Bilek, S., Lay, T. 1999. Rigidity variations with depth along interplate megathrust faults in subduction zones. *Nature* **400**, 443–446.
<https://doi.org/10.1038/22739>
- Bilek, S. L., & Lay, T. 2018. Subduction zone megathrust earthquakes. *Geosphere*, **14**(4),

- 1468–1500.
<https://doi.org/10.1130/GES01608.1>
- Blaser, Lilian & Krueger, Frank & Ohrnberger, Matthias & Scherbaum, Frank. 2010. Scaling Relations of Earthquake Source Parameter Estimates with Special Focus on Subduction Environment. *Bulletin of The Seismological Society Of America*. 100. 2914-2926. 10.1785/0120100111.
- BPBD. 2024. *Kajian Resiko Bencana Provinsi Bali 2024*. Bali: Badan Penanggulangan Bencana Daerah
- BPS. 2024. *Provinsi Denpasar Dalam Angka 2024*. Denpasar. Badan Pusat Statistik
- GITEWS. 2010. Peta Evakuasi Tsunami Bali-Denpasar. Diakses pada 12 Mei 2025, dari https://www.gitews.de/tsunami-kit/id/id_tsunami_hazard_map_bali.html
- Hanks, T. C., and H. Kanamori. 1979. A moment magnitude scale, *J. Geophys. Res.*, 84(B5), 2348–2350, doi:[10.1029/JB084iB05p02348](https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348).
- Hayes, G. P., Moore, G. L., Portner, D. E., Hearne, M., Flamme, H., Furtney, M., & Smoczyk, G. M.. 2018. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model. *Science*, 362(6410), 58-61.
<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh>
- Hutasoit, J.D.L.I. 2024. *Simulasi Tsunami Palu Pada 28 September 2018 dengan Menggunakan Software Cornell Multi-Grid Couple Tsunami (COMCOT 1.7)*. Skripsi Sarjana, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Brawijaya.
- Kanamori, Hiroo. 1986. Rupture Process of Subduction-Zone Earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 14 (May): 293–322. <https://doi.org/10.1146/annurev.ea.14.050186.001453>.
- Lay, T., H. Kanamori, C. J. Ammon, K. D. Koper, A. R. Hutko, L. Ye, H. Yue, and T. M. Rushing. 2012. Depth-varying rupture properties of subduction zone megathrust faults. *J. Geophys. Res.*, 117, B04311, doi:[10.1029/2011JB009133](https://doi.org/10.1029/2011JB009133).
- Martínez, C., Rojas, O., Villagra, P., Aránguiz, R., and Sáez-Carrillo, K. 2017. Risk factors and perceived restoration in a town destroyed by the 2010 Chile tsunami. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 721–734, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-721-2017>.
- Pusgen. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Bandung: Pusat penelitian dan pengembangan Geologi Edisi Kedua.
- Ratuluhain, E. S., Noya, Y. A., Pradjoko, E., Rahman, R., & Hukubun, R. D. (2022). Rekonstruksi Tsunami Mentawai dengan Menggunakan COMCOT v1. 7. *Nekton*, 2(2), 54-62.
- Uyun, F. Q., Adhi, M. A., & Latief, H. (2024). Virtual Tide Gauge Observation of the 2006 Pangandaran Tsunami Using COMCOT Version 1.7. *Jurnal Fisika*, 14(2).
- Wang, X., Prasetya, G., Lukovic, B., Brackley, H., Berryman, K. 2009. *Gisborne district council tsunami*

inundation study. GNS Science consultancy report 2009/233, GNS Science, New Zealand.

Wang; X., Power, W. 2011. COMCOT: a Tsunami Generation Propagation and Run-up Model, *GNS Science Report* 2011/43 129 p.

Windujati, Umboro. 2023. *Evaluasi Kinerja Program Cornell Multigrid Coupled Tsunami (COMCOT) Secara Uji Numerik Untuk Mensimulasikan Proses Penjalaran Dan Overtopping Tsunami Pada Seawall*. Disertasi Doktorat, Fakultas Teknik Sipil, Universitas Pertamina.