

PEMODELAN TSUNAMI BERDASARKAN AMPLITUDO MAKSIMUM HISTORIS GEMPABUMI DI PESISIR JAILOLO SELATAN

TSUNAMI MODELLING BASED ON HISTORICAL MAXIMUM AMPLITUDE OF EARTHQUAKE ON THE COASTAL OF SOUTH JAILOLO

**Rahim Achmad^{1*}, Suryani Taib², Rohima Wahyu Ningrum³, Wiwit Suryanto⁴, Marwis Aswan⁵,
Ramdani Salam⁶, Risky Nuri Amelia⁷, Hesti⁸, Nurhalis Wahiddin⁹**

^{1,2,3}Universitas Khairun/Pendidikan Fisika; Jl. Bandara Sultan Baabullah; 0921-3120027

⁴Universitas Gadjah Mada/Geofisika; Jl. Sekip Utara, Bulaksumur; 0274-6492384/0274-545183

⁵Universitas Pasifik Morotai/Teknik Lingkungan; Jl. Siswa Darama; 0923-2221233

^{6,7} Universitas Khairun /Pendidikan Geografi; Jl. Bandara Sultan Baabullah ; 0921-3120027/0921-3120027

⁸Universitas Lampung/Teknik Geofisika; Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro; 0721-704947

⁹Universitas Khairun/Manajemen Sumberdaya Perairan; Jl. Abdurrahman Yusuf; 0921-3110907

Received: 2023, October 10th

Accepted: 2023, November 27th

Keywords:

Amplitude;
COMCOT;
Tsunami;
UAV.

Correspondent Email:

rohima@unkhair.ac.id

How to cite this article:

Achmad, R., Taib, S., Ningrum, R.W., Suryanto, W., Aswan, M., Salam, R., Amelia, R.W., Hesti,

Abstrak. Pangkalan data paleo-tsunami Indonesia mencatat tanggal 28 Juni 1859 terjadi gempabumi kuat di Laut Maluku dengan skala intensitas (MMI) IX dan menyebabkan tsunami di Teluk Sidangoli dengan ketinggian 10 meter. Laut Maluku memiliki pengaruh yang signifikan terhadap potensi terjadinya bencana tsunami di sekitar wilayah Halmahera termasuk Jailolo Selatan. Melihat adanya potensi bencana tsunami yang besar di wilayah Jailolo Selatan, maka perlu dilakukan strategi perencanaan mitigasi bencana tsunami yakni dengan pemodelan bahaya tsunami. Pemodelan bahaya tsunami dilakukan untuk mengetahui nilai amplitudo maksimum (*Run-up*) gelombang tsunami dengan menggunakan perhitungan numerik dari software *Cornell Multi-Grid Coupled Tsunami Model* (COMCOT) versi 1.7, nilai jarak maksimum yang dapat ditembus oleh air pasang ke daratan pada pantai yang datar (inundasi), dan nilai sudut kemiringan lereng (*slope*) dari pengukuran fotogrametri udara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV). Hasil Pemetaan bahaya tsunami menghasilkan nilai amplitudo maksimum (*Run-up*) setinggi 4 meter dan wilayah yang terdampak akibat gelombang tsunami berjarak (inundasi) sekitar 310 meter dari garis pantai. Nilai rata-rata sudut kemiringan lereng (*slope*) di pesisir Jailolo Selatan adalah 22,9^o dan termasuk lereng curam. Dan *slope* tipe

& Wahiddin, N. (2023). Pemodelan Tsunami Berdasarkan Amplitudo Maksimum Historis Gempabumi di Pesisir Jailolo Selatan. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 09(03), 231-247.

© 2023 JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

curam cenderung menyebabkan peningkatan tinggi gelombang saat tsunami mendekati pantai, sehingga gelombang dapat menjadi lebih tinggi.

Abstract. *The Indonesian paleo-tsunami database records that on 28 June 1859, a strong earthquake occurred in the Molucca Sea with an intensity scale (MMI) of IX and caused a tsunami in Sidangoli Bay with a height of 10 metres. The Molucca Sea significantly influences the potential for tsunami disasters around the Halmahera region, including South Jailolo. One factor that triggers tsunami disasters is controlled by the movement of three main tectonic plates, namely the Philippine Plate, the Australian Plate and the Eurasian Plate. This makes the South Jailolo area vulnerable to tsunami disasters triggered by seismic activity in the Molucca Sea. Considering the potential of a large tsunami disaster in the South Jailolo area, it is necessary to carry out a tsunami disaster mitigation strategy by modelling tsunami hazards. Tsunami hazard modelling was conducted to determine the maximum tsunami wave height using UAV data and processed using COMCOT software. The tsunami hazard mapping resulted in a maximum amplitude value (Run-up) of 7 metres and an average coastline slope angle on the South Jailolo coast of 22.9° or steep. A steep coastline slope tends to cause an increase in wave height as the tsunami approaches the coast so that the waves can be higher.*

1. PENDAHULUAN

Bahaya tsunami merupakan ancaman atau risiko yang timbul akibat fenomena alam terjadinya tsunami yang diakibatkan oleh gempabumi besar sebagai pemicu terjadinya. Gempabumi besar yang terjadi berpusat di Laut Maluku dipengaruhi oleh pergerakan tiga lempeng tektonik utama yakni Lempeng Filipina, Lempeng Australia dan Lempeng Eurasia (**Gambar 1**) (Widiwijayanti dkk., 2004). Pergerakan lempeng tersebut dipengaruhi oleh sesar aktif bawah laut dan membentuk zona subduksi aktif yang menyebabkan Laut Maluku memiliki aktivitas seismik yang tinggi. Laut Maluku merupakan busur aktif dari tumbukan Busur Sangihe dan Busur Halmahera yang mengalami konvergensi (Cardwell dkk., 1980; Fitch, 1972; Hall & Spakman, 2015).

Zona subduksi Laut Maluku sangat aktif di mana lempeng tektonik saling bertabrakan dan berinteraksi. Hal inilah yang meningkatkan kemungkinan terjadinya berbagai peristiwa geologi seperti gempa bumi, tsunami, dan

letusan gunung berapi yang berdampak signifikan di wilayah ini.

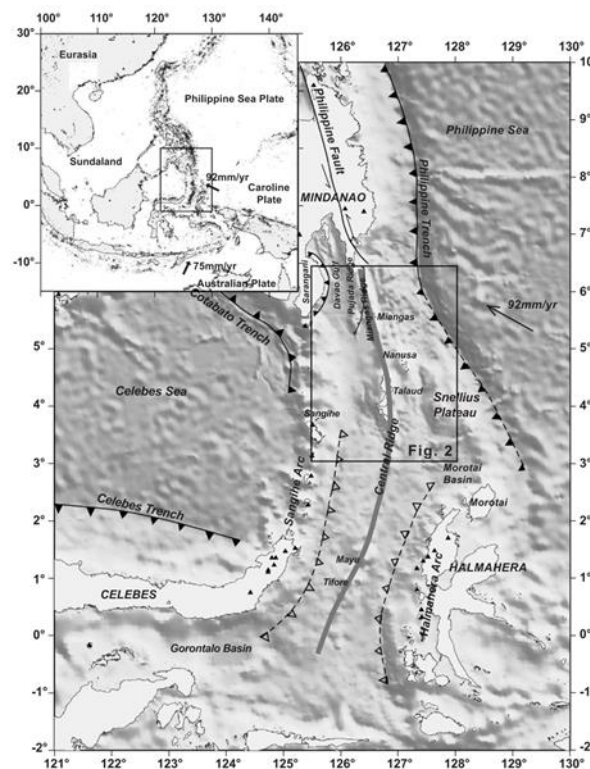
Tsunami adalah gelombang, atau serangkaian gelombang dalam suatu rangkaian gelombang, yang ditimbulkan oleh perpindahan vertikal secara tiba-tiba dari suatu kolom air. Perpindahan ini dapat disebabkan oleh aktivitas seismik, letusan gunung berapi, tanah longsor di atas atau di bawah air, tumbukan asteroid, atau fenomena meteorologi tertentu. Istilah tsunami berasal dari bahasa Jepang yang berarti pelabuhan (*tsu*) gelombang (*nami*), karena gelombang ini sering terjadi sebagai fenomena resonansi di pelabuhan setelah gempa bumi di lepas pantai (Bryant, 2008).

Berdasarkan Pangkalan data paleotsunami Indonesia (Ibtihaj, 2021) mencatat bahwa pada tanggal 28 Juni 1859 terjadi gempabumi kuat di Laut Maluku dengan skala intensitas (MMI) IX dan menyebabkan tsunami di Teluk Sidangoli dengan ketinggian 10 meter. Walaupun tidak ada korban jiwa dan hanya menimbulkan

tsunami lokal, namun sangat mempengaruhi kestabilan daerah.

Gelombang tsunami yang datang dari pusat samudra bergerak sangat cepat dan bertambah tinggi ketika mendekati pantai, sehingga segala sesuatu yang berada di depan gelombang tersebut dapat hancur dan tersapu oleh volume air yang terkumpul (Kurniawan & Laili, 2019).

Hal ini yang akan menyebabkan masyarakat menjadi panik dan lari tidak beraturan apabila tidak diikuti dengan kapasitas masyarakat yang tinggi terhadap bencana tsunami. Masyarakat akan lebih siap menghadapi ancaman tsunami dengan mengetahui informasi terbaru mengenai daerah-daerah rawan tsunami.



Gambar 1. Tatanan tektonik regional wilayah Laut Maluku (Widiwijayanti dkk., 2004).

Teluk sidangoli termasuk wilayah Jailolo Selatan yang terletak di wilayah pesisir dan memiliki potensi sumber daya alam, termasuk perairan laut yang kaya. Selain itu Teluk Sidangoli merupakan kawasan daerah kawasan peruntukan industri dari rumah tangga, industri sedang, dan industri besar serta pusat transportasi laut sebagai pintu keluar-masuk untuk angkutan barang dan orang yang menghubungkan dari/ke daratan pulau Halmahera. Maka dari itu perlu dilakukan pemetaan bahaya tsunami dengan menggunakan pemodelan numerik untuk

mengetahui amplitudo maksimum gelombang tsunami atau ketinggian maksimum gelombang tsunami (*Run-up*) dan dan jarak horizontal terjauh yang dijangkau oleh gelombang tsunami dari garis pantai (Inundasi).

Pemetaan bahaya tsunami dalam penelitian ini menggunakan *software Cornell Multi-grid Coupled Tsunami* (COMCOT) dengan skenario kejadian paleotsunami akibat gempa kuat dengan skala intensitas (MMI) IX. Hasil pemetaan bahaya tsunami dengan menggunakan pemodelan numerik digunakan

sebagai bentuk strategi mitigasi bencana tsunami yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam penentuan jalur evakuasi. Sehingga dapat meminimalisir bencana tsunami di wilayah Jailolo Selatan khususnya Teluk Sidangoli

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. *Paleotsunami Teluk Sidangoli*

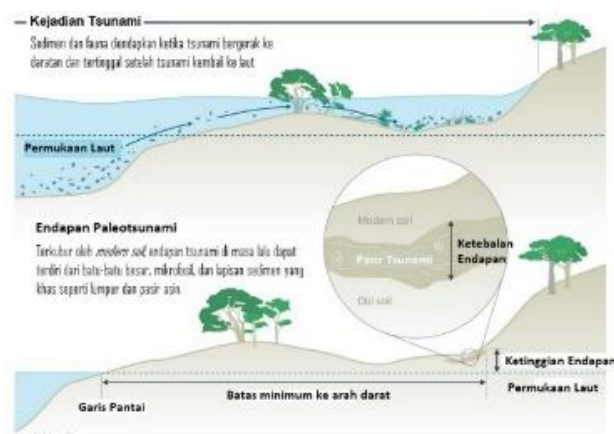
Tsunami adalah gelombang, atau serangkaian gelombang dalam suatu rangkaian gelombang, yang ditimbulkan oleh perpindahan vertikal secara tiba-tiba dari suatu kolom air. perpindahan ini dapat disebabkan oleh aktivitas seismik, letusan gunung berapi, tanah longsor di atas atau di bawah air, tumbukan asteroid, atau fenomena meteorologi tertentu. Istilah tsunami berasal dari bahasa Jepang yang berarti pelabuhan (*tsu*) gelombang (*nami*), karena gelombang ini sering terjadi sebagai fenomena resonansi di pelabuhan setelah gempa bumi di lepas pantai (Bryant, 2008).

Tsunami yang pernah terjadi di Teluk Sidangoli merupakan kejadian paleotsunami dengan ketinggian mencapai 10 meter pada tanggal 28 Juni 1859, terjadi akibat gempa yang berasal dari perairan Laut Maluku. Gempa tersebut memiliki kemungkinan adalah gempa megathrust. Terdapat suara gemuruh bawah

tanah yang keras, seperti guntur di kejauhan, dan disertai dengan osilasi di permukaan laut. Dua perahu kandas, tetapi tersapu lagi oleh gelombang berikutnya (Soloviev & Go, 1974).

Menurut (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2019), paleotsunami adalah tsunami yang terjadi sebelum adanya catatan sejarah atau ketika tidak ada pengamatan tertulis. Dengan kata lain, paleotsunami adalah tsunami yang terjadi di masa lalu.

Paleotsunami dapat diidentifikasi dengan menemukan endapan paleotsunami. Ketika tsunami melanda, ombak mengangkut material dari dasar laut. Ketika tsunami mendekati pantai, tsunami mengikis dasar pantai, yang biasanya terbuat dari pasir. Akibatnya, pasir pantai dan lumpur laut dalam bercampur menjadi satu. Semakin besar tsunami, semakin luas zona genangan tsunami (inundasi) dan benda-benda yang terbawa tsunami akan menjalar ke daratan. Setelah energi tsunami menghilang, air laut kembali ke laut dengan kecepatan yang lebih lambat (*backwash*), dan material pasir yang terbawa tidak kembali, tetapi diendapkan di daratan. Endapan tsunami akan menutupi dataran pantai, permukaan tanah, atau vegetasi yang ada (**Gambar 2**) (Zaim dkk., 2018).



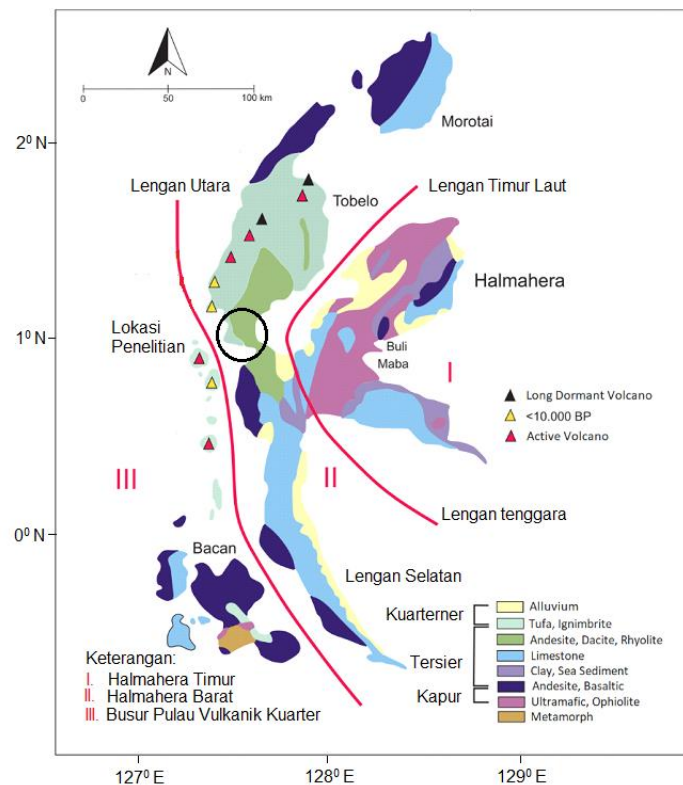
Gambar 2. Ilustrasi pembentukan endapan tsunami (<https://ptdb.niwa.co.nz/>).

2.2. Tataan Geologi Halmahera

Geologi Pulau Halmahera terbagi menjadi tiga bagian: Mandala Halmahera bagian Barat, Mandala Halmahera bagian Timur, dan Busur kepulauan gunung api kuartar. Sebagian besar Pulau Halmahera tersusun oleh kerucut vulkanik yang masih aktif (Apandi & Sudana, 1980). Mandala Halmahera bagian Barat terdiri dari lengan Utara hingga Selatan Pulau Halmahera yang meliputi perbukitan batuan sedimen, batugamping Neogen dengan

morfologi karst, dan di beberapa tempat terdapat morfologi kasar yang mencerminkan batuan vulkanik Oligo-Miosen, batuan sedimen tufan dan karbonat Miosen-Pliosen (Darman & Sidi, 2000).

Ditunjukkan pada Peta Geologi Lembar Ternate, wilayah Pesisir Jailolo Selatan yang menjadi lokasi penelitian berada di Teluk Sidangoli dimana daerah tersebut merupakan daerah aluvium dan endapan pantai, serta tufa yang terdiri dari lempung lanau, pasir, kerikil, tufa batuapung dan tufa biotit.



Gambar 3. Kondisi Fisiografi Halmahera (modifikasi dari Apandi & Sudana, 1980; Ramadhan dkk., 2020).

2.3. Sumber Pemicu Tsunami

Pesisir Jailolo Selatan merupakan wilayah subduksi, dimana sumber pemicu tsunami adalah gempa tektonik yang ada di Laut Maluku. Gempa bumi dangkal di bawah laut (kurang dari 70 km) seperti pada **Gambar 4**, dengan hiposentrum di dekat zona subduksi

dapat menimbulkan tsunami besar yang merusak (Pribadi dkk., 2013).

Parameter sumber gempa bumi lainnya selain kedalaman sumber gempa, adalah lokasi atau episenter pusat gempa di dasar laut, magnitudo gempa besar yang lebih besar dari $M=6,5$, mekanisme fokus, dan geometri patahan (Madrinovella dkk., 2011).

Geometri patahan seperti panjang (*length*), dan lebar patahan (*width*), magnitudo, dihitung dengan menggunakan persamaan empiris Wells dan Coppersmith (1994):

$$\log_{10} L = -2.42 + (0.58 \times M_w) \quad (1)$$

$$\log_{10} W = -1.61 + (0.41 \times M_w) \quad (2)$$

Dimana, L adalah panjang bidang patahan dan W adalah lebar bidang patahan.

Geometri patahan dapat digunakan untuk mengestimasi momen seismik gempa dan

dislokasi dengan menggunakan persamaan oleh Hanks dan Kanamori (1979):

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 10.7 \quad (3)$$

$$M_0 = \mu d L W \quad (4)$$

Dimana,

M_w : magnitude moment

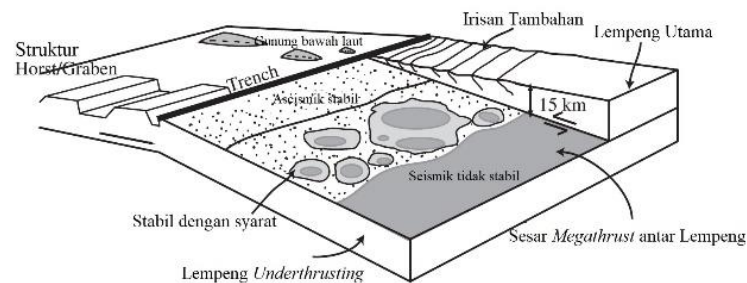
M_0 : seismik momen

μ : nilai rigiditas (10^{10} N/m²)

d : dislokasi/slip (m)

L : panjang bidang patahan (m)

W : lebar bidang patahan (m)



Gambar 4. Model Lempeng pada Zona Subduksi pemicu gempabumi dangkal di bawah laut (Bilek & Lay, 2002).

2.4. UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)

Kemajuan teknologi dalam pemetaan bahaya untuk upaya manajemen bencana khususnya tsunami telah banyak dilakukan inovasi. Teknologi UAV yang cepat, terjangkau, detil, dan mutakhir dapat digunakan untuk pemetaan bahaya tsunami (Wicaksono, 2023).

Dalam penelitian ini hasil teknologi UAV dari fotogrametri udara menghasilkan data

Digital Surface Model (DSM) dan mozaik foto udara. Hasil DSM kemudian diolah menggunakan tools *slope* di *arcmap* untuk menghasilkan data sudut kemiringan lereng (*slope*) dan digunakan untuk keperluan analisis data.

Adapaun klasifikasi kemiringan lereng berdasarkan kriteria (van Zuidam, 1985) (**Tabel 1**).

Tabel 1. Klasifikasi Kemiringan Lereng (*slope*).

Kelas Lereng (%)	Morfologi (°)	Sifat
0 - 2 %	0 - 20	Datar hingga hampir datar
2 - 7 %	2 - 40	Agak miring atau landai
7 - 15 %	4 - 80	Miring dengan besaran yang tinggi atau bergelombang
15 - 30 %	8 - 160	Agak Curam
30 - 70 %	16 - 350	Curam
70 - 40 %	35 - 550	Sangat Curam
> 140 %	> 550	Curam Sekali

2.5. COMCOT (Multi-Grid Coupled Tsunami Model)

Pemodelan tsunami dibantu *software* COMCOT dengan menggunakan teknik numerik eksplisit yang dapat mensimulasikan bagaimana gelombang tsunami menyebar selama kejadian sebelumnya. Model simulasi tsunami dikembangkan untuk pemetaan daerah rawan bencana didasarkan pada parameter pembangkit tsunami (seperti gempa bumi, longsoran atau letusan gunung di bawah laut), waktu kedatangan tsunami di daratan, tinggi tsunami (*run-up*) dan jauhnya genangan tsunami (inundasi) (**Gambar 5**).

Pemodelan COMCOT ini lebih praktis, mudah dan simpel dan berfungsi menjadi pembangkit gelombang tsunami dengan menggunakan persamaan (5) gelombang panjang perairan dangkal (*Linear Shallow Water*) (Wang & Liu, 2007).

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} &= -\frac{\partial h}{\partial t}, \\ \frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ &= 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - fP &= 0. \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial h}{\partial t},\end{aligned}\quad (5)$$

dengan

η = ketinggian permukaan air
(*water surface elevation*),
 P, Q = fluks volume dalam arah x
(barat-timur) dan dalam arah y

(utara-selatan),

g = percepatan gravitasi

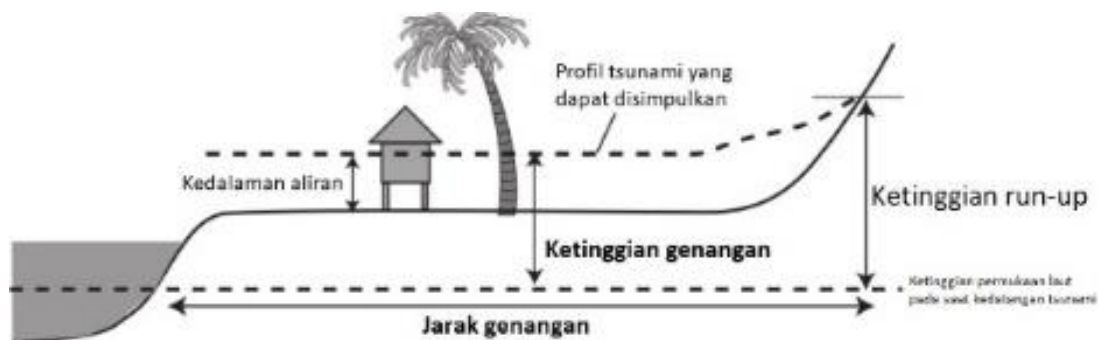
H = kedalaman air total, $(\eta + h)$

Saat gelombang tsunami melewati dasar laut pada berbagai kedalaman, gelombang tsunami akan mengalami percepatan dan perlambatan. Tsunami di laut dalam dapat mencapai kecepatan 500 hingga 1.000 km/jam, sedangkan di laut dangkal, kecepatannya melambat namun tinggi gelombangnya bertambah. Batimetri lokal dan karakteristik topografi mempengaruhi bentuk dan kecepatan gelombang, sehingga menyebabkan variasi dalam penjalaran tsunami (Intergovernmental Oceanographic Commission, 2019).

Semakin besar tsunami, atau semakin lama periode gelombangnya maka semakin besar volume air yang terbawa ke daratan dan seakin besar pula luas banjir yang terjadi. Jarak maksimum yang dapat ditembus oleh air pasang ke daratan pada pantai yang datar dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Hills & Mader, 1997):

$$X_{max} = (H_t)^{1.33} n^{-2} k \quad (6)$$

Dengan H_t adalah tinggi gelombang tsunami di pantai, X_{max} adalah batas genangan maksimum (inundasi) dalam meter, n adalah *Manning's roughness coefficient*, dan k adalah konstanta (0,06). Persamaan (6) mengindikasikan bahwa efek tsunami dapat diminimalkan pada daerah pantai yang datar dengan menanam pohon-pohon yang lebat.



Gambar 5. Gambaran Parameter akibat dari transformasi gelombang tsunami (Satake, 2015).

Persamaan gesekan dasar dimodelkan dengan persamaan *Manning's Formula*. Koefisien Manning (*Manning's roughness coefficient*) digunakan dalam pengolahan di COMCOT untuk menggambarkan

karakteristik fitur permukaan profil bathimetri dan topografi area penelitian. Koefisien Manning berbagai jenis lahan di tampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. *Manning's Roughness Coefficient* Untuk Berbagai Jenis Lahan (Berryman, 2006; Bryant, 2008).

Jenis lahan	Koefisien Kekasaran
Lumpur, es, ladang terbuka tanpa tanaman	0,015
Area terbangun - area pemukiman	0,035
Sungai, danau	0,007
Area terbangun (pusat kota denhan bangunan bertingkat tinggi)	0,03
Hutan, hutan rimba	0,07

3. METODE PENELITIAN

3.1. Data

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif-kuantitatif. Parameter sumber gempa yang digunakan dalam pengolahan data ini adalah peristiwa gempa tanggal 28 Juni 1859 dengan magnitudo 7 SR atau skala MMI IX di Teluk Sidagoli. Gempa tersebut berasal akibat sesar Lempeng Laut Maluku dan menyebabkan tsunami terjadi tsunami dengan ketinggian gelombang tsunami mencapai 10 meter (Harris & Major, 2017; Ishimoto & Iida, 1939; Soloviev & Go, 1974). Informasi geologi dan arkeologi dikenal sebagai data paleotsunami yang digunakan untuk mengidentifikasi dan memahami kejadian tsunami yang terjadi di masa lalu, jauh sebelum catatan tertulis atau pengamatan modern tentang tsunami tersedia. Dengan menggunakan data ini, peneliti dapat lebih memahami frekuensi, intensitas, dan dampak aktivitas tsunami dari waktu ke waktu di wilayah tertentu.

Lokasi penelitian adalah pesisir Jailolo Selatan yang difokuskan pada daerah padat

pemukiman dan penduduk dengan batas koordinat 0°53'40"LU - 127°29'59"BT (**Gambar 6**).

Penelitian ini menggunakan data primer dari fotogrametri udara *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) yang menghasilkan data DEM dalam bentuk *Digital Terrain Model* (DTM) untuk mendapatkan nilai sudut kemiringan lereng (*slope*).

Sumber data sekunder yang digunakan adalah katalog tsunami Indonesia per-wilayah tahun 416-2017, data tutupan lahan dari Badan Informasi Geospasial (BIG) (meliputi pemukiman, vegetasi, pertanian dan perkebunan), data geometri patahan, data Bathimetri dari *General Bathymetric Chart of the Ocean* (GEBCO) dan data topografi berupa data *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS). Data geometri patahan yang digunakan dihitung dengan menggunakan persamaan empiris (Hanks dan Kanamori, 1979; Wells dan Coppersmith, 1994), hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 3**.



Gambar 6. Wilayah penelitian.

Tabel 3. Data Geometri Bidang Patahan.

Kriteria	Patahan ke-					
	1	2	3	4	5	6
Long	127,3	127,2	127,1	127,7	127,95	127,9
Lat	1,65	1,30	0,89	0,53	0,39	0,001
Strike ($^{\circ}$)	20	35	15	5	10	8
Dip ($^{\circ}$)	30	30	30	30	30	30
Rake ($^{\circ}$)	90	90	90	90	90	90
Length (km)	43,4	43,4	43,4	24,9	43,4	33,6
Width (km)	57	57	57	57	57	57
Depth (km)	30	30	30	30	30	30
Dislokasi (<i>slip</i>)	7	7	7	7	7	7

3.2. Akuisisi Data

Penelitian ini menggunakan beberapa perangkat keras dan perangkat lunak dalam proses akuisisi dan pengolahan data. Perangkat keras yang digunakan saat akuisisi data adalah wahana teknologi fotogrametri udara UAV tipe Dji Mavic Mini 2, *remote Control*, *smartphone*, dan GPS (Gambar 7). Pengambilan data dilakukan di wilayah pesisir Teluk Sidangoli, Jailolo Selatan, Halmahera Barat.

Luas area penelitian sekitar 14,7 hektare dilakukan menggunakan Wahana UAV tipe dji Mavic Mini dengan ketinggian terbang 80 meter. Waktu penerbangan (maksimum) sekitar 31 menit diukur saat terbang dengan kecepatan 4,7 m/s dalam kondisi tanpa angin. Jumlah foto yang diambil dengan kamera dengan sensor CMOS 1/2,3 inci (Piksel Efektif: 12 MP) senyaak 288 buah. Ukuran overlap yang digunakan ditentukan secara manual di aplikasi *Litchi*.



Gambar 7. Alat UAV yang digunakan dalam akuisisi data.

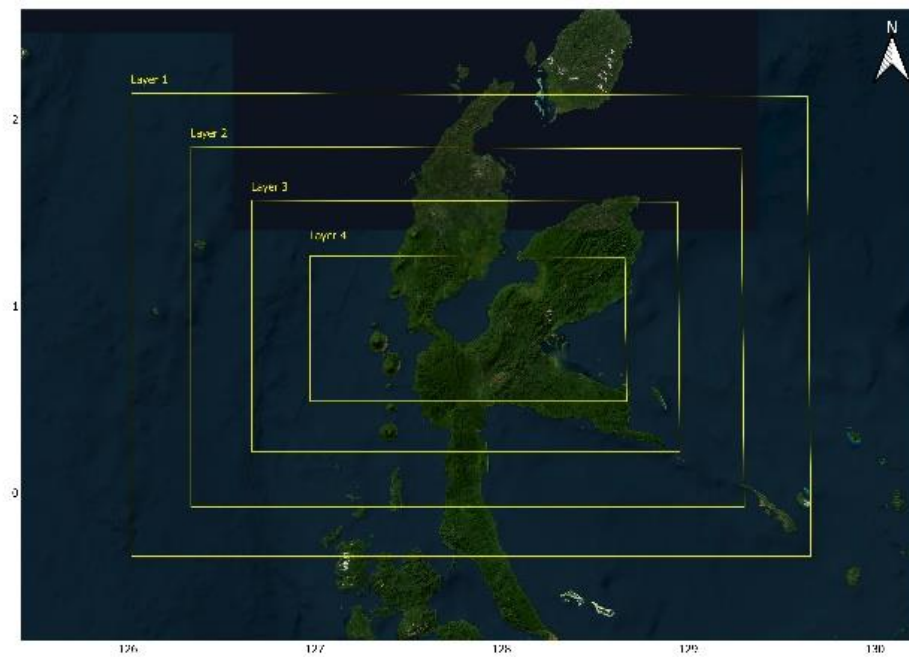
3.3. Pengolahan Data

Perangkat lunak yang digunakan adalah aplikasi *Litchi* untuk melakukan pengaturan autopilot UAV agar dapat menangkap foto udara sesuai dengan estimasi waktu yang dibutuhkan, *Agisoft Metashape Professional 2.0.1* digunakan untuk pemodelan dari fotogrametri menghasilkan data DEM berupa *Digital Surface Model (DSM)*, *Digital Terrain Model (DTM)*, dan *orthomosaic*. Kemudian data nya diolah dengan menggunakan *ArcMap* untuk menghitung sudut kemiringan lereng (*slope*).

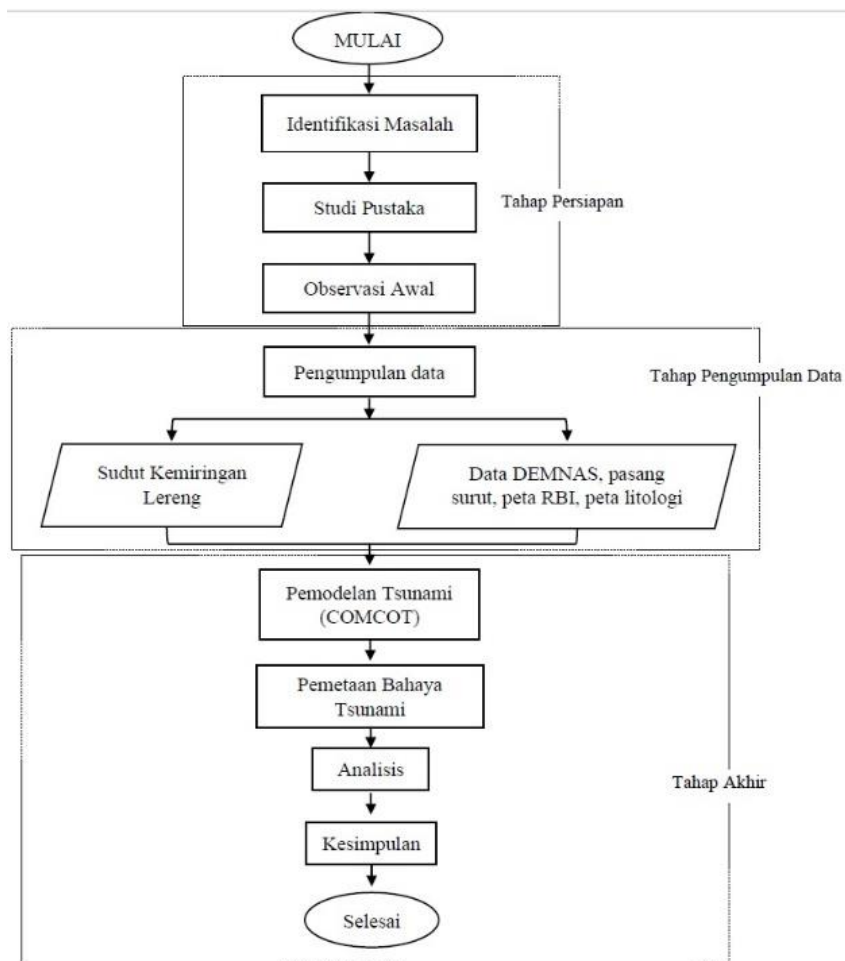
Dalam proses pemodelan tsunami menggunakan perhitungan numerik dengan program komputasi *Cornell Multi-Grid Coupled Tsunami Model (COMCOT)*. Parameter patahan yang diperoleh melalui persamaan empiris (Hanks dan Kanamori, 1979; Wells dan Coppersmith, 1994), digunakan sebagai input pengolahan data melalui COMCOT. Penentuan luas lokasi penelitian akan dibagi menurut *nesting grid system* menjadi 4 layer (**Gambar 8**). Hal ini dilakukan agar penalaran tsunami di pesisir Jailolo Selatan dapat tergambar dengan jelas. Hasil pengolahan data COMCOT menghasilkan nilai amplitudo maksimum tsunami (*Run-up*) yang ditampilkan dalam

bentuk peta dengan bantuan *software Matlab R2016a*. Kemudian nilai *run-up* digunakan untuk menghitung jarak maksimum yang dapat ditembus oleh air pasang ke daratan pada pantai yang datar (inundasi) dengan menggunakan persamaan (6).

Studi tentang analisis bahaya tsunami yang menghasilkan ketinggian maksimum gelombang tsunami telah dilakukan peneliti terdahulu seperti yang telah dilakukan Dilla, 2022; Fatimah dkk., 2023; Widada dkk., 2022. Penelitian yang dilakukan menggunakan data sekunder (data GEBCO dan DEMNAS) dan diolah dengan menggunakan *software COMCOT v.1.7*. COMCOT merupakan teknik pemodelan numerik yang menggunakan skema *leap-frog finite difference* dengan sistem grid bersarang (*nested grid*) untuk menghasilkan hasil pemodelan yang lebih detail dan beresolusi lebih tinggi. Hasil pemodelan ini digunakan untuk memperkirakan tinggi gelombang tsunami (*run-up*) dan menghitung jarak maksimum yang dapat ditembus oleh air pasang ke daratan pada pantai yang datar (inundasi) serta digunakan sebagai upaya mitigasi bencana tsunami. Adapun tahapan penelitian ditampilkan dalam bentuk diagram alir (**Gambar 9**).



Gambar 8. Layer lokasi penelitian.



Gambar 9. Diagram Alir Penelitian.

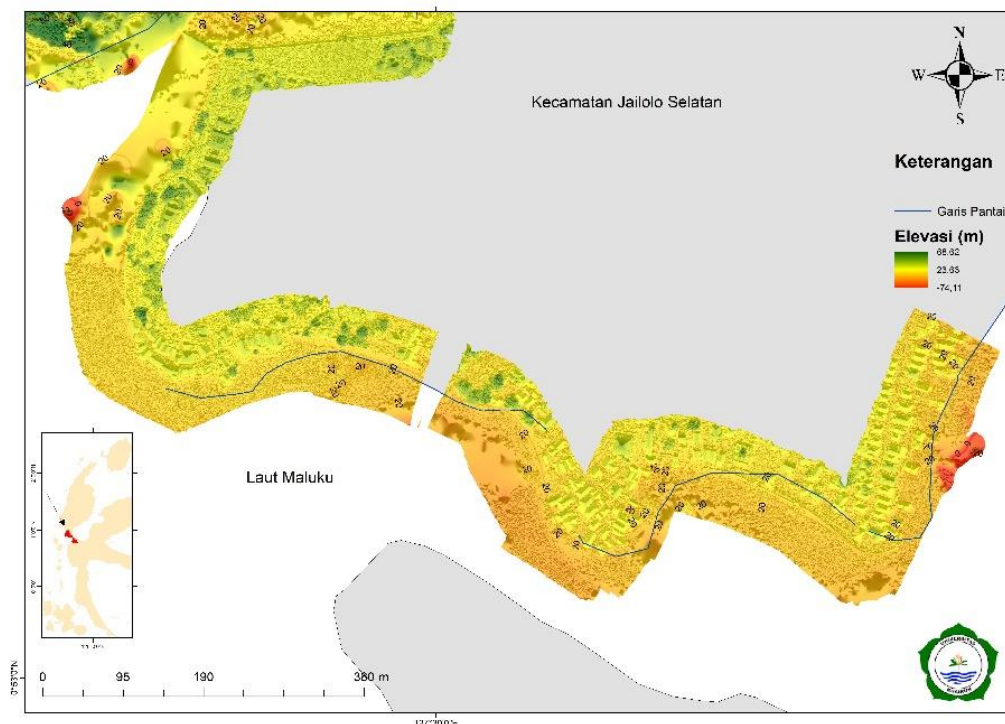
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Topografi dan Sudut Kemiringan Lereng dengan UAV

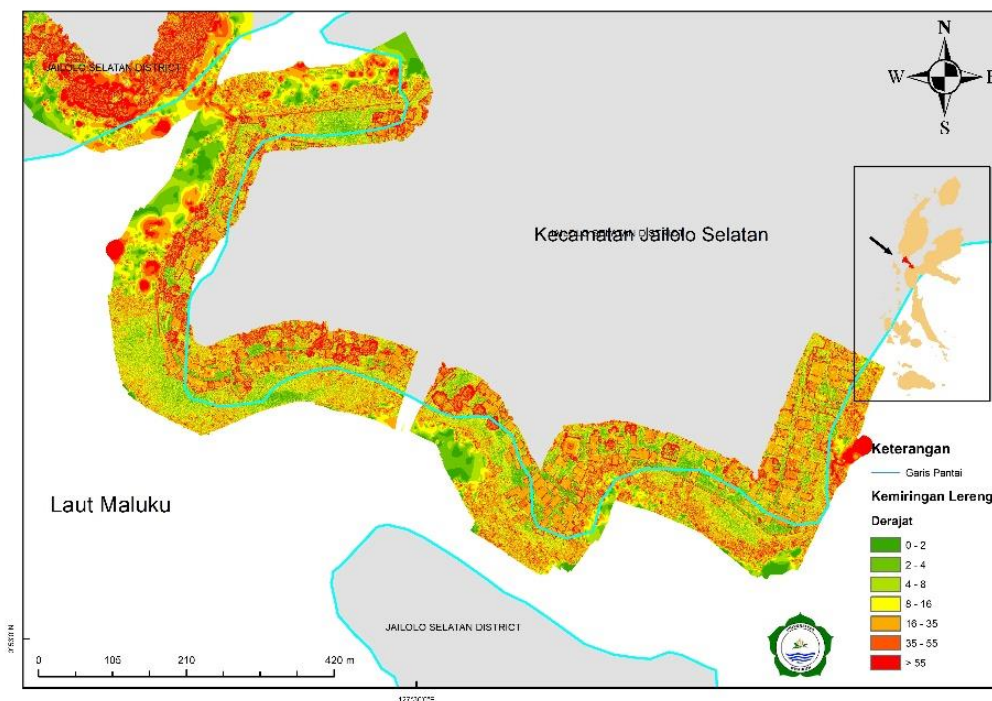
Hasil foto udara dari UAV diolah menjadi peta topografi dalam bentuk Digital Terrain Model (DTM) (**Gambar 10**) di wilayah penelitian. Informasi ketinggian yang diperoleh dari peta topografi dalam bentuk DTM dengan skala gradien warna dari warna merah dengan elevasi 74,11 meter di bawah permukaan laut sampai dengan warna biru untuk elevasi tinggi dengan 68,62 meter di atas permukaan laut. Wilayah dengan elevasi rendah berada di pesisir, pantai, dan delta sungai yang berbatasan langsung dengan Laut Maluku. Terlihat dari peta *orthomosaic* bahwa daerah pesisir Jailolo Selatan merupakan

pantai berpasir. Sedangkan untuk wilayah dengan elevasi tinggi berada di daerah pemukiman masyarakat dan perbukitan. Dalam hal ini perilaku gelombang tsunami saat mencapai wilayah pesisir sangat dipengaruhi oleh permukaan tanah atau lahan di wilayah pesisir pantai.

Data DTM menjadi data kontur batimetri dan dikonversi menghasilkan data sudut kemiringan lereng (*slope*) dengan menggunakan *tool slope* dari *armap* (**Gambar 11**). Selanjutnya nilai *slope* tersebut dapat dianalisa sebagai data pendukung dalam pemetaan bahaya tsunami. Nilai *slope* berbanding lurus dengan energi gelombang (Darlan, 1996).



Gambar 10. Digital Terrain Model (DTM), di wilayah penelitian.



Gambar 11. Peta Distribusi Kemiringan lereng dalam derajat ditandai dengan gradasi warna di Wilayah pesisir Jailolo Selatan.

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari data DTM maka nilai rata-rata sudut kemiringan lereng (*slope*) untuk pesisir adalah $22,9^0$ atau termasuk daerah curam. Daerah pesisir yang memiliki sudut kemiringan besar atau tipe kemiringan curam memiliki energi gelombang kuat dengan sedimen berfraksi kasar (Kalay dkk., 2018).

Nilai *slope* di pesisir termasuk curam dan memiliki dampak signifikan terhadap penjarangan gelombang tsunami. Cenderung menyebabkan peningkatan tinggi gelombang saat tsunami mendekati pantai, sehingga gelombang dapat menjadi lebih tinggi demikian sebaliknya. Meskipun gelombang tsunami tidak terlalu tinggi di awalnya, namun dapat mencapai jarak yang jauh ke dalam daratan, dan menciptakan bahaya di wilayah yang lebih luas. Daerah jangkauan tsunami sangat dipengaruhi oleh ketinggian dan kemiringan pantai suatu wilayah. Semakin besar kemungkinan suatu tempat rusak akibat tsunami, semakin rendah posisinya, sedangkan

kemiringan pantai mempengaruhi jarak tempuh gelombang tsunami ke daratan (Ayunda dkk., 2020).

4.2. Pemetaan Bahaya Tsunami

Pemodelan bahaya tsunami diolah dengan menggunakan software COMCOT menggunakan metode *Shallow water Equation* yang menggabungkan berbagai parameter. Parameter yang digunakan dalam pemodelan bahaya tsunami adalah amplitudo maksimum gelombang tsunami (*Run-up*), inundasi, kemiringan lereng, dan koefisien gesekan dasar yang dimodelkan dengan *Manning's Roughness Coefficient*.

Semakin besar gesekan antara ombak dan dasar pantai, semakin lambat kecepatan rambat gelombang bagian bawah, tetapi semakin besar amplitudo gelombang bagian atas (*Run-up*). Hasil dari pengolahan data di COMCOT adalah nilai amplitudo maksimum tsunami (*Run-up*) sebesar 4 meter yang ditunjukkan dengan warna kuning (**Gambar**

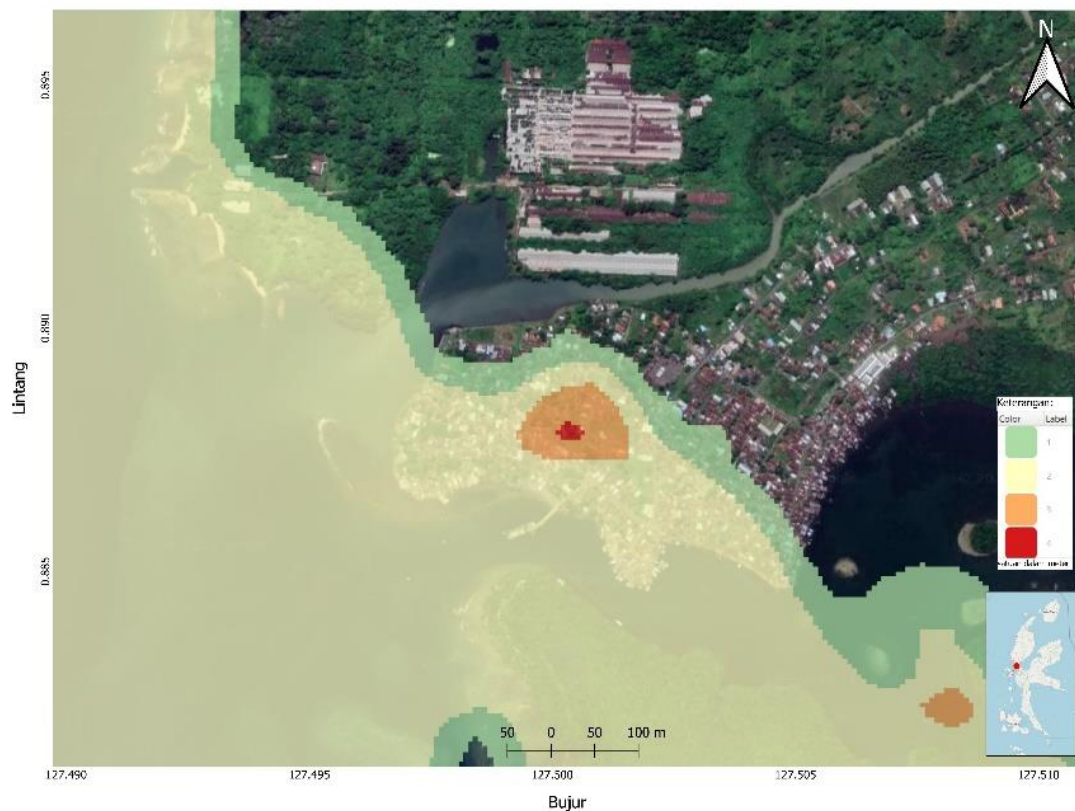
12). Berdasarkan nilai inundasi yang diperoleh, maka wilayah yang terdampak gelombang tsunami berjarak sekitar 310 meter dari garis pantai.

Dari hasil diketahui bahwa semakin besar nilai amplitudo maka semakin besar tinggi gelombang, dan sebaliknya semakin kecil nilai amplitudo maka semakin kecil tinggi gelombang. Tinggi gelombang akan bertambah seiring dengan penjarannya ketika mencapai lokasi yang lebih dekat dengan pusat gempa dan ketika gelombang tersebut menembus perairan dangkal dengan medan yang landai (Pradjoko dkk., 2015; Sugianto dkk., 2017).

Karakteristik fisik pantai Jailolo Selatan berupa aluvium dan endapan pantai, serta tufa (terdiri dari: lempung lanau, pasir, kerikil, tufa batupung dan tufa biotit) juga merupakan faktor penyebab daerah Pesisir Jailolo Selatan berpotensi tinggi terhadap bencana tsunami.

Keberadaan sungai di pesisir Jailolo Selatan dan membentuk Teluk Sidangoli menyebabkan tingginya potensi dampak bencana tsunami karena berperan sebagai jalur perjalanan gelombang tsunami. Wilayah yang berbentuk teluk menyebabkan gelombang tsunami menjadi kuat, saling memantul, dan berinterferensi (menyatu) menjadi gelombang yang sangat besar, sehingga memusatkan kekuatan gelombang di teluk. Akibatnya, daratan di sekitar teluk lebih rentan terhadap limpasan gelombang dibandingkan dengan pantai yang relatif datar di sepanjang pesisir (Aperus dkk., 2016).

Minimnya tutupan lahan seperti vegetasi di pesisir Jailolo Selatan juga membuat tingginya potensi dampak terhadap terjadinya tsunami. Tutupan lahan menjadi *point* penting terhadap pengaruh ketinggian gelombang tsunami (*Run-up*) (Hariyanto, 2020).



Gambar 12. Sebaran nilai Amplitude maksimum tsunami dengan *software* COMCOT.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa maka dapat disimpulkan bahwa pemetaan bahaya tsunami dengan data gempa Laut Maluku 28 Juni 1859 menghasilkan nilai amplitudo maksimum (ketinggian gelombang tsunami) 4 meter dan wilayah yang terdampak akibat gelombang tsunami berjarak (inundasi) sekitar 310 meter dari garis pantai. Nilai rata-rata sudut kemiringan lereng (*slope*) di pesisir Jailolo Selatan adalah $22,9^0$ dan termasuk lereng curam. Dan *slope* tipe curam cenderung menyebabkan peningkatan tinggi gelombang saat tsunami mendekati pantai, sehingga gelombang dapat menjadi lebih tinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Khairun melalui Hibah Fakultas dan pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Apandi, T., & Sudana, D. (1980). Peta Geologi Lembar Ternate Maluku Utara. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Aperus, R., Pujiastuti, D., & Billyanto, R. (2016). Pemodelan Tinggi dan Waktu Tempuh Gelombang Tsunami Berdasarkan Data Historis Gempa Bumi Bengkulu 4 Juni 2000 di Pesisir Pantai Bengkulu. *Jurnal Fisika Unand*, 5(4), 364–370. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.4.364-370.2016>
- Ayunda, G., Ismanto, A., Hariyadi, H., Sugianto, D. N., & Helmi, M. (2020). Analisis Penjalaran Run-Up Gelombang Tsunami Menggunakan Pemodelan Numerik 2D di Pesisir Kota Bengkulu. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3), 253–260. <https://doi.org/10.14710/ijoc.v2i3.8572>
- Berryman, K. (2006). Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand. *Institute of Geological and Nuclear Sciences*, (September), 139.
- Bilek, S. L., & Lay, T. (2002). Tsunami earthquakes possibly widespread manifestations of frictional conditional stability. *Geophysical Research Letters*, 29(14), 18-1-18-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015215>
- Bryant, E. (2008). *Tsunami: The Underrated Hazard (Second edition)*. Building Standards. Chichester UK: Praxis Publishing, Springer. <https://doi.org/10.14778/3425879.3425880>
- Cardwell, R. K., Isacks, B. L., & Karig, D. E. (1980). The spatial distribution of earthquakes, focal mechanism solutions, and subducted lithosphere in the Philippine and northeastern Indonesian Islands. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands. Part 1*. <https://doi.org/10.1029/gm023p0001>
- Darlan, Y. (1996). *Geomorfologi wilayah pesisir. Aplikasi Untuk Penelitian Wilayah Pantai*. Bandung, Indonesia.: Pusat Pengembangan Geologi Kelautan.
- Darman, H., & Sidi, F. H. 2000. (2000). *An Outline of The Geology of Indonesia (Jakarta: Ikatan Ahli Geologi Indonesia)*. Jakarta: Ikatan Ahli Geologi Indonesia.
- Dilla, S. F. (2022). *Pemodelan penjalaran tsunami akibat gempa sebagai upaya mitigasi bencana di wilayah pesisir pantai jember*. Fakultas Sains dan Teknologi UIN semarang. Universitas Islam Negeri Walisongo.
- Fatimah, A., Djamaluddin, R., Darwisito, S., Mamuaja, J. M., Wantasen, A. S., & Schadu, J. N. W. (2023). Pemodelan Numerik Tsunami untuk Mengestimasi Waktu Tiba dan Ketinggian Maksimum Gelombang Tsunami di Teluk Amurang. *Euler: Jurnal Ilmiah Matematika, Sains Dan Teknologi*, 11(1), 8–15. <https://doi.org/10.34312/euler.v11i1.19463>
- Fitch, T. J. (1972). Plate Convergence, Transcurrent Faults, and Internal Deformation Adjacent to Southeast Asia and the Western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 77(23), 4432–4460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/JB077i023p04432>
- Hall, R., & Spakman, W. (2015). Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, 658(January), 14–45. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2015.07.003>
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A Moment

- Magnitude Scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(9), 2348–2350.
- Hariyanto, I. H. (2020). *Analisis Ketinggian Gelombang Tsunami Akibat Submarine Landslide (Studi Kasus: Teluk Palu, Sulawesi Tengah)*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Harris, R., & Major, J. (2017). Waves of destruction in the East Indies: The Wichmann catalogue of earthquakes and tsunami in the Indonesian region from 1538 to 1877. *Geological Society Special Publication*, 441(1), 9–46. <https://doi.org/10.1144/SP441.2>
- Hills, J. G., & Mader, C. L. (1997). Tsunami produced by the impacts of small asteroids. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 822, 381–394. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1997.tb48352.x>
- Ibtihaj, I. (2021). Indonesia Paleotsunami Database, Universitas Indonesia. [30 Oktober 2023].
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2019). *Tsunami Glossary. IOC Technical Series*, 85 (Fourth Edi). Paris, UNESCO: Intergovernmental Oceanographic Commission of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Ishimoto, M., & Iida, K. (1939). Observations of Earthquakes Registered with the Micro Seismograph Constructed Recently. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 17, 443–478.
- Kalay, D. E., Lopulissa, V. F., & Noya, Y. A. (2018). Analisis Kemiringan Lereng Pantai Dan Distribusi Sedimen Pantai Perairan Negeri Waai Kecamatan Salahutu Provinsi Maluku (Coastline Slope Analysis and Sediment Distribution of Waai Village Waters, District of Salahutu, Maluku Province). *Triton*, 14(1), 10–18. Retrieved from <https://media.neliti.com/media/publications/286871-analisis-kemiringan-lereng-pantai-dan-di-fb1e72db.pdf>
- Kurniawan, T., & Laili, A. (2019). Penentuan Area Terdampak “Ketinggian Maksimum Tsunami” di Pulau Bali Berdasarkan Potensi GempaBumi Pembangkit Tsunami pada Segemen Megathrust Sumba. *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 10(1), 93–104.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., & Meilano, I. (2011). Relokasi Hiposenter Gempa Padang 30 September 2009 Menggunakan Metode Double Difference, *XVIII*(1), 3–10.
- Pradjoko, E., Kusuma, T., Setyandito, O., Suroso, A., & Harianto, B. (2015). The Tsunami Run-up Assesment of 1977 Sumba Earthquake in Kuta, Center of Lombok, Indonesia. *Procedia Earth and Planetary Science*, 14, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.079>
- Pribadi, S., Afnimar, Puspito, N. T., & Ibrahim, G. (2013). Characteristics of earthquake-generated tsunamis in Indonesia based on source parameter analysis. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 45(2), 189–207. <https://doi.org/10.5614/j.math.fund.sci.2013.45.2.8>
- Ramadhan, A. R., Basuki, N. I., Priadi, B., Sutopo, B., & Bari, A. (2020). *Lateritisasi pada Kompleks Melange Area Wailukum, Kabupaten Halmahera Timur*. *Bulletin of Geology*, 4(1), 474–495. <https://doi.org/10.5614/bull.geol.2020.4.1.3>.
- Satake, K. (2015). *Tsunamis* (In Treatis). Elsevier, Oxford, second edition edn. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00086-5>. <http://www.sciencedirect.com/sci>
- Soloviev, S. L., & Go, C. N. (1974). *Catalog of tsunamis in western shore of the Pacific Ocean (173-1968)*. Canada: Nauka Publishing House, Moscow, USSR, Can. Fish. Aquat. Sci. 5077.
- Sugianto, D., Nurjaya, I. W., MN Natih, N., & Pandoe, W. W. (2017). Potensi Rendaman Tsunami Di Wilayah Lebak Banten. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(1), 9. <https://doi.org/10.15578/jkn.v12i1.6241>
- van Zuidam, R. (1985). *Aerial Photo-Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping*. The Hague: Smits Publishers.
- Wang, X.; Liu, & P.L.-F. (2007). *Numerical simulation of the 2004 Indian Ocean tsunami – Coastal Effects*. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 1(3): 273–297.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area,

- and surface displacement. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>
- What is a Palaeotsunami? (n.d.). Retrieved from <https://ptdb.niwa.co.nz/>
- Wicaksono, I. (2023). *Perencanaan Evakuasi Bencana Tsunami Memanfaatkan Teknologi Uav Di Kawasan Wisata Pantai Sepanjang Kabupaten Gunungkidul*. Universitas Gadjah Mada.
- 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.
<https://doi.org/10.14710/buloma.v11i3.44032>
- Widiwijayanti, C., Tiberi, C., Deplus, C., Diamant, M., Mikhailov, V., & Louat, R. (2004). Geodynamic evolution of the northern Molucca Sea area (Eastern Indonesia) constrained by 3-D gravity field inversion. *Tectonophysics*, 386(3–4), 203–222.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.05.003>
- Zaim, Y., Daryono., Sukanta, I. N., Rizal, Y., Aswan., Wahyu, R. O., ... Simangunsong, G. (2018). *Jejak tsunami masa lalu diantara pangandaran dan cilacap*. (M. Riyadi & R. Triyono, Eds.). Jakarta: Pusat Gempabumi dan Tsunami, Kedeputan Bidang Geofisika, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.