

# Mangrove ecosystems as tsunami reducers on small islands in Bunaken National Park, North Sulawesi Province, Indonesia

Dewi Handayani<sup>1\*</sup>, Joshian N.W. Schadu<sup>2</sup>, Lefrand Manoppo<sup>3</sup>, Ping A. Angmalisang<sup>2</sup>, Wilmy E. Pelle<sup>2</sup>, Deiske A. Sumilat<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Master Program of Aquatic Science, Postgraduate Program, Sam Ratulangi University, Manado, North Sulawesi, Indonesia

<sup>2</sup> Marine Science Program, Faculty of Fisheries and Marine Science, Sam Ratulangi University, North Sulawesi, Indonesia

<sup>3</sup> Fishing Technology Program, Faculty of Fisheries and Marine Science, Sam Ratulangi University, North Sulawesi, Indonesia

\*Corresponding author: dewi19hand@gmail.com

Received: 10 December 2024 – Revised: 17 January 2025 – Accepted: 8 March 2025

**ABSTRACT:** This research aims to analyse the role of mangrove ecosystems in reducing tsunami wave impacts on the small islands of Bunaken National Park. Numerical modelling was conducted to simulate tsunami wave propagation under different scenarios, including with and without mangroves, using data on tree density, mangrove width, and coastal bathymetry. Spearman correlation analysis was applied to evaluate the relationship between mangrove density and width with the percentage of tsunami height reduction. Results revealed there was a strong positive correlation between mangrove density ( $r = 0.79$ ,  $P = 0.00036$ ) and mangrove width ( $r = 0.87$ ,  $P = 0.00045$ ) with tsunami height reduction, indicating that denser and wider mangroves result in greater wave attenuation. The modelling also highlighted the influence of coastal bathymetry and land topography on mangrove effectiveness, where steeper coasts produced lower tsunami heights compared to flatter areas. In conclusion, mangrove ecosystems play a critical role in mitigating tsunami impacts and should be prioritised in coastal conservation strategies to enhance disaster resilience and protect vulnerable coastal communities.

Keywords: mangroves; tsunami; wave attenuation; bunaken national park; disaster mitigation

## PENDAHULUAN

Secara geografis, Indonesia terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia (Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik) dan lempeng tektonik kecil, yaitu Lempeng Filipina. Hal ini mengakibatkan sebagian besar wilayah di Indonesia memiliki aktivitas seismik/kegempaan yang tinggi. Selain itu, aktivitas lempeng-lempeng tersebut dapat menimbulkan gempa bumi yang memicu terjadinya tsunami (Pusgen, 2017).

Dari segi seismik, wilayah Sulawesi Utara, merupakan wilayah yang aktivitas seismiknya tinggi. Dalam Silver and Moore (1978) dijelaskan, penyebab terjadinya aktivitas seismik yang tinggi di wilayah ini adalah adanya pertemuan Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik. Akibat aktivitas lempeng tersebut, terbentuklah zona subduksi yang terdapat di sebelah Utara dan Timur Semenanjung Minahasa. Zona subduksi di utara Semenanjung Minahasa merupakan subduksi lempeng Laut Sulawesi yang menyusup di bawah Pulau Sulawesi dan memanjang sampai di bawah Teluk Tomini. Sedangkan zona subduksi di sebelah Timur terdapat penukikan di Laut Maluku di bawah busur Kepulauan Sangihe dan di bawah Kepulauan Halmahera (Hall and Spakman, 2015). Aktivitas tektonik tersebut mengakibatkan daerah Sulawesi Utara tertekan membentuk zona subduksi

dan sesar yang merupakan sumber-sumber pembangkit gempa bumi.

Taman Nasional Bunaken (TNB) yang terdiri atas Pulau Bunaken, Pulau Manado Tua, Pulau Mantehage, Pulau Siladen, dan Pulau Nain, hingga perairan dari Desa Poopoh dan Desa Popareng, serta sekitaran Tanjung Pisok, yaitu antara Desa Molas dan Desa Tiwoho. Pulau-pulau tersebut merupakan destinasi wisata serta memiliki nilai ekologi dan ekonomi bagi masyarakat sekitar. Hutan mangrove di TNB merupakan 10% dari total hutan mangrove di Sulawesi Utara (Schadu, 2016). Selain itu, hutan mangrove di kawasan tersebut merupakan komunitas mangrove tertua di Asia Tenggara karena masih ditemukan diameter mangrove di atas 1,5 meter yang sudah jarang ditemukan di lokasi lain.

Pada manual Cornell Multi-grid Couple Tsunami (COMCOT) (Wang and Power, 2011) digunakan koefisien manning yang sama untuk segala jenis hutan. Sedangkan nilai koefisien manning untuk kondisi hutan yang berbeda memiliki karakteristik yang berbeda dan memiliki daya hambat gelombang tsunami yang berbeda pula (Yanagisawa et al., 2010). Oleh karena itu, pada setiap pemodelan tsunami di lokasi-lokasi tertentu harus memiliki nilai koefisien manning yang berbeda untuk dapat mempresentasikan kemampuan mangrove dalam mereduksi tsunami. Berdasarkan hal tersebut, maka perlu dibuat adanya pemodelan tsunami dengan memperhitungkan ekosistem

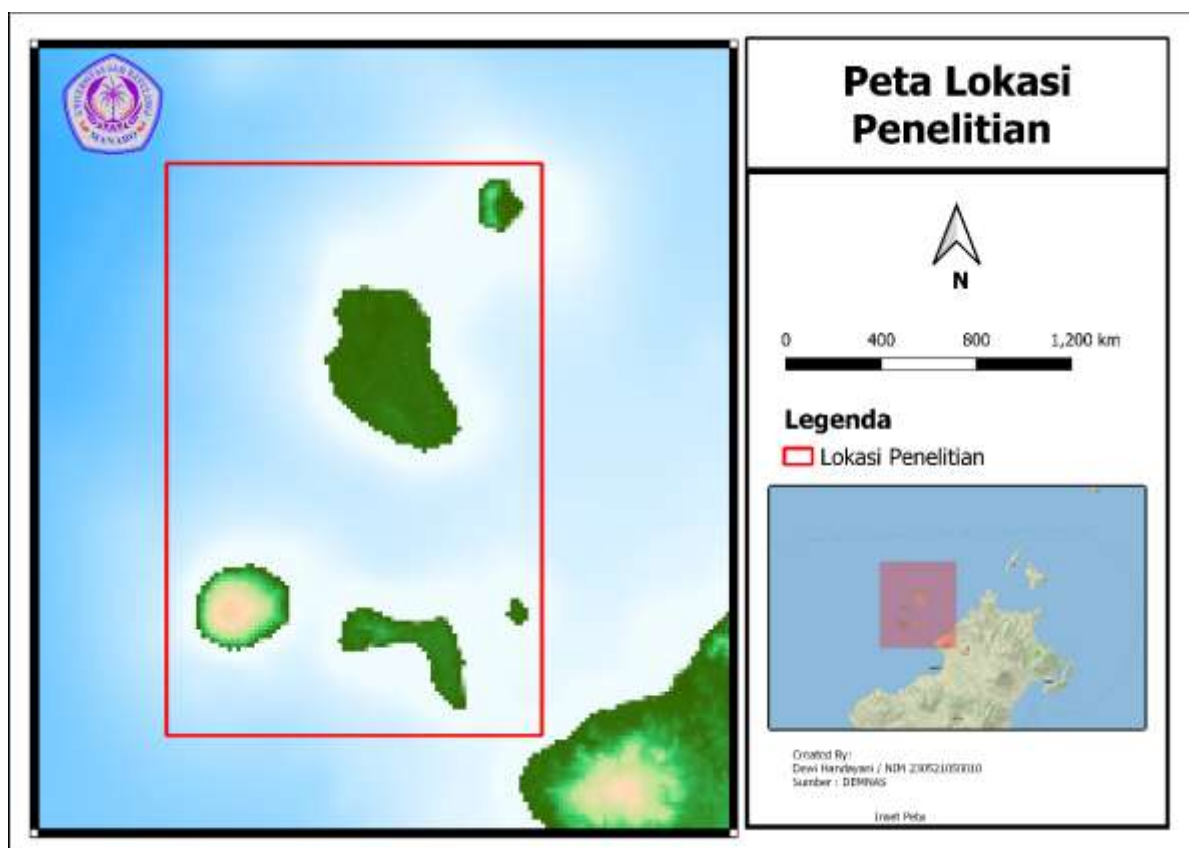


Figure 1. Map of the study area

mangrove dengan menggunakan koefisien manning untuk mangrove, khususnya di pulau-pulau kecil di TNB. Pemodelan tsunami yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan koefisien manning hasil perhitungan dengan menggunakan rumus dari Mazda et al. (1997) dengan data mangrove dari Mazda et al. (1997), Teh et al. (2009), dan Schaduw et al. (2024). Dengan adanya penelitian ini, maka dapat diketahui kemampuan ekosistem mangrove dalam mengurangi dampak terjangan gelombang tsunami. Hal ini dapat digunakan sebagai salah satu opsi dalam upaya mitigasi bencana tsunami.

## MATERIAL DAN METODE

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juni hingga November 2024. Lokasi penelitian dilakukan di pulau-pulau kecil di TNB, yang terdiri atas Pulau Bunaken, Manado Tua, Pulau Mantehage, dan Pulau Nain (Figure 1). Pulau Siladen, meskipun masuk dalam pulau-pulau kecil di TNB, tidak dibahas dalam penelitian ini, karena tidak adanya mangrove dalam pulau tersebut.

Pemodelan tsunami dalam penelitian ini menggunakan bantuan COMCOT, aplikasi *open source* yang menggunakan persamaan gelombang panjang atau persamaan air dangkal dalam menyimulasikan penjalaran tsunami dari sumber pembangkit tsunami sampai ke area pantai. Persamaan air dangkal dalam koordinat spherical digunakan dalam persamaan berikut (Wang and Power, 2011):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi Q) \right\} &= -\frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots 1 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - f Q &= 0 \dots\dots\dots 2 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} + f P &= 0 \dots\dots\dots 3 \end{aligned}$$

di mana:

$\eta$  adalah elevasi permukaan air laut (m)

$(P, Q)$  komponen fluks volume dalam arah  $(x, y)$

$(\phi, \psi)$  merupakan latitude dan longitude

$R$  adalah jari-jari bumi

$g$  adalah percepatan gravitasi bumi

$h$  adalah kedalaman air

$f$  merupakan koefisien gaya coriolis, dengan  $f = \Omega \sin \phi$ ; di mana

$\Omega$  adalah laju rotasi bumi

Persamaan air dangkal linier dalam koordinat Cartesian juga diimplementasikan dalam aplikasi COMCOT, seperti berikut (Wang and Power, 2011):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} &= -\frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots 4 \\ \frac{\partial P}{\partial t} + g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - f Q &= 0 \dots\dots\dots 5 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + g h \frac{\partial \eta}{\partial y} + f P &= 0 \dots\dots\dots 6 \end{aligned}$$

Komponen  $(P, Q)$  menunjukkan komponen fluks volume pada arah  $(x, y)$  merupakan perkalian dari kecepatan dan kedalaman air  $P = hu$  dan  $Q = hv$ .

Ketika tsunami merambat di landas kontinen dan mencapai pantai, persamaan air dangkal linier tidak dapat berlaku. Panjang gelombang tsunami menjadi lebih pendek dan amplitudonya meningkat seiring semakin dangkal

Table 1. Materials used in this research

| Bahan                          | Sumber                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Output                                                                                                              |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Data RBI (Rupa Bumi Indonesia) | Badan Informasi Geospasial ( <a href="https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah">https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/rbi-wilayah</a> )                                                                                                                          | Peta topografi dan batimetri                                                                                        |
| Data Tutupan Lahan             | Digitasi QGIS, merujuk pada <a href="#">Schaduw et al. (2024)</a>                                                                                                                                                                                                                                 | Peta tutupan mangrove                                                                                               |
| Data Parameter Bidang Patahan  | Katalog Global CMT ( <a href="https://www.globalcmt.org/">https://www.globalcmt.org/</a> )<br>( <a href="#">Pusgen, 2017</a> )<br>( <a href="https://luk.staff.ugm.ac.id/gempa/pdf/Pusgen2017PetaGempaIndonesia.pdf">https://luk.staff.ugm.ac.id/gempa/pdf/Pusgen2017PetaGempaIndonesia.pdf</a> ) | Parameter lokasi, dip, slip dan strike bidang patahan <i>history</i> gempa bumi<br>Parameter panjang bidang patahan |

perairan di mana gelombang tsunami merambat. Oleh karena itu, gaya inersia konvektif nonlinier dan gaya gesek dasar menjadi semakin berpengaruh, sebaliknya gaya korolis dan dispersi frekuensi semakin tidak berpengaruh. Persamaan nonlinier air dangkal termasuk di dalamnya efek gaya gesek dasar mampu menggambarkan gerakan aliran di zona daratan.

Pada gelombang tsunami, ketika panjang gelombang menjadi lebih kecil maka amplitud membesar, karena gelombang air merambat di dasar laut yang semakin dangkal ketika semakin dekat dengan pantai. Hal ini disebut dengan fenomena efek pendangkalan atau efek *shoaling*. Sehingga menyebabkan persamaan air dangkal linier secara bertahap

menjadi tidak valid dan efek non-linier yang mendominasi. Sehingga dalam aplikasi COMCOT mengimplementasikan persamaan air dangkal non-linier. Persamaan air dangkal non-linier dalam koordinat *spherical* yang digunakan dalam COMCOT adalah sebagai berikut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \phi} (\cos \phi Q) \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots 7$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{gH}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_x = 0 \dots\dots\dots 8$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + \frac{gH}{R \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} + fP + F_y = 0 \dots\dots\dots 9$$

Dalam koordinat cartesian persamaan air dangkal non-linier seperti berikut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots 10$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = 0 \dots\dots\dots 11$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0 \dots\dots\dots 12$$

di mana  $H$  adalah total kedalaman air ( $H=\eta+h$ ).  $F_x$  dan  $F_y$  merupakan gesekan dalam arah (x,y) dan kedua sisi ini didapatkan dari rumus Manning:

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{7/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \dots\dots\dots 13$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{7/3}} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \dots\dots\dots 14$$

di mana  $n$  adalah koefisien kekasaran Manning yang mungkin bervariasi dalam segala bidang. Data-data yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada Table 1.

Data tutupan mangrove di keempat pulau tersebut merujuk pada penelitian [Schaduw et al. \(2024\)](#) (Figure 2). Nilai koefisien *manning* yang spesifik untuk mangrove di pulau-pulau kecil Taman Nasional Bunaken dari data survey [Schaduw et al. \(2024\)](#) dengan diameter batang 16 cm dengan nilai kerapatan mangrove dalam satuan individu per 100 meter persegi untuk Pulau Manado Tua 4.83, Pulau Bunaken 6.75, Pulau Mantehage 7.77 dan Pulau Nain 6.17. Perhitungan koefisien *manning* merujuk pada persamaan dalam penelitian [Hiraishi and Harada \(2003\)](#) dan [Mazda et al \(1997\)](#).

$$A_0 = A_R + A_T + A_L \dots\dots\dots 15$$

$$A_R = H_R \left( D_R \frac{N_R N_T}{100} \right) \dots\dots\dots 16$$

$$A_T = H_T \left( D_T \frac{N_T}{100} \right) \dots\dots\dots 17$$

$$\text{Dan } A_L = P_L \times H_L \left( D_L \frac{N_T}{100} \right) \dots\dots\dots 18$$

$$V_0 = V_R + V_T + V_L \dots\dots\dots 19$$

Table 2. Data for calculating the mangrove manning coefficient

| Data                                    | Nilai                                                                      | Sumber                                   |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Porositas Daun                          | PL 0,03                                                                    | ( <a href="#">Teh et al., 2009</a> )     |
| Jumlah pohon(dalam 100 m <sup>2</sup> ) | NT 6,75 (Bunaken), 4,8334 (Manado Tua), 7,77083 (Mantehage), 6,1667 (Nain) | ( <a href="#">Schaduw et al., 2024</a> ) |
| Jumlah akar setiap pohon                | NR 300                                                                     | ( <a href="#">Teh et al., 2009</a> )     |
| Diameter daun (setiap pohon)            | DL 3                                                                       | ( <a href="#">Teh et al., 2009</a> )     |
| Diameter batang (meter)                 | DT 0,16                                                                    | ( <a href="#">Schaduw et al., 2024</a> ) |
| Diameter akar (meter)                   | DR 0,037                                                                   | ( <a href="#">Mazda et al., 1997</a> )   |
| Ketinggian Daun                         | HL 3                                                                       | ( <a href="#">Mazda et al., 1997</a> )   |
| Ketinggian batang                       | HT 5,5                                                                     | ( <a href="#">Mazda et al., 1997</a> )   |
| Ketinggian akar                         | HR 0,255                                                                   | ( <a href="#">Mazda et al., 1997</a> )   |
| Gaya Gravitasi Bumi                     | g 9,81                                                                     |                                          |
| grid (meter)                            | x 10                                                                       |                                          |
| grid (meter)                            | y 10                                                                       |                                          |

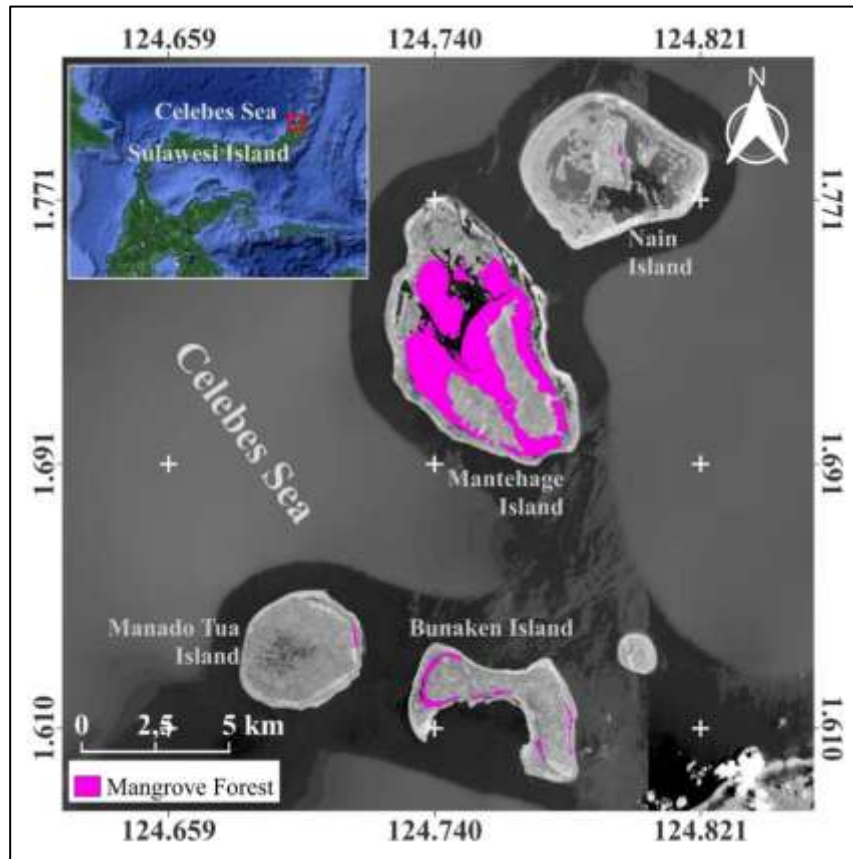


Figure 2. Mangrove cover on the small islands of Bunaken National Park (Schaduw et al., 2024)

$$V_R = H_R \left( \pi \frac{D_R^2}{4} N_R N_T \right) \dots\dots\dots 20$$

$$V_T = H_T \left( \pi \frac{D_T^2}{4} N_T \right) \dots\dots\dots 21$$

$$\text{Dan } V_L = P_L \times H_R \left( \pi \frac{D_L^2}{4} N_T \right) \dots\dots\dots 22$$

$$\text{Dengan } C_d = 8.4 \frac{V_0}{V} + 0.66 \dots\dots\dots 23$$

$$\text{Dan } C_m = 1.7 \dots\dots\dots 24$$

Dengan nilai parameter input dijelaskan pada Figure 3 dan Table 2. Maka, manning dapat dihitung dengan persamaan 25 (Mazda et al., 1997).

$$n = \sqrt{\frac{C_d A_0 D^{\frac{1}{3}}}{2g \Delta x \Delta y}} \dots\dots\dots 25$$

Dengan D adalah kedalaman total, g adalah gravitasi, x dan y adalah grid. Untuk parameter lain digunakan parameter hasil survey dari Teh et al. (2009) dan

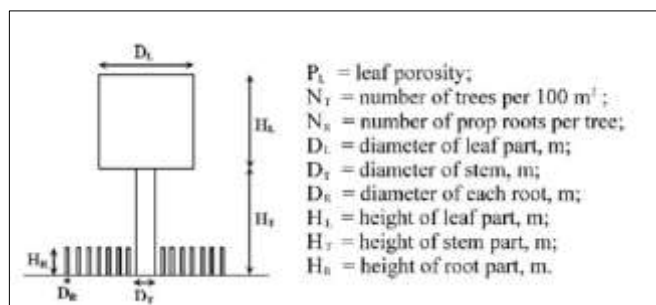


Figure 3. Mangrove Tree Model (Teh et al., 2009)

menghasilkan nilai koefisien *manning* 0.019437 untuk Pulau Mantehage, 0.01756 untuk Pulau Bunaken, 0.01647 untuk Pulau Nain dan Pulau Manado Tua 0.01584.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan secara umum di pulau-pulau kecil Taman Nasional Bunaken (Figure 4) menunjukkan penjalaran gelombang tsunami pada waktu T=0 menit atau saat terjadi gempa bumi. Pada saat tersebut, lempeng benua melepaskan energinya mendorong air laut ke arah utara sehingga di arah utara terjadi kenaikan muka air laut secara tiba-tiba yang digambarkan dengan warna jingga tua. Sebaliknya, di selatan terjadi penurunan muka air laut secara tiba-tiba dengan jumlah yang signifikan yang digambarkan dengan warna biru tua. Pada menit selanjutnya, gelombang air laut terpecah menjalar menjauhi sumber gempa penyebab tsunami. Sedangkan di sekitar lokasi sumber tsunami mengalami penurunan muka air laut. Pada T=6 menit dan T=7 menit memperlihatkan gelombang air pertama telah sampai di pulau-pulau kecil Taman Nasional Bunaken. Pada T=20 menit, di pulau-pulau kecil Taman Nasional Bunaken terjadi penurunan muka air laut signifikan pada bagian yang masuk Kota Manado, sedangkan bagian lain masih mengalami gelombang tinggi. Pada T=40 menit, lautan di daerah penelitian masih mengalami kenaikan dan penurunan gelombang dan pada T=120 menit, keadaan gelombang laut di sekitar pulau-pulau kecil Taman Nasional Bunaken relatif stabil yang ditunjukkan dengan warna putih, biru muda dan kuning.

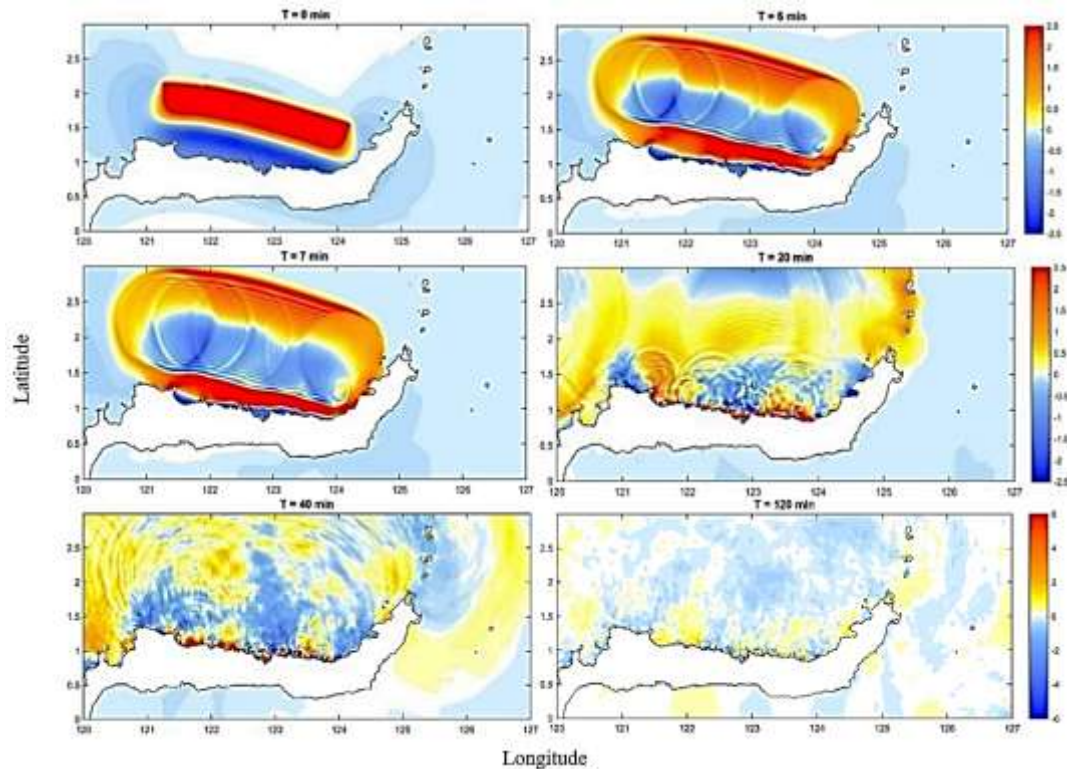


Figure 4. Tsunami wave propagation at T = 0, 6, 7, 20, 40, and 120 minutes

Table 3. Tsunami height on small islands of Bunaken National Park

| Nama Pulau | Estimasi Waktu Tiba (menit) | Ketinggian Tsunami Maksimal (meter) | Jarak Terpendek dari Sumber Gempa (kilometer) |
|------------|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Manado Tua | 6 hingga 8                  | 5,02                                | 222,47                                        |
| Mantehage  | 8 hingga 26                 | 3,23                                | 227,89                                        |
| Bunaken    | 8 hingga 10                 | 5                                   | 228,26                                        |
| Nain       | 13 hingga 16                | 3,86                                | 235,02                                        |

Table 4. Tsunami reduction in small islands of the Bunaken National Park

| Nama Pulau               | Kerapatan Mangrove (individu per 100 meter <sup>2</sup> ) | Lebar Mangrove (meter) | Reduksi Tertinggi (%) |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Manado Tua (Irisan A-A') | 5                                                         | 94                     | -0,074                |
| Mantehage (Irisan B-B')  | 7,77                                                      | 1.256                  | -7, 54                |
| Mantehage (Irisan C-C')  |                                                           | 3.742                  | -5,94                 |
| Mantehage (Irisan D-D')  |                                                           | 1.920                  | -26,48                |
| Mantehage (Irisan E-E')  |                                                           | 364                    | -3,05                 |
| Mantehage (Irisan F-F')  |                                                           | 210                    | -2,67                 |
| Bunaken (Irisan G-G')    | 6,75                                                      | 128                    | -0,0076               |
| Bunaken (Irisan H-H')    |                                                           | 173                    | -1,85                 |
| Bunaken (Irisan I-I')    |                                                           | 53                     | -0,049                |
| Bunaken (Irisan J-J')    |                                                           | 176                    | -0,051                |
| Nain (Irisan K-K')       | 6,167                                                     | 92                     | Belum Tereduksi       |
| Nain (Irisan L-L')       |                                                           | 88                     | -0,044                |

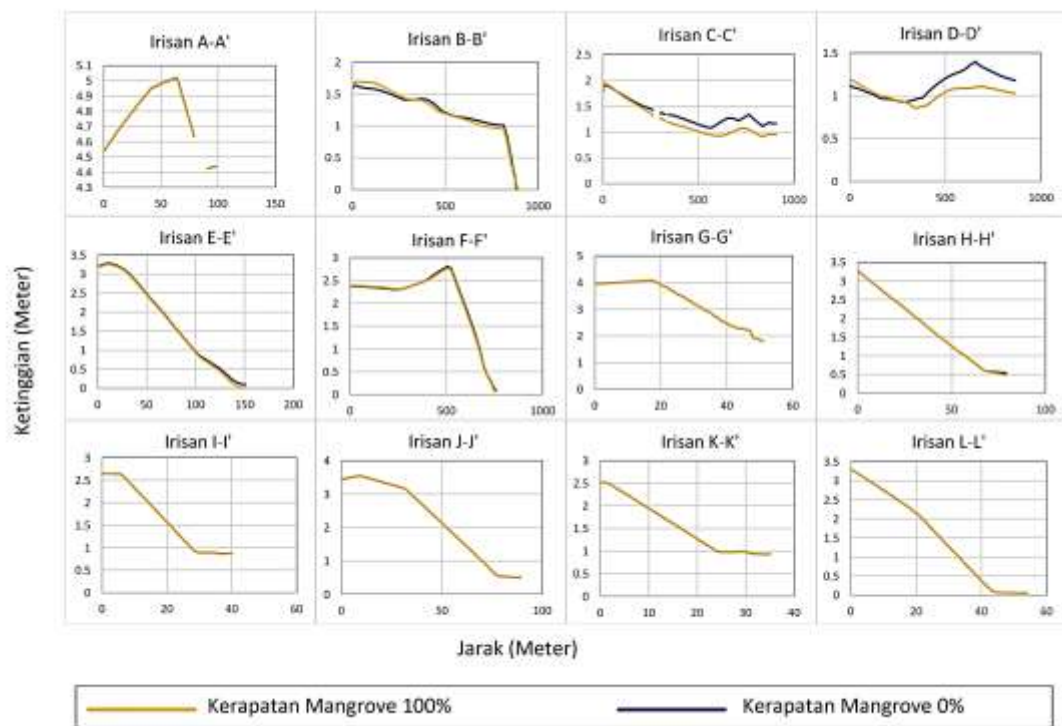


Figure 5. Maximum height of tsunami wave at the intersection location

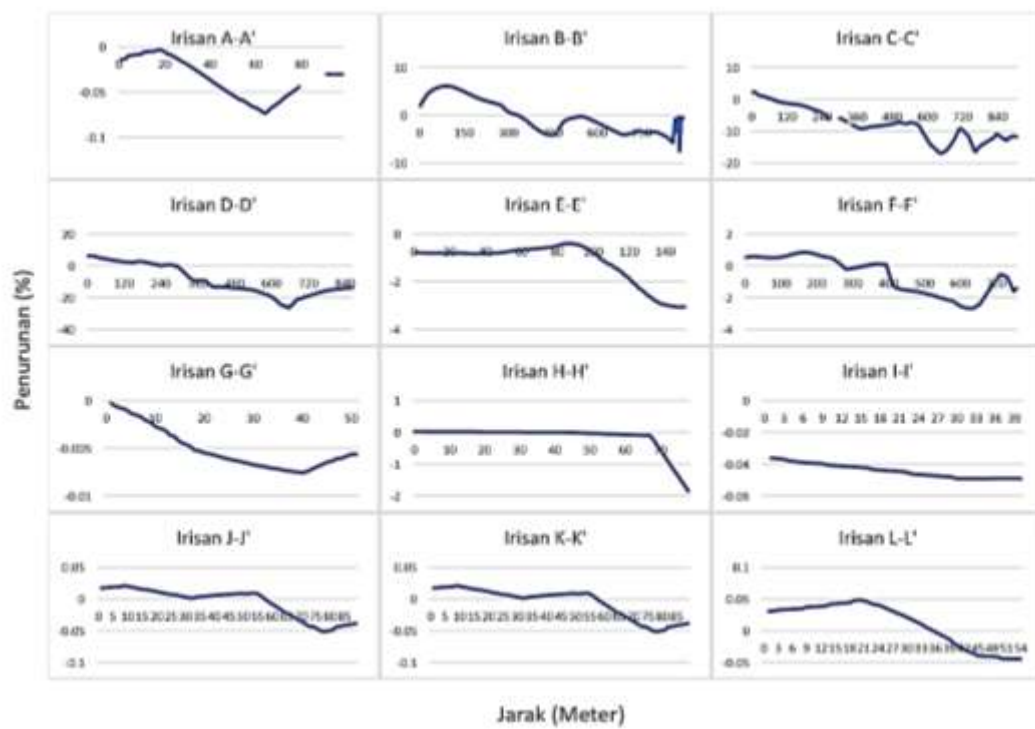


Figure 6. Height of tsunami wave reduction at the intersection location

Ketinggian tsunami di masing-masing pulau memiliki nilai yang berbeda (Table 3). Ketinggian tsunami di pantai bergantung pada kemiringan batimetri dekat dengan pantai (Saputri, 2018), semakin curam batimetri pantai maka ketinggian tsunami akan semakin rendah. Sesuai dengan hal tersebut, pulau yang memiliki batimetri yang curam seperti Manado Tua memiliki ketinggian yang lebih tinggi daripada pulau Mantehage yang memiliki batimetri lebih landai. Ketinggian gelombang tsunami yang sampai di daratan akan mengalami reduksi baik karena adanya topografi, hunian dan benda-benda yang ada di daratan. Pada penelitian ini, diasumsikan daratan hanya berupa tanah terbuka dan hutan mangrove untuk memudahkan dalam melihat peran hutan mangrove dalam mereduksi gelombang tsunami. Reduksi ketinggian gelombang tsunami oleh hutan mangrove pada pemodelan di Pulau Manado Tua, Pulau Mantehage, Pulau Bunaken dan Pulau Nain memiliki persentase reduksi yang berbeda karena input yang berbeda berupa kerapatan pohon dan lebar hutan mangrove (Table 4).

Dari hasil pemodelan, dibuatlah grafik untuk melihat bagaimana ketinggian maksimal gelombang tsunami di daratan (Figure 5). Pada setiap lokasi irisan mengindikasikan adanya reduksi tsunami ketika gelombang tsunami menjalar masuk ke daratan. Pemodelan dengan tanpa mangrove (mangrove 0%) dan pemodelan dengan mangrove (mangrove 100%) dibandingkan dalam persen (Figure 6). Dari grafik perbandingan tersebut, terlihat bahwa hutan mangrove memiliki peran dalam mengurangi ketinggian tsunami yang ditunjukkan dengan grafik menurun hingga mencapai negative di akhir pola grafik.

Untuk mengetahui hubungan korelasi antara kerapatan pohon mangrove dalam 100 meter persegi, ketebalan mangrove dan persentase reduksi tsunami maka dilakukan uji korelasi Spearman karena hubungan yang tidak linier. Pada hasil uji korelasi Spearman pada ketebalan hutan mangrove dan persentase reduksi tsunami memiliki nilai koefisien korelasi 0,87 dan P-value bernilai 0,00045. Sedangkan uji korelasi Spearman pada kerapatan pohon mangrove dalam 100 meter persegi dan persentase reduksi tsunami memiliki nilai koefisien korelasi 0,79 dan P-value 0,00036. Nilai positif pada uji korelasi menunjukkan hubungan positif pada uji korelasi. Artinya semakin tinggi kerapatan pohon mangrove dan lebar hutan mangrove, maka semakin besar persentase reduksi tsunami yang terjadi. Nilai 0,87 menunjukkan hubungan antar variable yang sangat kuat dan 0,79 menunjukkan hubungan variable yang kuat. Nilai P-value pada kedua uji korelasi menunjukkan hubungan yang sangat kuat secara statistic, sehingga kecil kemungkinan terjadi secara kebetulan. Hal ini sesuai dengan Yanagisawa et al. (2010), bahwa pengurangan ketinggian tsunami bergantung pada kerapatan pohon dan lebar hutan.

Jika dilihat dari Figure 5 dan Figure 6, maka reduksi tsunami juga dipengaruhi oleh topografi di daratan. Pada irisan K-K' grafik reduksi oleh mangrove hilang saat grafik mulai mengalami penurunan namun belum bernilai negatif. Hal tersebut menandakan adanya kenaikan gelombang tsunami karena akumulasi energi gelombang karena keberadaan hutan mangrove, namun reduksi oleh hutan mangrove belum terjadi. Umumnya, gelombang tsunami di Pulau Nain akan tereduksi setelah melewati hutan mangrove dengan lebar 35 meter, namun pada jarak tersebut gelombang tsunami di irisan K-K' telah tereduksi maksimal (tsunami habis).

## KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan, bahwa korelasi positif yang kuat antara kerapatan dan lebar mangrove dengan reduksi ketinggian tsunami menegaskan perlunya prioritas pada konservasi dan restorasi mangrove dalam strategi pengelolaan pesisir. Selain itu, penguatan ekosistem mangrove tidak hanya mengurangi risiko tsunami, tetapi juga meningkatkan ketahanan jangka panjang bagi komunitas pesisir yang rentan.

**Ucapan terima kasih.** Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penulisan artikel ini. *"Kami menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dengan organisasi manapun mengenai bahan yang didiskusikan dalam naskah ini."*

## REFERENSI

- HALL, R. and SPAKMAN, W. (2015) Mantle structure and tectonic history of SE Asia. *Tectonophysics*, 658, pp. 14-45.
- HIRAISHI, T. and HARADA, K. (2003) Greenbelt tsunami prevention in South-Pacific region. *Report of the Port and Airport Research Institute*, 42(2), pp. 3-25.
- MAZDA, Y., WOLANSKI, E., KING, B., SASE, A., OHTSUKA, D. and MAGI, M. (1997) Drag force due to vegetation in mangrove swamps. *Mangroves and Salt Marshes*, 1, pp. 193-199.
- PUSGEN (2017) *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Studi Gempa Nasional. Jakarta: Kementrian PUPR.
- SAPUTRI, F. (2018) *Pengaruh Kemiringan dan Bentuk Pantai Terhadap Ketinggian Tsunami Di Cilacap*. Skripsi. Tangerang Selatan.
- SCHADUW, J.N.W. (2016) Kondisi ekologi mangrove Pulau Bunaken, Kota Manado, Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Sains LPPM UNSRAT bidang Sains dan Teknologi*, 3(2), pp. 64-74.
- SCHADUW, J.N.W., TALLEI, T.E. and SUMILAT, D.A. (2024) Mangrove Health Index, Community Structure and Canopy Cover in Small Islands of Bunaken National Park, Indonesia: Insights into Dominant Mangrove Species and Overall Mangrove Condition. *Tropical Life Sciences Research*, 35(2), pp. 187-210.
- SILVER, E.A. and Moore, J.C. (1978) The Molucca sea collision zone, Indonesia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 83(B4), pp. 1681-1691.
- TEH, S.Y., KOH, H.L., LIU, P.L.F., ISMAIL, A.I.M. and LEE, H.L. (2009) Analytical and numerical simulation of tsunami mitigation by mangroves in Penang, Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(1), pp. 38-46.
- WANG, X. and POWER, W. (2011) *Comcot: A tsunami generation, propagation, and run-up model*. Institute of Geological and Nuclear Sciences.
- YANAGISAWA, H., KOSHIMURA, S., MIYAGI, T. and IMAMURA, F. (2010). Tsunami damage reduction performance of a mangrove forest in Banda Aceh, Indonesia inferred from field data and a numerical model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C6).