



**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN UNGGULAN UNIB 2022**

JUDUL PENELITIAN

**KAJIAN EFEKTIVITAS VEGETASI PANTAI DALAM
MEREDUKSI ENERGI TSUNAMI DI KAWASAN WISATA
PANTAI PANJANG KOTA BENGKULU**

Tim Peneliti:

Dr. Yulian Fauzi, M.Si. (0027077205)

Dr. Hardiansyah, ST., MT. (0013088301)

Zulfia Memi Mayasari, S.Si, M.Si. (0002127301)

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BENGKULU**

2022

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian : **Kajian Efektivitas Vegetasi Pantai dalam Mereduksi Energi Tsunami di Kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu**

Ketua Peneliti

a. Nama Lengkap : Dr. Yulian Fauzi, M.Si
b. NIP : 197312021998022001
c. NIDN : 0002127301
d. Pangkat/Golongan : Pembina Tk I / IV b
e. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
f. Fakultas/Jurusan : MIPA/Matematika
g. Pusat Penelitian : Universitas Bengkulu
h. Alamat Institusi : Jl. WR. Supratman, Kandang Limun Bengkulu
i. Nomor HP/ email : 081373190203/yulianfauzi@unib.ac.id

Peneliti Anggota : 2 orang

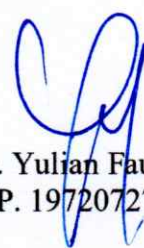
Nama Anggota 1 : Dr. Hardiansyah, ST., MT
NIDN : 0013088301
Bidang Keahlian : Modeling dan Transportasi

Nama Anggota 2 : Zulfia Memi Mayasari, S.Si. M.Si
NIDN : 0002127301
Bidang Keahlian : Aljabar

Biaya yang diusulkan : **Rp. 45.000.000,-**
Biaya total penelitian : **Rp. 45.000.000,-**

Bengkulu, 20 Desember 2022

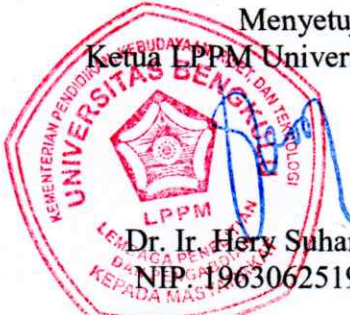
Ketua,


Dr. Yulian Fauzi, M.Si
NIP. 197207271998021001


Wakil Dekan Akademik
Fakultas MIPA

Dr. Jarulis, S.Si., M.Si
NIP. 197511252005011013

Menyetujui
Ketua LPPM Universitas Bengkulu


Dr. Ir. Hery Suhartoyo, M.Sc
NIP. 196306251987031002

RINGKASAN

Hutan pantai merupakan sabuk hijau yang relatif ampuh dijadikan sebagai peredam energi tsunami. Kajian efektifitas hutan pantai sebagai peredam energi tsunami di kawasan wisata pantai sangat penting dilakukan sebagai upaya meminimalisir potensi risiko bencana tsunami di kawasan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan gambaran efektifitas hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah 1). Memodelkan beberapa skenario jenis vegetasi pantai, luasan vegetasi dan kerapatan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. 2) Menginventarisir luasan dan kerapatan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami sebagai upaya menciptakan tingkat kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Tahapan untuk mencapai tujuan penelitian ini dilakukan dengan cara: pengumpulan data dan bahan penelitian, pemetaan kawasan hutan pantai, penetapan skenario luasan dan kerapatan hutan pantai, pemodelan spasial genangan dengan skenario luasan dan kerapatan hutan pantai menggunakan ArcGIS serta validasi dan analisis efektifitas hutan pantai untuk mereduksi energi tsunami menggunakan *Spatial Multi-Criteria Analysis* (SMCA). Inovasi yang dikembangkan adalah memodelkan sabuk hijau berupa hutan pantai dan pengaruhnya terhadap potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata pantai, sebagai upaya merencanakan dan mengembangkan mitigasi bencana tsunami. Hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi tsunami 10 meter di garis pantai penjalaran genangan tsunami di daratan berkisar antara 170 – 335 meter. Jangkauan sejauh ini berada di sekitar *Sport Center* karena hutan pantai yang berada di depan lokasi ini merupakan hutan pantai dengan kerapatan rendah. Kawasan hutan pantainya dengan kerapatan tinggi cenderung jangkauan tsunaminya tidak terlalu jauh ke daratan, tetapi untuk hutan pantainya yang kerapatannya rendah maka jangkauan tsunami sangat jauh sampai ke daratan. Hasil simulasi genangan tsunami dengan ketinggian 10 meter di garis pantai menunjukkan bahwa pengaruh vegetasi/hutan pantai di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu sangat berarti dalam mereduksi energi tsunami. Simulasi pemodelan genangan tsunami tanpa hutan pantai menghasilkan model luas genangan tsunami seluas 60,6 Ha, sedangkan dengan adanya hutan pantai menghasilkan genangan tsunami seluas 49,6 Ha. Keberadaan hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu mampu mereduksi energi tsunami sebesar 20%.

Kata kunci: Hutan Pantai, Sabuk Hijau, Tsunami, dan Pantai Panjang Kota Bengkulu.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat_Nya peneliti dapat menyelesaikan laporan kemajuan Penelitian Unggulan Universitas Bengkulu Tahun 2023 dengan judul : **Kajian Efektivitas Vegetasi Pantai dalam Mereduksi Energi Tsunami di Kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu**. Penelitian ini dilaksanakan untuk mendapatkan gambaran secara spasial tentang efektivitas vegetasi dalam meredam gelombang tsunami di Kota Bengkulu khususnya di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Potensi sebaran tsunami dimodekan dengan menggunakan model spasial Berryman dengan mengacu pada ketinggian tsunami yang dikeluarkan oleh BNPB. Pengaruh vegetasi dalam meredam gelombang tsunami dikaji melalui simulasi nilai indeks kekasaran permukaan di kawasan hutan Pantai Panjang Kota Bengkulu. Laporan kemajuan penelitian ini disusun sesuai dengan keterbatasan dan kemampuan yang peneliti miliki. Peneliti merasakan banyak sekali kekurangan khususnya yang berkaitan dengan pengumpulan data dalam skala detail dan data real pengaruh vegetasi pantai di Kota Bengkulu. Untuk itu peneliti mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan laporan penelitian ini kemudian.

Demikianlah laporan ini disusun agar dapat berguna dan kemajuan bagi kita semua di masa yang akan datang

Bengkulu, Desember 2022
peneliti

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| HALAMAN PENGESAHAN | ii |
| RINGKASAN | iii |
| PRAKATA | iv |
| DAFTAR ISI | v |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR | v |
| DAFTAR LAMPIRAN | vii |
| | |
| BAB I. PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| | |
| BAB II. TINJAUAN PUSTAKA | 3 |
| 2.1. Landasan Teori | 3 |
| 2.2. Tsunami | 4 |
| 2.3. Model Genangan Tsunami | 5 |
| 2.4. Peran Hutan Pantai dalam Mitigasi Tsunami | 7 |
| 2.5. Peta Jalan Penelitian | 8 |
| | |
| BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN | 11 |
| 3.1. Tujuan Penelitian | 11 |
| 3.2. Manfaat Penelitian | 11 |
| | |
| BAB IV. METODE PENELITIAN | 13 |
| 4.1. Data Penelitian | 13 |
| 4.2. Langkah Penelitian | 13 |
| 4.2.1. Pengumpulan Data | 13 |
| 4.2.2. Penentuan Skenario Hutan Pantai | 14 |
| 4.2.3. Pemodelan Genangan Tsunami | 14 |
| | |
| BAB V. HASIL DAN LUARAN DICAPAI | 17 |
| 5.1. Deskripsi Daerah Penelitian | 17 |
| 5.1.1. Geografis | 17 |
| 5.1.2. Hutan Pantai..... | 18 |
| 5.2. Hasil Penelitian | 19 |
| 5.2.1. Pengumpulan Data Spasial | 19 |
| 5.2.2. Pemodelan Genangan Tsunami | 22 |
| 5.2.3. Penentuan Skenario Hutan Pantai | 23 |
| 5.2.4. Simulasi Kerapatan Hutan Pantai dalam Mereduksi Energi Tsunami | 26 |
| 5.3. Pengujian Keefektifan Hutan Pantai dalam Mereduksi Energi Tsunami | 29 |
| | |
| BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN | 31 |
| 6.1. Kesimpulan | 31 |
| 6.2. Saran | 31 |
| | |
| DAFTAR PUSTAKA | 32 |
| LAMPIRAN | 34 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 4.1. Bahan Penelitian | 13 |
| Tabel 5.1. Persentase Luas Masing-masing Kelurahan | 17 |
| Tabel 5.2. Data Penelitian | 21 |
| Tabel 5.3. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan | 22 |
| Tabel 5.4. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan Hutan Pantai ... | 27 |
| Tabel 5.5. Luasan dan Jangkauan Genangan Tsunami dengan Berbagai Skenario | 29 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1. Hubungan Kecepatan Gelombang Tsunami dengan Tinggi Genangan | 5 |
| Gambar 2.2. Tingkat kerusakan pohon berdasarkan perbandingan diameter batang dan tinggi tsunami di atas permukaan tanah | 8 |
| Gambar 2.3. Ketinggian tsunami saat memecah pepohonan dalam kaitannya dengan diameter pohon setinggi dada | 8 |
| Gambar 2.4. Peta Jalan Penelitian | 10 |
| Gambar 4.1. Bagan Alir Penelitian | 16 |
| Gambar 5.1. Peta Citra Wilayah Penelitian | 20 |
| Gambar 5.2. Foto Pengukuran Lapangan | 21 |
| Gambar 5.3. Pengaruh hutan pantai terhadap jangkauan tsunami di daratan di <i>Sport Center</i> dan <i>Bencollen Mall</i> | 23 |
| Gambar 5.4. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 meter di Kecamatan Ratu Samban Kota Bengkulu | 24 |
| Gambar 5.5. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 meter di Sport Center dan Bencollen Mall | 25 |
| Gambar 5.6. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Kerapatan Hutan Pantai | 26 |
| Gambar 5.7. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Kerapatan dan Luas Hutan Pantai | 28 |

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Draft Artikel Ilmiah pada Jurnal Internasional

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu merupakan salah satu pantai terbaik yang berada di Provinsi Bengkulu dan semakin ramai dikunjungi oleh wisatawan dari tahun ke tahun. Penataan kawasan pantai baik yang dilakukan oleh pemerintah maupun swasta menjadikan kawasan ini menjadi primadona untuk dikunjungi oleh wisatawan. Banyak pusat-pusat keramaian yang dibangun dikawasan ini seperti *Sport Center*, *Bencoolen Mall* dan hotel. Ramainya kunjungan wisatawan baik lokal maupun dari luar daerah menjadikan kawasan ini menjadi salahsatu kawasan yang rentan terhadap bencana khususnya bencana tsunami. Untuk itu pemerintah daerah dan pihak-pihak yang terkait harus berperan aktif dalam mensosialisasikan kerentanan bencana tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu (Fauzi dkk., 2021).

Tsunami merupakan bencana alam yang ditimbulkan oleh gempa bumi dan bencana ini sangat sulit untuk diprediksi kapan akan terjadi, disamping itu efek bahaya yang ditimbulkan juga sangat dahsyat sehingga dibutuhkan upaya untuk mengurangi risiko dari bencana tersebut (Fauzi dkk., 2020). Melihat efek bahaya yang ditimbulkan bencana tsunami tidaklah kecil, maka perlu adanya sistem manajemen mitigasi bencana tsunami khususnya pada pra bencana. Upaya mitigasi bencana tsunami dapat dilakukan secara alami melalui penanaman sabuk hijau (*green belt*) berupa hutan pantai. Harada dan Imamura (2002) menyatakan efektifitas hutan pantai dengan tebal hutan pantai 200 meter, kerapatan 30 pohon per 100 meter persegi, dan diameter pohon 15 cm mampu meredam tsunami sebesar 50 %.

Hutan pantai merupakan sabuk hijau yang relatif ampuh dijadikan sebagai peredam energi tsunami. Indonesia merupakan salah satu negara yang pernah memiliki hutan pantai terbesar kedua di dunia (Diposaptono dan Budiman, 2008). Sejauh ini kajian aspek teknis terhadap fungsi dan peran vegetasi pantai sebagai pelindung daerah pantai masih tergolong sangat kurang dilakukan di Indonesia. Penelitian lebih lanjut terhadap perilaku dari berbagai jenis pohon pantai dalam mitigasi bencana tsunami masih dibutuhkan, namun terdapat berbagai sumber pengetahuan yang ada saat ini yang dapat menjelaskan kinerja hutan pantai dalam menghadapi gelombang tsunami yang menghempas pantai, sebagian besar didasarkan pada hasil eksperimen empiris dan laboratorium. Dengan didukung oleh beberapa hasil penyelidikan lapangan pasca bencana tsunami, pengetahuan

yang ada saat ini untuk batas tertentu dapat digunakan sebagai panduan terhadap aplikasi yang mungkin dari hutan pantai sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana tsunami. Penilaian terhadap Efektifitas vegetasi dalam mereduksi tsunami dapat dilakukan melalui analisis spasial dengan cara memberi bobot pada variabel luas, kerapatan dan diameter vegetasi (Susanto dkk., 2019).

Secara umum, hutan pantai di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu didominasi oleh tumbuhan cemara laut (*casuarina sp*). Keberadaan cemara laut dapat dipergunakan sebagai tanaman campuran dengan jenis tanaman lainnya, karena tanaman ini tahan terhadap angin. Kajian efektifitas hutan pantai sebagai peredam energi tsunami di kawasan wisata pantai sangat penting dilakukan sebagai upaya meminimalisir potensi risiko bencana tsunami di kawasan tersebut. Banyaknya aktifitas penduduk dan wisatawan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu perlu diantisipasi dan direncanakan tingkat keselamatannya jika terjadi bencana tsunami. Berdasarkan kondisi terkini yang ada di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu maka diperlukan adanya kajian atau penelitian tentang efektifitas hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami sebagai upaya mitigasi bencana.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

Hutan pantai memiliki peranan yang penting dalam mengurangi risiko bencana khususnya bencana tsunami. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa 30 pohon pada luasan hutan pantai sebesar 100 m² dengan lebar 100 m pada sepanjang sabuk hijau di pesisir mampu mengurangi maksimum tekanan aliran tsunami, dimana maksimum tekanan aliran menjadi <10% dari tekanan awal. Danielsen *et al.* (2005) melakukan penelitian terkait manfaat vegetasi pantai dalam mengurangi dampak kerusakan di pesisir oleh tsunami. Daerah penelitian memiliki garis pantai yang lurus, profil pantai yang seragam, dan kemiringan lereng yang seragam. Di sepanjang pantai terdiri atas area yang bervegetasi maupun tidak bervegetasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tsunami telah menghancurkan bangunan-bangunan di wilayah pesisir tanpa perlindungan mangrove. Namun demikian, bangunan-bangunan yang berada di belakang mangrove tidak mengalami kerusakan. Sedangkan desa-desa yang terletak di antara tanaman *Casuarina* di sepanjang pantai mengalami rusak sebagian. Tanaman ini tidak mengalami kehancuran, kecuali pada area dengan 5 sampai 10 jumlah pohon dekat pantai yang mengalami kerusakan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa mangrove dan tanaman *Casuarina* mampu mengurangi gelombang tsunami dan melindungi pesisir pantai dari kerusakan.

Hasil pemodelan Yanagisawa *et al.* (2010) menunjukkan bahwa lebar mangrove 500 m berpotensi mengurangi gaya hidrodinamika sampai 70% pada gelombang lebih kecil dari 3 m. Namun demikian, saat gelombang meningkat sampai 4 m, hutan mangrove yang berumur 10 tahun akan hancur. Sedangkan pada hutan mangrove berumur 30 tahun mampu bertahan dari gelombang tsunami dengan ketinggian 5 meter sebesar 80% dan mampu menyerap 50% gaya hidrodinamika. Oleh karena itu, ketinggian gelombang tsunami dan ketebalan hutan pantai merupakan faktor penting untuk melindungi dari gelombang tsunami. Meskipun hutan pantai rusak akibat gelombang tsunami yang tinggi tidak mampu melindungi pesisir secara penuh, namun demikian keberadaannya tetap mampu mengurangi risiko yang besar pada area-area di belakang hutan pantai.

Shuto (1987) dalam Yudhicara (2015) menguraikan manfaat dari hutan pantai dalam mengurangi dampak tsunami dengan beberapa alasan: 1) menghentikan kayu

apung dan sampah lainnya; 2) mengurangi kecepatan aliran air dan kedalaman genangan; 3) menyediakan jerat yang menyelamatkan jiwa bagi orang-orang tersapu tanah oleh tsunami *run-down*; dan 4) mengumpulkan pasir yang tertiu angin dan menciptakan bukit pasir, yang berfungsi sebagai penghalang alami terhadap tsunami. Namun, penting untuk dicatat bahwa, dalam kasus tsunami besar, jalur pohon atau hutan yang sempit mungkin tidak efektif dalam memberikan perlindungan, dan dalam beberapa kasus bahkan dapat menimbulkan lebih banyak kerusakan karena pohon tumbang yang mengalir ke daratan. Vegetasi mangrove terbukti mampu menyelamatkan kehidupan dan sumber daya wilayah pesisir dari bencana tsunami Samudra Hindia tahun 2004. Rumah-rumah di belakang hutan pantai di Pantai Serambu, Nias Barat, terselamatkan dari gelombang setinggi 3-4 meter, sementara rumah-rumah di belakang kebun kelapa banyak yang hancur. Hutan pantai (lebar 40 meter) juga terbukti mengurangi tinggi tsunami di Cikalong, Jawa Barat dari bencana tsunami Pangandaran. Dari pantauan citra satelit menunjukkan permukiman/rumah yang di depannya tidak terdapat vegetasi pantai mengalami kehancuran total, sedangkan areal yang ditumbuhi beberapa vegetasi hanya rusak ringan akibat tsunami Pangandaran setinggi 4-5 meter.

Kapasitas hutan untuk mengurangi dampak tsunami dapat dimodelkan dengan dinamika fluida. Model-model ini, yang menguji hubungan hidrodinamika fluida yang bergerak melalui vegetasi, memerlukan berbagai parameter dan koefisien terkait untuk memperkirakan ketahanan hutan terhadap tsunami dengan ketinggian dan tekanan yang berbeda. Angka yang paling penting untuk didapatkan adalah *volumetric occupancy*, koefisien drag, koefisien inersia dan koefisien kekasaran Manning. Hal ini diperkirakan dari pengukuran diameter dan tinggi batang pohon, tinggi dan kerapatan tajuk, serta kerapatan pohon.

2.2. Tsunami

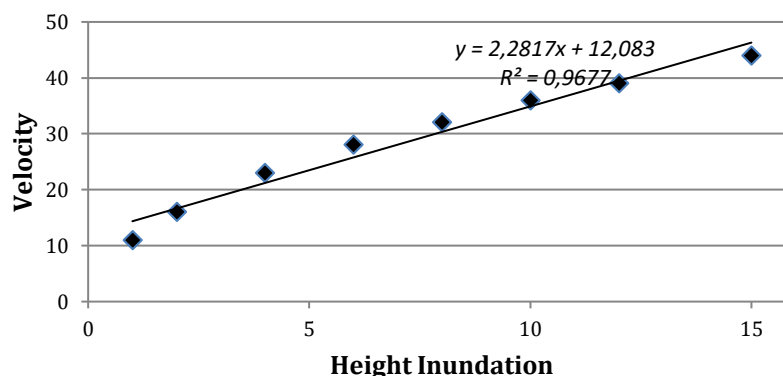
Gelombang tsunami terbentuk akibat tubuh air laut mengalami gangguan dalam skala besar dan dalam jangka waktu yang relatif singkat. Besar kecilnya gelombang tsunami sangat ditentukan oleh karakteristik gempa bumi (parameter sesar, magnitudo, lokasi dan kedalaman) yang memicunya dan material penyusun dasar laut (Jaffe dan Gelfenbuam, 2007; Dao *et al.*, 2007; Bryant, 2008; Latief, 2013; dan Flouri *et al.*, 2013). Tsunami akan membentuk seri gelombang dengan kecepatan tertentu, dengan menggunakan prinsip hukum kekekalan energi. Kecepatannya gelombang tsunami tergantung pada kedalaman air, sehingga gelombang tersebut mengalami percepatan atau

perlambatan ketika melintasi kedalaman yang berbeda-beda. Kecepatan tsunami di daratan dapat dihitung berdasarkan ketinggian genangan tsunami di daratan, menggunakan persamaan Annunziato dan Best, (2005):

$$V = \sqrt{g \cdot h} \quad (1)$$

dimana: V = cepat rambat gelombang
 g = percepatan gravitasi bumi (9,8 m/s)
 h = kedalaman laut

Hubungan antara cepat rambat gelombang tsunami dengan tinggi genangan (*run up*) dapat dilihat dalam gambar berikut (Fauzi, 2015):



Gambar 2.1. Hubungan Kecepatan Gelombang Tsunami dengan Tinggi Genangan

Pada beberapa kasus tsunami dapat berupa gelombang pasang naik yang terjadi sangat cepat yang langsung membanjiri daerah pesisir rendah. Pada kasus lainnya tsunami dapat datang sebagai bentuk dinding air vertikal yang bersifat turbulen dengan daya rusak tinggi. Morfologi pantai berbentuk teluk dengan batimetri yang dangkal akan menyebabkan tinggi gelombang tsunami menjadi semakin besar, yang merupakan fungsi dari perubahan batimetri dan lebar alur yang dilewati (Santius, 2015).

2.3. Model Genangan Tsunami

Pemodelan genangan tsunami digunakan untuk mengestimasi genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan dan umumnya model ini dikembangkan melalui metode empiris. Beberapa model genangan yang telah dikembangkan untuk mengestimasi genangan tsunami menggunakan variabel ketinggian *run up* di garis pantai, kemiringan lereng dan kekasaran permukaan. Persamaan yang digunakan untuk mengetahui jarak genangan ke arah darat yang dituangkan dalam Persamaan 2 (Hills dan Mader, 1997)

$$X_{max} = \frac{0,06 (H_0)^{4/3}}{n^2} \quad (2)$$

Persamaan ini digunakan untuk mencari ketinggian *run up* maksimum untuk pantai yang landai-datar (Hills & Mader, 1997). Perkembangan persamaan ini dimodifikasi oleh Khomarudin dan Kongko (2011). Untuk mencari nilai kekasaran permukaan. Persamaan untuk mencari nilai kekasaran permukaan ditulis sebagai berikut:

$$n^2 = \frac{0,06 (H_0)^{4/3}}{X_{max}} \quad (3)$$

dimana:

X_{max} = Jarak genangan dari garis pantai ke arah darat

H_0 = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai

n = Koefisien kekasaran permukaan

k = Konstanta

Pemodelan genangan tsunami digunakan untuk mengestimasi genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan dan umumnya model ini dikembangkan melalui metode empiris. Beberapa model genangan yang telah dikembangkan untuk mengestimasi genangan tsunami menggunakan variabel ketinggian *run up* di garis pantai, kemiringan lereng dan kekasaran permukaan. Persamaan ini dikembangkan melalui perhitungan matematis berdasarkan kalkulasi kehilangan ketinggian tsunami persatu meter jarak genangan. Salasatu metode yang dikembangkan untuk memodelkan genangan tsunami didaratan adalah metode *Hloss*.

Metode *Hloss* merupakan metode pemodelan genangan berdasarkan ketinggian gelombang dari garis pantai, kemiringan lereng, dan koefisien kekasaran permukaan. Persamaan ini diimplementasikan menggunakan fungsi *cost-distance* yang menghitung jarak ke sumber terdekat untuk setiap piksel, dengan cara meminimalkan jarak yang ditentukan dalam suatu permukaan biaya. Sumber untuk fungsi adalah nilai piksel yang mewakili gelombang laut/tsunami, dan permukaan biaya adalah piksel yang mewakili hilangnya ketinggian gelombang tsunami (*Hloss*), dengan n adalah piksel kekasaran permukaan dan S merupakan piksel kemiringan lereng. Persamaan modifikasi disajikan dalam Persamaan 4.

$$H_{loss} = \left(\frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \quad (4)$$

dimana:

- H_{loss} = Penurunan ketinggian air permeter dari jarak genangan
 n = Koefisien kekasaran permukaan
 H_0 = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai
 S = Lereng

Model genangan tsunami belum didukung oleh kajian teoritis sehingga dapat memberikan hasil yang kurang baik ketika diterapkan pada wilayah pesisir yang berbeda.

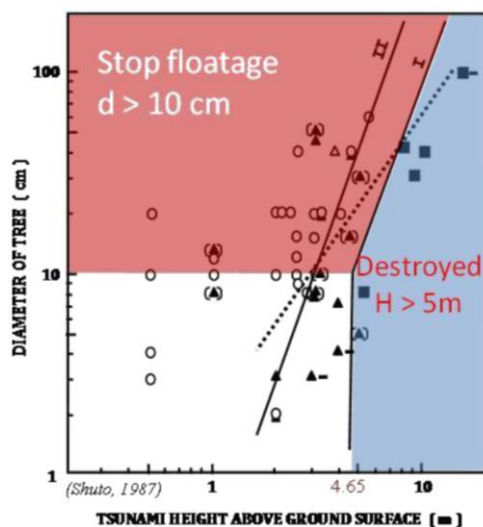
2.4. Peran Hutan Pantai dalam Mitigasi Tsunami

Peran atau fungsi dari hutan pantai dalam mereduksi tsunami dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Sebagai perangkap, yaitu untuk menghentikan kayu yang hanyut, reruntuhan bangunan yang hancur dan puing lainnya,
- 2) Sebagai peredam energi tsunami, yaitu efek untuk mengurangi kecepatan aliran air, tekanan aliran, dan kedalaman genangan air,
- 3) Sebagai pegangan, yaitu untuk menjadi sarana penyelamatan diri bagi orang-orang yang tersapu oleh tsunami dengan cara berpegangan pada cabang-cabang pohon,
- 4) Sebagai sarana melarikan diri, yaitu untuk menjadi cara untuk melarikan diri dengan cara memanjat pohon,
- 5) Sebagai pembentuk gumuk pasir, yaitu untuk mengumpulkan pasir yang tertiuap angin dan membentuk gumuk/bukit, yang bertindak sebagai penghalang alami terhadap tsunami.

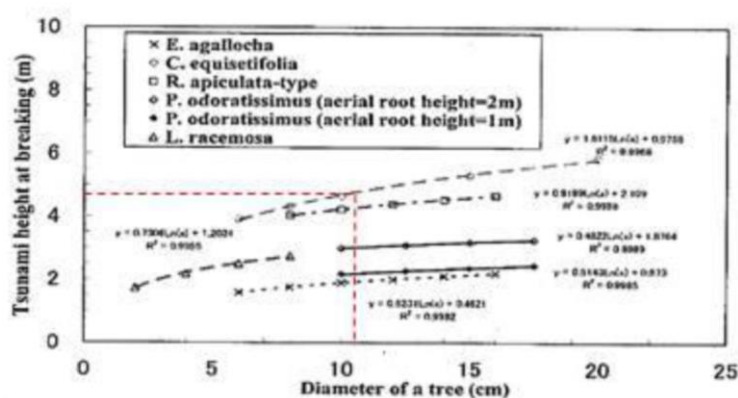
Penelitian yang membahas atau memformulasikan kapasitas hutan pantai terhadap kekuatan tsunami masih sangat terbatas. Namun demikian, beberapa penelitian telah dapat digunakan sebagai dasar untuk mendesain hutan pantai terhadap tsunami. Dari beberapa penelitian yang pernah dilakukan sampai saat ini, dapat disimpulkan bahwa secara umum hutan pantai hanya sedikit memberikan aspek mitigasi terhadap genangan tsunami dengan ketinggian lebih dari lima meter (Dirjen KP3K KKP, 2012). Dengan kata lain jika ketinggian tsunami di garis pantai lebih dari 5 meter, maka pengaruh hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami sangat kecil.

Shuto (1987) dalam Yudhicara (2015) dalam penelitiannya mengumpulkan beberapa wilayah hutan pantai dari lima kejadian tsunami besar di Jepang yang diwujudkan dalam Gambar 2.2. Grafik tersebut menunjukkan situasi kerusakan hutan pinus (kebanyakan pohon pinus hitam dan sebagian kecil pohon pinus merah) dengan perbandingan diameter batang dan ketinggian tsunami dari permukaan tanah.



Gambar 2.2. Tingkat kerusakan pohon berdasarkan perbandingan diameter batang dan tinggi tsunami di atas permukaan tanah

Tanaka, dkk (2006) dalam Yudhicara (2015) menyajikan grafik pada Gambar 2.3 yang menghubungkan diameter batang beberapa pohon lainnya (*Exoecaria agallocha*, *Casuarina equisetifolia*, *Rhizophora apiculata*, *Pandanus odoratissimus*, *Lumnitzera racemosa*) dengan tinggi tsunami maksimum yang tersedia di lokasi bencana dimana pohon-pohon ditemukan tumbang atau patah setelah tsunami. Data ini dikumpulkan dari investigasi lapangan pasca tsunami di Sri Lanka and Thailand.



Gambar 2.3. Ketinggian tsunami saat memecah pepohonan dalam kaitannya dengan diameter pohon setinggi dada

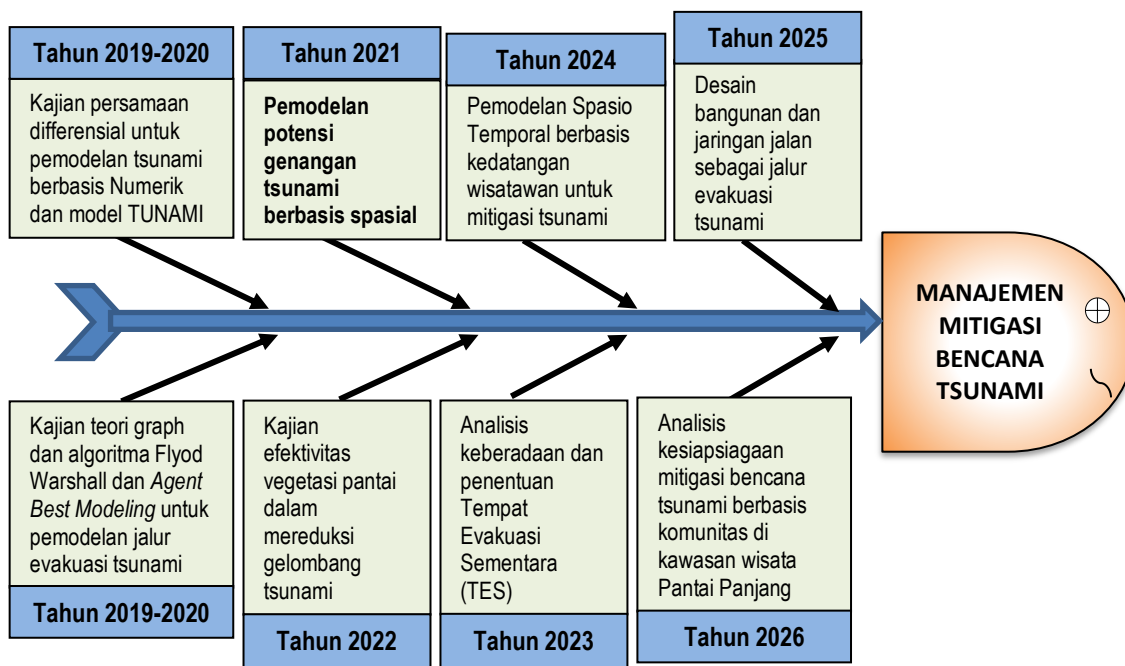
2.5. Peta Jalan Penelitian

Kota Bengkulu merupakan wilayah yang sangat rawan terhadap bencana tsunami (BNPB, 2012). BNPB menempatkan Kota Bengkulu sejajar dengan Kota Banda Aceh sebagai daerah rawan bencana tsunami di Pantai Barat Sumatera. Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan kajian-kajian yang mendalam tentang manajemen mitigasi

bencana tsunami sebagai upaya meminimalisir dampak bencana tsunami khususnya di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Penelitian yang dilakukan ini terfokus pada penelitian bidang matematika terapan khususnya pada keahlian matematika kebencanaan. Beberapa penelitian yang sudah tim pengusul lakukan untuk mendukung usulan penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Kajian genangan tsunami di Kota Bengkulu melalui pemodelan *run up* tsunami menggunakan metode Statistik Krigging (Hibah Bersaing DRPM-Dikti 2013-2014). Dalam penelitian ini dikembangkan model genangan menggunakan parameter kekasaran permukaan, lereng dan skenario *run up* tsunami (studi kasus tingkat kelurahan dan Kota Bengkulu).
2. Kajian tentang pemodelan jalur evakuasi bencana tsunami melalui pendekatan Riset Operasi dan *agent best modeling* telah dilaksanakan tim pengusul (anggota) melalui penelitian Unggulan Unib (2018) dan penelitian skripsi mahasiswa. Dalam penelitian ini dihasilkan sistem manajemen evakuasi bencana tsunami di wilayah pesisir.
3. Kajian teoritis terhadap persamaan-persamaan differensial gelombang sebagai persamaan dasar model gelombang tsunami untuk model penjalaran dan model genangan tsunami melalui pendekatan numerik dilakukan dalam penelitian yang didanai oleh RBA FMIPA Tahun 2019.
4. Kajian pemodelan potensi genangan tsunami juga dilakukan oleh tim pengusul (ketua) melalui penelitian disertasi Progam Doktor UGM dengan judul “Pemodelan Potensi Genangan Tsunami Berbasis pada Ancaman Gempa Bumi di Zona Subduksi Selatan Jawa” Tahun 2021. Pemodelan potensi genangan tsunami yang digunakan dalam penelitian ini difokuskan pada pemodelan berbasis numerik dengan menggunakan model TUNAMI-N3.
5. Kajian pemodelan potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata pantai panjang Kota Bengkulu telah dilakukan peneliti pada tahun 2021 melalui skema penelitian unggulan UNIB. Penelitian ini menghasilkan peta genangan tsunami di kawasan wisata pantai panjang dengan skenario ketinggian tsunami digaris pantai 10 meter. Model yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan model Berryman dan Model Smart.

Secara ringkas kegiatan penelitian yang telah dilakukan dan rencana penelitian untuk 5 tahun ke depan disajikan dalam peta jalan penelitian yang digambarkan dalam diagram berikut:



Gambar 2.4. Peta Jalan Penelitian

Hasil penelitian yang telah dan akan dilaksanakan tim pengusul dalam bidang pemodelan potensi sebaran genangan tsunami beserta kajian sistem mitigasi dan jalur evakuasi bencana tsunami sangat mendukung sekali terhadap **Usulan Penelitian Unggulan Unib Tahun 2022** yang diajukan ini. Hal ini menjadi salahsatu indikator bahwa tim pengusul mampu dan *eligible* untuk mendapatkan pendanaan pada skema penelitian ini.

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian

Secara umum tujuan penelitian ini adalah mendapatkan gambaran efektivitas hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Efektivitas hutan pantai dapat digunakan sebagai upaya mitigasi bencana tsunami dan perencanaan tata ruang di wilayah pesisir khususnya Kota Bengkulu. Beberapa tujuan khusus yang hendak dicapai adalah:

1. Memodelkan beberapa skenario kerapatan dan luas hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu.
2. Menginventarisir jenis dan luasan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami sebagai upaya menciptakan tingkat kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu.

Output akhir yang diharapkan dari penelitian ini adalah dihasilkannya peta reduksi tsunami dengan skenario sabuk hijau berupa hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Luaran yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah dihasilkannya artikel ilmiah yang akan dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks scopus yaitu jurnal *Science of Tsunami Hazards* dengan *SCImago Journal Rank* (SJR) Q3. <http://www.tsunamisociety.org/OnlineJournals.html>.

Target lain yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah: a). Mengintegrasikan hasil penelitian ini pada materi perkuliahan Matematika Kebencanaan di Prodi Matematika FMIPA UNIB melalui penulisan dan penyusunan bahan ajar. Hasil penelitian ini juga akan dijadikan bahan sosialisasi kepada masyarakat sekitar untuk menunjang pemberdayaan mitigasi berbasis komunitas. b). Terlibatnya dua orang mahasiswa S1 Prodi Matematika dalam penelitian awal yang berkaitan dengan pengumpulan data dan pengolahan data spasial, khususnya pada perancangan parameter dan variabel model spasial genangan tsunami dengan berbagai skenario luas hutan pantai yang berbeda-beda.

3.2. Manfaat Penelitian

Penelitian dalam bidang mitigasi bencana khususnya pemodelan spasial sangat dibutuhkan oleh Kota Bengkulu sebagai upaya mitigasi bencana tsunami. Penelitian ini akan berkontribusi untuk pembangunan pariwisata di Kota Bengkulu dalam menyusun dan merancang dokumen pengembangan potensi sumberdaya alam wilayah pesisir,

sehingga pemanfaatan wilayah pesisir dapat dikembangkan sesuai dengan potensi dan tingkat risiko bencana yang bisa terjadi. Inovasi yang dikembangkan adalah memodelkan sabuk hijau berupa hutan pantai dan pengaruhnya terhadap potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata pantai. Penelitian ini dilakukan sebagai upaya mengembangkan tingkat kewaspadaan dan antisipasi kebencanaan di kawasan pesisir Kota Bengkulu seperti tercantum dalam salah satu Rencana Induk Penelitian (RIP) Universitas Bengkulu Tahun 2021-2025.

Sedangkan manfaat praktis dari hasil penelitian ini adalah:

1. Pengaruh sabuk hijau berupa hutan pantai terhadap potensi sebaran genangan tsunami yang dihasilkan dalam penelitian ini berupa peta dan simulasi spasial, dapat digunakan sebagai alat bantu (*tools*) untuk memahami dan menjelaskan faktor-faktor dan mekanisme yang menyebabkan terjadinya potensi genangan tsunami.
2. Hasil pemodelan potensi sebaran genangan tsunami berupa peta reduksi tsunami dapat memberikan gambaran secara keruangan eksplisit (*spatially explicit*) tentang sistem peringatan dini di daerah penelitian pada saat terjadi bencana tsunami. Pemerintah melalui instansi yang kompeten dengan perencanaan pembangunan dapat memanfaatkan peta reduksi tsunami sebagai masukan dalam proses perencanaan dan pengembangan pembangunan wisata pantai di Kota Bengkulu..

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1. Data Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dalam bidang ilmu Sains dan Teknologi (Sainstek) dengan topik penelitian kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan. Tahapan penelitian didahului dengan mengkaji peta bahaya genangan tsunami yang sudah dihasilkan pada tahun 2021. Penelitian ini merupakan penelitian lanjutan dari penelitian sebelumnya dimana variabel kekasaran permukaan akan disimulasi dalam penelitian ini. Skenario luas, jenis dan kerapatan vegetasi pantai di lokasi penelitian akan dijadikan variabel penelitian untuk melihat sejauh mana efektifitas hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami. Penelitian ini membutuhkan bahan penelitian berupa ketersediaan data topografi, dan data penggunaan lahan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 4.1. Bahan Penelitian

| Jenis Data | Data | Spesifikasi | Sumber Data |
|-----------------------|-----------------------|----------------|--|
| Peta Dasar | RBI | Skala 1:50.000 | Diunduh dari data RBI BIG https://tanahair.indonesia.go.id |
| Peta Penggunaan Lahan | Penggunaan Lahan | Skala 1:50.000 | Hasil interpretasi data penginderaan jauh dan survey lapangan |
| Peta Hutan Pantai | Jenis vegetasi pantai | Skala 1:50.000 | Survey lapangan |

Secara umum metode penelitian berupa tahapan penelitian dapat dilihat dalam Gambar 5, sedangkan penjelasan secara detail tentang metode penelitian dari setiap tahapan diuraikan sebagai berikut.

4.2. Langkah Penelitian

4.2.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini diawali dengan pengumpulan data-data penelitian berupa jenis, diameter pohon, kerapatan vegetasi pantai dan luas hutan pantai yang ada di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Pengukuran jenis dan diameter pohon melibatkan mahasiswa dengan cara mengukur secara langsung dilapangan. Sedangkan pengumpulan data kerapatan dan luas hutan pantai diukur menggunakan bantuan citra satelit *google earth* melalui software ArcGis. Pengumpulan data ini akan dilakukan di kawasan hutan pantai Panjang Kota Bengkulu dengan titik sampel

hutan pantai di kawasan *Sport Center* dan di depan hotel *Raffles City*. Variabel yang diukur berupa diameter pohon, luas hutan pantai dan jumlah vegetasi dalam luasan 100 x 100 meter. Pengumpulan data sekunder berupa penggunaan lahan dan kemiringan lereng diambil dari referensi dan hasil penelitian pada tahun sebelumnya. Kedua data ini digunakan sebagai parameter dalam pemodelan potensi genangan tsunami menggunakan model Berryman.

4.2.2. Penentuan Skenario Hutan Pantai

Inovasi yang akan dikembangkan dalam penelitian berupa simulasi pemodelan tsunami dengan skenario hutan pantai sebagai penahan gelombang tsunami. Skenario akan diawali dengan menentukan jenis vegetasi pantai berupa mangrove dan cemara laut. Skenario juga akan dilanjutkan dengan mengkaji diameter pohon, kerapatan dan luas hutan pantai, sehingga dapat diperoleh pengaruh dari parameter ini dalam mereduksi energi tsunami. Skenario hutan pantai dalam penelitian ini akan mengacu pada penelitian yang dilakukan Shuto dkk. (1987) dan Tanaka dkk. (2006). Parameter hutan pantai ini dijadikan sebagai variabel pemodelan genangan tsunami menggunakan model Berryman.

4.2.3. Pemodelan Genangan Tsunami

Pemodelan potensi genangan tsunami dibuat dengan mengembangkan konsep kehilangan ketinggian air (*Hloss*) yang dikembangkan oleh Berryman (2006). Kegiatan yang dilakukan dalam tahapan ini adalah membuat beberapa skenario luasan hutan pantai, dan jenis vegetasi pantai dalam mereduksi energi tsunami. Pemodelan genangan tsunami menggunakan variabel kemiringan lereng, kekasaran permukaan (vegetasi pantai) dan tinggi tsunami di garis pantai. Variabel tinggi tsunami di garis pantai akan menggunakan data ketinggian tsunami di garis pantai yang dikeluarkan oleh BNPB. Pemodelan ini akan dilakukan berdasarkan skenario jenis, luasan dan kerapatan vegetasi pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Perbedaan pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada variabel kekasaran permukaan berupa skenario hutan pantai.

a. Pengujian keefektifan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami

Pemodelan genangan tsunami dengan menggunakan skenario hutan pantai menghasilkan peta-peta genangan tsunami dengan berbagai skenario hutan pantai. Pengujian keefektifan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan berupa luas dan jangkauan genangan tsunami

di daratan. Luas genangan yang kecil dan jangkauan genangan yang dekat dengan garis pantai menandakan bahwa hutan pantai efektif dalam mereduksi energi tsunami. Sebaliknya jika luas genangan yang besar/luas dengan jangkauan yang jauh dari garis pantai menandakan bahwa hutan pantai tidak mampu menahan energi tsunami. Pengujian keefektifan dilakukan pada beberapa lokasi hutan pantai yang terdapat dalam kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Hasil pengujian akan dibuat dalam bentuk peta reduksi tsunami dengan menggunakan analisis Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) (Susanto dkk, 2019). Analisis SMCA merupakan pembobotan faktor-faktor karakteristik hutan yang dapat mereduksi kekuatan tsunami, sehingga menghasilkan peta reduksi tsunami. Pembobotan analisis SMCA dibuat dalam bentuk formulasi spasial pada persamaan berikut:

$$\text{Reduksi Tsunami} = \left(\frac{R}{R_{max}} \times 0,25 + \frac{K}{K_{max}} \times 0,3 + \frac{D}{D_{max}} \times 0,25 + \frac{S}{S_{max}} \times 0,2 \right)$$

R adalah luas hutan disetiap lokasi pengamatan

K adalah kerapatan disetiap lokasi pengamatan

D adalah diameter disetiap lokasi pengamatan

S adalah Topografi di lokasi pengamatan

R_{max} adalah luas hutan maksimal

K_{max} adalah kerapatan maksimal

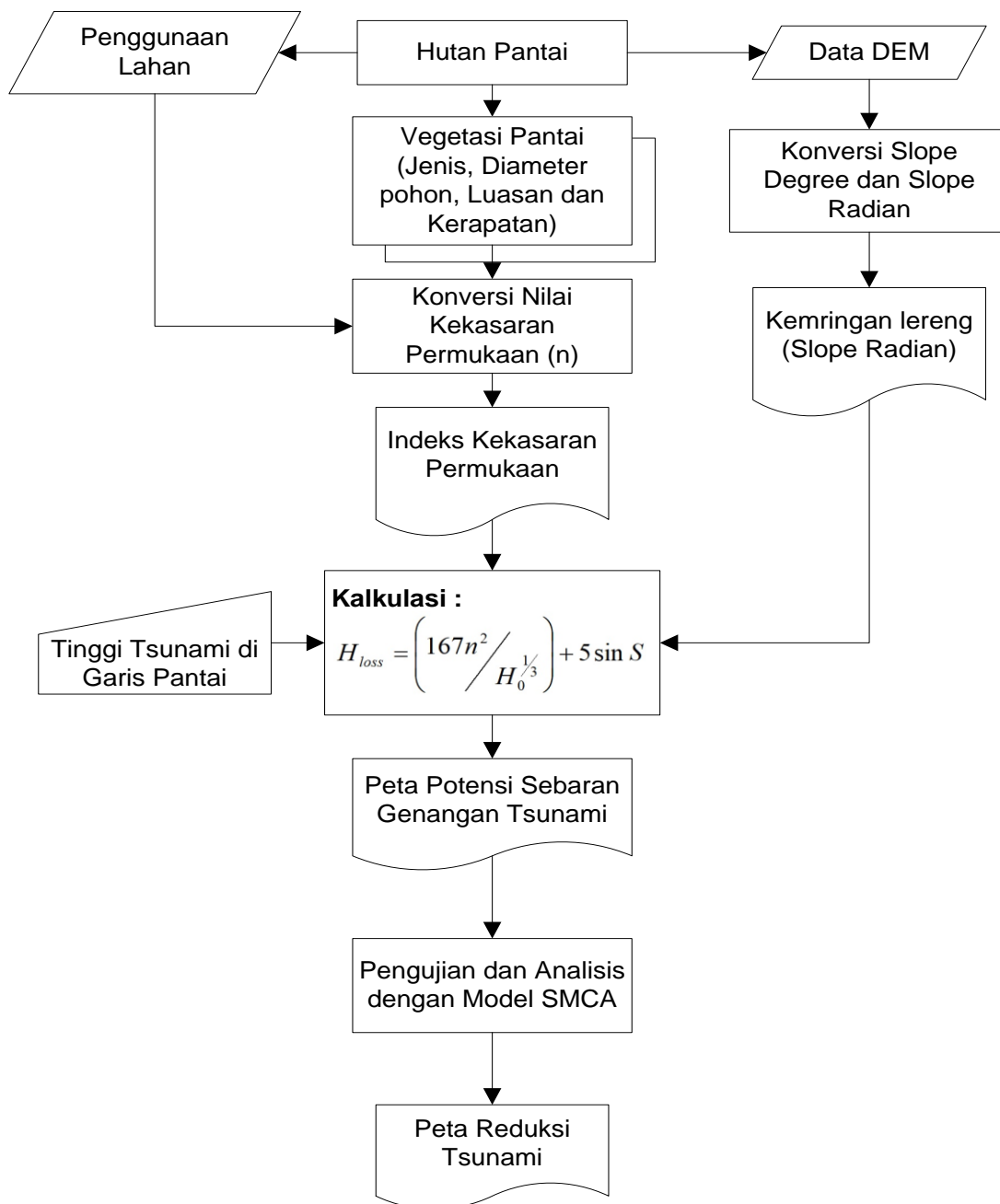
D_{max} adalah diameter maksimal

S_{max} adalah Topografi maksimal

b. Analisis hasil

Tahapan selanjutnya adalah menganalisis hasil pemodelan genangan tsunami dengan berbagai skenario hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Analisis hasil dilakukan dengan cara membandingkan hasil penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan oleh Shuto dkk. (1987) dan Tanaka dkk (2006). Penelitian ini juga akan dianalisis dengan kejadian-kejadian tsunami yang pernah terjadi di wilayah Indonesia yang terdokumentasi dalam laporan penelitian dan artikel ilmiah.

Indikator keberhasilan dari kegiatan penelitian adalah dihasilkannya Peta Reduksi Tsunami dengan skenario hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu, artikel ilmiah yang diterbitkan dalam jurnal internasional terindeks Scopus, dan HaKI.



Gambar 4.1 Bagan Alir Penelitian

BAB V

HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1. Deskripsi Daerah Penelitian

5.1.1. Geografis

Penelitian ini dilaksanakan di Kecamatan Ratu Samban tepatnya di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Berdasarkan posisi geografisnya, Kecamatan Ratu Samban menempati wilayah barat Kota Bengkulu, memiliki batas-batas: Bagian utara Kecamatan Ratu Samban berbatasan dengan Kecamatan Teluk Segara. Bagian selatan dan timur berbatasan dengan Kecamatan Ratu Agung dan bagian barat berbatasan dengan Samudera Hindia. Kecamatan Ratu Samban memiliki kondisi topografi yang datar dengan ketinggian wilayah berkisar antara 10 – 40 meter di atas permukaan laut.

Luas wilayah Kecamatan Ratu Samban mencapai 285,44 hektar atau 2.844,5 kilometer persegi. Kecamatan Ratu Samban memiliki sembilan kelurahan definitif. Ibukota Kecamatan Ratu Samban terletak di Kelurahan Penurunan. Kelurahan yang terdekat dengan ibukota kecamatan yaitu Kelurahan Anggut Bawah, Anggut Atas dan Padang Jati. Wilayah terluas yaitu Kelurahan Penurunan dan Padang Jati, dengan luas masing-masing sekitar 30 persen dan 26 persen dari luas kecamatan. Berikut disajikan luasan masing-masing kelurahan berdasarkan data statistik dari BPS Kota Bengkulu tahun 2020

Tabel 5.1 Persentase Luas Masing Masing Kelurahan

| No | Kecamatan | Luas | |
|-----------------------|-----------------|--------|-------|
| | | Ha | % |
| 1 | Anggut Bawah | 17,80 | 6,25 |
| 2 | Penurunan | 86,00 | 30,23 |
| 3 | Padang Jati | 75,00 | 26,40 |
| 4 | Belakang Pondok | 19,05 | 6,69 |
| 5 | Pengantungan | 27,50 | 9,67 |
| 6 | Kebuh Dahri | 15,10 | 5,30 |
| 7 | Kebun Geran | 17,00 | 5,97 |
| 8 | Anggut Atas | 12,00 | 4,22 |
| 9 | Anggut Dalam | 15,99 | 5,27 |
| Kecamatan Ratu Samban | | 285,44 | 100 |

Sumber: BPS Kota Bengkulu, 2021

Pantai Panjang merupakan pantai yang berada di Provinsi Bengkulu. Letaknya sekitar 4 km dari pusat Kota Bengkulu. Pantai ini memiliki garis pantai yang mencapai 7 km dan lebar pantai sekitar 500 meter. Pantai Panjang terletak di Kecamatan Ratu

Samban, Kecamatan Teluk Segara, & Kecamatan Ratu Agung. Pantai Panjang terletak sejajar dengan Pantai Tapak Paderi dan Pantai Zakat. Secara administratif, lokasi penelitian merupakan termasuk dalam Kecamatan Ratu Samban Kota Bengkulu. Pantai Panjang sering dimanfaatkan oleh wisatawan dan masyarakat sekitar sebagai tempat bersantai, rekreasi dan mencari nafkah. Sarana dan prasarana yang berada dalam Pantai Panjang terdapat *Sport Center* sehingga masyarakat dapat melakukan kegiatan berbagai macam kegiatan olahraga. Ombak di Pantai Panjang banyak dimanfaatkan oleh para wisatawan untuk berselancar. Pantai Panjang yang ada di Bengkulu ini mempunyai banyak fasilitas diantaranya terdapat restoran, cafe, penginapan, area bermain, pusat perbelanjaan, hingga fasilitas untuk olahraga.

5.1.2. Hutan Pantai

Hutan pantai atau *beach forest* adalah wilayah hutan yang tumbuh berkembang di muara sungai, tepi laut atau daerah yang memiliki pasang surut. Hutan pesisir juga dapat diartikan sebagai hutan yang tumbuh berkembang di garis pantai yang memiliki batas pasang tertinggi. Kawasan pantai merupakan daerah datar atau bergelombang dengan perbedaan ketinggian tidak lebih dari 200 m dari permukaan laut, yang dibentuk oleh endapan pantai dan sungai yang bersifat lepas. Secara umum, di pantai ditemukan vegetasi mangrove dan vegetasi tanaman pantai. Vegetasi pada hutan pantai cukup beragam dan tumbuh bergerombol membentuk unit-unit tertentu sesuai dengan habitatnya. Vegetasi yang dominan di Pantai Panjang Kota Bengkulu berupa vegetasi cemara laut. Cemara laut (*Casuarina equisetifolia L.*) adalah salah satu jenis cemara dari golongan *Casuarina*. Cemara laut merupakan tanaman jenis pohon berumah satu dengan percabangan halus, dan pepagan berwarna coklat-keabu-abuan muda. Bagian batangnya yang masih muda bertekstur halus sedangkan batang yang tua bertekstur kasar, tebal, dan beralur. Secara umum pohon ini berbentuk kurus dan banyak ditemukan di sepanjang pinggir pantai.

Cemara laut mempunyai manfaat bagi lingkungan dan turut berdampak bagi kehidupan manusia. Secara ekologis manfaat Cemara laut diantaranya

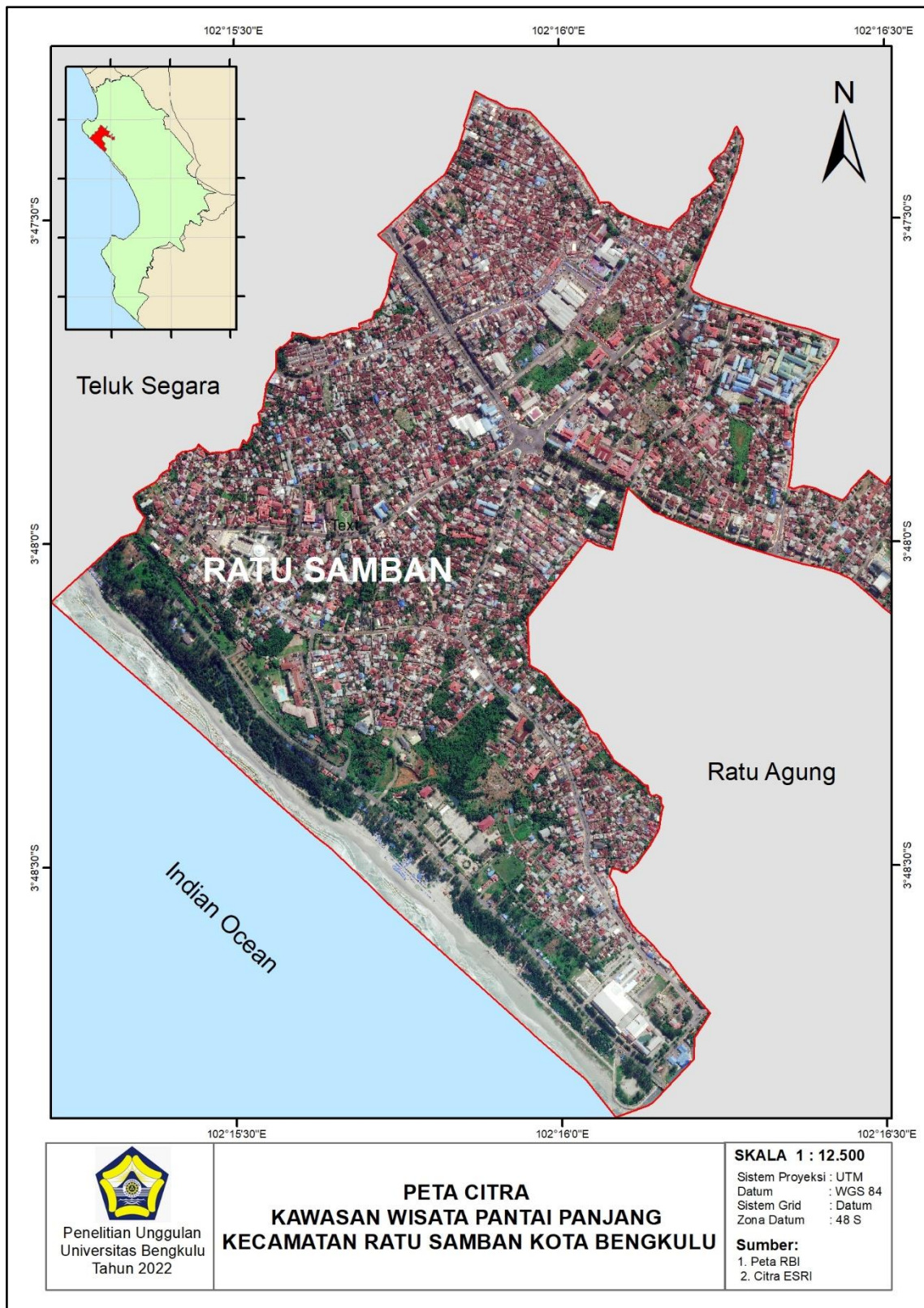
1. Menjadi salah satu jenis tanaman yang sangat potensial untuk rehabilitasi lahan dan konservasi tanah (RLKT) wilayah pantai berpasir.
2. Ketahanan pohon cemara laut akan terpaan angin laut dan uap air laut yang mengandung garam sehingga dapat melindungi pertumbuhan tanaman lain.

3. Simbiosis yang dilakukan antara cemara pohon dengan bakteri frankia dapat membantu dalam meningkatkan dan memperbaiki unsur hara yang ada di sekitar tegakan cemara laut. Sehingga membantu pertumbuhan tanaman lain dan kelestarian hutan di sekitar pesisir pantai.
4. Penanaman cemara laut di sepanjang pesisir pantai dan membentuk lapisan cemara laut dapat berfungsi sebagai pelindung dari tsunami, gelombang tinggi dan abrasi pantai.
5. Cemara laut juga berfungsi untuk mengurangi dan mengubah kecepatan angin, sehingga dapat mengurangi laju angin ke wilayah sekitar laut.
6. Penanaman cemara laut juga dapat memperbaiki iklim mikro karena reboisasi yang dilakukan di pesisir pantai atau laut.
7. Di bawah pohon cemara laut, dapat digunakan oleh para penyu belimbing untuk bertelur dan menyembunyikan telurnya.
8. Cemara laut juga menjadi rumah untuk beberapa hewan yang mampu memperkirakan datangnya bencana sehingga menjadi salah satu langkah mitigasi bencana.

5.2. Hasil Penelitian

5.2.1. Pengumpulan Data Penelitian

Data penelitian ini berupa jenis vegetasi, diameter pohon, kerapatan vegetasi pantai dan luas hutan pantai yang ada di kawasan wisata Pantai Panjang Kecamatan Ratu Samban Kota Bengkulu. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 27 September 2022 di sepanjang hutan pantai mulai dari *Bencollen Mall* sampai ke *Sport Center*. Jenis vegetasi yang terdapat dalam hutan pantai dikawasan wisata pantai panjang didominasi oleh vegetasi jenis cemara laut (*Casuarina equisetifolia L.*). Beberapa jenis vegetasi lain yang ditemukan di hutan pantai adalah ketapang dan kelapa. Pengukuran jenis dan diameter pohon melibatkan mahasiswa dengan cara mengukur secara langsung dilapangan. Sedangkan pengumpulan data kerapatan dan luas hutan pantai diukur menggunakan bantuan citra satelit *google earth* melalui software ArcGis. Pengumpulan data ini dilakukan di kawasan hutan Pantai Panjang Kota Bengkulu dengan cara membagi kawasan hutan pantai menjadi blok-blok pengukuran dengan luasan 100 x 100 meter. Variabel yang diukur berupa diameter pohon, luas hutan pantai dan jumlah vegetasi dalam luasan 100 x 100 meter. Peta citra wilayah penelitian disajikan dalam gambar 5.1. Hasil pengukuran lapangan dan data penelitian disajikan dalam tabel berikut 5.2.



Gambar. 5.1. Peta Citra Wilayah Penelitian
 (Sumber: Hasil olahan data Arcgis 2022)



Gambar. 5.2. Foto Pengukuran Lapangan (Sumber: Hasil Survey Lapangan, 2022)

Tabel 5.2. Data Penelitian

| Blok | Jenis Vegetasi | Jumlah Pohon (buah) | Rata-rata Diameter Pohon (cm) |
|------|-------------------|---------------------|-------------------------------|
| 1 | Cemara, Ketapang | 146 | 51,2 |
| 2 | Kamboja, Ketapang | 78 | 65,6 |
| 3 | Kelapa, Cemara | 167 | 75,6 |
| 4 | Cemara | 153 | 67 |
| 5 | Cemara | 138 | 59 |
| 6 | Ketapang, cemara | 175 | 57,3 |
| 7 | Cemara | 154 | 55 |
| 8 | Cemara | 317 | 67 |
| 9 | Cemara | 111 | 122,2 |
| 10 | Cemara | 175 | 116,75 |
| 11 | cemara | 74 | 103 |

Sumber: Hasil Pengukuran Lapangan, 2022.

Selain pengumpulan data primer, penelitian ini juga menggunakan data sekunder berupa penggunaan lahan dan kemiringan lereng diambil dari referensi dan hasil penelitian pada tahun sebelumnya. Kecamatan Ratu Samban berdasarkan data kemiringan lereng termasuk daerah landai dengan kemiringan lereng 3 – 8 %. Ketinggian kecamatan Ratu Samban berkisar antara 10 – 25 meter, sedangkan wilayah pesisirnya mempunyai ketinggian berkisar 0 – 10 meter. Penggunaan lahan dilokasi penelitian merupakan lahan terbangun yang dimanfaatkan sebagai lahan perumahan, perdagangan dan perkantoran.

Hasil interpretasi penggunaan lahan dikonversi menjadi nilai indeks kekasaran permukaan. Koefisien kekasaran permukaan dibedakan berdasarkan jenis penggunaan lahan detail menurut Putra (2008) dan tipe penutup lahan yang dibuat Berryman (2006). Nilai kekasaran permukaan berdasarkan penggunaan lahan ditunjukkan dalam Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan

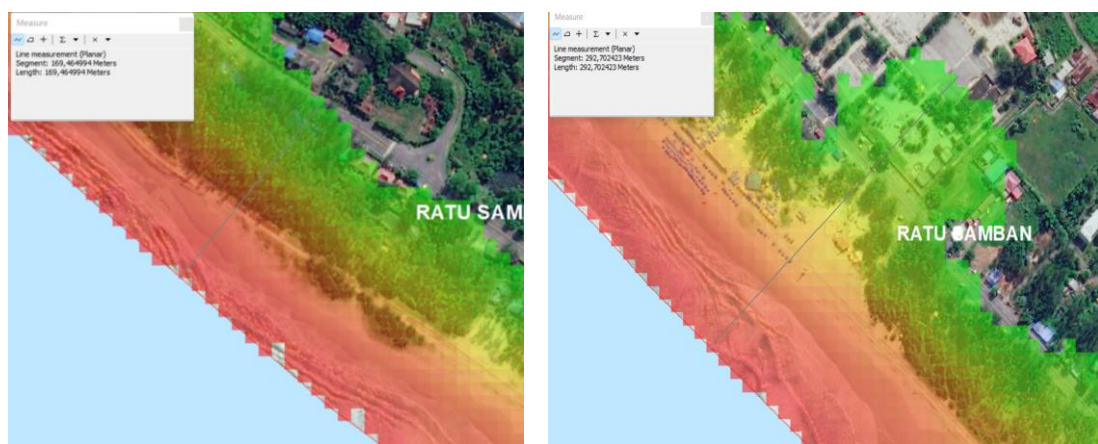
| No | Jenis Penggunaan Lahan | Koefisien Kekasaran Permukaan |
|----|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | Badan Air | 0,007 |
| 2 | Rawa | 0,015 |
| 3 | Tambak | 0,010 |
| 4 | Pasir/Bukit Pasir | 0,018 |
| 5 | Semak Belukar | 0,040 |
| 6 | Padang Rumput | 0,020 |
| 7 | Hutan | 0,070 |
| 8 | Kebun/Perkebunan | 0,035 |
| 9 | Tegalan/Ladang | 0,030 |
| 10 | Lahan Pertanian | 0,025 |
| 11 | Permukiman/Lahan Terbangun | 0,050 |
| 12 | Mangrove/Hutan Pantai | 0,060 |
| 13 | Lahan Terbuka/Kosong | 0,015 |

Sumber: Berryman (2006); Putra (2008); BNPB (2012); Hasil Analisis (2022).

5.2.2. Pemodelan Genangan Tsunami

Pemodelan potensi genangan tsunami dibuat dengan mengembangkan konsep kehilangan ketinggian air (*Hloss*) yang dikembangkan oleh Berryman (2006). Kegiatan yang dilakukan dalam tahapan ini adalah membuat beberapa skenario luasan hutan pantai, dan jenis vegetasi pantai dalam mereduksi energi tsunami. Pemodelan genangan tsunami menggunakan variabel kemiringan lereng, kekasaran permukaan (vegetasi pantai) dan tinggi tsunami di garis pantai. Variabel tinggi tsunami di garis pantai akan menggunakan data ketinggian tsunami di garis pantai yang dikeluarkan oleh BNPB. Pemodelan genangan tsunami diawali dengan menganalisis simulasi genangan tsunami yang dihasilkan hasil penelitian sebelumnya. Fokus wilayah penelitian di pusatkan mulai dari *Bencollen Mall* sampai dengan *Sport Center* Pantai Panjang Kota Bengkulu dengan garis pantai sepanjang kurang lebih 1.092 meter. Hasil analisis menunjukkan bahwa dengan tinggi tsunami 10 meter di garis pantai penjarangan genangan tsunami di daratan berkisar antara 170 – 295 meter. Jangkauan sejauh ini berada di sekitar *Sport Center* karena hutan pantai yang berada di depan lokasi ini merupakan hutan pantai dengan kerapatan rendah. Dari hasil kajian dan analisis terhadap jangkauan tsunami ke daratan di kawasan pantai panjang, sangat jelas terlihat

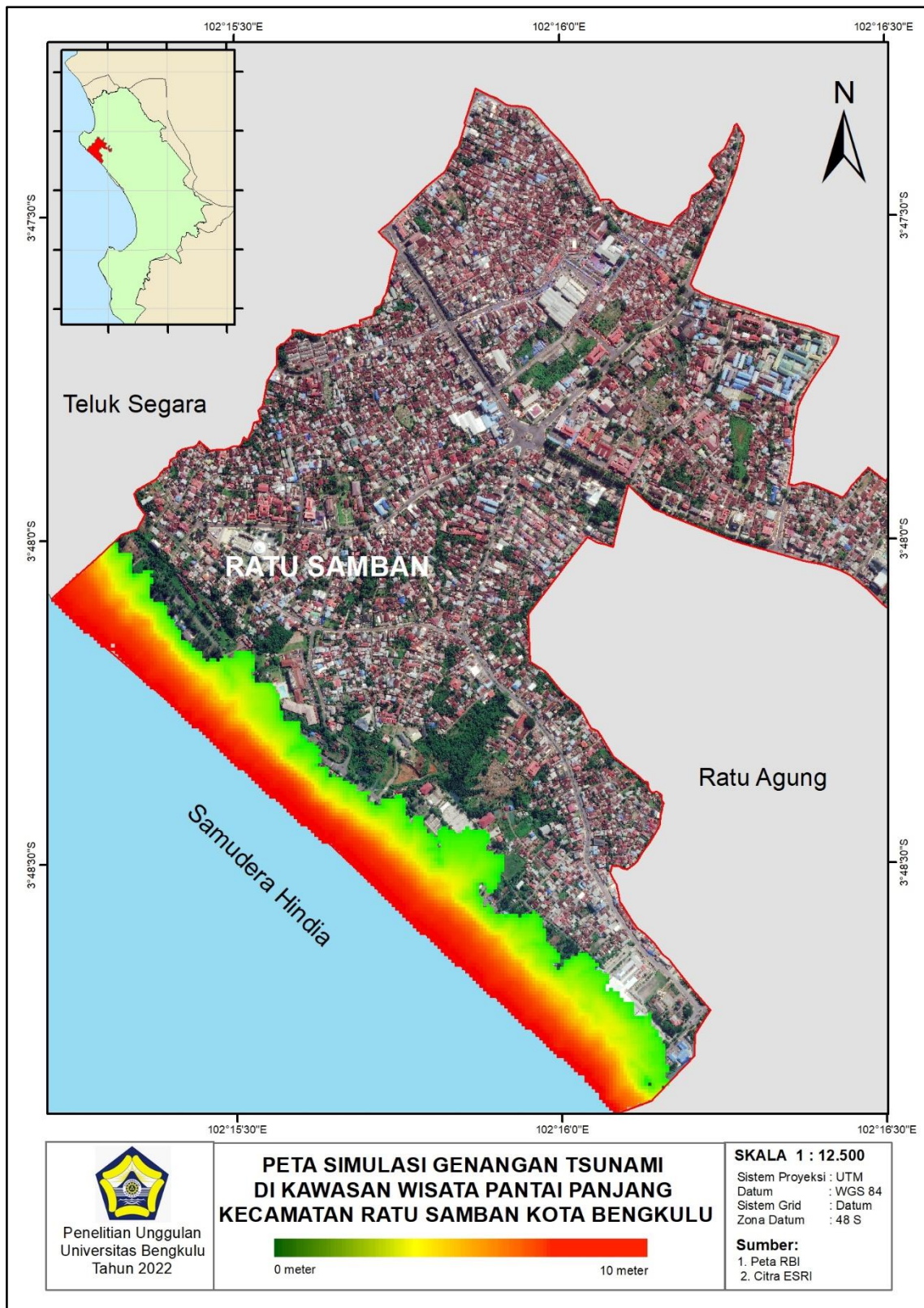
bahwa jangkauan tsunami sangat dipengaruhi oleh hutan pantai yang ada di sepanjang pantai. Kawasan yang hutan pantainya rapat cenderung jangkauan tsunaminya tidak terlalu jauh ke daratan, tetapi untuk hutan pantainya yang tidak rapat maka jangkauan tsunami sangat jauh sampai ke daratan. Gambaran secara spasial pengaruh hutan pantai terhadap jangkauan tsunami dapat dilihat dalam Gambar 5.3. Jauh dan dekatnya jangkauan genangan tsunami di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu sangat dipengaruhi oleh keberadaan hutan pantai yang terdapat di sepanjang pantai. Peta genangan tsunami hasil simulasi ketinggian tsunami 10 meter dapat dilihat pada Gambar 5.4 dan 5.5.



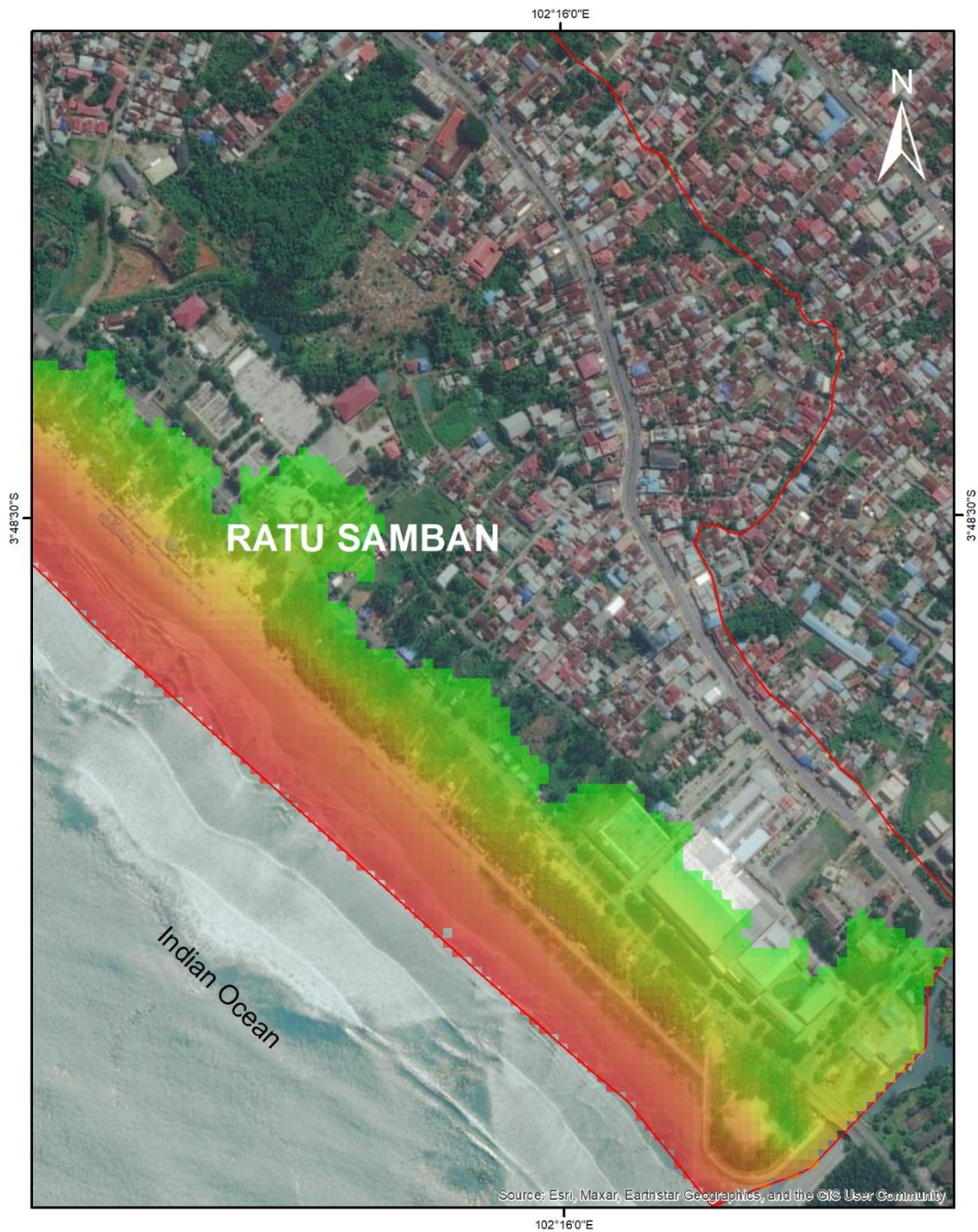
Gambar 5.3. Pengaruh hutan pantai terhadap jangkauan tsunami di daratan di *Sport Center* dan *Bencollen Mall* (Sumber: Hasil Olah ArcGis, 2022).

5.2.3. Penentuan Skenario Hutan Pantai

Inovasi yang akan dikembangkan dalam penelitian berupa simulasi pemodelan tsunami dengan skenario hutan pantai sebagai penahan gelombang tsunami. Skenario akan diawali dengan menentukan jenis vegetasi pantai berupa cemara laut yang memang banyak terdapat di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu. Skenario juga akan dilanjutkan dengan mengkaji kerapatan dan luas hutan pantai, sehingga dapat diperoleh pengaruh dari parameter ini dalam mereduksi energi tsunami. Skenario hutan pantai dalam penelitian ini akan mengacu pada penelitian yang dilakukan Shuto dkk. (1987) dan Tanaka dkk. (2006). Parameter hutan pantai ini dijadikan sebagai variabel pemodelan genangan tsunami menggunakan model Berryman. Pemodelan ini akan dilakukan berdasarkan skenario luasan dan kerapatan vegetasi pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Perbedaan pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini dengan penelitian sebelumnya terletak pada variabel kekasaran permukaan berupa skenario hutan pantai.



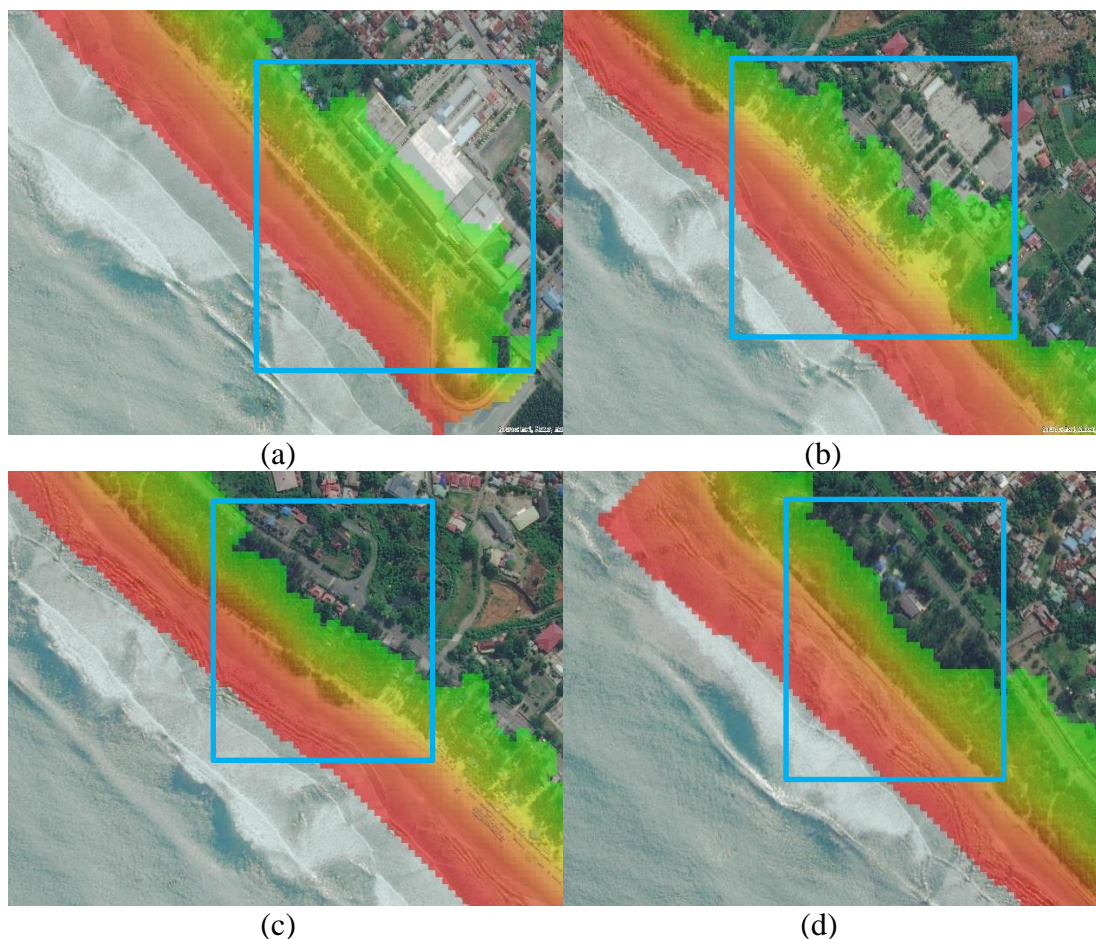
Gambar 5.4. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 meter di Kecamatan Ratu Samban Kota Bengkulu (Sumber: Hasil Olah ArcGis, 2022)



Gambar 5.5. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 meter di Sport Center dan Bencollen Mall (Sumber: Hasil Olah ArcGis, 2022).

5.2.4. Simulasi Kerapatan Hutan Pantai dalam Mereduksi Energi Tsunami

Simulasi model genangan tsunami dengan beberapa skenario luasan dan kerapatan vegetasi cemara laut di sekitar kawasan wisata Pantai Panjang yaitu *Sport Center* dan *Mall Bencollen* Kota Bengkulu. Kerapatan hutan pantai di lokasi penelitian dibagi dalam tiga bagian yaitu kerapatan hutan pantai rendah, kerapatan hutan pantai sedang dan kerapatan hutan pantai tinggi. Kerapatan hutan pantai rendah terdapat di sekitar kawasan depan *Sport Center* atau sekitar bangunan tulisan Pantai Panjang, sedangkan kerapatan hutan pantai sedang terdapat di depan *Mall Bencollen*. Kerapatan hutan pantai tinggi terdapat disekitar kompleks Dekranasda Propinsi Bengkulu. Hasil simulasi genangan tsunami terhadap kerapatan hutan pantai di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu dapat dilihat dalam gambar berikut:



Gambar 5.6. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Kerapatan Hutan Pantai (a) Hutan Pantai Kerapatan Sedang, (b) Hutan Pantai Kerapatan Rendah, (c) dan (d) Hutan Pantai Kerapatan Tinggi. (Sumber: Hasil Olah ArcGis, 2022).

Pemodelan genangan tsunami menggunakan nilai kekasaran permukaan yang dikonversi dari penggunaan lahan/tutupan lahan di lokasi penelitian. Nilai kekasaran permukaan yang dikaji dalam penelitian ini adalah nilai kekasaran permukaan yang

berasal dari vegetasi atau hutan pantai. Pembagian jenis kerapatan hutan pantai juga berdampak pada nilai kekasaran permukaan yang dibuat dalam tabel berikut.

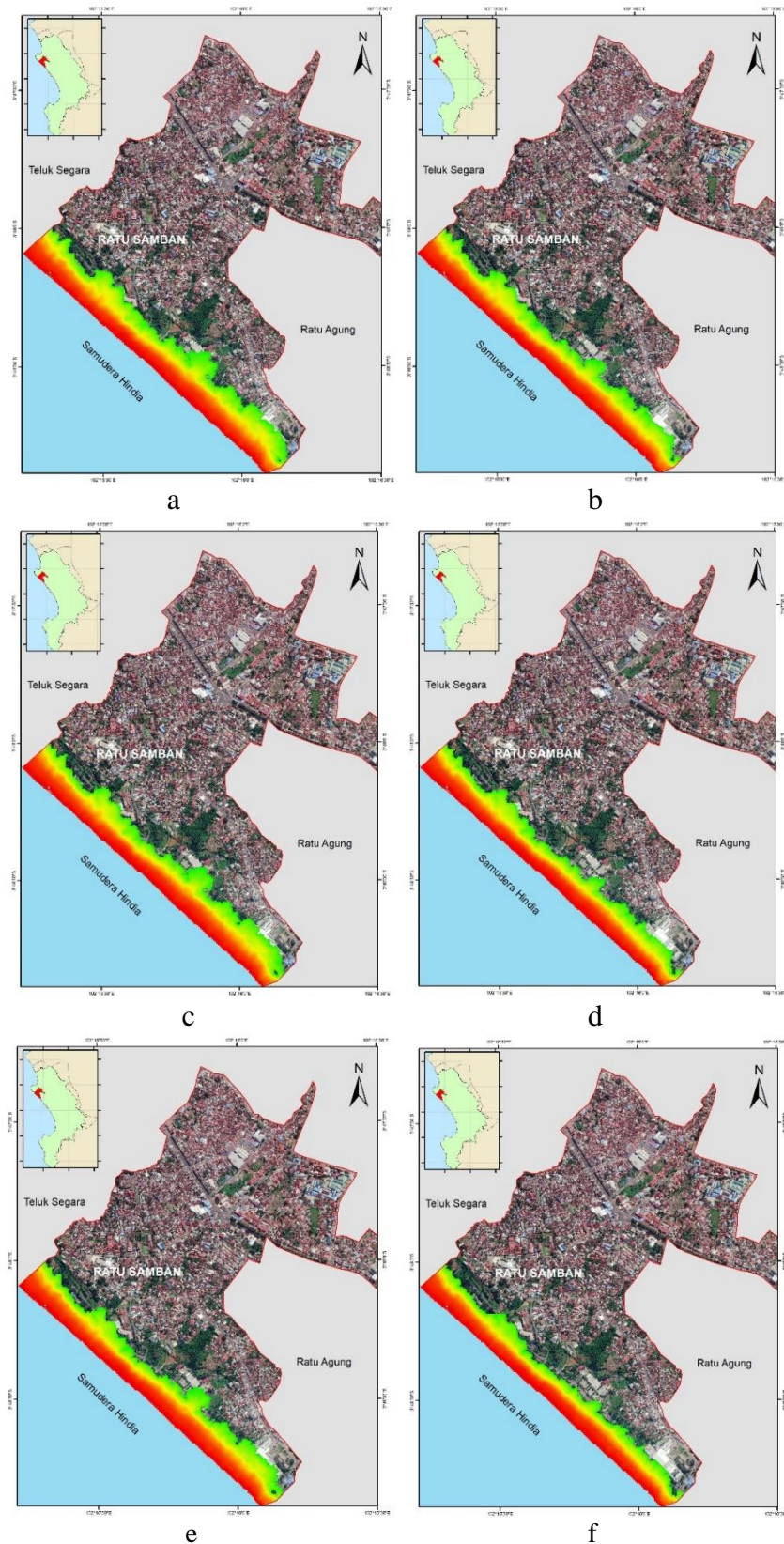
Tabel 5.4. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan

| No | Jenis Penggunaan Lahan | Koefisien Kekasaran Permukaan |
|----|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Hutan pantai kerapatan rendah | 0,050 |
| 2 | Hutan pantai kerapatan sedang | 0,060 |
| 3 | Hutan pantai kerapatan tinggi | 0,070 |

Sumber: Hasil Analisis (2022).

Hasil simulasi genangan tsunami berdasarkan kerapatan hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu menghasilkan wilayah yang terdampak genangan tsunami seluas 49,6 Ha. Berdasarkan ancaman bahaya tsunami kawasan wisata Pantai Panjang memiliki wilayah yang rawan terhadap bahaya tsunami. Dengan ketinggian tsunami 10 meter di garis pantai maka jangkauan tsunami di kawasan pantai panjang berkisar antara 173 - 332 meter ke daratan. Pemodelan genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang tanpa vegetasi menghasilkan model luas genangan tsunami seluas 60,6 Ha dengan jangkauan antara 175 – 375 meter ke daratan. Hutan Pantai Panjang Kota Bengkulu yang dekat dengan laut lepas memiliki kerawanan bencana sangat tinggi. Semakin menjauhi pantai tingkat kerawanannya menjadi rendah. Sebaran genangan (*inundasi*) di Pantai Panjang Kota Bengkulu dapat direduksi dengan adanya hutan pantai. Kerapatan dan luas hutan pantai mulai dari tumbuhan bawah sampai dengan pohon secara pemodelan mampu mengurangi *inundasi* akibat tsunami. Kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu memiliki kerapatan vegetasi yang beragam, mulai dari kerapatan rendah, sedang dan tinggi. Hampir seluruh kawasan Pantai Panjang memiliki hutan pantai dengan kerapatan sedang. Peta-peta hasil simulasi genangan tsunami dengan berbagai scenario kerapatan hutan disajikan dalam Gambar 5.6.

Peta kelas genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang menunjukkan tiga tingkat genangan mulai kerentanan sangat rendah sampai dengan kerentanan sangat tinggi. Tinggi gelombang tsunami (*run up*) tsunami 10 m yang dimodelkan menghasilkan tingkat genangan paling rendah 1 m sampai dengan 10 m. Hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang mampu meredam genangan sampai dengan 10 m. Kerapatan dan luasan hutan pantai sangat berpengaruh terhadap luasan genangan tsunami. Hasil luasan dari masing-masing simulasi pemodelan genangan tsunami disajikan dalam tabel 5.5.



Gambar 5.7. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Kerapatan dan Luas Hutan Pantai (a) Hutan Pantai Kerapatan Rendah, (b) Hutan Pantai Kerapatan Rendah yang diperluas, (c) Hutan Pantai Kerapatan sedang, (d) Hutan Pantai Kerapatan Sedang yang diperluas, (e) Hutan Pantai Kerapatan Tinggi, (f) Hutan Pantai Kerapatan Tinggi yang diperluas, (Sumber: Hasil Olah ArcGis, 2022).

Tabel 5.5. Luasan dan Jangkauan Genangan Tsunami dengan Berbagai Skenario

| No | Skenario | Luas Genangan (Ha) | Jangkauan Tsunami | |
|----|--|--------------------|-------------------|----------|
| | | | Min (m) | Maks (m) |
| 1 | Hutan pantai kerapatan rendah | 53,0 | 164 | 335 |
| 2 | Hutan pantai kerapatan sedang | 50,2 | 165 | 332 |
| 3 | Hutan pantai kerapatan tinggi | 47,1 | 160 | 315 |
| 4 | Hutan pantai kerapatan rendah yang diperluas | 48,4 | 160 | 280 |
| 5 | Hutan pantai kerapatan sedang yang diperluas | 44,4 | 148 | 262 |
| 6 | Hutan pantai kerapatan tinggi yang diperluas | 40,6 | 134 | 239 |

Sumber: Hasil Olah ArcGis (2022).

5.3. Pengujian Keefektifan Hutan Pantai Dalam Mereduksi Energi Tsunami

Data vegetasi dan topografi digunakan untuk mengetahui efektivitas hutan pantai sebagai buffer tsunami di kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu. Sebaran genangan yang terjadi di kawasan Pantai Panjang dimodelkan dengan menggunakan persamaan Berryman (2006). Hasil perhitungan menggunakan model Berryman (2006) menghasilkan peta genangan tsunami (Gambar 5.4). Pemodelan genangan tsunami dengan menggunakan skenario hutan pantai menghasilkan peta-peta genangan tsunami dengan berbagai skenario hutan pantai. Pengujian keefektifan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami dilakukan dengan cara membandingkan hasil pemodelan berupa luas dan jangkauan genangan tsunami di daratan. Luas genangan yang kecil dan jangkauan genangan yang dekat dengan garis pantai menandakan bahwa hutan pantai efektif dalam mereduksi energi tsunami. Sebaliknya jika luas genangan yang besar/luas dengan jangkauan yang jauh dari garis pantai menandakan bahwa hutan pantai tidak mampu menahan energi tsunami. Pengujian keefektifan dilakukan pada beberapa lokasi hutan pantai yang terdapat dalam kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Hasil pengujian akan dibuat dalam bentuk peta reduksi tsunami dengan menggunakan analisis Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) (Susanto dkk, 2019). Analisis SMCA merupakan pembobotan faktor-faktor karakteristik hutan yang dapat mereduksi kekuatan tsunami, sehingga menghasilkan peta reduksi tsunami. Pembobotan analisis SMCA dibuat dalam bentuk formulasi spasial pada persamaan berikut:

$$\text{Reduksi Tsunami} = \left(\frac{R}{R_{max}} \times 0,25 + \frac{K}{K_{max}} \times 0,3 + \frac{D}{D_{max}} \times 0,25 + \frac{s}{s_{max}} \times 0,2 \right)$$

R adalah luas hutan disetiap lokasi pengamatan

K adalah kerapatan disetiap lokasi pengamatan

D adalah diameter disetiap lokasi pengamatan

S adalah Topografi di lokasi pengamatan

R_{max} adalah luas hutan maksimal

K_{max} adalah kerapatan maksimal

D_{max} adalah diameter maksimal

S_{max} adalah Topografi maksimal

Pemodelan hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami dengan menggunakan analisis SMCA belum dilakukan dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan analisis berdasarkan hasil simulasi kerapatan dan luas hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu sudah mewakili karakteristik hutan pantai dalam mereduksi energi tsunami. Tingkat reduksi tsunami oleh hutan pantai menunjukkan sebaran genangan tsunami yang sampai ke daratan. Semakin jauh jangkauan dan luas genangan tsunami di daratan maka tingkat reduksi tsunaminya rendah. Sebaliknya jika jangkauan tsunami dekat dan luas genangan sempit/kecil maka semakin tingkat reduksi tsunaminya tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan hutan pantai dengan kerapatan tinggi dengan lebar hutan yang luas mampu menjadi parameter dalam kegiatan mitigasi bencana tsunami di Kota Bengkulu. Hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu mampu menjadi *buffer* tsunami sehingga jangkauan dan luas genangan tsunami dapat diminimumkan. Karakteristik hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu sangat menentukan besaran reduksi gelombang tsunami. Menurut kriteria Harada dan Imamura (2002), hampir sebagian besar wilayah hutan pantai memiliki kerapatan, diameter, dan lebar hutan pantai yang baik. Hutan pantai yang masih baik akan menjadi penghalang gelombang tsunami yang datang, sehingga energi tsunami mampu diredam dan dapat direfleksikan kembali ke laut (Triatmadja 2010).

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian sementara yang telah dilakukan, peneliti dapat menarik kesimpulan yaitu:

1. Hasil simulasi genangan tsunami berdasarkan kerapatan hutan pantai di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu menghasilkan wilayah yang terdampak genangan tsunami seluas 49,6 Ha. Berdasarkan ancaman bahaya tsunami kawasan wisata Pantai Panjang memiliki wilayah yang rawan terhadap bahaya tsunami. Dengan ketinggian tsunami 10 meter di garis pantai maka jangkauan tsunami di kawasan pantai panjang berkisar antara 170 - 335 meter ke daratan. Pemodelan genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang tanpa vegetasi menghasilkan model luas genangan tsunami seluas 60,6 Ha.
2. Jangkauan genangan tsunami di daratan sangat dipengaruhi oleh hutan pantai yang ada di sepanjang pantai. Kawasan yang hutan pantainya rapat cenderung jangkauan tsunaminya tidak terlalu jauh ke daratan, tetapi untuk hutan pantainya yang tidak rapat maka jangkauan tsunami sangat jauh sampai ke daratan. Kajian secara visual ini cukup membuktikan bahwa hutan pantai mampu mereduksi energi tsunami yang sampai ke daratan.

7.2. Saran

Penelitian efektivitas hutan pantai untuk meredam gelombang tsunami yang dihasilkan dalam penelitian ini belum mengkaji dan menganalisis berapa besar pengaruh diameter dan luasan hutan pantai dalam menghalangi gelombang tsunami. Untuk itu perlu dilakukan kajian khusus tentang keefektifan vegetasi dan besaran nilai indeks kekasaran permukaan dari vegetasi pantai sebagai penahan gelombang tsunami yang masuk ke daratan.

DAFTAR PUSTAKA

- Annunziato, A. & Best. C., 2005. *The tsunami event analyses and models*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission. <http://tsunami.jrc.it/model/simulation.pdf>.
- Berryman, K., 2006. *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*. Lower Hutt, Institute of Geological and Nuclear Science.
- BNPB, 2012. Lampiran Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Bencana, *Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta, BNPB.
- BPS, 2021. Kecamatan Ratu Samban Dalam Angka 2021. BPS Kota Bengkulu.
- Bryant, E., 2008. *Tsunami the Underrated Hazard*, Second Edition. Chichester, Springer-Praxis Publishing.
- Dao, M. H. & Tkalich, P., 2007. Tsunami Propagation Modelling? a Sensitivity Study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 7, 741–754.
- Danielse, F., Sørensen, M.K., Olwig. M.F,, 2005 The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, *SCIENCE*, 310.
- Dirjen KP3K KKP, 2012, Pedoman Mitigasi Tsunami dengan Vegetasi Pantai, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta.
- Fauzi, Y., 2015. Aplikasi Matematika dalam Pemodelan Risiko Bencana Tsunami, *Prosiding Seminar Nasional Matematika*, Universitas Parahyangan, 10, 32-36.
- Fauzi, Y., Hartono, H. & Kongko, W., 2020. Numerical Modeling of Tsunami and Tsunami Vulnerability Analysis of Temon Coastal Region in Yogyakarta, Indonesia. *Disaster Advances*, 13 (5), 33- 41.
- Fauzi, Y., Hardiansyah. & Mayasari, Z.M., 2022. Spatial Modeling of Tsunamis and Tsunami Inundation Analysis of “Panjang” Beach In Bengkulu City, Indonesia, *Science of Tsunami Hazard*, 40 (1), 95-108
- Flouri, E. T., Kalligeris, N., Alexandrakis, G., Kampanis, N. A. & Synolakis, C. E., 2013. Application of a finite difference computational model to the simulation of earthquake generated tsunamis. *Applied Numerical Mathematics*, 67, 111–125. <http://doi.org/10.1016/j.apnum.2011.06.003>.
- Harada, K., & Imamura, F., 2002; Experimental Study on the Effect in Reducing Tsunami by the Coastal Permeable Structures, *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu*. May, 2002.
- Hills, J.G. & Mader, C.L., 1997. Tsunami Produced by the Impacts of the Small Asteroids, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **822**, 381-394.

- Jaffe, B. E. & Gelfenbuam, G., 2007. A Simple Model for Calculating Tsunami Flow Speed from Tsunami Deposits. *Sedimentary Geology*, 200 (3–4), 347–361. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>.
- Latief, H., 2013. *Pedoman Teknik Pembuatan Peta Bahaya Rendaman Tsunami*. Bandung, Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB.
- Khomarudin. M.R., & Kongko. W., 2011. Learning From Tsunami 2004: Estimation of Roughness Coefficient Using Remote Sensing Data, *Journal of Information Technology for Natural Resources Management* 01/2011; II: 1-11.
- Santius, S. H., 2015. Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami pada Permukiman di Kota Bengkulu Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Pemukiman*, 10 (2), 92–105. <http://dx.doi.org/10.31815/jp.2015.10.92-105>
- Susanto. D., Faida. L.R.W., & Sunarto, 2019. Pemodelan Efektivitas Hutan Pantai di Cagar Alam Pananjung Pangandaran sebagai Buffer Tsunami. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 13, pp 4-14.
- Triatmadja R., 2010. Tsunami: Kejadian, penjalaran, daya rusak, dan mitigasinya. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Yanagisawa. H., Koshimura. S., Miyagi, T., & 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*, 115, pp: 1-11, doi:10.1029/2009JC005587
- Yudhicara, 2015, The Existence of Coastal Forest, its Implication for Tsunami Hazard Protection, a Case Study: in Cilacap-Central Java, Indonesia, *Bulletin of the Marine Geology*, 30 (1), pp. 23 to 34.

Lampiran 1. Draft Artikel Ilmiah

Study on the Effectiveness of Coastal Vegetation in Reducing Tsunami Energy in the “Panjang” Beach in Bengkulu, Indonesia

Fauzi Yulian^{1*}, Hardiansyah², and Mayasari Zulfia Memi¹

¹ Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Bengkulu, Bengkulu, INDONESIA

² Faculty of Engineering, University of Bengkulu, Bengkulu, INDONESIA

* Corresponding author: yulianfauzi@unib.ac.id

Abstract

Coastal forest is a relatively powerful green belt used as a tsunami energy absorber. It is very important to study the effectiveness of coastal forests as a tsunami energy absorber in coastal tourism areas as an effort to minimize the potential risk of a tsunami disaster in the area. The purpose of this study was to obtain an overview of the effectiveness of coastal forests in reducing tsunami energy. Specifically, the objectives of this research are 1). Modeling several scenarios of coastal vegetation types, vegetation area and coastal forest density in reducing tsunami energy in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City. 2) Inventorying the area and density of coastal forests in reducing tsunami energy as an effort to create a level of awareness and anticipation in disasters in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City. The stages to achieve the objectives of this study were carried out by: collecting data and research materials, mapping coastal forest areas, determining the area and density scenarios of coastal forests, spatial modeling of inundation with scenarios of area and density of coastal forests using ArcGIS and validation and analysis of the effectiveness of coastal forests to reduce tsunami energy using Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA). The innovation developed is to model the green belt in the form of coastal forest and its effect on the potential distribution of tsunami inundation in coastal tourism areas, as an effort to plan and develop tsunami disaster mitigation. The final result expected from this research is a tsunami reduction map with a scenario of the area and density of coastal forests in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City as a guide in tsunami disaster mitigation.

Keywords: Coastal Forest, Tsunami, Spatial Multi-Criteria Analysis, and Beach Panjang

Introduction

A tsunami is a natural disaster caused by an earthquake and this disaster is very difficult to predict when it will occur, besides the hazard effects generated are also very powerful so efforts are needed to reduce the risk of the disaster (Fauzi et al., 2020). Seeing the hazard effect caused by the tsunami disaster is not small, it is necessary to have a tsunami disaster mitigation management system, especially in pre-disaster. Tsunami disaster mitigation efforts can be carried out naturally through planting a green belt in the form of coastal forests. Harada and Imamura (2002) stated that the effectiveness of coastal forest with a thickness of 200 meters of coastal forest, a density of 30 trees per 100 square meters, and a tree diameter of 15 cm was able to reduce tsunamis by 50%.

Coastal forest is a relatively powerful green belt used as a tsunami energy absorber. Indonesia is one of the countries that once had the second largest coastal forest in the

world (Diposaptono and Budiman, 2008). So far, the study of technical aspects of the function and role of coastal vegetation as a protector of coastal areas is still considered very less carried out in Indonesia. Further research on the behavior of various types of coastal vegetation in tsunami disaster mitigation is still needed, but there are various sources of knowledge currently available that can explain the performance of coastal forests in dealing with tsunami waves hitting the coast, mostly based on empirical and laboratory experimental results. Supported by the results of several post-tsunami field investigations, the current knowledge can to some extent be used as a guide to the possible applications of coastal forests as part of tsunami disaster mitigation efforts. Assessment of the effectiveness of vegetation in reducing tsunamis can be carried out through spatial analysis by giving weight to the variables of area, density and diameter of vegetation (Susanto et al., 2019).

In general, coastal forests in the Long Beach area of Bengkulu City are dominated by sea pine plants (*casuarina* sp). The existence of sea pine can be used as a mixed plant with other types of plants, because this plant is resistant to wind. It is very important to study the effectiveness of coastal forests as a tsunami energy absorber in coastal tourism areas as an effort to minimize the potential risk of a tsunami disaster in the area. The number of activities of residents and tourists in the Pantai Panjang tourist area of Bengkulu City needs to be anticipated and planned for the level of safety in the event of a tsunami disaster. Based on the current conditions in the Long Beach area of Bengkulu City, it is necessary to have a study or research on the effectiveness of coastal forests in reducing tsunami energy as a disaster mitigation effort.

Material and Methods

Study Area and Data: The study area is located in Ratu Samban Sub-District of Bengkulu City. The Research materials used in this study can be seen in the Table 1.

Table 1. Research Material

| Data Type | Data | Spesification | Data Source |
|----------------------|----------|--|---|
| Base Maps | RBI | Scale 1:50.000 | Downloaded from RBI BIG data https://tanahair.indonesia.go.id |
| Topografi | DEMNAS | Spatial Resolution 8,5 m (0,27 Arc Second) | Downloaded from Demnas BIG https://tides.big.go.id |
| Surface Roughness | Land Use | Skala 1:50.000 | <i>Google Earth</i> Interpretation and field survey |

Research Steps

The steps of this research are:

1. Data collection

The data needed in this study are trees species, trees diameter, coastal vegetation density and the area of coastal forest in “Panjang” Beach tourist area, Bengkulu City.

2. Determination of the coastal forest scenario.

In this study, an innovation was developed in the form of a tsunami modeling simulation with a coastal forest scenario as a tsunami wave barrier

3. Tsunami inundation modeling

The modeling of potential tsunami inundation is made by developing the concept of water level loss (Hloss) which was developed by Berryman (2006). This modeling was carried out based on the scenario of the type, area and density of coastal vegetation in “Panjang” Beach tourist area, Bengkulu City. The difference between the modeling carried out in this study and the previous research lies in the surface roughness variable in the form of a coastal forest scenario.

Model Formulation

Tsunami inundation modeling using coastal forest scenarios, produces tsunami inundation maps with various coastal forest scenarios. Testing the effectiveness of coastal forests in reducing tsunami energy is carried out by comparing the modeling results in the form of the area and range of tsunami inundation on land. The small inundation area and the inundation range close to the shoreline indicate that coastal forests are effective in reducing tsunami energy. On the other hand, if the inundation area is large/wide with a far reach from the shoreline, it indicates that the coastal forest is unable to withstand tsunami energy. The effectiveness test was carried out at several coastal forest locations in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City. The test results will be made in the form of a tsunami reduction map using the Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) analysis (Susanto et al, 2019). The SMCA analysis is a weighting of forest characteristic factors that can reduce the strength of a tsunami, resulting in a tsunami reduction map. The weighting of the SMCA analysis is made in the form of a spatial formulation in the following equation:

$$Tsunami\ Reduction = \left(\frac{R}{R_{max}} \times 0,25 + \frac{K}{K_{max}} \times 0,3 + \frac{D}{D_{max}} \times 0,25 + \frac{s}{s_{max}} \times 0,2 \right)$$

R : the forest area at each observation location

K : the density at each observation location

D : the diameter at each observation location

S : the topography at the observation site

R_{max} : the maximum forest area

K_{max} : the maximum density

D_{max} : the maximum diameter

S_{max} : the maximum topography

Results and Discussion

The image map of the research area is presented in Figure 1. The results of field measurements and research data are presented in Table 2.

Table 2. Research Data

| Block | Vegetation Type | Number of trees (Amount) | Average Tree Diameter (cm) |
|-------|-------------------|--------------------------|----------------------------|
| 1 | Cemara, Ketapang | 146 | 51,2 |
| 2 | Kamboja, Ketapang | 78 | 65,6 |
| 3 | Kelapa, Cemara | 167 | 75,6 |
| 4 | Cemara | 153 | 67 |
| 5 | Cemara | 138 | 59 |
| 6 | Ketapang, cemara | 175 | 57,3 |
| 7 | Cemara | 154 | 55 |
| 8 | Cemara | 317 | 67 |

| | | | |
|----|--------|-----|--------|
| 9 | Cemara | 111 | 122,2 |
| 10 | Cemara | 175 | 116,75 |
| 11 | Cemara | 74 | 103 |

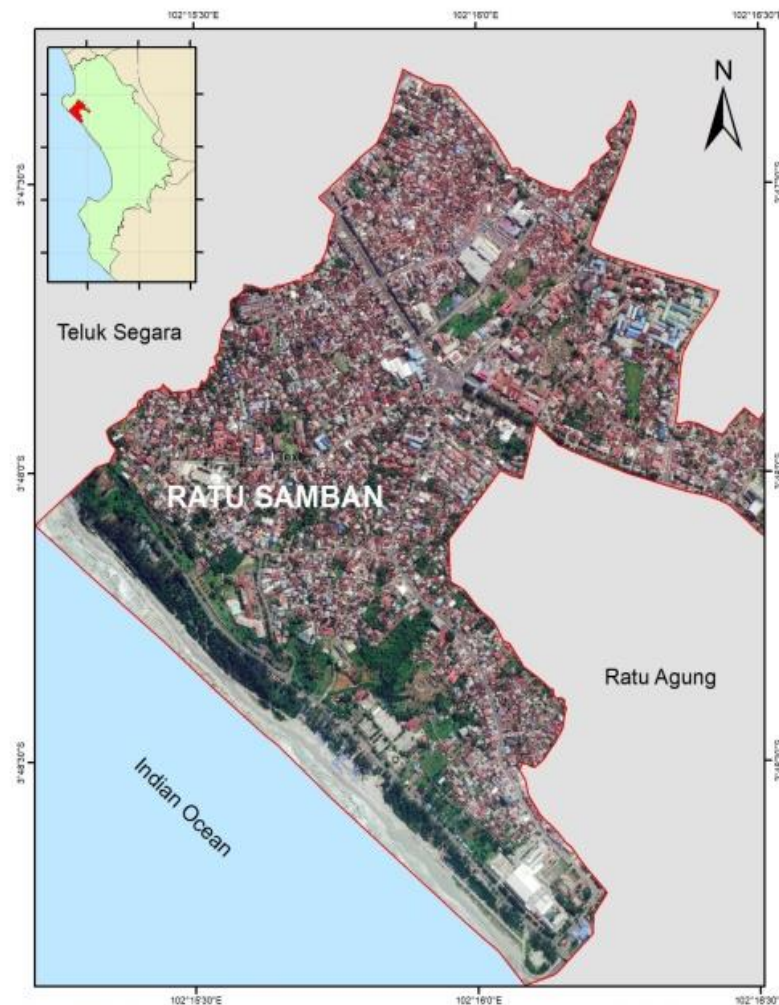


Figure 1. Image Map of Research Area
(Source: Arcgis 2022 data processing results)

The result of the interpretation of land use is converted into a surface roughness index value. The coefficient of surface roughness is distinguished by the type of detailed land use according to Putra (2008) and the type of land cover made by Berryman (2006). Surface roughness values based on land use are shown in Table 3.

Table 3. List of Surface Roughness Coefficient Values

| No | Type of Land Use | Surface Roughness Coefficient |
|----|-------------------|-------------------------------|
| 1 | Water Body | 0,007 |
| 2 | Swamp | 0,015 |
| 3 | Pond | 0,010 |
| 4 | Sand/Dunes | 0,018 |
| 5 | Bush | 0,040 |
| 6 | Meadow | 0,020 |
| 7 | Forest | 0,070 |
| 8 | Garden/Plantation | 0,035 |
| 9 | Moor/Field | 0,030 |
| 10 | Agricultural Land | 0,025 |

| | | |
|----|---------------------------|-------|
| 11 | Settlements/Built-up Land | 0,050 |
| 12 | Mangrove/Coastal Forest | 0,060 |

Source: Berryman (2006); Putra (2008); BNPB (2012); Analysis Result (2021).

a. Tsunami Inundation Modeling

From the results of the study and analysis of the reach of the tsunami to the mainland in the long coast area, it is very clear that the tsunami range is strongly influenced by the coastal forest along the coast. Areas with dense coastal forest tend to have a tsunami that is not too far inland, but for coastal forests that are not densely packed, the tsunami range is very far inland. A spatial description of the influence of coastal forests on the tsunami range can be seen in Figure 2.

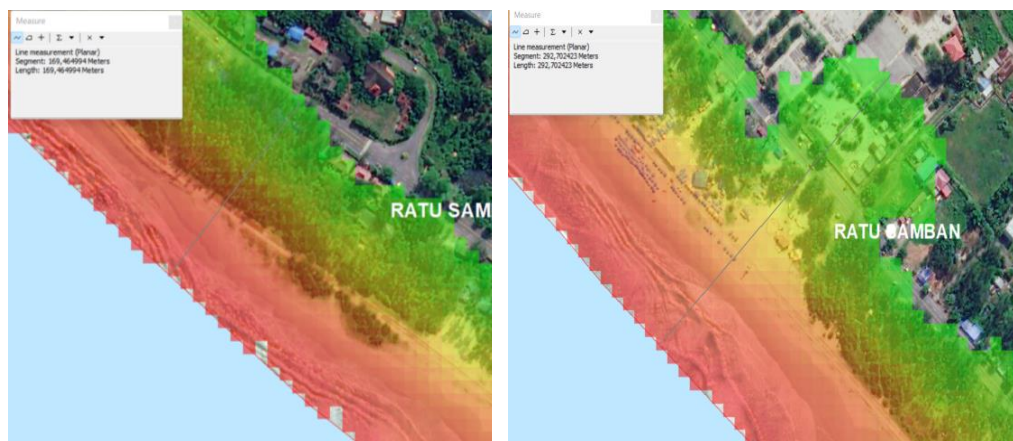


Figure 2. Effect of coastal forest on tsunami range on land at Sport Center and Bencoolen Mall (Source: ArcGis Results, 2022).

b. Determination of Coastal Forest Scenario

The innovation that will be developed in this research is in the form of a tsunami modeling simulation with a coastal forest scenario as a tsunami wave barrier. The scenario will begin by determining the type of coastal vegetation mangroves and sea pine. The scenario will also be continued by studying tree diameter, density and area of coastal forest, so that the effect of these parameters can be obtained in reducing tsunami energy. The coastal forest scenario in this study will refer to the research conducted by Shuto et al. (1987) and Tanaka et al. (2006). This coastal forest parameter is used as a modeling variable for tsunami inundation using the Berryman model. This modeling will be carried out based on the scenario of the area, diameter and density of coastal vegetation in the “Panjang” Beach tourist area, Bengkulu City. The difference between the modeling carried out in this study and the previous research lies in the surface roughness variable in the form of a coastal forest scenario. Simulation results of tsunami inundation modeling with a height of 10 meters in Ratu Samban District, Bengkulu City and at the Sports Center and Bencoolen Mall are shown in the following picture.

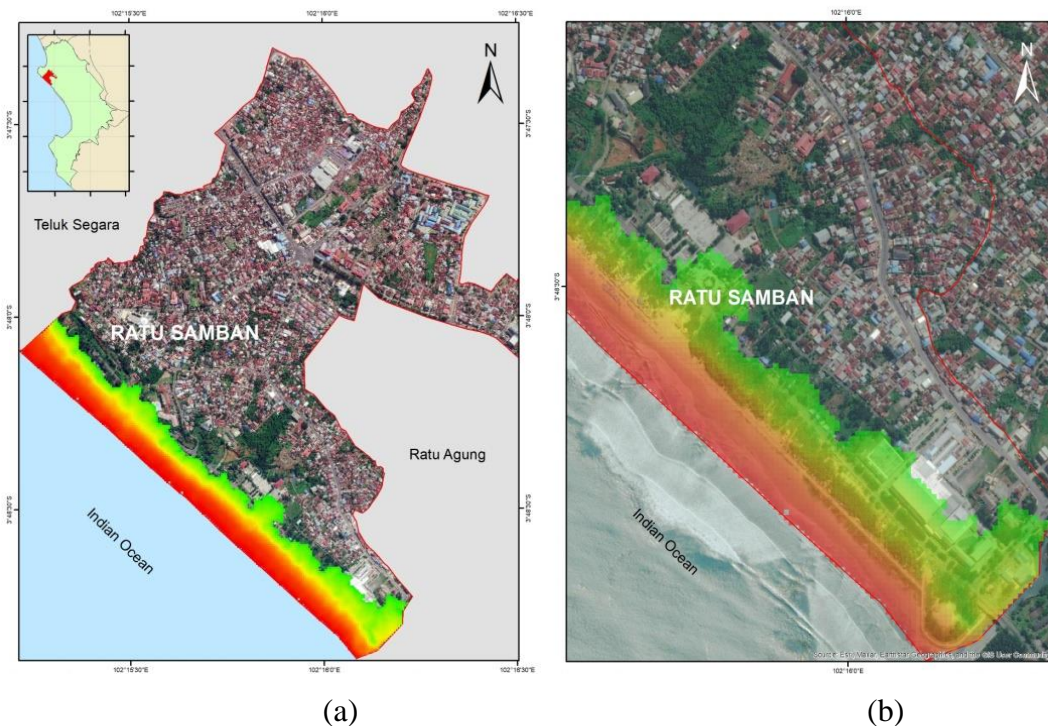


Figure 3. (a) Simulation Results of Tsunami Inundation Modeling with a Height of 10 meters in Ratu Samban District, Bengkulu City. (b) Simulation Results of Tsunami Inundation Modeling with a Height of 10 meters at Sport Center and Bencollen Mall (Source: ArcGis Results, 2022).

Conclusions

The range of tsunami inundation on land is strongly influenced by coastal forests along the coast. Areas with dense coastal forest tend to have a tsunami that is not too far inland, but for coastal forests that are not densely packed, the tsunami range is very far inland. This visual study is sufficient to prove that coastal forests are able to reduce tsunami energy that reaches the mainland.

Acknowledgments

Thank you very much to the University of Bengkulu which has funded this research through the Penelitian Unggulan Universitas scheme with contract number

References

- Annunziato, A. & Best. C., 2005. *The tsunami event analyses and models*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission. <http://tsunami.jrc.it/model/simulation.pdf>.
- Berryman, K., 2006. *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*. Lower Hutt, Institute of Geological and Nuclear Science.
- BNPB, 2012. Lampiran Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Bencana, *Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta, BNPB.
- BPS, 2021. Kecamatan Ratu Samban Dalam Angka 2021. BPS Kota Bengkulu.
- Bryant, E., 2008. *Tsunami the Underrated Hazard*, Second Edition. Chichester, Springer-Praxis Publishing.
- Dao, M. H. & Tkalich, P., 2007. Tsunami Propagation Modelling? a Sensitivity Study.

- Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 7, 741–754.
- Danielse, F., Sørensen, M.K., Olwig, M.F.,, 2005 The Asian Tsunami: A Protective Role for Coastal Vegetation, *SCIENCE*, 310.
- Dirjen KP3K KKP, 2012, Pedoman Mitigasi Tsunami dengan Vegetasi Pantai, Kementerian Kelautan dan Perikanan, Jakarta.
- Fauzi, Y., 2015. Aplikasi Matematika dalam Pemodelan Risiko Bencana Tsunami, *Prosiding Seminar Nasional Matematika*, Universitas Parahyangan, 10, 32-36.
- Fauzi, Y., Hartono, H. & Kongko, W., 2020. Numerical Modeling of Tsunami and Tsunami Vulnerability Analysis of Temon Coastal Region in Yogyakarta, Indonesia. *Disaster Advances*, 13 (5), 33- 41.
- Fauzi, Y., Hardiansyah. & Mayasari, Z.M., 2022. Spatial Modeling of Tsunamis and Tsunami Inundation Analysis of “Panjang” Beach In Bengkulu City, Indonesia, *Science of Tsunami Hazard*, 40 (1), 95-108
- Flouri, E. T., Kalligeris, N., Alexandrakis, G., Kampanis, N. A. & Synolakis, C. E., 2013. Application of a finite difference computational model to the simulation of earthquake generated tsunamis. *Applied Numerical Mathematics*, 67, 111–125. <http://doi.org/10.1016/j.apnum.2011.06.003>.
- Harada, K., & Imamura, F., 2002; Experimental Study on the Effect in Reducing Tsunami by the Coastal Permeable Structures, *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference Kitakyushu*. May, 2002.
- Hills, J.G. & Mader, C.L., 1997. Tsunami Produced by the Impacts of the Small Asteroids, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **822**, 381-394.
- Jaffe, B. E. & Gelfenbuam, G., 2007. A Simple Model for Calculating Tsunami Flow Speed from Tsunami Deposits. *Sedimentary Geology*, 200 (3–4), 347–361. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>.
- Latief, H., 2013. *Pedoman Teknik Pembuatan Peta Bahaya Rendaman Tsunami*. Bandung, Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB.
- Khomarudin. M.R., & Kongko. W., 2011. Learning From Tsunami 2004: Estimation of Roughness Coefficient Using Remote Sensing Data, *Journal of Information Technology for Natural Resources Management* 01/2011; II: 1-11.
- Santius, S. H., 2015. Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami pada Permukiman di Kota Bengkulu Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Pemukiman*, 10 (2), 92–105. <http://dx.doi.org/10.31815/jp.2015.10.92-105>
- Susanto. D., Faida. L.R.W., & Sunarto, 2019. Pemodelan Efektivitas Hutan Pantai di Cagar Alam Pananjung Pangandaran sebagai Buffer Tsunami. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 13, pp 4-14.
- Yanagisawa. H., Koshimura. S., Miyagi, T., & 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*, 115, pp: 1-11, doi:10.1029/2009JC005587
- Yudhicara, 2015, The Existence of Coastal Forest, its Implication for Tsunami Hazard Protection, a Case Study: in Cilacap-Central Java, Indonesia, *Bulletin of the Marine Geology*, 30 (1), pp. 23 to 34.