

**ANALISIS TINGKAT KERUSAKAN BANGUNAN BERDASARKAN
SKENARIO KETINGGIAN INUNDASI TSUNAMI YANG BERBEDA DI
PULAU PISANG, KABUPATEN PESISIR BARAT**

SKRIPSI

Oleh

**FATHAN AL FADHIL
NPM 1814221007**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS TINGKAT KERUSAKAN BANGUNAN BERDASARKAN
SKENARIO KETINGGIAN INUNDASI TSUNAMI YANG BERBEDA DI
PULAU PISANG, KABUPATEN PESISIR BARAT**

Oleh

FATHAN AL FADHIL

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Perikanan dan Kelautan
Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS TINGKAT KERUSAKAN BANGUNAN BERDASARKAN SKENARIO KETINGGIAN INUNDASI TSUNAMI YANG BERBEDA DI PULAU PISANG, KABUPATEN PESISIR BARAT

Oleh

Fathan Al Fadhil

Pulau Pisang merupakan sebuah pulau kecil yang terletak di Kabupaten Pesisir Barat dan memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana gempa bumi dan tsunami. Sebagian besar masyarakat tinggal di wilayah pesisir yang datar dengan tingkat kerentanan bangunan yang beragam. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan kerentanan tsunami, memetakan daerah rendaman tsunami, dan memetakan tingkat kerusakan bangunan yang diakibatkan oleh tsunami sesuai skenario inondasi tsunami di Pulau Pisang. Data diperoleh melalui survei kerentanan masing-masing bangunan terhadap tsunami. Tiga skenario ketinggian tsunami yang digunakan dalam pemodelan adalah 5 meter, 10 meter, dan 20 meter. Skenario ini digunakan sebagai dasar pemodelan jangkauan tsunami di berbagai lokasi di Pulau Pisang. Tingkat kerusakan bangunan dianalisis berdasarkan tingkat kerentanan masing-masing bangunan dan ketinggian tsunami di lokasi bangunan tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Pulau Pisang tergolong sangat rentan terhadap tsunami, terutama Desa Labuhan, Desa Sukadana, dan Desa Pasar Pulau Pisang yang menjadi wilayah paling terdampak di semua skenario. Daerah genangan mencakup kawasan pemukiman padat dan bangunan dengan kerentanan tinggi. Semakin tinggi ketinggian tsunami, semakin meluas cakupan area terdampak serta meningkatnya tingkat kehancuran bangunan, terutama bangunan berkonstruksi kayu.

Katakunci: Bangunan, Pesisir Barat, Pulau Pisang, Skenario, Tsunami.

ABSTRACT

ANALYSIS OF BUILDING DAMAGE LEVEL BASED ON VARIOUS OF TSUNAMI INUNDATION HEIGHT SCENARIOS IN PISANG ISLAND, WEST LAMPUNG REGENCY

By

Fathan Al Fadhil

Pisang Island is a small island located in Pesisir Barat Regency and is highly vulnerable to earthquakes and tsunamis. Most of the population resides in flat coastal areas with varying levels of building vulnerability. This study aimed to map tsunami vulnerability, inundation areas, and building damage levels resulting from tsunami scenarios on Pisang Island. Data were obtained through a survey assessing the vulnerability of each building to tsunamis. Three tsunami height scenarios used in the modeling are 5 meters, 10 meters, and 20 meters. These scenarios served as the basis for modeling tsunami reach across different locations on the island. The level of building damage was analyzed based on each building's vulnerability and the tsunami height at that location. The results show that most areas on Pisang Island are highly vulnerable to tsunamis, particularly Labuhan Village, Sukadana Village, and Pasar Pulau Pisang Village, which are the most affected under all scenarios. The inundation areas include densely populated settlements and buildings with high vulnerability. As the tsunami height increases, the extent of the affected areas and the level of building destruction also increase, especially among wooden structures. These findings highlight the need for mitigation strategies based on vulnerability and structural reinforcement in coastal regions.

Keywords: Building, Pisang Island, Scenario, Tsunami, West Lampung Coast.

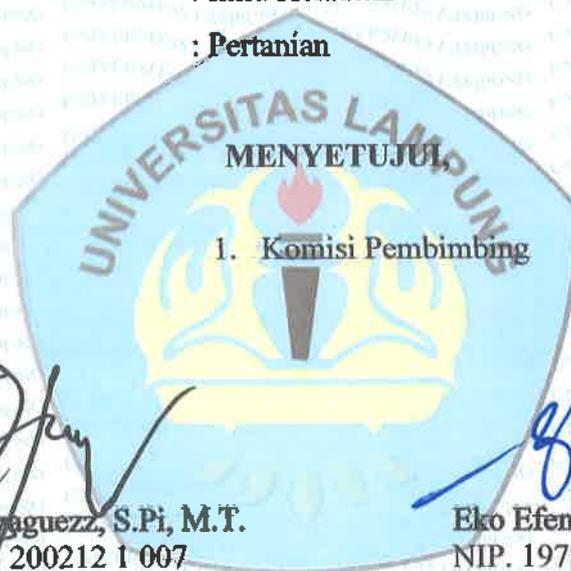
Judul skripsi : **ANALISIS TINGKAT KERUSAKAN BANGUNAN BERDASARKAN SKENARIO KETINGGIAN INUNDASI TSUNAMI YANG BERBEDA DI PULAU PISANG, KABUPATEN PESISIR BARAT**

Nama Mahasiswa : **Fathan Al Fadhil**

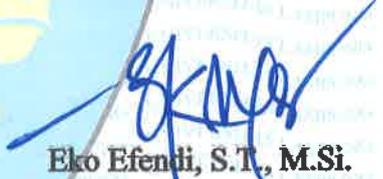
Nomor Pokok Mahasiswa : **1814221007**

Program Studi : **Ilmu Kelautan**

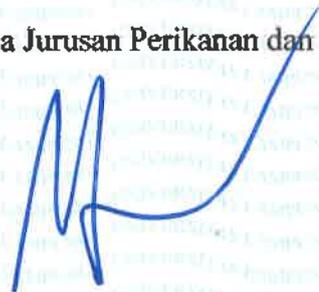
Fakultas : **Pertanian**




Dr. Henry Mayaguez, S.Pi, M.T.
NIP. 19750516 200212 1 007


Eko Efendi, S.T., M.Si.
NIP. 19780329 200312 1 001

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan


Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.
NIP 19830923 200604 2 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T.



Sekretaris

: Eko Efendi, S.T., M.Si.



Penguji Bukan Pembimbing : Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si.



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.

NIP. 19641118198902 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 9 Mei 2025

PENYATAAN

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Skripsi ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik sarjana baik di Universitas Lampung maupun perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Tim Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan naskah, dengan naskah disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini serta sanksi lainnya sesuai norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Bandar Lampung, 19 Juni 2025
Yang membuat pernyataan



Fathan Al Fadhi
NPM. 1814221007

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan pada 04 Juli 2000 di Depok, Jawa Barat sebagai anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak M. Ali Umri dan Ibu Popi Delvira. Penulis memiliki satu orang adik yang bernama Naila Alyssa. Penulis menyelesaikan pendidikan mulai Taman Kanak-Kanak (TK) Islam Terpadu Insan Madani tahun 2006, pendidikan dasar di SD Negeri 02 Depok tahun 2012, pendidikan menengah pertama di SMP IT Al-Qalam tahun 2015, dan pendidikan menengah atas di MAN 13 Jakarta tahun 2018.

Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang sarjana (S1) di tahun 2018 pada Program Studi Ilmu Kelautan, Jurusan Perikanan dan Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Semasa menjadi mahasiswa, penulis pernah tergabung dalam Himpunan Mahasiswa Perikanan dan Kelautan (Himapik) sebagai anggota Bidang Kewirausahaan tahun 2019-2021. Penulis pernah menjadi anggota Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) pada Departemen Dana dan Usaha Tahun 2020-2021. Penulis pernah menjadi asisten dosen pada mata kuliah Renang pada semester ganjil tahun ajaran 2019/2020.

Penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Kelurahan Gunung Terang, Kecamatan Langkapura, Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung tahun 2021. Penulis melaksanakan Praktik Umum (PU) secara mandiri di Pulau Kelagian, Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Pesawaran dengan judul “Pemetaan Sebaran Vegetasi Lamun menggunakan Citra Satelit sentinel 2-A di Pulau Kelagian, Teluk Lampung”.

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang.

Puji syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat serta karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Dengan kerendahan hati dan ketulusan, kupersembahkan skripsi ini sebagai tanda bukti kasih sayangku.

Untuk yang tersayang :

Ayahku M. Ali Umri dan Ibuku Popi Delvira

Yang telah senantiasa melalui banyak perjuangan dan rasa sakit hanya untukku. Terima kasih atas semua kepercayaan dan doa yang diberikan kepada saya selama ini sehingga saya bisa sampai pada tahap Sarjana Sains.

Adik dan seluruh keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan dukungan dalam semua proses yang saya lewati, sehingga saya dapat menyelesaikan pendidikan sarjana.

Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dengan tulus dan ikhlas, serta teman-teman seperjuangan yang selalu ada di saat senang maupun sulit kehidupan perkuliahan ini.

Dan almamater tercinta
Universitas Lampung

MOTO

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya”
(Q.S Al-Baqarah :286)

“Sesungguhnya, apa yang dijanjikan kepadamu itu pasti terjadi”
(Q.S Al-Mursalat : 7)

“Apabila sesuatu yang kau senangi tidak terjadi, maka senangilah apa yang terjadi”
(Ali bin Abi Thalib)

“Ketika dalam kesulitanmu orang-orang meninggalkanmu, itu bisa jadi karena Allah sendirilah yang akan mengurusmu”
(Imam Syafi'i)

“Terkadang Allah membiarkan kamu untuk merasakan kepahitan dunia ini supaya kamu dapat sepenuhnya menghargai manisnya iman”
(Omar Suleiman)

SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan.

Skripsi dengan judul “*Analisis Tingkat Kerusakan Bangunan Berdasarkan Skenario Ketinggian Inundasi Tsunami yang Berbeda di Pulau Pisang, Kabupaten Pesisir Barat*” adalah salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Universitas Lampung.

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan FP Unila;
2. Munti Sarida, S.Pi. M.Sc. Ph.D. selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan;
3. Dr. Henky Mayaguezz, S.Pi., M.T. selaku dosen pembimbing utama;
4. Eko Efendi, S.T., M.Si. selaku dosen pembimbing pembantu dan dosen pembimbing akademik;
5. Dr. Moh. Muhaemin, S.Pi., M.Si. selaku dosen penguji utama;
6. Ayah, Ibu, Adik yang telah mendoakan dan memberikan.
7. Ismawan Adjie Prasetyo dan Ramdani Rasyid sebagai tim tsunami yang senantiasa membantu penulis dalam penelitian;
8. Teman-teman seperjuangan mahasiswa Prodi Ilmu Kelautan angkatan 2018.

Dengan adanya skripsi yang telah disusun, penulis berharap dapat membantu dan memberikan informasi kepada pembaca, semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, Juni 2025

Fathan Al Fadhil
NPM. 1814221007

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Manfaat Penelitian.....	3
1.4. Kerangka Pikir Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Tsunami.....	5
2.2. Faktor Penyebab Terjadinya Tsunami	6
2.3. Mekanisme Terjadinya Gelombang Tsunami	8
2.4. Sejarah Tsunami di Pulau Sumatera.....	9
2.5. Dampak Tsunami.....	10
2.6. Kerentanan Fisik Bangunan	10
2.7. Pengaruh Ketinggian Tsunami dan Kecepatan Gelombang Tsunami Terhadap Kerusakan Bangunan	12
III. METODE PENELITIAN	14
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2. Bahan dan Alat	14
3.3. Pengumpulan Data.....	15
3.4. Metode Penelitian.....	16
3.5. Prosedur Penelitian.....	16
3.5.1. Pengolahan Citra.....	18
3.5.2. Mengidentifikasi Daerah Rendaman Tsunami	18
3.5.3. Kemiringan Lahan (<i>Slope</i>)	18
3.5.4. Tutupan Lahan.....	19
3.5.5. Pemodelan Daerah Rendaman Tsunami	21
3.5.6. Kerusakan Bangunan	23
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1. Kerentanan Bangunan dan Penyebaran Pada Wilayah Terdampak	29
4.2. Estimasi Daerah Terdampak Tsunami.....	32
4.2.1. Skenario Ketinggian Tsunami 5 Meter	32
4.2.2. Skenario Ketinggian Tsunami 10 Meter	35

4.2.3. Skenario Ketinggian Tsunami 20 meter.....	39
4.3. Skenario Tingkat Kerusakan Bangunan	43
4.3.1. Skenario Kerusakan 5 Meter	44
4.3.2. Skenario Kerusakan 10 Meter	47
4.3.3. Skenario Kerusakan 20 Meter	50
V. SIMPULAN DAN SARAN.....	53
5.1. Simpulan	53
5.2. Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Katalog tinggi tsunami signifikan.	9
2. Alat penelitian.	15
3. Bahan penelitian.	15
4. Tingkat kemiringan lahan.	19
5. Nilai koefisien penggunaan lahan.	20
6. Data kerentanan bangunan.	30
7. Ketinggian genangan tsunami 5 meter.	34
8. Ketinggian genangan tsunami 10 meter.	38
9. Ketinggian genangan tsunami 20 meter.	42
10. Kerusakan bangunan sesuai skenario ketinggian 5 meter.	44
11. Kerusakan bangunan sesuai skenario ketinggian 10 meter.	47
12. Kerusakan bangunan sesuai skenario ketinggian 20 meter.	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir penelitian.	4
2. Ledakan gunung berapi di laut menimbulkan bangkitan tsunami.	6
3. Pembangkitan tsunami akibat longsor.	7
4. Grafik pengaruh ketinggian tsunami dan kecepatan gelombang tsunami terhadap kerusakan bangunan.	13
5. Peta lokasi penelitian di Pulau Pisang.	14
6. Prosedur kerja.	17
7. Pemodelan genangan tsunami dengan menggunakan model <i>builder</i>	22
8. Kelas kerentanan bangunan berdasarkan kejadian tsunami Aceh	23
9. Tipologi kerusakan bangunan.	25
10. Kurva kerusakan tsunami.	27
11. Sampel ketahanan fisik.	29
12. Peta kerentanan bangunan.	31
13. Peta lokasi terdampak tsunami pada skenario tinggi genangan 5 meter.	33
14. Peta lokasi terdampak tsunami pada skenario tinggi genangan 10 meter.	37
15. Peta lokasi terdampak tsunami pada skenario tinggi genangan 20 meter.	41
16. Peta lokasi kerusakan bangunan akibat tsunami dengan tinggi genangan 5 meter.	46
17. Peta lokasi kerusakan bangunan akibat tsunami dengan tinggi genangan 10 meter.	49
18. Peta lokasi kerusakan bangunan akibat tsunami dengan tinggi genangan 20 meter.	52

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia secara geografis terletak pada pertemuan tiga lempeng, yaitu Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik, yang sering mengalami berbagai aktivitas tektonik dan vulkanik akibat pergerakan lempeng-lempeng tersebut. Panjang garis pantai yang dimiliki oleh Indonesia yakni sekitar 108.000 km dengan total garis pantai yang rawan akan tsunami sekitar 21.000 km (Gunawan, 2023), yaitu garis pantai berhadapan langsung dengan zona sangat rawan terhadap bencana gempa bumi dan tsunami (Kasman & Triokmen, 2021).

Bencana tsunami merupakan salah satu bencana alam yang mengancam penduduk terutama mereka yang menetap di wilayah pesisir. Meskipun bencana tsunami jarang terjadi, namun kemampuan yang besar untuk merusak membuat bencana tsunami harus diwaspadai (Lessy *et al.*, 2021). Bencana alam yang terjadi di daerah pesisir seperti tsunami akan menyebabkan kerusakan pada jalan-jalan, lokasi konstruksi, bangunan, dll. Bencana ini mengakibatkan kerusakan fisik, kehilangan atau kerusakan properti dan infrastruktur, gangguan psikososial, sosial-demografis, sosial ekonomi, dan sosial-politik (Fauzi & Mussadun, 2021).

Wilayah pesisir di bagian barat pulau Sumatera menjadi salah satu daerah rawan terhadap bencana tsunami karena kawasannya berhadapan langsung dengan zona tumbukan lempeng Eurasia dan Indo-Australia, yang bisa memicu gempa bumi besar (Zona Megathrust) Pada bagian barat Lampung terutama Kabupaten Pesisir Barat Lampung rentan terhadap tsunami karena lokasi daerah Pesisir Barat Lampung berbatasan langsung dengan zona tumbukan lempeng tersebut (Pratiwi & Fitri, 2021). Pulau Pisang adalah salah satu pulau paling barat yang ada di Provinsi Lampung yang langsung menghadap Samudra (Riyani, 2017). Pulau Pisang terletak di Pesisir Barat Lampung memiliki potensi terkena tsunami karena berada

dekat dengan zona subduksi lempeng Indo-Australia dan Eurasia, yang rawan gempa bumi tektonik di dasar laut.

Tsunami merupakan gelombang yang terjadi setelah gempa bumi, gempa laut, letusan gunung berapi, atau dampak meteor di laut. Tinggi tsunami pada saat mendekati pantai akan mengalami perbesaran, Tinggi tsunami yang ada di laut dalam hanya sekitar 1-2 meter, namun saat mendekati pantai dapat mencapai tinggi puluhan meter. Proses datangnya tsunami tersebut di daerah pantai dapat merusak apa saja yang dilaluinya seperti, bangunan, tumbuh-tumbuhan, dan mengakibatkan korban jiwa manusia serta menyebabkan genangan, pencemaran air asin lahan pertanian, tanah, dan air bersih (Sugito, 2008).

Beberapa faktor yang mempengaruhi tingkat kerusakan bangunan akibat tsunami diantaranya adalah ketinggian tsunami dan kerentanan bangunan. Ketinggian tsunami berkorelasi dengan tingkat kerusakan bangunan (Koshimura *et al.*, 2009). Bangunan yang memiliki struktur yang lemah lebih cenderung rusak oleh tsunami (Wibowo *et al.*, 2017). Wilayah perairan laut di depan Pulau Pisang merupakan bagian dari zona megathrust memiliki sejarah aktivitas seismik yang signifikan, meskipun Pulau Pisang belum pernah terkena tsunami besar secara langsung seperti pada Gempa Aceh 2004. Letaknya yang dekat dengan sumber gempa di Samudra Hindia membuat pulau ini berisiko terdampak bencana tsunami.

Kerentanan bangunan menunjukkan kondisi suatu bangunan mudah rusak akibat suatu bencana sehingga tidak dapat digunakan sebagaimana mestinya. Penilaian kerentanan sangat bermanfaat untuk mengevaluasi risiko akibat tsunami (Sari & Kusumawati, 2023). Risiko Tsunami dapat diartikan sebagai suatu akibat negatif yang dapat timbul ketika bahaya Tsunami terjadi, yang mempengaruhi terhadap elemen kerentanan manusia, dan properti (Pradika, 2012). Oleh karena itu, diperlukan simulasi kerusakan bangunan dengan beberapa skenario ketinggian tsunami 5, 10, dan 20 meter untuk mengetahui besaran dampak yang dapat terjadi di Pulau Pisang.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

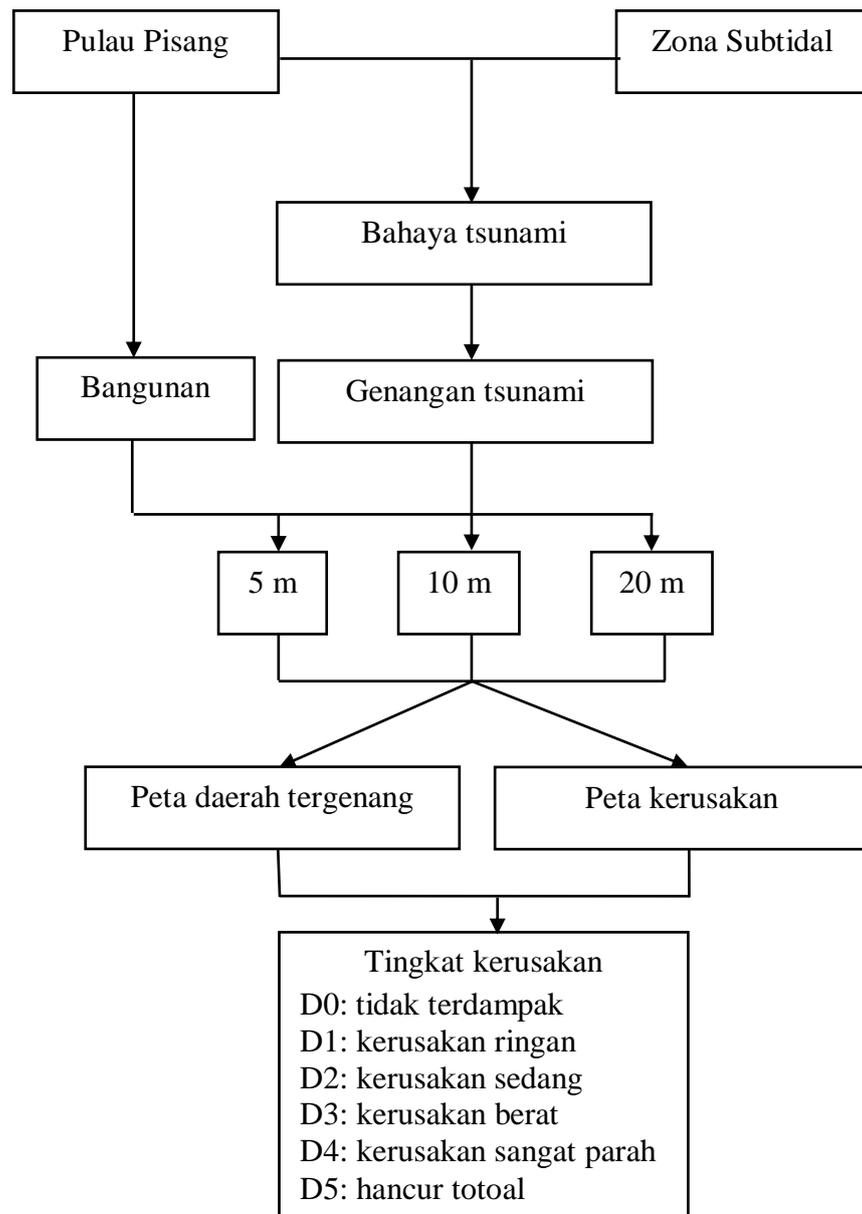
1. memetakan kerentanan bangunan terhadap tsunami di Pulau Pisang.
2. memetakan daerah rendaman tsunami sesuai skenario inundasi tsunami di Pulau Pisang.
3. memetakan tingkat kerusakan bangunan yang diakibatkan oleh tsunami sesuai skenario ketinggian inundasi di Pulau Pisang.

1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberi informasi kepada pemerintah dan masyarakat pesisir, mengenai kawasan yang rentan akan bencana tsunami di wilayah Pulau Pisang. Penelitian ini juga dapat menjadi bahan penanganan bencana yang difokuskan untuk mengurangi korban jiwa dan kerusakan yang akan terjadi di masa yang akan datang.

1.4. Kerangka Pikir Penelitian

Pulau Pisang merupakan sebuah pulau kecil dengan luasan daerah 27,08 km². Secara administrasi, Pulau dengan jumlah penduduk 1.731 jiwa (Badan Pusat Statistik, 2023) ini merupakan dari salah satu kecamatan di Kabupaten Pesisir Barat. Wilayah Pulau Pisang merupakan salah satu wilayah dengan kerentanan tinggi terhadap bencana tsunami. Bencana tsunami dapat menimbulkan korban jiwa dan kerusakan properti masyarakat. Kerusakan dan korban jiwa tersebut tidak bisa dihindari jika tsunami yang terjadi memiliki ketinggian yang cukup tinggi. Oleh sebab itu diperlukan estimasi kerusakan apa saja yang mungkin terjadi terhadap bangunan. Mengingat ketinggian tsunami tidak bisa di prediksi maka estimasi kerusakan dan kerugian diukur berdasarkan 3 skenario ketinggian tsunami 5 m, 10 m, dan 20 m penelitian ini akan menghasilkan estimasi nilai kerusakan sesuai dengan skenario *run up*. Kerangka penelitian disajikan pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Kerangka pikir penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tsunami

Tsunami adalah salah satu bencana alam yang paling merusak dan sering terjadi di wilayah pesisir Indonesia. Fenomena ini terjadi karena letak geografis Indonesia yang berada di antara Lempeng Samudera Indo-Australia di selatan, Lempeng Samudera Pasifik di timur, dan Lempeng Eurasia yang memiliki aktivitas tektonik dinamis (Rusli, 2010). Tsunami terjadi ketika gangguan impulsif di dasar laut, seperti perubahan bentuk secara vertikal dari struktur geologis dasar laut, menghasilkan gelombang laut yang merambat ke berbagai arah. Kata "tsunami" berasal dari bahasa Jepang, di mana "tsu" berarti pelabuhan dan "nami" berarti gelombang. Tsunami secara konkret adalah gelombang laut gravitasional dengan periode panjang yang disebabkan oleh berbagai peristiwa, termasuk gempa bumi, pergerakan patahan, longsor bawah laut, jatuhnya benda langit, letusan gunung berapi bawah laut, dan ledakan di dekat permukaan air laut.

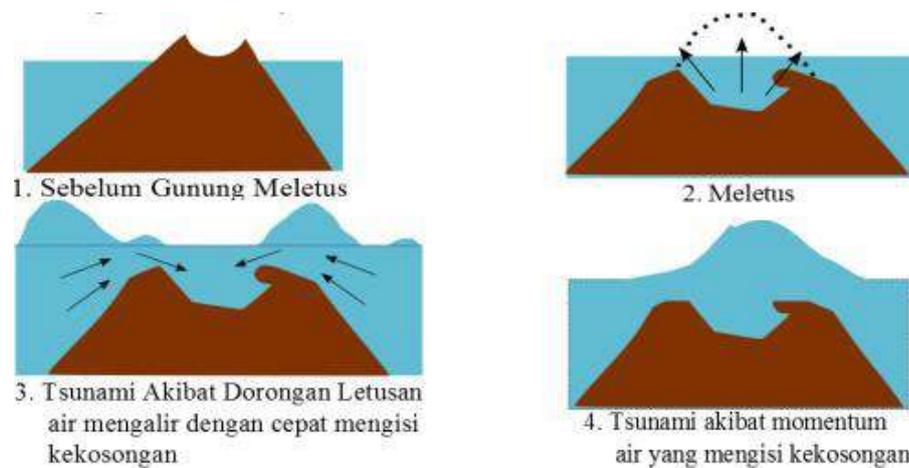
Potensi tsunami di Asia Pasifik sangat tinggi karena wilayah ini merupakan salah satu zona seismik paling aktif di dunia, dikenal sebagai Cincin Api Pasifik. Negara-negara di kawasan ini, seperti Indonesia, Jepang, dan Filipina, sering mengalami gempa bumi yang dapat memicu tsunami. Aktivitas tektonik di bawah laut, seperti subduksi lempeng, dapat menyebabkan perubahan bentuk dasar laut yang mendadak dan menghasilkan gelombang tsunami yang merambat ke berbagai arah. Dampak tsunami ini dapat sangat merusak, menghancurkan infrastruktur dan menyebabkan korban jiwa. Oleh karena itu, penting untuk meningkatkan sistem peringatan dini dan mitigasi risiko di wilayah-wilayah rentan tsunami.

2.2. Faktor Penyebab Terjadinya Tsunami

Bencana tsunami dapat disebabkan oleh gangguan-gangguan yang memiliki skala besar terhadap air di laut. Biasanya, tsunami disebabkan karena aktivitas atau gangguan alam seperti letusan gunung berapi, gempa bumi tektonik dan longsoran di bawah laut yang penjelasannya sebagai berikut.

1. Gempa Vulkanik

Gempa vulkanik merupakan gempa yang diakibatkan karena peristiwa meletusnya gunung berapi. Gempa vulkanik cenderung menghasilkan getaran yang tidak terlalu kuat karena sebagian besar energi yang dihasilkan pada gempa disalurkan melalui suara ledakan gunung berapi. Peristiwa gempa karena aktivitas vulkanik ini pada umumnya memiliki getaran yang lebih kecil jika dibandingkan dengan gempa yang diakibatkan karena pergerakan lempeng tektonik.



Gambar 2. Ledakan gunung berapi di laut menimbulkan bangkitan tsunami.
Sumber: Triatmadjo, (2010).

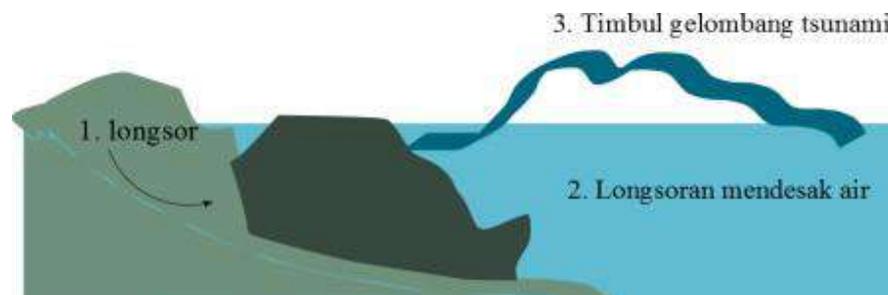
Gambar 2 menunjukkan proses terbentuknya tsunami akibat letusan gunung berapi bawah laut. Sebelum meletus, gunung berada stabil di bawah laut. Saat meletus, terjadi ledakan besar yang menciptakan kekosongan. Air laut kemudian mengalir cepat mengisi kekosongan tersebut, menghasilkan dorongan kuat dan membentuk gelombang tsunami.

2. Gempa Tektonik

Jenis gempa yang disebabkan karena aktivitas pergerakan lempeng bumi disebut gempa tektonik. Dalam mekanisme tsunami yang diakibatkan gempa tektonik, umumnya gempa terjadi di bawah laut yang mengakibatkan air di atas wilayah lempeng tersebut menjadi berpindah dari posisi setimbangnya. Gempa bumi tektonik yang mengakibatkan tsunami terjadi karena beberapa faktor penentu, yaitu seperti episentrum gempa pada dasar laut, besarnya magnitudo gempa lebih dari 6,5 SR, kedalaman sumber gempa kurang dari 50 km, gerakan pembangkit gempa secara tegak (*dip-slip*) dan bukan horizontal (*strike-slip*), kemiringan, topografi, bentuk dari pesisir pantai, serta kekuatan energi tsunami sehingga mampu membentuk gelombang tsunami (Rusli, 2010).

3. Gempa Longsoran

Peristiwa gempa longsoran terjadi ketika tanah ataupun batuan dalam massa yang besar jatuh ke laut lalu menggosok massa air laut dengan cepat dan menimbulkan tsunami yang merambat ke pantai karena pergerakan massa air yang kuat (Triatmodjo, 2010).



Gambar 3. Pembangkitan tsunami akibat longsoran.

Sumber : Triatmodjo, (2010).

Gambar 3 menunjukkan tsunami yang terjadi akibat longsoran bawah laut. Longsoran menekan air laut, lalu tekanan itu menghasilkan gelombang tsunami yang menyebar ke sekitarnya.

2.3. Mekanisme Terjadinya Gelombang Tsunami

Menurut Triatmodjo (2010), peristiwa tsunami terjadi karena mekanisme yang terdiri dari empat tahap yang dimulai dengan tahap kondisi awal terbentuknya tsunami, tahap pemisahan gelombang, tahap amplifikasi serta tahap terjadinya rambatan sebagai berikut.

1. Tahap permulaan terbentuknya tsunami

Gempa bumi pada umumnya berupa guncangan permukaan yang dihasilkan dari perambatan gelombang elastik melalui batuan dasar ke permukaan bumi dan kemudian mengakibatkan sebagian dasar lautan menjadi terangkat dan sebagian turun, sehingga dapat mendorong gerakan air ke atas dan ke bawah pada wilayah yang berdekatan dengan titik gempa. Dorongan air tersebut menghasilkan energi potensial yang kemudian diubah menjadi gelombang tsunami berupa energi kinetik di atas permukaan laut rata-rata.

2. Tahap pemisahan gelombang

Pada tahap ini gelombang tsunami awal akan terpecah menjadi tsunami setelah beberapa menit terjadinya gempa. Tsunami yang merambat ke laut disebut dengan tsunami jauh, dan sebagian lain merambat ke wilayah pesisir disebut dengan tsunami lokal. Ketinggian gelombang di atas permukaan laut ditentukan dari rata-rata tinggi dua gelombang dalam arah berlawanan dan kurang lebih setengah dari ketinggian gelombang tsunami asli. Dengan demikian, gelombang tsunami laut dalam merambat lebih cepat dibandingkan gelombang tsunami lokal.

3. Tahap amplifikasi gelombang

Ketika tsunami lokal menyebar di lereng kontinental, amplitudo gelombang mengalami peningkatan dan panjang gelombang akan menjadi turun saat menuju daratan. Kondisi lereng-lereng daratan pesisir yang cenderung lebih tegak kemudian menimbulkan pembentukan rayapan dari gelombang tsunami.

4. Tahap rambatan gelombang tsunami

Rambatan gelombang tsunami merupakan tinggi muka air di suatu pantai terhadap muka air laut rata-rata yang digunakan sebagai dasar atau acuan. Pada proses rambatan gelombang tsunami, rambatan menghasilkan suatu bentuk rayapan ketika gelombang merambat dari laut dalam melewati lereng kontinental menuju ke

wilayah pesisir. Tsunami tidak menghasilkan gelombang tinggi yang berputar secara lokal seperti gelombang yang digerakkan oleh angin, namun tsunami datang sebagai gelombang dengan energi kuat serta memiliki kecepatan tinggi di wilayah pesisir pantai. Dalam rayapan gelombang tsunami, rayapan yang pertama tidak selalu merupakan gelombang tertinggi.

2.4. Sejarah Tsunami di Pulau Sumatera

Katalog historis tsunami yang digunakan yaitu tahun 2000-2018 yang dirilis oleh Pusat Gempa Bumi dan Tsunami Indonesia. Kejadian tsunami yang tercatat pada Tabel 1, sejarah mencatat bahwa wilayah Sumatera memang rentan terhadap gempa bumi dan tsunami karena berada di zona subduksi aktif, yaitu pertemuan antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia. Aktivitas tektonik yang tinggi ini telah menyebabkan sejumlah kejadian tsunami signifikan yang berdampak besar terhadap masyarakat pesisir. Berikut data signifikan tsunami disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Katalog tinggi tsunami signifikan.

No	Waktu Kejadian	Mag. Gempa	Sumber Tsunami	Lokasi		H (m)	Referensi
				Lat	Lon		
1.	11-11-2004	7.5	Barat daya Banda Aceh Megathrust Sumatera	3.295	95.982	5-30	BMG, Borrero (2005), EERI report.
2.	12-09-2007	8.4	Bengkulu	-4.438	101.367	3.6	BMG, BAKOSURTA NAL, Borrero <i>et al.</i> (2009).
3.	25-10-2010	7.7	Mentawai, Sumatera Barat	-3.57	99.93	6-12	BMKG, LIPI, Kerpen <i>et al.</i> (2011) dalam Satake <i>et al.</i> (2012)

Sumber : Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, (2018).

2.5. Dampak Tsunami

Bencana gempa bumi dan tsunami di daerah pesisir menyebabkan berbagai kerugian ekonomi yang signifikan. Jenis kerusakan yang terjadi meliputi kerusakan aset seperti rumah, bangunan komersial, dan infrastruktur kritis. Kerugian ekonomi lainnya termasuk kerugian bisnis dan hilangnya mata pencaharian masyarakat yang bekerja sebagai pedagang dan nelayan. Li *et al.* (2014), menunjukkan bencana di daerah pesisir perkotaan dapat menyebabkan kerusakan pada jalan, tempat parkir, lokasi konstruksi, dan bangunan. Fauzi & Massadun (2021) menyatakan gempa bumi dapat menimbulkan kerusakan pada rumah penduduk, kantor, pasar, dermaga, dan jalan. Gempa bumi berdampak pada kerusakan aset seperti rumah, bangunan komersial, infrastruktur kritis, dan mata pencaharian masyarakat (Davies & Davies, 2018).

Dampak kerusakan sosial pasca bencana gempa bumi dan tsunami di daerah pesisir mencakup berbagai aspek. Pertama, kerusakan yang mempengaruhi manusia seperti kematian dan cedera. Kedua, gangguan layanan makanan dan pasokan bahan bakar. Ketiga, gangguan layanan kesehatan dan penyediaan kesejahteraan. Keempat, gangguan layanan keuangan. Kelima, gangguan layanan perawatan medis. Kerusakan sosial lainnya termasuk kehilangan kekuatan masyarakat yang mengalami trauma serta hilangnya pelayanan air bersih. Temuan ini sejalan dengan penelitian yang mengidentifikasi dampak bencana terhadap kerusakan fisik tubuh korban, kehilangan atau kerusakan properti dan infrastruktur, serta gangguan psikososial, sosial-demografis, sosial ekonomi, dan sosial-politik (Davies & Davies, 2018; Fauzi & Massadun 2021).

2.6. Kerentanan Fisik Bangunan

Noson (2002) mendefinisikan kerentanan sebagai kondisi spesifik atau karakteristik yang mengakibatkan meningkatnya kerusakan, kerugian dan kehilangan akibat suatu bencana tergantung pada karakteristik seperti jenis material konstruksi, demografi dan letak geografis. Selanjutnya, kerentanan fisik didefinisikan sebagai sifat struktur fisik yang menentukan potensi kerusakan terhadap bencana (jenis material dan kualitas bangunan) (Ebert *et al.*, 2009).

Penaksiran tingkat kerentanan bangunan diperoleh melalui pengukuran variabel elemen fisik bangunan yang berkontribusi pada tingkat kerentanan terhadap bencana Tsunami. Putra (2008) menggunakan empat variabel elemen kerentanan bangunan yaitu material bangunan, lantai dasar, pembukaan lantai dasar, tingkat bangunan, dan orientasi bangunan. Masing-masing elemen memiliki bobot yang berbeda terhadap kerentanan fisik bangunan.

1. Material bangunan

Tingkat kerentanan bangunan terhadap tsunami sangat dipengaruhi oleh material bangunan yang menyusun bangunan tersebut. Material bangunan digunakan sebagai variabel kerentanan bangunan dengan pembagian berdasarkan tiga tipe material di antaranya batako/bata, campuran (batako/bata dan kayu), dan kayu.

2. Bukaan besar di lantai dasar

Lantai dasar Bangunan yang terdapat bukaan pada lantai dasar dianggap mampu meloloskan limpasan air dibanding desain bangunan dengan lantai dasar yang tertutup. Pembagian skor penilaian variabel lantai dasar dibagi menjadi tiga karakteristik, yaitu bukaan lantai dasar tanpa objek bergerak, bukaan lantai dasar dengan objek bergerak, dan lantai dasar tanpa bukaan.

3. Tingkat bangunan

Tingkat bangunan memiliki pengaruh terhadap tingkat kerentanan bangunan. Gelombang tsunami akan menghantam bangunan dengan kedalaman tertentu (Fauzan, 2011). Tingkat bangunan menggambarkan seberapa besar bagian dari tinggi bangunan ketika diterjang gelombang tsunami. Pembagian penilaian kerentanan pada variabel ini dibagi berdasarkan tiga karakteristik yaitu bangunan dengan satu lantai, bangunan dengan dua lantai, dan bangunan dengan tiga lantai atau lebih.

4. Orientasi bangunan

Orientasi bangunan yang dimaksud adalah kecenderungan sisi panjang bangunan terhadap garis pantai. Pembagian nilai kerentanan dibagi menjadi 3 klasifikasi orientasi (terhadap garis pantai), yaitu sisi panjang bangunan cenderung tegak lurus, sisi panjang cenderung miring, sisi panjang bangunan cenderung sejajar. Pembagian tiga zona orientasi tersebut dianggap paling relevan dengan kondisi bangunan di wilayah kajian yang sangat heterogen.

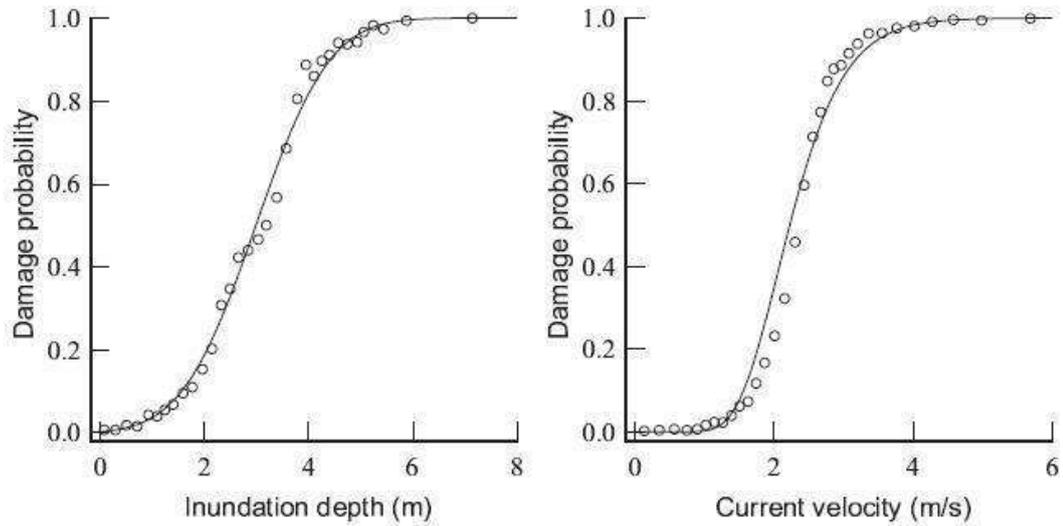
2.7. Pengaruh Ketinggian Tsunami dan Kecepatan Gelombang Tsunami Terhadap Kerusakan Bangunan

Kerusakan bangunan akibat tsunami digolongkan ke dalam tiga bagian, yaitu 1). Kerusakan yang disebabkan oleh gelombang datang, 2). kerusakan yang disebabkan oleh puing-puing yang terbawa oleh gelombang, dan kerusakan yang disebabkan oleh gelombang balik. Ketiga kategori tersebut akan memiliki akibat yang berbeda terhadap bangunan, karena setiap bangunan memiliki struktur yang belum tentu sama (Ramroth, 2007).

Penilaian kerentanan bangunan terhadap tsunami merupakan langkah awal untuk penilaian risiko secara kuantitatif, karena secara teoritis risiko merupakan hasil interaksi antara bahaya dengan kerentanan. Kajian pemetaan risiko secara kuantitatif bermanfaat sebagai dasar pengurangan risiko bencana yang rinci. Pengurangan risiko bencana merupakan salah satu upaya dalam menghadapi bencana alam agar sedapat mungkin mengurangi kerugian yang mungkin ditimbulkan. Penelitian ini bertujuan untuk menilai risiko bangunan terhadap tsunami dengan menggunakan pendekatan kuantitatif. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan untuk pemilihan strategi pengurangan risiko bencana (UNDP, 2004; Smith & Petley, 2008).

Struktur bangunan yang lemah (misalnya, beberapa lantai, bahan bangunan yang lemah seperti kayu, fondasi yang dangkal, perawatan yang buruk.) lebih cenderung rusak oleh tsunami, bahkan jika hanya sebagian yang terendam banjir. Hal ini karena oleh tekanan hidrodinamik air yang mengalir dan/atau benturan dari benda-benda terapung seperti mobil dan perahu (Wibowo *et al.*, 2017). Koshimura *et al.* (2009) juga menemukan hubungan langsung antara ketahanan bangunan dan karakteristik bahaya tsunami (Gambar 4). Faktanya terdapat korelasi yang sangat baik antara kemungkinan kerusakan dan karakteristik banjir (kecepatan dan ketinggian aliran). Bangunan bertingkat yang terbuat dari beton bertulang dan diperhitungkan dengan baik memiliki tingkat ketahanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan bangunan tempat tinggal individu tanpa lantai dan tanpa tulangan.

Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman genangan dan kecepatan arus akibat tsunami, semakin tinggi kemungkinan terjadinya kerusakan, dengan lonjakan tajam terjadi setelah melewati ambang sekitar 2 meter kedalaman dan 2 m/s kecepatan.



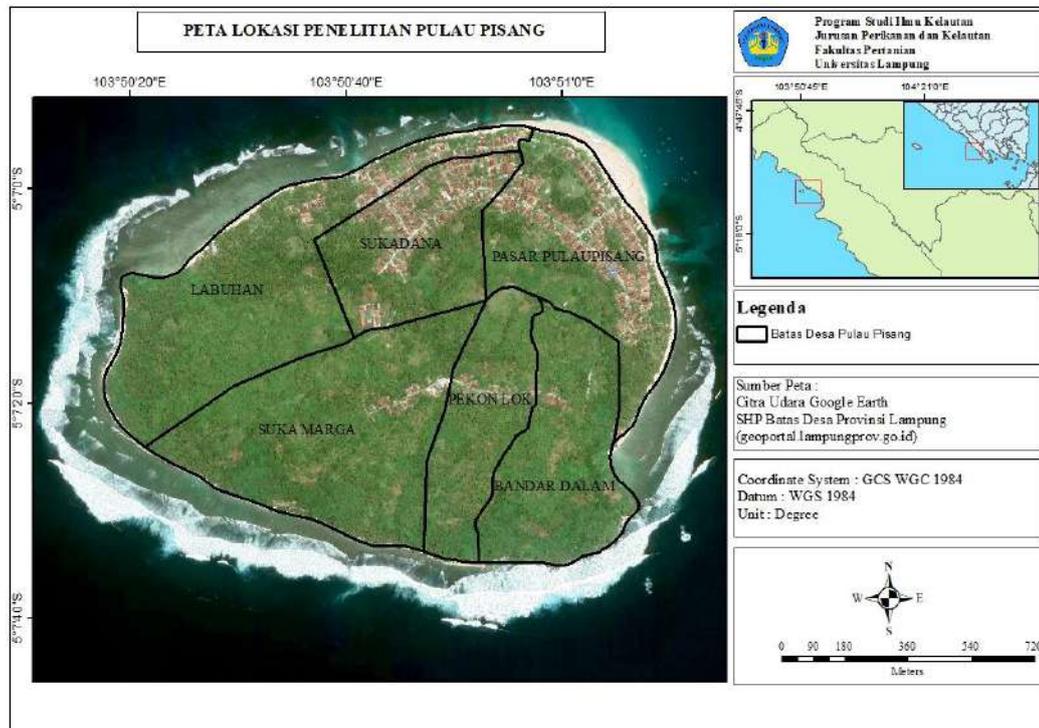
Gambar 4. Hubungan ketinggian tsunami dan kecepatan gelombang tsunami terhadap kerusakan bangunan.

Sumber : Koshimura *et al.* (2009).

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Desember bertempat di Kecamatan Pulau Pisang, Kabupaten Pesisir Barat, Provinsi Lampung. Wilayah penelitian ini meliputi seluruh kecamatan yang terdiri dari Desa Sukamarga, Pekon Lok, Bandar Dalam, Pasar Pulau Pisang, Sukadana, dan Labuhan. Wilayah penelitian ini disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Peta lokasi penelitian di Pulau Pisang.

3.2. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak dan perangkat keras (Tabel 2). Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah peta dan gambar satelit yang diproses sebagai sumber data (Tabel 3).

Tabel 2. Alat penelitian.

No.	Nama Alat	Spesifikasi	Kegunaan
1.	<i>Global positioning system (GPS)</i>	Poco X3GT	Digunakan pada observasi lapangan.
2.	Perangkat keras laptop	Acer nitro V-15	Analisis dan pengolahan data, serta pembuatan laporan penelitian.
3.	Perangkat lunak <i>ArcMap</i>	Arcmap 10.5	Proses pengolahan citra, yaitu pembuatan peta elevasi daratan, kemiringan, jarak dari garis pantai, jarak dari sungai, penggunaan lahan, dan perhitungan luas serta pembuatan laporan penelitian.
4.	Perangkat lunak <i>Microsoft Word</i>	2021	Pembuatan laporan penelitian.

Tabel 3. Bahan penelitian.

No.	Nama Alat	Tipe Bahan	Kegunaan
1.	Citra satelit sentinel-2 dan <i>google earth</i>	Satelit	Digunakan untuk pembuatan peta penggunaan lahan tahun 2021.
2.	DEMNAS (<i>Digital Evation Model Nasional</i>)	IFSAR	Digunakan untuk pembuatan peta elevasi daratan dan peta kemiringan lahan.
3.	Peta RBI (Rupa Bumi Indonesia)	-	Pembuatan peta jarak dari garis pantai, dan peta jarak dari sungai.
4.	Data kerentanan bangunan	-	Data digunakan sebagai uji akurasi.

3.3. Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di lokasi penelitian yang mencakup kerentanan fisik bangunan. Kerentanan fisik meliputi indikator fungsi bangunan, jumlah lantai, bangunan tersebut berpenghuni atau tidak, serta pengecekan lapangan sebagai bentuk validasi hasil interpretasi objek berdasarkan pengamatan penginderaan jauh.

Data sekunder digunakan sebagai data pembanding dengan data primer. Data sekunder diperoleh dari pemerintah terkait dan juga dapat diakses melalui studi pustaka berupa buku, jurnal, artikel, dan situs web yang dapat dipercaya. Peta yang

digunakan meliputi peta *Digital Elevation Model* (DEM), peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), dan Citra Sentinel 2A. Peta DEM berfungsi untuk data raster yang digunakan untuk analisis ketinggian dan kemiringan, sedangkan peta RBI berbentuk raster dan vektor (.shp). Menurut Harti (2009), data sekunder diperoleh secara tidak langsung dari subjek atau objek yang diteliti, tetapi melalui pihak terkait seperti instansi atau lembaga, dengan membaca buku, literatur, laporan statistik, serta hasil penelitian sebelumnya yang relevan.

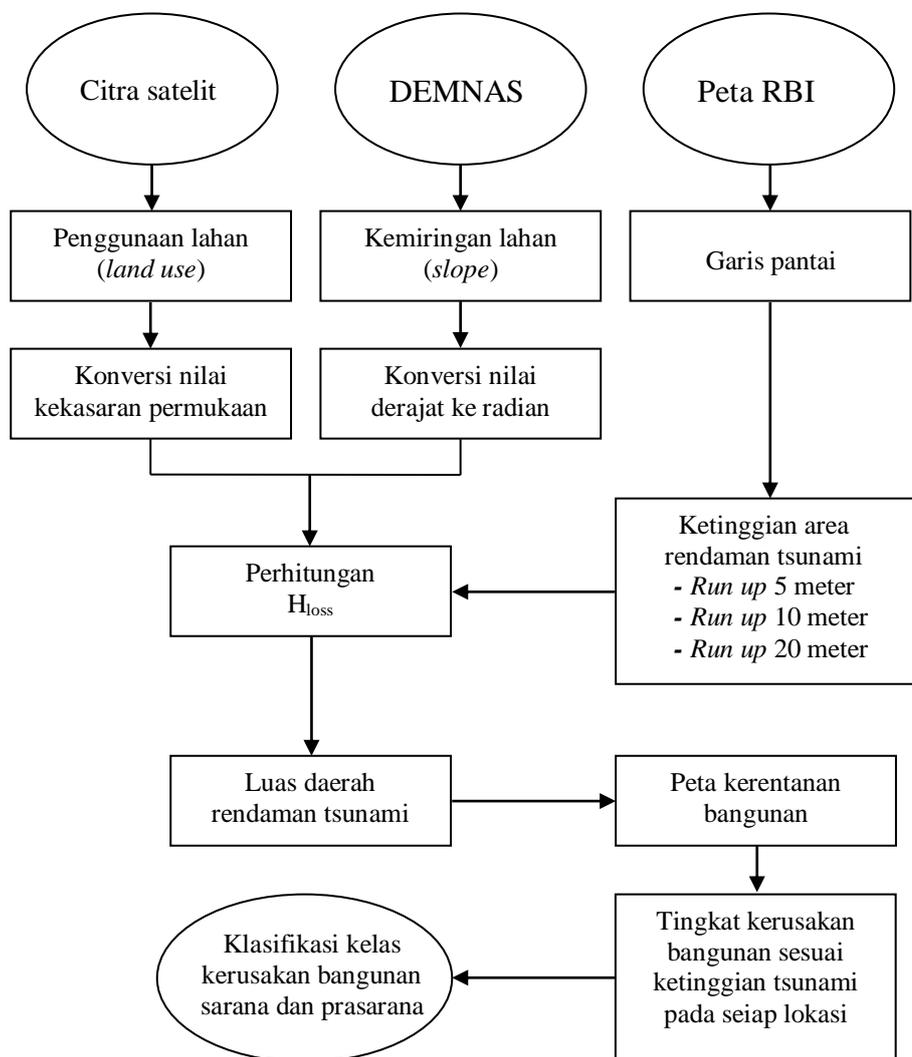
3.4. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Pendekatan kuantitatif adalah pendekatan yang memadukan suatu variabel yang dianalisis dengan data numerik (angka). Pendekatan ini digunakan untuk mendukung tujuan penelitian yang dilakukan, yaitu, identifikasi daerah rendaman tsunami sesuai skenario, identifikasi perbedaan ketinggian rendaman tsunami sesuai skenario dan analisis kerusakan dan kerugian akibat bencana tsunami.

3.5. Prosedur Penelitian

Penelitian ini terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu pengumpulan data, pengolahan data, dan analisis data. Tahap pertama adalah pengumpulan data, yang mencakup pencarian, pengunduhan, dan seleksi citra atau peta yang digunakan dalam analisis. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi citra Sentinel-2 untuk informasi spasial mengenai kondisi fisik wilayah terdampak, peta DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) yang menyediakan data elevasi dan kontur topografi guna menganalisis luasan genangan akibat tsunami, serta peta RBI (Rupa Bumi Indonesia) yang memuat berbagai elemen geografis penting seperti jaringan jalan dan batas administrasi. Selain itu, peta penggunaan lahan yang diterbitkan oleh BIG pada tahun 2018 turut digunakan untuk mengetahui pola pemanfaatan lahan sebelum dan sesudah kejadian. Setelah data terkumpul, penelitian berlanjut ke tahap pengolahan data, yang mencakup analisis peta penggunaan lahan untuk memahami distribusi spasial berbagai kategori lahan serta identifikasi perubahan pola pemanfaatannya akibat tsunami. Analisis kerusakan fisik bangunan dilaku-

kan dengan perangkat lunak ArcMap guna memetakan bangunan yang terdampak berdasarkan data citra dan hasil survei lapangan. Selanjutnya, tahap analisis data dilakukan untuk menginterpretasikan hasil pengolahan serta menjawab pertanyaan penelitian. Analisis mencakup perbandingan kerusakan fisik bangunan sebelum dan setelah kejadian, pengukuran luasan genangan berdasarkan data elevasi dan pola aliran air dari peta DEMNAS, serta penghitungan korelasi antara penggunaan lahan dan kelas kerentanan yang telah dibuat. Keseluruhan alur kerja penelitian ini dapat dilihat secara visual pada Gambar 6.



Gambar 6. Prosedur kerja.

3.5.1. Pengolahan Citra

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode analisis geospasial atau sistem informasi geografis (SIG) dengan dukungan data primer. Sistem informasi geografis (SIG) diartikan sebagai sistem informasi yang digunakan untuk memasukkan, menyimpan, mengolah, menganalisis dan menghasilkan data referensi geografis atau data geospasial, untuk mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan dan pengelolaan penggunaan lahan, sumber daya alam, lingkungan transportasi, fasilitas kota, dan pelayanan umum lainnya. Komponen utama SIG adalah sistem komputer, data geospasial dan pengguna. Semua data yang terkumpul kemudian akan diolah sesuai kebutuhannya masing-masing dan sesuai dengan dasar datanya.

Dalam menjalankan pengolahan data SIG digunakan perangkat lunak ArcGIS. ArcGIS sendiri adalah salah satu perangkat lunak yang digunakan untuk membuat sistem informasi geografis (SIG) yang berbasis dekstop. Software ini memiliki beberapa fungsi ekstensi yang telah tersedia didalamnya serta juga mengimplementasikan konsep berbasis data spasial. ArcGIS diciptakan khusus untuk kompatibilitas sistem informasi berbasis geografis (SIG) yang membutuhkan performa besar seperti *Server GIS*, *Database GIS*, *Web GIS* dan lain sebagainya. *Software* ArcGIS telah menyediakan berbagai macam tools, tutorial serta ekstensi yang mudah dipahami dan digunakan (Wijaya & Ayundha, 2014).

3.5.2. Mengidentifikasi Daerah Rendaman Tsunami

Identifikasi daerah rendaman didasarkan dengan perhitungan sistematis yang didasarkan pada kemiringan lahan, penggunaan lahan, dan rasio ketinggian gelombang yang selanjutnya akan diolah menggunakan ArcGIS pada tools *Model Builder*.

3.5.3. Kemiringan Lahan (*Slope*)

Identifikasi daerah rendaman bertahap pada analisis kemiringan lahan dengan menggunakan data DEMNAS (*digital elevation model nasional*). Data DEM diperoleh dari BIG (badan informasi geospasial) yang selanjutnya diolah menjadi peta kemiringan lahan (*slope*). Kemiringan menjadi salah satu bagian dalam me-

modelkan daerah rendaman tsunami, yang dalam hal ini terjal dan landainya daratan menentukan jangkauan tsunami di suatu wilayah. Wilayah dengan kontur yang lebih tinggi jauh lebih aman dari jangkauan gelombang tsunami (Oktariadi, 2009). Peta kemiringan lahan dibuat dengan prosedur dan indikator yang disajikan pada Tabel 4 di bawah ini.

1. Pengolahan data *slope*

Pengolahan data *slope* menggunakan data DEM yang diinput ke dalam *tools slope* yang terdapat pada 3D analysis *tools* dan *raster surface*.

2. Reclassify data *slope*

Data *slope* dikelaskan ke dalam 5 kelas melalui *tools reclassify* yang terdapat pada 3D analysis *tools* dan *raster reclass*. Proses ini bertujuan untuk membagi tingkat kerentanan dari kemiringan lahan terhadap gelombang tsunami.

Tabel 4. Tingkat kemiringan lahan

<i>Slope</i> (%)	Tingkat Kemiringan Lahan
<8	Datar
8-15	Landai
16-25	Agak curam
26-40	Curam
>40	Sangat curam

Sumber: Peraturan Direktur Jenderal Bina Pengelolaan Daerah Aliran Sungai dan Perhutanan Sosial Nomor: P. 4/V-Set/2013 Tentang Petunjuk Teknis Penyusunan Data Spasial Lahan Kritis.

3. *Dissolve Atribut*

Proses *dissolve* dibagi ke dalam 5 atribut yang bertujuan untuk memudahkan identifikasi persentase tingkat kerentanan. Proses *dissolve* menggunakan *tools dissolve* yang terdapat pada bagian *geoprocessing*.

3.5.4. Tutupan Lahan

Pemetaan tutupan lahan bertujuan untuk menilai tingkat kekasaran permukaan yang akan berdampak pada besaran gelombang tsunami yang menghantam daratan. Peta tutupan lahan dibuat dengan prosedur sebagai berikut;

1. Pengolahan citra satelit

Citra satelit dipertajam di dalam perangkat lunak ArcMap dengan mengkombi-

nasikan warna RGB *true color* pada band tertentu. Citra satelit yang digunakan pada penelitian ini adalah Citra Sentinel-2a dengan kombinasi band warna 4-3-2.

2. Pemotongan citra (*cropping*)

Kombinasi citra yang terdapat pada setiap kanal selanjutnya dipotong (*cropping*) menggunakan peta administrasi wilayah Pulau Pisang. Pemotongan citra bertujuan untuk memudahkan analisis citra dan memperkecil ukuran citra. Proses ini dilakukan di dalam perangkat lunak ArcMap.

3. *Classification unsupervised* (klasifikasi tak terbimbing)

Klasifikasi tak terbimbing (*classification unsupervised*) dilakukan setelah melakukan pemotongan citra agar dapat menampilkan peta tutupan lahan. Proses klasifikasi tak terbimbing ini dilakukan pada perangkat lunak ArcMAP dengan menggunakan *tools classification* lalu pilih *ISO cluster unsupervised classification*, kemudian dilanjutkan dengan mengidentifikasi jenis tutupan lahan dengan cara membandingkannya dengan pengecekan secara langsung (*ground check*) untuk mengelompokkan kelas penggunaan lahan yang sama, sehingga dapat menentukan koefisien kekasaran.

Menurut Abdillah & Muhsoni (2020), pembuatan peta tutupan lahan yang didasarkan dengan koefisien kekasaran dimaksudkan sebagai gambaran nyata di lapangan saat gelombang tsunami merambat di wilayah daratan. Berikut nilai koefisien kekasaran disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Nilai koefisien penggunaan lahan.

No.	Penggunaan lahan	Nilai koefisien kekasaran
1.	badan air	0,007
2.	semak / belukar	0,040
3.	hutan	0,070
4.	kebun / perkebunan	0,035
5.	lahan kosong / terbuka	0,015
6.	lahan pertanian	0,025
7.	pemukiman / lahan terbangun	0,045
8.	mangrove	0,025
9.	tambak / empang	0,010

Sumber : BNPB (2016).

3.5.5. Pemodelan Daerah Rendaman Tsunami

Kehilangan ketinggian genangan dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

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

keterangan:

H_{loss} : Kehilangan ketinggian tsunami per 1 m jarak inundasi.

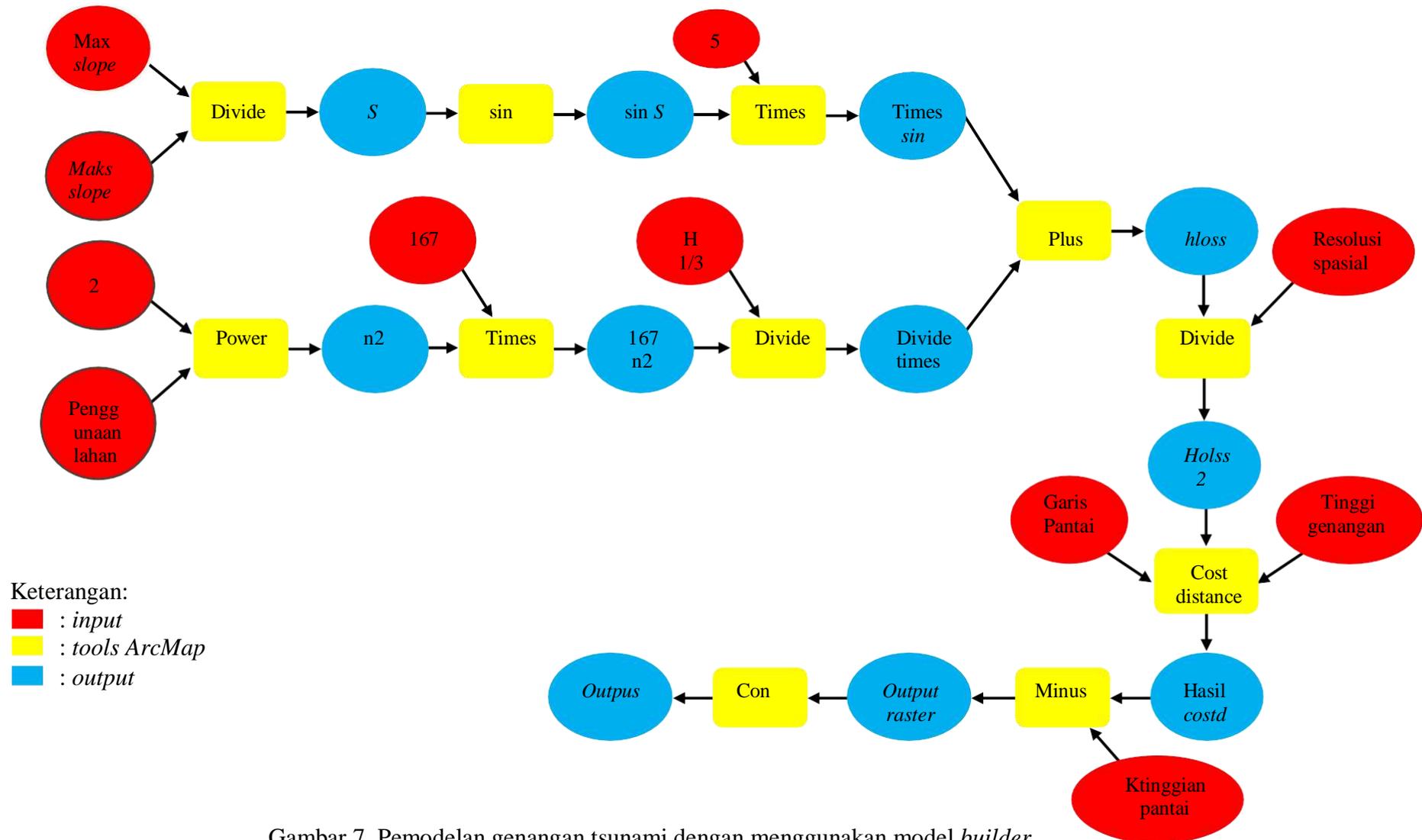
N : Koefisien kekasaran permukaan.

H_0 : Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai (m).

S : Besarnya lereng permukaan (derajat).

Proses pengolahan data untuk pemodelan limpasan tsunami adalah sebagai berikut:

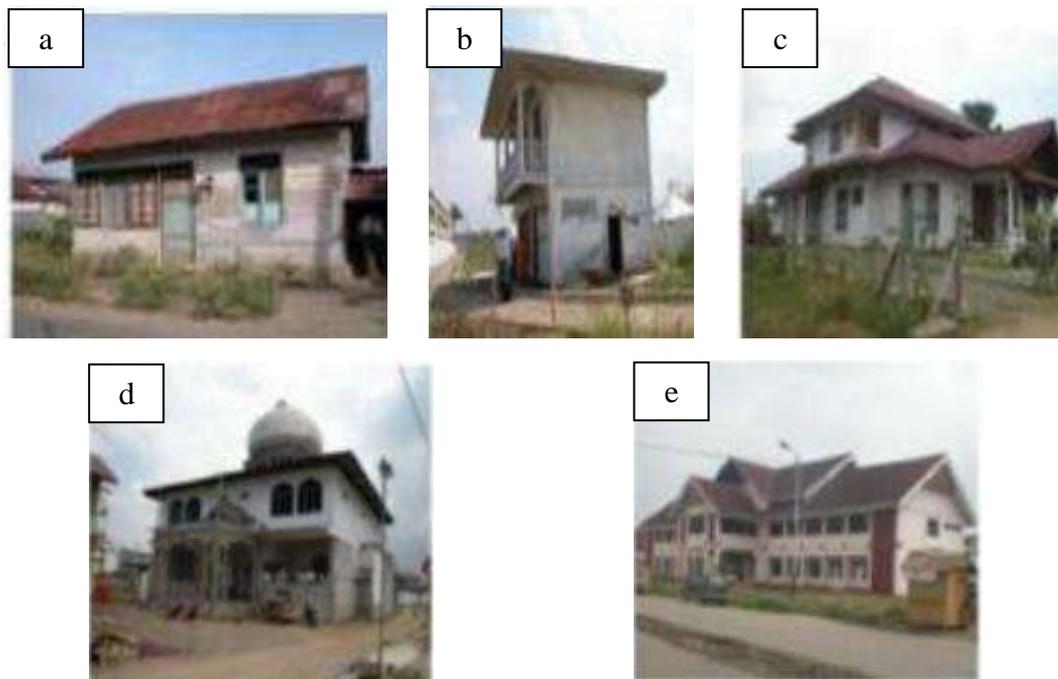
1. Data DEM dimasukkan, lalu dikonversi nilainya menjadi derajat menggunakan *tools slope*.
2. Hasil yang didapatkan dikalikan dengan 5 Sin menggunakan *tools raster calculator*.
3. Peta tutupan lahan dimasukan ke dalam *model builder* kemudian dikali dengan 167.
4. Hasil yang didapatkan dibagi dengan ketinggian tsunami yang akan digunakan (5 m, 10 m, dan 15 m), lalu diberi pangkat 1/3.
5. 5 sin S yang sudah didapatkan dari perhitungan sebelumnya ditambahkan.
6. Hasil H_{loss} yang didapat kemudian dikoneksikan dengan data garis pantai menggunakan *tools cost distance* untuk mendapatkan peta genangan tsunami.



Gambar 7. Pemodelan genangan tsunami dengan menggunakan model *builder*.
 Sumber: Berryman, (2006) yang dimodifikasi.

3.5.6. Kerusakan Bangunan

Pemetaan ini dapat digunakan sebagai dasar menentukan strategi mitigasi dan tindakan yang dapat dilakukan untuk memperkuat atau memperbaiki bangunan. Survey kerentanan bangunan dilakukan berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Leone (2007) dengan klasifikasi (A,B,C,D,E). Bangunan tipe A merupakan bangunan dengan struktur paling lemah, sedangkan tipe E merupakan bangunan dengan struktur paling kuat dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Kelas kerentanan bangunan berdasarkan kejadian tsunami Aceh, (a) bangunan tipe A, (b) bangunan tipe B, (c) bangunan tipe C, (d) bangunan tipe D, dan (e) bangunan tipe E.
Sumber : Leone, (2007).

Bangunan A merupakan bangunan individu dengan struktur kayu yang memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap tsunami. Penyelesaiannya menggunakan kayu atau batu bata, dengan atap genteng merah atau baja lembaran mentah, umumnya tanpa lantai, kadang bertumpu pada tiang pancang, yang membuatnya kurang stabil saat terjadi gelombang besar. Bangunan B adalah bangunan individu dengan struktur campuran beton dan kayu, terdiri dari 1–2 lantai, serta menggunakan atap dari baja lembaran mentah atau yang dicat, atau ubin panel merah dan abu. Memiliki kerentanan sedang, tergantung pada kualitas penyambungan antar material.

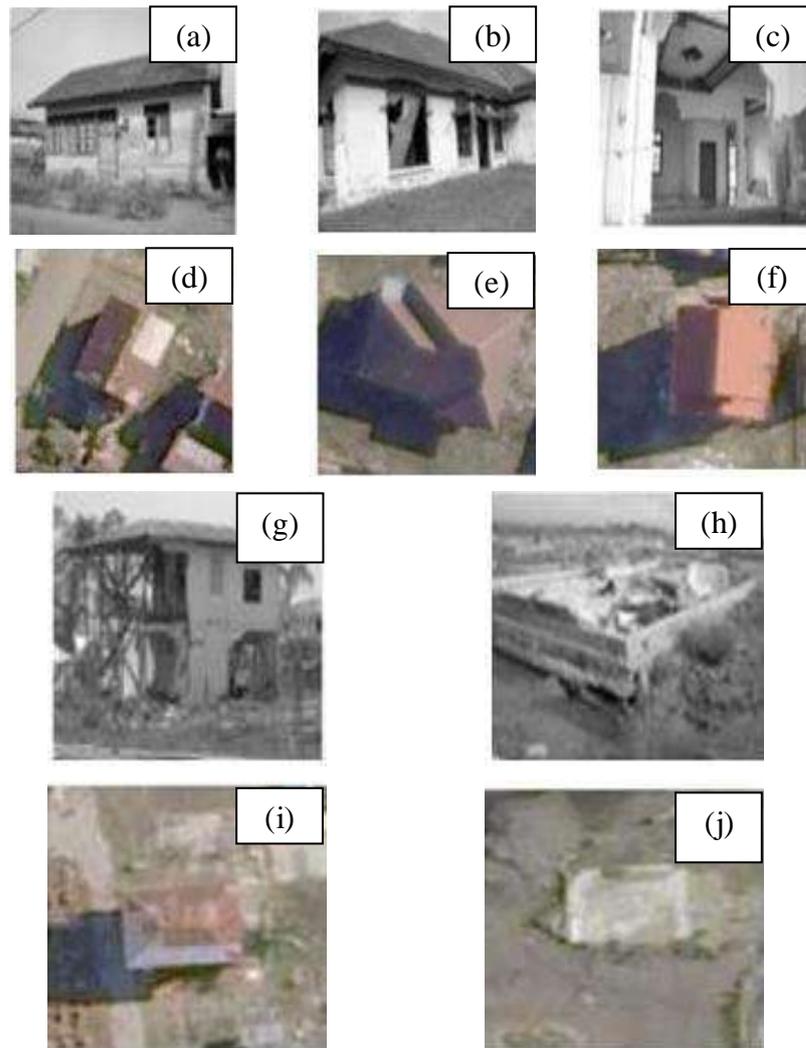
Bangunan C merupakan bangunan individu dengan struktur yang diperkuat beton dan pasangan bata dari batu bata, batu puing, atau beton. Dengan jumlah lantai 1-2 dan atap dari panel-ubin beragam warna, bangunan ini lebih tahan terhadap tekanan gelombang, sehingga memiliki kerentanan yang lebih rendah dibandingkan A dan B. Bangunan D adalah fasilitas umum, baik individu maupun kolektif, yang dibangun dengan struktur beton tidak diperkuat. Meskipun memiliki 1-3 lantai, jenis struktur ini masih tergolong rentan jika tidak dilengkapi penguatan struktural tambahan. Sementara itu, bangunan E termasuk dalam kelas bangunan kolektif dengan struktur beton bertulang, terdiri dari tiga lantai atau lebih, dan atap bervariasi. Bangunan jenis ini memiliki tingkat ketahanan paling tinggi terhadap tsunami, karena konstruksinya dirancang untuk menghadapi beban besar.

Identifikasi kerusakan bangunan ini dilakukan untuk setiap bangunan yang ada di kecamatan pulau pisang. Diperkirakan terdapat sekitar 500 bangunan secara keseluruhan. Setiap bangunan diberikan identifikasi tertentu yang berbeda dengan bangunan lain. Adapun informasi yang dikumpulkan antara lain:

1. Fungsi bangunan (Rumah, Masjid, Fasilitas kesehatan, Fasilitas Umum),
2. Kelas Kerentanan Bangunan (A,B,C,D,E),
3. Tinggi bangunan (Jumlah lantai).

Hasil Identifikasi ini kemudian dipetakan sehingga dapat menggambarkan sebaran bangunan di pulau pisang menurut fungsi bangunan, kelas kerentanan bangunan dan jumlah lantai bangunan.

Lebih lanjut, Leone (2007) mengevaluasi kemampuan resistensi bangunan menurut karakteristik strukturalnya. Tingkat kerusakan bangunan diklasifikasikan menurut hirarki (D0 – D5) Tingkat kerusakan bangunan akibat tsunami bervariasi, dimulai dari kerusakan yang ringan (D0) hingga kerusakan total yang meratakan seluruh bangunan (D5).



Gambar 9. Tipologi kerusakan bangunan 1, atas : tampilan foto lapangan, bawah : tampilan foto udara, (a) dan (d) kategori D0-A, (b) dan (e) kategori D1-C, (c) dan (f) kategori D2-C, (g) dan (i) kategori D3-B, dan (h) dan (j) kategori D0-A.
Sumber : Leone, (2007).

Pada Gambar 9 kategori D0-A menggambarkan kondisi bangunan yang tidak mengalami kerusakan atau hanya menunjukkan kerusakan yang sangat kecil sehingga tidak terlihat bahkan setelah satu tahun berlalu. Foto lapangan memperlihatkan bangunan dalam kondisi utuh dan layak huni, sedangkan foto udara menunjukkan struktur atap dan bangunan yang masih terlihat jelas dan tidak berubah bentuk, menandakan bahwa bangunan tersebut tidak mengalami gangguan struktural maupun visual dari udara.

Pada kategori D1-C, kerusakan yang terjadi bersifat ringan dan tidak memengaruhi struktur utama bangunan, seperti kerusakan pada furnitur, lingkungan sekitar, atau puing-puing yang tertimbun di dalam bangunan. Foto lapangan menunjukkan beberapa kerusakan kecil, sementara foto udara memperlihatkan bangunan yang hampir tidak terlihat, kemungkinan akibat perubahan kecil pada atap atau warna bangunan yang memudar, tetapi bangunan tersebut tetap dikategorikan sebagai layak huni.

Pada kategori D2-C, kerusakan yang dialami lebih signifikan, meskipun tidak sampai merusak struktur utama. Tanda-tanda kerusakan meliputi dinding dan plafon yang retak atau hancur sebagian, jendela dan pintu yang rusak, serta atap yang robek sebagian. Foto lapangan menunjukkan bangunan dengan kerusakan mencolok, dan foto udara memperlihatkan bangunan yang tidak terlihat sama sekali dari atas, menunjukkan gangguan yang cukup parah pada elemen bangunan bagian atas. Klasifikasi ini penting dalam menentukan prioritas pemulihan dan intervensi pasca-bencana, khususnya untuk memastikan keamanan dan kelayakan huni bangunan yang terdampak tsunami.

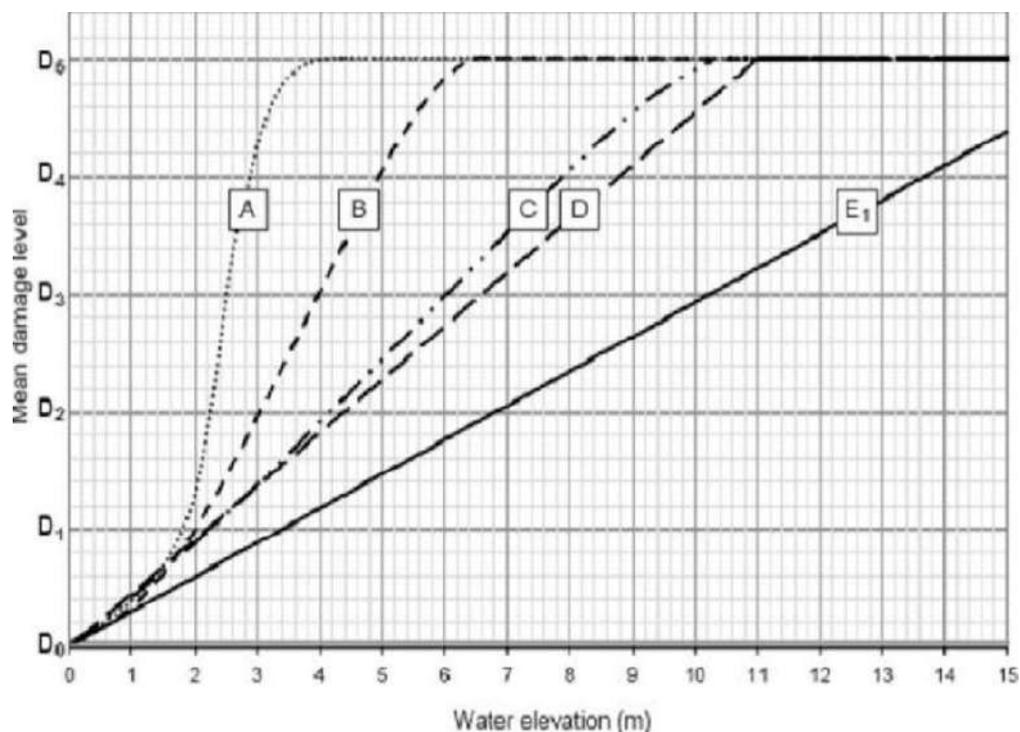
Pada kategori D3-B, kerusakan yang terjadi sudah memengaruhi stabilitas struktur bangunan. Tanda-tanda umum dari kategori ini meliputi retaknya pilar atau runtuhnya sebagian lantai, yang membahayakan keseluruhan kekuatan bangunan. Foto lapangan menunjukkan bangunan dalam kondisi miring atau terdistorsi, sedangkan foto udara memperlihatkan visibilitas yang tidak terlihat atau hampir tidak terlihat, terutama jika atap telah rusak atau dilepas. Meskipun tingkat kerusakannya tinggi, bangunan ini masih dapat diperbaiki dengan evakuasi dan perbaikan struktural yang signifikan.

Gambar dengan kategori D4-C menunjukkan bangunan yang mengalami kerusakan parah pada struktur utama, dengan bagian bangunan yang runtuh secara signifikan. Foto lapangan memperlihatkan keruntuhan sebagian besar elemen struktural, menunjukkan bahwa fungsi struktural bangunan telah terganggu. Dalam citra udara, bangunan masih dapat dilihat, menandakan adanya sisa struktur yang masih berdiri meskipun dalam kondisi tidak stabil. Bangunan pada kategori ini tidak da-

pat diperbaiki karena tingkat kerusakan strukturalnya sangat berat dan berisiko tinggi jika tetap digunakan.

Pada kategori D5-B, terjadi penghancuran total pada bangunan, baik dengan perataan maupun tanpa perataan. Foto lapangan menunjukkan bangunan yang hancur sepenuhnya hingga menyisakan puing. Citra udara memperlihatkan bangunan sangat terlihat, biasanya berupa sisa-sisa struktur atau jejak bangunan di atas tanah. Bangunan dalam kategori ini tidak dapat diperbaiki sama sekali, karena sudah kehilangan seluruh elemen struktural dan fungsionalnya. Klasifikasi ini mencerminkan prioritas tertinggi dalam hal evakuasi dan perencanaan pembangunan kembali di wilayah terdampak tsunami.

Kemudian Leone (2007) Mengintegrasikan tingkat kerusakan bangunan (D0 ,D1, D2, D3, D4, D5) dan kelas kerentanan bangunan dengan (A, B, C, D, E). Grafik dibawah juga menjelaskan posisi ke 5 kelas kerentanan bangunan terhadap tingkat kerusakan menurut variasi ketinggian tsunami.



Gambar 10. Kurva kerusakan tsunami.
Sumber : Leone, (2007).

Gambar 10 menunjukkan hubungan antara ketinggian air (*water elevation*) dan tingkat kerusakan rata-rata (*mean damage level*) untuk lima kategori berbeda (A, B, C, D, dan E). Semakin tinggi elevasi air, tingkat kerusakan juga meningkat. Setiap kategori menunjukkan tingkat kerentanan yang berbeda, di mana kategori A paling cepat mencapai kerusakan maksimum, sedangkan kategori E lebih tahan, baru mencapai kerusakan parah pada ketinggian air yang lebih besar.

Penilaian kerentanan fisik bencana tsunami didasarkan pada pemodelan genangan tsunami dengan berbagai skenario yaitu Hloss dengan tinggi gelombang 5, 10 dan 20 meter. Penilaian kerentanan dan kerusakan bangunan dilakukan berdasarkan metode Leone, (2007); Mayaguezz *et al.* (2017).

V. SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada penelitian ini, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Bangunan-bangunan terhadap tsunami di Pulau Pisang memiliki tingkat kerentanan yang tinggi. Bangunan jenis A (kayu) memiliki tingkat kerentanan tertinggi dan bangunan D (beton) memiliki tingkat kerentanan terendah.
2. Desa Labuhan, Desa Sukadana, dan Desa Pasar Pulau Pisang, adalah yang paling terdampak pada semua ketinggian genangan.
3. Pada skenario ketinggian genangan 5 meter, kerusakan bangunan didominasi oleh kategori tingkat kerusakan D1 tipe bangunan A dan tingkat kerusakan D5 tipe bangunan A, dengan Desa Labuhan sebagai wilayah yang paling terdampak, dengan total 30 bangunan mengalami kerusakan. Skenario 10 meter menunjukkan bahwa kerusakan bangunan lebih banyak terjadi di Desa Pasar Pulau Pisang, dengan kategori bangunan yang paling terdampak adalah D4-A, dengan total 210 bangunan yang rusak. Pada skenario 20 meter, dampak kerusakan semakin meluas, dengan Desa Pasar Pulau Pisang kembali menjadi wilayah dengan tingkat kehancuran tertinggi. Bangunan yang paling terdampak didominasi oleh kategori D5-B dan D5-A, dengan jumlah kerusakan yaitu 210 bangunan.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil yang diperoleh saran yang dapat diberikan adalah mempertimbangkan kebijakan dalam mitigasi bencana, serta menjalin komunikasi yang bagus antara kepala desa dengan warga untuk selalu menerapkan upaya peningkatan kapasitas masyarakat dalam menghadapi bencana gempa dan tsunami.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, I. A., & Muhsoni, F. F. (2020). Pemetaan risiko tsunami berdasarkan skenario ketinggian tsunami di kecamatan pasirian kabupaten Lumajang Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Juvenil*, 1(4), 486-497.
<https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i4.8946>.
- Badan Meteorologi *Klimatologi dan Geofisika (BMKG)*. (2018). *Katalog Tsunami Indonesia perwilayah*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2016). *RBI Risiko Bencana Indonesia*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Berryman, K. (2006). *Review of tsunami hazard and risk in New Zealand*. Institute of Geological & Nuclear Sciences.
<https://www.hbemergency.govt.nz/assets/Documents/Hazard-Reference-Documents/review-of-tsunami-hazard-and-risks-in-nz-sept-05.pdf>.
- Borrero, J.C. (2005). Field Survey northern Sumatra and Banda Aceh, Indonesia and after the tsunami and earthquake of 26 December 2004. *Seismological Research Letters*, 76(3), 312-320. <https://doi.org/10.1785/gssrl.76.3.312>.
- Borrero, J.C., Weiss, R., Okal, E.A., Hidayat, R., Suranto, Arcas, D., & Titov V.V. (2009). The tsunami of 2007 September 12, Bengkulu province, Sumatra, Indonesia: post-tsunami field survey and numerical modeling. *Geophysical Journal International*, 178(1), 180-194.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04058.x>.
- Davies, T. R. H., & Davies, A. J. (2018). Increasing communities' resilience to disasters: An impact-based approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31(6), 742-749. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.07.026>.
- Diposaptono, S. (2007). *Hidup akrab dengan gempa dan tsunami*. Sarana Komunikasi Utama.
https://perpustakaan.kkp.go.id/knowledgerepository/index.php?p=show_detail&id=2791.
- Ebert, A., Kerle, N., & Stein, A. (2009). Urban social vulnerability assessment with physical proxies and spatial metric derived from air and spaceborne imagery and gis data. *Natural Hazards*, 48(2), 275-294.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-008-9264-0>.

- Fauzan, F. (2011). Evaluasi existing building dan pembuatan peta evakuasi vertikal terhadap tsunami di Kota Padang. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 7(2), 9-38. <https://doi.org/10.25077/jrs.7.2.29-39.2011>.
- Fauzi, M., & Mussadun, M. (2021). Dampak bencana gempa bumi dan tsunami pesisir Lere Kota Palu. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Kota*, 17(1), 16-24. <https://doi.org/10.14710/pwk.v17i1.29967>.
- Fitriani, T. (2014). Analisis bahan bangunan pada daerah rawan gempa dan tsunami di Pesisir Pantai Teluk Palu. *Jurnal Infrastruktur*, 4(1), 15-21. <https://www.neliti.com/id/publications/243468/analisis-bahan-bangunan-pada-daerah-rawan-gempa-dan-tsunami-di-pesisir-pantai-te>.
- Gunawan, H. (2023). Analisis peran masyarakat pesisir terhadap ketahanan pasca bencana alam di Desa Pesisir. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan*, 1(1), 47-52. <http://dx.doi.org/10.15578/jkpt.v1i0.12062>.
- Kasman, K., & Triokmen, E. (2021). Analisis risiko bencana tsunami di Pesisir Selatan Jawa studi kasus: Kabupaten Garut. *Jurnal Kelautan Tropis*, 24(2), 265-274. <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>.
- Kerpen, N.B., Kongko, W., Kramer, K.D.D., Goseberg, N., & Schlurmann, T. (2011). International post-tsunami survey related to the October 25th, 2010 Mentawai tsunami. *Dalam* Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P. S., Gusman, A. R., Sunendar, H., Fuji, Y., Tanioka, Y., Latief, H., & Yulianto, E. (2012). Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia Earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling. *Pure and applied Geophysics*, 1, 1-16. 10.1007/s00024-012-0536-y.
- Koshimura, S., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering in Japan*, 51(3), 243-273. 10.1142/S0578563409002004.
- Leone, F. (2007). Characterisation des Vulnerabilites aux Catastrophes 'Naturelles': Kontribusi une Evaluation Geographique Multirisque (Mouvements de Terrain, Seismes, Tsunamis, Letusan Volcaniques, Cyclones). *Universite Paul Valery - Montpellier III*, 2(1), 245. 10.13140/RG.2.2.33919.41123.
- Lessy, M. R., Wahiddin, N., Bemba, J., & Aswan, M. (2021). Analisis potensi genangan tsunami dan penentuan jalur evakuasi berbasis sistem informasi geografis di Desa Daruba Pantai–Kabupaten Pulau Morotai. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 9(1), 79-91. <https://doi.org/10.14710/jwl.9.1.79-91>.
- Li, Z., Valladares, L. R., Abu, G. M., Zhan, T., Yangali, Q. V., & Amy, G. (2014). Osmotically driven membrane process for the management of urban runoff in coastal regions. *Water Research*, 48(1), 200-209.

- <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.09.028>.
- Mayaguezz, H., Perreau, C. P., Leone, F., & Pouget, F. (2017). Spation-temporal modeling of human vulnerability in the case of a tsunami in Padang, Indonesia. *Internasional Journal of Mass Emergencies & Disasters*, 35(3), 224-270.
https://scholar.google.co.id/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=ALaO2NQAAAAAJ&citation_for_view=ALaO2NQAAAAAJ:u5HHmVD_uO8C.
- Noson, L. (2002). *Hazard mapping & risk assesement. Proceeding of The Regional Workshop on Best in Disaster Managemen. 1*, 71-140.
<https://www.adpc.net/V2007/IKM/ONLINE%20DOCUMENTS/download/ADUMP/hazardmapping.pdf>.
- Oktariadi, O. (2009). Penentuan peringkat bahaya tsunami dengan metode analytical hierarchy process (studi kasus: wilayah pesisir kabupaten sukabumi). *Jurnal Geologi Indonesia*, 4(2), 103-116.
<https://doi.org/10.17014/ijog.4.2.103-116>.
- Pratiwi, D., & Fitri, A. (2021). Analisis potensial penjalaran gelombang tsunami di Pesisir Barat Lampung, Indonesia. *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, 8(1), 5-15. <https://doi.org/10.21063/jts.2021.V801.05>
- Pradika, M. I. (2012). Kajian risiko tsunami terhadap bangunan gedung non-hunian dengan aplikasi pj dan sig di Kota Pacitan. *Jurnal Bumi Indonesia*, 1(3), 40-49. <https://www.neliti.com/id/publications/238172/kajian-risiko-tsunami-terhadap-bangunan-gedung-non-hunian-dengan-aplikasi-pj-dan#cite>.
- Pusat Vulkanologi & Mitigasi Bencana Geologi. (2020). *Pemodelan Inundasi dan Pemetaan Kawasan Rawan Bencana Tsunami*. Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Putra, R. (2008). Kajian risiko tsunami terhadap bangunan gedung nonhunian dengan skenario variasi ketinggian *run-up* pada garis pantai (studi kasus Kota Banda Aceh, Indonesia). (Tesis Tidak Terpublikasi). Universitas Gajah Mada.
- Ramroth, W.G. (2007). *Planning for Disasters: How Natural and Man-Made Disasters Shape The Built Environment*. Kaplan Publishing.
- Riyani, E. I. (2017). Tantangan pengembangan ekowisata bahari di Pulau Pisang Pesisir Barat Lampung: *Jurnal Ilmiah Ekonomi dan Bisnis*, 5(1), 16-24.
<https://doi.org/10.37676/ekombis.v5i1.326>.
- Rusli. (2010). Pemodelan tsunami sebagai sarana mitigasi bencana: studi kasus Sumenep dan Kepulauannya. (Tesis Tidak Terpublikasi). Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim.

- Sari, M. M., & Kusumawati, A. (2023). Penilaian kerentanan dan potensi kerusakan bangunan akibat tsunami di Desa Pejamben, Pandeglang, Banten. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(4), 7093-7100. <https://doi.org/10.32672/jse.v8i4.6746>.
- Smith, K. & Petley, D.N. (2008). *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster (5th Edition)*. Routledge.
- Sugito, N. T., & Sugandi, D. (2008). Urgensi penentuan dan penegakan hukum kawasan sempadan pantai. *Jurnal Geografi*, 8(2), 1-12. <https://doi.org/10.17509/gea.v8i2.1703.g1154>
- Triatmodjo, B. (2010). *Teknik Pantai*. Beta Offset.
- UNDP. (2004). *Reducing Disaster Risk: A Challenge for Development*. John S. Swift Co.
- Wibowo, T.W., Mardiatno, D., & Sunarto, S. (2017). Pemetaan risiko tsunami terhadap bangunan secara kuantitatif. *Jurnal UGM*. 31(2), 68-78. <https://doi.org/10.22146/mgi.28044>
- Wijaya, A., & Ayundha, O. (2014). Sistem informasi geografis pemetaan kantor Dinas Pemerintah Kota Palembang menggunakan ArcGIS. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Informasi & Komunikasi Terapan*, 4(1), 129-134. <https://publikasi.dinus.ac.id/index.php/semantik/article/view/853/626>.