

## **Analisis Probabilistik Bencana Tsunami terhadap Tingkat Kerentanan Bangunan di Kota Painan, Sumatera Barat berdasarkan Rasio Gempa dengan Metode *Logic Tree***

**Gusti Mahendra Putra\*<sup>1</sup>, Teuku Mahlil<sup>1</sup>, Nurul Fajar Januriyadi<sup>1</sup>, Teuku Muhammad Rasyif<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Perencanaan Infrastruktur, Universitas Pertamina, Jl. Teuku Nyak Arief, Jakarta Selatan, DKI Jakarta, 12220, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie, Kawasan Rasuna Epicentrum, Jl. H. R. Rasuna Said, Kuningan, DKI Jakarta, 12940, Indonesia  
e-mail: [\\*gustimahendra05@gmail.com](mailto:*gustimahendra05@gmail.com)

---

### **Abstract**

*West Sumatra, especially the Mentawai Megathrust segment, is a vulnerable segment where active faults collide, triggering earthquakes followed by tsunami disasters. The aim of this research is to determine the influence of different variables of seismic activity levels and ratios between large and small earthquakes using the Logic Tree tool, assess the tsunami hazard potential using Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA), and identify buildings that can be used as evacuation centers based on the Building Tsunami Vulnerability (BTV) index in the Padang fault zone in Painan City. The simulation in this research utilized the Cornell Multi-grid Coupled Tsunami program. From the simulation, calculations were conducted to determine the tsunami height for each building in Painan City, and the recurrence interval was determined using the PTHA equation. Additionally, the vulnerability level of buildings was determined using the BTV equation. The processed PTHA data revealed that the maximum tsunami height in a 1000-year recurrence interval is 5.664 meters, while in a 4000-year recurrence interval, it is 36 meters. Based on the Building Tsunami Vulnerability index, the recommended mitigation solution is to use buildings with BTV class values of 0 (none), 1 (low), and 2 (medium). For example, the Branch Office of Bank Nagari building, which is a 4-story reinforced concrete structure, it is designated for residents living near the coastline or far from the hills. Additionally, residents can utilize highlands or hills as evacuation areas.*

**Keywords:** *earthquake, tsunami, Cornell Multi-grid Coupled Tsunami (COMCOT), Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA), Building Tsunami Vulnerability (BTV), evacuation center*

### **Abstrak**

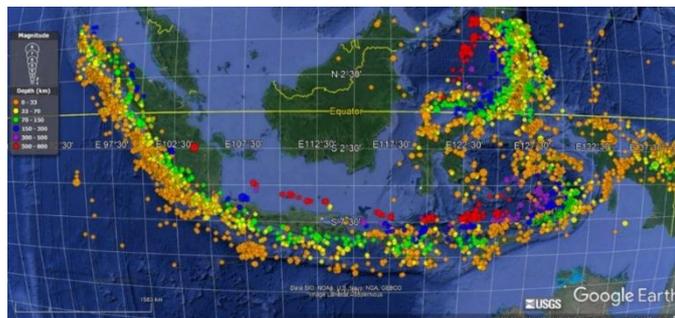
*Sumatera Barat khususnya segmen Mentawai Megathrust merupakan suatu segmen yang rentan terjadinya tumbukan antara patahan aktif, sehingga memicu terjadinya gempa bumi yang kemudian disusul dengan bencana tsunami. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh perbedaan variabel tingkat keaktifan seismik dan rasio antara gempa besar dan gempa kecil dengan alat bantu Logic Tree, potensi bahaya tsunami dengan Probabilistic Tsunami Hazard Assessment, serta menentukan gedung yang dapat digunakan sebagai tempat evakuasi berdasarkan nilai indeks Building Tsunami Vulnerability yang berlangsung di Kota Painan terhadap zona patahan padang. Simulasi dalam penelitian ini menggunakan program Cornell Multi-grid Coupled Tsunami. Dari simulasi tersebut, dilakukan perhitungan ketinggian tsunami pada setiap bangunan di Kota Painan,*

dan waktu periode ulang ditentukan menggunakan persamaan PTHA. Selain itu, dilakukan penentuan tingkat kerentanan bangunan dengan menggunakan persamaan BTV. Hasil pengolahan data PTHA menunjukkan bahwa ketinggian tsunami maksimal dalam periode ulang 1000 tahun adalah 5,664 meter, sedangkan pada periode ulang 4000 tahun adalah 36 meter. Berdasarkan nilai Building Tsunami Vulnerability, solusi mitigasi yang direkomendasikan adalah menggunakan bangunan dengan nilai kelas BTV 0 (tidak ada), 1 (rendah), dan 2 (sedang). Seperti bangunan Kantor Cabang Bank Nagari yang merupakan bangunan beton bertulang 4 lantai, dikhususkan untuk masyarakat yang tinggal di sekitar garis pantai atau yang jauh dari perbukitan. Selain itu, masyarakat yang tinggal dapat memanfaatkan dataran tinggi atau perbukitan sebagai tempat evakuasi.

**Kata kunci:** gempa bumi, tsunami, Cornell Multi-grid Coupled Tsunami (COMCOT), Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA), Building Tsunami Vulnerability (BTV)

## 1. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan luas sekitar 7,81 juta km<sup>2</sup>, terdiri dari daratan sekitar 2,01 juta km<sup>2</sup> (25,7%) dan lautan sekitar 5,8 juta km<sup>2</sup> (74,3%). Terbentang dari Sabang sampai Merauke (Pratama, 2020). Indonesia terletak pada pertemuan lempeng tektonik yang paling kompleks dan aktif di dunia, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik (Mega, 2018). Potensi bencana yang dimiliki Indonesia dapat mengancam penduduknya, termasuk intensitas kegempaan yang cukup tinggi di beberapa pulau (Ratuluhain et al., 2021). Gempa bumi dan tsunami merupakan bencana alam yang berbahaya dan dapat terjadi tanpa diawali tanda, memberikan dampak besar bagi kehidupan manusia.



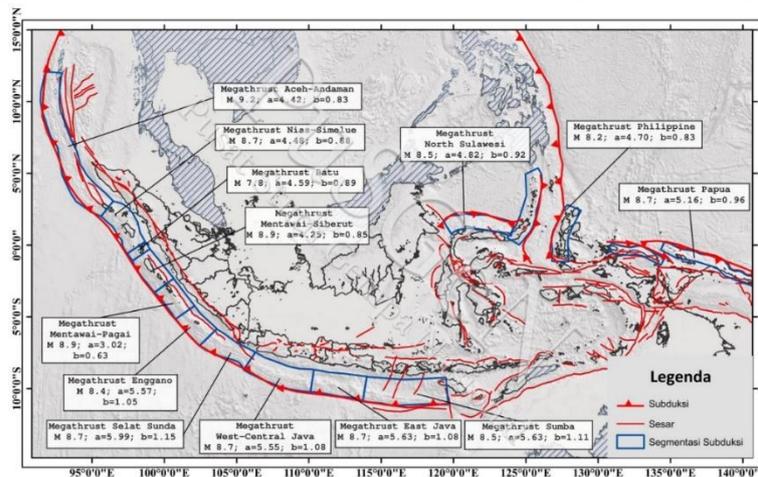
**Gambar 1.1** Peta Persebaran Gempa Bumi di Indonesia dari Tahun 2000-2021

(USGS, 2022)

Indonesia memiliki kawasan lautan seluas 74,3% dengan banyak titik gempa yang terlihat di **Gambar 1.1**. Kawasan ini terletak pada lempeng tektonik, yang berpotensi memicu bencana alam seperti tsunami. Tsunami dapat disebabkan oleh berbagai gangguan, seperti gempa bumi bawah laut, letusan gunung berapi, longsor bawah laut, dan tumbukan benda langit (Rohman, 2019). Gangguan tersebut menyebabkan terbentuknya gelombang tsunami karena dasar laut mengalami perubahan (disturbance) atau patahan dasar bumi yang bergeser secara vertikal, menyebabkan guncangan yang kuat dan sebagian dasar laut mengalami kenaikan (subduksi). Akibatnya, laut mengalami osilasi vertikal yang meluncurkan serangkaian gelombang.

Sumatera Barat, terutama segmen Mentawai Megathrust, adalah area rentan untuk tumbukan antara lempeng dan patahan aktif, yang memicu gempa bumi dan tsunami. Peta segmentasi, khususnya pada patahan Mentawai Megathrust dengan kekuatan 8,9 Mw, terlihat pada **Gambar 1.2**. Pada tahun 1797, terjadi gempa berkekuatan 8,4 M. Kemudian tahun 1833, terjadi gempa berkekuatan 9 M yang diikuti oleh tsunami dengan ketinggian 2-3 meter (Badan Nasional

Penanggulangan Bencana, 2020). Survei kelautan tahun 2008 mengindikasikan bahwa penyebab bencana ini berasal dari longoran bawah laut atau backthrust. Kejadian-kejadian ini menunjukkan bahwa segmen Mentawai Megathrust memiliki potensi besar untuk memicu bencana alam, baik itu gempa bumi dengan magnitudo besar atau tsunami dengan ketinggian yang tinggi.



**Gambar 1.2** Peta Segmentasi dan Mmaks Subduksi Indonesia (PUSGEN & PUSLITBANG PUPR, 2017)

Penelitian ini menggunakan analisis probabilistik bahaya tsunami (PTHA) sebagai awal penentuan penilaian risiko tsunami dan perencanaan mitigasi bencana. PTHA digunakan untuk menilai bahaya suatu daerah dalam rentang waktu tertentu dengan langkah dasar sebagai berikut: (1) Menentukan sumber yang dapat menyebabkan tsunami. (2) Memperhitungkan tinggi gelombang tsunami melalui simulasi. (3) Menentukan kurva bahaya tsunami yang menghubungkan ketinggian gelombang dengan periode ulang dalam waktu tertentu. Dalam penelitian ini, digunakan metode logic tree untuk menganalisis probabilitas ketinggian tsunami dengan variabel  $a$  dan  $b$  (tingkat keaktifan seismik dan rasio antara peristiwa gempa besar dan gempa kecil) yang terlihat pada **Gambar 1.2**.

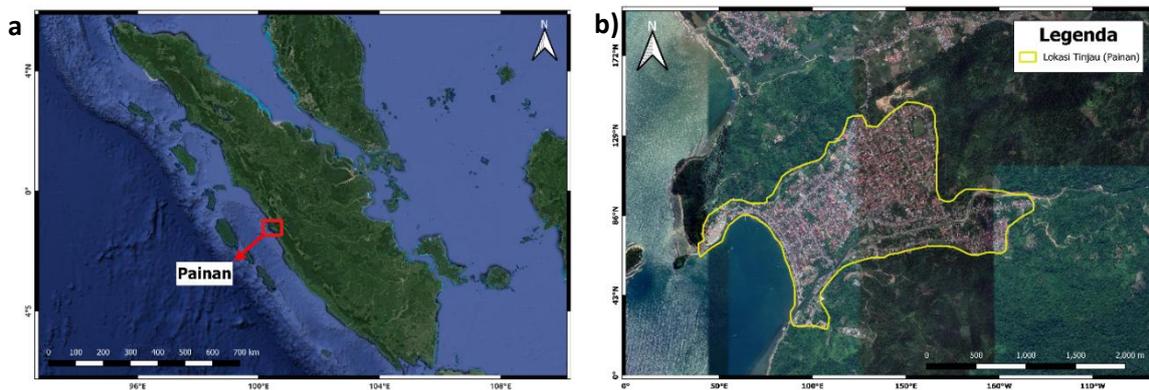
Penelitian ini menggunakan perangkat lunak Cornell Multi-grid Coupled Model (COMCOT) untuk melakukan simulasi model tsunami. COMCOT memperlihatkan proses penjalaran aliran tsunami dari sumber pembangkit ke area pantai, menghasilkan output tinggi tsunami tiap interval waktu (Ratuluhain et al., 2021). Berdasarkan penelitian teoritis dan numerik yang dilakukan oleh Shuto (1991) dan Imamura et al. (1988), COMCOT diciptakan oleh Yongsik Cho dan S.N. Seo, sebagaimana dijelaskan oleh (Wang, 2009). COMCOT telah menghasilkan berbagai pencapaian signifikan, termasuk simulasi Tsunami Chili 1960 (Liu et al., 1994) dan Tsunami Hua-lien Taiwan 1986. Selain itu, COMCOT juga dapat digunakan untuk memprediksi dan menganalisis dampak dari bencana alam, termasuk gempa bumi dan tsunami.

Kerugian besar akibat tsunami disebabkan oleh tingkat kerentanan yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan metode mitigasi yang tepat untuk meningkatkan kesiapsiagaan masyarakat. Salah satu solusi adalah menggunakan *escape building* dari bangunan eksisting yang kuat sebagai tempat evakuasi sementara. Jika tidak ada bangunan eksisting yang cocok, disarankan untuk membangun bangunan evakuasi secara vertikal di wilayah perkotaan agar mencapai daerah perbukitan menjadi lebih mudah. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kerentanan bangunan terhadap bencana tsunami dan memberikan rekomendasi sarana dan prasarana sebagai tempat evakuasi sementara jika terjadi bencana tsunami.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Lokasi Penelitian

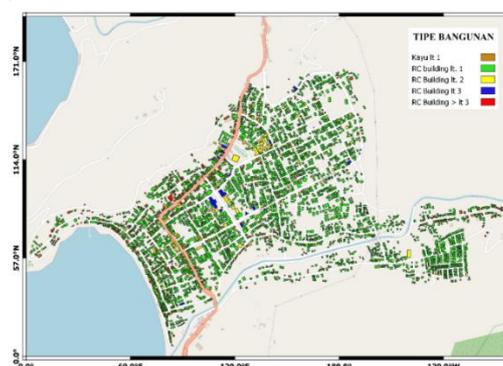
Kota Painan, yang berada di Provinsi Sumatera Barat pada **Gambar 2.1a**, merupakan wilayah yang memiliki tingkat seismisitas tinggi karena berhadapan dengan zona Subduksi Sumatra (McCaffrey, 2009). Kondisi ini menyebabkan wilayah ini menjadi rawan bencana alam, terutama gempa bumi dan tsunami. Bukti nyata dari tingginya risiko ini terlihat dari sejarah gempa di sepanjang Zona Subduksi Sumatra, seperti beberapa gempa besar pada tahun 2004, 2005, 2010, dan 2012 dengan magnitudo masing-masing sebesar 9,1 Mw, 8,7 Mw, 8,4 Mw, dan 7,7 Mw. Mekanisme gempa tersebut mengubah permukaan laut dan menghasilkan tsunami, yang menyebabkan kerusakan sarana prasarana, lahan pertanian, genangan di daerah rendah, dan menyebabkan korban jiwa. Selain itu, dekat ibu kota Provinsi Sumatra Barat, Padang, juga terdapat indikasi *seismic gap*, yaitu area yang belum mengalami gempa besar sehingga menyimpan energi seismik yang memungkinkan terjadinya gempa dan tsunami di masa depan dengan periode ulang sekitar 200 tahun (Schlurmann et al., 2010). Pada **Gambar 2.1b** merupakan area Kota Painan yang memiliki luas 8,49 km<sup>2</sup> dan populasi sekitar 5888 orang dengan kepadatan penduduk sekitar 2365 orang per km<sup>2</sup> pada tahun 2021, seperti dilaporkan oleh (BPS Kabupaten Pesisir Selatan, 2022).



**Gambar 2.1** a) Studi Area b) Analisis BTV dilakukan pada Lokasi Tinjauan

### 2.2 Klasifikasi Bangunan

Pada penelitian kali ini, data klasifikasi bangunan di Kota Painan didapatkan dari survei yang sebelumnya dilakukan oleh (Meitrya, 2021). Dapat dilihat **Gambar 2.3** merupakan peta persebaran bangunan berdasarkan *building class* di Kota Painan. Serta **Tabel 2.1** merupakan jumlah bangunan yang terdapat pada Kota Painan. Gambar tersebut menjelaskan zona kelas terhadap kondisi bangunan yang dapat dibagi berdasarkan material penyusun dan jumlah lantai untuk tipe bangunan *Reinforced Concrete (RC) building*. Menurut (Syamsidik et al., 2022) tujuan klasifikasi jumlah lantai berdasarkan *RC building* adalah untuk menentukan bangunan mana yang dapat dijadikan sebagai tempat evakuasi apabila terjadi bencana tsunami.



**Gambar 2. 2** Peta Persebaran Bangunan Berdasarkan Building Class di Kota Painan

**Tabel 2. 1** Jumlah Bangunan sesuai Building Class (Fc,b) di Kota Painan

Tipe Bangunan	Kelas Zona	Building Class (Fc,b)	Jumlah (unit)	Jumlah (%)
Kayu lantai 1	A	5	417	10.76
RC <i>building</i> lt.1	B	4	3198	82.48
RC <i>building</i> lt.2	C	3	241	6.22
RC <i>building</i> lt.3	D	2	19	0.49
RC <i>building</i> > lt.3	E	1	2	0.05
Total			3876	100

### 2.3 Pemodelan Numerik

Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk gelombang tsunami dengan menggunakan program *Cornel Multigrid Copled Tsunami* (COMCOT) dengan pemodelan *2 Dimensional Horizontal* (2DH). Program COMCOT telah sukses melakukan simulasi dengan hasil yang akurat dan efisien, seperti pada kasus tsunami Chili (1960), Indonesia (2004, 2005, dan 2006), dan Jepang (2011). Program ini mampu mensimulasikan gelombang tsunami secara numerik sehingga dapat membangkitkan penjalaran tsunami dari pusat gempa ke daerah pesisir dengan menggunakan *Shallow Water Equations* (SWE) yang mengandung persamaan momentum dan kekekalan masa. Selanjutnya dilakukan diskritisasi menggunakan metode leapfrog dan upwind. Persamaan SWE akan dicacah terhadap ruang dan waktu untuk persamaan linier dan non linier dalam koordinat *spherical* dan *cartesian*. Persamaan SWE dapat ditulis sebagai berikut (Wang, 2009).

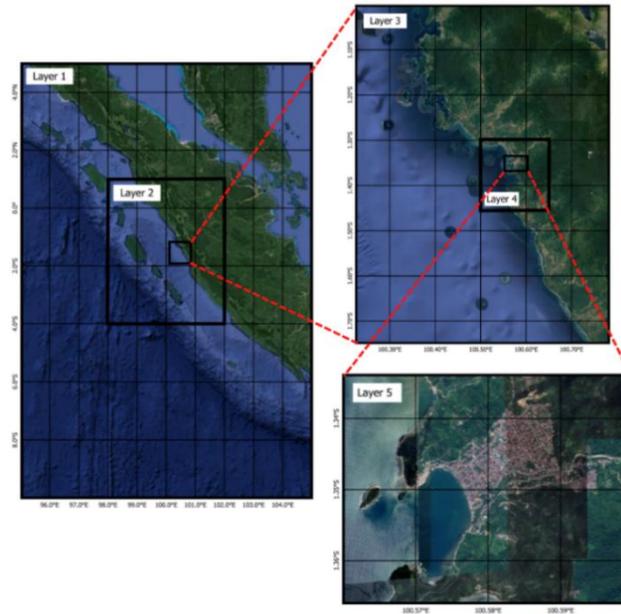
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_x = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fQ + F_x = 0 \quad (2.3)$$

Dengan penjelasan  $\eta$  ialah elevasi permukaan air,  $t$  merupakan waktu,  $R$  adalah radius bumi,  $\varphi$  dan  $\psi$  merupakan koordinat garis lintang dan bujur bumi,  $P$  dan  $Q$  adalah *volume flubes* untuk arah  $x$  dan  $y$ ,  $g$  adalah percepatan gravitasi bumi,  $H = h + \eta$  ialah total kedalaman air,  $h$  adalah kedalaman air,  $f$  adalah koefisien gaya coriolis karena rotasi bumi.  $F_x$  dan  $F_y$  adalah *bottom friction* untuk arah  $x$  dan  $y$ .

**Gambar 2.4** menunjukkan sistem *multilayer* yang dibuat dengan mencakup luasan area sesuai yang dengan data yang dibutuhkan untuk melakukan simulasi gelombang tsunami di Kota Painan. Tujuan penggunaan *multilayer* dalam simulasi ini adalah untuk mensimulasikan gelombang tsunami dengan ukuran grid yang lebih kecil pada daerah spesifik yang menjadi fokus penelitian, yaitu di Kota Painan. Jumlah *layers* yang digunakan yaitu lima. Persamaan yang digunakan pada layer 1 sampai layer 4 yaitu koordinat *spherical* (mempertimbangkan lengkungan bumi) dan pada layer 5 menggunakan koordinat kartesian (tidak mempertimbangkan lengkungan bumi/memiliki jarak yang dekat). Parameter yang digunakan untuk cakupan area simulasi terdapat pada **Tabel 2.2**. Data topografi dan batimetri yang digunakan dalam keseluruhan *layers* berasal dari sumber BATNAS (Batimetri Nasional) dan DEMNAS (Digital Elevation Model Nasional).



**Gambar 2.3** Bentuk Multilayer Area Simulasi pada Program COMCOT

**Tabel 2.2** Informasi parameter simulasi untuk program COMCOT

Domain	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
Latitude (°)	95E-105E	98E-102E	100,25E-100,75E	100,5E-100,65E	100,55E-100,6E
Longitude (°)	10S-5N	4S-1N	1,75S-1S	1,45S-1,3S	1,37S-1,34S
size grid (m)	1850	370	74	14,8	2,96
Total grid	600×900	1200×1500	750×1125	1125×1125	1907×1147
Parent grid	-	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
Ratio to parent grid	-	5	5	5	5
Coord. System	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical	Spherical
SWE type	Linear	Linear	Linear	Linear	Nonlinear
Time step (detik)	1	1	0,333	0,333	0,083
Manning's roughness coef			0,02		

## 2.4 Kondisi Awal

Saat melakukan simulasi dengan program COMCOT, data yang *diinput* yaitu data mekanisme gempa. Pada penelitian kali ini yang menjadikan pembangkit gelombang tsunami di zona patahan padang yaitu longsoran lempeng bawah laut. Data mekanisme gempa yang di input pada penelitian ini menggunakan pemodelan *slip stokastik*. Penelitian yang telah dilakukan oleh Mei & Beroza (2002), yaitu mengembangkan metode untuk mengkarakteristikan kompleksitas slip pada gempa, berdasarkan bidang acak spasial spektrum bilangan gelombang anisotropik dengan fungsi autokorelasi Von Karman. Data yang digunakan untuk pemodelan slip yaitu panjang dan lebar patahan sebesar 600 km dan 240 km. Kemudian, patahan tersebut dibagi menjadi beberapa luasan patahan kecil dengan luas  $10 \times 10$  km. Nilai kedalaman gempa, strike, rake, dan dip yang digunakan ialah sebesar 40 km,  $325^\circ$ ,  $75^\circ$ , dan  $13^\circ$  berdasarkan (Muhari et al., 2010). Skenario yang digunakan ialah gempa dengan besar magnitudo 8.5-9 dengan interval gempa 0.1. Masing-masing interval gempa memiliki jumlah skenario sebanyak 100. Sehingga total skenario yang digunakan ialah 600 skenario.

## 2.5 Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA)

Penilaian pada bahaya mempunyai tujuan utama yaitu untuk memperkirakan seberapa bahaya suatu peristiwa dan seberapa besar risiko yang disebabkan. Menurut (Pranantyo, 2017), dalam melakukan penilaian bahaya terdapat 2 metode, yaitu secara deterministik dan probabilistik. Metode deterministik merupakan metode yang digunakan untuk mengukur besarnya bahaya berdasarkan kejadian yang pernah terjadi. Sedangkan metode probabilistik adalah metode yang digunakan untuk mengukur suatu bahaya berdasarkan segala potensi kejadian yang mungkin terjadi.

Dalam penelitian ini, digunakanlah metode probabilistik untuk menilai bahaya tsunami di masa yang akan datang. Metode ini dapat disebut juga dengan PTHA (*Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*), digunakan untuk mengetahui besarnya risiko bahaya suatu wilayah dalam jangka waktu tertentu. Dalam metode tersebut dibutuhkan langkah dasar yang perlu untuk dilakukan yaitu: (1) Menentukan parameter sumber, pada penelitian ini digunakan sumber gempa patahan Padang, patahan Nias-Simeulue, dan patahan Bengkulu. (2) Menentukan tinggi gelombang tsunami pada tiap bangunan dengan penjalaran tsunami dari sumber gempa menggunakan simulasi numerik program bantu COMCOT. (3) Hasil simulasi tersebut akan mendapatkan kurva bahaya tsunami pada lokasi yang ditinjau. PTHA dasarnya memiliki persamaan sebagai berikut.

$$\lambda(H \geq c) = \sum_{i=1}^{n_s} v_i \sum_{j=1}^{n_m} P(H \geq c | m_j) P(M_i = m_j) \quad (2.4)$$

Dimana  $c$  adalah ketinggian gelombang tsunami uji,  $H$  adalah ketinggian tsunami dari hasil simulasi.  $n_s$  adalah jumlah total sumber/*fault* ( $i$ ),  $n_m$  adalah jumlah magnitudo  $m$  yang dipertimbangkan dengan interval ( $j$ ). Penelitian ini mempertimbangkan rentang magnitudo mulai dari magnitudo terkecil  $M_{min}$  hingga magnitudo terbesar  $M_{max}$  dengan interval 0.1.  $\lambda$  adalah tingkat kejadian gempa per tahun.  $P$  adalah persentase perprobabilitas terjadinya pada periode ulang tertentu.  $M_j$  adalah magnitudo gempa yang dipakai.

Kemudian saat menghitung PTHA dengan menggunakan nilai  $\beta$  yang bervariasi berdasarkan *logic tree*. Nilai *logic tree* telah dilakukan oleh (Mulia et al., 2020). Nilai  $\beta$  merupakan persamaan distribusi normal standar kumulatif. Pada persamaan nilai  $\beta$  merupakan  $\ln(\kappa)$  dibawah ini, menentukan nilai tersebut telah dilakukan oleh (Aida, 1978).

## 2.6 Modified Damage Probability

Parameter lain dalam kajian kerentanan bangunan selain kondisi bangunan terdapat parameter *damage probability*. Menurut (Koshimura et al., 2009), *damage probability* adalah menentukan tingkat kemungkinan kerusakan struktur bangunan akibat bencana tsunami, melalui pendekatan *hydrodynamic force*, *inundation depth*, dan kecepatan. Studi tersebut menghasilkan sebuah fragility function untuk bangunan yang terkena dampak tsunami di Banda Aceh pada tahun 2004. Rumus awal *damage probability* terhadap tsunami yang diusulkan oleh (Koshimura et al., 2009) telah dimodifikasi dengan menggunakan nilai ketinggian tsunami berdasarkan periode ulang tertentu berdasarkan metode PTHA, seperti yang dapat dilihat pada Persamaan (2.5).

$$P(x_i) = \Phi \left[ \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right] \quad (2.5)$$

Dimana  $x_i$  ialah ketinggian tsunami dengan periode ulang tertentu.  $\Phi$  ialah *the standardize lognormal distribution functions* dengan nilai mean ( $\mu$ ) dan standar deviasi ( $\sigma$ ) sebesar 2.99 dan 1.12.

## 2.7 Building Tsunami Vulnerability (BTV)

*Building Tsunami Vulnerability* (BTV) merupakan metode untuk menentukan nilai indeks kerentanan tsunami dan mengetahui lokasi yang memiliki kerentanan sangat tinggi terhadap tsunami,

sehingga memudahkan pemetaan terhadap lokasi penelitian dengan kategori tingkat risiko tinggi, sedang, dan rendah (Febrianti & Safriani, 2016). Dalam menganalisis menggunakan BTV terdapat 3 parameter, yaitu kondisi bangunan, tinggi tsunami, dan pertahanan laut (Omira et al., 2010). Parameter pertahanan laut tidak digunakan dalam penelitian ini dikarenakan daerah pesisir kota Painan tidak memiliki pelindung pantai, sehingga parameter tersebut tidak memberikan variasi yang signifikan. Pada penelitian ini parameter ketinggian tsunami dimodifikasi menjadi damage probability berdasarkan tinggi tsunami dengan periode ulang tertentu. Parameter *damage probability* dapat lebih baik merepresentasikan nilai kerentanan bangunan terhadap bencana tsunami (Syamsidik et al., 2023). Persamaan yang digunakan dapat dilihat pada Persamaan (2.6).

$$BTV_i = \frac{(F_{c,b} \times F_{w,b}) + (F_{c,d} \times F_{w,d})}{\sum_{k=1}^2 (F_{c,max} \times F_{w,k})} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana  $BTV_i$  adalah *building tsunami vulnerability* dalam periode ulang tertentu.  $F_{c,b}$  adalah klasifikasi faktor bangunan berdasarkan kondisi bangunan.  $F_{w,b}$  adalah faktor pembobotan tipe bangunan dengan nilai dua.  $F_{c,d}$  adalah klasifikasi keruntuhan bangunan berdasarkan *damage probability* periode ulang tertentu.  $F_{w,d}$  adalah faktor pembobotan probabilitas keruntuhan bangunan dengan nilai 1. Pada **Tabel 2.3** dibawah ini merupakan klasifikasi BTV yang digunakan.

**Tabel 2.3** Faktor tipe bangunan dan *damage probability* (Syamsidik et al., 2022)

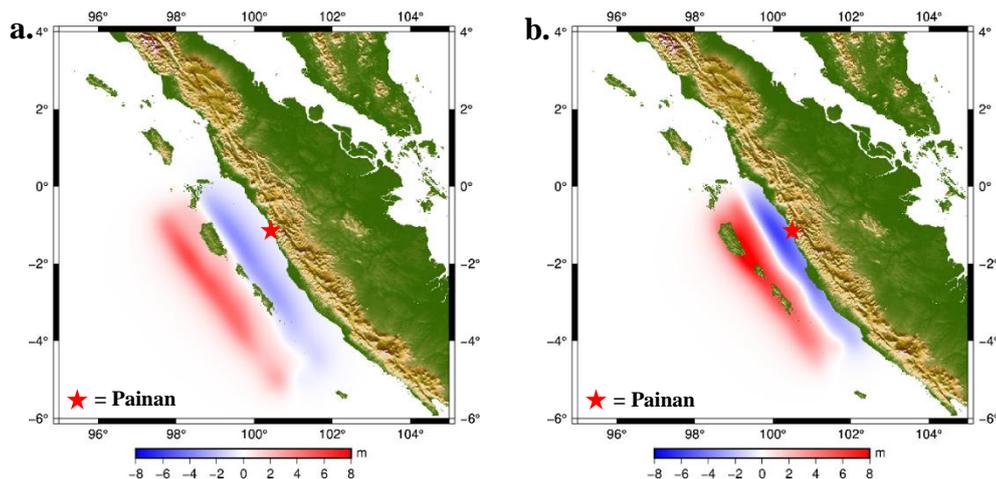
Faktor Tipe Bangunan ( $F_{c,b}$ )		Faktor <i>damage probability</i> ( $F_{c,d}$ )		Klasifikasi BTV	
Tipe Bangunan	$F_{c,b}$	$P(x_i)$	$F_{c,d}$	BTV (%)	Klasifikasi
Bangunan Kayu (1 Lantai)	5	$P(x_i) \geq 0.8$	5	$BTV_i \geq 80$	<i>Very High</i>
Bangunan Beton Bertulang (1 Lantai)	4	$0.6 \leq P(x_i) < 0.8$	4	$60 \leq BTV_i < 80$	<i>High</i>
Bangunan Beton Bertulang (2 Lantai)	3	$0.4 \leq P(x_i) < 0.599$	3	$40 \leq BTV_i < 60$	<i>Medium</i>
Bangunan Beton Bertulang (3 Lantai)	2	$0.2 \leq P(x_i) < 0.399$	2	$20 \leq BTV_i < 40$	<i>Low</i>
Bangunan Beton Bertulang (>3 Lantai)	1	$0.001 \leq P(x_i) < 0.199$	1	$BTV < 20$	<i>None</i>
		$P(x_i) = 0$	<i>Not affected</i>		

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Initial Condition

Untuk memahami awal terjadinya tsunami dari lokasi sumbernya, digunakan kondisi awal yang disebut sebagai *initial condition*. Data *initial condition* ini diperoleh melalui program *slipreal* dengan menerapkan pemodelan *slip* stokastik. Dalam pemodelan ini, besaran gempa yang digunakan untuk simulasi antara 8.5 Mw hingga 9 Mw. Setiap besaran gempa akan diuji dengan 100 skenario yang berbeda karena setiap skenario memiliki nilai slip yang berbeda-beda. Dengan demikian, total terdapat 600 skenario yang digunakan dalam penelitian ini. *Initial condition* yang digunakan dengan kekuatan 9.0 Mw pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3.1**, terdapat perbedaan dalam kondisi awal pembangkit tsunami antara skenario 1 (**Gambar 3.1a**) dan skenario 50 (**Gambar 3.1b**). Perbedaan ini disebabkan oleh variasi nilai slip yang dihasilkan.

Warna merah yang merupakan naiknya permukaan air laut yang diakibatkan oleh naiknya dasar laut. Naiknya dasar laut ini diperoleh dari perhitungan nilai slip yang sudah dihitung menggunakan program *SlipReal*. Dikarenakan naiknya dasar laut maka permukaan air laut juga akan naik, sehingga terjadi penurunan permukaan air laut (warna biru) seperti yang dilihat pada **Gambar 3.1**. Jenis patahan yang digunakan yaitu *reverse fault*. Patahan tersebut terjadi ketika *hanging wall* bergerak naik terhadap *footwall*. Untuk mengetahui jenis patahan yang akan digunakan dapat melihat terlebih dahulu pada *website* USGS, lalu patahan akan terlihat dalam bentuk *beachball*.



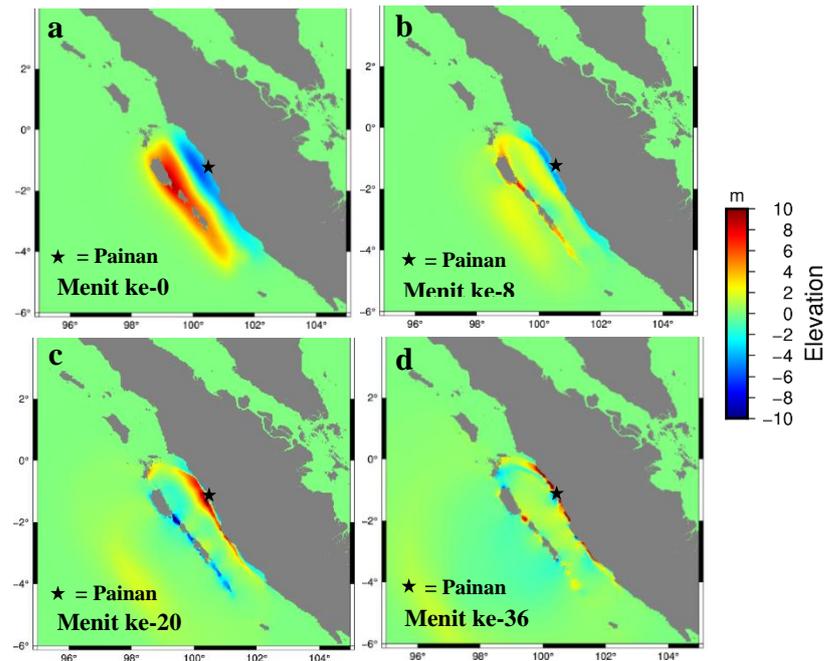
**Gambar 3.1** Initial Condition dengan kekuatan gempa 9.0 Mw untuk skenario gempa: a. 1 dan b. 50

Pada **Gambar 3.1** terlihat perbedaan kondisi antara yang pudar memiliki luasan lebih luas dibanding yang pekat memiliki luasan yang lebih kecil, ini diakibatkan penjumlahan nilai slip yang tidak boleh melebihi batasan energi pada *moment magnitude* yang sudah ditentukan. Untuk penelitian ini tidak dapat menentukan batasan kenaikan dasar laut yang digunakan, sehingga menggunakan batasan energi ( $M_0$ ) yang telah dilakukan oleh Hanks dan Kanamori di tahun 1979 untuk masing-masing dari *moment magnitude*. Maka dari itu menggunakan program *slip real* untuk memperoleh nilai *slip* yang sudah dikaji oleh (Mai & Beroza, 2002).

### 3.2 Proses Penjalaran Gelombang Tsunami

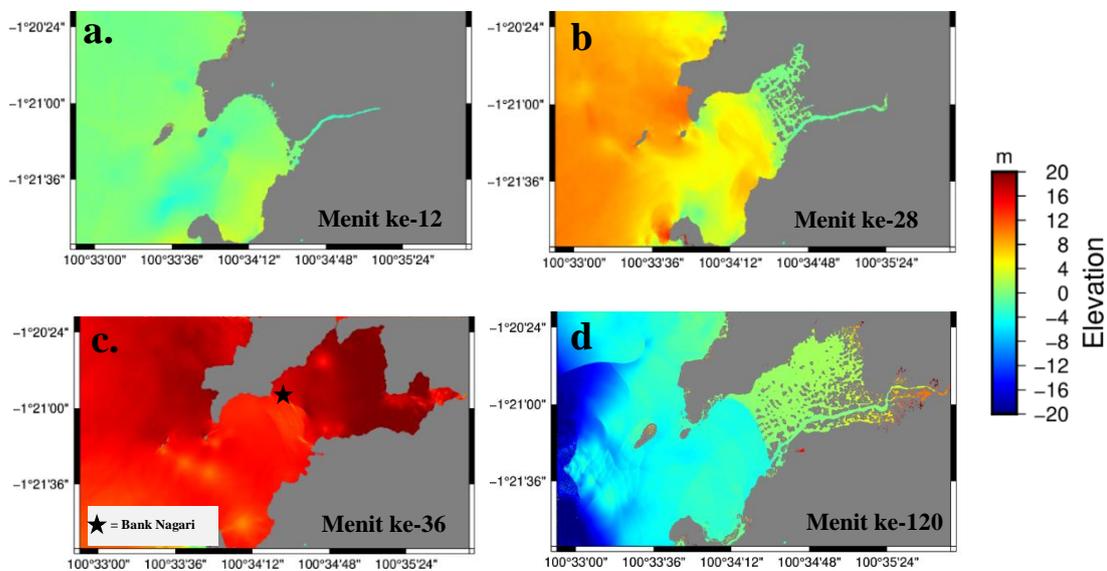
Setelah melakukan simulasi menggunakan COMCOT, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi penjalaran pada layer 1 hingga layer 5 dengan kekuatan gempa 8.5 – 9 Mw. Memilih skenario, kekuatan gempa, dan layer yang ingin ditampilkan secara acak untuk mengetahui ketinggian gelombang tsunami dan penurunan air laut akibat gempa yang berasal dari sumbernya. Penjalaran gelombang tsunami yang akan dimunculkan gambar visualisasinya yaitu kekuatan gempa 9.0 Mw, skenario 50, dan difokuskan pada layer 1 yang merupakan kondisi awal dari terjadinya tsunami dari lokasi sumbernya (*fault*) dan layer 5 yang merupakan daerah pantai serta daratan Kota Painan.

Simulasi menggunakan program COMCOT dilakukan selama 120 menit (7200 detik) dengan pembacaan hasil data setiap 4 menit (240 detik). Proses penjalaran gelombang tsunami yang terdapat pada **Gambar 3.2** yang merupakan proses penjalaran pada layer 1 untuk kekuatan gempa 9 Mw. Dilihat pada gambar tersebut proses dari gelombang tersebut terbentuk, menyebar ke segala arah hingga memasuki pesisir pantai. Untuk dapat lebih jelasnya pada penjalaran saat mencapai pesisir pantai dilihat ke layer 5.



Gambar 3.3 Proses penjalaran tsunami di layer 1 untuk: a)t=0 menit, b)t=6 menit, c)t=20 menit, dan d)t= 36 menit

Pada Gambar 3.3 merupakan proses penjalaran gelombang tsunami yang terdapat di layer 5. Gelombang tsunami mulai memasuki wilayah pesisir pantai hanya perlu waktu 12 menit dari sumber gempa. Lalu di menit 36 terjadi ketinggian gelombang tsunami maksimal mencapai 20 meter dan jarak inundasi yang diperoleh lebih dari 1.5 kilometer. Pada lokasi Kantor Cabang Bank Nagari yang diberi tanda ☆ dan untuk bangunan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4, terlihat ketinggian tsunami berkisar 13 meter, bangunan tersebut termasuk jenis beton bertulang 4 lantai yang ketinggian bangunan tersebut mencapai 20 meter. Sehingga masyarakat dapat ke bangunan tersebut, dapat digunakan Tempat Evakuasi Sementara. Kemudian gelombang tsunami surut di menit 120.



Gambar 3.2 Proses penjalaran tsunami di layer 1 untuk: a)t=0 menit, b)t=6 menit, c)t=20 menit, dan d)t= 36 menit



**Gambar 3.4** Kantor Cabang Bank Nagari

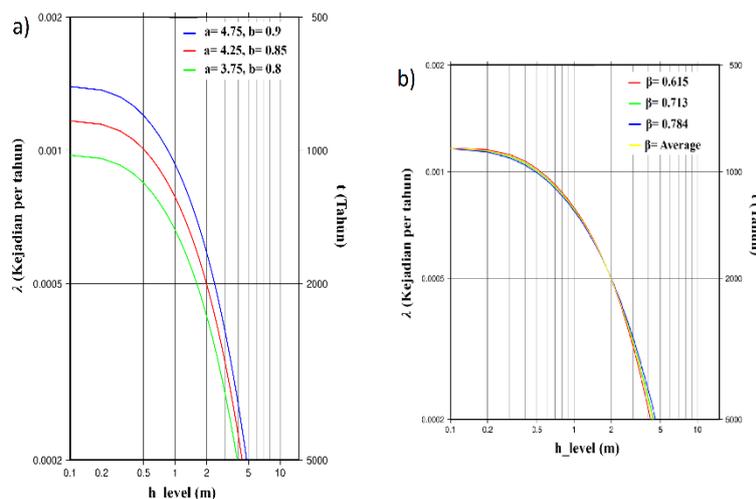
### 3.3 Probabilistic Tsunami Hazard Assessment (PTHA)

Analisis Potensi Bahaya Tsunami (PTHA) digunakan untuk menentukan probabilitas munculnya ketinggian gelombang tsunami pada setiap besaran kekuatan gempa, serta untuk menentukan tingkat kejadian tahunan (*Annual Rate*,  $\lambda$ ) guna mendapatkan nilai *return period*. Dalam tahapan analisis PTHA, terdapat beberapa data penting yang diperlukan. Diawali dengan menggunakan 3 skenario untuk nilai  $a$  dan  $b$ , diawali nilai 4.25 dan 0.85. Nilai tersebut didapatkan berdasarkan Zona Megathrust Mentawai-Siberut yang merupakan lokasi sumber gempa, dan diperoleh dari PUSGEN & PUSLITBANG PUPR, 2017. Lalu menggunakan nilai  $a$  dan  $b$  hasil penjumlahan dan pengurangan. Selain itu, juga dihasilkan *hazard curve* pada setiap bangunan yang ada berdasarkan kemungkinan ketinggian tsunami. Kurva tersebut membandingkan nilai antara ketinggian air yang direncanakan, *annual rate of exceedance* ( $\lambda$ ), dan *return period* ( $t$ ).

**Gambar 3.5a** adalah *hazard curve* dengan nilai  $a$  (tingkat keaktifan seismik) dan  $b$  (rasio kejadian antara gempa besar dan kecil) yang bervariasi. Dapat diamati pada gambar tersebut bahwa grafik tersebut sangat sensitif saat menggunakan nilai  $a$  dan  $b$  yang berbeda, untuk warna merah tersebut menggunakan nilai dari data PUSGEN. Terlihat untuk periode ulang 1000 tahun untuk nilai  $a$  sebesar 3.75 dan  $b$  sebesar 0.8 tidak mencapai 0.1 meter.

Jika belum pernah terjadi bencana alam tersebut, maka nilai  $\beta$  yang digunakan dapat secara acak. Pada **Gambar 3.5b** dibawah ini merupakan *hazard curve* yang dihasilkan jika mengubah nilai  $\beta$ . Dapat dilihat pada kurva tersebut bahwa nilai  $\lambda$  dan  $t$  yang diperoleh tidak signifikan saat menggunakan nilai  $a$  dan  $b$  yang berbeda. Sensitivitas saat menggunakan nilai  $\beta$  juga terdapat perbedaan ketinggian tsunami, saat menggunakan nilai  $\beta$  terkecil yaitu 0.615 dan nilai  $\beta$  terbesar yaitu 0.718 dapat mencapai 1.7 meter.

**Hazard Curve pada Kantor Cabang Bank**



**Gambar 3.5** Nilai ketinggian tsunami pada Kantor Cabang Bank Nagari; a) variasi nilai  $a$  dan  $b$ , b) nilai variasi  $\beta$  berdasarkan kurva bahaya

### 3.4 Damage Probability

Menurut (Koshimura et al., 2009), *damage probability* adalah menentukan tingkat kemungkinan kerusakan struktur bangunan akibat bencana tsunami, melalui pendekatan *hydrodynamic force*, *inundation depth*, dan kecepatan. Pada penelitian kali ini menggunakan pendekatan terhadap *inundation depth*. Hasil genangan (inundansi) yang terbentuk pada perhitungan *damage probability*, yang menggunakan tinggi tsunami dari setiap lokasi bangunan. Dalam perhitungannya, *damage probability* menggunakan *The Standardize Lognormal Distribution Functions* dengan data input seperti *mean* ( $\mu$ ) dan standar deviasi ( $\sigma$ ), diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan oleh (Koshimura et al., 2009).

Setelah melakukan perhitungan menggunakan *return period* yang sudah ditentukan yaitu 1000 tahun dan 4000 tahun. *Damage probability* ini mendeskripsikan tingkat kemungkinan kerusakan bangunan yang terjadi akibat tinggi genangan air di setiap titik bangunan selama periode ulang 1000 dan 4000 tahun. Pada **Tabel 3.1** dibawah ini merupakan nilai ketinggian genangan yang diperoleh sehingga dapat dibagi menjadi 6 kelas.

**Tabel 3.1** *Damage Probability* berdasarkan jumlah bangunan dan kelas (Fc,d) di Kota Painan pada periode ulang 1000 tahun dan 4000 tahun

<i>Damage Probability</i>	Kelas <i>Damage Probability</i> (Fc,d)	Tipe Kerusakan	1000 Tahun		4000 Tahun	
			Jumlah (Unit)	Jumlah (%)	Jumlah (Unit)	Jumlah (%)
>0.8	5	<i>Total Collapse</i>	16	0.41	2989	69.56
0.6 – 0.8	4	<i>Heavy Damage</i>	1	0.03	288	7.43
0.4 – 0.599	3	<i>Moderate Damage</i>	1	0.03	164	4.23
0.2 – 0.399	2	<i>Minor Damage</i>	29	0.75	157	4.05
0.001 – 0.199	1	<i>Non-Structural Damage</i>	3211	82.84	356	9.18
0	0	<i>Not Affected</i>	618	15.94	215	5.55
Total			3876	100	3876	100

Dapat dilihat pada tabel diatas, terdapat jumlah bangunan yang diklasifikasikan berdasarkan nilai *damage probability* pada periode ulang 1000 dan 4000 tahun. Pada periode ulang 1000 tahun, terdapat 618 titik bangunan, selain itu pada periode ulang 4000 tahun terdapat 215 titik bangunan dengan nilai kelas *damage probability* sebesar 0. Hal ini menunjukkan bahwa titik-titik tersebut tidak terkena gelombang tsunami karena tsunami yang naik ke daratan tidak mencapai bangunan-bangunan tersebut. Terdapat pula sebanyak 16 titik pada periode ulang 1000 tahun dan 2989 titik pada periode ulang 4000 tahun dengan nilai kelas *damage probability* sebesar 5. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan yang berada pada titik-titik tersebut memiliki tingkat probabilitas dengan dampak maksimum berdasarkan tinggi genangan (inundansi). Pada periode ulang 4000 tahun, terjadi peningkatan persentase nilai jumlah bangunan yang berada pada klasifikasi 5 dan nilai *damage probability* >0.8 sebesar 69.15%.

### 3.5 Building Tsunami Vulnerability (BTV)

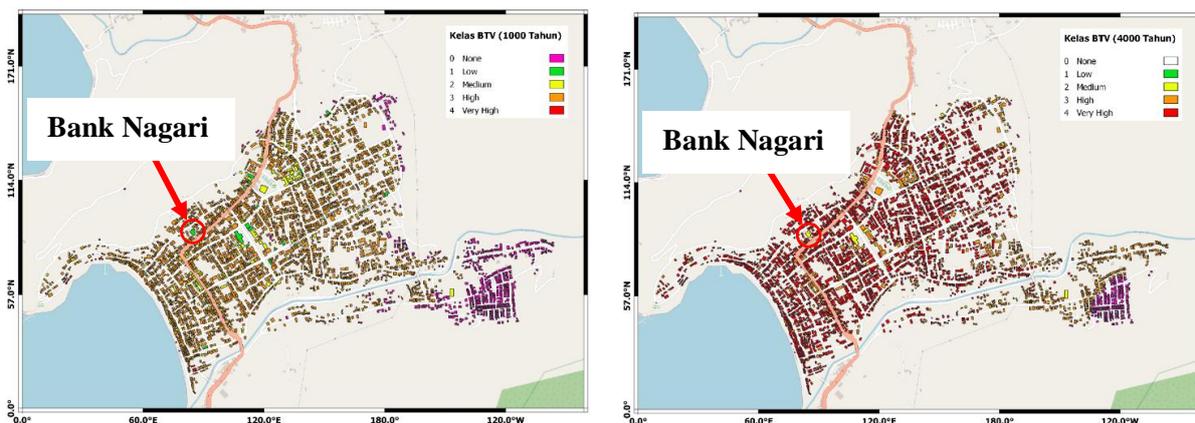
Pengklasifikasian kelas BTV mengikuti penelitian yang telah dilakukan oleh (Syamsidik et al., 2022). Saat melakukan analisis *Building Tsunami Vulnerability* (BTV), diperlukan data input berupa kelas kondisi bangunan yang sudah dilakukan penelitian oleh (Meitrya, 2021), dan kelas inundansi yang diperoleh dari perhitungan *damage probability*. Hasil dari perhitungan *Building Tsunami Vulnerability* pada setiap bangunan di Kota Painan yang dapat dilihat pada **Tabel 3.2**.

**Tabel 3.2** Hasil Perhitungan Kelas BTV di Kota Painan dalam Periode Ulang 1000 Tahun dan 4000

BTV Class	BTV (%)	Vulnerability	1000 Tahun		4000 Tahun	
			Jumlah Bangunan (Unit)	Jumlah Bangunan (%)	Jumlah Bangunan (Unit)	Jumlah Bangunan (%)
4	>80	Very High	26	0.67	2752	71
3	60-80	High	2974	76.73	892	23.01
2	40-60	Normal	234	6.04	13	0.34
1	20-40	Low	21	0.54	0	0
0	0-20	None	621	16.02	219	5.65
Total			3876	100	3876	100

Berdasarkan informasi yang terdapat dalam **Tabel 3.2**, dapat disimpulkan bahwa jumlah bangunan dengan tingkat kerentanan tinggi (*high*) paling banyak terdapat dalam kelas BTV pada periode ulang 1000 tahun. Terdapat sebanyak 2974 unit bangunan yang termasuk dalam kelas BTV sebesar 3, yang merupakan 76.73% dari total jumlah bangunan di Kota Painan. Hal ini berarti bangunan di Kota Painan memiliki probabilitas yang tinggi untuk mengalami kerusakan yang parah. Di sisi lain, terdapat juga bangunan dengan kelas BTV sebesar 0 (*none*) dan 1 (*low*), yang cenderung lebih aman. Jumlah bangunan dalam kedua kelas ini adalah 642 unit atau sekitar 16.56% dari total keseluruhan bangunan di Kota Painan.

Berdasarkan **Tabel 3.2** dapat dilihat bahwa pada periode ulang 4000 tahun, bangunan dengan kelas BTV 4 (*very high*) yang merupakan jumlah paling banyak. Terdapat sebanyak 2752 unit bangunan yang termasuk dalam kelas BTV 4, mewakili 71% dari total bangunan di Kota Painan. Selain itu, terdapat juga 892 unit bangunan (23.01%) yang memiliki nilai kelas BTV 3 (*high*). Dengan demikian, bahwa sekitar 93.01% bangunan di Kota Painan termasuk dalam kategori tingkat kerentanan tinggi hingga sangat tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa bangunan tersebut memiliki potensi kerusakan yang berat hingga sangat berat saat terjadi gelombang tsunami dengan parameter ketinggian genangan air.



**Gambar 3.6** Peta Bangunan Dengan Persebaran Tingkat Kerentanan Bangunan Berdasarkan Periode Ulang 1000 tahun dan 4000 tahun

Pada **Gambar 3.6** merupakan peta persebaran tingkat kerentanan bangunan dalam periode ulang 1000 tahun dan 4000 tahun. Pada wilayah timur Kota Painan dari kota tengah Painan, terdapat bangunan yang memiliki nilai kelas BTV sebesar 0, itu termasuk wilayah dataran tinggi ataupun

perbukitan yang tidak terkena dampak gelombang tsunami. Bangunan yang ditandai dengan x adalah Kantor Cabang Bank Nagari yang memiliki tingkat kerentanan rendah (kelas BTV 3) dan tingkat sedang (kelas BTV 2). Bangunan ini dapat berfungsi sebagai tempat evakuasi bagi penduduk yang tinggal di sekitar garis pantai. Kantor Cabang Bank Nagari memiliki kapasitas untuk menampung 500-700 orang, dan termasuk dalam klasifikasi bangunan beton bertulang dengan lantai lebih dari 3.

#### 4. Kesimpulan

Pengaruh perbedaan variabel a (tingkat keaktifan seismik) dan variabel b (rasio antara gempa besar dan gempa kecil) saat menganalisis PTHA, pada *hazard curve* berdasarkan nilai a dan b yang bervariasi, perbandingan dari masing-masing nilai tersebut terlihat perbedaan signifikan yang dihasilkan untuk *annual rate of exceedance* ( $\lambda$ ) serta *return period* (t). Sedangkan untuk menggunakan variabel  $\beta$  (yang bervariasi) dengan *logic tree*, *hazard curve* yang diperoleh terlihat perbedaan nilai tersebut yang tidak signifikan dibandingkan dengan variabel a dan b. Sehingga variabel a dan b memiliki sifat yang sensitif jika variabel tersebut diubah kedalam analisis PTHA.

Potensi bahaya yang ditimbulkan oleh bencana tsunami di Kota Painan sangat tinggi sebagai akibat dari gempa bumi pada Zona Patahan Padang. Hasil analisis PTHA memberikan informasi mengenai ketinggian tsunami pada setiap bangunan dengan waktu periode ulang yang sudah ditentukan. Terdapat probabilitas nilai ketinggian maksimum sebesar 5.665 meter untuk periode ulang 1000 tahun, dan 36 meter untuk periode ulang 4000 tahun.

Salah satu cara yang bisa dilakukan untuk mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh bencana tsunami, berdasarkan nilai kerentanan bangunan terhadap tsunami (*Building Tsunami Vulnerability*), adalah dengan memanfaatkan bangunan yang memiliki tingkat kerentanan bangunan kelas BTV sebesar 0 (tidak ada), 1 (rendah), serta 2 (sedang). Terlihat pada BTV di periode ulang 4000 tahun, masyarakat yang tinggal daerah pesisir pantai atau garis pantai, dapat ke Kantor Cabang Bank Nagari jika terjadi bencana, dikarenakan letak untuk tempat tersebut dapat dijadikan tempat evakuasi. Jarak tempat tersebut dari wilayah di sekitar garis pantai berjarak berkisaran 460 meter dan dapat menampung 500-700 orang.

#### Daftar Pustaka

- Aida, I. (1978). *Reliability Of A Tsunami Source Model Derived From Fault Parameters*. 57–73.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2020). *Refleksi Tsunami 1797*. Bnpb.Go.Id. <https://bnpb.go.id/berita/refleksi-tsunami-1797>
- Febrianti, D., & Safriani, M. (2016). Kajian Tingkat Kerentanan Bangunan Terhadap Tsunami Dengan Metode BTV (Studi Kasus Pada Desa Kuta Padang, Kabupaten Aceh Barat). *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar*, 2(2477–5258), 45–55.
- Koshimura, S., Oie, T., 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 Journal*, 51(3), 243–273. <https://doi.org/10.1142/S0578563409002004>
- Mai, P. M., & Beroza, G. C. (2002). A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B11), ESE 10-1-ESE 10-21. <https://doi.org/10.1029/2001jb000588>
- Mega, A. (2018). PEMODELAN MITIGASI BENCANA TSUNAMI DI PANTAI LOSARI. *INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOVEMBER*.
- Meitrya, D. (2021). *Kajian Tingkat Kerentanan Bangunan Akibat Gelombang Tsunami Berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG)*.

- Muhari, A., Imamura, F., Natawidjaja, D. H., Diposaptono, S., Latief, H., Post, J., & Ismail, F. A. (2010). Tsunami mitigation efforts with pTA in west Sumatra province, Indonesia. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 4(4), 341–368. <https://doi.org/10.1142/S1793431110000790>
- Mulia, I. E., Ishibe, T., Satake, K., Gusman, A. R., & Murotani, S. (2020). Regional probabilistic tsunami hazard assessment associated with active faults along the eastern margin of the Sea of Japan. *Earth, Planets and Space*, 72(1). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01256-5>
- Omira, R., Baptista, M. A., Miranda, J. M., Toto, E., Catita, C., & Catalão, J. (2010). Tsunami vulnerability assessment of Casablanca-Morocco using numerical modelling and GIS tools. *Natural Hazards*, 54(1), 75–95. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9454-4>
- Pranantyo, I. R. (2017). *ANALISIS PROBABILISTIK BAHAYA TSUNAMI KAWASAN LAUT BANDA*. <https://digilib.itb.ac.id/index.php/gdl/view/22501>
- Pratama, O. (2020). *Konservasi Perairan Sebagai Upaya menjaga Potensi Kelautan dan Perikanan Indonesia*. DIREKTORAT JENDERAL PENGELOLAAN RUANG LAUT. <https://kkp.go.id/djprl/artikel/21045-konservasi-perairan-sebagai-upaya-menjaga-potensi-kelautan-dan-perikanan-indonesia#:~:text=Dari total luas wilayah tersebut,juta km2 yang berupa daratan.>
- PUSGEN, & PUSLITBANG PUPR. (2017). *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*.
- Ratuluhain, E. S., Nurjaya, I. W., & Natih, N. M. N. (2021). *ANALISIS POTENSI TSUNAMI DI LOMBOK UTARA*. 13(April), 113–126.
- Rohman, A. (2019). *Faktor yang dapat Menjadi Penyebab Tsunami*. Geodesi Geodinamik UGM. <https://geodesigeodinamik.ft.ugm.ac.id/2019/10/04/faktor-yang-dapat-menjadi-penyebab-tsunami/#:~:text=Tsunami yang disebabkan oleh longsor,kemudian bisa menyebabkan terjadinya tsunami.>
- Syamsidik, Rasyif, T. M., Fritz, H. M., Idris, Y., & Rusydy, I. (2022). Fragility based characterization of alternative tsunami evacuation buildings in Banda Aceh, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88(8), 103607. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103607>
- USGS. (2022). *Earthquake Hazard Program*. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- Wang, X. (2009). COMCOT User Manual Ver. 1.7. In *Cornell University* (Vol. 6, pp. 1–59).