

Skripsi Geofisika

**ANALISIS JALUR EVAKUASI TSUNAMI
DI KOTA BUOL**

Disusun dan diajukan oleh

NUR ANNISA

H061 18 1023



**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2022

HALAMAN JUDUL

ANALISIS JALUR EVAKUASI DI KOTA BUOL

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin



Disusun dan Diajukan Oleh:

NUR ANNISA

H061 18 023

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS JALUR EVAKUASI TSUNAMI DI KOTA BUOL

Disusun dan diajukan oleh:

NUR ANNISA

H061 18 1023

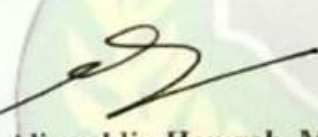
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

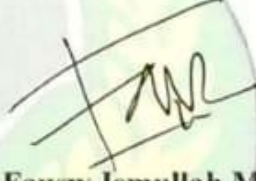
Pada tanggal 27 Mei 2022

Menyetujui,

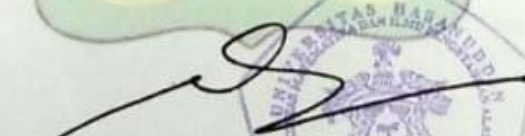
Pembimbing Utama

Pembimbing Pertama


Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709292993031003


Muh. Fawzy Ismullah M, S.Si., MT
NIP. 199111092019031010

Ketua Departemen Geofisika,


Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709292993031003

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Annisa

Nim : H061 18 1023

Program Studi : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Jalur Evakuasi Tsunami di Kota Buol

Adalah tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri .

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan sebagai atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 27 Mei 2022

Yang menyatakan,



Nur Annisa

SARI BACAAN

Wilayah Indonesia memiliki 6 zona subduksi dengan 13 segmentasi *megathrust* dan 295 segmen sesar aktif. Salah satu dari zona subduksi *megathrust* tersebut adalah *megathrust* Sulawesi Utara. *Megathrust* Sulawesi Utara berdekatan dengan Buol sehingga menjadikan wilayah tersebut berpotensi terjadi gempa bahkan tsunami. Mengingat jumlah penduduk di Kabupaten Buol yang besar dan secara spasial di sebelah utara Buol berbatasan dengan *Megathrust* Sulawesi Utara maka perlu adanya penelitian mengenai jalur evakuasi di Kota Buol dengan menggunakan metode *cost distance*. *Cost distance* digunakan untuk menghitung jarak akumulatif terpendek untuk setiap sel ke atau dari sumber dalam waktu tercepat. Dari hasil analisis didapatkan jalur evakuasi terpanjang di Kota Buol berada di Kelurahan Buol dengan jalur evakuasi mencapai 1.331 m sedangkan jalur evakuasi terpendek berada di Kelurahan Guamomial dengan panjang mencapai 114 m. Disarankan membuat 4 *shelter* untuk prioritas 1 yang ada di Kelurahan Leok II, Buol dan Bugis serta sebagai tambahan dapat dibangun 2 *shelter*.

Kata Kunci : Buol, *Cost Distance*, Jalur Evakuasi Tsunami, *Shelter*

ABSTRACT

Indonesian territory has 6 subduction zones with 13 megathrust segments and 295 active fault segments. One of these megathrust subduction zones is the North Sulawesi megathrust. The North Sulawesi megathrust is close to Buol, making the area potentially prone to earthquakes and even tsunamis. Considering the large population in Buol Regency and spatially in the north of Buol bordering the megathrust of North Sulawesi, it is necessary to research on evacuation routes in Buol City using the cost distance method. Cost distance is a method used to calculate the shortest cumulative distance for each cell to or from the source in the fastest time. From the results of the analysis, it was found that the longest evacuation route in Buol City was in Buol Village with an evacuation route reaching 1,331 m while the shortest evacuation route was in Guamomial Village with a length of 114 m. It is recommended to make 4 shelters for priority 1 in the Villages of Leok II, Buol and Bugis and in addition, 2 shelters can be built there.

Keywords : Buol, Cost Distance, Tsunami Evacuation Route, Shelter

KATA PENGANTAR



Assalamu 'alaikum Warahmatullaahi Wabarakaatuuuh.

Puji dan syukur kepda Allah SWT yang senantiasa memberikan penulis kesehatan, rahmat dan keberkahan di setiap prosesnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “**Analisis Jalur Evakuasi Tsunami di Kota Buol**”. Juga tiada hentinya saya mengucapkan salam dan shalawat senantiasa tercurahkan kepada Rasulullah SAW.

Tulisan ini merupakan salah satu syarat kelulusan di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Dalam penulisan skripsi ini tentu tidak lepas dari hambatan dan kesulitan. Namun berkat pertolongan Allah SWT disetiap kesulitan selalu ada kemudahan, penyusunan skripsi ini dapat terselesaikan. Izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Orang Tua tersayang dan tercinta, Ibunda **Ganok** dan Ayahanda **Budiman** serta ketiga saudara saya **Suherni Febrianti**, **Reza Perdiansyah**, **Halilul Rahman** atas do'a, dukungan, dan perhatian yang tak henti-hentinya diberikan kepada penulis. Serta seluruh keluarga besar yang selalu memberikan do'a, kasih sayang yang tulus, dukungan moril maupun do'a yang tiada henti untuk penulis.

Dalam kesempatan ini pula penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya dari berbagai pihak atas bantuan, nasihat, didikan, dan bimbingan yang diberikan kepada penulis selama ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan skripsi ini, baik secara langsung maupun tidak langsung, yaitu kepada:

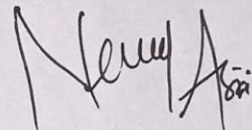
1. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** dan Bapak **Muh. Fawzy Ismullah M, S.Si., MT** selaku Pembimbing Utama dan Pembimbing Pertama yang telah banyak memberikan arahan, pembelajaran, masukan dan motivasi kepada penulis untuk selalu belajar dan jangan mudah merasa puas diri agar selalu berkembang.
2. Bapak **Prof. Dr. Dadang Ahmad S, M. Eng (Alm.)** dan Bapak **Dr. Sakka, M.Si** selaku tim penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan yang bersifat membangun sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
3. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Penasihat Akademik yang banyak memberikan nasehat dan arahan kepada penulis selama masa kuliah.
4. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng** selaku Ketua Departemen Geofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin
5. Bapak dan Ibu Dosen yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan di Departemen Geofisika.
6. Bapak dan Ibu Dosen yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan di Departemen Geofisika
7. Bapak **Sofian, S.Si** sebagai pembimbing selama melakukan Tugas Akhir, Bapak Hendrik S.Si dan seluruh Pegawai di BMKG Kelas 1 Palu serta Segenap Keluarga **Nene Aji** yang telah banyak membantu selama Tugas Akhir di Kota Palu.

8. Partner Penelitian Tugas Akhir yang menemani serta ditemani **Fhauzia Suci Rahmadani, Siti Wahyuni M Wael, Windy Sari** dan partner Kerja Praktek **Nurfadilla, Patricia Banne**.
9. Teman-Teman Geofisika Unhas Angkatan 2018 **Agung, Aini, Ainul, Andry, Anto, Ayu, Aswan, Banne, Dea, Dilla, Evy, Faika, Fia, Fian, Fina, Fiskah, Hasnan, Heral, Iis, Indah Onding, Ipul, Irma, Izzah, Jihan, Jojo, Juni, Kemal, Kiki, Komang, Marni, Masdar, Mute, Nilam, Ocha, Rahmat, Sarwan, Sri, Syana, Uci, Wawan, Waqiah, Wilda, Windy, Yansen, Yen, Yusril, Yusuf, Yusran, Yoga, Zefanya** terima kasih telah kebersamai penulis dalam melaksanakan tugas akhir di Geofisika, semoga Allah menjadikan kita generasi yang berguna bagi bangsa dan Negara, Aamiin.
10. Teman-teman **HMGF & HIMAFI FMIPA Unhas** Angkatan 2018
11. Teman-teman **KM FMIPA Unhas** Angkatan 2018, **Satu Tekat Taklukan Waktu**.
12. Kanda-kanda angkatan 2014 (**MAPERWA**), 2015 (**Pengurus BEM**), 2016 (**Pengurus HIMAFI**), 2017 (**Panitia BK**) yang telah memberi banyak bantuan dalam menghadapi dunia kampus.
13. Kepada adik-adik 2019, 2020, dan 2021 **HMGF FMIPA Unhas** dan **HIMAFI FMIPA Unhas**.
14. Teman-teman **KKN Gelombang 106 Tamalanrea 15 Inayah, Manto, Widi, Fadly, Vivi, Aeni, Fade, Mirza, Nicen, Nining dan Paisa**.
15. Kanda-kanda, teman-teman, dan adik-adik pengurus *Society of Exploration Geophysicist (SEG)* Student Chapter Universitas Hasanuddin

16. Teman-teman dan kakak **Asisten Laboratorium** yang telah mengisi hari-hari selama asistensi, praktikum di lapangan, dan selama perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kata sempurna, sehingga dengan segala kerendahan hati penulis sangat mengharapkan kritikan dan saran yang bersifat membangun untuk memperbaiki kekurangan yang ada. Penulis pun tetap berharap agar tulisan ini dapat memberikan manfaat bagi siapapun yang membacanya.

Makassar, 27 Mei 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Nur Annisa' with a stylized flourish at the end.

Nur Annisa

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iiiv
SARI BACAAN	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xivi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Rumusan Masalah	3
I.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
II.1 Sejarah Tsunami	4
II.2 Sumber Tsunami	6
II.2.1 Gempa.....	7
II.3 Jalur Evakuasi	13
II.4 Mitigasi Bencana	16

II.5 Sistem Informasi Geografis	17
II.6 Pemodelan Tsunami.....	18
II.7 <i>Cost Distance</i>	20
II.8 <i>Pedestrian Evacuation Analyst</i>	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	26
III.1 Peta Lokasi	26
III.2 Alat dan Bahan	26
III.2.1 Alat.....	26
III.2.2 Bahan.....	27
III.3 Prosedur Penelitian.....	27
III. 4 Pengolahan Data.....	27
III. 5 Bagan Alir	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
IV.1 Analisa Zona Bahaya dan Tinggi Tsunami	30
IV. 1. 1 Tinggi Genangan Tsunami.....	30
IV. 1. 2 Zona Bahaya Tsunami	33
IV. 2 Waktu Evakuasi Tsunami	35
IV. 2. 1 Waktu Evakuasi untuk Asumsi Ketinggian Tsunami 7 Meter	35
IV. 2. 2 Waktu Evakuasi untuk Asumsi Ketinggian Tsunami 10 Meter ..	41
IV. 3 Jalur Evakuasi Tsunami	46
IV. 3. 1 Jalur Evakuasi Tsunami	46

IV. 3. 2 Titik Rekomendasi <i>Shelter</i>	49
BAB V PENUTUP	52
V.1 Kesimpulan.....	52
V.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN.....	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Letak Episenter Gempabumi pada Zona Subduksi <i>Megathrust</i> Sulawesi Utara	5
Gambar 2. 2 Proses Terjadinya Tsunami	6
Gambar 2. 3 Peta tektonik wilayah Indonesia	7
Gambar 2. 4 Jenis Sesar Lempeng	9
Gambar 2. 5 Gempabumi Merusak dan Tsunami 1904 – 2018.....	10
Gambar 2. 6 Sesar Aktif di Pulau Sulawesi	11
Gambar 2. 7 Proses Pencarian Rute.....	22
Gambar 2. 8 Ilustrasi <i>Cost Distance</i>	22
Gambar 2. 9 Bobot yang Mempengaruhi Pencarian Jarak	23
Gambar 2. 10 Perhitungan Bobot Sel Tetangga dari Sel Asal	23
Gambar 2. 11 Perhitungan <i>Euclidean</i>	24
Gambar 3. 1 Peta Lokasi Penelitian	26
Gambar 3. 2 Bagan Alir Penelitian.....	29
Gambar 4. 1 Peta Tinggi Genangan Tsunami 7 Meter di Kota Buol	31
Gambar 4. 2 Peta Tinggi Genangan Tsunami 10 Meter di Kota Buol	32
Gambar 4. 3 Peta Zona Bahaya di Kota Buol	33
Gambar 4. 4 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,1 meter/detik (<i>Slow Walk</i>) dengan Ketinggian Gelombang 7 meter.....	37
Gambar 4. 5 Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,52 meter/detik (<i>Fast Walk</i>) dengan Ketinggian Gelombang 7 meter	38
Gambar 4. 6 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,79 meter/detik (<i>Slow Run</i>) dengan Ketinggian Gelombang 7 meter.....	39
Gambar 4. 7 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 3,85 meter/detik (<i>Fast Run</i>) dengan Ketinggian Gelombang 7 meter	40

Gambar 4. 8 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,1 meter/detik (<i>Slow Walk</i>) dengan Ketinggian Gelombang 10 meter.....	41
Gambar 4. 9 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,52 meter/detik (<i>Fast Walk</i>) dengan Ketinggian Gelombang 10 meter	42
Gambar 4. 10 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 1,79 meter/detik (<i>Slow Run</i>) dengan Ketinggian Gelombang 10 meter.....	43
Gambar 4. 11 Peta Waktu Evakuasi Tsunami Untuk Kecepatan Evakuasi 3,85 meter/detik (<i>Fast Run</i>) dengan Ketinggian Gelombang 10 meter	44
Gambar 4. 12 Peta Jalur Evakuasi Tsunami di Kelurahan Leok I dan Kelurahan Leok II.....	47
Gambar 4. 13 Peta Jalur Evakuasi Tsunami di Kelurahan Kali, Kelurahan Kulango, Kelurahan Pajeko, Kelurahan Guamonial, Kelurahan Buol dan Kelurahan Bugis.....	48
Gambar 4. 14 Peta Jalur Evakuasi Tsunami dengan Skenario Penambahan <i>Shelter</i> di Kota Buol.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Nilai Koefisien Kekasaran (Qassam dkk., 2020)	19
Tabel 2. 2 Periode Ulang Tsunami (Horspool dkk., 2013)	20
Tabel 2. 3 Skenario Kecepatan Evakuasi (USGS, 2014)	25
Tabel 4. 1 Kepadatan Penduduk di Buol (BPS Kabupaten Buol, 2021)	35
Tabel 4. 2 Waktu Evakuasi Tsunami Pada Ketinggian Tsunami 7 Meter	36
Tabel 4. 3 Waktu Evakuasi Tsunami Pada Ketinggian Tsunami 10 Meter	45
Tabel 4. 4 Titik koordinat rekomendasi <i>shelter</i> pada ketinggian tsunami 10 meter.....	51

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Menurut UU No 24 tahun 2007 tentang penanggulangan bencana, bencana mempunyai definisi sebagai peristiwa atau rangkaian peristiwa yang mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat. Bencana disebabkan oleh faktor alam dan faktor non-alam maupun faktor manusia sehingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis (Sahetapy dkk., 2014).

Tsunami adalah sebuah ombak besar yang terjadi setelah adanya gangguan di dasar laut. Tsunami dapat disebabkan oleh gempa bumi, longsor bawah laut, gunungapi meletus, atau hantaman meteor di laut. Tsunami tidak terlihat saat masih berada jauh di tengah lautan. Namun, begitu mencapai wilayah dangkal gelombang menghampiri pantai maka ketinggian gelombang meningkat sementara kelanjutannya menurun. Gelombang tsunami hampir tidak dapat dirasakan efeknya oleh kapal laut (misalnya) saat melintas di laut dalam, ketinggiannya meningkat hingga mencapai 30 meter atau lebih di daerah pantai (Sarapang dkk., 2019).

Pulau Sulawesi merupakan salah satu pulau yang sangat rawan terjadinya gempa bumi. Hal ini disebabkan oleh bertemunya tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Filipina, dan Lempeng Indo-Australia. Selain 3 lempeng tersebut, juga terdapat lempeng mikro di Sulawesi bagian utara yang terbentuk dari hasil subduksi kerak samudra yang terdapat di Laut Sulawesi yang disebut sebagai Lempeng Laut Sulawesi. Aktifitas Lempeng Laut Sulawesi

membentuk zona subduksi atau zona penunjaman (Kurniawan dkk., 2021). Wilayah Indonesia memiliki 6 (enam) zona subduksi dengan 13 segmentasi *megathrust* dan 295 segmen sesar aktif. Salah satu dari zona subduksi *megathrust* tersebut adalah *megathrust* Sulawesi Utara (Naryanto, 2021). *Megathrust* Sulawesi Utara berdekatan dengan Tolitoli, Buol dan Gorontalo sehingga menjadikan wilayah tersebut berpotensi terjadi gempa bahkan tsunami.

Kabupaten Buol terdiri dari 115 desa yang tersebar di 11 kecamatan dengan jumlah penduduk pada tahun 2020 yakni 145.254 jiwa. 11 kecamatan memiliki 74.624234 jiwa penduduk laki-laki atau 51,4% dari keseluruhan penduduk dan 145.234 jiwa penduduk perempuan atau 48,6% dari keseluruhan penduduk (BPS Kabupaten Buol, 2021). Mengingat jumlah penduduk di Kabupaten Buol yang besar dan secara spasial di sebelah utara Buol berbatasan dengan *Megathrust* Sulawesi Utara sehingga adanya potensi gempabumi yang dapat membangkitkan tsunami serta belum adanya penelitian mengenai jalur evakuasi di Kota Buol dengan menggunakan metode *cost distance*. *Cost distance* merupakan metode yang digunakan untuk menghitung jarak akumulatif terpendek untuk setiap sel ke atau dari sumber dalam waktu tercepat. Metode ini telah digunakan dalam penelitian sebelumnya oleh Qassam dkk. (2020) di Kabupaten Serang., Siljander dkk. (2015) di Finlandia., dan Becker dkk. (2017) di Andalusian. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membuat peta jalur evakuasi bencana tsunami di Kabupaten Buol dengan menggunakan metode *cost distance* sebagai salah satu upaya mitigasi bencana yang dapat memudahkan dalam evakuasi bencana sehingga kerugian korban bencana dapat diminimalisir.

I.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian yang dilakukan ialah:

1. Berapa luas wilayah yang tergenang pada zona bahaya (*hazard zone*) tsunami dengan ketinggian gelombang tsunami 7 m dan 10 m di Kota Buol?
2. Berapa waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi tsunami di Kota Buol?
3. Bagaimana jalur evakuasi tsunami di Kota Buol?

I.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup dari penelitian ini dibatasi pada pembuatan peta genangan tsunami dan zona bahaya (*hazard zone*), peta waktu evakuasi tsunami, peta jalur evakuasi tsunami dan peta jalur evakuasi tsunami dengan *shelter* menggunakan data sekunder berupa data DEM tahun 2018 yang diperoleh dari DEMNAS dan RBI tahun 2013 yang diperoleh dari Badan Informasi Geospasial di Kota Buol dengan menggunakan metode *cost distance*.

I.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Membuat peta genangan tsunami dan zona bahaya (*hazard zone*) tsunami dengan ketinggian gelombang tsunami 7 m dan 10 m di Kota Buol.
2. Membuat peta waktu evakuasi tsunami di Kota Buol.
3. Membuat peta jalur evakuasi tsunami di Kota Buol.

BAB II

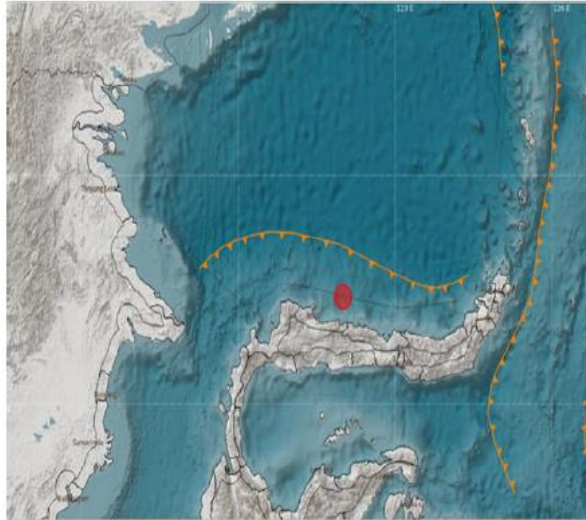
TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sejarah Tsunami

Tsunami, kata ini berasal dari Jepang, *tsu* berarti pelabuhan, *nami* berarti gelombang. Tsunami dipergunakan untuk gelombang pasang yang memasuki pelabuhan. Pada laut lepas misal terjadi gelombang pasang sebesar 8 m tetapi begitu memasuki daerah pelabuhan yang menyempit tinggi gelombang pasang menjadi 30 m. Tsunami bisa terjadi jika gempa bumi berada di dasar laut dengan pergerakan vertikal yang cukup besar. Tsunami juga bisa terjadi jika ada letusan gunungapi di laut atau terjadi longsor di laut (Nur, 2010).

Sulawesi terletak di daerah dengan tiga persimpangan lempeng tektonik. Persimpangan ini menyebabkan keadaan tektonik yang kompleks di Sulawesi yang terakomodasi oleh sesar geser dan sesar naik. Wilayah Sulawesi secara keseluruhan bukan merupakan wilayah yang sepi akan bencana gempa bumi. Gempabumi di beberapa wilayah di Sulawesi pernah membangkitkan tsunami (PUSGEN, 2018).

Pada Gambar 2.1 diketahui lokasi *megathrust* yang terdapat di Pulau Sulawesi yakni di Sulawesi bagian utara. Keberadaan zona subduksi pada Lempeng laut Sulawesi yang dikenal dengan nama *megathrust* Sulawesi Utara menjadikan wilayah didekatnya rawan gempa bumi bahkan berpotensi tsunami yang mengancam keselamatan masyarakat setempat. Kecepatan pergeseran geodetik *megathrust* Sulawesi Utara mencapai 42-50 mm/thn (Kurniawan dkk., 2021).



Gambar 2. 1 Letak Episenter Gempabumi pada Zona Subduksi *Megathrust* Sulawesi Utara (Kurniawan dkk., 2021)

Berdasarkan peta segmentasi dan magnitudo maksimum subduksi Indonesia yang terlihat pada Gambar 2.1, maka *megathrust* Sulawesi Utara dapat mengakibatkan gempabumi dengan magnitudo yang besar, yakni M 8,5. Apabila potensi magnitudo mencapai angka tersebut, tentu dapat menjadi sumber pembangkit tsunami di Sulawesi bagian utara. Dalam 25 tahun belakangan, terjadi dua aktivitas gempabumi dengan magnitudo yang besar. Pertama, pada 1 Januari 1996 terjadi gempabumi dengan magnitudo 7,9 di sebelah utara Tolitoli yang mengakibatkan tsunami. Kedua, gempabumi pada 16 November 2008 dengan magnitudo 7,3 di utara Gorontalo yang berpotensi tsunami dan menimbulkan kerugian jiwa serta kerugian materil (Kurniawan dkk., 2021). Selain Tolitoli dan Gorontalo yang dekat dengan *megathrust* Sulawesi Utara juga terdapat Kabupaten Buol yang berdekatan dengan *megathrust* di Sulawesi Utara. Meskipun Buol tidak memiliki sejarah tsunami sebelumnya, tetapi Kabupaten Buol memiliki potensi terjadinya tsunami karena wilayah Buol yang dekat dengan *megathrust*. Wilayah lain yang dekat dengan Buol dan *megathrust* Utara Sulawesi seperti Tolitoli dan

Gorontalo pernah mengalami tsunami. Berdasarkan informasi dari BMKG, Kabupaten Buol pernah diguncang gempa bumi yang cukup besar seperti yang terjadi pada tanggal 27 Agustus 2019 dengan magnitudo 5,0 diperkirakan berasosiasi dengan aktivitas zona penunjaman di sebelah utara pulau Sulawesi dan gempa bumi pada tanggal 4 Maret 2021 dengan magnitudo 4,6.

II.2 Sumber Tsunami

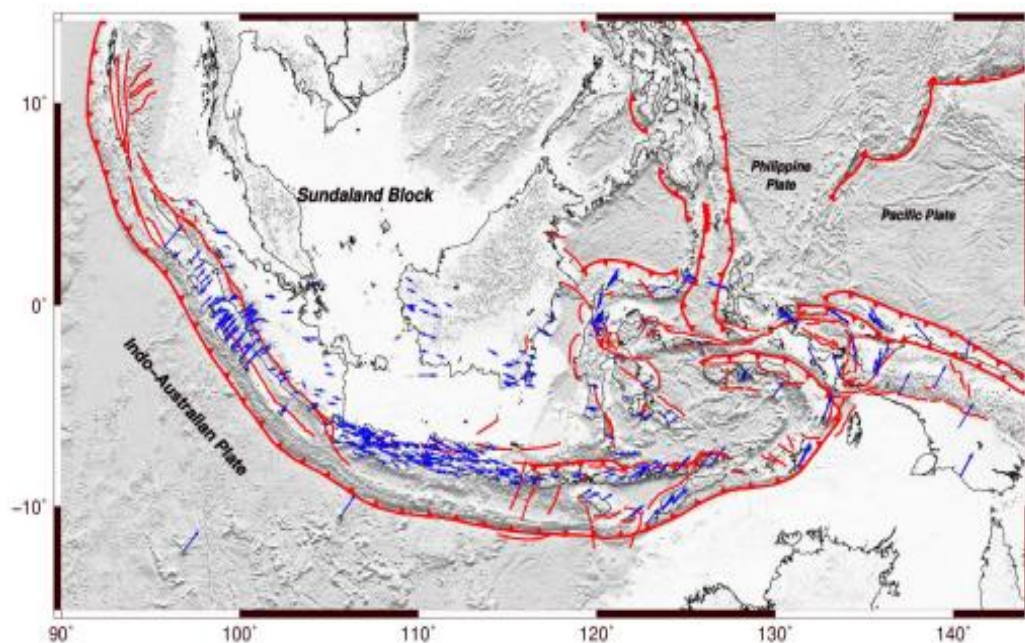


Gambar 2. 2 Proses Terjadinya Tsunami (UNESCO, 2007)

Tsunami paling sering disebabkan oleh gempa bumi, tetapi dapat pula dikarenakan tanah longsor, letusan gunung berapi, dan sangat jarang oleh meteor atau benturan lain di permukaan lautan. Pada Gambar 2.2 dapat dilihat proses terjadinya tsunami yang disebabkan gempa bumi. Tsunami terjadi terutama karena adanya pergeseran tektonik di bawah laut yang disebabkan oleh gempa bumi di pusat yang dangkal

sepanjang daerah subduksi. Lempeng kerak bumi (*crustal blocks*) yang terdorong ke atas dan ke bawah memberi energi potensial pada massa air sehingga terjadi perubahan drastis pada permukaan air laut di daerah yang terkena. Energi yang dilepas ke dalam massa air itu menyebabkan timbulnya tsunami yakni energi yang memancar dan menjauh dari daerah sumbernya dalam bentuk gelombang berperiode panjang (UNESCO, 2007).

II.2.1 Gempa



Gambar 2. 3 Peta tektonik wilayah Indonesia (PUSGEN, 2017)

Pada Gambar 2.3 dapat dilihat peta tektonik di wilayah Indonesia yang terletak pada pertemuan lempeng besar dunia dan beberapa lempeng kecil atau *microblocks* (Bird, 2003), menyebabkan daerah tersebut berpotensi mengalami banyak kejadian gempa. Indonesia dikelilingi oleh empat lempeng utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Penelitian lanjutan menggunakan informasi geodetik, geologis,

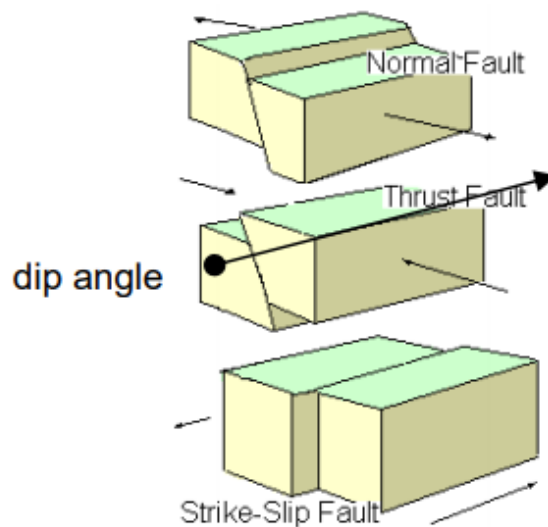
dan seismologi menunjukkan bahwa tektonik di Indonesia dapat dibagi ke dalam beberapa lempeng kecil, yaitu Burma, Sunda, Laut Banda, Laut Maluku, Timor, Kepala Burung, Maoke, dan Woodlark (PUSGEN, 2017).

Banyak penyebab terjadinya tsunami tetapi gempabumi bawah lautlah yang paling sering dan paling berbahaya. Longsor bawah juga berbahaya, tapi efektifitas tsunami akibat longsor bawah laut masih jauh di bawah efektifitas tsunami akibat gempa bumi. Tidak semua gempa menghasilkan tsunami, hal ini tergantung beberapa faktor utama seperti tipe sesar (*fault type*), kemiringan sudut antar lempeng (*dip angle*), dan kedalaman pusat gempa (*hypocenter*). Gempa dengan karakteristik tertentu akan menghasilkan tsunami yang sangat berbahaya dan sangat mematikan, yaitu (Sutowijoyo, 2005):

- 1) Tipe sesar naik (*thrust/ reverse fault*), seperti terlihat pada Gambar 2.4. Tipe ini sangat efektif memindahkan volume air yang berada di atas lempeng untuk bergerak sebagai awal lahirnya tsunami.
- 2) Kemiringan sudut tegak antar lempeng yang bertemu. Makin tinggi sudutnya (mendekati 90°), makin efektif tsunami yang terbentuk.
- 3) Kedalaman pusat gempa yang dangkal (<70 km). Makin dangkal pusat gempa makin efektif tsunami yang ditimbulkan.

Pada Gambar 2.4 terlihat jenis-jenis sesar yang dapat menjadi salah satu faktor terjadinya tsunami. Sesar adalah faktor planar dalam volume batuan yang telah mengalami perpindahan yang signifikan akibat gerakan massa batuan. Sebagai ilustrasi, meski kekuatan gempabumi relatif kecil (M. 6.0 – M. 7.0), tetapi dengan terpenuhinya ketiga syarat di atas, kemungkinan besar tsunami akan terbentuk. Sebaliknya, meski kekuatan gempa cukup besar (M>7.0) dan dangkal, tetapi kalau

tipe sesarnya bukan naik, namun normal (*normal fault*) atau sejajar (*strike slip fault*), bisa dipastikan tsunami akan sulit terbentuk. Gempabumi dengan kekuatan M 7.0, dengan tipe sesar naik dan dangkal, bisa membentuk tsunami dengan ketinggian mencapai 3-5 meter (Sutowijoyo, 2005).

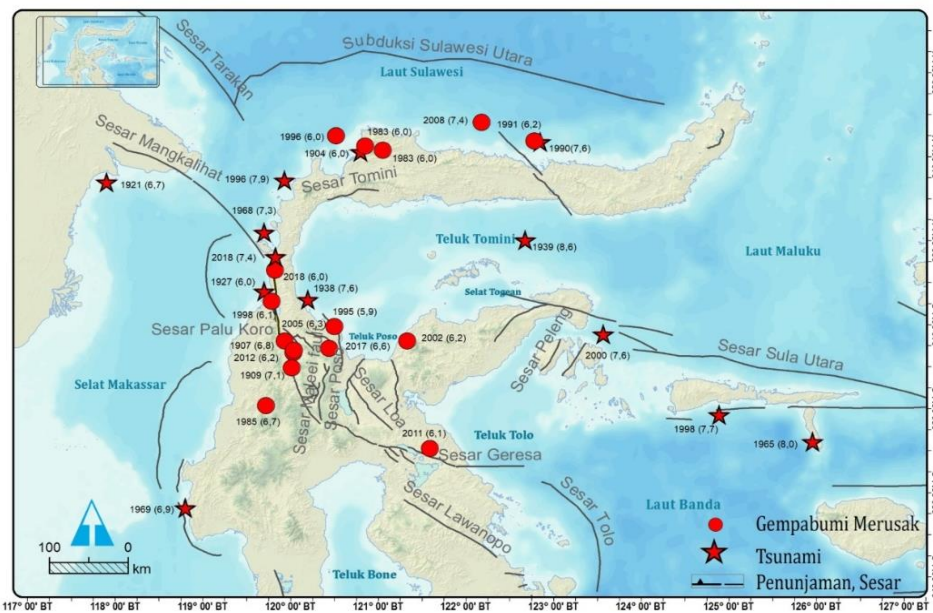


Gambar 2. 4 Jenis Sesar Lempeng (Sutowijoyo, 2005)

Secara umum karakteristik gempa yang dapat menimbulkan tsunami adalah sebagai berikut (Disaptono dan Budiman., 2006) :

1. Pusat gempa (*episenter*) berada di laut
2. Kedalaman pusat gempa (*hiposenter*) adalah dangkal, pada umumnya kurang dari 60 km dari permukaan
3. Mekanisme sesar gempa tektonik bertipe sesar naik (*reverse fault*) atau sesar turun (*normal fault*)
4. Magnitudo gempa besar, pada umumnya di atas M=7
5. Batimetri, kelandaian, dan bentuk dari pantai yang sesuai.
6. Gerakan vertikal ini dapat terjadi pada sesar bumi atau sesar ketika hal ini terjadi air laut akan berupaya untuk kembali pada kondisi seimbang

mengikuti gravitasi. Sehingga gerakan ini akan menyebabkan terjadinya energi yang dapat mendorong gelombang laut naik secara vertikal dan memunculkan tsunami.

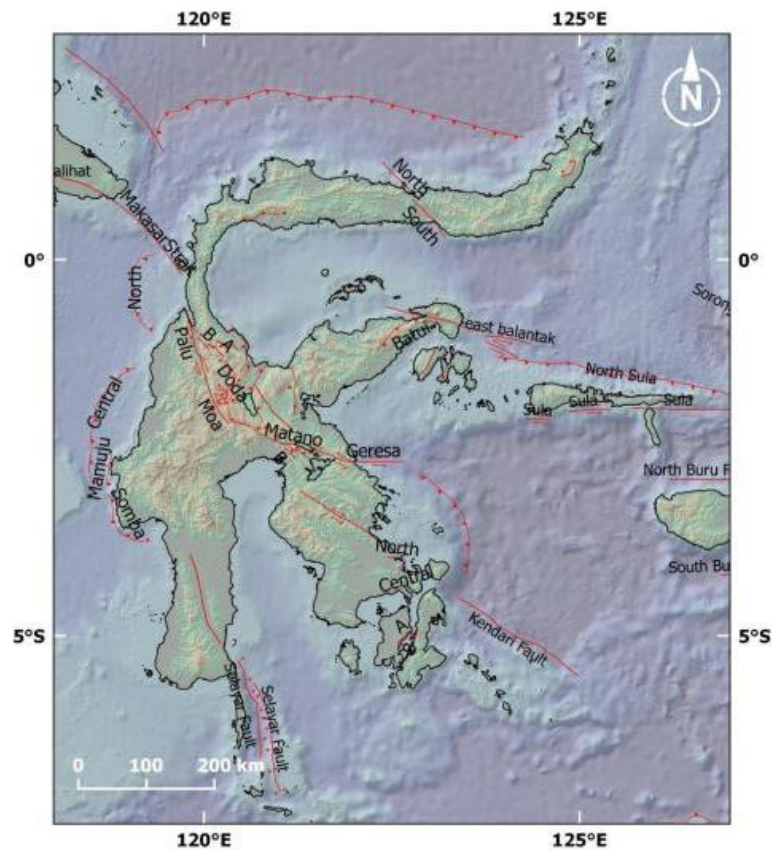


Gambar 2. 5 Gempabumi Merusak dan Tsunami 1904 – 2018 (BMKG, 2019)

Pada Gambar 2.5 terlihat titik kejadian gempabumi dan tsunami yang pernah terjadi di Sulawesi Tengah pada tahun 1904 – 2018. Selama tahun 2018 telah terjadi 1.822 gempabumi di Wilayah Sulawesi Tengah dan sekitarnya dengan 79 diantaranya merupakan gempabumi signifikan yang dirasakan oleh masyarakat. Secara umum, gempabumi tahun 2018 didominasi oleh gempa dangkal pada kedalaman ≤ 20 km dengan persentase sebesar 68 %, gempa pada kedalaman 20 km sampai 60 km sebesar 10%, sedangkan untuk gempa ≥ 60 km sebesar 22 %. Adapun berdasarkan distribusi magnitudo gempabumi, paling banyak terjadi dengan rentang dengan magnitudo 3 sebanyak 995 kejadian, gempa dengan magnitudo 2 sebanyak 515 kejadian, gempa dengan mangnitudo 4 sebanyak 275 kejadian, gempa dengan magnitudo 5 sebanyak 33 kejadian, gempa dengan

magnitudo 6 sebanyak 2 kejadian, dan gempa yang terbesar dengan magnitudo di atas 7 sebanyak 1 kali kejadian yang terjadi pada tanggal 28 September 2018 dan memicu tsunami (BMKG, 2019).

II.2.2 Gunungapi



Gambar 2. 6 Sesar Aktif di Pulau Sulawesi (PUSGEN, 2017)

Pada Gambar 2.6 dapat dilihat jalur sesar yang ada di Sulawesi. Pulau Sulawesi memiliki tatanan sesar rumit yang terdiri atas sesar yang masih aktif bergerak dan tidak lagi bergerak. Jalur sesar memiliki peranan penting terbentuknya gunungapi. Indonesia merupakan negara kepulauan yang mempunyai busur gunungapi terpanjang di dunia. Indonesia memiliki 127 gunungapi aktif, atau sekitar 13% gunungapi aktif di dunia terletak di Indonesia, sehingga menjadikan negara ini sebagai pemilik gunungapi terbanyak di dunia. Sekitar 60% dari jumlah tersebut

adalah gunungapi yang memiliki potensi bahaya cukup besar bagi penduduk yang ada di dekatnya. Pola penyebaran gunungapi Indonesia dapat dibagi atas 5 segmen yaitu Segmen Busur Sumatera, Sunda, Banda, Sulawesi dan Talaud (BNPB, 2016).

Berdasarkan kerapatan penyebaran gunungapi, segmen-segmen tersebut dapat dibagi lebih lanjut atas 15 sub segmen sebagai berikut:

- (1) Segmen Busur Sumatera terdiri atas Sub segmen Seulawah, Toba, Kerinci dan Dempo;
- (2) Segmen Busur Sunda terdiri dari Sub segmen Panggrango, Papandayan, Slamet, Semeru, Rinjani dan Kelimutu;
- (3) Segmen Busur Banda hanya terdiri dari satu segmen;
- (4) Segmen Talaud terdiri dari Sub segmen Dukono dan Gamalama;
- (5) Segmen Busur Sulawesi terdiri atas Sub segmen Sopotan dan Karangetang, serta Gunungapi Colo yang terpisah.

Masing-masing segmen dan sub segmen mempunyai kecenderungan kekhasannya. Data seismik memperlihatkan adanya perbedaan nilai seismisitas pada setiap segmen berbeda secara signifikan (BNPB, 2016).

Peristiwa tsunami yang berasosiasi dengan letusan gunungapi adalah letusan gunungapi bawah laut, runtuhnya kaldera (*caldera collapse*), dan masuknya material letusan gunungapi dalam jumlah besar dan cepat ke dalam air (Fauzi dkk., 2020).

II.2.3 Longsor

Longsoran bawah laut adalah proses alami penting yang menyebabkan massa

sedimen bervolume besar bergerak dari daerah lantai samudera (dasar laut) yang dangkal ke daerah yang lebih dalam. Terdapat berbagai jenis dan penyebab terjadinya ketidakstabilan lantai samudera dan terminologi longsor yang paling banyak digunakan untuk fenomena tersebut. Perbedaan bahan, lingkungan, dan muatan lantai samudera merupakan faktor-faktor yang sangat mempengaruhi jenis longsor tersebut. Longsor bawah laut sering memicu terjadinya tsunami atau gelombang laut besar berkecepatan tinggi di daerah longsor yang dapat mencapai jarak tempuh sangat jauh. gempa bumi merupakan faktor utama penyebab terjadinya longsor bawah laut. Semakin besar kekuatan gempa, semakin besar pula longsor yang terjadi. Hal ini akan mengakibatkan semakin besarnya kemungkinan terjadinya gelombang tsunami yang berpotensi merusak (Budiono, 2009). Untuk longsor massa yang dapat memicu tsunami dapat pula dipicu oleh gempa bumi atau letusan gunungapi berkekuatan besar yang mengakibatkan ketidakstabilan massa pada suatu lereng (Fauzi dkk., 2020).

II.3 Jalur Evakuasi

Jalur evakuasi tsunami merupakan aspek yang penting untuk memvisualisasikan strategi yang dikembangkan di suatu daerah. Jalur evakuasi yang baik adalah jalur yang aman serta tidak ada titik-titik *barrier* yang banyak ketika penduduk dievakuasikan ke tempat yang aman walau hanya ketempat evakuasi sementara bahkan ketempat evakuasi akhir. Syarat jalan yang digunakan harus mampu memfasilitasi seluruh penduduk yang akan dievakuasi dalam waktu yang cepat ke daerah perlindungan (*sheltering*) atau ke klinik dan rumah sakit sehingga kondisi jalan harus memenuhi syarat dari segi kualitas, material jalan, lebar jalan, dan

jarak tempuh keluar daerah A atau B pada saat evakuasi. Arah evakuasi juga dilakukan tidak mengikuti arah angin bertiup, agar paparan radiasi dapat ditekan seminimal mungkin. Dalam jalur evakuasi diperlukan jalan alternatif dengan arah berbeda-beda (Susilo dan Yarianto, 2007)

Jalur evakuasi mengarahkan untuk menjauhi arah gelombang dan harus diindikasikan dengan jelas melalui rambu-rambu, seperti menjauhi garis pantai, menghindari melewati jembatan, memanfaatkan jalur eksisting, menuju jalan dengan lebar yang lebih besar agar tidak terjadi *bottle neck* (lintasan sempit), menghindari hambatan atau rintangan, pergerakan massa setiap blok diarahkan agar tidak tercampur dengan blok lainnya untuk menghindari kemacetan (Aji, 2020).

Tingkatan bahaya tsunami bisa didasari oleh beberapa parameter yang bergantung pada jarak zona bahaya yaitu pantai ke zona aman. Seiring dengan bertambahnya jarak dari suatu tempat ke garis pantai maka akan semakin berkurang ketinggian gelombang tsunaminya. Jarak suatu tempat dari garis pantai dinilai sebagai parameter kerentanan bahaya tsunami berdasarkan pada jangkauan rayapan gelombang tsunami. Jarak dari garis pantai memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan wilayah bahaya tsunami. Semakin dekat jaraknya dengan garis pantai maka semakin tinggi tingkat bahaya tsunaminya sedangkan semakin jauh jaraknya dengan garis pantai maka semakin rendah tingkat bahaya tsunaminya (Oktaviana dkk., 2020).

Jalur evakuasi yang digunakan haruslah benar-benar aman dari benda-benda yang berbahaya yang dapat menimpa diri, serta jarak jalur evakuasi yang dipakai untuk

evakuasi dari tempat tinggal semula ke tempat yang lebih aman haruslah jarak yang memungkinkan cepat sampai pada tempat yang aman dan jalur yang dipilih juga layak digunakan pada saat evakuasi sehingga tidak menghambat proses evakuasi (Syam, 2016).

Ada dua jenis evakuasi yang dapat dibedakan yaitu evakuasi skala kecil dan evakuasi skala besar. Contoh dari evakuasi skala kecil yaitu penyelamatan yang dilakukan dari sebuah bangunan yang disebabkan karena ancaman bom atau kebakaran. Contoh dari evakuasi skala besar yaitu penyelamatan dari sebuah daerah karena banjir, letusan gunung berapi atau badai. Dalam situasi ini yang melibatkan manusia secara langsung atau pengungsi sebaiknya didekontaminasi sebelum diangkut keluar dari daerah yang terkontaminasi. Dalam modul Siap Siaga Bencana Alam dikemukakan syarat-syarat jalur evakuasi yang layak dan memadai tersebut adalah (Sahetapy dkk., 2014):

a. Keamanan Jalur

Jalur evakuasi yang akan digunakan untuk evakuasi haruslah benar-benar aman dari benda-benda yang berbahaya yang dapat menimpa diri.

b. Jarak Tempuh Jalur

Jarak jalur evakuasi yang akan dipakai untuk evakuasi dari tempat tinggal semula ke tempat yang lebih aman haruslah jarak yang akan memungkinkan cepat sampai pada tempat yang aman.

c. Kelayakan Jalur

Jalur yang dipilih juga harus layak digunakan pada saat evakuasi sehingga tidak menghambat proses evakuasi.

II.4 Mitigasi Bencana

Mitigasi (*mitigation*) adalah langkah-langkah struktural dan non struktural yang diambil untuk membatasi dampak merugikan yang ditimbulkan bahaya alam, kerusakan lingkungan dan bahaya teknologi. Mitigasi yang dilakukan secara struktural seperti pembangunan infrastruktur sabo, tanggul, alat pendeteksi atau peringatan dini, Sedangkan secara non struktural dapat dilakukan seperti pelatihan dan peningkatan kapasitas di masyarakat. Mitigasi meliputi beberapa kegiatan yang diantaranya membuat peta wilayah rawan bencana, memasang rambu-rambu peringatan bahaya di wilayah rawan bencana, menyiapkan tempat penampungan sementara di jalur-jalur evakuasi jika bencana terjadi dan memindahkan masyarakat yang tinggal di wilayah bencana ke tempat yang aman (Fernando, 2017).

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 21 Tahun 2008 tentang Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana, mitigasi bencana adalah serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman. Akan tetapi, proses perencanaan fisik perkotaan dan wilayah di Indonesia belum sepenuhnya bertitik tolak pada kerawanan bencana alam. Identifikasi kerawanan bencana dan lingkungan menjadi hal yang penting dan keharusan dalam kegiatan perencanaan sebagai usaha untuk memperkecil dan mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh bencana. Oleh karena itu, diperlukan pertimbangan yang bijaksana dalam pengambilan keputusan karena mitigasi bertujuan mengurangi atau menghilangkan risiko bencana pada kawasan-kawasan strategis yang berpotensi

risiko tinggi jika terjadi bencana (Edyanto, 2011).

Usaha pemerintah untuk melakukan penataan dalam penyelenggaraan penanggulangan bencana terlihat dengan diterbitkannya Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana yang menjadi acuan Pemerintah Pusat maupun Daerah dalam merencanakan, mengelola, melaksanakan serta mengawasi pelaksanaan upaya-upaya penanggulangan bencana. Kebijakan umum pelaksanaan *Master Plan* pengurangan risiko bencana tsunami diarahkan untuk melindungi masyarakat dari ancaman tsunami melalui penyediaan tempat evakuasi sementara (*shelter*) dan penguatan, pengembangan dan penyediaan sarana dan prasarana kesiapsiagaan dan pengurangan risiko bencana guna peningkatan kapasitas pemerintah, swasta dan masyarakat dalam penanggulangan bencana (Syukri dan Mukhlis, 2016).

Upaya mitigasi bencana sangat diperlukan untuk mencegah atau mengurangi resiko dari bencana tersebut. Kegiatan mitigasi tersebut dapat dilakukan dengan melalui pelaksanaan penataan ruang, pengaturan pembangunan, pembangunan infrastruktur, tata bangunan dan penyelenggaraan pendidikan, penyuluhan, dan pelatihan baik secara konvensional maupun modern. Dengan melakukan mitigasi bencana maka diharapkan dapat mengurangi tingkat resiko bencana yaitu seperti memperkecil ancaman bencana, mengurangi kerentanan kawasan terancam dan meningkatkan kapasitas kawasan terancam (Batu dan Fibriani, 2017).

II.5 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (SIG/ *Geographic Information System*) merupakan sistem informasi berbasis komputer yang digunakan untuk mengolah dan

menyimpan data atau informasi geografis. SIG mempunyai kemampuan untuk menghubungkan berbagai data pada suatu titik tertentu di bumi, menggabungkannya, menganalisa dan akhirnya memetakan hasilnya. Data yang akan diolah pada SIG merupakan data spasial yaitu sebuah data yang berorientasi geografis dan merupakan lokasi yang memiliki sistem koordinat tertentu, sebagai dasar referensinya. Sehingga aplikasi SIG dapat menjawab beberapa pertanyaan seperti lokasi, kondisi, tren, pola dan pemodelan (Nurrady dkk., 2015).

Teknologi GIS mengintegrasikan operasi pengolahan data berbasis *database* yang biasa digunakan saat ini, seperti pengambilan data berdasarkan kebutuhan, serta analisis statistik dengan menggunakan visualisasi yang khas serta berbagai keuntungan yang mampu ditawarkan melalui analisis geografis melalui gambar-gambar petanya. GIS merupakan suatu kajian ilmu dan teknologi yang relatif baru, digunakan oleh berbagai bidang disiplin ilmu, dan berkembang dengan cepat (Tumimomor dkk., 2013).

II.6 Pemodelan Tsunami

Tsunami termasuk bencana alam yang berbahaya yang diakibatkan adanya gangguan di dasar laut. Tinggi gelombang tsunami yang mencapai garis pantai dan rambatan gelombang tsunami ke daratan dapat menghasilkan genangan yang luas. Pemodelan luas genangan dilakukan dengan menggunakan model penurunan tinggi muka gelombang tsunami ketika mencapai daratan, persamaan yang digunakan untuk memodelkan penurunan tinggi gelombang tsunami dengan metode Hloss oleh Berryman (2006). Metode Hloss merupakan pemodelan genangan berdasarkan ketinggian gelombang dari garis pantai, kemiringan lereng,

dan koefisien kekasaran permukaan dengan persamaan (2.1) (Qassam dkk., 2020).

$$H_{loss} = \left(\frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \quad (2.1)$$

H_{loss} = Nilai penurunan air saat masuk ke daratan

n = Koefisien kekasaran

H_0 = Tinggi tsunami pada garis pantai (m)

S = *Slope* / kemiringan lereng (°)

Jenis tutupan lahan diterjemahkan menjadi sebuah koefisien kekerasan permukaan yang menggambarkan kenampakan tutupan lahan. Setiap nilai koefisien kekerasan permukaan memiliki nilai yang beragam, tergantung dari jenis tutupan lahannya. Berikut merupakan tabel nilai koefisien kekerasan permukaan. Nilai koefisien kekerasan permukaan dapat dilihat pada tabel 2.1. Koefisien kekasaran ini mengacu pada pedoman pembuatan peta ancaman tsunami yang dibuat oleh Tim Bimtek PRB (2014) dengan tutupan lahan yang ada.

Tabel 2. 1 Nilai Koefisien Kekasaran (Qassam dkk., 2020)

Tutupan Lahan	Koefisien Kekasaran
Danau	0,007
Gedung/ Bangunan	0,055
Hutan Rimba	0,070
Perkebunan/ Kebun	0,035
Tegalan/ Ladang	0,015
Sawah	0,025
Semak Belukar	0,040
Sungai	0,007
Tanah Kosong/ Gundul	0,015
Permukiman dan Tempat Kegiatan	0,45

Pada Tabel 2.2 dapat dilihat ketinggian tsunami pada periode ulang 500 tahun dan 2500 tahun yang berbeda-beda di setiap Kabupaten/ Kota. Ketinggian tsunami pada daerah penelitian yakni Kota Buol adalah 6,7 meter dan 10,4 meter yang

dibulatkan menjadi 7 meter dan 10 meter berdasarkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Horspool dkk. (2013). Bahaya tsunami di pesisir Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2.2 yang menunjukkan peluang melebihi ketinggian tsunami di pantai pada tahun tertentu, yang dalam hasil di atas terkait dengan ketinggian tsunami yang digunakan untuk tingkat peringatan yang berbeda dari InaTEWS.

Tabel 2. 2 Periode Ulang Tsunami (Horspool dkk., 2013)

No	Kabupaten/ Kota	Periode Ulang Tsunami 500 tahun (m)	Periode Ulang Tsunami 2500 tahun (m)
1	Buol	6,7	10,4
2	Tolitoli	5,7	9,5
3	Gorontalo	6,0	9,6
4	Parigi Moutong	1,8	2,9

Cara alternatif untuk mengungkapkan kemungkinan tsunami adalah melalui peta periode ulang sehingga pada penelitian ini digunakan dua periode ulang yakni pada periode 500 tahun dan 2500 tahun. Peta ketinggian tsunami pada periode ulang menunjukkan ketinggian tsunami minimum yang diperkirakan akan dialami selama interval waktu tertentu (500 tahun dan 2500 tahun pada penelitian ini). Periode ulang pada Tabel 2.2 menunjukkan daerah-daerah di sekitar Buol yang mungkin mengalami tsunami yang akan memicu peringatan tsunami, dan juga menunjukkan ketinggian melebihi tsunami untuk periode tertentu untuk memahami seberapa tinggi tsunami di lokasi tertentu (Horspool dkk., 2013).

II.7 Cost Distance

Cost distance adalah alat di ArcGIS yang digunakan untuk menghitung jarak akumulatif terpendek untuk setiap sel ke atau dari sumber dalam waktu tercepat. *Cost distance* adalah metode utama untuk melakukan analisis jarak di ArcGIS *Spatial Analyst*. *Cost distance* berfungsi untuk mengukur jarak dan arah dari

setiap sel ke sumber terdekat serta dapat menentukan lokasi. *Cost distance* memodifikasi jarak *Euclidean* dengan menyamakan waktu dan jarak melalui sel yang diberikan. Fungsi alokasi waktu mengidentifikasi sumber sel terjauh berdasarkan waktu perjalanan kumulatif. Fitur arah dan waktu menyediakan peta jalan atau rute yang mengidentifikasi jalur dari setiap sel ke sumber terdekat (Qossam dkk., 2020).

Euclidean distance adalah perhitungan untuk mengukur jarak dua titik dalam *euclidean space* yang mempelajari hubungan antara sudut dan jarak. Dalam matematika *euclidean distance* digunakan untuk mengukur dua titik dalam satu dimensi yang memberikan hasil seperti perhitungan *Pythagoras*. Berikut adalah persamaan *euclidean distance* (Miftaahuddin dkk., 2020):

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.2)$$

Keterangan :

d = Jarak

x_1 = Koordinat latitude 1

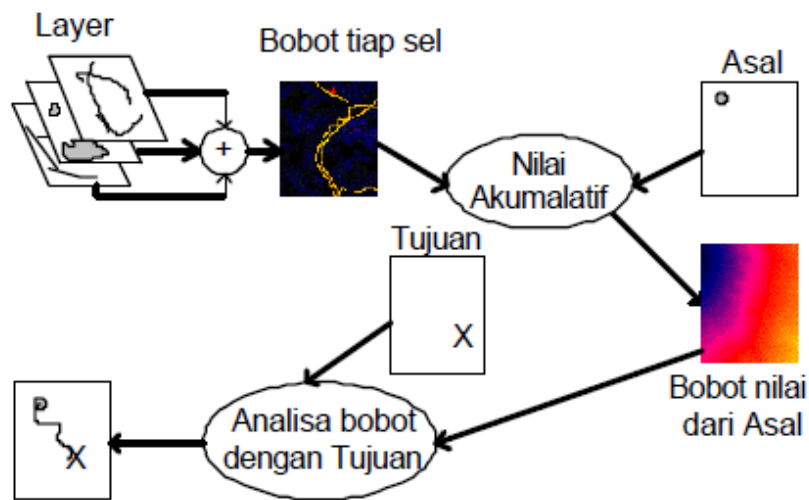
x_2 = Koordinat latitude 2

y_1 = Koordinat longitude 1

y_2 = Koordinat longitude 2

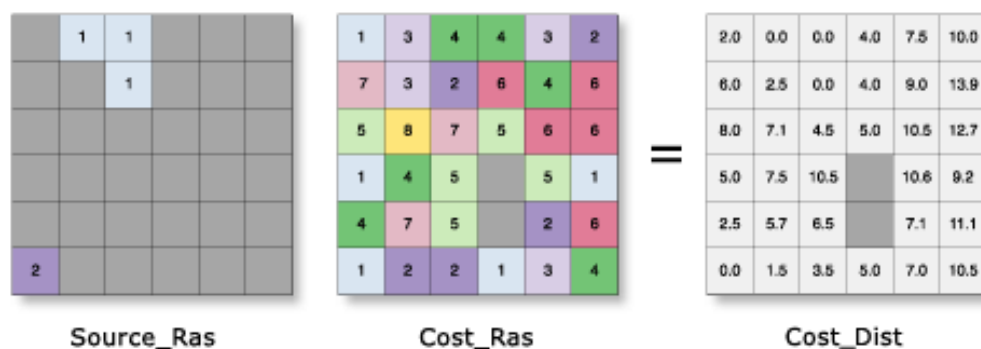
Gambar 2.7 menunjukkan proses pencarian rute atau jalur evakuasi yang membutuhkan masukkan berupa titik asal, titik tujuan serta grid bobot. Dari grid bobot dan titik tujuan dicari *cost distance*, yaitu grid yang berisi nilai bobot akumulasi ke tetangga terdekat sel asal. Hasil dari *cost distance* adalah bobot akumulasi dan *cost back link*, yaitu grid yang dapat digunakan untuk mengetahui

rute ke asal. Tiap nilai menandakan dari sel tetangga mana dia berasal, sehingga dapat ditelusuri sel asalnya. Dari *cost distance* dan titik asal, didapat *cost path*, yaitu rute bobot yang akan menunjukkan rute dengan bobot terkecil dari sel tujuan ke sel asal. Rute atau jalur evakuasi yang efisien akan mencari bobot akumulatif yang paling kecil (Rostianingsih, 2001).



Gambar 2. 7 Proses Pencarian Rute (Rostianingsih, 2001)

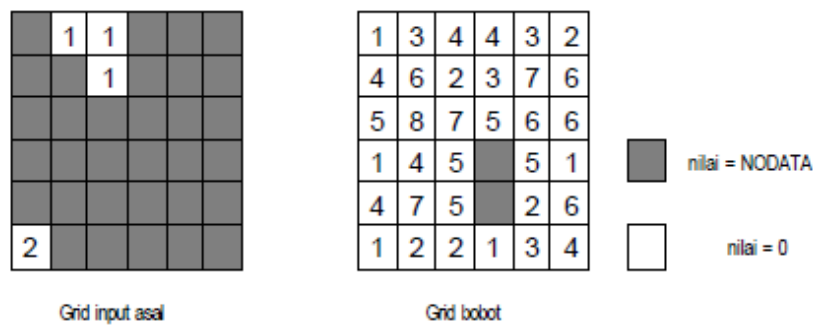
Grid *cost distance* adalah grid yang berisi nilai bobot akumulasi ke tetangga terdekat sel asal. Nilai akumulasi akan diurut dari nilai yang paling kecil ke nilai paling tinggi dan dimasukkan dalam tabel seperti pada Gambar 2.8 .



Gambar 2. 8 Ilustrasi *Cost Distance* (Esri, 2019)

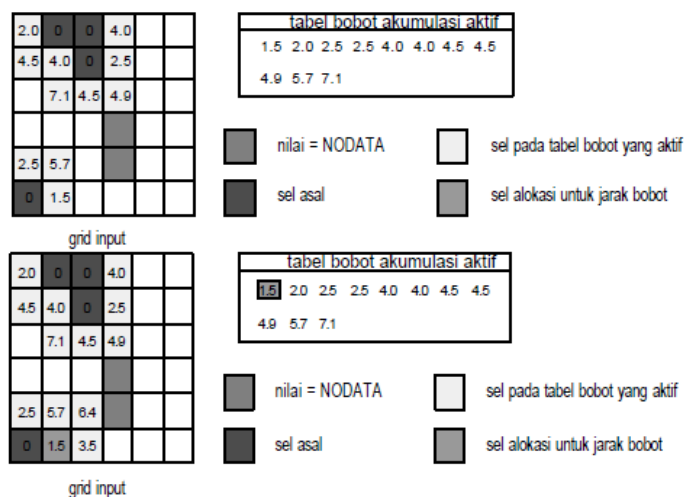
Pada Gambar 2.9 terlihat bobot yang mempengaruhi pencarian jarak iterasi pertama, sel asal dianggap bernilai 0 karena tidak ada nilai akumulasi untuk sel

tersebut, selanjutnya, semua tetangga sel asalnya akan aktif, dan bobot diberikan pada link antara sel asal dan sel tetangganya dengan menggunakan bobot akumulasi.



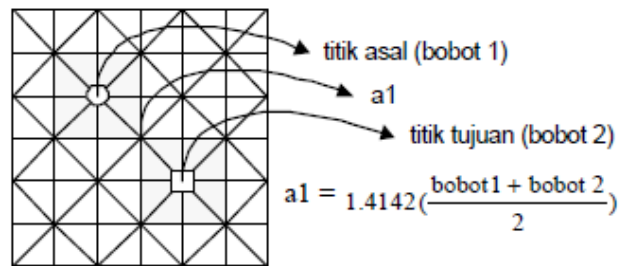
Gambar 2. 9 Bobot yang Mempengaruhi Pencarian Jarak (Rostianingsih, 2001)

Pada Gambar 2.10 dapat dilihat bahwa nilai bobot yang paling kecil pada sel akan terpilih sebagai grid *cost distance*. Tabel akan bertambah dari nilai sel tetangga dari sel yang terpilih tadi, karena sel tersebut sekarang mempunyai jalan untuk mencapai sel asal. Hanya sel yang dapat mencapai sel asal yang bisa dipilih. Bobot bergerak antar sel ini dihitung menggunakan rumus bobot akumulasi yang ada pada persamaan 2.3.



Gambar 2. 10 Perhitungan Bobot Sel Tetangga dari Sel Asal (Rostianingsih, 2001)

$$\text{Bobot akumulasi} = a1 + 1,4142 \left(\frac{\text{bobot 1} + \text{bobot 2}}{2} \right) \quad 2.3$$



Gambar 2. 11 Perhitungan *Euclidean* (Rostianingsih, 2001)

Pada Gambar 2.11 terdapat perhitungan *Euclidean* untuk mendapatkan bobot akumulasi. Sel dengan bobot terkecil akan terpilih lagi, dan sel tetangga yang baru akan dihitung kembali dan hasil outputnya akan ditambahkan ke tabel kembali. Rute bobot akan menunjukkan rute dengan bobot terkecil dari sel tujuan ke sel asal (Rostianingsih, 2001).

II.8 Pedestrian Evacuation Analyst

Perangkat lunak *Pedestrian Evacuation Analyst* mengimplementasikan pendekatan jarak-jalur anisotropik untuk evakuasi pejalan kaki dari bahaya yang datang secara tiba-tiba, dengan fokus khusus saat ini pada ancaman tsunami. Model tersebut memperkirakan evakuasi potensi berdasarkan ketinggian, arah pergerakan, tutupan lahan, dan kecepatan perjalanan dengan membuat peta yang menunjukkan waktu perjalanan menuju zona aman. *Pedestrian Evacuation Analyst* memberikan kemampuan untuk mengevaluasi keefektifan berbagai struktur evakuasi vertikal di dalam area studi, baik melalui peta waktu dari lanskap waktu perjalanan yang dimodelkan dengan struktur potensial yang ada maupun melalui perbandingan jumlah populasi dalam jangkauan keamanan.

Pedestrian Evacuation Analyst memberikan instruksi ke dalam versi ArcGIS desktop *Advanced (ArcInfo)* Esri dan menjelaskan langkah-langkah untuk menjalankan perangkat lunak dan menghasilkan peta waktu evakuasi dan jumlah

populasi. *Pedestrian Evacuation Analyst* digunakan oleh para peneliti untuk penilaian paparan populasi dan penjangkauan masyarakat untuk membantu memvisualisasikan skenario evakuasi dari bahaya yang muncul secara tiba-tiba seperti tsunami. Secara khusus, perangkat lunak *Pedestrian Evacuation Analyst* dirancang untuk memenuhi tujuan berikut: (1) mengotomatiskan pemrosesan data awal dan prosedur pemodelan evakuasi, (2) menghitung waktu tempuh ke tempat yang aman dari lokasi mana pun di area studi dan menghasilkan berbagai jumlah populasi di setiap jarak, (3) memungkinkan variasi kecepatan perjalanan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap waktu perjalanan dan jumlah paparan populasi, (4) menghasilkan peta waktu untuk wilayah studi sebagai fungsi waktu perjalanan, dan (5) menentukan populasi dan area aman serta bahaya (USGS, 2014).

Tabel 2.3 Skenario Kecepatan Evakuasi (USGS, 2014)

Kecepatan Perjalanan	Nilai Kecepatan Perjalanan (meter/detik)
Slow Walk	1,1
Fast Walk	1,52
Slow Walk	1,79
Fast run	3,85

Pada Tabel 2.4 dapat dilihat kecepatan evakuasi dengan menggunakan *Pedestrian Evacuation Analyst* yang dibedakan menjadi empat skenario kecepatan evakuasi yang merujuk pada USGS pada tahun 2014 yaitu kecepatan 1,1 m/s (*slow walk*), kecepatan 1,52 m/s (*fast walk*), kecepatan 1,79 m/s (*slow run*) dan kecepatan 3,85 m/s (*fast run*). Penggunaan variasi kecepatan yang digunakan dalam penelitian ini dikarenakan adanya perbedaan kecepatan seseorang dalam melakukan evakuasi yang dipengaruhi oleh usia, jenis kelamin, kesehatan, kondisi jalur evakuasi, topografi wilayah dan lain-lain.