

Skripsi Geofisika

ANALISIS JALUR EVAKUASI TSUNAMI DI KOTA TOLI-TOLI

Disusun dan diajukan oleh:

WINDY SARI

H061181317



PROGRAM STUDI GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2022

HALAMAN JUDUL
ANALISIS JALUR EVAKUASI TSUNAMI DI KOTA TOLI-TOLI

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

Pada Program Studi Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

Disusun dan diajukan oleh:

WINDY SARI

H061181317

DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR

2022

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS JALUR EVAKUASI TSUNAMI DI KOTA TOLI-TOLI

Disusun dan diajukan oleh:

WINDY SARI

H061 18 1317

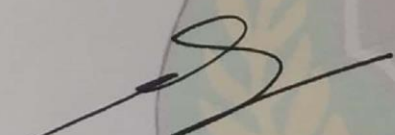
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

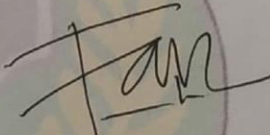
Pada tanggal 27 Mei 2022

Menyetujui,

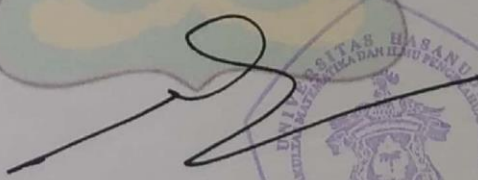
Pembimbing Utama

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 : Windy Sari

Nim : H061 18 1317

Program Studi : Geofisika

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Analisis Jalur Evakuasi Tsunami di Kota Toli-Toli

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



Windy Sari

ABSTRACT

A tsunami disaster is a disaster that causes damage and losses, especially if the magnitude of the tsunami that occurs is large enough. This can happen because of the geographical location of Indonesia, which is located on three main tectonic plates. One of the mitigation efforts that can be made is to make a map of the evacuation route. This study aims to map the tsunami hazard zones and provide alternative tsunami evacuation routes in Toli-toli City with a scenario of a tsunami height of 6 meters and 10 meters from the coastline using the Berryman equation with cost distance tools. The results of this study show that the area affected by the tsunami for a tsunami height of 6 meters is 216.16 Ha, while for a tsunami height of 10 meters it is 401.45 Ha, where the number of villages affected by the tsunami is four villages. The village most affected by the tsunami was Nalu Village (217.34 Ha). The results of the analysis of the tsunami evacuation route show that the time required from the vulnerable area to the safe zone is up to 22 minutes when the evacuation speed used is a fast walk (1.52 m/s). As many as 6 points were obtained for shelter for a tsunami height of 10 meters.

Keywords: *Cost Distance, A tsunami evacuation route, Shelter, Toli-toli, Tsunami*

SARI BACAAN

Bencana tsunami merupakan bencana yang menimbulkan kerusakan dan kerugian terutama jika *magnitude* tsunami yang terjadi cukup besar. Hal ini dapat terjadi karena letak geografis Indonesia yang terletak pada tiga lempeng tektonik utama. Salah satu upaya mitigasi yang dapat dilakukan adalah membuat peta jalur evakuasi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan zona wilayah bahaya tsunami dan memberikan alternatif jalur evakuasi tsunami di Kota Toli-toli dengan skenario ketinggian tsunami 6 meter dan 10 meter dari garis pantai dengan persamaan Berryman dengan *tools cost distance*. Hasil dari penelitian ini berupa luasan wilayah yang terdampak tsunami untuk ketinggian tsunami 6 meter adalah 216,16 Ha sedangkan untuk ketinggian tsunami 10 meter adalah 401,45 Ha, dimana jumlah kelurahan yang terkena dampak tsunami sebanyak empat kelurahan. Kelurahan yang terkena dampak tsunami paling besar adalah Kelurahan Nalu (217,34 Ha). Hasil analisis jalur evakuasi tsunami menunjukkan waktu yang dibutuhkan dari daerah rawan ke zona aman ialah mencapai 22 menit dengan kecepatan evakuasi yang digunakan adalah *fast walk* (1,52 m/s). Adapun titik rekomendasi *shelter* untuk ketinggian tsunami 10 meter yang diperoleh sebanyak 6 titik.

Kata Kunci : *Cost Distance*, Jalur evakuasi tsunami, *Shelter*, Toli-toli, Tsunami

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala limpahan rahmat dan karunianya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "**Analisis Jalur Evakuasi Tsunami di Kota Toli-Toli**" yang merupakan syarat untuk mengerjakan tugas akhir dalam rangka menyelesaikan studi untuk mendapatkan gelar Sarjana di Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin.

Shalawat serta salam tak lupa kita kirimkan dan haturkan kepada junjungan kita Rasulullah Nabi Muhammad Shallallahu Alahi Wasallam, sebagai panutan terbaik yang pernah ada di muka bumi ini, yang mengukir peradaban islam dari alam kegelapan menuju alam yang terang benderang. Tak lupa pula kita kirimkan salam dan shalawat kepada keluarga beliau, istri-istri beliau serta orang-orang yang selalu istiqomah dijalannya hingga takdir Allah berlaku pada diri-diri mereka.

Skripsi ini disusun oleh penulis menggunakan bahasa yang sederhana diharapkan agar dapat bermanfaat bagi semua orang. Setiap kalimat yang tertuang dalam skripsi ini tak luput dari kekurangan serta kesalahan. Maka dari itu penulis sangat menerima segala bentuk saran dan kritikan yang membangun demi kebaikan skripsi ini kedepannya, dengan selesainya skripsi ini tak terlepas dari segala doa, bimbingan, arahan, serta bantuan dari beberapa pihak.

Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada orang-orang terkasih, tersayang dan tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan, serta bantuan baik secara

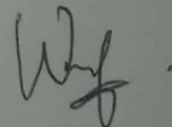
langsung maupun tidak langsung selama penulis menyusun skripsi ini. Terutama kepada kedua orang tua penulis yaitu kepada bapak penulis, Rismail yang tak pernah lelah selalu membimbing dan menyemangati, mengajarkan hal-hal yang baik, rela berkorban apapun demi mendukung cita-cita penulis, kepada mama tercinta Jusnawati yang selalu menemani, memberikan kehangatan, kebahagiaan dan menjadi pendengar setia untuk setiap keluhan penulis serta memberi semangat dan motivasi untuk penulis hingga sampai pada tahap ini. Oleh itu, untuk kedua orang tua penulis, semoga selalu diberi umur yang panjang, kesehatan dan rezeki yang melimpah, sehingga bisa menuntun anaknya menuju kesuksesan dan melangitkan doa-doa serta harapan-harapan yang baik untuk anaknya. Tiada hal yang dapat penulis balaskan selain ucapan terima kasih dari lubuk hati yang paling dalam atas segala dukungan lahiriah maupun batiniah yang diberikan kepada penulis. Semoga Allah SWT senantiasa memberikan Kesehatan dan perlindungan-Nya. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah Assegaf, M.Eng**, selaku Pembimbing Utama, Bapak **Muh. Fawzy Ismullah Massinai, S.Si., MT** selaku Pembimbing Pertama serta Bapak **Sofyan S.Si** selaku pembimbing kedua atas segala kebaikan dalam mendampingi penulis serta senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan saran kepada penulis selama penulis menyusun skripsi ini.
2. Bapak Alm. **Prof. Dr. Dadang Ahmad Surimiharja, M.Eng** dan **Dr. Sakka, M.Si**, selaku Dosen Penguji atas segala saran, masukan, serta ilmu yang diberikan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini;

3. Bapak **Hendrik Leopatty, S.Si, Kak Meriska, Kak Ana** dan **Kak Abdul** yang menemani penulis dan memberikan saran kepada penulis selama berada di Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Kelas I Palu.
4. Bapak **Sujabar, S.Si** selaku kepala BMKG Stasiun Geofisika Kelas I Palu yang telah mengizinkan penulis untuk melakukan penelitian tugas akhir.
5. Bapak **Dr. Muhammad Hamzah S., S.Si.,MT**, selaku Pembimbing Akademik yang banyak memberikan nasehat kepada penulis.
6. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, M.Si** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin, para Wakil Dekan dan beserta jajarannya.
7. Bapak dan Ibu Dosen Depaertemen Geofisika Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, nasihat yang senantiasa akan penulis ingat, serta pengalaman yang tak terlupakan selama penulis perkuliahan.
8. Teman seperjuangan TA Tsunami Palu yaitu **Fhauzia Suci Rahmadhani, Nur Annisa** dan **Siti Wahyuni M Wael** yang telah bersama dengan penulis selama pengerjaan skripsi ini.
9. Terkhusus kepada sahabat penulis, **Fatimah Rohma** yang selalu menyemangati penulis dan selalu ada buat penulis dikala susah maupun senang, terimakasih sudah menjadi tempat penulis dikala stress dengan perkuliahan, terimakasih sebanyak-banyaknya telah berdedikasi penuh dalam kehidupan kampus penulis.

10. Teman teman Geofisika 2018 khususnya kelas B yaitu **Jojo, Fhaika, Wilda, Dilla, Banne, Fhauzia, Dhea, Aini, dan Onding.**
11. Teman-teman **Fisika dan Geofisika 2018** yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu terima kasih telah menjadi teman sekaligus saudara penulis dari maba hingga saat ini.
12. Teman-teman se-MIPA 2018.
13. Terakhir, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada diri saya sendiri karena telah sabar dan berhasil melalui proses panjang perkuliahan hingga dapat menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih sudah bertahan hingga hari ini.

Makassar, 27 Mei 2022



Windy sari

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRACT	v
SARI BACAAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Ruang Lingkup.....	3
I.3 Rumusan Masalah.....	3
I.4 Tujuan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
II.1 Sejarah Tsunami di Toli-toli	5
II.2 Tsunami.....	5
II.3 Jalur Evakuasi	10
II.4 Titik Kumpul.....	13
II.5 Sistem Informasi Geografis	14
II.6 <i>Cost Distance</i>	16
II.7 <i>Tools Pedestrian Evacuation Analyst</i>	19
II.8 Pemodelan Genangan Tsunami.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
III.1 Lokasi Penelitian.....	27
III.2 Alat dan bahan Penelitian	27
III.3 Prosedur Penelitian	28
III.4 Bagan Alir Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
IV.1 Zona Bahaya Dan Tinggi Genangan Tsunami.....	31

IV.2 Analisis Waktu Evakuasi Tsunami	36
IV.2.1 Ketinggian tsunami 6 meter	36
IV.2.1.1 <i>Slow Walk</i>	36
IV.2.1.2 <i>Fast Walk</i>	37
IV.2.1.3 <i>Slow Run</i>	37
IV.2.1.4 <i>Fast Run</i>	38
IV.2.2 Ketinggian tsunami 10 meter	39
IV.2.2.1 <i>Slow Walk</i>	39
IV.2.2.2 <i>Fast Walk</i>	40
IV.2.2.3 <i>Slow Run</i>	41
IV.2.2.4 <i>Fast Run</i>	42
IV.3 Jalur Evakuasi Tsunami	43
IV.4 Titik Rekomendasi <i>Shelter</i>	45
BAB V PENUTUP	47
V.1 Kesimpulan	47
V.2 Saran	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Proses pencarian rute.....	18
Gambar 2. 2 Bobot yang mempengaruhi pencarian jarak.....	18
Gambar 2. 3 Perhitungan bobot sel tetangga dari sel asal.....	19
Gambar 2. 4 Diagram alur kerja <i>Tools Pedestrian Evacuation Analyst</i>	24
Gambar 3. 1 Peta lokasi penelitian.....	27
Gambar 3. 2 Bagan alir penelitian.....	30
Gambar 4. 1 Peta tinggi genangan tsunami 6 meter.....	33
Gambar 4. 2 Peta tinggi genangan tsunami 10 meter.....	34
Gambar 4. 3 Peta zona bahaya tsunami	35
Gambar 4. 4 Peta waktu evakuasi tsunami <i>slow walk</i> 6 meter.....	36
Gambar 4. 5 Peta waktu evakuasi tsunami <i>fast walk</i> 6 meter	37
Gambar 4. 6 Peta waktu evakuasi tsunami <i>slow run</i> 6 meter.....	38
Gambar 4. 7 Peta waktu evakuasi tsunami <i>fast run</i> 6 meter	39
Gambar 4. 8 Peta waktu evakuasi tsunami <i>slow walk</i> 10 meter.....	40
Gambar 4. 9 Peta waktu evakuasi tsunami <i>fast walk</i> 10 meter	41
Gambar 4. 10 Peta waktu evakuasi tsunami <i>slow run</i> 10 meter.....	42
Gambar 4. 11 Peta waktu evakuasi tsunami <i>fast run</i> 10 meter	43
Gambar 4. 12 Peta jalur evakuasi Kelurahan Nalu	44
Gambar 4. 13 Peta jalur evakuasi Kelurahan Sidoarjo, Panasakan dan Baru	45
Gambar 4. 14 Peta rekomendasi <i>shelter</i>	46

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Kecepatan Berjalan Kaki (Wood, 2014)	12
Tabel 2 Ketinggian tsunami maksimum di tepi pantai untuk periode ulang 500 tahun dan 2500 tahun (Horspool et al., 2013).....	25
Tabel 3 Nilai Koefisien Kekasaran (Ridwan dkk, 2014)	26
Tabel 4 Luas wilayah terdampak	32
Tabel 5 Titik rekomendasi <i>shelter</i>	46

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Kepulauan Indonesia merupakan salah satu wilayah dengan tatanan tektonik paling kompleks dan aktif di dunia. Interaksi kompleks antara tiga lempeng besar, yaitu Lempeng India-Australia, Pasifik, dan Eurasia telah mengakibatkan sebagian besar wilayah Indonesia menjadi wilayah yang rawan terhadap bencana geologi seperti gempa bumi dan tsunami. Tsunami bukanlah bencana baru dalam kehidupan masyarakat Indonesia. Sejak tahun 1600 sampai dengan tahun 2007, hampir 90% kejadian tsunami disebabkan oleh gempa bumi di laut, 9% diakibatkan oleh letusan gunung api dan 1% karena tanah longsor bawah laut. Dalam kurun waktu tersebut tercatat kurang lebih 172 tsunami telah terjadi di Indonesia dan 40% kejadian tsunami terjadi di kawasan timur Indonesia (BPBD, 2016).

Provinsi Sulawesi Tengah merupakan salah satu kawasan gempa bumi aktif di Indonesia. Salah satu daerah yang rawan dilanda bencana yaitu Toli-toli. Toli-toli merupakan salah satu kabupaten yang terletak di Sulawesi Tengah dengan luas wilayah 4079,76 km². Kabupaten Toli-toli berbatasan dengan Kabupaten Buol dan Laut Sulawesi di sebelah utara, Kabupaten Donggala di sebelah selatan, Selat Makassar di sebelah barat, dan Kabupaten Buol di sebelah timur. Kota Toli-toli yang merupakan Ibu kota Kabupaten Toli-toli terletak di Kecamatan Baolan. Kota Toli-toli terletak di dataran rendah berbatasan langsung dengan Teluk Tomini. Salah satu bencana tsunami pernah yang terjadi pada tahun 1996 dengan kekuatan gempa Mw 7,9 yang memicu tsunami dengan ketinggian 1,5 m dan menggenangi

daratan hingga sejauh 250 m. Selain itu, gempa bumi dan tsunami di Toli-toli ini menghancurkan sebanyak 386 rumah penduduk, fasilitas umum dan kantor pemerintahan (BMKG, 2018).

Salah satu upaya mitigasi yang dapat dilakukan untuk menghadapi ancaman dari bencana tsunami yakni pembuatan jalur evakuasi. Jalur evakuasi ini akan memudahkan masyarakat agar pada saat terjadi tsunami masyarakat dapat pergi ke tempat evakuasi dengan cepat. Untuk memperkecil kemungkinan jatuhnya korban jiwa, maka harus memperhatikan kondisi jalur yang ada seperti keamanan jalur, jarak tempuh jalur dan kelayakan jalur (Syam, 2016). Jalur evakuasi yang digunakan haruslah benar-benar aman serta jarak yang dipakai untuk evakuasi haruslah jarak yang memungkinkan untuk cepat sampai ke tempat yang aman dan jalur yang dipilih juga layak digunakan pada saat evakuasi sehingga tidak menghambat proses evakuasi (Yarianto, 2007).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis penentuan jalur evakuasi tsunami di Kota Toli-toli agar dapat meminimalisir jatuhnya korban jiwa yang besar. Pembuatan jalur evakuasi tsunami dibangun dengan memperhatikan zona bahaya dan zona aman yang diperoleh dengan menggunakan metode *cost distance*. Metode *cost distance* ini akan menganalisa jalur dan titik kumpul ke sumber terdekat bila terjadi tsunami di daerah tersebut. Metode ini juga digunakan oleh Alimsuardi et al. (2020) di kawasan pesisir pantai Kecamatan Carita dan Kecamatan Labuan Kabupaten Pandeglang; Qossam et al. (2020) di wilayah Kabupaten Serang; serta Setyawan dan Basuki (2021) di Kota Padang.

I.2 Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi pada pembuatan jalur evakuasi menggunakan *Tools Pedestrian Evacuation Analysis* sesuai dengan zona aman dan zona bahaya yang telah didapat dengan skenario ketinggian tsunami 6 m dan 10 m di Kota Toli-toli menggunakan metode *cost distance* serta *software* ArcGis 10.8. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang terdiri dari data DEM (DEMNAS, 2018), Tutupan lahan, dan Peta Rupa bumi Indonesia (BIG, 2013). Hasil yang diharapkan nantinya adalah peta zona bahaya dan tinggi genangan tsunami, peta waktu evakuasi tsunami, peta jalur evakuasi tsunami dan peta titik rekomendasi *shelter*.

I.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat dirumuskan masalah yang dikaji dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Berapa luasan wilayah zona bahaya dan tinggi genangan di Kota Toli-toli dengan asumsi ketinggian tsunami 6 meter dan 10 meter di garis pantai?
- b. Berapa waktu yang dibutuhkan masyarakat untuk mencapai zona aman dengan asumsi kecepatan 1,1 m/s, 1,52 m/s, 1,79 m/s dan 3,85 m/s di Kota Toli-toli?
- c. Bagaimana jalur evakuasi tsunami dan titik rekomendasi *shelter* apabila terjadi tsunami di Kota Toli-toli?

I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui luasan wilayah zona bahaya dan tinggi genangan di Kota Toli-toli dengan asumsi ketinggian tsunami 6 meter dan 10 meter di garis pantai.

- b. Membuat peta waktu evakuasi tsunami di Kota Toli-toli
- c. Membuat peta jalur evakuasi tsunami dan titik rekomendasi *shelter* di Kota Toli-toli.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Sejarah Tsunami di Toli-toli

Provinsi Sulawesi Tengah merupakan salah satu kawasan gempa bumi aktif di Indonesia. Hal ini tak dapat dipungkiri sebab secara tektonik, kawasan ini merupakan zona *triple-junction* atau pertemuan tiga lempeng, yaitu Lempeng Benua Indo-Australia dan Eurasia serta Lempeng Samudera Caroline-Pasifik. Kawasan ini sangat kompleks dan telah terbentuk dalam jutaan tahun yang lalu. Salah satu daerah yang sering dilanda bencana yaitu Toli-toli. Berdasarkan katalog gempa merusak BMKG tahun 2017 tercatat telah terjadi 26 kali gempa merusak di wilayah Sulawesi Tengah dari tahun 1821-2017 bahkan 3 diantaranya hingga membangkitkan gelombang tsunami (BMKG, 2019). Salah satunya terjadi pada tahun 1996 terjadi gempa berkekuatan Mw 7,9 yang memicu tsunami dengan ketinggian 1,5 m dan menggenangi daratan sejauh 250 m. Tsunami datang 5 menit setelah gempa, 9 orang meninggal dunia dan 63 luka-luka. Selain itu, gempabumi dan tsunami di Toli-toli ini menghancurkan sebanyak 386 rumah penduduk, fasilitas umum dan kantor pemerintahan (BMKG, 2018).

II.2 Tsunami

II.2.1 Pengertian Tsunami

Tsunami berasal dari bahasa Jepang “tsu” berarti lautan, “nami” berarti gelombang ombak. Tsunami adalah serangkaian gelombang ombak laut raksasa yang timbul karena adanya pergeseran di dasar laut akibat gempa bumi (Qossam et al., 2020). Menurut Bakornas PB (2007), Tsunami dapat diartikan sebagai gelombang laut

dengan periode panjang yang ditimbulkan oleh gangguan impulsif dari dasar laut. Gangguan *impulsive* tersebut bisa berupa gempa bumi tektonik, erupsi vulkanik atau longsor. Kecepatan tsunami bergantung pada kedalaman perairan, akibatnya gelombang tersebut mengalami percepatan atau perlambatan sesuai dengan bertambah atau berkurangnya kedalaman perairan, dengan proses ini arah pergerakan arah gelombang juga berubah dan energi gelombang bias menjadi terfokus atau juga menyebar, di perairan dalam tsunami mampu bergerak dengan kecepatan 500 sampai 1000 kilometer per jam sedangkan di perairan dangkal kecepatannya melambat hingga beberapa puluh kilometer per jam, demikian juga ketinggian tsunami juga bergantung pada kedalaman perairan. Amplitudo tsunami yang hanya memiliki ketinggian satu meter di perairan yang meninggi hingga puluhan meter di garis pantai (Puspito, 2010).

II.2.2 Mekanisme Tsunami

Sebagian besar tsunami yang terjadi di dunia disebabkan oleh pergeseran vertikal kerak bumi di dasar laut dalam yang berkaitan dengan gempa bumi tektonik lepas pantai. Perubahan dasar laut secara mendadak tersebut diikuti oleh perubahan tempat massa air laut secara mendadak pula, yang dapat menimbulkan gelombang air laut yang sangat panjang (dapat mencapai 800 km) dengan periode gelombang yang lama (dapat mencapai 60 menit). Gelombang tersebut menjalar dengan kecepatan yang sangat tinggi (dapat mencapai 800 km per jam) secara frontal dengan arah tegak lurus terhadap bidang pergeseran dasar laut, yang biasanya terjadi pada zona subduksi.

Setelah mengalami refraksi, defraksi, ataupun pendangkalan (*shoaling*), gelombang tsunami yang mencapai pantai dapat berubah menjadi gelombang pasang yang sangat tinggi sampai beberapa puluh meter di atas elevasi air pasang normal tertinggi. Elevasi muka air laut tertinggi yang dapat dicapai oleh tsunami yang *running up* ke pantai dikenal sebagai *run up elevation*, sedangkan elevasi terendah dikenal sebagai *drawdown elevation*. Gempa-gempa yang terjadi di lepas pantai banyak pula yang tidak menimbulkan tsunami, karena *magnitude*-nya yang kecil atau pusat gempanya yang cukup dalam.

II.2.3 Faktor – Faktor Penyebab Terjadinya Tsunami

Tsunami adalah sebuah bencana alam yang dahsyat. Tsunami merupakan gambaran ombak yang sangat besar yang menerjang hingga ke wilayah daratan. Tidak dapat dipungkiri bahwa bagian daratan yang terkena sapuan ombak akan luluh lantak karena kekuatan yang dimiliki oleh ombak tersebut. Pada saat terjadinya tsunami ini biasanya tidak bencana alam tunggal. Maksudnya, umumnya tsunami tidak datang sendiri dengan tiba-tiba. Namun biasanya ada yang menghantarkan, sehingga terjadilah tsunami tersebut. Beberapa peristiwa alam menjadi penyebab akan terjadinya bencana tsunami tersebut. Hal-hal yang dapat menyebabkan terjadinya tsunami antara lain adalah sebagai berikut:

a) Gempa bumi

Pada umumnya, tsunami yang terjadi di Indonesia disebabkan oleh gempa bumi tektonik. Hal ini dikarenakan secara geologis, Indonesia terletak di antara tiga lempeng besar yakni Lempeng Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik yang masing-masing bergerak relatif saling mendekat. Tumbukan yang terjadi antara

lempeng-lempeng tektonik ini menyebabkan terakumulasinya energi yang cukup besar. Jika sebagian lempeng tersebut patah, maka terlepaslah energi yang sangat besar. Energi ini yang dirasakan sebagai gempa. Mengingat posisi Indonesia yang sebagian besar wilayahnya adalah perairan, maka besar kemungkinan untuk gempa bumi terjadi di dasar laut, sehingga potensi untuk terjadinya tsunami juga menjadi cukup besar. Namun, tidak semua gempa bumi tektonik dapat berpotensi tsunami.

Tsunami akibat gempa bumi di bawah laut ini berawal dari adanya gerakan vertikal pada lempeng di dasar laut yang berupa sesar, sesar di dasar laut tersebut menyebabkan dasar laut naik dan mendorong volume air ke atas, kemudian gelombang dari bawah laut bergerak dengan kecepatan tinggi dan air laut terhisap dari bibir pantai, sehingga mengakibatkan munculnya gelombang raksasa yang bergerak menuju pantai.

Gelombang yang terbentuk akan merambat dengan kecepatan bisa mencapai ratusan kilometer per jam dari tengah samudra atau lautan, hingga akhirnya mendekat ke pesisir dan berubah menjadi gelombang tinggi berkecepatan rendah namun dengan daya rusak yang dahsyat, dapat menghantam dan menghancurkan bangunan, tanaman, dan apapun yang ada di depannya.

b) Letusan gunung berapi

Kawasan Indonesia menjadi area benturan antara Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara dan Lempeng Pasifik yang relatif ke arah barat. Itulah yang menyebabkan kepulauan Indonesia dihimpit oleh dua pergerakan, masing-masing ke arah utara dan ke arah barat. Kecepatan pergerakan itu mencapai 4-6

cm pertahun, maka lempeng yang bertabrakan tersebut menunjam tepat di tengah Kepulauan Indonesia dan memberikan kesempatan pada magma untuk naik persis di atas Nusantara dan membentuk banyak pulau yang dikelilingi lautan. Sementara di utara ada lempeng ketiga, yaitu Lempeng Eurasia yang menahan himpitan tersebut, sehingga membuat Indonesia berada dalam pertarungan tiga lempeng besar dunia. Akibat benturan ketiga lempeng tersebut, membuat retaknya beberapa bagian pada kerak bumi, selain menimbulkan panas, juga memproduksi batuan cair (magma). Melalui retakan-retakan tersebut yang bisa dikatakan sebagai bidang lemah, magma cair tersebut terdorong naik ke permukaan bumi dan membentuk kerucut-kerucut gunung api, hal itu yang disebut zona subduksi.

Karena Indonesia dikelilingi oleh gunung berapi di sepanjang zona subduksi, membuat Indonesia berpotensi besar untuk mengalami bencana tsunami yang disebabkan oleh letusan vulkanik gunung berapi. Letusan gunung berapi di bawah laut maupun di atas laut dapat menjadi penyebab tsunami. Hal ini yang menyebabkan terjadinya tsunami di Selat Sunda pada bulan Desember 2018 lalu, erupsi dari Gunung Anak Krakatau diduga menjadi penyebab air laut naik, sehingga terjadi tsunami.

c) Longsor di Bawah Laut

Di dasar laut, terdapat struktur permukaan bumi yang mirip dengan di daratan seperti bukit, lembah, dan cekungan yang bisa longsor. Longsor di bawah laut ini bisa disebabkan oleh gempa bumi tektonik atau letusan gunung di bawah laut.

Getaran kuat yang ditimbulkan oleh longsor kemudian bisa menyebabkan terjadinya tsunami.

II.3 Jalur Evakuasi

Jalur evakuasi adalah lintasan yang digunakan sebagai pemindahan langsung dan cepat dari orang-orang yang akan menjauh dari ancaman atau kejadian yang dapat membahayakan. Ada dua jenis evakuasi yang dapat dibedakan yaitu evakuasi skala kecil dan evakuasi skala besar. Contoh dari evakuasi skala kecil yaitu penyelamatan yang disebabkan karena ancaman bom atau kebakaran. Contoh dari evakuasi skala besar yaitu penyelamatan dari sebuah daerah karena banjir, letusan gunung berapi atau tsunami (Setyawan & Basuki, 2021).

Perencanaan jalur evakuasi adalah untuk mencari jalan tersingkat menuju daerah aman bagi masyarakat yang bertempat tinggal di daerah rawan bencana. Jalur evakuasi menggunakan akses jalan yang telah ada baik jalan raya maupun jalan lingkungan. Penataan jalur evakuasi disesuaikan dengan jumlah penduduk serta perkiraan kapasitas pengungsian wilayah tersebut. Jalur evakuasi bertujuan untuk meminimalkan korban jiwa. Jalur evakuasi pada lingkungan permukiman perlu dipertimbangkan karena merupakan suatu kavling atau blok lingkungan tertentu yang dapat dipetakan sesuai hirarki jalan yang ada pada kawasan perencanaan. Identifikasi yang dilakukan untuk jalur penyelamatan yaitu tersedianya jalur evakuasi yang baik dan aman, tata ruang yang berbasis bencana sudah harus menyiapkan tempat dan rute evakuasi jika terjadi bencana dan mempertimbangkan lokasi pengungsian. Pengaturan jalur evakuasi dan penempatan rambu diberlakukan merujuk pada ketentuan yang telah disepakati nasional maupun internasional.

Syarat-syarat dalam penentuan jalur evakuasi yaitu sebagai berikut (*Sea Defence Consultants, 2007*):

- a. Standar lebar jalan 6 m tetapi lebar jalan yang lebih kecil juga diperbolehkan pada situasi yang memerlukan kapasitas kecil yaitu 4 m
- b. Maksimum jarak jalur evakuasi 1 km digunakan untuk memaksimalkan waktu perjalanan.
- c. Wilayah yang mencakupi jalur evakuasi sebaiknya sesuai dengan kapasitas pengungsian
- d. Disarankan agar terdapat jalur pemisahan antara lalu lintas, pencampuran kendaraan bermotor dan pejalan kaki untuk mengurangi kapasitas
- e. Rute evakuasi yang melalui daerah evakuasi lain harus dihindari
- f. Rute pelarian diusahakan selurus mungkin untuk memperjelas arah jalan
- g. Rute pelarian hendaknya tidak melintasi jalan sibuk
- h. Titik kemacetan sebaiknya dihindari agar mencegah dari kemungkinan penyeberangan dan rintangan
- i. Rute pelarian ditandai dengan jelas

Pada bencana tsunami, proses evakuasi sendiri dapat berupa evakuasi horizontal menuju tempat yang lebih tinggi maupun evakuasi vertikal memanfaatkan gedung-gedung yang aman terhadap tsunami (BNPB, 2012). Dalam pembuatan jalur evakuasi tsunami perlu mengantisipasi jalur yang rawan terhadap genangan tsunami dan bahaya sekunder yang disebabkan oleh gempa, area yang perlu dihindari dalam jalur evakuasi yakni (Spahn et al., 2010):

- 1) Jembatan-jembatan yang bisa rapuh akibat gempa bumi, dan khususnya jembatan yang kemungkinan terkena aliran tsunami yang merambat dengan cepat melalui sungai-sungai,
- 2) Area-area yang rawan longsor serta reruntuhan bangunan tinggi dan rapuh,
- 3) Jalan-jalan yang terhadap tiang-tiang listrik serta area yang mempunyai gardu listrik,
- 4) Lokasi-lokasi industri yang dapat memicu bahaya sekunder akibat gempa dan tsunami seperti industri minyak dan gas, dan
- 5) Jalan-jalan yang dekat dengan sungai atau muara sungai.

Jalur evakuasi erat kaitannya dengan estimasi waktu tempuh yang dibutuhkan penduduk untuk menyelamatkan diri menuju titik evakuasi. Kecepatan pergerakan pengungsi adalah faktor kunci pada saat menjangkau *shelter*. Kondisi berjalan kaki dan rata-rata kecepatan berjalan saat evakuasi bencana seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Kecepatan Berjalan Kaki (Wood, 2014)

Nama kecepatan berjalan	Nilai kecepatan berjalan (m/s)
<i>Slow walk</i>	1,1
<i>Fast walk</i>	1,52
<i>Slow run</i>	1,79
<i>Fast run</i>	3,85

Waktu tempuh berkaitan dengan kecepatan orang untuk menjauhi daerah rawan bencana. Pembuatan jalur evakuasi harus dilengkapi dengan tempat atau titik evakuasi pengungsi. Titik evakuasi yang akan ditentukan harus dapat melayani dan

menampung sesuai dengan kebutuhan ruang terhadap pengungsi yang akan ditampung. Diperkirakan setiap orang akan membutuhkan ruang minimum 1,64 m sehingga daya tampung bangunan penyelamatan dapat dihitung dari luas lantai dibagi kebutuhan ruang minimal per orang.

II.4 Titik Kumpul

Titik kumpul (*Assembly Point*) adalah sebuah tempat atau lokasi yang digunakan oleh masyarakat untuk berkumpul jika terjadi sebuah bencana yang lokasinya paling aman dari bahaya (Wedagama, 2018). Titik Kumpul sebagian besar merupakan lapangan olah raga, sebagian kecil berupa area terbuka yang memungkinkan dilakukan kegiatan pengungsian seperti halaman kantor Kelurahan, sekolah atau tempat ibadah. Titik kumpul harus aman dari bahaya bencana.

Tempat evakuasi sementara atau TES adalah tempat perlindungan yang bersifat sementara karena adanya potensi intensitas ancaman dan sumber daya yang terbatas sedangkan tempat evakuasi akhir atau TEA merupakan lokasi akhir pengungsian yang memiliki fungsi sebagai tempat berkumpul masyarakat yang terpapar bencana pasca bencana dan tempat mendapatkan bantuan serta melakukan aktivitas hingga proses pemulihan. Wilayah dengan topografi perbukitan ruang terbuka di atas bukit dapat dijadikan tempat evakuasi sementara (TES), pada wilayah lain tempat evakuasi sementara (TES) dapat berupa bangunan swasta maupun fasilitas umum yang hanya difungsikan sebagai tempat evakuasi, kriteria bangunan sebagai tempat evakuasi sementara adalah sebagai berikut (BNPB, 2012):

- Bangunan tahan terhadap gempa bumi,

- Memiliki jumlah lantai yang cukup aman (lebih tinggi dari perkiraan tinggi tsunami), dan
- Dalam kondisi normal, bangunan tersebut berfungsi sebagai bangunan umum sehingga memenuhi aspek keberlanjutan.

Penentuan bangunan gedung sebagai *shelter* evakuasi bencana dilakukan melalui interpretasi citra satelit resolusi tinggi. Selanjutnya observasi lapangan diperlukan untuk menilai jenis bangunan tertentu yang diprediksi berpotensi sebagai bangunan *shelter* evakuasi, jenis tempat evakuasi dapat berupa (*Sea Defence Consoultans*, 2007):

- Bangunan berada pada zona aman dari bahaya bencana
- Bangunan umum yang memenuhi ketentuan sebagai bangunan penyelamatan (*escape building*) seperti perkantoran (pemerintah dan swasta), masjid, bank, hotel serta pasar swalayan.
- Memiliki kapasitas yang cukup untuk menampung pengungsi selama evakuasi

II.5 Sistem Informasi Geografis

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk menyimpan dan memanipulasi informasi geografis. SIG dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, serta menganalisis objek-objek dan fenomena- fenomena yang menentang lokasi geografis sebagai karakteristik yang penting atau kritis untuk dianalisis. Secara implementatif SIG merupakan sistem komputer yang memiliki empat kemampuan dalam menangani data yang bereferensi geografis yaitu masukan, keluaran, manajemen data (penyimpanan dan pemanggilan data), manipulasi data dan analisis.

Sistem informasi Geografi merupakan suatu sistem hasil pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak untuk tujuan pemetaan, sehingga fakta wilayah dapat disajikan dalam satu sistem berbasis komputer. Sistem informasi ini semua data yang ditampilkan bereferensi spasial (berkaitan dengan ruang/tempat/posisi absolut) demikian pula dengan data atributnya, karena yang membedakan sistem ini dengan sistem informasi lainnya terletak di aspek spasialnya (kaitan dengan ruang), semua data dapat dirujuk lokasinya di atas peta yang menjadi peta dasarnya. Ketelitian lokasi data ditentukan oleh sumber petanya dengan segala aspeknya antara lain skala, proyeksi, tahun pembuatan, saat pengambilan (untuk citra satelit), koreksi geometris dan lain sebagainya. Menurut Prahasta (2001) Sistem Informasi Geografis merupakan sistem yang berbasis komputer yang digunakan untuk menyimpan dan memanipulasi informasi-informasi geografi khususnya data spasial.

SIG merupakan suatu sistem informasi yang berbasis spasial, maka untuk dapat memberikan informasi yang akurat diperlukan data yang akurat, tepat waktu, berkesinambungan dan sesuai kebutuhan. Usaha untuk mendukung hal tersebut diperlukan peta dasar yang berupa peta terbaru, peta digital dan citra satelit sedangkan data atribut (berupa teks, tabel dan grafis), harus selalu diperbaharui sesuai dengan perubahan kondisi dan dikumpulkan dari sumber-sumber yang berkompeten. Salah satu unggulan pertama SIG terletak pada kemampuan untuk mendapatkan informasi-informasi yang tidak terprediksi sebelumnya. Penggunaan SIG terutama untuk pengelolaan sumberdaya alam, yang menyangkut perencanaan, pemanfaatan, dan pengendalian sumberdaya alam dan lingkungan hidup.

Secara umum SIG terdiri dari sub sistem berikut ini (Prahasta, 2001):

1. Data masukan (*input data*): Subsistem ini bertugas untuk mengumpulkan dan mempersiapkan data spasial dan atribut dari berbagai sumber. Subsistem ini pula yang bertanggung jawab dalam mengkonversi atau mentransformasikan format-format data aslinya ke dalam format yang dapat digunakan oleh SIG.
2. Data keluaran (*output data*): Subsistem ini menampilkan atau menghasilkan keluaran seluruh atau sebagian data baik dalam bentuk *softcopy* maupun dalam *hardcopy* seperti tabel, grafik, dan peta.
3. Data Manajemen: Subsistem ini mengorganisasikan baik data spasial maupun atribut ke dalam sebuah basis data sedemikian rupa sehingga mudah dipanggil, di *update*, dan di *edit*.
4. Data Manipulasi dan Analisis: Subsistem ini menentukan informasi-informasi yang dapat dihasilkan oleh SIG. Selain itu, Subsistem ini juga melakukan manipulasi dan pemodelan data untuk menghasilkan informasi yang diharapkan.

II.6 Cost Distance

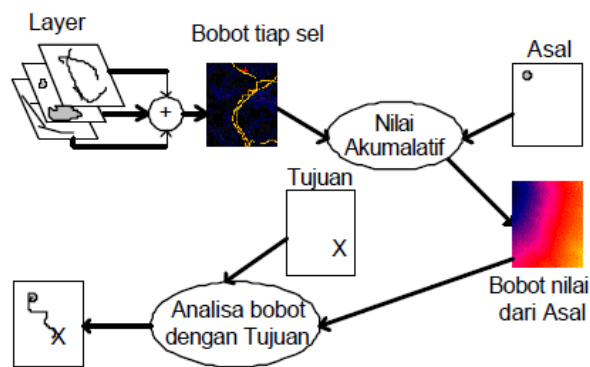
Cost Distance merupakan salah satu *tool* yang ada pada ArcGIS yang berfungsi untuk menghitung jarak biaya akumulatif terendah untuk setiap sel dari atau ke sumber dengan biaya terendah. Biaya/ *cost* merupakan suatu faktor yang harus diminimalis, karena biaya dalam hal ini adalah jarak yang didefinisikan sebagai nilai *raster* dan sebagai masukan dalam fungsi pembobotan jarak. *Cost distance* adalah cara utama untuk melakukan analisis jarak di ArcGIS *Spatial Analyst*. Fungsinya mengukur garis lurus jarak dari setiap sel ke sumber terdekat. Tidak hanya dapat menentukan lokasi, namun juga dapat menghitung jarak dan arah ke

sumber terdekat. Fungsi *cost distance* memodifikasi jarak *Euclidean* dengan menyamakan jarak dengan biaya untuk melakukan perjalanan melalui sel yang diberikan (Esri, 2019). Perhitungan jarak dapat dianalisis melalui perhitungan jarak lurus dari objek (*Euclidean distance*). *Euclidean distance* pada data *raster* dihitung dari pusat sel sumber ke pusat dari masing-masing sel-sel di sekitarnya. Perhitungan jarak adalah menggunakan jarak terpendek dengan pusat sel sumber. Perhitungan *Euclidean distance* merupakan perhitungan jarak sebenarnya dari suatu pusat sel ke sel lainnya. Perhitungan jarak selain menggunakan jarak sebenarnya juga dapat memperhitungkan jarak berdasar biaya perjalanan yaitu dengan perhitungan *cost distance*. Fungsi jarak pada *cost distance* tidak berdasar pada satuan unit geografis melainkan berdasar atas satuan biaya. Oleh karena itu perlu disusun peta unit biaya (*cost raster*) untuk melakukan perhitungan *cost distance*. *Cost raster* merupakan suatu peta satuan unit biaya yang didasarkan pada analisa kondisi wilayah. *Cost raster* dibuat dengan menggunakan peta penggunaan lahan dan kemiringan lereng. Hal ini berdasar atas pertimbangan bahwa dalam pembangunan jalan sangat dipengaruhi oleh faktor kemiringan lereng dan penggunaan lahan terkait dalam hal biaya. Mengingat perhitungan jarak terhadap jalan akan digunakan dalam pemodelan perubahan penggunaan lahan dan mengikutsertakan faktor kemiringan lereng juga maka perhitungan *cost distance* tidak digunakan (Rahayu et al., 2017). Input yang dibutuhkan adalah titik asal, titik tujuan serta grid bobot, yaitu grid dari hasil gabungan bobot-bobot dari faktor-faktor yang berpengaruh. Dari grid bobot dan titik tujuan, dicari *cost distance*, yaitu grid yang berisi nilai bobot akumulasi ke

tetangga terdekat sel asal. Perhitungan bobot akumulasi dilakukan dengan algoritma *euclidean*.

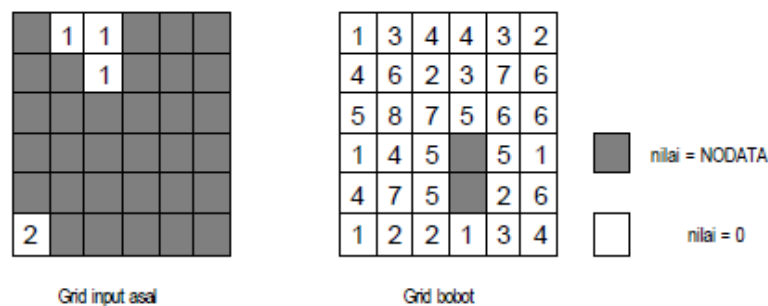
Hasil dari *cost distance* adalah bobot akumulasi dan *cost back link*, yaitu grid yang dapat digunakan untuk mengetahui rute ke asal. Tiap nilai menandakan dari sel tetangga mana dia berasal, sehingga dapat ditelusuri sel asalnya.

Dari *cost distance* dan titik asal, didapat *cost path*, yaitu rute bobot akan menunjukkan rute dengan bobot terkecil dari sel tujuan ke sel asal. Rute yang efisien akan mencari bobot akumulatif yang paling kecil.



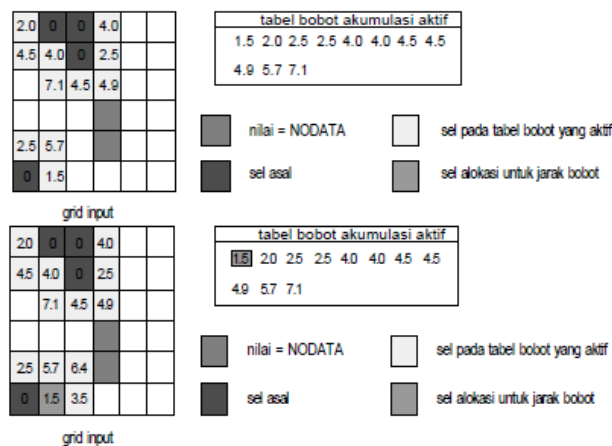
Gambar 2. 1 Proses pencarian rute

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.



Gambar 2. 2 Bobot yang mempengaruhi pencarian jarak

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*.



Gambar 2. 3 Perhitungan bobot sel tetangga dari sel asal

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.

Grid *cost distance* menentukan bobot akumulasi tiap sel ke sel tetangga terdekat yang ada pada kumpulan sel asal. Disini tidak diketahui sel asal mana yang dipilih atau bagaimana mencapai sel tersebut (Rostianingsih, 2001).

II.7 Tools Pedestrian Evacuation Analyst

Perangkat lunak *Pedestrian Evacuation Analyst* mengimplementasikan pendekatan jarak-jalur anisotropik ini untuk evakuasi pejalan kaki dari bahaya yang datang secara tiba-tiba, dengan fokus khusus saat ini pada ancaman tsunami lokal. Model tersebut memperkirakan potensi evakuasi berdasarkan ketinggian, arah pergerakan,

tutupan lahan, dan kecepatan perjalanan dan membuat peta yang menunjukkan waktu perjalanan menuju keselamatan (peta waktu) di seluruh zona bahaya. Hasil model memberikan pandangan umum dan statis dari lanskap evakuasi pada kecepatan perjalanan pejalan kaki yang berbeda dan dapat digunakan untuk mengidentifikasi area di luar jangkauan dataran tinggi yang terjadi secara alami. Selain itu, data tentang ukuran dan lokasi berbeda populasi yang dalam zona bahaya dapat diintegrasikan dengan peta waktu perjalanan untuk membuat tabel dan grafik jumlah populasi berisiko sebagai fungsi waktu perjalanan menuju keselamatan. Sebagai pendukung keputusan alat, *Pedestrian Evacuation Analyst* menyediakan kemampuan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai struktur evakuasi vertikal di dalam area studi, baik melalui peta waktu dari lanskap waktu perjalanan yang dimodelkan dengan struktur potensial di tempat dan melalui perbandingan jumlah populasi dalam jangkauan keselamatan.

Pedestrian Evacuation Analyst dirancang untuk digunakan oleh para peneliti yang memeriksa potensi evakuasi pejalan kaki dari komunitas berisiko. Di komunitas di mana waktu evakuasi yang dimodelkan melebihi waktu kedatangan peristiwa (misalnya, gelombang tsunami), peneliti dapat menggunakan perangkat lunak dengan manajer darurat untuk menilai area dan populasi yang dilayani oleh opsi evakuasi vertikal potensial. Dengan mengotomatisasi dan mengelola proses pemodelan, perangkat lunak memungkinkan peneliti untuk memusatkan upaya pada penyediaan informasi penting dan tepat waktu tentang kerentanan masyarakat terhadap bahaya yang muncul secara tiba-tiba.

Pedestrian Evacuation Analyst membantu peneliti dengan menyederhanakan tugas mengelola data dan *file* hasil yang terkait dengan berbagai skenario pemrosesan. Perangkat lunak ini menggunakan konsep portofolio untuk merujuk pada pengelompokan logis dari *file* terkait dan menyimpan nama yang terkait dengan skenario pemrosesan, jalur *folder*, dan jalur *file* dalam *database*. Alur kerja yang baik dapat dimulai dengan membuat portofolio untuk setiap bidang studi. Gunakan manajer portofolio untuk memulai portofolio baru dalam *database*, mengatur portofolio untuk digunakan, mengedit atau menghapus portofolio yang telah dibuat, atau hanya memverifikasi pengaturan untuk portofolio tertentu.

Perangkat lunak *Pedestrian Evacuation Analyst* dikembangkan untuk membantu para peneliti mempelajari pejalan kaki, evakuasi mandiri dari bahaya yang muncul secara tiba-tiba, seperti tsunami lokal, aliran puing, lahar (aliran lumpur vulkanik), dan banjir bandang. Analisis terperinci tentang potensi evakuasi membutuhkan sejumlah besar data beresolusi tinggi dan beberapa langkah pemrosesan. Perangkat lunak membantu peneliti dengan mengelola *file* data dan menyediakan jalur yang teratur melalui pemrosesan. Beberapa operasi *geoprocessing* diotomatisasi menjadi langkah-langkah sesedikit mungkin untuk membebaskan waktu peneliti untuk analisis lebih lanjut. Selain itu, alat bantu grafik dalam (1) visualisasi hasil dengan menampilkan grafik populasi berisiko menurut waktu perjalanan dan (2) pendukung keputusan melalui perbandingan opsi evakuasi vertikal.

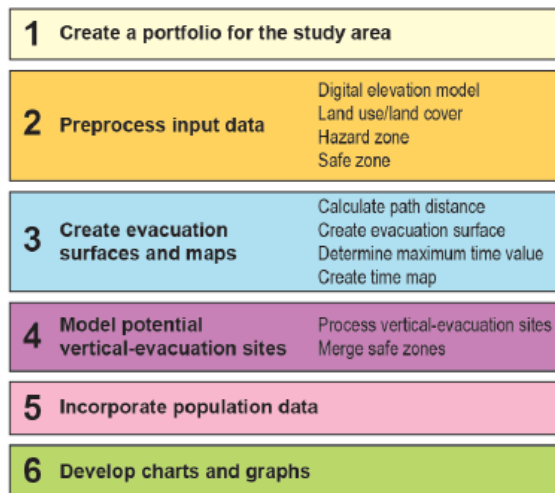
Tujuannya adalah untuk menyediakan alat penelitian untuk analisis eksplorasi potensi evakuasi di lanskap. Hasil dimaksudkan untuk memulai diskusi pengurangan risiko dan kesiapsiagaan dalam masyarakat dan tidak berfungsi

sebagai pernyataan definitif tentang potensi kematian dari skenario bahaya tertentu. Pertama, pemodelan LCD (*Least Cost Distance*) yang dijelaskan dalam laporan ini didasarkan pada rute optimal melintasi lanskap terbuka yang ditentukan oleh hubungan matematis yang berkaitan dengan kemiringan, tutupan lahan, dan pergerakan. Jalur evakuasi sebenarnya yang diambil oleh individu yang berisiko dapat berbeda secara substansial dari rute yang dimodelkan. Kedua, pemodelan mengasumsikan kecepatan perjalanan tertentu yang mungkin atau mungkin tidak akurat mengingat karakteristik individu atau lingkungan mereka (misalnya, evakuasi selama badai hujan pagi versus satu saat langit malam tak berawan). Ketiga, pemodelan waktu perjalanan ke zona aman didasarkan pada skenario bahaya tertentu. Oleh karena itu, zona aman aktual selama suatu peristiwa mungkin berbeda dari zona aman yang diproduksi model berdasarkan skenario atau asumsi tertentu.

Pedestrian Evacuation Analyst dimaksudkan untuk 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 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, serta grafik dan bagan populasi sebagai fungsi waktu

perjalanan, dan (5) menentukan area dan populasi yang dilayani oleh opsi evakuasi vertikal potensial.

Perangkat lunak diinstal dengan *tools* yang berisi ikon untuk setiap langkah pemrosesan yang dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pengguna memulai perangkat lunak dengan membuat atau memilih portofolio sebagai wadah untuk skenario (langkah 1). Langkah kedua melibatkan *preprocessing digital-elevation-model* (DEM), *land-use/land-cover* (LULC), dan data zona bahaya untuk digunakan dalam model evakuasi. Pengguna dapat memvalidasi zona aman yang dikembangkan oleh perangkat lunak dan berdasarkan zona bahaya, untuk memastikan tidak ada *sliver* yang salah di lapisan (misalnya, karena celah yang tidak disengaja dalam poligon bahaya). Setelah semua pra-pemrosesan selesai, langkah ketiga melibatkan beberapa tugas untuk menghitung permukaan jalur, membuat permukaan waktu evakuasi, dan menghasilkan peta waktu. Analisis dapat berhenti pada titik ini, atau pengguna juga dapat memilih ikon evakuasi vertikal (VE) untuk membuat peta waktu untuk opsi evakuasi vertikal (langkah 4). Langkah selanjutnya melibatkan pembuatan tabel dengan jumlah populasi pada waktu perjalanan yang berbeda untuk keselamatan (langkah 5) atau membuat bagan dan grafik dari data populasi yang terpapar (langkah 6). *Toolbar* memungkinkan pengguna untuk mengunjungi kembali langkah sebelumnya dan menjalankan kembali dengan parameter baru (Wood, 2014).



Gambar 2. 4 Diagram alur kerja *Tools Pedestrian Evacuation Analyst*

II.8 Pemodelan Genangan Tsunami

Penggenangan (*inundation*) didefinisikan sebagai *maximum horizontal penetration of the tsunami from the shoreline*, sehingga dapat diartikan sebagai jarak horizontal antara tempat yang tertutup air sebagai akibat penjalaran gelombang tsunami di sepanjang daratan terhadap titik acuan tertentu yang umumnya berupa garis pantai. Penggenangan maksimum umumnya diukur dari jarak horizontal penetrasi maksimum gelombang tsunami ke wilayah daratan hingga masing-masing garis pantai yang dilanda tsunami (Pertiwi et al., 2018).

Genangan ataupun inundasi tsunami di daerah pesisir pantai dimodelkan dengan menggunakan model penurunan tinggi muka gelombang tsunami ketika mencapai daratan, persamaan yang digunakan adalah dengan menggunakan metode Hloss oleh Berryman (2006). Metode Hloss merupakan metode pemodelan genangan berdasarkan ketinggian gelombang dari garis pantai, kemiringan lereng, dan koefisien kekasaran permukaan (Alimsuardi et al., 2020).

Pemodelan *run-up* tsunami dilakukan dengan bantuan *tools cost distance*. Ketinggian tsunami yang digunakan pada penelitian ini adalah 6 meter dan 10 meter mengikuti ketinggian maksimum di tepi pantai untuk periode ulang 500 tahun dan 2500 tahun dalam buku *A National Tsunami Hazard Assessment for Indonesia* (Horspool et al., 2013), yang dapat dilihat pada Tabel 2 di bawah. Tabel tersebut memperlihatkan wilayah di sekitar Kabupaten Toli-toli yang berpotensi terjadi tsunami dan berapa ketinggian tsunami yang dapat terjadi selama periode ulang tahun tersebut.

Tabel 2 Ketinggian tsunami maksimum di tepi pantai untuk periode ulang 500 tahun dan 2500 tahun (Horspool et al., 2013).

No	Kabupaten/ Kota	Ketinggian tsunami maksimum (m) untuk:	
		Periode ulang 500 tahun	Periode ulang 2500 tahun
1.	Buol	6,7	10,4
2.	Toli-toli	5,7	9,5
3.	Palu	3,0	5,9
4.	Donggala	3,0	6,0

Parameter yang digunakan adalah data kelerengan lahan yang diturunkan dari data DEMNAS BIG dengan resolusi spasial $0,27\text{-arcsecond}$ ($\pm 8,1$ meter) dan koefisien kekasaran permukaan lahan berdasarkan data penggunaan lahan eksisting dengan menggunakan persamaan Berryman, seperti berikut ini (Setyawan & Basuki, 2021):

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

H_{loss} = kehilangan ketinggian tsunami untuk 1 m jarak rambatannya

H_0 = Ketinggian awal tsunami di garis pantai (m)

n = koefisien kekasaran permukaan

S = *Slope*/ kemiringan lereng (°)

Jenis tutupan lahan diterjemahkan menjadi sebuah koefisien kekasaran permukaan yang menggambarkan kenampakan tutupan lahan. Setiap nilai koefisien kekasaran permukaan memiliki nilai yang beragam, tergantung dari jenis tutupan lahannya. Berikut merupakan tabel nilai koefisien kekasaran permukaan yang dapat dilihat pada Tabel 3 Koefisien kekasaran ini mengacu pada pedoman pembuatan peta ancaman tsunami yang dibuat oleh Tim Bimtek PRB (Ridwan dkk., 2014) dengan tutupan lahan yang ada.

Tabel 3 Nilai Koefisien Kekasaran (Ridwan dkk, 2014)

Jenis Penutupan / Penggunaan Lahan	Nilai Koefisien Kekasaran
Badan Air	0,007
Belukar / Semak	0,040
Hutan	0,070
Perkebunan	0,035
Lahan Kosong	0,015
Lahan pertanian	0,025
Pemukiman	0,045
Mangrove	0,025
Tambak / empang	0,010