

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Selat Makassar merupakan jalur laut strategis di Indonesia yang memegang peranan penting dalam dinamika oseanografi dan geologi regional. Wilayah ini dipengaruhi oleh *arus Indonesian Throughflow* (ITF), yaitu aliran laut dari Samudra Pasifik ke Samudra Hindia yang mengangkut sedimen dalam jumlah besar. Proses ini memengaruhi pembentukan geomorfologi pesisir dan bentang alam dasar laut (Surono, 2013). Sedimentasi yang terus berlangsung di Selat Makassar menyebabkan dinamika geologi yang kompleks, terutama pada lereng dasar laut yang rentan terhadap ketidakstabilan sedimen, sehingga meningkatkan risiko terjadinya longsoran bawah laut (*submarine landslide*).

Tsunami akibat longsoran bawah laut memiliki karakteristik unik, yakni kedatangan gelombang yang sangat cepat dengan ketinggian hingga 10 meter. Dampaknya cenderung bersifat lokal dibanding tsunami tektonik. Fenomena ini terobservasi dalam berbagai peristiwa, misalnya tsunami Papua Nugini 1998 yang menghasilkan gelombang setinggi 15 meter dalam waktu 20 menit karena longsoran pasca-gempa bumi. Contoh lain adalah tsunami Nice 1979, yang dipicu faktor geoteknik dan antropogenik dengan gelombang setinggi 3 meter. Tsunami Palu 2018 juga mencatat gelombang 10 meter akibat kombinasi gempa dan longsoran sedimen di Teluk Palu (Heidarzadeh & Mulia, 2023; Sepúlveda et al., 2020). Kejadian-kejadian ini menegaskan bahwa tsunami yang disebabkan oleh longsoran bawah laut merupakan ancaman serius, terutama di wilayah pesisir Indonesia.

Longsoran pada lereng benua yang disebabkan oleh ketidakstabilan sedimen dapat memicu tsunami, dan proses ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti akumulasi sedimen yang berlebihan, aktivitas seismik dan vulkanik, peledakan bawah laut, serta efek perubahan iklim yang menyebabkan kenaikan permukaan air laut (Dan et al., 2007; Diani et al., 2024; Harbitz et al., 2014; Sun & Leslie, 2020). Di Selat Makassar, terdapat endapan sedimen *mass-transport complex* (MTC) bernama Haya yang terdeteksi melalui metode seismik refleksi. Material dari Haya ini bersifat tidak stabil dan rentan bergeser, sehingga memiliki potensi memicu tsunami (Diani et al., 2024; Nugraha et al., 2020). Walaupun demikian, studi kuantitatif tentang karakteristik penalaran gelombang tsunami akibat longsoran Haya dan dampaknya terhadap wilayah pesisir masih sangat terbatas.

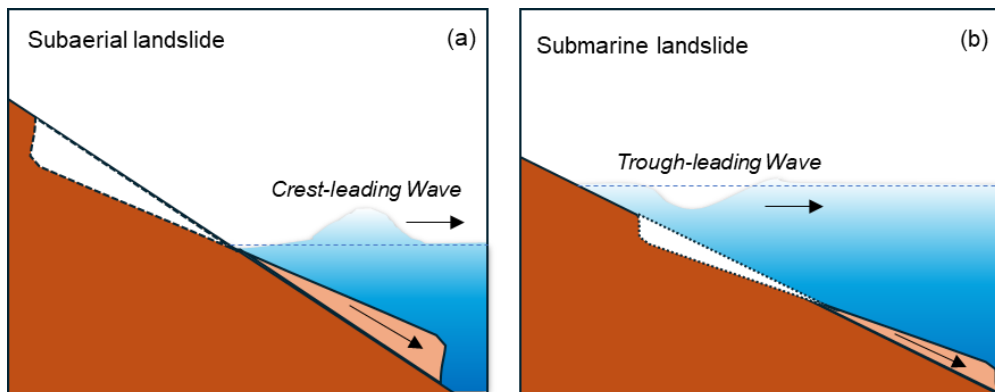
Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik penalaran gelombang tsunami yang dihasilkan oleh longsoran bawah laut di Selat Makassar, khususnya dari longsoran Haya, dengan menggunakan pendekatan numerik berbasis *shallow water equation* (SWE). Melalui penelitian ini, diharapkan akan diperoleh dasar ilmiah yang dapat meningkatkan pemahaman dan membantu pengelolaan risiko bencana

tsunami non-tektonik di wilayah tersebut, serta mendukung upaya mitigasi dan perencanaan kebencanaan yang lebih efektif.

## 1.2 Teori Dasar

### 1.2.1 Tsunami Akibat Longsoran Bawah Laut

Tsunami akibat longsoran dapat diklasifikasikan berdasarkan lokasinya menjadi *subaerial landslide* dan *submarine landslide*. Mekanisme pembangkitan gelombang dari kedua jenis ini memiliki perbedaan fundamental, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 1. Longsoran *subaerial* terjadi di daratan, di mana material longsor bergerak masuk ke dalam air dan mendorong massa air untuk menghasilkan gelombang. Sebaliknya, *submarine landslide* terjadi sepenuhnya di dasar laut, umumnya di lereng benua, sisi pulau, atau delta bawah laut. Perpindahan massa di bawah air ini memiliki dinamika yang lebih kompleks, di mana massa padat dapat bertransformasi menjadi aliran sedimen melalui proses seperti *hydroplaning* dan retrogresi, sehingga menghasilkan gelombang yang sering kali diawali dengan penurunan muka air laut (*trough-leading wave*).



**Gambar 1** Mekanisme pembangkit tsunami akibat (a) *Subaerial* dan (b) *Submarine landslides* (Paris et al., 2014)

Faktor-faktor pemicu longsoran sangat beragam. Dari sisi geodinamik, ketidakstabilan lereng akibat pemuatan sedimen berlebihan, aktivitas seismik, dan vulkanik berperan penting. Selain itu, faktor antropogenik seperti ledakan bawah air dan kegagalan struktur buatan manusia juga signifikan (Gumbira et al., 2021; Harbitz et al., 2014; Dan et al., 2007; Sun & Leslie, 2020). Secara keseluruhan, *submarine landslide* memiliki potensi tsunamigenik yang lebih besar dibandingkan *subaerial landslide*. Hal ini disebabkan oleh volume material longsor yang umumnya lebih masif, kecepatan perpindahan sedimen yang tinggi, serta pengaruh langsung pergerakannya terhadap seluruh kolom air di atasnya. Mengingat kompleksitas ini, model numerik berbasis *shallow water equation* (SWE) umum digunakan untuk mensimulasikan dinamika longsoran dan gelombang tsunami yang dihasilkannya,

dengan mempertimbangkan perbedaan karakteristik fisik antara kedua jenis longsoran tersebut (Harbitz et al., 2014; Sabeti & Heidarzadeh, 2022; Yavari-Ramshe & Ataie-Ashtiani, 2016).

1.2.2 Penelitian Terdahulu

Beberapa peneliti juga telah melakukan studi terkait tsunami yang pernah terjadi dengan tujuan memahami penyebab terjadinya melalui pemodelan numerik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa longsoran bawah laut (*submarine landslide*) dapat menghasilkan tsunami dengan ketinggian lebih dari 5 meter. Beberapa penelitian tersebut dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian terdahulu mengenai pemodelan tsunami berbasis numerik

| Lokasi Penelitian         | Metode Penelitian                                                                                                          | Hasil Penelitian                                                                                                                  |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tsunami Aleutian 1946     | Pemodelan numerik menggunakan PL-SWE dan COMCOT untuk simulasi gelombang impuls longsoran                                  | Model PL-SWE dengan COMCOT lebih akurat untuk simulasi tsunami akibat longsoran skala besar (Zhang et al., 2024).                 |
| Teluk Palu, Indonesia     | Simulasi tsunami dengan hipotesis longsoran bawah laut, menggunakan pendekatan numerik SWE                                 | Longsoran di Teluk Palu mencatat data tsunami, menunjukkan peran signifikan longsoran (Sepúlveda et al., 2020).                   |
| Aitape, Papua Nugini      | Simulasi tsunami menggunakan COMCOT dengan skenario longsoran bawah laut.                                                  | Longsoran bawah laut menghasilkan simulasi tsunami paling sesuai dengan kejadian nyata (Qonita et al., 2024).                     |
| Teluk Palu, Indonesia     | Pemodelan numerik dengan sumber gempa dan longsoran, berdasarkan survei batimetri                                          | Model gabungan gempa dan longsoran mencatat hasil observasi tsunami dengan baik (Heidarzadeh & Mulia, 2023)                       |
| Selat Makassar, Indonesia | Pemodelan numerik menggunakan NHWAVE (pembangkitan gelombang) dan FUNWAVE, dengan skenario longsoran 5–200 km <sup>3</sup> | Ketinggian gelombang 1,5 m di Palu-Bangkir, run-up hingga 7,5 m. Dampak meningkat dengan volume longsoran (Gumbira et al., 2021). |
| Teluk Benggala, India     | Simulasi tsunami menggunakan COMCOT dengan pendekatan <i>leap-frog finite difference</i>                                   | Gelombang tsunami 0,2–6,5 m dihasilkan oleh longsoran 1,2–7,51 km <sup>3</sup> (Begum et al., 2025).                              |

Sumber: Berbagai sumber (lihat referensi di dalam tabel)

Penelitian-penelitian tersebut menunjukkan bahwa pemodelan numerik berbasis persamaan gelombang dangkal atau *Shallow Water Equations* (SWE)

efektif untuk memahami dinamika tsunami yang dihasilkan oleh longsor bawah laut. Namun demikian, penelitian khusus mengenai longsor Haya di Selat Makassar masih terbatas, terutama dalam hal analisis kuantitatif mengenai karakteristik penjalaran gelombang tsunami dan potensi area terdampak di wilayah pesisir.

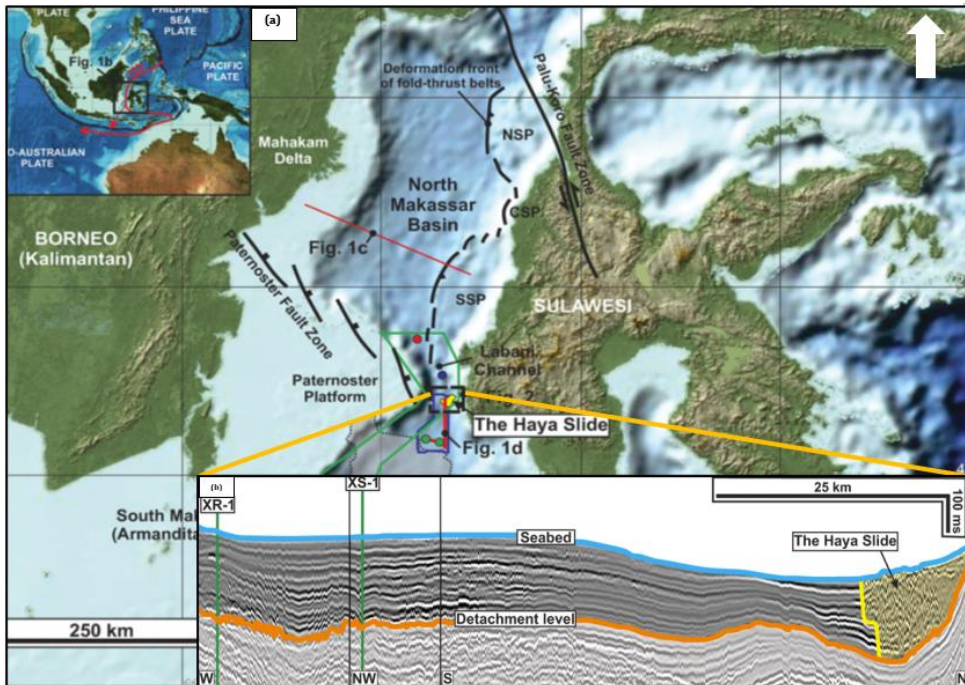
### 1.2.3 Geologi Regional Longsor Haya

Selat Makassar terletak pada zona pertemuan empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Laut Filipina, dan Lempeng Pasifik. Interaksi antar lempeng ini menyebabkan tingginya aktivitas seismik, sehingga wilayah ini sangat aktif secara tektonik. Proses-proses geologi seperti pengangkatan kerak bumi (*uplift* tektonik) akibat tekanan lempeng, akumulasi sedimen yang cepat, serta kemiringan lereng benua yang curam menciptakan kondisi yang mendukung terjadinya longsor bawah laut (*submarine slope failure*).

Akumulasi sedimen dipengaruhi oleh Arus Lintas Indonesia, disebut *Indonesian Throughflow* (ITF), yaitu aliran laut yang kuat dari Samudra Pasifik menuju Samudra Hindia melalui perairan Indonesia, termasuk Selat Makassar. Arus ini mengangkut sedimen dalam jumlah besar dari sungai dan erosi pesisir, kemudian mendepositkannya di dasar laut, sehingga membentuk tumpukan sedimen yang tidak stabil. Lereng benua yang curam memperbesar risiko longsor karena sedimen mudah tergelincir akibat gaya gravitasi.

Fenomena geologi penting di Selat Makassar adalah potensi tsunami akibat longsor endapan sedimen masif dalam mass-transport complex (MTC) bernama Haya. Lokasi dan distribusinya dapat dilihat pada Gambar 2, yang memperlihatkan area berwarna kuning di bagian barat Selat Makassar. Endapan Haya terbentuk akibat longsor yang terjadi pada sisi selatan struktur geologi berupa antiklin (lipatan cembung ke atas) di lepas pantai Selat Makassar. Longsor ini menghasilkan aliran material sedimen ke arah barat daya, membentuk endapan longsor massal atau *mass-transport deposit* (MTD). Proses ini dipicu oleh ketidakstabilan lereng dasar laut yang kemungkinan diperparah oleh aktivitas gempa bumi di wilayah tersebut. Analisis data seismik 3D mengungkapkan struktur geologi yang kompleks di wilayah Longsor Haya. Struktur tersebut meliputi:

1. *fold-and-thrust belt*, yaitu zona di mana lapisan batuan mengalami pelipatan dan sesar naik (*thrust fault*) akibat gaya kompresi tektonik;
2. *pop-up blocks*, yaitu blok batuan yang terangkat akibat tekanan dari dua bidang sesar naik yang berlawanan arah;
3. Kombinasi sesar naik (*thrust fault*) dan *backthrust*, yaitu sesar naik dengan arah gerak berlawanan sebagai respons terhadap deformasi kompleks.



**Gambar 2** Wilayah yang berwarna kuning merupakan endapan *mass-transport complex* (MTC) yang disebut Haya (Nugraha et al., 2020).

Struktur ini mengalami pemendekan 8–14% akibat tekanan lempeng, meningkatkan ketidakstabilan lereng dasar laut. Pergerakan material longsoran bervariasi: di tenggara, topografi dasar laut dan struktur geologi lokal menghambat pergerakan, sedangkan di barat laut, material menyebar luas karena lereng curam dan sesar yang lebih dalam. Longsoran Haya berpotensi memicu tsunami, terutama jika terjadi runtuh massal cepat. Di bagian barat, sedimen membentuk struktur penyebaran bebas, mengalir tanpa hambatan topografi, meningkatkan risiko runtuh lanjutan dan gelombang tsunami besar. Ketidakstabilan sedimen ini juga mengancam stabilitas dasar laut dan wilayah pesisir di Selat Makassar. Pemantauan aktivitas tektonik dan dinamika longsoran sangat penting untuk mitigasi risiko bencana tsunami (Armandita, Cipi; Morlye, C.K; Rowell, 2015; Gumbira et al., 2023; Nugraha et al., 2020).

## BAB II

### METODE PENELITIAN

#### 2.1 Analisis Geometri Longsoran Haya

Berdasarkan penelitian Nugraha et al. (2020), longsoran Haya terletak di Selat Makassar pada koordinat  $3^{\circ}17'54''$ – $3^{\circ}9'24''$  LS dan  $118^{\circ}33'24''$ – $118^{\circ}43'12''$  BT. Wilayah ini memiliki struktur geologis yang kompleks, mengindikasikan keberadaan *mass-transport complex* (MTC), yaitu endapan sedimen besar yang berpotensi mengalami kelongsoran akibat gangguan seperti gempa bumi. Struktur ini terdiri dari lapisan sedimen tidak stabil di dasar laut yang dapat terpicu bergerak oleh aktivitas tektonik di Selat Makassar, sebuah wilayah dengan aktivitas seismik tinggi. Oleh karena itu, longsoran Haya memiliki potensi untuk menghasilkan tsunami yang mengancam pesisir Sulawesi dan Kalimantan (Nugraha et al., 2020; ten Brink et al., 2014).

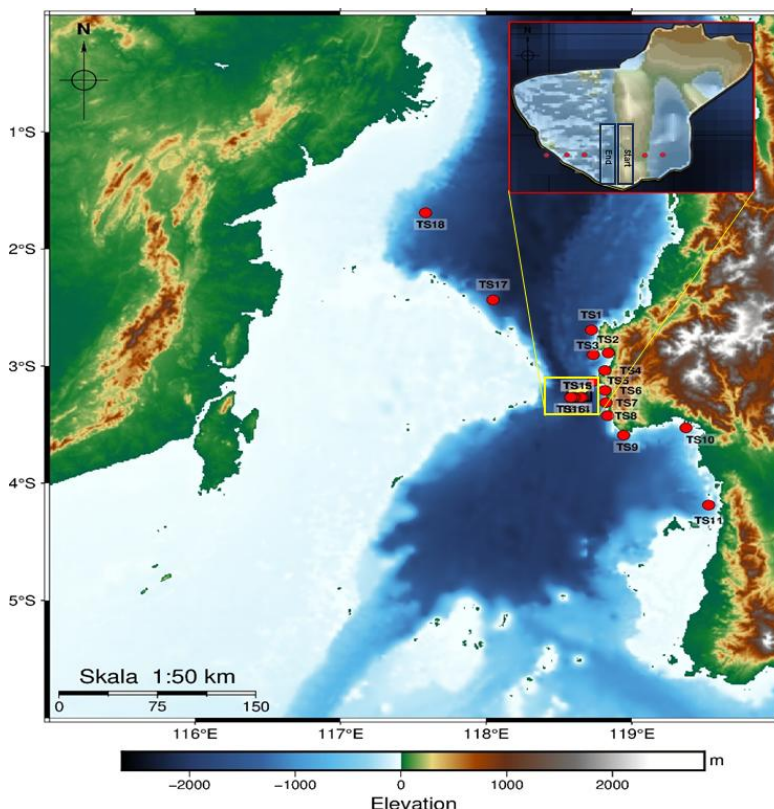
Dalam penelitian ini, hanya sebagian kecil wilayah Haya yang dimodelkan, khususnya bagian dengan perbedaan elevasi signifikan di atas 100 meter, yaitu endapan sedimen yang berisiko longsor akibat getaran besar seperti gempa bumi. Kemiringan lereng endapan ini dihitung sebesar  $4,4^{\circ}$ , berdasarkan perbedaan elevasi ( $\Delta h$ ) sebesar 80,64 meter yang diperoleh dari rata-rata batimetri area penelitian dan jarak horizontal ( $\Delta d$ ) sebesar 1050 meter di lintasan longsoran. Kemiringan lereng dihitung dengan rumus:

$$Slope = \arctan\left(\frac{\Delta h}{\Delta d}\right) \quad (2.1)$$

Kemiringan sekitar  $4,4^{\circ}$  ini menunjukkan bahwa endapan sedimen memiliki kecenderungan longsor, terutama saat dipicu aktivitas seismik. Gempa bumi dapat menurunkan kekuatan geser sedimen atau memicu likuifaksi, sehingga meningkatkan potensi kelongsoran (ten Brink et al., 2014). Oleh sebab itu, dalam simulasi tsunami, kemiringan lereng ini menjadi parameter penting untuk merepresentasikan kondisi longsoran yang dipicu gempa, yang akan menyebabkan deformasi dasar laut dan pembangkitan gelombang tsunami (Nugraha et al., 2020).

Pemodelan tsunami menggunakan data batimetri resolusi tinggi dari sumber global seperti *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO). Fokus pemodelan hanya pada zona Haya dengan variasi elevasi dan kemiringan lereng yang berpotensi longsor. Arah pergerakan longsoran dimodelkan ke barat daya, mengikuti kecenderungan alami pergerakan massa sedimen akibat gaya gravitasi dan konfigurasi topografi dasar laut. Arah lain, misalnya timur laut atau utara, tidak dipilih karena terhalang oleh bagian batimetri seperti punggung dan elevasi dasar laut yang berperan sebagai penghalang alami bagi pergerakan material sedimen.

Stasiun pasang surut atau tide station yang berjumlah 18 TS ditempatkan di beberapa tempat untuk memantau dinamika gelombang tsunami yang dihasilkan, *Tide Stations* (TS) tersebut ditempatkan di sekitar sumber longsor, serta di pesisir Sulawesi dan Kalimantan yang memiliki wilayah padat penduduk dan berpotensi terkena dampak tsunami. Stasiun-stasiun ini berfungsi merekam ketinggian muka air dan menganalisis potensi dampak gelombang tsunami (lihat Gambar 3).



**Gambar 3** Peta lokasi penelitian

## 2.2 Simulasi Potensi Tsunami Haya di Selat Makassar

Aplikasi simulasi tsunami akibat longsor Haya menggunakan model COMCOT dipilih karena keunggulan efisiensi komputasi dan akurasi dalam merepresentasikan deformasi dasar laut yang memicu tsunami. Model ini juga telah diakui dan banyak digunakan dalam studi tsunami terkini. COMCOT merupakan model hidrodinamika yang dikembangkan oleh Prof. Philip L.-F. Liu dan tim dari Cornell University pada tahun 1998, disempurnakan oleh Wang (2009). Simulasi penelitian ini dijalankan dengan menggunakan persamaan *shallow water equations* (SWE) linear dalam sistem koordinat bola (*spherical coordinate system*), sesuai untuk memodelkan propagasi gelombang tsunami skala besar di perairan dangkal. Sistem ini mempertimbangkan kelengkungan bumi dan gaya Coriolis. Adapun persamaan SWE linear adalah sebagai berikut:

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = 0 \quad (2.3)$$

Dimana:

- $\eta$  = elevasi permukaan air (m)
- $\varphi, \psi$  = koordinat lintang dan bujur (radian)
- $P, Q$  = volume aliran air dalam arah Barat-Timur (P) dan Selatan-Utara (Q) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
- $R$  = jari-jari bumi (m)
- $g$  = percepatan gravitasi ( $\text{m}/\text{s}^2$ ),
- $h$  = kedalaman air (m)
- $f$  = gaya Coriolis ( $\text{s}^{-1}$ )
- $t$  = waktu (s)

Pendekatan linear dipilih karena efisiensi komputasinya, memungkinkan simulasi cepat dengan tingkat akurasi yang memadai untuk menggambarkan fenomena utama tsunami, seperti *shoaling*, refleksi, dan amplifikasi gelombang. Pendekatan non-linear, meskipun lebih akurat di daerah pesisir yang sangat dangkal, membutuhkan waktu komputasi lebih lama serta data input yang lebih rinci. Karena fokus penelitian ini adalah pada penjalaran gelombang di perairan Selat Makassar yang relatif dalam, pendekatan linear dianggap memadai. Validitas pendekatan ini didukung oleh karakteristik tsunami yang memiliki panjang gelombang sangat besar (puluhan hingga ratusan kilometer) dibandingkan kedalaman perairan, sehingga memenuhi asumsi gelombang air dangkal yang menjadi dasar persamaan SWE (Gusman et al., 2019; Wang, 2009).

### 2.2.1. Parameter Input

Sumber tsunami dimodelkan menggunakan *block model*, yaitu representasi massa longsoran sebagai balok yang bergerak di sepanjang lereng dasar laut. Dimensi balok longsoran adalah panjang 1050 m, lebar 5425 m, dan tebal 140 m, mencerminkan volume material sedimen aktif yang memicu tsunami. Bagian ini ditentukan berdasarkan perbedaan elevasi yang signifikan yang terlihat dari data batimetri, sedangkan tebal 140 m merepresentasikan lapisan sedimen tak stabil yang bergeser dan membentuk deformasi dasar laut (Nugraha et al., 2020; Wang, 2009). Kekasaran Manning untuk permukaan laut terbuka adalah 0,025, yang mencerminkan hambatan aliran air terhadap pergerakan gelombang di laut terbuka. *Grid* spasial: Resolusi 0,12 untuk visualisasi yang lebih jelas. Koefisien gesekan basal statik: Nilai 0,01 digunakan, mencerminkan gesekan rendah akibat sedimen

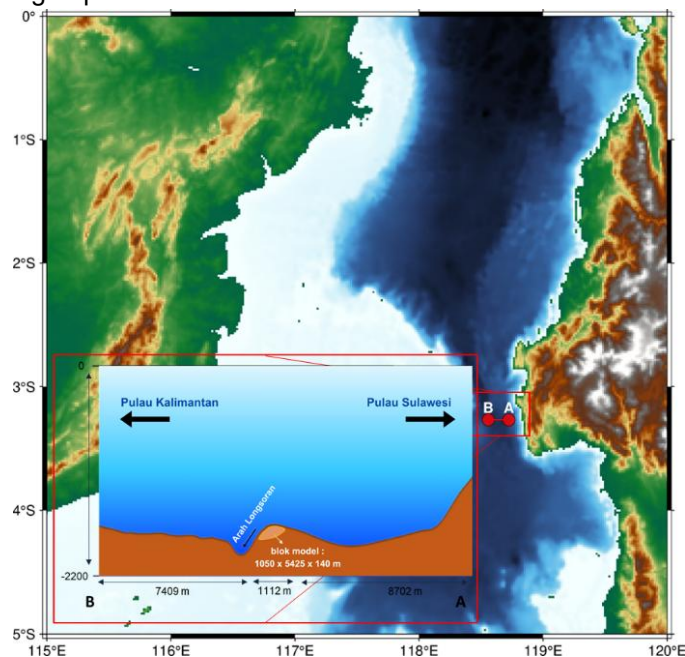
lunak dan air di dasar laut (Han et al., 2023; Surono, 2013). Parameter simulasi COMCOT dan model longsoron dijabarkan lebih rinci dalam file konfigurasi comcot.ctl dan landslide\_multi.ctl, yang dapat dilihat dalam Lampiran 2. Penjelasan terkait fungsi dan isi parameter penting ini memberikan gambaran lebih jelas mengenai pengaturan simulasi..

### 2.2.2. Interpretasi Data Hasil Simulasi

Hasil simulasi berupa data numerik yang mencakup kondisi sebelum dan sesudah longsoron, ketinggian serta kecepatan gelombang tsunami pada setiap titik pengamatan (TS), dan potret penjalaran tsunami selama simulasi 1 jam. Data hasil simulasi dianalisis untuk mengevaluasi tinggi gelombang, pola penjalaran, serta identifikasi wilayah pesisir yang berpotensi terdampak signifikan. Seluruh data hasil simulasi, yang disimpan dalam format '.dat' sesuai grid spasial dan batimetri yang digunakan, kemudian divisualisasikan menggunakan MATLAB untuk menganalisis dinamika tsunami dan mengidentifikasi area terdampak.

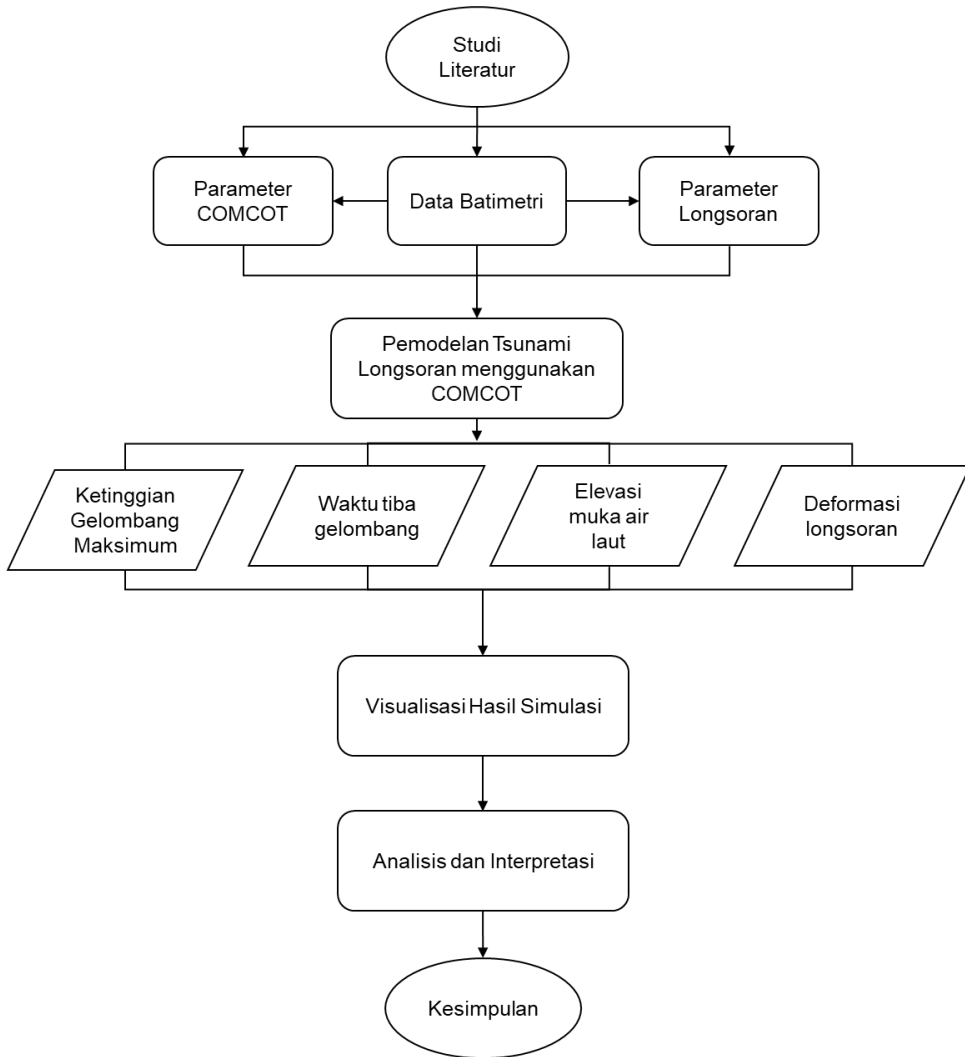
### 2.3 Kerangka Pikir dan Bagan Alir

Setelah memaparkan metode simulasi, selanjutnya skema longsoron dan bagan alir penelitian memberikan gambaran visual langkah demi langkah pelaksanaan penelitian ini. Skema longsoron pada Gambar 4 berada pada rentang  $3^{\circ}16'08.4''\text{LS}$ ,  $118^{\circ}33'00.0''\text{BT}$  hingga  $3^{\circ}16'04.8''\text{LS}$ ,  $118^{\circ}43'12.0''\text{BT}$  menggambarkan longsoron sedimen Haya di kedalaman 1900 – 2200 meter yang dimodelkan sebagai blok dengan dimensi  $1050 \times 5425 \times 140$  m, bergerak ke arah barat daya menuju Selat Makassar, dengan posisi Pulau Kalimantan di barat dan Sulawesi di timur.



**Gambar 4** Skema Longsoron

Secara keseluruhan, alur penelitian dirangkum pada bagan alir (lihat Gambar 5).



**Gambar 5** Bagan Alir Penelitian