

**ANALISIS TINGKAT KERAWANAN TANAH  
LONGSOR MENGGUNAKAN METODE REGRESI  
LOGISTIK DI SUB DAS BONEHAU, DAERAH  
ALIRAN SUNGAI KARAMA**

**OLEH**

**MUHAMMAD MUHSHIY KADIR POLE**

**M11115336**



**PROGRAM STUDI KEHUTANAN  
FAKULTAS KEHUTANAN  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2022**

## HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Analisis Tingkat Kerawanan Tanah Longsor  
Menggunakan Metode Regresi Logistik Di Sub DAS  
Bonehau, Daerah Aliran Sungai Karama

Nama Mahasiswa : Muhammad Muhshiy Kadir Pole

Stambuk : M11115336

Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Kehutanan

pada  
Program Studi Kehutanan  
Fakultas Kehutanan  
Universitas Hasanuddin

Menyetujui:  
Komisi pembimbing


Pembimbing I

Pembimbing II

  
Andang Suryana Soma, S.Hut., M.P., Ph.D  
NIP. 19780325 200812 1 002

  
Dr. Ir. H. Usman Arsvad, M.P., IPU  
NIP. 19540107 201901 5 001

Mengetahui,  
Ketua Program Studi Kehutanan  
Fakultas Kehutanan  
Universitas Hasanuddin

  
Dr. Forest. Muhammad Alif K.S, S.Hut, M.Si  
NIP. 19790831 200812 1 002

Tanggal Lulus: 14 April 2022

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Muhshiy Kadir Pole  
NIM : M11115336  
Program Studi : Kehutanan  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

### ANALISIS TINGKAT KERAWANAN TANAH LONGSOR MENGGUNAKAN METODE REGRESI LOGISTIK DI SUB DAS BONEHAU, DAERAH ALIRAN SUNGAI KARAMA

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

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa Sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksiatas perbuatan tersebut

Makassar, 22 April 2022

Yang Menyatakan

  
Muhammad Muhshiy Kadir Pole

## ABSTRAK

**Muhammad Muhshiy Kadir Pole (M11115336). Analisis Tingkat Kerawanan Tanah Longsor Menggunakan Metode Regresi Logistik Di Sub DAS Bonehau, Daerah Aliran Sungai Karama di bawah bimbingan Andang Suryana Soma dan Usman Arsyad.**

Tanah longsor memainkan peran penting dalam evolusi bentang alam, hadir hampir di semua tempat, dan menjadi bahaya serius dari bencana alam yang sering terjadi. Pemodelan statistik-spasial berbasis *ethics of care* di era ini telah menjadi alat penting untuk menilai resiko tanah longsor. Sub DAS Bonehau menunjukkan hidrogeomorfologi yang identik dengan kejadian tanah longsor. Terlebih lagi, 2.47 % lahan berhutan yang terkonversi setiap tahunnya mendukung inisiasi serta reaktivasi kejadian tanah longsor. 2.468 kejadian longsor yang terinventarisasi pada citra *Google Earth* menjadi dasar untuk menilai kerawanan tanah longsor. Diskriminasi faktor kausatif dalam frekuensi rasio (FR) memperlihatkan faktor litologi, perubahan penutupan lahan, dan kemiringan lereng menjadi penyebab utama kejadian longsor. Peta kerawanan longsor (LSM) kemudian dibangun menggunakan hasil pemodelan regresi logistik (LR). Kurva ROC pada model lebih cenderung ke arah sumbu sensitivitas dengan *area under the curve (AUC) success* dan *predictive* masing-masing sebesar 0,732 dan 0,674.

Kata kunci: *Peta kerawanan longsor, inventarisasi longsor, frekuensi rasio, regresi logistik, Sub DAS Bonehau*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT., Tuhan Yang Maha Esa, atas selesainya skripsi ini. Sejarah penelitian longsor hingga saat ini telah berkembang sedemikian rupa, dengan dinamika yang begitu kompleks. Ketersediaan GIS mungkin telah menjawab berbagai persoalan yang muncul pada era empirik, tapi secara tidak langsung telah mengalami disorientasi tujuan.

Ketepatan analisis piksel dari kejadian-kejadian longsor yang selalu melahirkan kesenangan personal bagi saya, tapi ternyata malah mengaburkan kepekaan terhadap realita yang dihadapi orang-orang Peu, Tabulahan. Hidup mereka ditentukan oleh stabilitas lereng dan siklus hidrologi regional. Saat musim penghujan tiba kejadian longsor menjadi momok bagi mereka. Belum ada korban jiwa, namun destruksi lahan persawahan-pertanian, relokasi pemukiman, dan aksesibilitas yang terputus adalah bukti nyata yang harus lebih kita soroti.

Saat kebanyakan orang, termasuk saya, terlena dengan harmoni spasial, dan melankoli pemodelan, kita lupa esensi dari sebuah penelitian. Penelitian seharusnya tidak hanya befokus pada aspek efisiensi-efektivitas di atas meja, aspek kemanusiaan harus dimasukkan. Tidak harus memulai dari yang besar, membuat mereka dapat tidur dengan nyenyak di malam hari dan beraktivitas untuk mencari penghidupan di siang harinya adalah hal yang mereka butuhkan saat ini.

*“Penelitian untuk tujuan kemanusiaan”*

Pandangan di atas muncul dari endapan pengalaman dan euforia spasial saya beberapa tahun terakhir. Hingga pada titik tertentu dalam penyelesaian tugas akhir saya, uap air dari proses transpirasi hilir membawa saya pada kondensasi faktual di bagian hulu DAS Karama.

Banyak tantangan yang dihadapi oleh penulis selama penyusunan skripsi, yang dengan bantuan berbagai pihak, maka skripsi ini dapat selesai pada waktu yang tepat. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada **Andang Suryana Soma, S.Hut, MP, Ph.D** dan **Dr. Ir. Usman Arysad, M.S, IPU** atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari perumusan masalah, pelaksanaan, sampai dengan penulisan skripsi.

Terima kasih pula yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada **Prof. Dr. Ir. Daud Malamassam, M.Agr.** dan **Budi Arty, S.Hut., M.Si.** yang telah memberikan banyak masukan dalam penulisan skripsi. Kepada Bapak dan Ibu Dosen Fakultas Kehutanan yang telah memberikan banyak ilmu. Bapak dan Ibu staf administrasi Fakultas Kehutanan Universitas Hasanuddin yang telah membantu dalam pengurusan administrasi penulis.

Terima kasih **Kepala Desa Tabulahan** dan **Bonehau** yang telah mengarahkan serta membantu penulis selama proses observasi kejadian tanah

longsor. Rekan-rekan penelitian pada **Laboratorium Pengelolaan Daerah Aliran Sungai** atas masukan dan kerjasamanya selama masa penelitian. Keluarga Besar **KORPALA UNHAS** dan Teman-teman **Virbius 2015** yang telah memberikan banyak pengalaman dan kenangan yang baik selama masa studi.

Terima kasih yang mendalam kepada keluarga, terkhusus orang tuaku, **Ambe' Dija sola Indo' Dija** atas doanya hingga saat ini.

Masih banyak pertanyaan menarik belum terjawab dalam skripsi ini yang menunggu untuk diteliti. Harapan penulis, semoga tulisan ini mampu mensosialisasikan piksel pemodelan kerawanan longsor dan bermanfaat bagi pemerintah serta masyarakat, terkhusus orang-orang Bonehau dan Tabulahan.

Makassar, 14 April 2022

Penulis

# DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
SAMPUL .....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
PERNYATAAN KEASLIAN .....	ii
ABSTRAK .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
I. PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan dan Kegunaan .....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Mengenal Pemodelan Kerawanan Longsor .....	4
2.1.1 Tanah Longsor .....	4
2.1.2 Pemodelan Tanah Longsor.....	5
2.2 Pendekatan Statistik-Spasial dan Sosialisasi Piksel.....	6
2.2.1 Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Penginderaan Jauh.....	7
2.2.2 Frekuensi Rasio.....	9
2.2.3 Regresi Logistik .....	9
2.2.4 <i>Receiver Operating Characteristic Curve</i> .....	11
2.3 Relasi Faktor Fisik dan Antropogenik terhadap Longsor .....	12
2.3.1 Perubahan Penutupan Lahan .....	12

2.3.2 Hidrologi .....	13
2.3.3 Geologi.....	14
2.3.4 Topografi.....	15
2.3.5 Aktivitas Seismik .....	15
2.3.6 Faktor Antropogenik .....	16
2.4 Peran Pemodelan dalam Pengelolaan DAS.....	17
III. METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	19
3.2 Alat dan Bahan.....	20
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	21
3.3.1 Inventarisasi Longsor .....	22
3.3.2 Faktor Kausatif Tanah Longsor .....	22
3.4 Analisis Data .....	25
3.5 Validasi Data.....	26
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1 Inventarisasi Longsor .....	28
4.2 Frekuensi Rasio.....	30
4.2.1 Curah Hujan .....	32
4.2.2 Perubahan Penutupan Lahan .....	35
4.2.3 Kemiringan Lereng .....	39
4.2.4 Elevasi.....	40
4.2.5 Kurvatur .....	41
4.2.6 Litologi.....	42
4.2.7 Jarak dari Sesar .....	43
4.2.8 Jarak dari Sungai.....	44
4.2.9 Jarak dari Jalan.....	45



4.2.10 Magnitudo Gempa.....	47
4.2.11 Jarak dari Episentrum.....	48
4.3 Regresi Logistik .....	49
4.3.1 Validasi Kurva Receiver Operating Characteristic (ROC) .....	52
4.3.2 Pemetaan Kerawanan Longor (LSM) .....	53
V. KESIMPULAN DAN SARAN .....	55
5.1 Kesimpulan .....	55
5.2 Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA .....	57
LAMPIRAN .....	66

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Judul</b>	<b>Halaman</b>
Gambar 1.	Peta lokasi penelitian Sub DAS Bonehau yang secara administrasi masuk dalam wilayah Kabupaten Mamasa di sisi selatan dan Kabupaten Mamuju di sisi utara, Sulawesi Barat.....	19
Gambar 2.	Bagan Alir Penelitian.....	22
Gambar 3.	Inventarisasi kejadian longsor berdasarkan karakteristik spektral, bentuk, dan kontras periode 2014-2020 yang terekam pada citra Google Earth .....	28
Gambar 4.	Peta sebaran kejadian longsor hasil inventarisasi citra Google Earth periode 2011-2020 dan hasil ground truth kejadian longsor.....	29
Gambar 5.	Kejadian longsor hasil observasi lapangan di Sub DAS Bonehau (sisi kiri memperlihatkan kejadian longsor yang menutup aksesibilitas jalan, sisi kanan menunjukkan kejadian sekitar daerah permukiman, dan pada posisi tengah berada pada daerah pertanian-persawahan). .....	29
Gambar 6.	Grafik curah hujan rerata per bulan dengan perekaman 2011-2020.....	32
Gambar 7.	Grafik curah hujan rerata per tahun dengan perekaman Januari-Desember .....	33
Gambar 8.	Peta curah hujan hasil interpolasi IDW dari perekaman satelit MERRA 2 pada sembilan stasiun .....	33
Gambar 9.	Luas kelas curah hujan serta rasio variabel terhadap kejadian longsor.....	34

Gambar 10. Sosialisasi piksel penutupan lahan 2008 dan 2013 dari Citra Landsat 7 ETM dan 8 OLI dengan pendekatan <i>unsupervised classification</i> .....	35
Gambar 11. Luas kelas perubahan penutupan lahan serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	38
Gambar 12. Luas kelas kemiringan lereng serta rasio variabel terhadap kejadian longsor.....	39
Gambar 13. Luas kelas elevasi serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	40
Gambar 14. Luas kelas kurvatur (kelengkungan permukaan) serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	41
Gambar 15. Luas kelas litologi serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	42
Gambar 16. Grafik batang luas kelas jarak dari sesar (DtF) dan nilai frekuensi rasio variabel jarak dari sesar .....	44
Gambar 17. Luas kelas jarak dari sungai (DtR) serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	45
Gambar 18. Luas kelas jarak dari jalan (DtRo) serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	46
Gambar 19. Luas kelas magnitudo gempa serta rasio variabel terhadap kejadian longsor.....	47
Gambar 20. Luas kelas jarak dari episentrum (DtE) serta rasio variabel terhadap kejadian longsor .....	48
Gambar 21. Faktor kausatif kejadian longsor yang dimasukkan ke dalam model Regresi Logistik.....	50
Gambar 22. Kurva AUC hasil validasi ROC pemodelan kerawanan longsor dengan 10 kali pengulangan (AUC <i>Success</i> (ROC validasi 1) dan AUC <i>Predictive</i> (ROC validasi 2)) .....	52
Gambar 23. Peta kerawanan tanah longsor dari hasil klasifikasi natural breaks LSI Iterasi 9.....	53

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel</b>	<b>Judul</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 1.	Bahan penelitian yang dijadikan sebagai data input dalam pemodelan kerawanan longsor.....	21
Tabel 2.	Alat yang digunakan dalam proses penelitian di atas meja dan observasi di lapangan.....	21
Tabel 3.	Hasil perhitungan Frekuensi Rasio (FR) beberapa faktor penyebab tanah longsor.....	30
Tabel 4.	Luas penutupan lahan 2008 dan 2013.....	36
Tabel 5.	<i>Confusion matrix</i> uji akurasi penutupan lahan 2008 dengan parameter overall accuracy dan kappa accuracy (piksel).....	36
Tabel 6.	<i>Confusion matrix</i> uji akurasi penutupan lahan 2013 dengan parameter overall accuracy dan kappa accuracy (piksel).....	37
Tabel 7.	Persentase ketepatan klasifikasi dan nilai koefisien B regresi logistik faktor penyebab longsor menggunakan proporsi piksel longsor dan non longsor yang sama.....	51
Tabel 8.	Nilai kurva AUC hasil validasi ROC pemodelan kerawanan longsor dengan 10 kali pengulangan.....	52
Tabel 9.	Luasan area kelas peta kerawan (LSM) longor dan area sampel uji (30% piksel longsor) menggunakan regresi logistik (LR) .....	54

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Tabel sampling uji akurasi hasil inventarisasi kejadian longsor serta, hasil <i>ground truth</i> di Sub DAS Bonehau yang berjumlah 77 titik. ....	67
Lampiran 2.	Gambar hasil inventarisasi kejadian longsor pada citra Google Earth, disertai foto kejadian hasil survei. ....	69
Lampiran 3.	Peta inventarisasi kejadian longsor periode 2011-2020 dan peta survei kejadian longsor ( <i>ground truth</i> ) di Sub DAS Bonehau pertanggal 23 april 2021 s.d. 7 mei 2021.....	77
Lampiran 4.	Peta faktor kausatif kejadian longsor yang terdiri dari peta curah hujan, perubahan penutupan lahan, kemiringan lereng, elevasi, kurvatur, jarak dari sungai, jarak dari jalan, litologi, jarak dari sesar, magnitudo gempa, dan jarak dari episentrum.....	80
Lampiran 5.	Tabel frekuensi rasio faktor kausatif terhadap kejadian longsor di Sub DAS Bonehau. Variabel independen secara keseluruhan berjumlah 11 yang dianggap sebagai variabel yang mampu mewakili faktor fisik dan antropogenik Sub DAS Bonehau.....	92
Lampiran 6.	Hasil analisis statistik Regresi Logistik (LR) pada 10 kali pengulangan. Berturut-turut dengan penamaan Iterasi 1, Iterasi 2, ..., Iterasi 10.....	94
Lampiran 7.	Hasil validasi kurva ROC untuk melihat sensitivitas kesuksesan dan prediksi faktor kausatif (variabel independen) terhadap kejadian longsor (variabel dependen).....	100

Lampiran 8. Peta kerawanan longsor Iterasi 9 dengan nilai validasi tertinggi dari sepuluh kali pengulangan. Intervensi variabel independen secara berturut-turut didominasi oleh jarak dari sungai, litologi, jarak dari jalan, kemiringan lereng, kurvatur, gempa (magnitudo dan jarak dari episentrum), perubahan penutupan lahan (PPL), dan elevasi..... 105

# I. PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Tanah longsor memainkan peran penting dalam evolusi bentang alam, hadir hampir di semua tempat, dan menjadi bahaya serius dari bencana alam yang sering terjadi. Pada laman resmi Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI) Badan Penanggulangan Bencana Nasional (BNPB) (<https://dibi.bnpb.go.id>) tercatat bahwa lima belas tahun terakhir tanah longsor selalu masuk dalam peringkat tiga besar bencana alam paling sering terjadi di Indonesia, di tahun 2020 sebanyak 574 kejadian tercatat, berdampak pada kerusakan infrastruktur, putusnya jaringan jalan, relokasi permukiman, destruksi hutan dan lahan, hingga menelan korban jiwa.

Tanah longsor yang terjadi pada hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Jeneberang di tahun 2004 akibat runtuhnya sisi dalam kaldera *Bulu' Bawakaraeng* telah berdampak pada evolusi bentang alam. Material longor dalam jumlah besar menuruni lereng dan terakumulasi pada lembah sepanjang 7 km, menyebabkan kerugian besar. Runtuh dan terkuburnya 12 rumah serta sebuah sekolah dasar (SD), destruksi 1.500 ha lahan pertanian dan termasuk 32 jiwa yang hilang (Tsuchiya dkk, 2004). Terbang jauh ke arah timur laut, kerusakan hulu DAS Rongkong telah menyebabkan bencana yang serupa. BNPB pada laman resminya melansir 1600 rumah mengalami kerusakan parah yang masih dapat dilihat pada bagian tengah DAS. Paski dkk. (2021) menambahkan 48 jiwa tercatat meninggal dunia, dan sepuluh di antaranya hilang terkubur dan terbawa material longsor.

Pemodelan longsor di era ini telah menjadi alat penting untuk menilai resiko longsor. Variasi model prediktif mulai dari prosedur berbasis opini heuristik sederhana hingga model statistik canggih yang beroperasi pada kompleksitas basis data, telah menawarkan peluang baru dalam mengevaluasi kekurangan dan kelebihan model. Lebih jauh lagi ketika model mampu memprediksi secara akurat sensitivitas faktor kausatif terhadap kejadian longsor kelak akan sangat membantu dalam pengelolaan mitigasi dan konservasi Daerah Aliran Sungai (DAS). Brabb (1993) berpendapat setidaknya 90% kerugian longsor dapat dihindari jika masalah tersebut diketahui sebelum terjadinya. Sejalan dengan pendapat Brabb dan tak lepas

dari prinsip kemanusiaan, ketika model telah mampu menjawab kompleksitas dan ketidakpastian kejadian longsor, setidaknya kesalahan pengambilan keputusan di masa lampau tidak akan terulang lagi, dan tentunya tidak ada lagi jiwa yang hilang akibat tanah longsor.

Sub DAS Bonehau menjadi lokasi kajian dalam penelitian ini. Daerah yang sangat dipengaruhi oleh iklim regional sehingga siklus hidrologi berlangsung lebih cepat menyebabkan hujan berlangsung hampir sepanjang tahun. Tekstur sungai yang rapat, mengalir dari arah tenggara menuju barat laut di daerah hulu, dan selanjutnya mengalir ke arah utara sepanjang tengah hingga hilir. Didominasi atas batuan berumur miosen tengah hingga pliosen, dengan pola aliran dendritik menjadi ciri khasnya. Berdasarkan hasil survei geologi pada tahun 2019, Sub DAS Bonehau di kelilingi Sesar, Kekar, dan Sesar Anjak, sebagian di antaranya tergolong aktif, dan telah memicu kejadian gempa yang semakin meningkat setiap tahun. Hidrogeomorfologi yang identik dengan kejadian longsor, terlebih lagi lahan berhutan yang terkonversi setiap tahunnya mendukung peningkatan kejadian longsor.

Penelitian ini menggunakan model statistik regresi logistik (LR) dengan batuan frekuensi rasio (FR) untuk melakukan normalisasi numerik serta menunjukkan faktor kausatif (curah hujan, jarak dari sungai, kemiringan lereng, elevasi, kurvatur, litologi, jarak dari sesar, magnitudo gempa, jarak dari episentrum gempa, dan jarak dari jalan) yang paling berpengaruh terhadap kejadian longsor. Mengandalkan kurva *Receiver Operating Characteristics* (ROC) dalam mengevaluasi kesuksesan dan prediksi model kerawanan tanah longsor.



## **1.2 Tujuan dan Kegunaan**

Sosialisasi piksel citra satelit merepresentasikan Sub DAS Bonehau selama ini kurang diperhatikan, padahal secara geografis merupakan daerah hulu DAS Karama, daerah penyangga bagi masyarakat perkotaan di hilir. Setiap tahunnya masyarakat hulu DAS Karama selalu dihadapkan dengan bencana longsor, namun belum ada yang tercatat bahkan pada laman resmi Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi kejadian longsor periode 2011-2020 di Sub DAS Bonehau
2. Menganalisis faktor kausatif yang paling berpengaruh terhadap kejadian longsor dari hasil frekuensi rasio (FR) di Sub DAS Bonehau
3. Membuat peta kerawanan longsor dari hasil analisis regresi logistik (LR) di Sub DAS Bonehau

Melalui penelitian partisipatif dengan pemerintah dan masyarakat setempat, diharapkan penelitian ini mampu mensosialisasikan piksel pemodelan kerawanan longsor sebagai bentuk upaya mitigasi dan tanggap bencana bagi pemerintah termasuk lebih memberi perhatiannya kepada masyarakat hulu terkhusus Sub DAS Bonehau.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Mengenal Pemodelan Kerawanan Longsor

Peralihan konsepsi *ethics of right* menjadi *ethics of care* telah meningkatkan kepedulian terhadap lingkungan. Peralihan yang melahirkan konsep perubahan lingkungan pada awal 1980, demi linearitas pembangunan sosial ekonomi dan lingkungan yang terjaga. Selama dua dekade terakhir, aspek fisik dari perubahan global telah menjadi item penting dalam banyak agenda penelitian (Schellnhuber, 1999). Namun hanya sedikit kasus yang diketahui mencakup banyak komponen dan proses utama, merakit dan menganalisisnya pada skala yang berbeda, dan mengadopsi berbagai metodologi. Penelitian yang membutuhkan fleksibilitas interdisiplin, dan konsistensi sebagai dasarnya.

Pemodelan sistem bumi, metode penelitian dasar untuk ilmu sistem bumi, dianggap sebagai revolusi Copernicus kedua (Schellnhuber, 1999). Pemodelan dapat dianggap sebagai pendekatan sintesis untuk memformalkan pengetahuan yang ada tentang ilmu sistem bumi. Pemodelan numerik merupakan satu-satunya cara untuk mensimulasikan evolusi dan interaksi di antara bidang-bidang sistem bumi yang kompleks dan luas. Melalui pemodelan numerik, konseptualisasi kualitatif sistem bumi dapat diubah menjadi pemahaman kuantitatif. Model mampu mereproduksi keadaan masa lalu dan meramalkan keadaan masa depan. Lebih jauh lagi, model dapat membantu peneliti, pemangku kepentingan, dan pengambil keputusan mengusulkan tindakan pencegahan sebelum kemungkinan perubahan di masa depan berdasarkan skenario nyata dan hipotesis. Dalam hal ini, pemodelan numerik juga merupakan alat yang sangat diperlukan untuk mencapai keberlanjutan (Reid dkk, 2010; Weaver dkk, 2013; Li dkk, 2018).

#### 2.1.1 Tanah Longsor

Tanah longsor merupakan proses perpindahan massa batuan (tanah) dalam volume yang besar. Kejadian longsor memiliki hubungan erat dengan gravitasi karena kemampuannya mengatur interaksi massa di dalam lereng yang kemudian memengaruhi kinerja gaya penahan dan gaya peluncur (McColl, 2015). Kedua gaya

ini menentukan stabilitas lereng. Terganggunya kesetimbangan gaya yang bekerja pada lereng menyebabkan terjadinya longsor. Apabila gaya penahan lebih besar dari gaya peluncur maka lereng dikategorikan stabil. Gaya peluncur dipengaruhi oleh kandungan air, berat beban bangunan, dan berat massa tanah itu sendiri. Ketidakseimbangan gaya tersebut diakibatkan adanya gaya dari luar lereng yang menyebabkan gaya peluncur pada suatu lereng menjadi lebih besar daripada gaya penahannya, sehingga mengakibatkan massa tanah bergerak turun (Naryanto dkk., 2019). Semakin besar tegangan yang bekerja sejajar terhadap keruntuhan potensial permukaan.

Tanah longsor merupakan kejadian alam tetapi dapat berubah menjadi bahaya yang menyebabkan hilangnya nyawa dan kerusakan pada bangunan buatan manusia dan alam. Tanah longsor dipengaruhi oleh beberapa faktor persiapan dan pemicu yang sangat bervariasi dari satu wilayah ke wilayah lainnya karena variasi sebaran batuan dan jenis tanah, struktur geologi, deformasi batuan, geomorfologi, dan kondisi iklim. Model tanah longsor ditangani oleh banyak penulis secara berbeda. Menurut Brabb (1993) setidaknya 90% kerugian longsor dapat dihindari jika masalah tersebut diketahui sebelum terjadinya longsor.

### **2.1.2 Pemodelan Tanah Longsor**

Pemodelan longsor di era ini telah menjadi alat penting untuk menilai resiko longsor dan berkontribusi untuk mitigasi dan konservasi. Variasi metode prediktif mulai dari prosedur berbasis opini heuristik sederhana hingga model statistik canggih yang beroperasi pada kompleksitas basis data. Prediksi model dapat memandu peneliti, tetapi interpretasi menjadi persoalan yang sering mencuat. Semisal, suatu wilayah dimodelkan berbahaya, mungkin sulit untuk memutuskan langkah-langkah praktis yang akan diambil di wilayah tersebut. Mengutamakan rehabilitasi dan konservasi serta mengesampingkan pembangunan, tentunya akan berakhir pada krisis ekonomi yang serius. Pengambil keputusan tidak hanya membutuhkan relativitas tingkat kerawanan tetapi juga prediksi model terhadap kemungkinan terjadinya tanah longsor di masa depan. Resiko longsor kemudian dapat diprediksikan dan beberapa bentuk penilaian atau analisis *cost-benefit* dilakukan untuk sampai pada keputusan yang tepat (Chung dan Fabbri, 2008).

Studi kasus longsor rentang tahun 2014 hingga saat ini mengintegrasikan *cost survey* dengan *risk analysis*. Pendekatan ini menggabungkan data kejadian longsor di masa lalu (studi empiris) dengan analisis resiko longsor di masa mendatang (studi pemodelan). Penelitian di bidang longsor dimulai pada tahun 1958 dengan melaporkan data kejadian longsor yang telah terjadi. Penelitian kejadian longsor menggunakan pendekatan ini berlangsung sejak tahun 1958 – 1990 dikenal dengan era empiris. Kemudian rentang tahun 1990 – 2014 bergeser menggunakan pendekatan pemodelan berbasis GIS. Melalui pemodelan GIS resiko kejadian longsor di masa mendatang dapat diprediksi. Dalam piramida prioritas dan tahapan penelitian dengan pendekatan *cost survey risk analysis*, Klose (2015) menempatkan pemodelan kerawanan tanah longsor pada urutan kedua.

## **2.2 Pendekatan Statistik-Spasial dan Sosialisasi Piksel**

Kejadian longsor dapat diidentifikasi melalui beberapa media, salah satunya dengan penginderaan jauh. Inventarisasi longsor dapat diperoleh melalui interpretasi manual ataupun semi otomatis. Interpretasi longsor secara manual memperhatikan elemen-elemen berikut: bentuk, ukuran, pola, dan tekstur. Interpretasi longsor secara manual sangat bergantung pada kemampuan interpreter. Fenomena longsor yang erat kaitannya dengan lanskap dan karakteristik lokal setempat, sehingga rangkaian fenomena longsor, mulai dari hilangnya penutupan hutan setelah kejadian longsor hingga revegetasi di area longsor ataupun timbunan, memegang peranan penting (Hölbling dkk, 2017).

Intrusi teknologi *machine learning* di era pemodelan telah menawarkan peluang baru dalam mengevaluasi kekurangan dan kelebihan model kerawanan longsor. Lebih jauh lagi ketika pemodelan mampu memprediksi secara akurat sensitivitas faktor kausatif terhadap kejadian longsor kelak akan sangat membantu dalam pengelolaan mitigasi dan konservasi Daerah Aliran Sungai (DAS). Studi Reichenbach dkk, (2018) menuturkan terdapat beragam metode pemodelan yang digunakan dalam menentukan tingkat kerawan longor, sebagian besar cenderung pada penilaian kuantitatif statistik. Metode standar yang seringkali digunakan seperti Frekuensi Rasio, Regresi Logistik, et cetera.

### 2.2.1 Sistem Informasi Geografis (SIG) dan Penginderaan Jauh

Kegiatan pemetaan dan pemodelan untuk pengelolaan lingkungan, sumber daya dan wilayah, dewasa ini sudah tidak dapat dilepaskan dari dua macam teknologi, yaitu penginderaan jauh dan sistem informasi geografis. Penginderaan jauh merupakan suatu ilmu dan seni dalam memperoleh informasi mengenai suatu objek, area, atau fenomena melalui analisis data yang diperoleh dengan alat tanpa suatu kontak langsung (Lillesand dkk., 2008). Sistem Informasi Geografis (SIG) sendiri merupakan suatu sistem berbasis komputer yang digunakan untuk menyimpan, mengelola, menganalisis, dan mengaktifkan atau memanggil kembali data yang mempunyai referensi keruangan, untuk berbagai tujuan yang berkaitan dengan pemetaan dan perencanaan. Kedua macam teknologi tersebut sangat bermanfaat dalam pengelolaan informasi keruangan mengenai kondisi permukaan bumi. Oleh karena itu, pada perkembangan selanjutnya, teknologi tersebut cenderung diintegrasikan demi peningkatan efisiensi perolehan serta akurasi hasil pemetaannya, sebagai masukan dalam proses perencanaan dan pengelolaan wilayah (Danoedoro, 2012).

Tomlin (1990) melihat sebuah peta dapat direpresentasikan dalam bentuk digital, tentu akan mempermudah pengukuran elemen dasarnya. Analisis biaya-manfaat Tomlin menunjukkan bahwa komputerisasi akan hemat biaya. Inovator GIS utama, telah menemukan bahwa, GIS berasal dari manfaat mengotomatisasi proses produksi peta. Begitu informasi dalam bentuk apa pun dapat dimuat ke bentuk digital, akan lebih mudah untuk memanipulasi, menyalin, mengedit, dan mengirimkan. Pencapaian luas manfaat kartografi otomatis harus menunggu pengembangan mekanisme yang sesuai untuk input, tampilan, dan output data peta. Sejak pertengahan 1970-an hingga saat ini semakin banyak organisasi yang mulai mengubah semua peta mereka menjadi bentuk yang terkomputerisasi (Reddy, 2008).

Google Earth menyediakan citra *time series* yang dapat menjadi pilihan dalam mengidentifikasi longsor. Empat kriteria utama dalam mengidentifikasi longsor di Google Earth: 1) perubahan vegetasi menjadi area terbuka, 2) perubahan morfologi, 3) kelerengan dan elevasi di lokasi terduga longsor, 4) adanya *debris* atau timbunan material di pangkal area terduga longsor (Rabby dan Li, 2018).

Perubahan vegetasi menjadi area terbuka dan perubahan morfologi diamati dengan membandingkan sejumlah citra pada rentang waktu tertentu. Longsor dapat menghilangkan atau merusak vegetasi karena terbawa bersama material longsor, selanjutnya, menjadikan area tersebut sebagai lahan terbuka. Kegiatan pembukaan lahan oleh manusia dan kejadian banjir juga dibaca sebagai lahan terbuka pada citra. Kekeliruan interpretasi antara lahan terbuka karena aktivitas manusia dengan longsor dapat dibedakan dari bentuk bangunnya. Pembukaan lahan oleh manusia cenderung memiliki bentuk yang jelas, sementara longsor memiliki bentuk yang tidak beraturan. Perubahan elevasi dan kelerengan ditambahkan pada saat proses interpretasi visual, kejadian longsor dapat dibedakan dari lahan terbuka lainnya. Hal ini dikarenakan longsor dapat menghilangkan lapisan tanah atas dan vegetasi. Material tanah dan vegetasi yang terbawa oleh longsor akan terakumulasi pada pangkal. Timbunan material dipertimbangkan sebagai indikasi terjadinya longsor. Material timbunan pada citra dikenali dengan adanya kontras warna cerah sampai coklat gelap pada area terduga longsor. Dalam kegiatan inventarisasi longsor, tipe pergeseran/pergerakan longsor seperti *falls*, *topples*, *slides*, *spreads*, dan *flows* juga ditentukan. Identifikasi jenis-jenis longsor bergantung pada kualitas citra (Rabby dan Li, 2018)

Pemodelan longsor sangat ditentukan oleh kejadian longsor di masa lalu. Inventarisasi longsor dengan persiapan yang hati-hati merupakan salah satu prasyarat untuk mencapai prediksi pemodelan tanah longsor yang akurat (Galli dkk, 2008). Penerapan penginderaan jauh dan SIG sangat penting untuk pemetaan kerawanan longsor yang efektif, penilaian bahaya dan penilaian resiko yang menghasilkan kesadaran, mitigasi, dan manajemen. Langkah ini merupakan bagian penting, diketahui bahwa probabilistik terjadinya longsor linear dengan kondisi kejadian longsor sebelumnya (Skilodimou dkk, 2018). Inventarisasi longsor merupakan dasar untuk menilai kerawanan, bahaya, dan resiko longsor (Ardizzone dkk., 2002; Dai dan Lee, 2002; Kanwal dkk., 2016).

SIG telah memainkan peran penting dalam penelitian tanah longsor karena memiliki fungsi gabungan pengumpulan, penyimpanan, manipulasi, tampilan, dan analisis data yang bereferensi spasial. Kombinasi GIS dan analisis statistik dianggap sebagai pendekatan yang bermanfaat dalam pemetaan tanah longsor

(Chung dkk., 1995; Chen dan Wang, 2007). Meskipun model statistik ini dianggap sebagai metode penting dalam studi tanah longsor, model tersebut kurang efisien dalam menjelaskan variasi spasial di wilayah studi saat pemodelan (Pourghasemi dkk., 2013). Khususnya dalam studi kerawanan longsor, yang merupakan area spesifik, penting untuk memahami interaksi spasial antara lokasi longsor dan faktor pengkondisian. Jadi kombinasi elemen spasial dan model statistik bisa menjadi metode yang lebih kuat untuk pemodelan longsor daripada metode prediksi longsor statistik standar.

### 2.2.2 Frekuensi Rasio

Analisis statistik membutuhkan tahapan normalisasi numerik sebagai upaya penyetaraan skala pengukuran. Pada dasarnya tidak ada gunanya menggabungkan data dengan skala pengukuran yang berbeda. Jadi, langkah pertama dan utama dalam analisis statistik adalah memastikan bahwa data telah dinormalisasi sesuai kebutuhan regresi logistik. Kegagalan pada tahap ini biasanya menyebabkan masalah selama interpretasi hasil akhir.

Pendekatan statistik di awal pemodelan menggunakan frekuensi rasio (FR). Teknik statistik serdehana dengan membagi rasio faktor kejadian longsor dengan rasio luas. FR dijadikan *numeric base* untuk uji statistik pada pada regresi logistik (LR). FR dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Soma dkk., 2019):

$$Fr = \frac{Pxcl(nm)/\Sigma PnxL}{Pixel(nm)/\Sigma Pnx}$$

dimana, Pxcl mewakili jumlah piksel kelas dalam faktor kejadian dari parameter m (nm), dan Pixel diartikan sebagai jumlah piksel kelas dari parameter m (nm). Dalam frekuensi rasio Pxcl dan Pixel masing-masing dibagi dengan total piksel dari parameter m ( $\Sigma PnxL$ ) dan keseluruhan piksel dari area kajian ( $\Sigma Pnx$ ).

### 2.2.3 Regresi Logistik

Dalam aplikasi untuk pemetaan kerawanan longsor, solusi umum adalah membuat nilai lapisan biner (*variable dummy*) untuk setiap kelas dari parameter independen (Guzzetti dkk., 1999; Dai dan Lee, 2002). Jika jumlah parameternya

sedikit, pendekatan ini sesuai. Namun, jika parameternya banyak, maka akan menghasilkan persamaan regresi yang panjang bahkan dapat menimbulkan masalah numerik. Bertentangan dengan beberapa asumsi dasar regresi logistik seperti tidak adanya korelasi yang kuat antara variabel independen (multikolinearitas). Mungkin juga sulit untuk memahami hasil statistik dan mengevaluasi peran setiap variabel independen dalam model akhir. Hosmer dan Lemeshow (2000) menambahkan estimasi untuk model regresi tidak dapat dihitung secara unik ketika ada hubungan linier yang sempurna di antara prediktor, karena analisis ini sensitif terhadap kolinearitas di antara variabel independen. Selain itu, toleransi (TOL) dihitung untuk diagnosis multikolinearitas faktor-faktor independen (Huang dkk., 2015)

Penelitian oleh Ayalew dkk. (2005) dengan jumlah variabel independen sebanyak tujuh menggunakan pendekatan yang berbeda. Langkah pertama dimulai dengan mengatur kelas untuk semua parameter sebelumnya menggunakan analisis statistik. Penggunaan kepadatan longsor memungkinkan untuk mengekspresikan parameter independen dengan skala yang sama. Kemudian, regresi dilakukan di antara parameter independen. Hasil akhir menunjukkan kelas dengan kepadatan longsor yang tinggi, yang sesuai dengan parameter yang memiliki koefisien positif lebih tinggi, dianggap lebih berperan dalam menyebabkan terjadinya longsor.

Secara umum, dalam regresi logistik, prediksi spasial dimodelkan oleh variabel dependen dan variabel independen (Shirzadi dkk. 2012). Variabel dapat berupa kontinu atau diskrit, atau kombinasi dari keduanya. Variabel dependen adalah variabel biner/dikotomis yang merepresentasikan ada tidaknya longsor. Teknik regresi logistik berganda menghasilkan koefisien untuk setiap variabel berdasarkan data yang diperoleh dari sampel yang diambil di daerah penelitian. Jika koefisiennya positif, nilai *log* yang ditransformasikan akan lebih besar dari satu, yang berarti peristiwa tersebut lebih mungkin terjadi. Jika koefisiennya negatif, koefisien yang terakhir akan lebih kecil dari satu dan peluang terjadinya peristiwa tersebut menurun. Koefisien 0 memiliki nilai *log* yang ditransformasikan sebesar 1, dan tidak mengubah peluang dengan satu atau lain cara. Untuk koefisien positif, probabilitas diplotkan terhadap nilai-nilai variabel independen mengikuti kurva berbentuk S. Gambar cermin akan diperoleh untuk koefisien negatif (Menard, 2002). Koefisien ini berfungsi sebagai bobot dalam suatu algoritma, yang dapat



digunakan dalam *database* GIS untuk menghasilkan peta yang menggambarkan kemungkinan terjadinya longsor.

Data biner, multinomial, atau ordinal (Sahin dkk., 2020) dari variabel-variabel pengkondisian kejadian longsor, dianalisis menggunakan metode regresi logistik. Regresi logistik menentukan hubungan kejadian longsor dan kemungkinan faktor penyebabnya, telah banyak digunakan dalam pemetaan kerawanan longsor (Shahabi dkk, 2013). Probabilitas regresi dibatasi dalam kisaran nilai nol (0 % kejadian longsor) sampai satu (probabilitas 100 %). Regresi logistik mengikuti fungsi logistik-z yang diekspresikan dalam persamaan berikut (Soma dan Kubota, 2017):

$$P = \frac{1}{1 + \exp^{-z}}$$

$$Z = C_0 + C_1CF_1 + C_2CF_2 + \dots + C_nCF_n$$

dimana, P adalah probabilitas terjadinya longsor yang nilai taksirannya bervariasi dari 0 sampai 1. Variabel Z atau faktor penyebab longsor diasumsikan sebagai kombinasi linier dari faktor penyebab Xi (i = 1, 2, ..., n). Selain itu, Z dihitung menggunakan persamaan C<sub>0</sub> yang merupakan intersep, dan C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, ..., C<sub>n</sub> adalah koefisien yang mengukur kontribusi faktor independen (CF<sub>1</sub>, CF<sub>2</sub>, ..., CF<sub>n</sub>) terhadap variasi Z.

#### **2.2.4 Receiver Operating Characteristic Curve**

Pengukuran kinerja algoritma pemodelan merupakan langkah penting dalam semua prediksi berbasis model termasuk *Landslide Susceptibility Mapping* (LSM). Pada penelitian ini, *Receiver Operating Characteristic* (ROC) digunakan untuk menilai kinerja algoritma. ROC membuat grafik plot sensitivitas (rasio positif benar) terhadap 1-spesifisitas (rasio positif palsu) dengan berbagai ambang. Indeks dihitung sebagai berikut:

$$AUC = \sum TP + \sum \frac{TN}{P + N}$$

dimana, P adalah jumlah total longsor dan N jumlah total lokasi non-longsor. Area di bawah kurva ini disebut AUC digunakan untuk mengevaluasi kinerja model yang dianalisis (Sahin dkk., 2020). Kurva perubahan laju dibuat dengan nilai LSI sebagai

sumbu x dan persentase kumulatif kejadian longsor sebagai sumbu y (Nusantara dan Setianto, 2015). Klasifikasi hasil validasi longsor kemudian dikelompokkan menjadi beberapa rentang nilai yaitu 0,5 – 0,6 dinyatakan gagal, 0,6 – 0,7 dinyatakan buruk, 0,7 – 0,8 dinyatakan cukup, 0,8 – 0,9 dinyatakan baik, dan 0,9 – 1 dinyatakan sangat baik (Rasyid dkk, 2016). Peta kerawanan tanah longsor yang telah dihasilkan kemudian diklasifikasikan menjadi lima kelas yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, sangat tinggi.

### **2.3 Relasi Faktor Fisik dan Antropogenik terhadap Longsor**

Longsor dapat terjadi dimana saja: wilayah dengan kelembaban tinggi atau di daerah kering; daratan atau lautan; berbagai penutupan lahan, lereng yang curam sampai landai dan seterusnya (Highland dan Bobrowsky, 2008). Beberapa peneliti membagi variabel yang berkontribusi terhadap longsor menjadi dua, faktor pemicu (eksternal) dan faktor kontrol (internal) (Singh dan Bartlett, 2018; Kloze 2015; Highland & Bobrowsky, 2008). Memandang kejadian longsor secara spesifik pada skala regional atau nasional maupun skala DAS menjadi penting agar perencanaan manajemen dan mitigasi bencana tepat sasaran. Tidak hanya skala ruang yang spesifik, penelitian skala temporal juga penting untuk memetakan kecenderungan variabel penyebab serta pemicu kejadian longsor. Studi kasus di Lower Saxony oleh Kloze (2015), Jerman, memperlihatkan variabel pemicu longsor selama tahun 1865 – 2013 berdasarkan *database* yang tercatat. Berikut variabel utama penyebab longsor: 1) pengembangan jaringan jalan yang signifikan (1865 – 1885), 2) pengembangan daerah perkotaan (1920 – 1930), 3) kombinasi beberapa faktor penyebab (1960 – 2013).

#### **2.3.1 Perubahan Penutupan Lahan**

Faktor vegetasi berpengaruh terhadap longsor melalui pengaruh akar dan kegiatan-kegiatan biologi yang berhubungan dengan pertumbuhan vegetatif dan pengaruhnya terhadap stabilitas struktur dan porositas tanah, dan transpirasi yang mengakibatkan kandungan air tanah berkurang. Suatu vegetasi penutup tanah yang baik seperti rumput yang tebal atau rimba yang lebat akan menghilangkan pengaruh

hujan dan topografi terhadap longsor. Akan tetapi, kebutuhan manusia akan pangan, sandang, dan pemukiman membuat semua tanah tidak dapat dibiarkan tertutup oleh hutan dan padang rumput (Arsyad, 2010). Studi kasus kejadian longsor di bagian selatan North Island, New Zealand, memperlihatkan peran penutupan hutan terhadap jumlah kejadian longsor. Sebuah foto menunjukkan dua sisi bukit dengan penutupan lahan berbeda. Satu sisi berpenutupan hutan, sementara sisi lainnya berpenutupan semak/padang rumput. Ribuan kejadian longsor terjadi di penutupan semak, berbanding terbalik dengan penutupan hutan yang memperlihatkan nol kejadian longsor (Klose, 2015). Sementara di Jamaika, data kejadian longsor pada rentang tahun 1968 – 2018 terus meningkat. Perubahan pola penggunaan lahan memberi pengaruh besar terhadap kejadian longsor. Salah satu contohnya adalah alih fungsi hutan daun lebar menjadi areal pertanian dan areal penggunaan lain.

### **2.3.2 Hidrologi**

Besarnya curah hujan, intensitas, dan distribusi hujan menentukan kekuatan tekanan hujan terhadap tanah, jumlah dan kecepatan aliran permukaan, serta kerusakan longsor (Barus, 1999). Air permukaan yang membuat tanah menjadi basah dan jenuh akan sangat rawan terhadap longsor. Hujan yang tidak terlalu lebat, tetapi durasi hujan berkepanjangan selama lebih dari satu atau dua hari akan berpeluang untuk menimbulkan tanah longsor (Soedrajat, 2007 dalam Prasektiono dkk., 2016). Berdasarkan data kejadian longsor di Jamaika sejak tahun 1980, mayoritas kejadian longsor dipicu oleh curah hujan rendah sampai sedang yang terjadi secara terus menerus selama lebih dari 24 jam. Curah hujan tinggi dalam periode waktu singkat tidak menyebabkan perpindahan massa dalam volume besar, namun lebih dominan menyebabkan aliran air permukaan dan erosi. Sebaliknya curah hujan rendah dalam waktu yang lama, menyebabkan tanah jenuh dan membentuk tekanan air pori yang rentan menimbulkan longsor. Salah satu kejadian longsor yang terjadi di Manchester Highland, Jamaika, merupakan akumulasi 1.500 mm curah hujan untuk periode waktu 11 hari. Nam dan Wang (2020) menambahkan pada curah hujan ekstrem tahunan (2008-2018) di daerah Fukumitsu, Oda dan Sakurae, Jepang (1657 mm, 1786 mm dan 2011 mm) menyebabkan 90 kejadian longsor dangkal, 63 di antaranya terjadi di tahun 2013.

### 2.3.3 Geologi

Sifat geo-teknik batuan, endapan dangkal, ataupun regolit menentukan kerawanan material yang mengalami longsor serta jenis perpindahan material longsor. Batuan kohesif memiliki mode kejadian longsor yang berbeda dengan endapan kohesif rendah dan regolit. Apabila komposisi liat dalam batuan meningkat maka lereng menjadi sensitif dengan longsor. Salah satu penyebab utama longsor adalah terbentuknya lapisan tekanan air pori. Hal ini bisa terjadi apabila sejumlah besar air masuk ke dalam tanah dan mencapai lapisan kedap air sehingga tidak dapat berpindah lagi.

Terbentuknya lapisan tekanan air pori menyebabkan gaya penahan lereng menjadi berkurang dan sebaliknya gaya peluncur meningkat. Kondisi ini meningkatkan peluang terjadinya longsor. Persoalan ini akan semakin diperparah apabila lapisan tanah yang berada di atas tekanan air pori adalah tanah lapuk yang dalam serta mengandung liat (Singh dan Bartlett, 2018). Batuan yang mengalami pelapukan serta lapisan regolit yang tebal pada kelerengan sedang sampai curam juga menjadi penyebab utama terjadinya longsor. Pelapukan batuan menjadi liat mineral menyebabkan perubahan kekuatan fisik yang linear dengan penurunan kekuatan gaya penahan. Lapisan liat menjadi jenuh akan air, dalam hal ini air memisahkan lapisan tanah dan berperilaku seperti plastik. Tingkat pemisahan lapisan tanah bergantung pada jenis liat.

Kejadian longsor terasosiasi dengan jarak suatu wilayah dari patahan, semakin dekat jarak dengan patahan maka peluang terjadinya longsor semakin besar. Garis atau zona patahan memiliki pengaruh jangka panjang terhadap kejadian longsor. Batuan yang berada dekat atau di daerah patahan berpeluang besar mengalami perubahan bentuk atau pecah akibat pergerakan lempeng (*sheared*) dan terdiri atas komponen yang bersudut dan pekat menjadi satu (*brecciated*). Lempengan yang lemah dan penurunan kekuatan gaya penahan dihasilkan oleh proses *shearing* dan *brecciated* di daerah patahan. Sedikit gaya peluncur saja dapat menyebabkan kegagalan lereng. Tidak hanya itu, daerah patahan memiliki peluang lebih besar menyebabkan pelapukan batuan oleh air menjadi lapisan liat yang berkontribusi menyebabkan longsor. Celah batuan di zona patahan meningkatkan perkolasi sehingga tekanan air pori ikut meningkat (Singh dan Bartlett, 2018).

### **2.3.4 Topografi**

Indikator faktor topografi dalam longsor adalah lereng atau kemiringan lereng. Kemiringan dan panjang lereng adalah dua unsur topografi yang paling berpengaruh besar terhadap terjadinya longsor di lahan pegunungan atau perbukitan. Unsur lain yang berpengaruh adalah konfigurasi, keseragaman, dan arah lereng. Makin curam lereng, makin besar kemungkinan gerakan tanah dari atas ke bawah lereng (Barus, 1999). Kondisi kemiringan lereng >15 % perlu mendapat perhatian terhadap kemungkinan bencana tanah longsor dan tentunya dengan mempertimbangkan faktor-faktor lain yang mendukung.

Pada penelitian lain dari Carson dan Kirkby (1972) mengamati pengaruh kurvatur terhadap kejadian longsor, dimana kelengkungan pada kelas cekung, aliran air terkonsentrasi pada sentral lengkungan yang akan meningkatkan kadar air tanah dan durasi kejenuhan tanah. Hal ini, pada gilirannya, akan meningkatkan erosi dan menurunkan stabilitas tanah.

Sebagian besar wilayah di Indonesia merupakan daerah perbukitan atau pegunungan yang membentuk lahan miring. Namun tidak selalu lereng atau lahan yang miring berpotensi longsor. Potensi terjadinya gerakan pada lereng juga tergantung pada kondisi batuan dan tanah penyusun lerengnya, struktur geologi, curah hujan, vegetasi penutup, dan penggunaan lahan pada lereng tersebut (Karnawati, 2001).

### **2.3.5 Aktivitas Seismik**

Gempa bumi biasanya akan menyebabkan kerak bumi di sekitarnya terdeformasi, baik dalam arah horizontal maupun vertikal. Dalam suatu siklus terjadinya gempa bumi, proses deformasi dapat dibagi ke dalam beberapa tahapan, yaitu: interseismik, praseismik, koseismik, dan pascaseismik (Park dan Mori, 2005; Natawidjaja dkk., 2004). Keunikan tata tektonik di Indonesia membuat setiap pulau memiliki aktivitas seismik yang berbeda.

Keberadaan lempeng Indonesia-Australia, lempeng Pasifik dan lempeng Eurasia dan lempeng Filipina membuat pulau Sulawesi menjadi lokasi kajian yang kompleks (Eva dkk., 2016). Sompotan (2012) menuturkan deformasi yang terus menerus terjadi di pulau Sulawesi diakibatkan oleh tekanan dari luar, di antaranya;

(1) tekanan laut Flores di bagian selatan mengaktifkan Sesar Palu-Koro dan Walanae; (2) tekanan Banggai-Sula dan Laut Banda dari timur mengaktifkan Sesar Matano, Batui, Lawanopo dan Kolaka; (3) Tekanan Laut Sulawesi dari utara mengaktifkan subduksi Laut Sulawesi dan Sesar Matano.

Penelitian yang dilakukan Papadopoulos dan Plessa (2000) di Yunani dan perbandingan dengan studi serupa di berbagai lokasi, memperlihatkan kejadian longsor diakibatkan gempa dengan magnitudo 5,3 – 7,9 SR, dengan rasio tertinggi pada kelas magnitudo 6,4 – 6,7. Magnitudo tinggi yang terjadi di bagian utara Yunani memperlihatkan korelasi negatif mungkin dikarenakan waktu pengulangan rerata yang rendah. Pada penelitian lain Mahdavifar dkk. (2006) mengidentifikasi 51 kejadian longsor di Gilan dan Zanjan, sisi utara Iran akibat gempa Manjil-Rudbar tahun 1990 dengan magnitudo tinggi (7.7 SR). Namun salah satu magnitudo terendah pemicu kejadian longsor sepanjang 20 m dan lebar 3 m yang pernah dipublikasikan berlokasi di Peloponnesos, bagian selatan Yunani diakibatkan oleh gempa susulan 3,8 SR yang secara kebetulan berada pada daerah *epicentral* (Papadopoulos dkk, 1994)

### **2.3.6 Faktor Antropogenik**

Tanah longsor memiliki implikasi serius bagi kehidupan manusia, habitat, dan kegiatan sosial ekonomi seperti industri dan jalur kehidupan, termasuk jaringan aksesibilitas dan sistem komunikasi (Martha dkk. 2019). Pemodelan longsor dan faktor penyebabnya telah menjadi perhatian yang berkembang karena tekanan urbanisasi (Aleotti dan Chowdhury, 1999; Sajinkumar dkk., 2011). Populasi penduduk yang bertambah tiap tahun memberikan tekanan pada sumber daya lahan, telah menyebabkan aktivitas manusia meluas ke daerah pegunungan. Hal ini mengakibatkan peningkatan kerugian sosial ekonomi karena keruntuhan lereng yang tidak stabil saat terjadi longsor (Das dkk., 2011; Hong dkk., 2017; Jones dkk., 2021).

## 2.4 Peran Pemodelan dalam Pengelolaan DAS

Daerah aliran sungai (DAS) didefinisikan sebagai suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami, yang batas di darat merupakan pemisah topografis dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (PP No. 37 tahun 2012). DAS merupakan unit pengelolaan dengan karakteristik yang unik dan berbeda di tiap tempat. Oleh karena itu, model DAS dirancang untuk memahami sistem DAS yang kompleks dan mendukung sistem pengelolaan DAS terpadu. Kajian umum yang sering dilakukan meliputi dinamika air tanah, heterogenitas distribusi vegetasi, ketersediaan air, multifungsi penggunaan lahan, erosi tanah dan lebih banyak lagi. Selain itu model DAS harus mencakup simulasi antropogenik untuk memahami jejak manusia pada proses hidrologi, ekologi, dan pengelolaannya. Ide kunci di balik pemodelan DAS dengan mengintegrasikan hubungan air, tanah, udara, vegetasi, serta manusia.

Pengelolaan DAS berdasarkan PP nomor 37 tahun 2012 merupakan upaya manusia dalam mengatur hubungan timbal balik antara sumberdaya alam dengan manusia di dalam DAS dan segala aktivitasnya, agar terwujud kelestarian dan keserasian ekosistem serta meningkatnya kemanfaatan sumberdaya alam bagi manusia secara berkelanjutan. Pengelolaan DAS secara berkelanjutan terdiri atas tiga aspek, yakni ekologi, ekonomi, dan sosial. Aspek ekologi mencakup konservasi sumber daya alam. Aspek sosial sendiri terkait dengan kelembagaan yang berfungsi sebagai regulator. Aspek tersebut di atas mendasari sasaran utama pengelolaan DAS yang terdiri atas rehabilitasi lahan, perlindungan zona inti, dan peningkatan serta pengembangan sumber daya air.

Model pengelolaan ekosistem DAS mencakup seluruh kawasan hulu hingga hilir. Ekosistem DAS terbentuk dari interaksi antara komponen biotik dan abiotik yang ditunjukkan melalui keseimbangan masukan dan keluaran. Curah hujan merupakan masukan dalam suatu DAS dan produk keluaran berupa debit air. Komponen DAS seperti vegetasi, tanah, dan saluran air berfungsi sebagai prosesor. Asdak (2010) menempatkan manusia dan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi

(IPTEK) sebagai input yang mengelola vegetasi, tanah, serta komponen DAS lainnya. Zona hulu, tengah, dan hilir memiliki karakter khususnya masing-masing. Zona hulu banyak ditetapkan menjadi kawasan lindung dan daerah konservasi. Pengelolaan DAS bagian hulu sering kali menjadi fokus perhatian, mengingat dalam suatu kawasan DAS, bagian hulu dan hilir mempunyai keterkaitan biofisik melalui daur hidrologi.

Pendekatan pemodelan kerawanan longsor berkontribusi dalam memeriksa berbagai proses ketidakstabilan dengan karakteristik geologi dan geomorfologi suatu DAS. Sebagai contoh Li dkk. (2018) menyelidiki perilaku longsor besar di bawah fluktuasi permukaan sungai. Model numerik 2D dibuat dan menggabungkan serangkaian simulasi hidro-mekanis. Analisis balik juga digunakan untuk mengkalibrasi model terhadap data lapangan nyata. Hasil menunjukkan bahwa model dapat dengan tepat mensimulasikan perilaku jangka panjang dari longsor.

Pada kajian yang lebih spesifik Tanaka dkk. (2019) menyelidiki pengaruh *soil pipes* dan udara yang terperangkap pada peningkatan tekanan air pori dengan menggunakan percobaan model *bench-scale*. Hasilnya menunjukkan bahwa meskipun *soil pipes* dapat mengalirkan sejumlah air dari lapisan tanah, pipa tersebut juga dapat meningkatkan tekanan air pori dan membuat lereng tidak stabil. Selanjutnya, udara yang terperangkap menjadi katalis dan meningkatkan efek ketidakstabilan lereng. Damiano dkk. (2012) mengembangkan dua model kompleks untuk tanah piroklastik yang memungkinkan simulasi yang benar dari proses fisik, seperti peningkatan saturasi karena infiltrasi air hujan dan degradasi mekanis sejauh ketidakstabilan tak terdrainase, yang mengatur evolusi pasca kegagalan. Kerangka kerja yang akan digunakan dalam mendefinisikan basis data tanah, serta untuk prakiraan aliran longsor yang akan digunakan untuk implementasi dalam *Early Warning Systems* (EWSs).