

**PEMODELAN SPASIAL PREDIKSI LONGSOR DI KECAMATAN MALALAK
DAN KECAMATAN IV KOTO, KABUPATEN AGAM DENGAN
MACHINE LEARNING RANDOM FOREST**

Andika Adityawarman¹, Triyatno²

^{1,2}Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Padang
andikaadtywrnm@student.unp.ac.id

ABSTRACT

The objectives of this study are: 1) spatial modeling of landslide prediction, 2) analysis of factors that contribute most to landslide occurrence, and 3) landslide prediction model as a basis for landslide disaster mitigation planning. This study uses a multivariate statistical approach with random forest machine learning, and model validation is performed by calculating the Area Under Curve (AUC) value using the R language. The variables analyzed in this study include landslide locations, slope direction, slope curvature, elevation, slope inclination, rainfall, geology, land cover, vegetation index, soil type, landform, distance from roads, and distance from rivers. The results of the study found 57 landslide locations spread across the study area. The resulting machine learning random forest produced a landslide hazard prediction map with an AUC value of 0,91, classified into five hazard level categories based on probability values: very low with an area of 5.240,98 hectares (27,64%), low with an area of 4.468,25 hectares (23,56%), moderate with an area of 4,336.05 hectares (22,86%), high with an area of 3.048,19 hectares (16,07%), and very high with an area of 1.870,42 hectares (9,86%). The largest contributing factors to landslides were slope gradient, rainfall, and distance from roads. Mitigation strategies based on the primary contributing factors to landslides include the construction of retaining walls, soil retention structures, drainage improvements, revegetation of slopes with strong root systems, and regular monitoring.

Keywords: Spatial Modeling, Landslide Hazard, Machine Learning, Random Forest, Landslide Mitigation

ABSTRAK

Tujuan dari penelitian ini untuk: 1) pemodelan spasial prediksi longsor, 2) analisis faktor yang memiliki kontribusi terbesar terjadinya longsor, dan 3) model prediksi longsor sebagai dasar perencanaan mitigasi bencana longsor. Penelitian ini menggunakan pendekatan statistik multivariat dengan *machine learning random forest* serta validasi model dilakukan melalui perhitungan nilai *Area Under Curve* (AUC) menggunakan bahasa R. Variabel yang dianalisis dalam studi ini mencakup titik kejadian longsor, arah lereng, kelengkungan lereng, elevasi, kemiringan lereng, curah hujan, geologi, tutupan lahan, indeks vegetasi, jenis tanah, bentuklahan, jarak dari jalan, dan jarak dari sungai. Hasil penelitian, ditemukan 57 titik kejadian longsor yang tersebar di wilayah penelitian. *Machine learning random forest* yang dihasilkan menghasilkan peta prediksi bahaya longsor dengan nilai AUC sebesar 0,9062 yang diklasifikasikan ke dalam lima kategori tingkat bahaya berdasarkan nilai probabilitas, yaitu sangat rendah dengan luas 5.240,98 hektar (27,64%), rendah dengan luas 4.468,25 hektar (23,56%), sedang dengan luas 4.336,05 hektar (22,86%), tinggi dengan luas 3.048,19 hektar (16,07%), dan sangat tinggi dengan luas 1.870,42 hektar (9,86%). Kontribusi faktor terbesar terjadinya longsor adalah kemiringan lereng, curah hujan, dan jarak dari jalan. Strategi mitigasi berdasarkan faktor kontribusi terbesar terjadinya longsor meliputi pembangunan dinding penahan tanah, beronjong, peningkatan tata salir, revegetasi lereng berakar kuat, dan pemantauan berkala.

Kata Kunci: Pemodelan Spasial, Bahaya Longsor, *Machine Learning*, *Random Forest*

A. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara yang terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik. Kondisi ini menyebabkan wilayah Indonesia memiliki tingkat bahaya tinggi terhadap berbagai bencana geologi, salah satunya adalah bencana longsor. Menurut Undang-Undang Nomor 24 Tahun 2007, longsor termasuk dalam kategori gerakan massa tanah akibat terganggunya kestabilan lereng yang disebabkan oleh faktor internal maupun eksternal. Salah satu pemicu utama adalah kejenuhan air dalam tanah yang

melemahkan kohesi tanah dan meningkatkan beban lereng.

Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 2015-2024, terjadi sebanyak 4.650 kejadian longsor di Indonesia dengan peningkatan terbanyak sejak tahun 2018. Pada tahun 2022 saja, tercatat 538 kejadian longsor yang tersebar di seluruh provinsi, menyebabkan kerusakan infrastruktur, korban jiwa, dan gangguan aktivitas ekonomi.

Provinsi Sumatera Barat merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerawanan longsor yang tinggi. Topografi bergunung dan perbukitan,

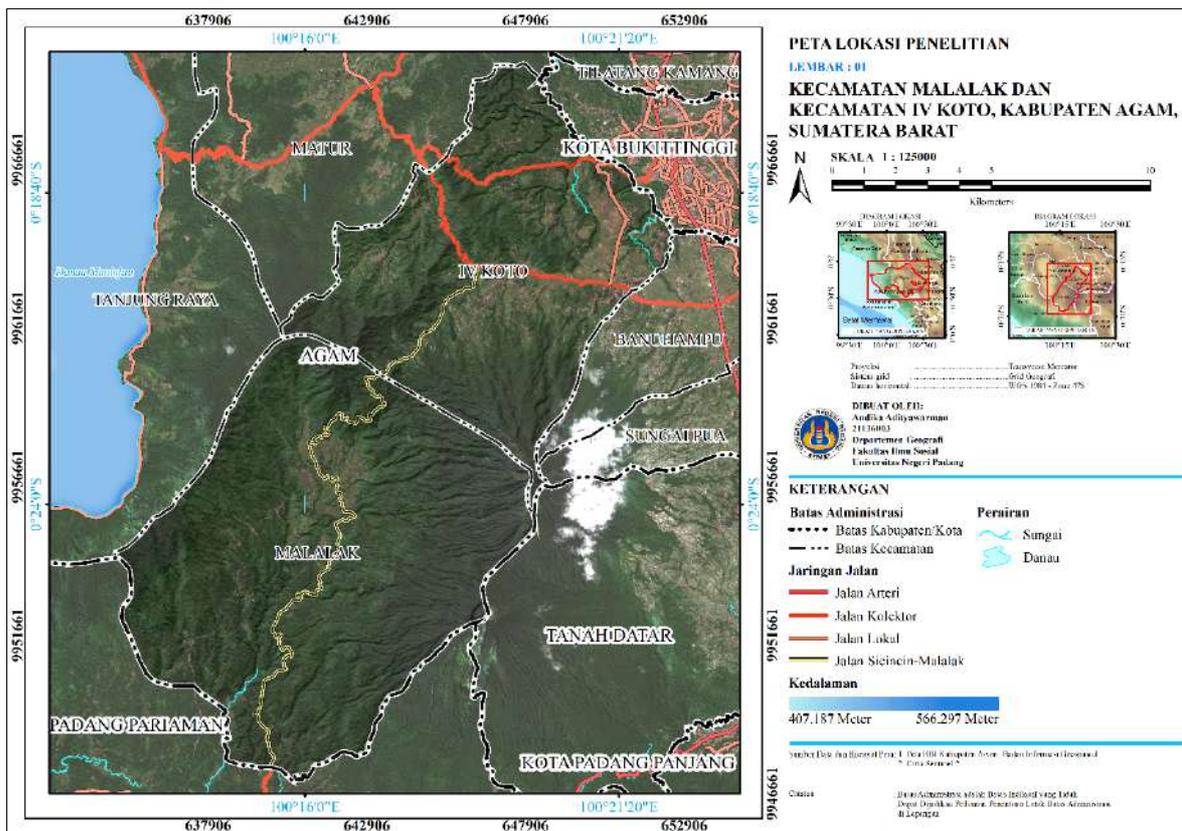
curah hujan tinggi, serta kondisi geologi yang kompleks menyebabkan daerah ini sangat berbahaya terhadap longsor, khususnya di sepanjang Bukit Barisan. Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto di Kabupaten Agam merupakan dua wilayah yang secara historis sering mengalami longsor, terutama di sepanjang Ruas Jalan Sicincin-Malalak yang merupakan jalur alternatif penghubung antarwilayah strategis. Berdasarkan data BPBD Kabupaten Agam (2019-2024), terdapat lebih dari 50 kejadian longsor di dua kecamatan tersebut yang menyebabkan penutupan jalan, kerusakan infrastruktur, serta gangguan sosial ekonomi.

Studi terdahulu menunjukkan bahwa faktor-faktor seperti kemiringan lereng, curah hujan, kondisi geologi, tutupan lahan, dan jenis tanah memiliki hubungan kuat dengan potensi terjadinya longsor. Oleh karena itu, pemodelan prediksi longsor berbasis spasial menjadi penting dalam upaya mitigasi risiko bencana. Salah satu metode yang dinilai efektif adalah pendekatan statistik multivariat dengan *machine learning Random Forest* yang mampu menangani banyak variabel prediktor sekaligus menghasilkan akurasi tinggi dalam pemetaan bahaya. Penelitian ini bertujuan untuk 1) pemodelan spasial prediksi longsor, 2) analisis faktor yang memiliki kontribusi terbesar terjadinya longsor, dan 3) model prediksi longsor sebagai dasar perencanaan mitigasi bencana longsor.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode statistik multivariat berbasis *machine learning Random Forest* untuk pemodelan spasial prediksi longsor. Validasi model dilakukan melalui perhitungan nilai *Area Under Curve* (AUC) menggunakan bahasa R. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk merancang penelitian yang terstruktur dan terukur, dengan menyusun hipotesis yang dapat diuji secara empiris (Creswell, 2023). Tujuan utama dari pemodelan ini adalah untuk mengidentifikasi tingkat bahaya longsor dan menganalisis faktor-faktor dominan yang berkontribusi terhadap kejadian longsor.

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Agam tepatnya Kecamatan Malalak yang secara geografis berada pada koordinat 0° 25' 1" Lintang Selatan sampai 100° 16' 14" Bujur Timur dan Kecamatan IV Koto yang secara geografis berada pada koordinat 0° 19' 57" Lintang Selatan sampai 100° 19' 8" Bujur Timur. Kecamatan Malalak memiliki luas 11.185 hektar dan Kecamatan IV Koto memiliki luas 7.778 hektar yang terletak di daerah berbukit dengan curah hujan tinggi, menjadikannya sebagai salah satu daerah bahaya bencana longsor di Kabupaten Agam yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Sumber: Pengolahan Data Sekunder Administrasi Kabupaten Agam, 2025

Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah titik kejadian longsor sebagai variabel respons, arah lereng, kelengkungan lereng, elevasi, kemiringan lereng, curah hujan, geologi, tutupan lahan, indeks vegetasi, jenis tanah, bentuklahan, jarak dari jalan, dan jarak dari sungai sebagai variabel prediktor. Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah ArcGIS 10.8, QGIS 3.34.8, dan *Google Colab*.

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan data sekunder. Data primer adalah sumber data yang langsung memberikan data kepada pengumpul data. Sumber data primer didapatkan melalui observasi atau pengamatan langsung di lapangan. Data sekunder adalah merupakan sumber data yang

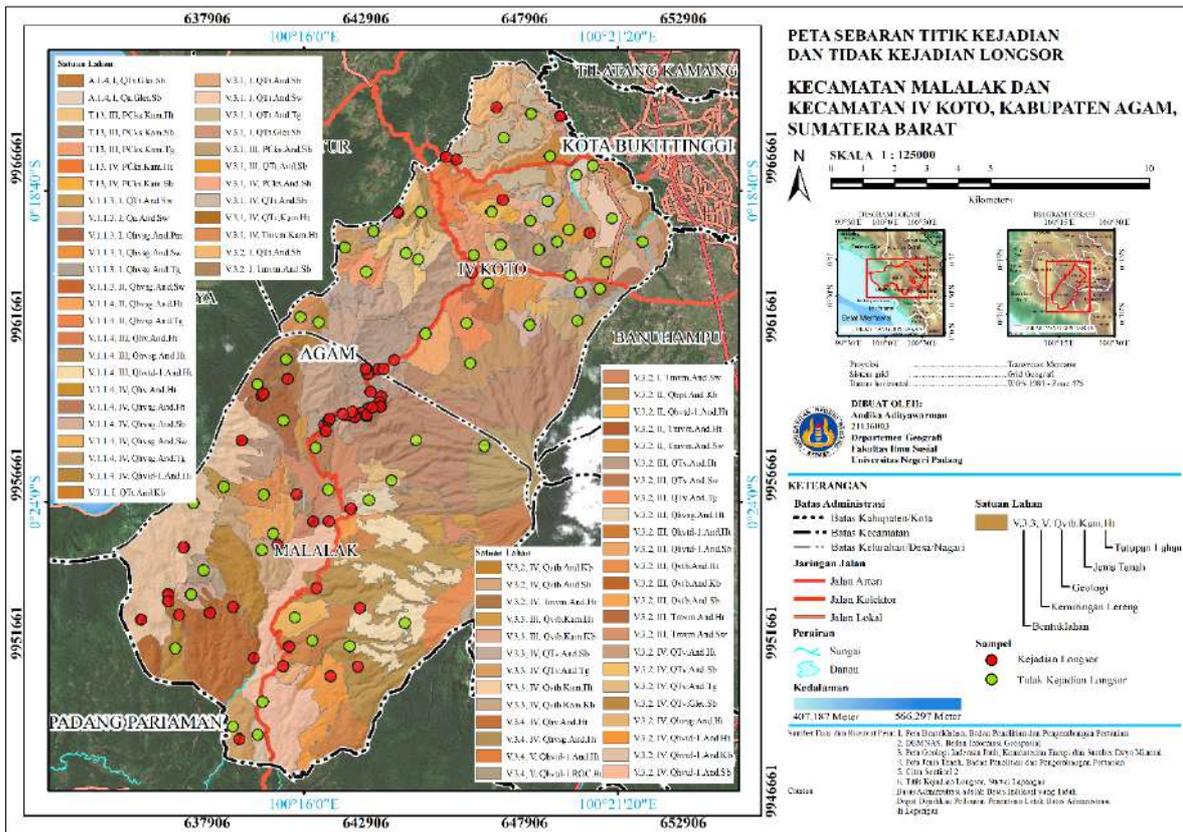
tidak langsung memberikan data kepada pengumpul data, misalnya melalui orang lain atau lewat dokumen. Sumber data sekunder digunakan untuk mendukung informasi yang didapatkan dari sumber data primer, yaitu dari bahan pustaka, literatur, penelitian terdahulu, buku, dan laporan-laporan kegiatan lainnya. Data primer yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah mengambil titik koordinat kejadian longsor di lokasi penelitian. Data sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini adalah data *Digital Elevation Model* (DEM) dari Inageoportal, data curah hujan dari Dinas Sumber Daya Air dan Bina Konstruksi, data jenis tanah dan bentuklahan dari Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, data indeks

tutupan lahan dan indeks vegetasi dari Citra Sentinel 2, data geologi dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Alam, serta data jaringan jalan dan jaringan sungai dari Badan Informasi Geospasial.

C. Hasil Penelitian dan Pembahasan Hasil

1. Model Prediksi Longsor

a. Titik Kejadian dan Tidak Kejadian Longsor



Sumber: Pengolahan Titik Sampel

Gambar 2 Peta Sebaran Titik Kejadian Longsor dan Titik Tidak Kejadian Longsor, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam

Dalam pemodelan spasial prediksi longsor menggunakan dua jenis kejadian, yaitu titik kejadian longsor dan titik tidak kejadian longsor. Titik kejadian adalah lokasi-lokasi yang tercatat pernah mengalami longsor berdasarkan inventarisasi longsor historis, baik melalui survei lapangan maupun dokumen data bencana oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD). Titik tidak kejadian adalah lokasi-lokasi tidak pernah mengalami

longsor untuk melatih model dalam *Machine Learning Random Forest* yang dipilih berdasarkan peta satuan lahan agar persebaran lebih representatif di seluruh wilayah studi. Peta satuan lahan disusun berdasarkan keseragaman karakteristik bentuklahan, kemiringan lereng, geologi, jenis tanah, dan tutupan lahan dengan klasifikasi penamaan sesuai dengan Rancangan Standar Nasional Indonesia 8473:2024. Peta titik kejadian longsor dan tidak longsor di

Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2, terdapat 57 titik kejadian longsor yang diambil dari survei lapangan yang tersebar dalam 24 satuan lahan di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto. Titik kejadian longsor terbanyak berada di satuan lahan V.3.2, IV, QTv.And.Ht sebanyak 17 titik, V.3.2, III, QTv.And.Ht sebanyak 9 titik, V.3.2, IV, Qvtb.And.Kb sebanyak 3 titik, V.3.3, IV, Qvtb.Kam.Ht sebanyak 3 titik, dan V.3.2, III, Qvtb.And.Kb sebanyak 3 titik, sedangkan 57 titik tidak longsor diambil berdasarkan satuan lahan agar persebaran lebih representatif di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto.

b. Variabel Prediktor

1) Arah Lereng (*Aspect*)

Arah lereng mengklasifikasikan arah hadap lereng menjadi 10 kelas yang terdiri dari Datar (-1-0) dengan luas 346,52 hektar (1,83%), Utara (0-22,50) dengan luas 889,16 hektar (4,69%), Timur Laut (22,50-67,50) dengan luas 2.027,48 hektar (10,69%), Timur (67,50-112,50) dengan luas 2.050,45 hektar (10,81%), Tenggara (112,50-157,50) dengan luas 2.045,27 hektar (10,79%), Selatan (157,50-202,50) dengan luas 2.326,49 hektar (12,27%), Barat Daya (202,50-247,50) dengan luas 2.672,80 hektar (14,09%), Barat (247,50-292,50) dengan luas 2.867,54 hektar (15,12%), Barat Laut (292,50-337,50) dengan luas 2.739,68 hektar (14,45%), dan Utara (337,50-360) dengan luas

998,51 hektar (5,27%) berdasarkan rentang derajat azimuth.

2) Kelengkungan Lereng (*Curvature*)

Kelengkungan lereng adalah bentuk geometris permukaan lereng berdasarkan tingkat kelengkungan pada setiap titik permukaan tanah yang terdiri dari Cembung dengan luas 7.657,95 hektar (40,38%), Datar dengan luas 3.252,65 hektar (17,15%), dan Cekung 8.053,29 hektar (42,47%).

3) Elevasi

Elevasi merupakan gambaran ketinggian permukaan tanah terhadap permukaan laut di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berupa peta elevasi seperti pada Gambar (iii). Peta elevasi mengklasifikasikan ketinggian yang terdiri dari elevasi rendah (224-600 meter) dengan persentase 11,19%, elevasi sedang (600-1.400 meter) dengan persentase (58,72%), dan elevasi tinggi (1.400-2.869 meter) dengan persentase 30,09%.

4) Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng adalah gambaran sudut kemiringan permukaan tanah yang terdiri dari lereng Datar (0-8°) dengan luas 2.881,59 hektar (15,20%), Landai (8-15°) dengan luas 3.769,24 hektar (19,88%), Agak Curam (15-25°) dengan luas 5.529,86 hektar (29,16%), dan Sangat Curam dengan luas 446,36 hektar (2,35%).

5) Curah Hujan

Curah hujan merupakan jumlah curah hujan tahunan yang diukur melalui pos curah hujan terdekat di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto. Titik

pengamatan diinterpolasi menggunakan interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) yang menghasilkan peta curah hujan seperti pada Gambar (v).

6) Geologi

Geologi mengidentifikasi material induk yang mempengaruhi kekuatan geser, permeabilitas, dan proses pelapukan di lereng. Peta geologi mengklasifikasikan litologi yang terdiri dari PCks dengan luas 875,50 hektar (4,62%), Qa dengan luas 414,49 hektar (2,19%), Qhpt dengan luas 137,31 hektar (0,72%), Qhv dengan luas 457,97 hektar (2,41%), Qhvsg dengan luas 4.066,73 hektar (21,44%), Qhvtd-1 dengan luas 3.909,87 hektar (20,62%), Qhvtd-2 dengan luas 15,78 hektar (0,08%), QTt dengan luas 2.134,94 hektar (11,26%), QTv dengan luas 2.619,52 hektar (13,81%), Qvtb 3.259,27 hektar (17,19%), dan Tmvm dengan luas 1.072,51 hektar (5,66%) seperti pada Gambar (vi).

7) Tutupan Lahan

Tutupan lahan bentuk fisik dari permukaan bumi yang diamati dan dipetakan secara spasial mencakup vegetasi alami permukaan air, lahan kosong, dan struktur buatan manusia di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berupa peta tutupan lahan. Peta tutupan lahan mengklasifikasikan jenis tutupan yang terdiri dari Danau/Situ dengan luas 0,51 hektar (0,00%), Empang dengan luas 0,39 hektar (0,00%), Gedung/Bangunan dengan luas 0,67 hektar (0,00), Hutan Rimba dengan luas 10.289,28 hektar

(54,26%), Pasir/Bukit Pasir Darat dengan luas 5,91 hektar (0,03%), Perkebunan/Kebun dengan luas 1.583,03 hektar (8,35%), Permukiman dengan luas 286,46 hektar (1,51%), Sawah dengan luas 2.021,70 hektar (10,66%), Semak Belukar dengan luas 3.307,70 hektar (17,44%), Sungai dengan luas 19,76 hektar (0,10%) persen, Tegalan/Ladang dengan luas 1.448,47 hektar (7,64%) seperti pada Gambar (vii).

8) Indeks Vegetasi

Indeks vegetasi merupakan indeks yang mengukur intensitas tutupan dan kesehatan vegetasi. Vegetasi lebat (nilai indeks tinggi) meningkatkan kohesi tanah melalui sistem perakaran dan mengurangi erosi permukaan, sehingga memperkuat kestabilan lereng. Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam secara keseluruhan memiliki indeks vegetasi yang cukup baik, di mana wilayah tertutup vegetasi sedang hingga lebat seperti pada Gambar (viii).

9) Jenis Tanah

Jenis tanah adalah kategori tanah yang diklasifikasikan berdasarkan sifat fisik, kimia, dan mineralogi horizon tanah serta bahan induk dan proses pembentukannya di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berupa peta jenis tanah. Peta jenis tanah mengklasifikasikan kategori tersebut yang terdiri dari Andosol Haplik dengan luas 15.937,61 hektar (84,04%), Gleisol Distrik dengan luas 600,32 hektar (3,17%),

Kambisol Distrik dengan luas 2.382,24 hektar (12,56%), dan ROC dengan luas 43,71 hektar (0,23%) seperti pada Gambar (ix).

10) Bentuklahan

Bentuklahan merupakan unit geomorfologi permukaan yang diklasifikasikan berdasarkan asal-usul proses pembentukannya (vulkanik, tektonik, maupun erosi), bentuk topografi, dan karakteristik material penyusunnya di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berupa peta bentuklahan. Peta bentuklahan mengklasifikasikan unit tersebut yang terdiri dari Dataran Vulkan Tua dengan luas 2.020,45 hektar (10,65%), Kawah (*Cone*) dengan luas 43,71 hektar (0,23%), Lereng Vulkan Atas dengan luas 868,02 hektar (4,58%), Lereng Vulkan Tengah dengan luas 4.792,64 hektar (25,27%), Pegunungan Tektonik dengan luas 761,38 hektar (4,01%), Pegunungan Vulkan Tua dengan luas 1.556,34 hektar (8,21%), Pelebahan Sempit antara Dataran Tinggi dengan luas 316,94 hektar (1,67%), Perbukitan Vulkan Tua dengan luas 7.572,87 hektar

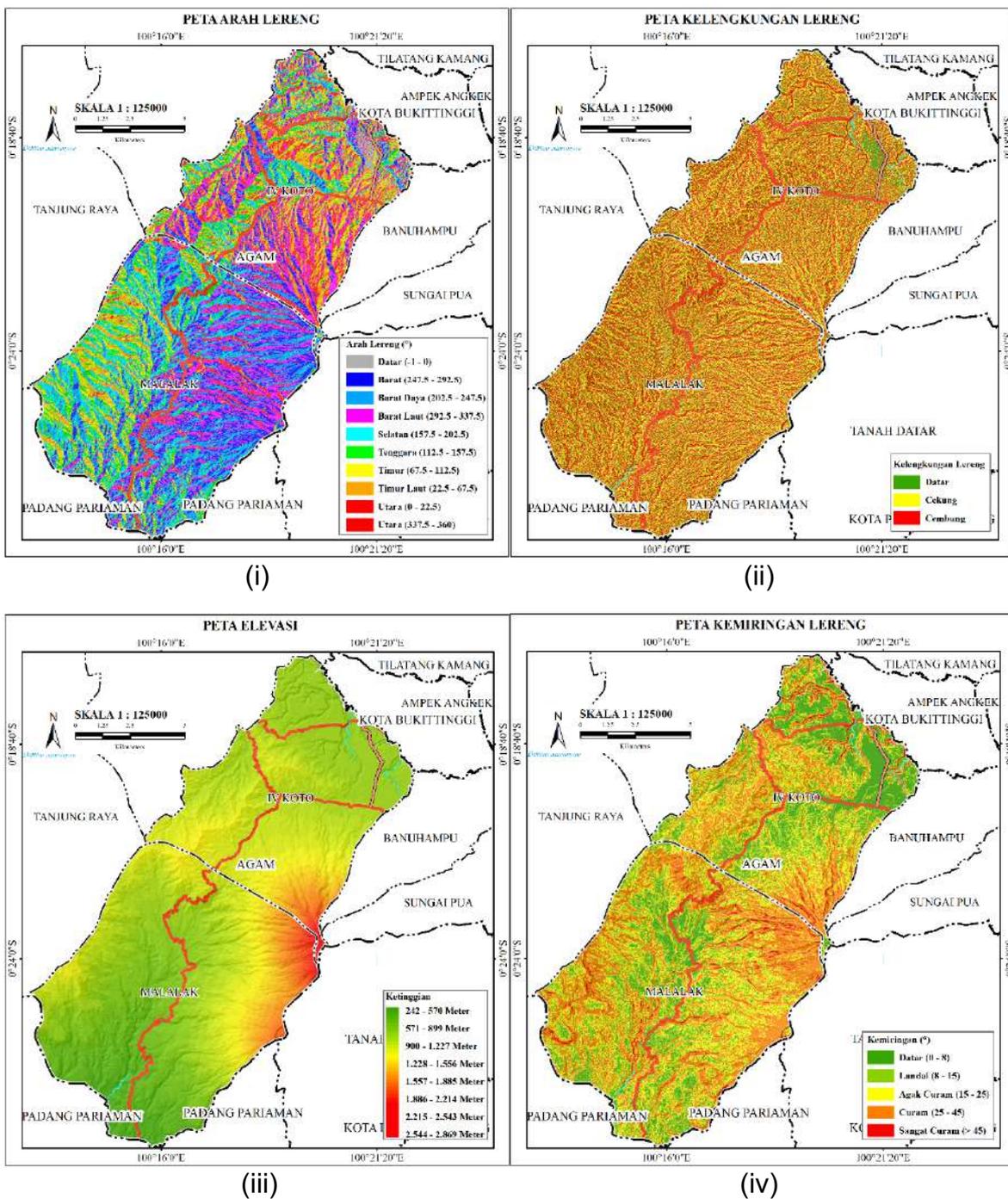
(39,93%), *Plateau* Vulkan dengan luas 1.031,53 hektar (5,44%) seperti pada Gambar (x).

11) Jarak dari Jalan

Jarak dari jalan menampilkan jarak radial yang berkisar dari 0 meter (sangat dekat jalan) hingga jarak maksimum. Jarak dari jalan di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berkisar dari 0 sampai 5.420,59 meter, menunjukkan area yang sangat dekat dengan jaringan jalan (0 meter) hingga area yang sangat jauh dengan jarak lebih dari 5.000 meter dari jalan terdekat seperti pada Gambar (xi).

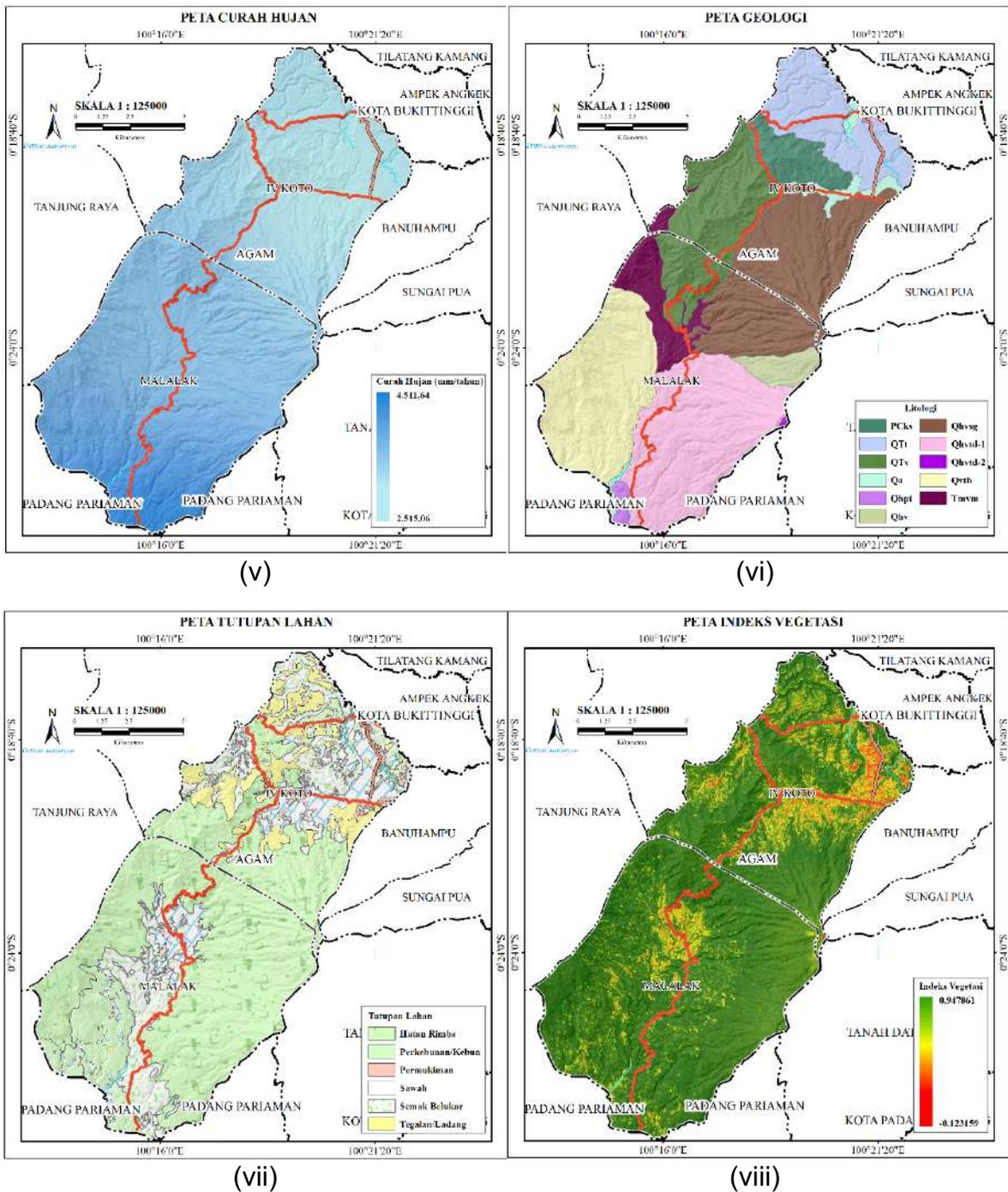
12) Jarak dari Sungai

Jarak dari sungai menggambarkan seberapa jauh setiap lokasi berada dari jaringan sungai terdekat, kemudian dikelompokkan ke dalam beberapa zona dalam analisis spasial. Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, jarak dari sungai berkisar antara 0 hingga 10.335,08 meter, menunjukkan variasi lokasi dari yang sangat dekat hingga lebih dari 10.000 meter dari aliran sungai terdekat seperti pada Gambar (xii).



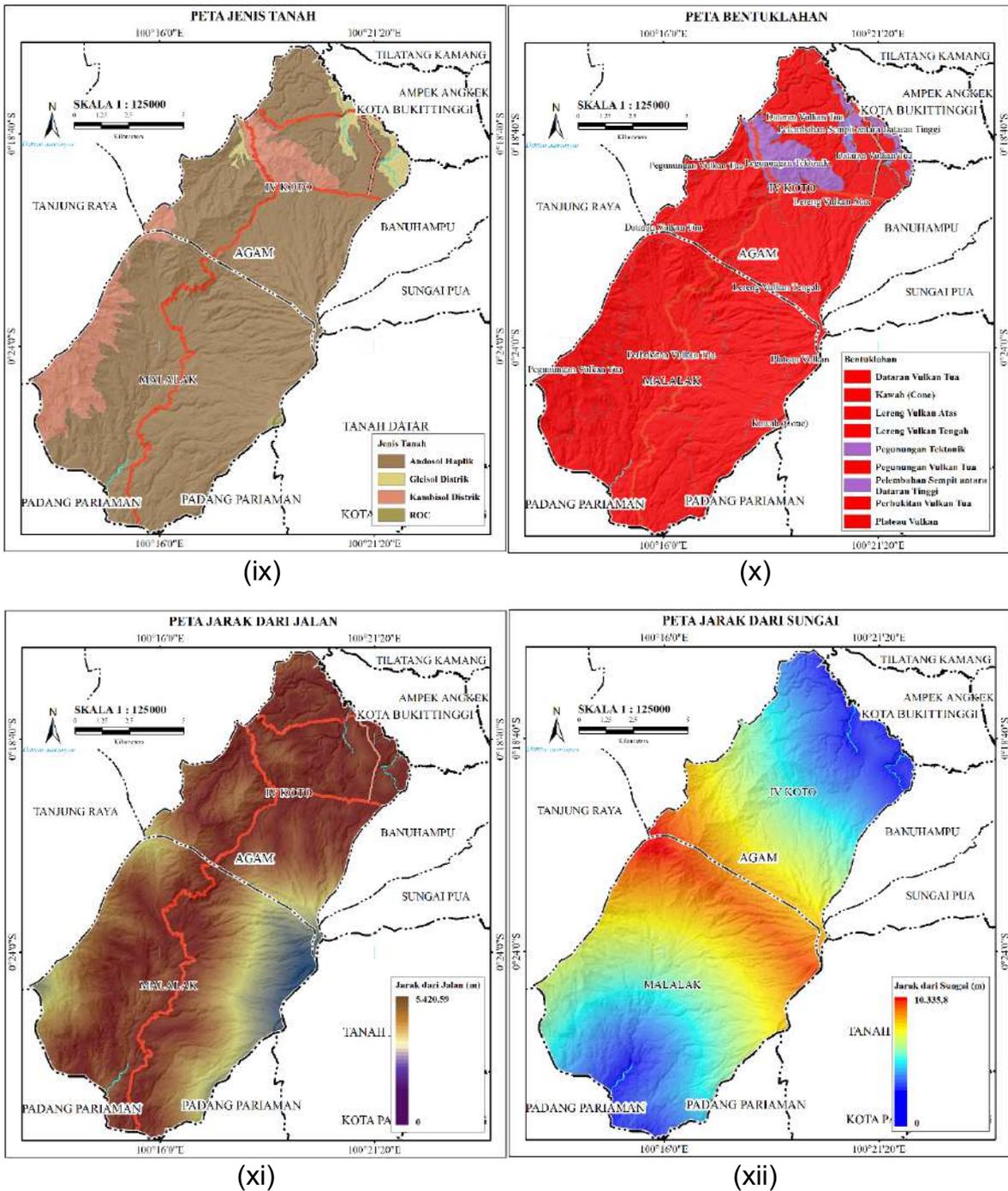
Sumber: Peneliti, 2025

Gambar 3 Variabel Prediktor Peta Arah Lereng (i), Peta Kelengkungan Lereng (ii), Peta Elevasi (iii), dan Peta Kemiringan Lereng (iv)



Sumber: Peneliti, 2025

Gambar 4 Variabel Prediktor Peta Curah Hujan (v), Peta Geologi (vi), Peta Tutupan Lahan (vii), dan Peta Indeks Vegetasi (viii)



Sumber: Peneliti, 2025

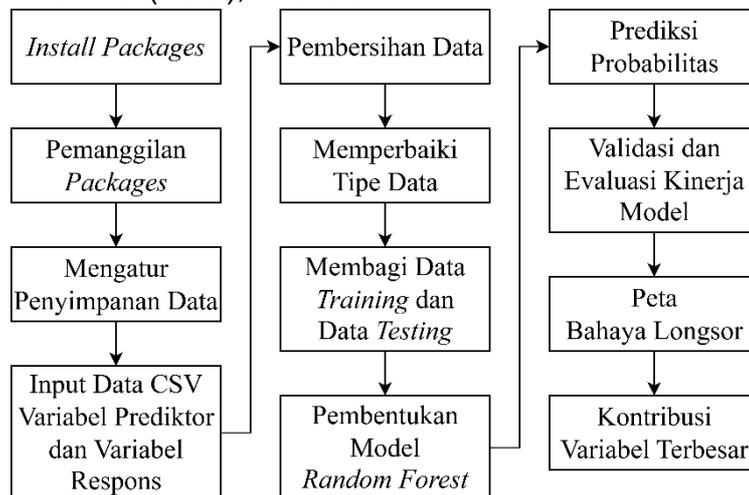
Gambar 5 Variabel Prediktor Peta Jenis Tanah (ix), Peta Bentuklahan (x), Peta Jarak dari Jalan (xi), dan Peta Jarak dari Sungai (xii)

Model prediksi longsor *Random Forest* disusun menggunakan 12 variabel prediktor dan variabel respons, yaitu 114 titik (longsor dan tidak longsor). Variabel yang disusun dilakukan proses *overlay* antara variabel prediktor dengan

variabel respons. Hasil *overlay* tersebut kemudian diekspor menjadi *file* CSV melalui *software* QGIS. Data hasil *overlay* ini dibagi menjadi dua bagian, yaitu 80% sebagai data *training* untuk membangun model *Random Forest*, dan

20% sisanya sebagai data *testing* untuk melakukan validasi kinerja model. Selanjutnya, dilakukan perhitungan probabilitas prediksi, validasi model melalui kurva ROC dengan menghitung nilai *Area Under Curve* (AUC), analisis

kontribusi variabel terbesar, dan menghasilkan peta bahaya longsor menggunakan bahasa R. Alur pengolahan model prediksi longsor terlihat pada Gambar 6.



Sumber: Peneliti, 2025

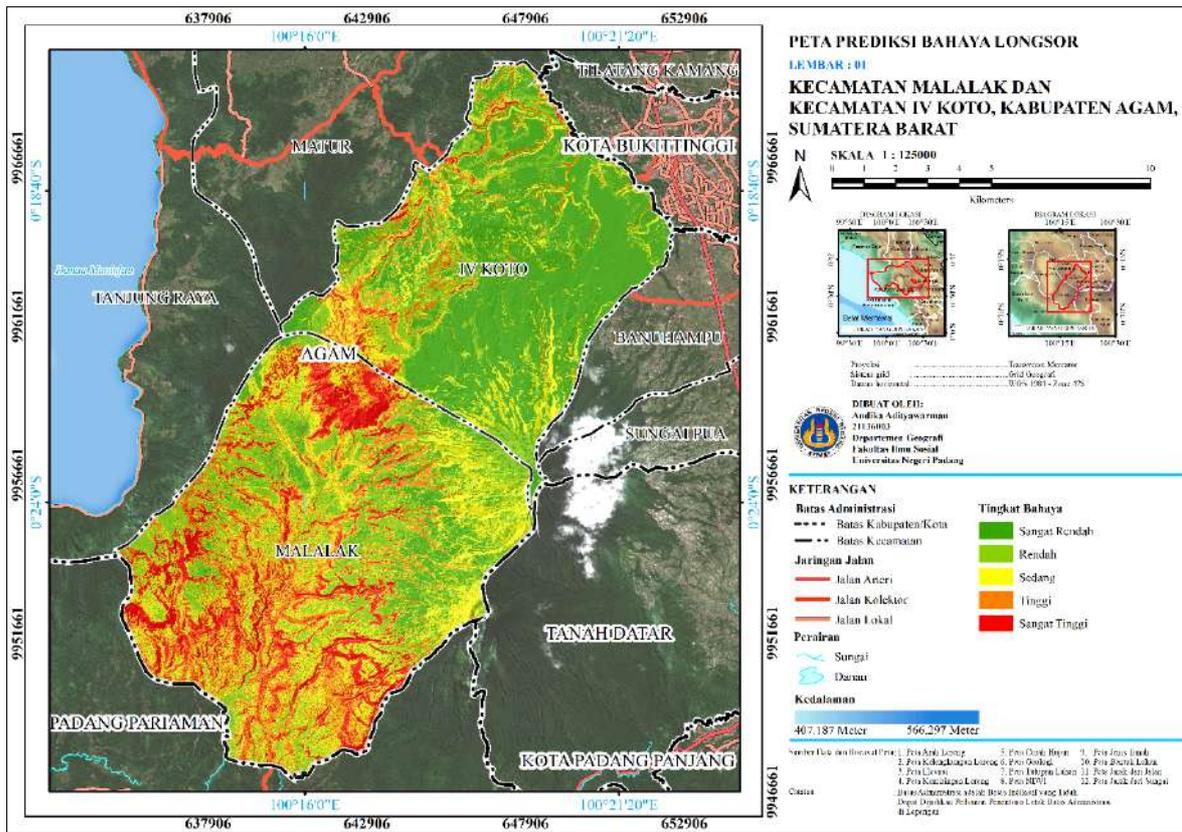
Gambar 6 Alur Pengolahan Model Prediksi Longsor

c. Model Prediksi Longsor

Model prediksi longsor dengan *machine learning Random Forest* yang telah dilatih menggunakan 12 variabel prediktor menghasilkan peta prediksi bahaya longsor. Kelas bahaya longsor ditentukan berdasarkan nilai probabilitas hasil pemodelan, kemudian diklasifikasikan dengan metode *Jenks Natural Breaks* ke dalam lima kelas bahaya, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menggunakan *software ArcGIS* yang dapat dilihat pada Gambar 7. *Natural Breaks (Jenks Natural Breaks)* merupakan metode klasifikasi spasial yang untuk mengidentifikasi *breakpoints* alami dalam distribusi probabilitas keluaran model, sehingga

meminimalkan variasi dalam setiap kelas dan memaksimalkan variasi antar kelas (Phuyal et al., 2022).

Peta prediksi bahaya longsor di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto menampilkan lima tingkat bahaya longsor berdasarkan nilai probabilitas model *Random Forest* dengan luas dan persentase terdiri dari Sangat Rendah dengan luas 5.240,98 hektar (27,64%), diikuti kelas bahaya Rendah dengan luas 4.468,25 hektar (23,56%), kelas bahaya Sedang dengan luas 4.336,05 hektar (22,86%), kelas bahaya Tinggi dengan luas 3.048,19 hektar (16,07%), dan kelas bahaya Sangat Tinggi dengan luas 1.870,42 hektar (9,86%).



Sumber: Pengolahan Model Prediksi Longsor, 2025

Gambar 7 Peta Prediksi Bahaya Longsor Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam

d. Validasi dan Evaluasi Kinerja Model

1) Confusion Matrix

Matriks ini menampilkan tentang seberapa baik model dapat mengklasifikasikan setiap kelas dengan menampilkan empat komponen, yaitu *True Positive* (TP), *True Negative* (TN), *False Positive* (FP), dan *False Negative* (FN) seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Confusion Matrix

Prediksi	0	1	<i>Class Error</i>
0	37	10	0,21
1	14	30	0,32

Sumber: Pengolahan Model Prediksi Longsor, 2025

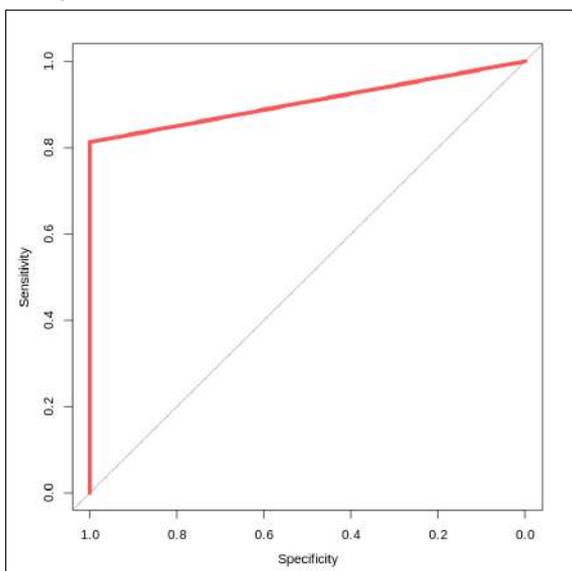
Pada Tabel 1, menunjukkan bahwa representasi detail tentang seberapa baik model dapat mengklasifikasikan setiap kelas adalah sebagai berikut.

- a) TN = 37, menunjukkan model berhasil memprediksi 37 sampel sebagai tidak longsor dengan benar.
- b) FP = 10, menunjukkan model salah memprediksi 10 sampel sebagai longsor padahal sebenarnya tidak longsor.
- c) FN = 14, menunjukkan model salah memprediksi 14 sampel sebagai tidak longsor padahal sebenarnya longsor.

d) TP = 30, menunjukkan model berhasil memprediksi 30 sampel sebagai longsor dengan benar.

2) Analisis Kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) dan Nilai *Area Under the Curve* (AUC)

Kurva ROC memberikan visualisasi tentang hubungan antara sensitivitas (kemampuan mendeteksi kasus positif) dan spesifisitas (kemampuan mendeteksi kasus negatif) dalam model prediksi yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Sumber: Pengolahan Model Prediksi Longsor, 2025

Gambar 8 Kurva ROC Model Prediksi Longsor

2. Analisis Faktor Kontribusi Variabel Terbesar Terjadinya Longsor

a. Tingkat Kepentingan Variabel

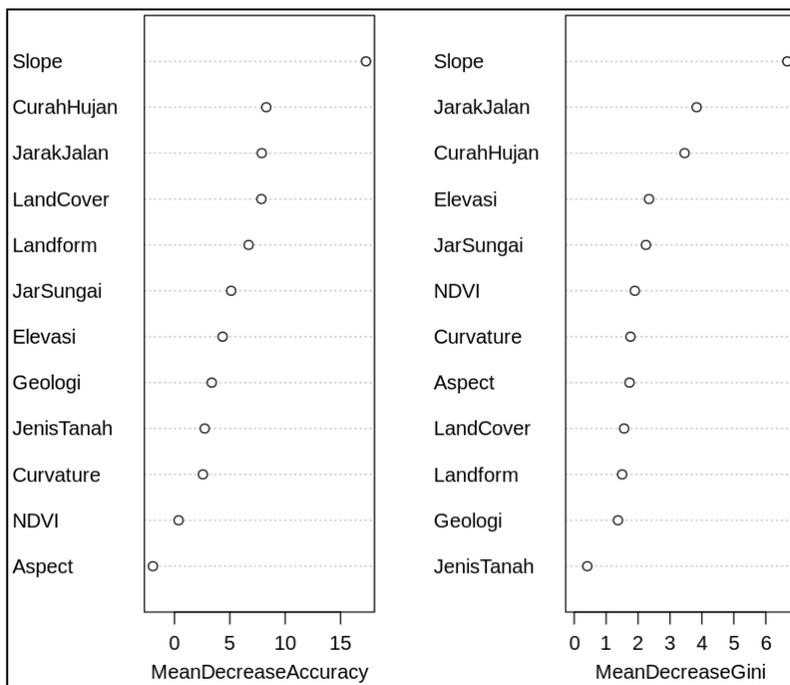
Tingkat pentingnya suatu variabel diperoleh dari nilai *Mean Decrease Accuracy* (MDA) dan *Mean Decrease Gini* (MDG). MDA merupakan tingkat penurunan akurasi model ketika nilai suatu variabel diacak secara acak di semua pohon. Nilai ini diperoleh dengan membandingkan akurasi model asli dengan akurasi model setelah satu fitur dihapus. Semakin besar penurunan akurasi, semakin signifikan peran fitur tersebut dalam model. MDG merupakan pengurangan impuritas yang dihasilkan oleh variabel di seluruh pohon. Nilai ini dihitung berdasarkan penurunan *Gini Impurity* setiap kali fitur digunakan dalam proses pembagian data. Semakin tinggi nilai MDG, semakin besar pengaruh fitur dalam memperbaiki kualitas pemisahan data dalam model. Model prediksi longsor yang telah dibuat dapat menampilkan tingkat kepentingan variabel prediktor melalui nilai grafik MDA dan MDG pada Tabel 2 dan Gambar 9.

Tabel 2 Nilai *Mean Decrease Accuracy* dan Nilai *Mean Decrease Gini*

Variabel	MDA	MDG	Variabel
<i>Aspect</i>	-1,95	1,73	<i>Aspect</i>
<i>Landform</i>	6,70	1,50	<i>Landform</i>
<i>Curvature</i>	2,57	1,76	Curah Hujan
<i>Slope</i>	17,30	6,67	<i>Curvature</i>
Jenis Tanah	2,73	0,41	Elevasi
Geologi	3,37	1,37	Geologi
NDVI	0,37	1,90	Jarak dari Jalan

Variabel	MDA	MDG	Variabel
<i>Land Cover</i>	7,85	1,56	Jarak dari Sungai
Jarak dari Jalan	7,88	3,83	Jenis Tanah
Elevasi	4,35	2,34	<i>Slope</i>
Curah Hujan	8,29	3,46	NDVI
Jarak dari Sungai	5,12	2,25	<i>Land Cover</i>

Sumber: Analisis *Feature Importance* Model Prediksi Longsor, 2025



Sumber: Tingkat Kepentingan Variabel Model Prediksi Longsor

Gambar 9 Tingkat Kepentingan Variabel Model Prediksi Longsor

Pada Tabel 2 dan Gambar 9, dalam *machine learning Random Forest* prediksi longsor di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, variabel yang paling penting adalah kemiringan lereng (*slope*) dengan nilai MDA tertinggi 17,30 dan MDG 6,67. Kedua, curah hujan (*rainfall*) juga memegang peranan penting, dengan nilai MDA 8,29 dan MDG 6,32. Jarak dari jalan (*distance to road*) menduduki kepentingan variabel ketiga berdasarkan MDA 7,88 dan MDG 4,60, selanjutnya tutupan lahan (*land cover*) dengan MDA 7,85 dan MDG 4,19. Variabel elevasi (MDA 4,35; MDG

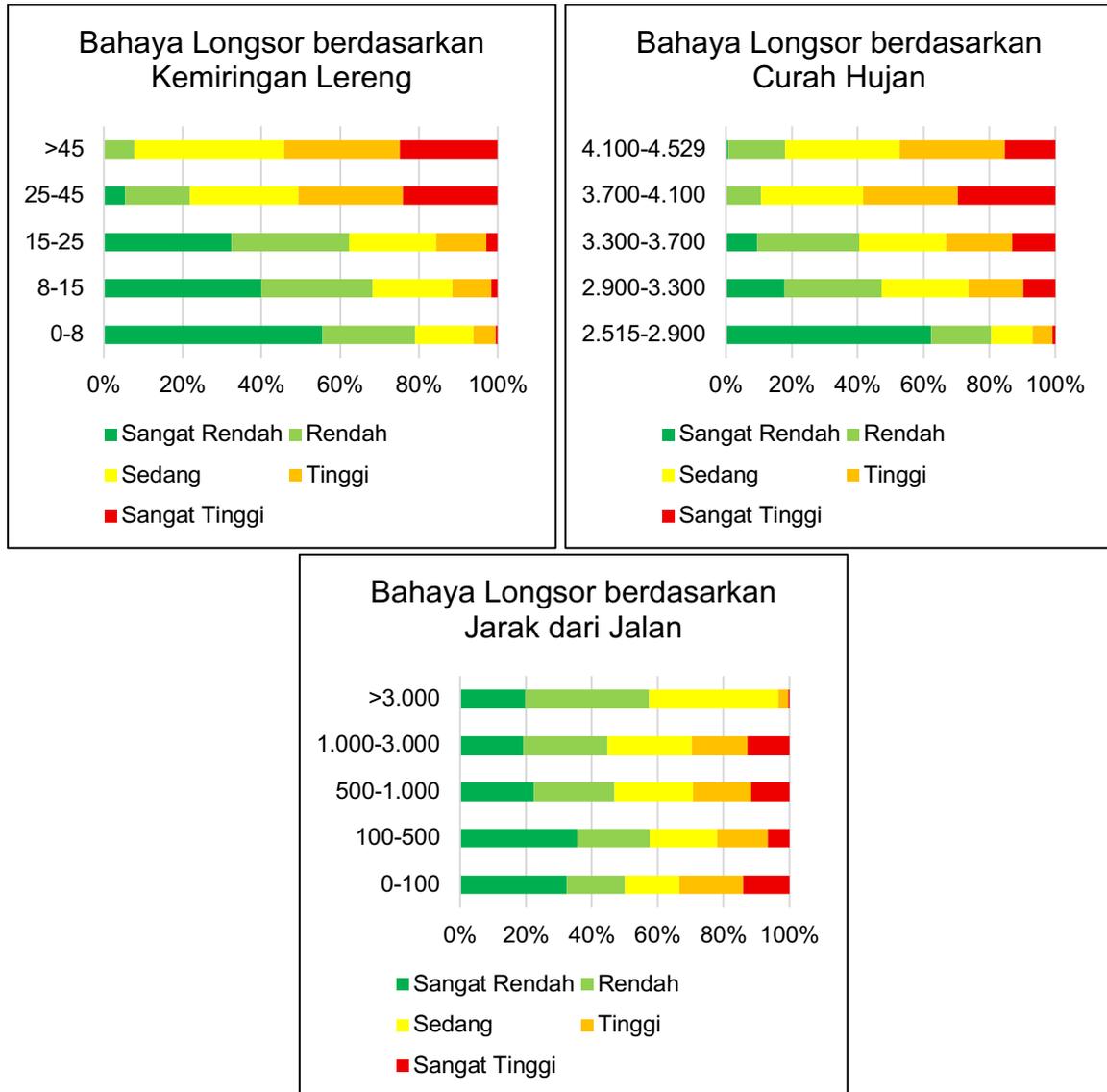
4,34) dan jarak dari sungai (MDA 5,12; MDG 3,52).

b. Bahaya Longsor dalam Variabel Kontribusi Terbesar

Model prediksi longsor di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto menghasilkan tiga variabel kontribusi terbesar melalui analisis *feature importance* yang menentukan tingkat bahaya longsor di wilayah studi, yaitu kemiringan lereng, curah hujan, dan jarak dari jalan seperti pada Gambar 10.

Tingkat bahaya longsor berubah seiring dengan peningkatan kemiringan lereng. Pada kemiringan 0-8°, tingkat

bahaya Sangat Rendah mendominasi sebesar 55,9%, diikuti tingkat bahaya Rendah 23,7%, tingkat bahaya Sedang 14,8%, tingkat bahaya Tinggi 5,8%, dan



Sumber: Analisis *Feature Importance* Model Prediksi Longsor, 2025

Gambar 10 Bahaya Longsor Berdasarkan Kontribusi Variabel Terbesar

Sangat Tinggi hanya 0,4%. Kemiringan curam 25-45° meningkatkan bahaya tinggi, di mana hanya 6,90% tingkat bahaya Sangat Rendah, 21,20% tingkat bahaya Rendah, 35,60% tingkat bahaya Sedang, 34,20% tingkat bahaya Tinggi, dan 30,90% tingkat bahaya Sangat Tinggi. Pada kemiringan ekstrem > 45°, tingkat bahaya Sangat Rendah tidak ada, tingkat bahaya Rendah 6,30%, tingkat bahaya Sedang 30,7%, tingkat

bahaya Tinggi 23,80%, serta tingkat bahaya Sangat Tinggi 20,10%. Curah hujan juga menunjukkan pengaruh kuat terhadap bahaya longsor. Pada curah hujan rendah (2.515-2.900 mm/tahun), zona Sangat Rendah mencapai 62,40%, namun pada curah hujan tinggi (3.700-4.100 mm/tahun), zona Tinggi dan Sangat Tinggi melonjak hingga 58,30%. Faktor jarak dari jalan juga berperan, di mana area dalam radius 0-100 meter

memiliki lebih dari 40% zona bahaya Tinggi dan Sangat Tinggi, sementara area >3.000 meter didominasi zona aman (70%).

3. Model Prediksi Longsor dalam Perencanaan Mitigasi Bencana Longsor di Ruas Jalan Sicincin-Malalak

a. Analisis *Overlay* Pendekatan Kuantitatif *Binary*

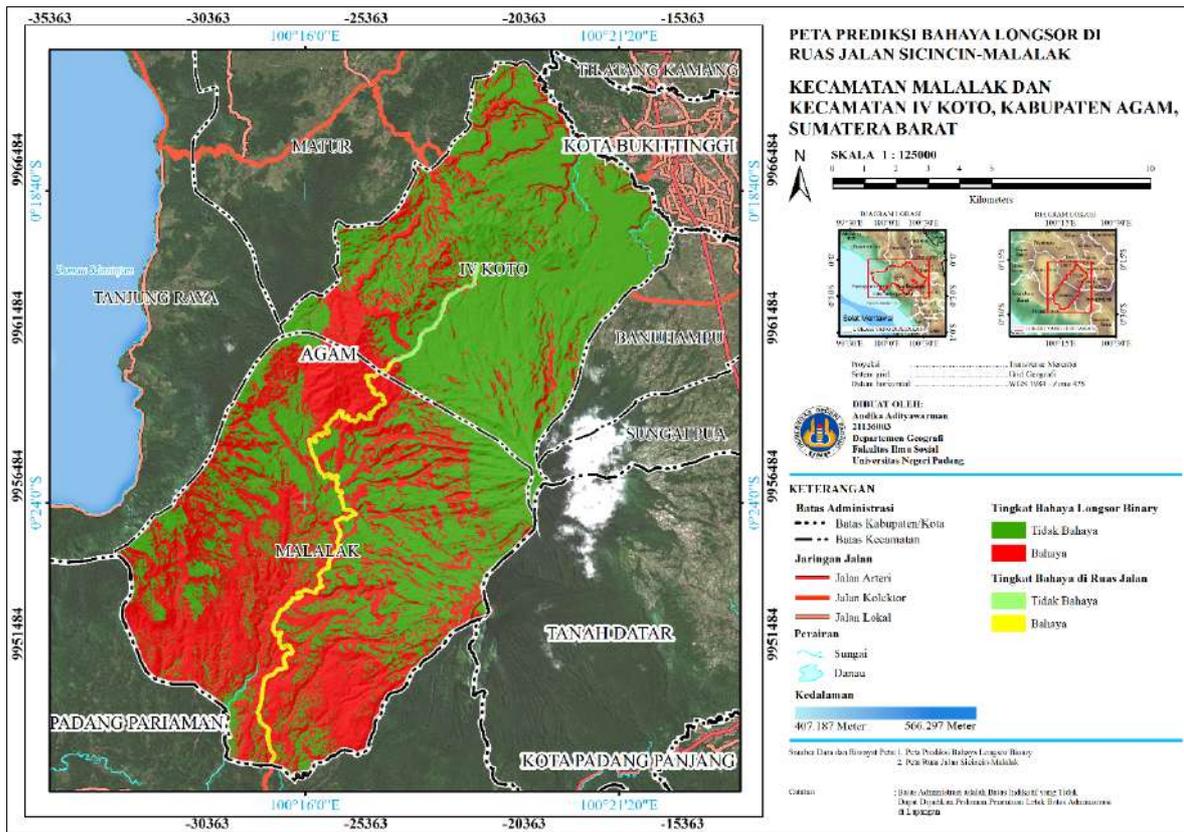
Pendekatan ini melakukan *overlay* dua peta tematik, yaitu peta bahaya longsor hasil *Random Forest* dan peta ruas jalan, lalu menerapkan klasifikasi biner 0 dan 1 (tidak bahaya dan bahaya) untuk mengidentifikasi adanya bahaya dan tidak bahaya di Ruas Jalan Sicincin-Malalak, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam yang dapat dilihat pada Gambar 11.

Peta bahaya longsor di Ruas Jalan Sicincin-Malalak membagi ruas jalan tersebut menjadi 27 segmen berdasarkan jarak atau posisi di sepanjang jalan yang dimulai dari perbatasan Kecamatan Malalak, Kabupaten Agam dan Kabupaten Padang Pariaman seperti pada Tabel 3.

Tabel 3 Bahaya Longsor di Segmen Kilometer Ruas Jalan Sicincin Malalak, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto

No.	Kilometer	Klasifikasi
1	1	Bahaya
2	2	Bahaya
3	3	Bahaya
4	4	Bahaya
5	5	Bahaya
6	6	Bahaya
7	7	Bahaya
8	8	Bahaya
9	9	Bahaya
10	10	Bahaya
11	11	Bahaya
12	12	Bahaya
13	13	Bahaya
14	14	Bahaya
15	15	Bahaya
16	16	Bahaya
17	17	Bahaya
18	18	Bahaya
19	19	Bahaya
20	20	Bahaya
21	21	Bahaya
22	22	Bahaya
23	23	Tidak Bahaya
24	23	Bahaya
25	24	Tidak Bahaya
26	24	Bahaya
27	25	Tidak Bahaya
28	25	Bahaya
29	26	Tidak Bahaya
30	26	Bahaya
31	27	Tidak Bahaya
32	27	Bahaya

Sumber: Analisis *Overlay* Kuantitatif *Binary*, 2025



Sumber: Analisis Overlay Kuantitatif Binary. 2025

Gambar 11 Peta Bahaya Longsor (Bahaya dan Tidak Bahaya) di Ruas Jalan Sicincin-Malalak, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam

Pada Gambar 11 dan Tabel 3, terdapat 27 segmen ruas jalan di Kecamatan Malalak dan IV Koto dengan klasifikasi yang sangat memerlukan prioritas mitigasi tinggi berdasarkan analisis *feature importance*. Dari total 27 segmen kilometer, 25 kilometer segmen diklasifikasikan sebagai Bahaya dengan dominasi berada di Kecamatan Malalak dan hanya 7 segmen kilometer yang

diklasifikasikan sebagai Tidak Bahaya berada di Kecamatan IV Koto.

b. Mitigasi Bencana Longsor di Ruas Jalan Sicincin-Malalak berdasarkan Analisis Feature Importance

Ruas Jalan Sicincin-Malalak di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam berdasarkan variabel kontribusi terbesar tersebut seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Ruas Jalan Sicincin-Malalak, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto berdasarkan Variabel Kontribusi Terbesar

No.	Kilometer	Kemiringan Lereng (°)	Curah Hujan (mm/tahun)
1	1	0-45	4.100-4.529
2	2	0-45	4.100-4.529
3	3	0-25	4.100-4.529
4	4	0-25	3.700-4.529

No.	Kilometer	Kemiringan Lereng (°)	Curah Hujan (mm/tahun)
5	5	0-45	3.700-4.100
6	6	0-45	3.700-4.100
7	7	0-25	3.300-4.100
8	8	0->45	3.300-3.700
9	9	0-45	3.300-3.700
10	10	0-45	3.300-3.700
11	11	0-45	3.300-3.700
12	12	0-45	2.900-3.700
13	13	0-45	2.900-3.300
14	14	0-25	2.900-3.300
15	15	0-45	2.900-3.300
16	16	0-25	2.900-3.300
17	17	0-45	2.900-3.300
18	18	0-45	2.900-3.300
19	19	0-45	2.900-3.300
20	20	0->45	2.900-3.300
21	21	0-45	2.900-3.300
22	22	0-45	2.900-3.300
23	23	0->45	2.900-3.300
24	24	0-45	2.515-3.300
25	25	0-45	2.515-2.900
26	26	0-45	2.515-2.900
27	27	0-45	2.515-2.900

Sumber: Analisis *Overlay* dan Kontribusi Variabel Terbesar, 2025

Pada Tabel 4, klasifikasi segmen Ruas Jalan Sicincin-Malalak berdasarkan variabel kontribusi terbesar terjadinya longsor yang diidentifikasi dari hasil analisis *overlay* kuantitatif *binary* dan *feature importance* untuk menentukan bagian jalan yang menjadi prioritas dalam perencanaan mitigasi bencana longsor. Ruas jalan (kilometer 1-27) sebagian besar memiliki rentang kemiringan lereng 0-45° dengan beberapa segmen mencapai kemiringan lebih dari 45°, seperti pada kilometer 8, 20, dan 23. Kemiringan di atas 30° berada di kelas kemiringan lereng curam dan berpotensi tinggi mengalami ketidakstabilan tanah dengan adanya konstruksi jalan dan

curah hujan tinggi yang menjadi fokus utama untuk mitigasi berupa penguatan lereng, seperti pembangunan dinding penahan tanah dan sistem beronjong. Curah hujan pada segmen-segmen awal seperti kilometer 1-4 berada pada zona dengan curah hujan sangat tinggi, yaitu 4.100-4.529 mm/tahun, menunjukkan bahwa peresapan air yang tinggi menyebabkan kejenuhan tanah. Kombinasi antara lereng yang curam dan curah hujan tinggi sangat berpotensi memicu kejadian longsor dengan mitigasi yang dapat dilakukan adalah penerapan sistem tata salir yang baik, seperti pembuatan saluran drainase permukaan dan sub-permukaan untuk menghindari

penumpukan air di lereng. Segmen di bagian tengah hingga akhir (kilometer 14-27) cenderung memiliki curah hujan lebih rendah (2.515-3.300 mm/tahun), namun berada pada kemiringan lereng curam terutama jika terjadi gangguan vegetasi atau pembukaan lahan dengan mitigasi berupa revegetasi lereng dengan tanaman berakar dalam dan pengawasan struktural berkala.

Pembahasan

Pertama, Model prediksi longsor menggunakan *machine learning Random Forest* menghasilkan peta probabilitas bahaya longsor dengan akurasi tinggi (AUC sebesar 0,91), menunjukkan kemampuan diskriminasi yang sangat baik antara area bahaya longsor dan stabil (Martin & Chai, 2022). Klasifikasi tingkat bahaya dilakukan berdasarkan nilai probabilitas antara 0 hingga 1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan tingkat bahaya longsor yang tinggi. Peta prediksi di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto menunjukkan distribusi tingkat bahaya sangat rendah hingga sangat tinggi, dengan kategori dominan adalah tingkat bahaya sedang (22,86%) dan tinggi (16,07%). Titik kejadian longsor cenderung terkonsentrasi di lereng curam dan zona geologi rentan, sesuai dengan temuan (Wilopo *et al.*, 2023) yang menyatakan bahwa material vulkanik di lereng gunung api aktif lebih rentan terhadap longsor dibandingkan batuan sedimen. Sebanyak 57 titik kejadian longsor tercatat dalam 24 satuan lahan, didominasi oleh bentuklahan vulkanik

V.3.2, yang memiliki karakteristik piroklastik lapuk (Faadhilah & Nugroho, 2024). Sebaran longsor juga banyak terjadi pada lereng dengan kemiringan $>25^\circ$, diperkuat temuan (Syaidah & Ahyuni, 2024) dan (Nofrizal & Zarinda, 2022) bahwa sudut kemiringan besar mengurangi faktor keamanan lereng. Jenis tanah andosol yang mendominasi area tersebut mencatat 52 titik kejadian, mengonfirmasi kerentanan tanah ini yang cepat jenuh dan kehilangan kekuatan geser saat musim hujan (Ayunimas *et al.*, 2023). Hal ini juga sejalan dengan (Nofrizal & Zarinda, 2022) yang menyatakan infiltrasi air hujan mempercepat penurunan kestabilan lereng. Secara keseluruhan, kombinasi curah hujan tinggi (hingga 4.532 mm/tahun), jenis tanah andosol, dan lereng curam menjadi faktor utama di area dengan tingkat bahaya longsor tertinggi.

Kedua, Model prediksi longsor menggunakan *Random Forest* mengidentifikasi tiga variabel utama dengan kontribusi terbesar terhadap bahaya longsor di Kecamatan Malalak dan IV Koto, yakni kemiringan lereng, curah hujan, dan jarak dari jalan. Kemiringan lereng memiliki nilai kontribusi tertinggi (MDA 17,30; MDG 6,67), di mana lereng curam ($26-45^\circ$) secara konsisten dikaitkan dengan risiko longsor tinggi (Ramadhani & Triyatno, 2025). Secara spasial, zona bahaya tinggi terpusat di area kemiringan curam dengan lereng sangat terjal ($30-55^\circ$) yang memiliki faktor keamanan rendah (Nofrizal & Zarinda, 2022). Curah hujan tinggi (MDA 8,29; MDG 6,32) turut menjadi

pemicu utama longsor, karena meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan kohesi tanah, terutama di wilayah dengan curah hujan >2.500 mm/tahun. Temuan ini sejalan dengan (Nofrizal & Zarinda, 2022), (Wilopo *et al.*, 2023), dan (Roihan, 2025) yang menekankan peran curah hujan sebagai pemicu penting longsor di wilayah tropis. Faktor ketiga, jarak dari jalan (MDA 7,88; MDG 4,60), menunjukkan bahwa modifikasi lereng akibat pembangunan infrastruktur meningkatkan risiko longsor. Lebih dari 40% area dalam jarak 0-100 m dari jalan tergolong dalam bahaya tinggi-sangat tinggi (Ahyuni *et al.*, 2023). Hasil frekuensi rasio oleh (Umbara *et al.*, 2024) juga menunjukkan nilai tertinggi pada jarak <50 m dari jalan (FR=2,64), menunjukkan konsentrasi longsor di sepanjang Jalan Sicincin-Malalak yang melewati lereng curam. Secara keseluruhan, model menunjukkan bahwa interaksi antara lereng curam, curah hujan tinggi, dan kedekatan terhadap jalan meningkatkan potensi longsor, sehingga ketiga variabel ini perlu menjadi fokus utama dalam upaya mitigasi di Ruas Jalan Sicincin-Malalak, Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto.

Ketiga, Analisis *overlay* kuantitatif *binary* pada Ruas Jalan Sicincin-Malalak sepanjang 27 km dari perbatasan Kecamatan Malalak, Kabupaten Agam hingga Kecamatan IV Koto, menunjukkan bahwa 22 segmen (81,50%) berada pada kelas bahaya longsor, mayoritas di Kecamatan Malalak, sedangkan 5 segmen (18,50%) di Kecamatan IV

Koto berada pada kelas tidak bahaya. Hal ini selaras dengan hasil analisis *feature importance* yang menempatkan kemiringan lereng, curah hujan, dan jarak dari jalan sebagai faktor dominan penyebab longsor. Kondisi ini menegaskan perlunya penanganan serius, mengingat longsor dapat mengganggu konektivitas dan aktivitas ekonomi masyarakat. Kemiringan lereng curam (0-45°) mendominasi 23 segmen (85,20%), sementara hanya 4 segmen memiliki kemiringan landai (<25°), memperkuat urgensi mitigasi pada segmen dengan kemiringan tinggi. Hal ini diperkuat oleh (Ardes *et al.*, 2024) bahwa curah hujan tinggi, lereng curam, dan pembangunan jalan yang memotong lereng merupakan faktor pemicu utama longsor. Curah hujan bervariasi antara 2.515-4.529 mm/tahun, dengan kilometer 1-4 mencatat curah hujan sangat tinggi (4.100-4.529 mm/tahun) dan masuk zona bahaya tinggi. Kondisi ini sejalan dengan (Hidayat *et al.*, 2023) yang menunjukkan nilai stabilitas lereng hanya 0,92 saat terjadi genangan air hujan. Hampir seluruh segmen berada dalam kemiringan 25-45°, memperkuat hubungan antara lereng curam dan longsor, apalagi jika dikombinasikan dengan curah hujan tinggi (Ahyuni *et al.*, 2023). Segmen km 8, 20, dan 23 memiliki kemiringan sangat curam (>45°) dan tetap berisiko meski curah hujan sedang, menunjukkan pentingnya mitigasi struktural maupun non-struktural seperti revegetasi. Seluruh segmen berada tepat di jalur jalan (jarak 0 m),

menjadikannya secara default masuk dalam kategori bahaya tertinggi karena modifikasi lereng oleh aktivitas jalan (Nugroho *et al.*, 2022). Peta prediksi bahaya longsor dari model ini dapat menjadi dasar kebijakan mitigasi oleh BPBD, Dinas PUPR, dan pemerintah daerah untuk menyusun rencana kontingensi, jalur evakuasi, dan penyesuaian tata ruang. Strategi ini penting untuk menciptakan sistem manajemen bahaya terpadu dan meningkatkan keselamatan pengguna jalan.

D. Kesimpulan

1. Model spasial prediksi longsor dengan Random Forest menunjukkan performa sangat baik (AUC = 0,91) dalam membedakan area bahaya dan tidak bahaya di Kecamatan Malalak dan Kecamatan IV Koto, Kabupaten Agam. Peta prediksi longsor yang dihasilkan mengklasifikasikan wilayah ke dalam lima tingkat bahaya longsor dengan 48,80% wilayah studi termasuk dalam kategori sedang hingga sangat tinggi yang diperkuat dengan distribusi titik kejadian longsor yang terkonsentrasi pada area dengan lereng curam, litologi vulkanik, dan jenis tanah andosol.
2. Analisis *feature importance* berdasarkan nilai *Mean Decrease Accuracy* (MDA) dan *Mean Decrease Gini* (MDG) menghasilkan kemiringan lereng (MDA 17,30; MDG 6,67), curah hujan (MDA 8,29; MDG (6,32), dan jarak dari jalan (MDA 7,88; MDG

4,60) sebagai kontribusi terbesar terjadinya longsor di Kecamatan Malalak dan IV Koto.

3. Analisis overlay kuantitatif binary pada Ruas Jalan Sicincin-Malalak menunjukkan 81,50% segmen jalan berada dalam zona bahaya longsor, terutama di Kecamatan Malalak yang diperkuat oleh hasil *feature importance* yang menempatkan kemiringan lereng, curah hujan, dan jarak dari jalan sebagai variabel terbesar terjadinya longsor. Segmen-segmen dengan kemiringan curam (25->45°) dan curah hujan sangat tinggi (hingga 4.529 mm/tahun), khususnya pada kilometer 1-4 dan 8, 20, serta 23. Kondisi ini memerlukan prioritas mitigasi melalui penguatan lereng, peningkatan sistem drainase, dan revegetasi. Hasil ini memberikan dasar kuat untuk perencanaan mitigasi struktural dan non-struktural serta mendukung penyusunan kebijakan oleh pihak terkait untuk mengurangi bahaya longsor dan menjaga konektivitas wilayah.

E. Daftar Pustaka

- Ahyuni, Hidayat, R. A., Purwaningsih, E., & Suasti, Y. (2023). Random Forest Method Utilization For Landslide Hazard Zonation In Lima Puluh Kota Regency. *ICGEO 2022: Proceedings of the 2nd International Conference of Geography, ICGEO 2022, 19-20 November 2022, Padang, West Sumatera, Indonesia*, 130.
- Ardes, W., Mizwar, Z., & Rahmat Putra, R. (2024). Faktor

- Penyebab Tanah Longsor Pada Wilayah Kabupaten Sijunjung. *Sigma Teknika*, 7(2), 428–438. <https://doi.org/10.33373/sigmateknika.v7i2.6799>
- Ayunimas, A., Haryati, N., Sonata, H., & Muchlian, M. (2023). Karakteristik Tanah Pada Lereng Sebagai Mitigasi Pasca Bencana Tanah Longsor (Studi Kasus: Nagari Aie Dingin, Kab. Solok, Sumatera Barat). *Jurnal Bangunan, Konstruksi & Desain*, 1(3), 159–167. <https://doi.org/10.25077/jbkd.1.3.159-167.2023>
- Faadhilah, A., & Nugroho, H. (2024). Pemetaan Daerah Rawan Longsor di Kabupaten Bandung Barat menggunakan Metode Machine Learning dengan Teknik SVM. *Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*, 8(2), 185–199. <https://doi.org/10.26760/jrh.v8i2.185-199>
- Hidayat, R., Wijaya, I. P. E. P., & Munir, M. D. (2023). Mekanisme Longsor Akibat Infiltrasi Dari Genangan Air (Studi Kasus Longsor Di Lahat, Sumatera Selatan). *Jurnal Teknik Hidraulik*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.32679/jth.v14i1.701>
- Martin, D., & Chai, S. S. (2022). A Study on Performance Comparisons between KNN, Random Forest and XGBoost in Prediction of Landslide Susceptibility in Kota Kinabalu, Malaysia. *2022 IEEE 13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, 159–164. <https://doi.org/10.1109/ICSGRC55096.2022.9845146>
- Nofrizal, N., & Zarinda, S. (2022). Studi Ekperimental Respon Intensitas Hujan Dan Tekanan Air Pori Tanah Pengaruhnya Terhadap Keruntuhan Lereng. *Ensiklopedia of Journal*, 4(2), 296–302. <https://doi.org/10.33559/eoj.v4i2.1067>
- Nugroho, B. W., Rojudin, D., Harist, M. C., & Affandi, H. A. (2022). Zonasi Rawan Gerakan Massa Berbasis GIS dan Integrasi Aplikasi Manajemen Bencana Berbasis Crowdsourcing di Area Pertambangan Emas Pongkor, Jawa Barat. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 4(2), 49–62. <https://doi.org/10.36986/impj.v4i2.72>
- Phuyal, B., Thapa, P. B., & Devkota, K. C. (2022). Characterization of large-scale landslides and their susceptibility evaluation in central Nepal Himalaya. *Journal of Nepal Geological Society*, 63, 109–122. <https://doi.org/10.3126/jngs.v63i01.50846>
- Ramadhani, K., & Triyatno, T. (2025). Analisis Tingkat Bahaya Longsor pada Ruas Jalan Sicincin-Malalak-Balingka dan Ruas Jalan Padang Lua-Maninjau di Kecamatan IV Koto Kabupaten Agam. *Tsaqofah*, 5(3), 1845–1871. <https://doi.org/10.58578/tsaqofah.v5i3.5420>
- Roihan, A. (2025). Analisis Kerawanan Longsor Menggunakan metode CMA di Kabupaten Tana Toraja. *Jurnal Sains Geografi*, 3(1), 1–12. <https://doi.org/10.21009/jsg.v3i1.01>

Syaidah, Y., & Ahyuni. (2024).
*PEMETAAN KAWASAN
BAHAYA BENCANA LONGSOR
DI KABUPATEN SOLOK
MENGUNAKAN METODE
RANDOM FOREST. 4.*

Umbara, R. P., Melati, D. N.,
Astisiasari, Wisyanto, Trisnafiah,
S., Trinugroho, Arifianti, Y.,
Prawiradisastra, F., Ramdhani, T.
I., Arifin, S., & Anggreainy, M. S.
(2024). Utilization of Frequency
Ratio and Logistic Regression
Model for Landslide Susceptibility
Mapping in Bogor Area.
*International Journal on
Advanced Science, Engineering
and Information Technology,*
14(2), 528–539.
[https://doi.org/10.18517/ijaseit.14
.2.19345](https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.19345)

Wibawanti, E., Sartohadi, J., Ngadisih,
N., Setiawan, A., & Mardiatno, D.
(2023). Keefektifan “ProKlim”
dalam Pengendalian Longsor
Secara Vegetatif di Kampung
Iklim Desa Sambak, Kajoran,
Magelang. *AgriTECH, 43(2), 105.*
[https://doi.org/10.22146/agritech.
72009](https://doi.org/10.22146/agritech.72009)

Wilopo, W., Putra, D. P. E., Fathani, T.
F., Pramaditya, A., Tandirerung,
R., & Erzagian, E. (2023).
Comparison of two landslide
hazard zonation methods in the
volcanic terrain of Temanggung
Regency, Central Java,
Indonesia. *Journal of Degraded
and Mining Lands Management,*
10(3), 4537–4546.
[https://doi.org/10.15243/jdmlm.2
023.103.4537](https://doi.org/10.15243/jdmlm.2023.103.4537)