

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Morfologi daerah aliran sungai menunjukkan banyak faktor penting yang perlu dipelajari dalam mengembangkan suatu kawasan, analisis morfologi daerah aliran sungai secara rinci menunjukkan gambaran kondisi potensi dan ancaman (Uca et al., 2021). Dengan demikian, mengidentifikasi morfologi daerah aliran sungai akan memberikan informasi yang mempertimbangkan secara luas dalam penggunaannya untuk mengurangi resiko di masa depan. Daerah aliran sungai terdiri dari ekosistem lengkap dan apabila keseimbangannya terganggu maka akan menimbulkan dampak yang tidak diinginkan. Perencanaan dan pelaksanaan pembangunan DAS yang efektif dan efisien dapat terjadi pada berbagai tahapan perencanaan, termasuk kondisi penggunaan lahan yang mengacu atau mengevaluasi faktor biofisik (Banuwa et al., 2008). Manfaat DAS akan sangat terasa jika dikelola dengan baik, sehingga tercipta vegetasi, tanah, dan air yang optimal bagi kesejahteraan manusia.

Sensitivitas ekologi mengacu terhadap kemampuan adaptasi perubahan lingkungan alam dan gangguan dari aktivitas manusia dengan mengasumsikan bahwa kualitas lingkungan ekologi tidak rusak (Mingwu et al, 2010 dalam Xu et al., 2023). Analisis sensitivitas ekologi telah difokuskan pada dampak dari suatu masalah lingkungan (Xu et al., 2023). Kerusakan lingkungan merupakan kondisi suatu wilayah yang berpotensi untuk terjadi kerusakan lingkungan karena aktivitas dan atau kegiatan manusia yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan. Kondisi alam termasuk kemiringan lereng, iklim, tanah dan tutupan vegetasi membentuk determinan kunci dari evaluasi kerentanan, bencana alam merupakan faktor yang berpengaruh terhadap sensitivitas (Yuni & Jawoto, 2015).

Kemiringan lereng merupakan faktor penting dalam pengendalian lingkungan, lereng mempengaruhi sensitivitas ekologi dengan pengaruh terhadap sebaran jenis tanaman, erosi tanah dan terjadinya bencana geologi (Xu et al., 2023). Hutan mencakup sebagian besar wilayah studi dan iklim mempengaruhi jenis dan kondisi pertumbuhan tanaman, secara umum curah hujan merupakan konteks iklim yang paling dasar dan penting (Xu et al., 2023). Kerusakan vegetasi, hutan dan vegetasi lainnya mengurangi luas hutan dan vegetasi, sehingga mengurangi efektivitasnya sebagai sistem perlindungan dalam sistem daerah aliran sungai secara keseluruhan (Maulana et al., 2014). Menurut Dong dan Lyu, 2022 dalam Xu et al. (2023) vegetasi mempunyai banyak fungsi ekologi dan merupakan faktor ekologi penting yang mencerminkan sensitivitas ekologi yang diukur dengan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

Pertumbuhan penduduk, tekanan sosial dan ekonomi serta laju pembangunan menyebabkan menurunnya kualitas sumber daya alam, khususnya tanah dan air, termasuk daerah aliran sungai. Jenis penutupan lahan merupakan karakteristik lahan yang dibentuk oleh manusia untuk memenuhi kebutuhannya sesuai dengan

karakteristik sumber dayanya (Xu et al., 2023). Daerah aliran sungai Mata Allo terletak di dua wilayah, yaitu Kabupaten Tana Toraja dan Kabupaten Enrekang dengan luas 101.840,71 hektar. Menurut data Badan Pusat Statistik selama lima tahun terakhir Kabupaten Enrekang mengalami peningkatan jumlah penduduk sebesar 13,11% dan Kabupaten Tana Toraja mengalami peningkatan sebesar 19,21%. Pertumbuhan penduduk yang tidak terkendali diiringi dengan kebutuhan manusia yang semakin meningkat sehingga dapat memperluas pembangunan dan alih fungsi lahan. Keadaan ini dapat menyebabkan rusaknya vegetasi penutup tanah dan merupakan faktor terpenting dalam menjaga ketahanan tanah terhadap erosi dan kemampuan tanah dalam menahan air. Secara kuantitatif mengidentifikasi tingkat sensitif dan menganalisis situasi saat ini dan penyebabnya sesuai dengan mekanisme pembentukan masalah lingkungan (Yishao et al., 2018) sebagai metode efektif untuk menjaga stabilitas ekologi dan mendorong pembangunan ekosistem berkelanjutan, indeks sensitivitas ekologi digunakan dalam perencanaan dan pengelolaan lanskap menggunakan *Principal component analysis* (PCA).

Sensitivitas suatu DAS menunjukkan potensi permasalahan yang ada di dalam DAS berkaitan dengan kondisi lanskap, curah hujan dan vegetasi, sehingga penelitian ini mengidentifikasi kerentanan di melalui data curah hujan, kelerengan, dan tutupan vegetasi (Kang et al., 2024). Misalnya, di pengelolaan ekologi di barat laut China nilai rata-rata sensitivitas ekologi mengalami penurunan dari 0,477 pada tahun 2000 menjadi 0,430 pada tahun 2016 menunjukkan bahwa sensitivitas lingkungan wilayah penelitian semakin menurun dan kondisi lingkungannya semakin menurun wilayah ini telah ditingkatkan secara efektif. Indeks Kerentanan Lingkungan di Kota Palu tahun 2019 mulai dari 0,000-0,600 yang memunculkan rekomendasi kebijakan mitigasi seperti mengadakan sosialisasi mitigasi, tidak menggunduli peruntukan lahan untuk hutan lindung dan hutan alam, dan tidak membangun bangunan di daerah padat bangunan terkhusus pada wilayah dengan kerentanan tinggi.

Sub DAS Mata Allo salah satu dari sub DAS dari Daerah Aliran Sungai Saddang yang bertemu di Kabupaten Enrekang, Provinsi Sulawesi Selatan. Sub DAS ini menjadi daerah yang rentan terhadap bencana alam akibat kesalahan manusia dalam pengelolaan dan penggunaan daerah aliran sungai. Pada tahun 2023 Kabupaten Enrekang sebanyak 2 kejadian bencana alam tanah longsor dan 2 kejadian bencana alam banjir, sedangkan Kabupaten Tana Toraja sebanyak 4 kejadian bencana alam tanah longsor. Untuk memperoleh informasi lebih lanjut mengenai kerentanan di DAS Mata Allo, maka perlu dilakukan identifikasi faktor yang mempengaruhi kerentanan di DAS Mata Allo dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (GIS). Identifikasi ini dapat menjadi pedoman perencanaan penggunaan lahan agar lahan dapat dimanfaatkan dengan melihat kerentanannya.

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi sensitivitas ekologi di wilayah DAS Mata Allo
2. Membangun model indeks sensitivitas ekologi di DAS Mata Allo
3. Memprediksi indeks sensitivitas ekologi di DAS Mata Allo

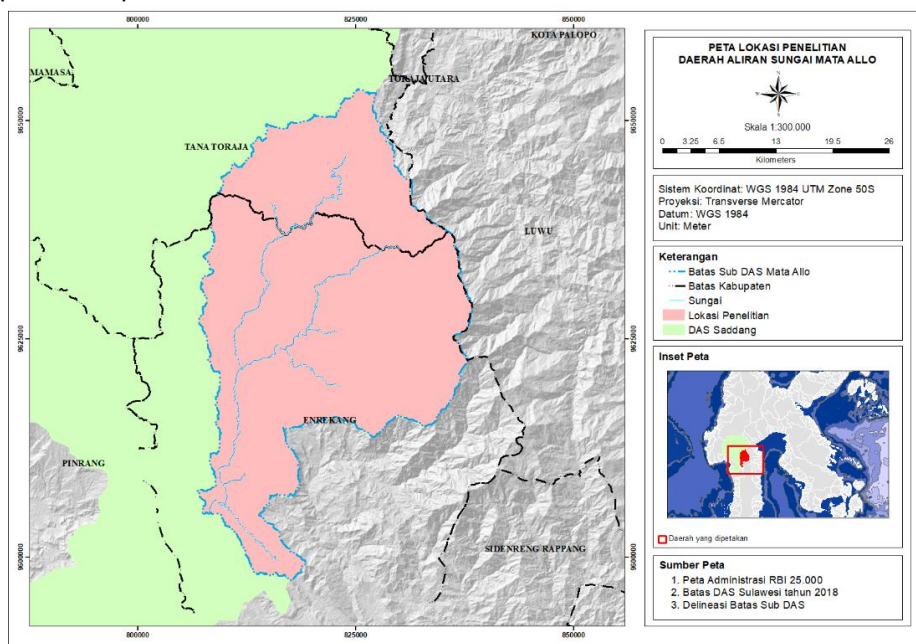
Manfaat dari penelitian ini dapat membantu mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi sensitivitas ekologi dengan pemahaman yang lebih baik tentang faktor-faktor untuk dapat merancang strategi yang lebih efektif untuk menjaga keseimbangan ekosistem dan mencegah kerusakan lingkungan. Indeks sensitivitas ekologi akan memberikan alat ukur yang objektif untuk menilai kondisi lingkungan yang bisa digunakan sebagai referensi dalam perencanaan tata ruang dan pengelolaan sumber daya alam. Dengan kemampuan untuk memprediksi indeks sensitivitas ekologi, penelitian ini dapat memberikan wawasan penting bagaimana perubahan mempengaruhi kondisi ekologi di masa depan untuk perencanaan jangka panjang atau mitigasi risiko terhadap bencana alam.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan mulai Bulan Mei 2024 hingga November 2024 dengan melalui tiga tahapan kegiatan, yaitu pengumpulan dan analisis data dilakukan di Laboratorium Perencanaan dan Sistem Informasi Kehutanan, Fakultas Kehutanan, Universitas Hasanuddin. Sedangkan, kegiatan lapangan dilaksanakan di lokasi penelitian yakni DAS Mata Allo yang secara geografis terletak antara 03°00'00" - 03°40'00" LS, 119°40'00" - 120°10'00" BT. Peta Lokasi penelitian DAS Mata Allo dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Laptop dengan spesifikasi 12th Gen Intel (R) Core (TM) i5-12500H, 2.50 GHz, RAM 8.00 GB, digunakan untuk menjalankan program/aplikasi
2. Perangkat lunak ArcGIS 10.4, SiBias, QGIS 2.18, dan Matlab 2024 digunakan untuk output dan visualisasi data
3. Aplikasi Avenza Maps, digunakan untuk mencari titik di lapangan
4. Perangkat lunak Microsoft Office, digunakan untuk mengolah data dan laporan
5. Kamera digunakan untuk dokumentasi

6. Alat tulis menulis digunakan untuk mencatat hasil pengamatan.

2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Bahan Penelitian

No.	Bahan	Kegunaan	Sumber
1.	Peta Batas DAS	Sebagai bahan untuk penetapan batas lokasi penelitian	Direktur Jenderal Pengendalian Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung
2.	Data DEM Nasional	Sebagai bahan analisis untuk menghasilkan batas DAS dan kemiringan lereng	Badan Informasi Geospasial
3.	Citra Landsat 8	Sebagai bahan analisis untuk penutupan lahan dan Perhitungan <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI)	<i>Earth Explorer- USGS</i> (https://earthexplorer.usgs.gov)
4.	Data Iklim tahun 2014-2023	Sebagai bahan analisis untuk menghasilkan data curah hujan	Satelit Merra (https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/ .)

2.3 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Adapun prosedur pelaksanaan dari penelitian ini diawali dengan penetapan batas lokasi penelitian, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data, pengecekan dan pengambilan data di lapangan, uji akurasi dan analisis hasil penelitian.

2.3.1 Penetapan batas lokasi penelitian

Pertama tama memilih lokasi penelitian yaitu Daerah Aliran Sungai (DAS) Saddang yang didasari oleh peta Peta Batas DAS tahun 2018 yang diperoleh dari Direktur Jendral Pengendalian Daerah Aliran Sungai dan Hutan Lindung. Penentuan batas DAS diperoleh dari kegiatan Delineasi batas DAS pada ekstensi SWAT yang terintegrasi pada *software* ArcGIS. Delineasi Sub DAS Mata Allo diperoleh dari ekstraksi data DEMNAS yang lokasinya telah disesuaikan dengan batas DAS Mata Allo.

2.3.2 Pengumpulan data

Kemiringan lereng. Data Kemiringan lereng diperoleh dari data DEMNAS, kemudian dilakukan analisis *Raster surface*, *reclassify* dan konversi Raster ke Poligon menggunakan perangkat lunak ArcGIS. Data kemiringan lereng dan

ketinggian digunakan untuk mengetahui tingkatan kelas lereng. Data DEMNAS dapat diunduh melalui website <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas>.

Penutupan lahan. Data Penutupan Lahan DAS Mata Allo diperoleh dari menginterpretasi citra landsat 8 yang ditetapkan berdasarkan digitasi *on screen* dan *software* yang digunakan ialah ArcGIS. identifikasi objek pada citra dengan memperhatikan unsur dan karakteristik citra (Rona/warna, bentuk, ukuran, pola) serta mengacu pada Juknis Penafsiran Citra Satelit Resolusi Sedang untuk Update Data Penutupan Lahan Nasional. Setelah proses mendetailkan data tutupan lahan yang sudah ada dan telah mendapatkan hasil penutupan lahan terbaru. Citra tersebut dapat diunduh melalui website <https://earthexplorer.usgs.gov>.

Prediksi penutupan lahan. Pemodelan dan prediksi penutupan lahan dilakukan menggunakan plugin MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) pada software QGIS (Quantum GIS). Menurut (Na'iemurrahman, 2022) prediksi penutupan lahan menggunakan sistem ANN (Artificial Neural Network) dan model CA (Cellular Automata) yang ada pada *plugin Molusce* dengan memanfaatkan data penutupan lahan dari dua penutupan lahan di waktu berbeda untuk memproyeksikan perubahan penutupan lahan di masa depan dan faktor pendorong. Tahun prediksi diperoleh dari $t_1 + (t_1 - t_0)$, dimana t_1 adalah tahun akhir dan t_0 adalah tahun awal, maka prediksi yang dihasilkan pada penelitian ini adalah $2023 + (2023 - 2014) = 2032$.

Curah hujan. Data curah hujan diperoleh dari hasil analisis data iklim tahun 2014-2023. Data iklim dapat diunduh melalui website <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Untuk melakukan download data curah hujan melalui satelit merra dengan menentukan batas wilayah kajian (DAS Mata Allo) sebagai areal atau batasan dalam memperoleh data curah hujan. Membuat grid pada wilayah kajian dengan resolusi 1.0° lintang dan $1,0^\circ$ bujur untuk set data radiasi dan $\frac{1}{2}^\circ$ latitude dan $\frac{5}{8}^\circ$ longitude untuk set data meteorologi, kemudian menentukan titik koordinat pada masing-masing grid yang dijadikan sebagai titik stasiun. Mengakses pada link <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> dan memilih menu *Power Data Access Viewer*. Setelah itu klik *POWER Single Point Data Acces*. Kemudian menginput titik koordinat stasiun yang telah ditentukan sebelumnya pada poin *latitude/longitude*, kemudian memilih data yang ingin di download di-mana dalam hal ini data curah hujan dengan output format CSV.

Prediksi curah hujan. Data iklim dilakukan prediksi menggunakan program SiBias khususnya curah hujan. Melakukan penyesuaian terhadap inputan data berdasarkan format penyusunan data yang telah ditentukan, secara otomatis software akan membaca data observasi yang telah dimasukkan dan secara otomatis menghitung tahun prediksi yang akan dihasilkan. Dalam penelitian ini menggunakan skenario RCP4.5 dan GCM CSIRO Mk3.6.0 dengan proyeksi metode delta yang merupakan metode downscaling yang paling sederhana dan banyak digunakan dalam penyusunan skenario perubahan iklim.

Kerapatan vegetasi. Kerapatan vegetasi diperoleh dengan Perhitungan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggunakan Google Earth Engine (GEE) dengan Nilai indeks vegetasi ini dihitung sebagai rasio antara pantulan yang

terukur dari band merah (R) dan band infra-merah (didekati oleh band NIR). Hasil penisbahan antara band merah dan infa-merah menghasilkan perbedaan yang maksimum antara vegetasi dan tanah. Menurut Danoedoro, 2012 dalam Aftriana (2013) nilai-nilai asli yang dihasilkan NDVI selalu berkisar antara -1 hingga +1. Nilai-nilai NDVI disekitar 0.0 biasanya mempresentasikan penggunaan lahan yang mengandung unsur vegetasi sedikit sampai tidak mempunyai vegetasi sama sekali.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

Dimana, NIR adalah nilai reflektan band infra merah (band 5) dan R adalah nilai reflektan band merah (band 4).

```
// NDVI L8 Collection 2 Tier 1 MODified By TIM UH-BID 1 SUMA
Map.centerObject(geometry,10);

//cloud mask
function maskL8sr(col) {
  // Bits 3 and 5 are cloud shadow and cloud, respectively.
  var cloudShadowBitMask = (1 << 3);
  var cloudsBitMask = (1 << 5);
  // Get the pixel QA band.
  var qa = col.select('QA_PIXEL');
  // Both flags should be set to zero, indicating clear conditions.
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0)
    .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0));
  return col.updateMask(mask);
}

// Applies scaling factors.
function applyScaleFactors(image) {
  var opticalBands =
image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
  var thermalBands =
image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);
  return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .addBands(thermalBands, null, true);}

var vizParams = {
  bands: ['SR_B4', 'SR_B3', 'SR_B2'],
  min: 0,
  max: 0.3,
  gamma: 1.4,
};

//Memasukkan Data Citra
var col = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
```

```

        .map(maskL8sr).map(applyScaleFactors)
        .filterDate('2023-01-01','2023-12-31')
        .filterBounds(geometry)
        .map(function(image){return image.clip(geometry)}));
print('collecion',col)
//Reduksi Image

var image = col.median();
print('image', image);

Map.addLayer(image, vizParams, 'Citra');

//PerhitunganNDVI
var ndvi1 = image.normalizedDifference(['SR_B5',
'SR_B4']).rename('NDVI'); //menggunakan API normalizedDifference

var ndviParams = {min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white',
'green']};

Map.addLayer(ndvi1, ndviParams, 'NDVI');

// Map.addLayer(geometry)

Export.image.toDrive({
  image: ndvi1,
  description:'NDVI_MATA ALLO',
  scale:30,
  maxPixels:600000000,
  region:geometry
});

```

Gambar 2. Script Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Prediksi kerapatan vegetasi. Pemodelan prediksi kerapatan vegetasi dilakukan dengan menggunakan dua data kerapatan vegetasi diwaktu yang berbeda dengan menggunakan pemodelan ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) pada software Matlab 2024. ANFIS adalah logika *fuzzy* yang ditambahkan jaringan syaraf tiruan sehingga memiliki struktur dan kemampuan dua metode tersebut untuk melakukan perkiraan suatu fungsi. Pemodelan dilakukan dengan membagi 2 data yaitu *training* dan *testing*, data *testing* digunakan untuk melatih data sementara data *testing* digunakan untuk memvalidasi data. Pembagian data ini menggunakan persentase 80% data *training* dan 20% data *testing* (Faisal et al., 2018). Untuk mengurangi komputasi yang terlalu besar dalam pemrosesan, data dinormalisasi ke dalam rentang 0-1. Menurut (Suparta & Samah, 2020). Model ANFIS dianggap mampu melakukan prediksi jika nilai MAPE (Mean Absolute Percentage Error) pada proses pengujian atau validasinya berada di bawah 20%.

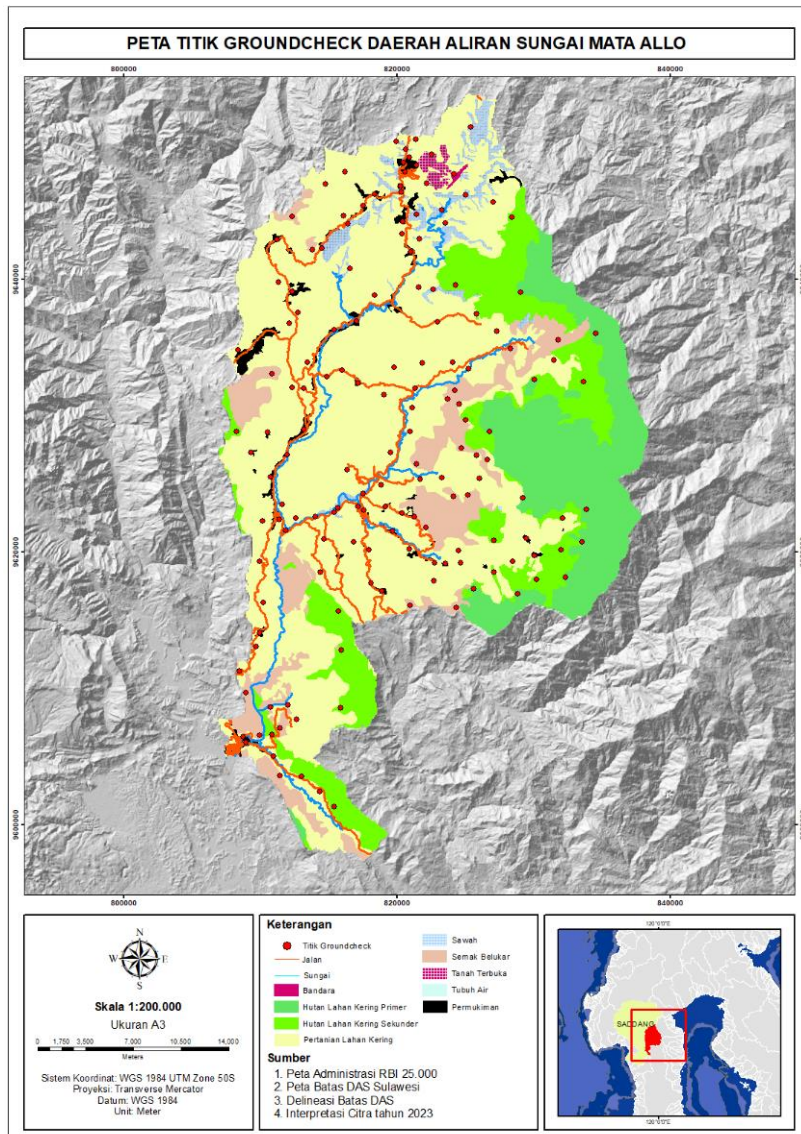
2.3.3 Pengecekan dan pengambilan data di lapangan

Setelah proses mendetailkan data tutupan lahan yang sudah ada dan telah mendapatkan hasil penutupan lahan terbaru, maka perlu dilakukan kegiatan pengambilan data di lapangan dengan metode *ground check* dan *ground truth* yang kemudian dilakukan perhitungan dari data-data yang didapatkan di lapangan. Pengecekan lapangan meliputi kerja lapangan yang ditujukan untuk memperoleh data lapangan serta memastikan sesuai tidaknya kondisi lapangan dengan interpretasi penutupan lahan yang telah dilakukan sebelumnya. Sebelum proses *ground check* dan *ground truth* dilakukan, kegiatan penentuan titik *sampling* pengecekan di lapangan ditentukan dengan menggunakan persamaan *multinomial distribution* (Congalton, 2008 dalam Putri et al. 2018).

$$n = \frac{B \cdot \Pi_i \cdot (1 - \Pi_i)}{b_i^2} \quad (2)$$

Dimana, n adalah jumlah sampel, B adalah nilai yang didapat dari tabel chi square berdasarkan jumlah kelas dan dengan derajat kebebasan 1, Π_i adalah kelas khusus yang mencakup area terbanyak dalam peta, dan b_i adalah tingkat ketidakpercayaan dalam %

Penelitian ini menggunakan 9 kelas tutupan lahan, maka untuk nilai B yang didapat dari tabel *chi square* dan derajat kebebasan 1 adalah 14,68, kemudian dengan mengasumsikan tingkat kepercayaan sebesar 85% berdasarkan standar yang digunakan USGS (United States Geological Survey) dan tingkat ketidakpercayaan sebesar 15% (Putri et al., 2018) serta cakupan kelas terbanyak adalah kelas pertanian lahan kering dengan cakupan *area* sebesar 58,65%. Kegiatan pengecekan lapangan dimulai dengan menentukan titik koordinat perwakilan pada setiap kelas penutupan lahan yang ada, jumlah titik sampel pengecekan di lapangan sebanyak 159 titik yang terbagi dalam 9 kelas tutupan lahan. Selain pengambilan titik koordinat, juga dilakukan pengambilan gambar dan informasi lain yang terkait pada setiap jenis penutupan lahan di lapangan. Peta titik sampel pengecekan di lapangan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta titik *groundcheck*

2.3.4 Uji akurasi

Uji akurasi adalah pengujian seberapa dekat nilai hasil pengukuran dengan nilai sebenarnya (true value) atau nilai yang dianggap benar (accepted value) (Nadzirah et al., 2023). Uji akurasi hasil klasifikasi dilakukan untuk menguji tingkat akurasi peta penggunaan yang dihasilkan dari proses klasifikasi digital dengan sampel uji dari hasil kegiatan lapangan. Uji akurasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah uji akurasi Kappa dengan bantuan matriks kesalahan (confusion matrix). Menurut Story &

Cangalton, 1986 dalam Nadzirah et al. (2023), perhitungan akurasi *Kappa* dapat dilakukan setelah menyusun matriks kesalahan.

Tabel 3. Matriks kesalahan (confusion matrix)

		Data Interpretasi			Total baris	User's accuracy	
		A	B	C			
Data Referensi	A	X			X_{i+}	X/X_{i+}	
	B		X				
	C			X			
Total kolom		X_{+1}			N		
Producer's Accuracy		X/X_{+1}					

Menurut Jaya, 2013 dalam Derajat et al. (2020), angka dalam matriks diagonal merupakan hasil klasifikasi dan data lapangan yang benar atau sesuai. Apabila angka-angka pada diagonal utama tersebut dijumlahkan dan kemudian dibagi dengan jumlah sampel maka akan didapatkan akurasi seluruh kategori. Saat ini akurasi yang dianjurkan adalah akurasi kappa, karena *overral accuracy* secara umum masih *over estimate*. Secara matematis akurasi kappa disajikan sebagai berikut:

$$Kappa(k) = \frac{N \sum X - \sum X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum X_{i+} X_{+i}} \times 100 \quad (3)$$

Dimana, N adalah total data (piksel) yang diuji, X adalah nilai diagonal matriks baris ke-n dan kolom ke-l, X_{i+} adalah jumlah piksel dalam baris ke-l, dan X_{+i} adalah jumlah piksel dalam kolom ke-i

Menurut Arisondang, 2015 dalam Syahrul (2024), proses pemetaan klasifikasi penutup/penggunaan lahan nilai akurasi total yang bisa diterima yaitu 85%, atau 0,85.

2.4 Analisis Data

2.4.1 Principal component analysis (PCA)

Dalam analisis sensitivity indeks menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) dengan mengidentifikasi faktor-faktor utama yang berkontribusi berfokus terhadap kerentanan. PCA digunakan untuk mengurangi volume data tanpa mengurangi informasi penting dari data tersebut (Juaeni, 2014). Untuk menentukan variabel spesifik dalam kerangka model sensitivitas ekologi, tidak ada sistem variabel yang bersifat tepat dan sebaliknya ditekankan pada fleksibilitas di seluruh wilayah berdasarkan karakteristik morfologi (Jiang et al., 2023). Analisis dilakukan dengan memasukkan data yang telah diberikan skor 1, 2, 3, 4, dan 5 pada setiap variabel dengan memperhatikan masing-masing faktor sensitivitas dari tingkatan rendah hingga tinggi untuk standarisasi numerik (Xu et al., 2023) kemudian dilakukan teknik overlay setiap variabel.

Tabel 2. Klasifikasi tutupan lahan dan skor tutupan lahan

Tipe Tutupan Lahan	Skor
Bandara/Lahan terbuka	1
Permukiman	2
Pertanian Lahan Kering/Semak Belukar/Sawah	3
Hutan lahan kering primer/Hutan lahan kering sekunder	4
Tubuh Air	5

Pemberian skor pengaruh tutupan lahan terhadap sensitivitas didasarkan pada aktivitas manusia, semakin rendah nilai perlindungan ekologis dan semakin rendah nilai sensitivitasnya. Sensitivitas ekologis hutan lebih tinggi daripada lahan terbangun (Xu et al., 2023,).

Tabel 3. Klasifikasi kemiringan lereng dan skor kemiringan lereng

Kemiringan Lereng	Skor
0-8%	1
8-15%	2
15-25%	3
25-45%	4
>45%	5

Kemiringan lereng sangat berpengaruh terhadap tingkat kerentanan, pemberian skor didasarkan pada kemiringan lereng yang datar hingga landai cenderung memiliki tingkat kerentanan lingkungan yang rendah. Dalam analisis sensitivitas, wilayah dengan kemiringan lereng yang curam memiliki risiko kerentanan yang tinggi.

Tabel 4. Klasifikasi kerapatan vegetasi dan skor kerapatan vegetasi

Kelas Kerapatan	Nilai NDVI	Skor
Kerapatan sangat rendah	$-1 \leq \text{NDVI} < 0,12$	1
Kerapatan rendah	$0,12 \leq \text{NDVI} < 0,22$	2
Kerapatan sedang	$0,22 \leq \text{NDVI} < 0,42$	3
Kerapatan tinggi	$0,42 \leq \text{NDVI} < 0,72$	4
Kerapatan sangat tinggi	$0,72 \leq \text{NDVI} \leq 1$	5

Pemberian skor terhadap kerapatan vegetasi, semakin tinggi nilai NDVI, semakin tinggi sensitivitasnya (Xu et al., 2023). Semakin rapat vegetasi berfungsi sebagai penyaring alami, mengurangi erosi tanah dan peningkatan kualitas tanah

Tabel 5. Klasifikasi curah hujan dan skor curah hujan

Kelas	Curah Hujan	Skor
Sangat rendah	0-1.000 mm/tahun	1
Rendah	1.000-2.000 mm/tahun	2
Sedang	2.000-3.000 mm/tahun	3
Tinggi	3.000-4.000 mm	4
Sangat tinggi	>4.000 mm	5

Klasifikasi kelas curah hujan dari sebaran curah hujan dilakukan sebanyak lima kelas curah hujan (Setiawan, dkk., 2021). Curah hujan yang tinggi biasanya meningkatkan sensitivitas (He et al., 2024). Hal ini karena curah hujan yang berlebihan dapat meningkatkan risiko, terutama jika tanahnya miring atau tidak tertutupi oleh vegetasi yang cukup.

Principal Component Analysis. Kemudian dilakukan analisis menggunakan uji *Principal Component Analysis* (PCA) untuk menentukan nilai bobot masing-masing variabel. Bobot yang digunakan berdasarkan hasil analisis PCA menggunakan nilai Eigen yaitu bentuk nilai yang memperlihatkan besaran pengaruh sebuah variabel terhadap terbentuknya karakteristik untuk membangun model.

Standarisasi data. Data harus dinyatakan dalam bentuk standar, yaitu dengan menghitung mean dan standar deviasi dari setiap variabel (Enzellina & Suhaedi, 2022).

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

Dimana, Z adalah data yang telah distandarisasi, X adalah data asli, μ adalah mean, dan σ adalah standar deviasi.

Menghitung matriks kovarians. Matriks kovarians digunakan untuk mengukur hubungan antara variabel-variabel dalam data (Enzellina & Suhaedi, 2022).

$$\text{Cov}(X) = \frac{1}{n-1} (X^T X) \quad (5)$$

Dimana, X adalah data asli, dan n adalah jumlah observasi

Menghitung eigen value dan eigen vector. Eigen value mengukur variasi yang dijelaskan oleh setiap komponen utama, sedangkan eigen vector menunjukkan arah dari komponen tersebut (Enzellina & Suhaedi, 2022).

$$|\text{Cov}(X) - \lambda v| = 0 \quad (6)$$

Dimana, λ adalah eigenvalue, dan v adalah eigen vektor

Analisis *Principal Component Analysis* (PCA) dilakukan dengan menggunakan *Software R Studio* untuk mengetahui hubungan variabel tutupan lahan, kemiringan lereng, dan kerapatan vegetasi. Sebelum itu, setiap variabel harus memiliki rentang nilai yang sama.

```

#Import Data
library(readxl)
data = read_excel("E:/S.HUT/DATA PENELITIAN/EXCEL/Input PCA
aktual.xlsx")
data

data[, -1] <- lapply(data[, -1], function(x)
as.numeric(as.factor(x)))
data[, -1]

# Standarisasi Data
data_std = scale(x=data[, -1])
data_std

# Matriks kovarians
data_cov = cov(data_std)
data_cov

# Eigen Value dan Eigen Vector
data_eigen = eigen(data_cov)$values
data_eigen

# Fungsi Komponen Utama
pr.out= prcomp(data_std, scale. = TRUE)
summary(pr.out) # Penentuan Banyaknya Komponen Utama
pr.out # Menghitung Koefisien Komponen Utama

```

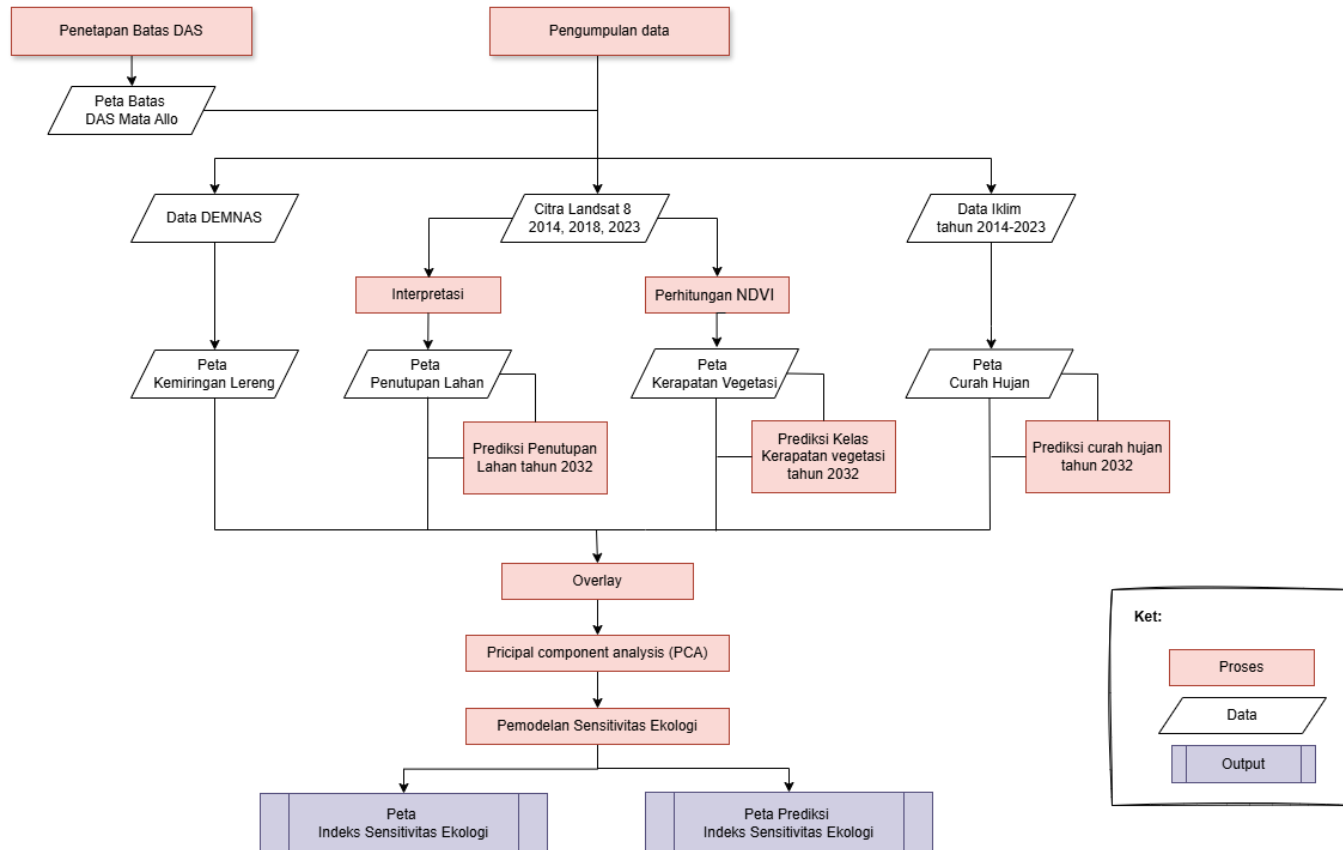
Gambar 4. Tampilan script *Principal Component Analysis* di software R studio

Nilai yang diamati harus lebih besar dari pada 0,5 untuk dianggap sebagai estimasi terbaik. Nilai tersebut juga akan menunjukkan seberapa besar pengaruh variabel terhadap indeks. Apabila nilai tersebut mendekati angka 1.0 maka akan semakin berpengaruh kuat (Oktapiana et al., 2017).

Berdasarkan *Principal Component Analysis* (PCA) maka pemodelan indeks sensitivitas ekologi adalah

Indeks Sensitivitas Ekologi:

$$\begin{aligned}
 & (\text{Tutupan Lahan} \times \text{Bobot Tutupan Lahan}) + (\text{Kemiringan Lereng} \times \text{Bobot} \\
 & \text{Kemiringan Lereng}) + (\text{Kerapatan Vegetasi} \times \text{Bobot Kerapatan vegetasi}) + \\
 & (\text{Curah hujan} \times \text{Bobot Curah Hujan})
 \end{aligned} \quad (7)$$



Gambar 5. Diagram alir penelitian

