

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Perubahan tutupan lahan merupakan hasil interaksi kompleks antara aktivitas manusia dan sumber daya lahan (Rakuasa & Pakniary, 2022; (Latue et al., 2023) serta telah menjadi isu krusial dalam perencanaan wilayah, khususnya di daerah berkembang yang mengalami pertumbuhan penduduk dan urbanisasi. Proses ini umumnya tercermin melalui konversi lahan bervegetasi dan pertanian menjadi kawasan terbangun, yang berpotensi menurunkan daya dukung lingkungan serta menimbulkan ketidaksesuaian antara kebijakan penataan ruang dan kondisi pemanfaatan lahan aktual.

Kabupaten Gorontalo Utara merupakan salah satu wilayah yang menunjukkan dinamika pembangunan yang semakin meningkat. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Gorontalo Utara (BPS, 2025), laju pertumbuhan penduduk tercatat sebesar 1,47% pada tahun 2022, meningkat menjadi 1,51% pada tahun 2023, dan kembali naik menjadi 1,53% pada tahun 2024. Tren ini menunjukkan meningkatnya tekanan terhadap kebutuhan lahan, perumahan, infrastruktur, dan ruang perkotaan. Namun demikian, dibandingkan dengan wilayah lain di Provinsi Gorontalo, kepadatan penduduk di Gorontalo Utara masih relatif rendah (BPS, 2025), yang mengindikasikan bahwa wilayah ini masih berada pada fase awal perkembangan perkotaan dan merupakan kawasan strategis untuk pengendalian serta pengarahan pemanfaatan ruang, terutama karena dokumen Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) kabupaten saat ini sedang dalam proses revisi.

Penginderaan jauh berbasis citra Sentinel-2 memungkinkan pemantauan perubahan tutupan lahan secara spasial-temporal (Nagendra et al., 2004; Juniyanti et al., 2020) melalui indeks vegetasi seperti NDVI dan NDLI (Putri et al., 2021). (Kawamuna et al., 2017; dan Rakhmat Awaliyan et al., 2018) menjelaskan bahwa Sentinel-2 merupakan sistem satelit yang terdiri atas 13 band spektral, termasuk empat band beresolusi 10 meter, enam band beresolusi 20 meter, dan tiga band beresolusi spasial 60 meter, dengan lebar sapuan (swath width) 290 km. Karakteristik ini memungkinkan identifikasi yang lebih presisi terhadap degradasi vegetasi, ekspansi permukiman, serta zona transisi vegetasi–non-vegetasi dibandingkan dengan citra satelit lainnya.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan pemodelan perubahan penggunaan lahan dan pertumbuhan perkotaan pada skala metropolitan, regional, hingga bioma, seperti penelitian (da Rocha de Souza et al., 2025) di Brasil–Portugal, (Varnier & Weber, 2025) pada tiga bioma di Brasil, serta (Giofandi et al., 2025) yang mengintegrasikan model CLUE-S dengan faktor pendorong pada skala daerah aliran sungai. Pendekatan pemodelan berbasis skenario juga banyak diterapkan menggunakan Dinamica EGO (Pinto et al., 2025); (Gonzales & Hopfgartner, 2024). Namun di Indonesia, sebagian besar penelitian masih bersifat deskriptif atau berfokus pada objek tertentu, seperti perubahan tutupan lahan di Kota Ambon (Latue et al., 2023), analisis NDVI di hutan pendidikan (Setiawan & Rijal, 2024), klasifikasi tutupan lahan Sentinel-2 menggunakan NDVI dan random forest (Marlina, 2022), serta perubahan kerapatan vegetasi mangrove berbasis NDVI (Dharma et al., 2022).

Citra Sentinel-2 digunakan dalam penelitian ini selain karena memiliki kombinasi resolusi spasial (10–20 m), juga memiliki resolusi spektral, dan resolusi temporal yang optimal untuk analisis perubahan tutupan lahan dan arah perkembangan kota pada skala kabupaten. Keberadaan band Red Edge, NIR, dan SWIR memungkinkan perhitungan indeks vegetasi dan kelembaban lahan secara lebih akurat dibandingkan sensor generasi sebelumnya. Selain itu, ketersediaan data multitemporal yang konsisten sejak tahun 2015 serta akses terbuka menjadikan Sentinel-2 sesuai untuk analisis perubahan

jangka menengah dan pemodelan spasial berbasis CLUE-S. Dibandingkan citra resolusi tinggi yang mahal dan citra resolusi menengah yang terlalu kasar, Sentinel-2 memberikan keseimbangan antara detail spasial, cakupan wilayah, dan konsistensi temporal.

**Tabel 1.** Karakteristik *Band* Citra Sentinel-2

Saluran	Kanal	Panjang Gelombang (nm)	Resolusi Spasial (m)	Kegunaan
<i>Band 1</i>	<i>Coastal aerosol</i>	443-463	60	Studi pesisir & aerosol
<i>Band 2</i>	Biru	490-555	10	Melihat fitur permukaan air/kolam air dangkal, batimetri
<i>Band 3</i>	Hijau	560-595	10	Studi vegetasi di laut & di darat serta sedimen
<i>Band 4</i>	Merah	665-695	10	Membedakan mineral dan tanah (studi geologi) / lereng vegetasi
<i>Band 5</i>	<i>Red Edge 1</i>	705-720	20	Vegetasi spektral untuk menilai status vegetasi
<i>Band 6</i>	<i>Red Edge 2</i>	740-755	20	Vegetasi spektral untuk menilai status vegetasi
<i>Band 7</i>	<i>Red Edge 3</i>	783-803	20	Vegetasi spektral untuk menilai status vegetasi
<i>Band 8</i>	<i>Near Infrared (NIR)</i>	842-957	10	Studi konten biomassa dan garis pantai
<i>Band 8a</i>	<i>NIR Narrow</i>	865-885	20	Vegetasi spektral untuk menilai status vegetasi
<i>Band 9</i>	<i>Water Vapour</i>	945-965	60	Studi deteksi uap air
<i>Band 10</i>	<i>Cirrus</i>	1375-1405	60	Peningkatan deteksi kontaminasi awan <i>cirrus</i>
<i>Band 11</i>	SWIR 1	1610-1700	20	Studi deteksi kandungan air tanah dan vegetasi
<i>Band 12</i>	SWIR 2	2190-2370	20	Studi deteksi kandungan air tanah dan vegetasi

Sumber : ESA (2015) dalam (Rizqon, 2020).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), yang sangat efektif untuk mendeteksi perubahan vegetasi melalui perhitungan band pada citra yang digunakan untuk mengetahui tingkat kehijauan, kemudian dianalisis untuk mengetahui sebaran kerapatan vegetasi. Nilai NDVI ini, merupakan nilai yang digunakan untuk mengetahui tingkat kehijauan pada daun dengan panjang gelombang inframerah (NIR) (Awaliyan & Sulistyoadi, 2018) dalam (Putri et al., 2021). Sebagai perbandingan, digunakan juga analisis indeks NDLI (*Normalized Difference Latent Index*) yang mampu mengidentifikasi perubahan tutupan lahan non-vegetatif melalui pendekatan berbasis komponen laten.

Dalam penelitian (Liou et al., 2024) menjelaskan bahwa *Normalized Difference Latent Index* (NDLI) merepresentasikan kelembapan residual dan karakteristik termal-reflektif permukaan, yang sering muncul pada area transisi antara lahan vegetasi dan kawasan terbangun. NDLI dikembangkan untuk menangkap kondisi laten permukaan

lahan yang tidak sepenuhnya terwakili oleh indeks vegetasi maupun indeks air permukaan.

Secara teoretis, NDLI memanfaatkan perbedaan respons spektral pada pita yang sensitif terhadap kandungan air tanah dangkal, permukaan terbangun, dan material non-vegetasi, sehingga mampu mengidentifikasi area yang secara fisik tidak sepenuhnya kering seperti bangunan padat, namun juga tidak sebasah badan air atau vegetasi sehat. Karakter ini menjadikan NDLI relevan untuk mengkaji wilayah perkotaan berkembang, di mana perubahan lahan sering diawali oleh degradasi vegetasi dan perubahan kelembapan permukaan. Penggunaan kedua indeks ini untuk mengevaluasi sensitivitas indeks dalam mendeteksi perubahan tutupan lahan secara lebih komprehensif.

Mengapa tidak menggunakan indeks lainnya sebagai pembanding? seperti indeks NDWI (*Normalized Difference Water Index*), MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) dan indeks NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*).

NDBI memang efektif dalam menonjolkan kawasan terbangun, namun sifatnya lebih *material-based* dan cenderung mengklasifikasikan lahan terbuka kering sebagai kawasan terbangun. Dalam penelitian ini, fokusnya bukan hanya identifikasi bangunan eksisting, tetapi proses perubahan tutupan lahan, khususnya pada fase transisi. Sementara itu, NDWI dan MNDWI dirancang untuk mendeteksi badan air atau permukaan basah secara eksplisit. Namun, indeks tersebut kurang sensitif terhadap kelembapan residual pada permukaan terbangun atau lahan transisi (Mulkal et al., 2024).

Penambahan indeks lain seperti NDBI, NDWI, dan MNDWI tentu berpotensi memperkaya analisis. Namun, dalam penelitian tesis dengan ruang lingkup yang terbatas, pemilihan NDVI dan NDLI dianggap sudah representatif untuk menjawab tujuan penelitian.

Selain itu, pendekatan yang dapat digunakan untuk memahami arah dan pola perubahan penggunaan lahan secara spasial adalah pemodelan CLUE-S (*Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent*). CLUE-S merupakan model berbasis spasial yang menggabungkan data penggunaan lahan masa lalu, variabel pendorong biofisik maupun sosial-ekonomi, serta skenario kebijakan untuk mensimulasikan kemungkinan perubahan tutupan lahan di masa depan (Verburg et al., 2002) dalam (Warlina, 2011). Model ini sangat berguna untuk menganalisis dinamika penggunaan lahan pada skala lokal dan menengah, serta dapat dimanfaatkan sebagai alat prediksi dalam perencanaan tata ruang.

Secara khusus di Kabupaten Gorontalo Utara, penelitian mengenai perubahan tutupan lahan masih sangat terbatas dan terfragmentasi. Penelitian oleh (Wahdaniah, Sukirman Rahim, 2022) hanya berfokus pada dampak hutan tanaman industri di Kecamatan Monano, sedangkan (Baderan, 2017) meneliti degradasi ekosistem mangrove di Kecamatan Kwandang. Hingga saat ini, belum terdapat penelitian yang secara komprehensif mengkaji perubahan tutupan lahan dan arah perkembangan kota pada skala administratif Kabupaten Gorontalo Utara dengan mengintegrasikan dinamika biofisik vegetasi dan pemodelan spasial.

Menjawab kesenjangan penelitian tersebut, studi ini mengusulkan pendekatan terintegrasi NDVI–NDLI yang dikombinasikan dengan pemodelan CLUE-S untuk mendeteksi secara dini zona transisi vegetasi–non-vegetasi sekaligus mengidentifikasi arah pertumbuhan perkotaan di Kabupaten Gorontalo Utara. Kebaruan utama penelitian ini terletak pada penggabungan dinamika biofisik vegetasi dengan pemodelan spasial serta evaluasi langsung terhadap dokumen RTRW, sehingga mampu mengungkap mekanisme struktural ekspansi permukiman di wilayah semi-perdesaan. Penelitian ini juga berasumsi bahwa aksesibilitas infrastruktur berperan dominan dalam membentuk pola pertumbuhan perkotaan, dan hasilnya diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah berbasis spasial bagi perencanaan wilayah yang lebih adaptif dan berkelanjutan.

## **1.2 Rumusan Masalah**

- a. Bagaimana kondisi tutupan lahan di Kabupaten Gorontalo Utara pada tahun 2016 dan tahun 2025?
- b. Bagaimana perubahan tutupan lahan berdasarkan analisis NDVI dan NDLI dari citra satelit sentinel-2A di Kabupaten Gorontalo Utara?
- c. Bagaimana arah dan pola perkembangan kota berdasarkan perubahan nilai NDVI dan nilai NDLI di Kabupaten Gorontalo Utara?
- d. Faktor dominan apa yang mempengaruhi perubahan tutupan lahan dan arah perkembangan kota di Kabupaten Gorontalo Utara?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

- a. Mendeskripsikan dan membandingkan kondisi tutupan lahan tahun 2016 dan 2025 di Kabupaten Gorontalo Utara;
- b. Menganalisis perubahan tutupan lahan berdasarkan nilai NDVI dan NDLI untuk mengidentifikasi dinamika spasial yang terjadi;
- c. Mengkaji arah serta pola perkembangan kota berdasarkan perubahan spasial nilai indeks vegetasi tersebut dan menyajikannya dalam bentuk peta tematik; serta
- d. Mengevaluasi faktor dominan yang mempengaruhi perubahan tutupan lahan dan perkembangan kota dengan pemodelan CLUE-S.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

### **1.4.1 Bagi Akademis**

- a. Menambah kontribusi ilmiah dalam bidang penginderaan jauh dan pemetaan perubahan tutupan lahan berbasis NDVI, NDLI dan pemodelan CLUE-S;
- b. Menjadi acuan bagi penelitian sejenis yang membahas dinamika tutupan lahan dan perkembangan kawasan perkotaan;
- c. Mendemonstrasikan pemanfaatan citra Sentinel-2 sebagai sumber data spasial yang akurat, murah, dan relevan untuk analisis lingkungan dan perencanaan wilayah.

### **1.4.2 Bagi Pemerintah Daerah**

- a. Memberikan informasi spasial terkini tentang perubahan tutupan lahan yang dapat digunakan oleh pemerintah daerah, khususnya Bappeda dan Dinas PUPR, dalam evaluasi dan perencanaan tata ruang;
- b. Menyediakan data dasar untuk mengantisipasi alih fungsi lahan pertanian, terutama sawah, agar tidak mengganggu ketahanan pangan lokal;
- c. Membantu dalam menentukan arah prioritas pengembangan kawasan permukiman dan infrastruktur secara berkelanjutan di Kabupaten Gorontalo Utara;
- d. Menjadi bahan pertimbangan dalam peninjauan ulang RTRW (Rencana Tata Ruang Wilayah) kabupaten, khususnya untuk kawasan strategis dari sudut kepentingan ekonomi dan lingkungan.

## 1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini difokuskan pada wilayah administratif Kabupaten Gorontalo Utara. Analisis dilakukan menggunakan data citra Sentinel-2A dalam dua periode waktu yaitu pada Tahun 2016 dan Tahun 2025 untuk mendeteksi perubahan tutupan lahan dan arah perkembangan kota.

Metode utama yang digunakan adalah pengolahan indeks vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Kemudian dibandingkan dengan hasil analisis dari perhitungan NDLI (*Normalized Difference Latent Index*) secara spasial untuk mengidentifikasi areal terbangun, pola dan arah perubahan tutupan lahan.

Perbandingan antara NDVI dan NDLI tidak hanya dilakukan secara visual, tetapi juga dievaluasi secara kuantitatif melalui uji akurasi menggunakan data referensi. Indeks yang menghasilkan nilai *Overall accuracy* dan *kappa accuracy* yang lebih tinggi dianggap lebih representatif dalam mendeteksi perubahan tutupan lahan pada wilayah studi.

Model Clue-S juga akan digunakan untuk memprediksi distribusi spasial dari perubahan penggunaan lahan dan menganalisis dampak dari kebijakan penggunaan lahan atau perubahan faktor-faktor eksternal seperti pertumbuhan penduduk atau pembangunan infrastruktur.

Data penyebab ini dikumpulkan melalui studi literatur, data statistik daerah (misalnya dari BPS), dokumen perencanaan wilayah (RTRW), dan wawancara/kuesioner terbatas (jika memungkinkan). Fokus utama adalah mengintegrasikan pola perubahan tutupan lahan berdasarkan analisis NDVI, NDLI dan pemodelan Clue-S.

## 1.6 Keaslian Penelitian

Keaslian penelitian merupakan salah satu cara untuk menunjukkan kebaruan dan keunikan dari suatu penelitian dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya atau memiliki sudut pandang, pendekatan, data, atau wilayah studi yang belum pernah dikaji sebelumnya. Selain itu, untuk menghindari plagiarisme atau pelanggaran kode etik akademik terhadap penelitian sebelumnya. Penelitian ini memiliki kebaruan dalam hal integrasi metode NDVI, NDLI dan skenario CLUE-S untuk mendeteksi perubahan tutupan lahan dan kecenderungan arah perkembangan kota secara spasial-temporal di Kabupaten Gorontalo Utara yang belum dilakukan sebelumnya. Selain itu, pendekatan NDLI dan CLUE-S memberikan pendekatan baru yang lebih sensitif terhadap perubahan permukaan non-vegetatif dalam konteks pertumbuhan permukiman. Berikut beberapa ulasan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, baik yang telah dilakukan di Gorontalo Utara dan lokasi penelitian lainnya.

**Tabel 2.** Penelitian-penelitian sebelumnya

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
1. <b>Elizabeth Maria Feitosa da Rocha de Souza (da Rocha de Souza et al., 2025)</b>	Urban Growth in Metropolitan Regions Using Dynamic Modeling by Cellular Automata: A Comparative Analysis Between Brazil and Portugal	Metropolitan Area of Porto (AMP) and the Metropolitan Region of Rio de Janeiro	Pemodelan dinamis oleh cellular automata di dua wilayah metropolitan di Portugal dan Brasil	Berdasarkan hasil proyeksi perluasan kota untuk Wilayah Metropolitan Rio de Janeiro (RMRJ) dan Wilayah Metropolitan Porto (AMP) memberikan sudut pandang yang unik dan berbeda. RMRJ memberikan penekanan yang cukup besar pada zona perluasan tertentu, terutama di sub-wilayah yang berkembang pesat seperti Baixada Fluminense dan Fluminense Timur. Perhatian khusus diberikan pada perubahan eksplisit dalam penggunaan lahan di dalam AMP, yang berkaitan dengan daerah pertanian dan daerah urban. Kedua konteks tersebut menekankan pada transformasi wilayah pertanian dan semak belukar menjadi wilayah perkotaan. Temuan-temuan tersebut menyatu dalam hal penekanan pada dampak lingkungan dan infrastruktur yang tidak memadai yang terkait dengan perluasan wilayah perkotaan, sehingga menekankan perlunya kebijakan publik yang berkelanjutan dan perencanaan kota yang cermat di kedua wilayah tersebut.	Menganalisis temuan-temuan yang diperoleh, dengan mempertimbangkan kekhasan masing-masing negara dan mengevaluasi potensi data yang digunakan melalui penerapan pemodelan dinamis dengan cellular automata.
2. <b>Macleidi Varnier (Varnier &amp; Weber, 2025)</b>	Evaluating the Accuracy of Land-Use Change Models for Predicting Vegetation Loss Across Brazilian Biomes	3 Bioma Brasil (Bioma Amazon, Bioma Cerrado, Bioma Pampa)	Pemodelan perubahan lahan (empat model dasar dan empat model berbasis pembelajaran mesin) untuk memprediksi terjadinya penekanan vegetasi dengan menggunakan pendekatan satu arah.	Empat model dasar (jarak Euclidean dari penggunaan antropis, jarak Euclidean dari penekanan vegetasi, model perubahan nol, dan model perubahan acak) dan empat model berbasis pembelajaran mesin (jaringan syaraf tiruan TerrSet, TerrSet SimWeight, Weights of Evidence-Dinamica Ego, dan Model Hutan Acak) dilatih dengan mempertimbangkan konteks lingkungan pada periode tahun 1995 sampai dengan tahun 2000. Tujuannya adalah untuk memprediksi penekanan vegetasi alami dari tahun 2000 hingga tahun 2005, 2010, 2015, dan 2020. Peta prediksi	Mengevaluasi dan membandingkan keakuratan model baseline dan model berbasis pembelajaran mesin untuk area studi di tiga bioma di Brasil.

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
3. (Giofandi et al., 2025)	Long-term land use dynamics and scenario-based land-use change modelling	Wilayah DAS / kawasan regional (studi kasus internasional); analisis tahun ±1990–2020 dan skenario masa depan hingga ±2035/2050	Analisis perubahan tutupan lahan multi-temporal berbasis citra satelit (Landsat), analisis faktor pendorong (fisik dan sosial ekonomi), pemodelan skenario perubahan penggunaan lahan menggunakan CLUE-S	dievaluasi dengan membandingkannya dengan peta referensi penggunaan lahan menggunakan metode akurasi yang ketat. Hasilnya menunjukkan bahwa, terlepas dari metode yang digunakan, model-model tersebut menunjukkan kinerja yang sama di semua situasi.  Hasil penelitian menunjukkan terjadinya konversi lahan non-terbangun (hutan dan pertanian) menjadi lahan terbangun secara signifikan dalam jangka panjang. Skenario kebijakan menunjukkan bahwa pembatasan penggunaan lahan mampu menekan laju ekspansi kawasan terbangun, namun tidak sepenuhnya menghentikan perubahan tutupan lahan.	Penelitian ini berorientasi pada pemodelan skenario dan prediksi perubahan penggunaan lahan jangka panjang menggunakan CLUE-S. Sementara penelitian saya tidak menitikberatkan pada pemodelan skenario, melainkan menganalisis perubahan tutupan lahan aktual serta mendeteksi arah perkembangan kota menggunakan citra Sentinel-2 dan indeks vegetasi NDVI & NDLI. Selain itu, penelitian saya berfokus pada wilayah pesisir dan perkembangan kota di Kabupaten Gorontalo Utara, bukan analisis regional berskala luas.
4. Luis Valenca	A Protocol to Model Future Land Use Scenarios	Lithuania, daerah perkotaan fungsional	Memodelkan skenario penggunaan lahan di masa depan	Bahwa pemodelan Dinamica EGO ini merinci pendekatan langkah demi Langkah untuk memodelkan perubahan penggunaan lahan di	Mengembangkan protocol terperinci untuk memprediksikan

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
<b>Pinto (Pinto et al., 2025)</b>	Using Dinamica-EGO	Kaunas (FUA), Maret 2025	menggunakan Dinamica EGO	daerah perkotaan manapun. Lithuania, daerah perkotaan fungsional Kaunas (FUA), luasan wilayah untuk tahun 1989, 2021 dan 2050 (BAU dan Urbanisasi), hasil pemodelan menunjukkan perbedaan jelas dalam luasan wilayah perkotaan untuk kedua skenario. Data penggunaan lahan untuk periode referensi yang berasal dari penginderaan jauh dapat dipengaruhi oleh kesalahan klasifikasi, yang akan mempengaruhi kakuratan analisis pada sub-modul yang berbeda. Menilai lanskap yang luas dan perubahan penggunaan lahan yang terjadi di antara beberapa kelas penggunaan lahan akan menambah kerumitan daam analisis dan dapat meningkatkan ketidakpastian hasil.	perubahan penggnaan lahan dengan menggunakan perangkat lunak Dinamica EGO
<b>5. (Gonzales &amp; Hopfgartner, 2024)</b>	Modeling future projections of land use and land cover in the Kakataibo territory	Wilayah Kakataibo yang terletak di antara departemen Ucayali dan Huanuco di Wilayah Amazon Tengah. November 2024	Menggunakan platform pemodelan Dinamica EGO	Temuan kami menunjukkan adanya kehilangan hutan yang cukup besar antara tahun 2014 dan 2022, dan tren ini kemungkinan akan terus berlanjut hingga tahun 2030. Di dalam wilayah adat, deforestasi tidak terlalu parah, dengan penurunan sebesar 30.247,4 hektar dibandingkan dengan kehilangan yang lebih signifikan di wilayah non-adat. Hal ini menggarisbawahi peran penting yang dimainkan oleh wilayah-wilayah tersebut dalam mengurangi kehilangan hutan. Namun, ekspansi pertanian dan infrastruktur yang cepat di wilayah-wilayah ini menandakan kebutuhan mendesak akan perlindungan hukum yang lebih kuat untuk menghentikan deforestasi lebih lanjut. Studi ini menyoroti pentingnya wilayah adat dalam konservasi hutan dan memberikan wawasan berharga untuk strategi pengelolaan lahan dan konservasi di masa depan di Amazon.	Membuat skenario penggunaan lahan dan tutupan lahan (LULC) di masa depan dengan mengkaji tren di masa lalu (2014-2022) dan memprediksi pola masa depan pada tahun 2030, dengan fokus wilayah Kakataibo di Peru Bagian Tengah, menggunakan pemodelan Dinamica EGO.

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
6. <b>Muhammad Sulfikar Setiawan (Setiawan &amp; Rijal, 2024)</b>	Penyusunan Model Volume Hutan Alam dengan menggunakan Sentinel 2A di Hutan Pendidikan Universitas Hasanuddin	Hutan Alam dalam kawasan KHDTK (Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus) Universitas Hasanuddin. Desember 2024	Kualitatif, menggunakan analisis spasial & perhitungan NDVI	Hasil penelitian menunjukkan adanya 23 jenis spesies pohon dengan rata-rata volume 0,74 m <sup>3</sup> /ha. Model regresi logaritmik terbukti menjadi model terbaik dalam mengestimasi volume hutan alam di kawasan ini, dengan nilai Adjusted-R <sup>2</sup> sebesar 0,723 dan SEE sebesar 7,14. Estimasi total volume pohon di area tersebut mencapai 13.533,18 m <sup>3</sup> /ha, dengan distribusi volume yang bervariasi berdasarkan tingkat kerapatan vegetasi: vegetasi sangat rendah (NDVI <0,15) dengan volume pohon <2.706 m <sup>3</sup> /ha (0,02% dari total area), vegetasi rendah (NDVI 0,15-0,30) dengan volume 2.707-5.412 m <sup>3</sup> /ha (0,58%), vegetasi sedang (NDVI 0,30-0,45) dengan volume 5.413-8.118 m <sup>3</sup> /ha (7,39%), vegetasi tinggi (NDVI 0,45-0,60) dengan volume terbesar 8.119-10.824 m <sup>3</sup> /ha (65,68%), serta vegetasi sangat tinggi (NDVI >0,60) dengan volume pohon mencapai 10.825 m <sup>3</sup> /ha (26,33%).	Menganalisis indeks kerapatan vegetasi dan mengembangkan model volume hutan (NDVI)
7. <b>(Chasia et al., 2023)</b>	Modelling of land-use/cover change trajectories in a transboundary catchment of the Sio-Malaba-Malakisi Region in East Africa using the CLUE-s model	DAS lintas negara Sio–Malaba–Malakisi (Kenya – Uganda), luas ±5.200 km <sup>2</sup> . Tahun 2023 (data historis 1986–2017, proyeksi 2027–2047)	<ul style="list-style-type: none"> <li>•CLUE-s model (<i>Conversion of Land Use and its Effects at Small regional extent</i>) menggunakan Data LULC dari Landsat (1986–2017)</li> <li>•Menggunakan logistic regression, driving factors (DEM, iklim, jarak,jalan/sungai/kota, SOC, pH, CEC, populasi).</li> <li>•Dua skenario: <ul style="list-style-type: none"> <li>– Scenario I: <i>Agricultural Expansion.</i></li> </ul> </li> </ul>	<p><i>Scenario I – Agricultural Expansion:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Lahan pertanian meningkat 24% hingga mencakup 62% wilayah pada tahun 2047.</li> <li>•Konversi utama terjadi dari open land &amp; wetland → cropland.</li> </ul> <p><i>Scenario II – Land Reclamation:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>•Tutupan hutan meningkat 30% (aforestasi &amp; REDD+).</li> <li>•Konversi open land → mixed forest.</li> </ul> <p>Validasi model: Kappa = 0.78–0.89; Ksimulation = 0.4 rata-rata.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Studi jurnal bersifat lintas negara dan DAS besar, fokus konservasi &amp; kebijakan wilayah.</li> <li>•Menggunakan dua skenario masa depan.</li> <li>•Data LULC berbasis Landsat resolusi 30 m → 250 m.</li> <li>•Fokus pada perubahan ekologis jangka panjang (1986–2047).</li> </ul>

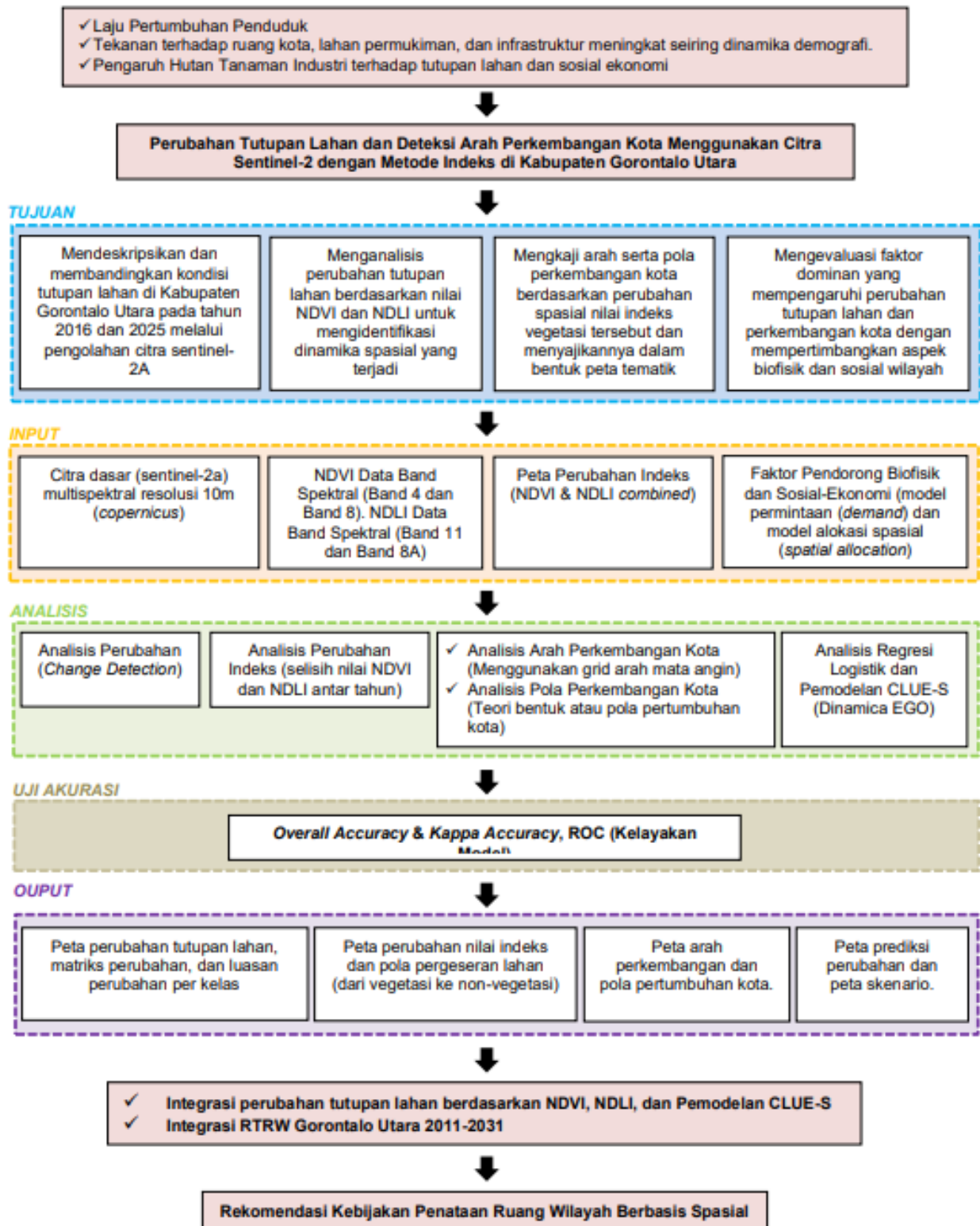
Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
8. <b>Philia Cristi Latue (Latue et al., 2023)</b>	Perubahan Tutupan Lahan Kota Ambon Tahun 2015, 2019 dan 2023	Kota Ambon, Provinsi Maluku, Maret 2023	– <i>Scenario II: Land Reclamation (reforestasi)</i> . Metode kualitatif dengan analisis spasial menggunakan citra ( <i>time series</i> )	Perubahan tutupan lahan Kota Ambon tahun 2015-2023 menunjukkan peningkatan luasan pada tutupan lahan terbangun dari sebelumnya tahun 2015 seluas 4.175,81 ha dan pada tahun 2023 naik bertambah seluas 4.421,01 ha Perkembangan lahan terbangun di Kota Ambon mengalami peningkatan atau penambahan luasan yang signifikan. Faktor yang mempengaruhi perkembangan lahan terbangun di Kota Ambon diantaranya pertumbuhan penduduk yang terus meningkat, pembangunan infrastruktur yang terus bertambah, konversi lahan pertanian atau hutan menjadi lahan untuk permukiman, kebijakan pemerintah dan investasi property yang tinggi.	Mengetahui secara spasial perubahan tutupan lahan di Kota Ambon dengan analisis spasial menggunakan citra ( <i>time series</i> )
9. <b>Wahdaniah (Wahdaniah, Sukirman Rahim, 2022)</b>	Dampak hutan tanaman industri terhadap perubahan tutupan lahan hutan Dan kondisi sosial ekonomi masyarakat	Areal konsesi Hutan Tanaman Industri (HTI) PT. Gorontalo Citra Lestari Kecamatan Monano Kabupaten Gorontalo Utara. 31 Oktober 2022	Deskriptif dan inferensial, menggunakan analisis deskriptif <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) dan <i>paired samples t Test</i>	(1) <i>Nilai Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) berada dalam kategori Kehijauan sedang pada tahun 2021. Hal ini menunjukkan bahwa dampak pembangunan oleh konsesi HTI PT.Gorontalo Citra Lestari terhadap perubahan tutupan lahan hutan pada jangka pendek cenderung kurang baik dalam lingkungan dan kehijauan hutan, namun secara jangka panjang akan berdampak positif dengan sebaran dan kepadatan tanaman hijau yang mampu memberikan manfaat lingkungan (perubahan tutupan lahan hutan makin baik) dan (2) Kehadiran konsesi HTI PT.Gorontalo Citra Lestari berpengaruh positif dan signifikan terhadap perubahan kondisi sosial dan kondisi ekonomi masyarakat di Kabupaten Gorontalo Utara (adanya perbedaan yang	Dampak Pembangunan HTI terhadap Perubahan Tutupan Lahan Hutan di Wilayah Konsesi HTI PT. Gorontalo Citra Lestari dan Dampak Pembangunan HTI terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Kecamatan Monano menggunakan analisis deskriptif <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI) dan <i>paired samples t Test</i>

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
<b>10. Dwi Marlina (Marlina, 2022)</b>	Klasifikasi tutupan lahan pada citra sentinel-2 kabupaten kuningan dengan NDVI dan algoritme <i>Random forest</i>	Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat. Juli 2022	Kualitatif (Analisis Spasial dengan metode NDVI dan algoritme random forest)	<p>krusial dari kondisi sosial dan kondisi ekonomi masyarakat sebelum dan sesudah adanya PT.Gorontalo Citra Lestari). Beberapa masyarakat petani, lahannya menjadi lebih sempit karena lahan hutan yang selama ini digunakan untuk kegiatan usahatani diklaim dan digunakan oleh HTI namun sebagai gantinya petani memperoleh pendapatan tambahan dengan bekerja di PT. Gorontalo Citra Lestari.</p> <p>Hasil nilai vegetasi NDVI yang diperoleh yaitu sebesar 0,3 – 0,91. Nilai ini menunjukkan bahwa vegetasi yang berada di daerah Kabupaten Kuningan memiliki kerapatan yang tinggi yaitu 0,91 dan juga memiliki lahan yang tidak bervegetasi (mengandung air) bernilai - 0,38. Nilai akurasi keseluruhan (<i>Overall accuracy</i>) 91,39%, dan nilai kappa 0,88. Nilai akurasi tersebut masuk dalam kategori layak dan hasil klasifikasinya dapat digunakan untuk keperluan lainnya.</p>	Klasifikasi tutupan lahan menggunakan metode NDVI dan algoritme <i>random forest</i> pada citra sentinel-2A.
<b>11. Febriansyah Dharma (Dharma et al., 2022)</b>	Pemanfaatan Citra Sentinel-2 Dengan Metode Ndvi Untuk Perubahan Kerapatan Vegetasi Mangrove Di Kabupaten Indramayu	Kabupaten Indramayu, September 2022	Menggunakan metode indeks vegetasi seperti Normalized Different Vegetation Index (NDVI).	Perubahan kerapatan mangrove yang terjadi pada kelas kerapatan sangat rendah mengalami penurunan sebesar 16.71 ha, kelas kerapatan rendah mengalami penurunan sebesar 61.99 ha, untuk kelas kerapatan sedang mengalami penurunan sebesar 28.04 ha, untuk kelas kerapatan tinggi mengalami penurunan sebesar 26.7 ha, sedangkan untuk kelas kerapatan sangat tinggi mengalami kenaikan sebesar 134.51 ha. Perubahan kerapatan vegetasi di Kabupaten Indramayu terjadi karena beberapa faktor yang mempengaruhi seperti aktivitas perubahan lahan hutan menjadi tambak ataupun karena faktor alam.	Menganalisis perubahan nilai indeks vegetasi (NDVI) pada hutan mangrove yang ada di Kabupaten Indramayu

Nama Peneliti	Judul	Lokasi dan Tanggal Penelitian	Metode Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan
12. (Akın et al., 2022)	Evaluating the efficiency of future crop pattern modelling using the CLUE-S approach in an agricultural plain	Lower Seyhan Plain (LSP), Turkey — Data digunakan tahun 1984, 2015, dan proyeksi hingga 2050	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Klasifikasi LULC berbasis objek pada citra Landsat-8 OLI (1984–2015)</li> <li>•Penyusunan driving factors (12 variabel: DEM, slope, soil salinity, precipitation, temperature, jarak jalan, jarak permukiman, dll.)</li> <li>•Regresi logistik untuk membuat suitability map</li> <li>•CLUE-S untuk pemodelan permintaan dan alokasi penggunaan lahan 2050</li> <li>•Skenario berbasis kebijakan (subsidi pemerintah untuk kapas &amp; jagung)</li> <li>•Validasi menggunakan ROC</li> </ul>	Jagung diprediksi meningkat 45% dan kapas berkurang 10% pada 2050. Akurasi model CLUE-S mencapai ROC 0.79. Perubahan LULC paling besar: peningkatan jagung, penurunan kapas & pertanian lain. Peningkatan permukiman sekitar 4498 ha. <i>Driving factor</i> paling berpengaruh: <i>land use capability, slope, soil salinity, precipitation, elevation</i> .	memodelkan pola tanaman (crop pattern) seperti : maize,cotton, <i>agriculture</i> di masa depan (2050) dengan menggunakan 12 faktor biofisik dan kebijakan pemerintah

## 1.7 Kerangka Pikir Penelitian

Kerangka pikir merupakan suatu rangkaian logika ilmiah yang menjelaskan alur berpikir peneliti dalam menyelesaikan masalah penelitian, mulai dari identifikasi masalah, teori/konsep yang digunakan, metode, hingga bagaimana hasil yang diharapkan dapat menjawab rumusan masalah.



Gambar 1. Kerangka Pikir

## BAB II METODE PENELITIAN

### 2.1 Jenis Penelitian

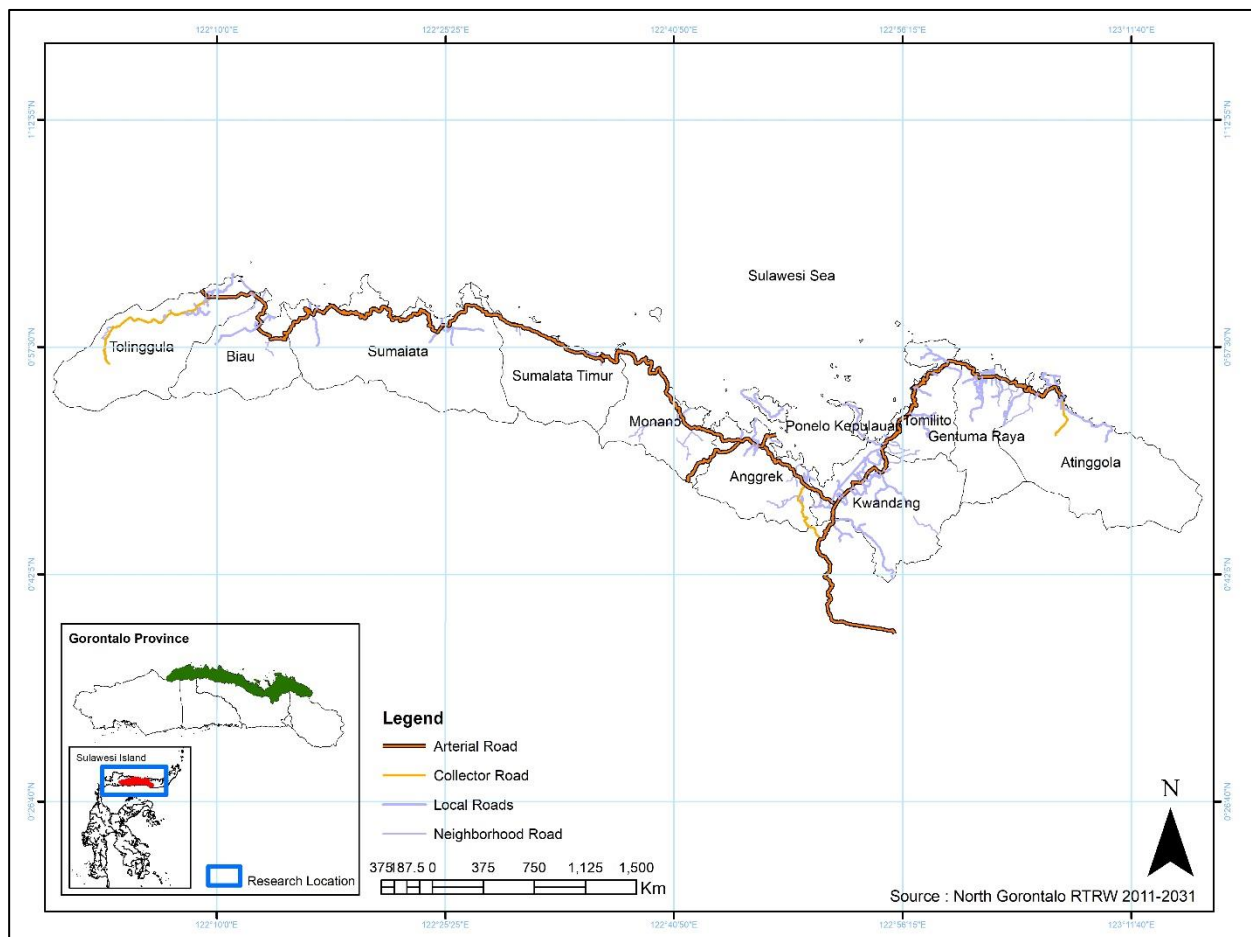
Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan pendekatan spasial-temporal melalui pemodelan perubahan tutupan lahan, untuk menganalisis perubahan tutupan lahan dan arah perkembangan kota menggunakan data penginderaan jauh dengan metode indeks dan Pemodelan CLUE-S.

### 2.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Mei Tahun 2025 sampai dengan bulan Januari tahun 2026 dengan cakupan data pada tahun 2016 dan tahun 2025 di wilayah Kabupaten Gorontalo Utara, Provinsi Gorontalo. Berikut batas wilayah studi penelitian yang disajikan pada Gambar 2.

Dalam dokumen teknis RTRW Kabupaten Gorontalo tahun 2011-2031, Kabupaten Gorontalo Utara merupakan wilayah administrasi hasil pemekaran dari Kabupaten Gorontalo, Provinsi Gorontalo berdasarkan Undang-undang Nomor 11 Tahun 2007. Luas wilayah Kabupaten Gorontalo Utara sebesar 1.777,03 Km<sup>2</sup>. Terbagi atas 11 kecamatan, yaitu: Kec. Atinggola, Gentuma Raya, Tomilito, Kwandang, Ponelo Kepulauan, Anggrek, Monano, Sumalata Timur, Sumalata, Biau dan Kec. Tolinggula.

Kabupaten Gorontalo Utara terletak memanjang arah timur-barat di bagian utara Provinsi Gorontalo, sepanjang jalur jalan trans sulawesi bagian utara, yang menghubungkan antara Kota Manado sebagai ibukota Provinsi Sulawesi Utara di bagian utara dan Kota Makassar sebagai ibukota Provinsi Sulawesi Selatan di bagian selatan Pulau Sulawesi. Secara Geografis daratan Kabupaten Gorontalo Utara terletak pada 386.732 mT – 530.446 mT dan 74.367 mU – 115.085 mU (*zone UTM 51 North*).



Gambar 2. Peta Batas Wilayah Studi

### 2.3 Tahap Pengumpulan Data

Untuk mengumpulkan data-data yang akan digunakan dalam proses analisis diperlukan alat bantu berupa kamera untuk mendokumentasikan kegiatan survei lapangan, perangkat lunak laptop berupa Microsoft Office untuk mengolah data deskriptif dalam bentuk tabular, tabel, grafik dan foto, Arcgis Desktop 10.8.2 untuk mengolah data spasial berupa citra satelit, GPS untuk memastikan titik koordinat lokasi survei penelitian dan aplikasi Dinamica EGO 8 untuk mengolah data pemodelan CLUE-S. Berikut tabel jenis-jenis data yang dibutuhkan dalam proses analisis berdasarkan tujuan penelitian.

**Tabel 3.** Kebutuhan Data

Tujuan Penelitian	Jenis Data	Kebutuhan Data	Sumber Data	Alat Analisis	Ouput
1. Mendeskripsikan & membandingkan kondisi tutupan lahan di Kabupaten Gorontalo Utara pada tahun 2016 dan 2025 melalui pengolahan citra sentinel-2A	Data Sekunder	Citra Sentinel-2A Data Set April 2016 dan April 2025	Dataspace.copernicus.eu	Arcgis	Citra dasar multispektral resolusi 10m
		Batas Administrasi Gorontalo Utara	RTRW Gorontalo Utara 2011-2031 (DPUPR Gorut)		Batas Administrasi untuk pemotongan citra
		Titik Sampling	Interpretasi visual citra resolusi tinggi Google Earth		Sebagai <i>training sample</i> dan uji akurasi
		Data Validasi Visual (Google Earth)	Google Earth Time Slider / Interpretasi manual		Validasi visual lokasi yang menunjukkan perubahan signifikan
2. Menganalisis perubahan tutupan lahan berdasarkan nilai NDVI dan NDLI untuk mengidentifikasi dinamika spasial yang terjadi	Data Sekunder	Data Band Spektral (Band 4 dan Band 8)	Diambil dari citra sentinel-2A Tahun 2016 & 2025	Arcgis	Band merah (B4) dan NIR (B8) untuk perhitungan NDVI
		Data Band Spektral (Band 11 dan Band 8A)	Diambil dari citra sentinel-2A Tahun 2016 & 2025		Band SWIR (B11) dan NIR (B8A) untuk perhitungan NDLI
		Data Validasi Visual (Google Earth)	Google Earth Time Slider / Interpretasi manual		Validasi visual lokasi yang menunjukkan perubahan signifikan
	Data Primer	Titik Sampel tutupan lahan	Sampel 3-5 titik lokasi dengan perubahan kondisi tutupan lahan yang signifikan)		Validasi lokasi yang menunjukkan perubahan
3. Mengkaji arah serta pola perkembangan kota berdasarkan perubahan spasial nilai indeks vegetasi tersebut dan menyajikannya dalam bentuk peta tematik	Data Sekunder	Citra Sentinel-2 (Tahun 2016 & 2025)	Citra Sentinel-2A	Arcgis	Data dasar multispektral resolusi 10–20 m
		NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	Diolah dari Band 8 & Band 4 Sentinel-2A		Raster indeks vegetasi 2016 dan 2025
		NDLI (Normalized Difference Latent Index)	Diolah dari Band 11 & Band 12 Sentinel-2A		Raster indeks kelembapan 2016 dan 2025

Tujuan Penelitian	Jenis Data	Kebutuhan Data	Sumber Data	Alat Analisis	Ouput
		Peta Selisih NDVI ( $\Delta$ NDVI)	Hasil overlay NDVI 2025 minus NDVI 2016		Peta perubahan vegetasi yang menunjukkan degradasi/pembangunan
		Peta Selisih NDLI ( $\Delta$ NDLI)	Hasil overlay NDLI 2025 minus NDLI 2016		Peta perubahan kelembapan lahan (indikator tutupan kedap air)
		Peta Perubahan Indeks (NDVI & NDLI combined)	Gabungan $\Delta$ NDVI dan $\Delta$ NDLI (thresholding / klasifikasi perubahan)		Peta tematik perubahan tutupan lahan akibat pembangunan / konversi
		Peta Administrasi Wilayah (Batas Kecamatan)	RTRW Gorontalo Utara 2011-2031 (DPUPR Gorut)		Digunakan untuk mengelompokkan arah perubahan secara administratif
		Data Jaringan Jalan & Permukiman	RTRW Gorontalo Utara (Dinas PU)		Digunakan untuk analisis hubungan antara perubahan vegetasi dan aksesibilitas/perkotaan
		Data pusat pemerintahan	RTRW Gorontalo Utara (Dinas PU)		Digunakan untuk analisis hubungan antara perubahan vegetasi dan pusat pemerintahan
		Data elevasi	RTRW Gorontalo Utara (Dinas PU)		Digunakan untuk analisis hubungan antara perubahan vegetasi dan ketinggian daerah penelitian
		Data Arah Mata Angin (Grid arah)	Dibuat manual di Arcgis (seperti kompas 8 arah atau 16 arah)		Membagi wilayah studi ke dalam zona arah mata angin dari suatu titik pusat (biasanya pusat kota) agar dapat dianalisis kemana arah dominan perubahan lahan terjadi (misalnya ke arah utara, tenggara, dll.).
4. Mengevaluasi faktor dominan yang mempengaruhi perubahan tutupan lahan dan perkembangan kota dengan	Data Sekunder	Citra Sentinel-2 (2016 & 2025)	Dataspace.copernicus.eu	Dinamica EGO	Peta tutupan lahan hasil klasifikasi untuk input awal dan akhir pemodelan
		Peta Tutupan Lahan (hasil klasifikasi)	Diolah dari citra Sentinel-2		Layer perubahan tutupan lahan tahun 2016–2025

Tujuan Penelitian	Jenis Data	Kebutuhan Data	Sumber Data	Alat Analisis	Ouput
mempertimbangkan aspek biofisik dan sosial wilayah			menggunakan NDVI dan NDLI		
		Peta Ketinggian (Elevation)	DEM dari USGS/SRTM		Peta elevasi sebagai variabel pendorong biofisik
		Jarak ke Jalan Utama	RTRW Gorontalo Utara (Dinas PUPR)		Variabel aksesibilitas sosial-ekonomi ( <i>driving factor sosial</i> )
		Jarak ke Pusat Pemerintahan	RTRW Gorontalo Utara (Dinas PUPR)		Variabel aksesibilitas sosial-ekonomi ( <i>driving factor sosial</i> )
		Peta Penggunaan Lahan Resmi (RTRW)	RTRW Kabupaten Gorontalo Utara (Dinas PUPR)		Layer perbandingan atau pembatasan zona dalam pemodelan
		Koefisien Transisi Lahan	Dihitung dari perubahan tutupan lahan 2016–2025		Matriks transisi untuk input Dinamica EGO
		Validasi (data teraktual tahun simulasi)	Data hasil klasifikasi vs. data referensi teraktual (google earth pro)		Akurasi model, validasi hasil prediksi

## 2.4 Tahap Analisis Data

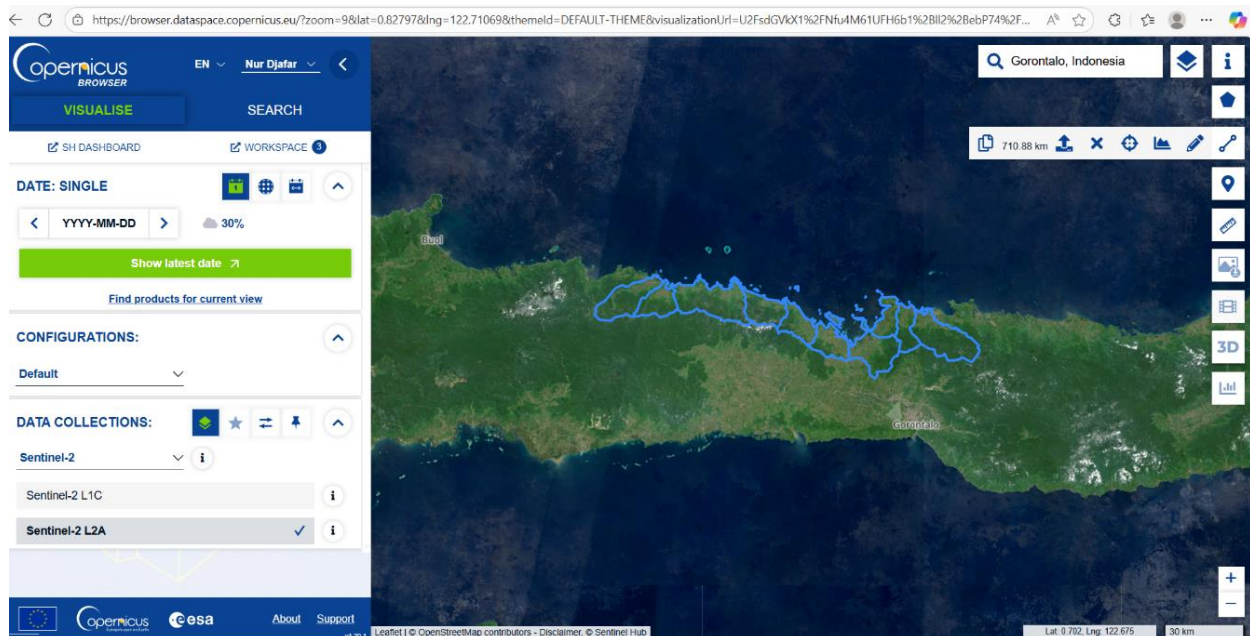
Tahap analisis data merupakan Langkah-langkah sistematis yang dilakukan untuk mengolah, menginterpretasi, dan menarik kesimpulan dari data-data yang telah dikumpulkan, baik itu data primer maupun data sekunder. Tujuannya adalah menjawab rumusah masalah dan menguji hipotesis. Berikut tahapan analisis data penelitian ini.

### 2.4.1 Persiapan data

Dalam kajian perubahan tutupan lahan berbasis penginderaan jauh, pemilihan jenis citra satelit merupakan tahapan metodologis yang sangat krusial karena akan mempengaruhi ketelitian hasil analisis, terutama dalam mendeteksi perubahan spasial dan pola perkembangan wilayah perkotaan. Saat ini tersedia berbagai sensor citra satelit dengan karakteristik yang berbeda, baik dari segi resolusi spasial, spektral, temporal, maupun ketersediaan data. Oleh karena itu, diperlukan pertimbangan ilmiah untuk menentukan citra yang paling sesuai dengan tujuan penelitian, skala wilayah kajian, serta metode analisis yang digunakan. Untuk memperjelas posisi dan keunggulan citra Sentinel-2 dalam penelitian ini, berikut disajikan (**Tabel 4**) perbandingan karakteristik Sentinel-2 dengan beberapa citra satelit lain yang umum digunakan dalam analisis perubahan tutupan lahan.

Berdasarkan keunggulan citra Sentinel-2A dalam analisis perubahan tutupan lahan, diperlukan proses persiapan data untuk menjamin kualitas dan konsistensi citra yang digunakan. Tahap persiapan data meliputi koreksi atmosfer, *cloud masking*, dan pembuatan komposit citra dan clipping area yang bertujuan menghasilkan data citra yang siap dianalisis secara akurat.

Citra sentinel-2A resolusi 10m diunduh dari platform [dataspace.copernicus.eu](https://dataspace.copernicus.eu) (lihat **Gambar 3**) dengan data set 01 Januari 2016 sampai dan 01 Agustus 2025 yang sudah terkoreksi atmosfer (*Cloud Coverage* 10-20%). Kliping citra berdasarkan batas administrasi Kabupaten Gorontalo Utara. Selanjutnya mengolah data citra tersebut menggunakan software Arcgis desktop 10.8.2. dengan komposisi komposit band untuk kombinasi NDVI (Band 8 (NIR) dan Band 4 (Red)) dan NDLI (Band 11 (SWIR) dan Band 8 (NIR)).



**Gambar 3.** Tampilan Platform Copernicus

**Tabel 4.** Tabel Perbandingan Citra untuk Perubahan Tutupan Lahan

Sensor/ Citra	Resolusi Spasial	Resolusi		Kelebihan Utama	Keterbatasan
		Spektral	Temporal		
Sentinel-2	10 m (VIS-NIR), 20 m (Red Edge & SWIR)	13 band	±5 hari	Deteksi LULC yang lebih detail pada skala lokal dengan band spektral banyak dan revisit tinggi, cocok untuk analisis perubahan tutupan lahan secara multitemporal, (Ghayour et al., 2021)	Terganggu awan pada wilayah tropis
Sentinel-1		Radar Band	C- ±6–12 hari	Tidak terpengaruh awan, desain untuk topografi dan struktur permukaan, (Prasetyo et al., 2025)	Kurang intuitif untuk indeks spektral vegetasi
Landsat 8/9	30 m	11 band (termasuk TIR)	16 hari	Telah banyak digunakan untuk analisis perubahan tutupan lahan berskala regional/jangka Panjang.	Resolusi spasial relatif lebih kasar, kurang detail untuk pola lokal
PlanetScope	±3 m	4 band (RGB + NIR)	Harian	Resolusi spasial sangat tinggi, cocok untuk peta LULC yang sangat detail (mis. bangunan kecil), (Acharki, 2022)	Spektral lebih sedikit, kurang kuat untuk indeks vegetasi kompleks
WorldView-3	0,3–2 m	Banyak band multispektral	Tidak reguler	Resolusi sangat tinggi, cocok untuk analisis mikro-urban detail, (van Deventer et al., 2022)	Data berbayar mahal, kurang konsisten untuk multitemporal

Sumber : Modifikasi peneliti, 2025.

## 2.4.2 Analisis Perubahan Tutupan Lahan

### Klasifikasi Citra (Supervised Classification)

Untuk menggambarkan serta membandingkan kondisi tutupan lahan pada tahun 2016 dan 2025, dilakukan pengolahan data citra satelit Sentinel-2A yang mencakup wilayah Kabupaten Gorontalo Utara. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi dinamika perubahan spasial dan klasifikasi tutupan lahan dengan cara mengekstraksi informasi spektral dari citra pada dua tahun yang berbeda dan diolah pada aplikasi Arcgis. Metode yang digunakan melibatkan klasifikasi tutupan lahan pada masing-masing tahun, yang kemudian dibandingkan menggunakan teknik analisis perubahan (*change detection*). Pendekatan ini memungkinkan diperolehnya gambaran yang jelas mengenai peningkatan, penurunan, atau konversi jenis tutupan lahan selama kurun waktu tersebut. Hasil akhir dari analisis ini disajikan dalam bentuk peta tematik perubahan tutupan lahan tahun 2016 dan 2025 dan matriks perubahan, yang menggambarkan distribusi dan luas perubahan lahan secara kuantitatif dan visual.

Menurut (Badan Standardisasi Nasional, 2010a), penutup lahan adalah tutupan biosfer pada permukaan bumi yang dapat diamati merupakan suatu hasil pengaturan, aktivitas, dan perlakuan manusia yang dilakukan pada jenis penutup lahan tertentu untuk melakukan kegiatan produksi, perubahan, ataupun perawatan pada penutup lahan tersebut.

Agar lebih mudah diklasifikasikan, BSN telah membagi kelas penutup lahan menjadi dua bagian, yaitu daerah bervegetasi dan daerah tidak bervegetasi. Semua kelas penutup lahan dalam kategori daerah bervegetasi diturunkan dari pendekatan konseptual struktur fisiognomi (ilmu yang mempelajari bentuk luar objek penutup lahan) yang konsisten dari bentuk tumbuhan, bentuk tutupan, tinggi tumbuhan dan distribusi spasialnya. Sedangkan dalam kategori daerah tidak bervegetasi, pendetailan kelas mengacu pada aspek permukaan tutupan, distribusi atau kepadatan, dan ketinggian atau kedalaman objek (Badan Standardisasi Nasional, 2010a). Adapun klasifikasi tutupan lahan yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5.** Klasifikasi Penutup Lahan

No.	Kelas Penutup Lahan	Deskripsi
1.	<b>Daerah Bervegetasi</b>	Daerah yang liputan vegetasi (minim 4%) sedikitnya selama 2 bulan dalam 2 tahun atau dengan liputan <i>Lichens/Mosses</i> lebih dari 25% (jika terdapat vegetasi lain)
	<b>Daerah Pertanian</b>	Areal yang diusahakan untuk budi daya tanaman pangan, dan hortikultura. Vegetasi alami telah dimodifikasi atau dihilangkan dan diganti dengan tanaman antropogenik dan memerlukan campur tangan manusia untuk menunjang kelangsungan hidupnya. Antarmasa tanam, area ini sering kali tanpa tutupan vegetasi. Seluruh vegetasi yang ditanam dengan tujuan untuk dipanen, termasuk dalam kelas ini.
	Sawah	Areal pertanian yang digenangi air atau diberi air baik dengan teknologi pengairan, tadah hujan, lebak atau pasang surut yang dicirikan oleh <i>pola pematang</i> , dengan ditanami jenis tanaman pangan berumur pendek (padi).
	Ladang, tegal, atau huma	Area yang digunakan untuk kegiatan pertanian dengan jenis tanaman semusim di lahan kering.
	Perkebunan	Lahan yang digunakan untuk kegiatan pertanian tanpa pergantian tanaman selama 2 tahun. Catatan : panen biasanya dapat dilakukan setelah satu tahun atau lebih.
	<b>Daerah Bukan Pertanian</b>	Areal yang tidak diusahakan untuk budi daya tanaman pangan dan hortikultura
	Hutan lahan kering	Hutan yang tumbuh dan berkembang di habitat lahan kering yang dapat berupa hutan dataran rendah, perbukitan, pegunungan, atau hutan tropis dataran tinggi
	Hutan lahan basah	Hutan yang tumbuh berkembang pada habitat lahan basah berupa rawa, termasuk rawa payau dan rawa gambut. Wilayah lahan basah berkarakteristik unik, yaitu ; (1) dataran rendah yang membentang sepanjang pesisir, (2) wilayah berelevasi rendah, (3) tempat yang dipengaruhi oleh pasang-surut untuk wilayah dekat pantai, (4) wilayah dipengaruhi oleh musim yang terletak jauh dari pantai, (5) Sebagian besar wilayah tertutup gambut.

No.	Kelas Penutup Lahan	Deskripsi
	Hutan bakau	Hutan yang tumbuh berkembang pada habitat lahan basah, telah mengalami intervensi manusia dengan vegetasi dominan berupa bakau
	Semak dan belukar	Kawasan lahan kering yang telah ditumbuhi berbagai vegetasi alami heterogen dan homogen yang tingkat kerapatannya jarang hingga rapat. Kawasan tersebut didominasi vegetasi rendah (alami). Semak belukar di Indonesia biasanya Kawasan bekas hutan dan biasanya tidak menampakkan lagi bekas atau bercak terbangun.
	Padang rumput, alang-alang, dan sabana	Areal terbuka yang didominasi oleh jenis rumput tidak seragam
	Rumput rawa	Rumput yang berhabitat di daerah rawa
2.	<b>Daerah Tidak Bervegetasi</b>	Daerah dengan total liputan vegetasi kurang dari 4% selama lebih dari 10 bulan, atau daerah dengan liputan <i>Lichens/Mosses</i> kurang dari 25% (jika tidak terdapat vegetasi berkayu atau herba)
	<b>Lahan terbuka</b>	Lahan tanpa tutupan baik yang bersifat alami, semi alami maupun artifisial. Menurut karakteristik permukaannya, lahan terbuka dapat dibedakan menjadi <i>consolidate</i> dan <i>unconsolidated surface</i> .
	<b>Permukiman dan lahan bukan pertanian yang berkaitan</b>	Lahan terbangun dicirikan oleh adanya substitusi penutup lahan yang bersifat alamiah atau semialami oleh penutup lahan yang bersifat artifisial dan sering kedap air.
	a. Lahan terbangun	Area yang telah mengalami substitusi penutup lahan alami ataupun semi alami dengan penutup lahan buatan yang biasanya bersifat kedap air dan relative permanen.
	- Permukiman	Areal atau lahan yang digunakan sebagai lingkungan tempat tinggal atau lingkungan hunian dan tempat kegiatan yang mendukung kehidupan.
	- Jaringan jalan	Jaringan prasarana transportasi yang diperuntukkan bagi lalu lintas kendaraan
	Jalan arteri	Jalan yang melayani angkutan utama dengan ciri-ciri perjalanan jarak jauh dan kecepatan rata-rata tinggi, sesuai dengan SNI 6502.4.
	Jalan kolektor	Jalan yang melayani angkutan dengan ciri-ciri perjalanan jarak sedang dan kecepatan rata-rata sedang, sesuai dengan SNI 6502.4.
	- Jaringan jalan kereta api	Rel kereta api
	- Bandar udara domestik/internasional	Bandar udara yang mempunyai fasilitas lengkap untuk penerbangan dalam dan luar negeri.
	- Pelabuhan laut	Tempat yang digunakan sebagai tempat sandar dan berlabuhnya kapal laut beserta aktivitas penumpangnya dan bongkar muat kargo. Catatan: fasilitas Pelabuhan dilengkapi bangunan sandar kapal, Gudang, dan terminal penumpang.
	b. Lahan tidak terbangun	Lahan ini telah mengalami intervensi manusia sehingga penutup lahan alami (semi alami) tidak dapat dijumpai lagi. Meskipun demikian, lahan ini tidak mengalami pembangunan sebagaimana terjadi pada lahan terbangun.
	<b>Perairan</b>	
	a. Danau atau waduk	Areal perairan dengan penggenangan air yang dalam dan permanen serta penggenangan dangkal termasuk fungsinya.
	b. Rawa	Genangan air tawar atau air payau yang luas dan permanen di daratan
	c. Sungai	Tempat mengalirnya air yang bersifat alamiah Catatan : aliran dapat bersifat musiman maupun sepanjang tahun
	d. Anjir pelayaran	Tempat mengalirnya air, bersifat artifisial, dan berasosiasi dengan laut atau pantai dan kegiatan pelaran.
	e. Terumbu karang	Kumpulan fauna laut yang berkumpul menjadi satu dan membentuk terumbu.
	f. Tambak Ikan	Aktivitas untuk perikanan yang tampak dengan pola pematang di sekitar pantai.

Sumber : (Badan Standardisasi Nasional, 2010a).

Citra sentinel-2A yang telah diunduh, setelah *band*-nya disesuaikan, siap diklasifikasikan berdasarkan klasifikasi tutupan lahan Badan Standardisasi Nasional Tahun 2010. Metode yang digunakan adalah *supervised classification* atau klasifikasi terbimbing di arcgis. Klasifikasi tersebut ditentukan berdasarkan *training sample* (contoh piksel) untuk setiap kelas tutupan lahan yang ingin dipetakan. Semakin *representatif training sample*, makin akurat hasil klasifikasinya. Menghitung luas perubahan tiap kelas tutupan lahan pada tahun 2016 dan tahun 2025 untuk kemudian ditampilkan dalam bentuk matriks.

### Uji Akurasi

Untuk mengecek akurasi hasil klasifikasi tutupan lahan dari citra sentinel-2 (baik NDVI, NDLI maupun klasifikasi *supervised* lainnya) menggunakan matriks konfusi atau *error matrix* (matriks kesalahan), validasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi dengan data referensi (*Ground Truth*) dari Citra *Google Earth* secara historical. Titik validasi diambil secara manual oleh peneliti, yang akan didistribusikan ke masing-masing kecamatan sesuai dengan kelas tutupan lahan yang ditentukan.

Dalam penelitiannya (Novianti, 2021), membahas tentang uji akurasi klafisikasi tutupan lahan menggunakan matriks kesalahan. Matriks berbentuk square dengan angka pada baris dan kolom sama dengan angka pada kategori tingkat akurasi klasifikasi yang akan dinilai. Klasifikasi citra dianggap benar jika hasil perhitungan matrik konfusi > 75%. Perhitungan matriks konfusi dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 6.** Matriks Konfusi

Kelas Referensi	Dikelaskan ke Kelas (Data Klasifikasi di Peta)			Jumlah Piksel	Akurasi Pembuat
	A	B	C		
A	X <sub>11</sub>	X <sub>12</sub>	X <sub>13</sub>	X <sub>1+</sub>	X <sub>11</sub> /X <sub>1+</sub>
B	X <sub>21</sub>	X <sub>22</sub>	X <sub>23</sub>	X <sub>2+</sub>	X <sub>22</sub> /X <sub>2+</sub>
C	X <sub>31</sub>	X <sub>32</sub>	X <sub>33</sub>	X <sub>3+</sub>	X <sub>33</sub> /X <sub>3+</sub>
Total Piksel	X <sub>+1</sub>	X <sub>+2</sub>	X <sub>+3</sub>	N	
Akurasi Pengguna	X <sub>11</sub> /X <sub>+1</sub>	X <sub>22</sub> /X <sub>+2</sub>	X <sub>33</sub> /X <sub>+3</sub>		

Sumber : (Arisondang et al., 2015) dalam (Novianti, 2021).

Adapun parameter akurasi yang dihitung dari matriks konfusi adalah sebagai berikut.

a. *Overall Accuracy (OA)*

Menunjukkan persentase klasifikasi yang benar dari total titik sampel

$$\left( \sum_{i=1}^r X_{ii} \right) / N \times 100\%$$

b. *Kappa Accuracy*

$$\left[ \left( N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} \times X_{+i} \right) / \left( N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} \times X_{+i} \right) \right] \times 100\%$$

Keterangan:

N : banyaknya piksel dalam contoh

X<sub>1+</sub> : jumlah piksel dalam baris ke-i

X<sub>+1</sub> : Jumlah piksel dalam kolom ke-i

X<sub>ii</sub> : Nilai diagonal dari matriks kontingensi baris ke-l dan kolom ke-i

Selanjutnya nilai Kappa diklasifikasikan untuk menilai tingkat akurasi (Rahmawati et al., 2025), yaitu sebagai berikut.

Nilai Kappa < 0,4 = Akurasi Buruk

Nilai Kappa 0,4 - < 0,75 = Akurasi Sedang

Nilai Kappa > 0,75 = Akurasi Sangat Baik

### 2.4.3 Analisis Perubahan Indeks

#### NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Dalam penelitian (Putri et al., 2021) menjelaskan tentang teori Interpretasi citra Sentinel-2 dengan menghitung indeks kerapatan vegetasi atau *Normalized Difference Vegetation Index* diperoleh dengan melakukan perhitungan gelombang *near infrared* dengan gelombang red yang dipantulkan oleh tumbuhan (Wahrudin et al., 2019). Metode NDVI ini mampu melakukan identifikasi terhadap tutupan tanaman melalui komputasi citra yang diolah (Purboyo et al., 2018). Pada citra Sentinel-2, citra yang digunakan untuk melakukan pengolahan NDVI adalah Band 4 dengan gelombang Red, dan Band 8 dengan gelombang *Near Infrared* (NIR). Menghasilkan peta vegetasi dan identifikasi area dengan perubahan tutupan vegetasi pada tahun 2016 dan tahun 2025. **Perhitungan NDVI** menggunakan rumus berikut.

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

NIR: Reflektansi inframerah dekat (biasanya Band 8 pada Sentinel-2)

Red: Reflektansi spektrum merah (Band 4 pada Sentinel-2)

Nilai NDVI berkisar dari -1 (lahan tidak bervegetasi) sampai +1 (vegetasi lebat dan rapat).

Setelah mendapatkan nilai NDVI, langkah selanjutnya adalah menginterpretasikan nilai NDVI pada tahun 2016 dan tahun 2025 berdasarkan klasifikasi pada tabel berikut.

**Tabel 7.** Klasifikasi Nilai NDVI

Nilai NDVI	Interpretasi
-1 s/d - 0,03	Lahan Tidak Bervegetasi
-0,04 s/d 0,15	Kehijauan Sangat Rendah
0,16 s/d 0,25	Kehijauan Rendah
0,26 s/d 0,35	Kehijauan Sedang
0,36 s/d 1,00	Kehijauan Tinggi

Sumber : Peraturan Menteri Kehutanan RI nomor P.12/Menhut-II/2012 dalam (Fadlillah et al., 2018) (Putri et al., 2021)

#### NDLI (Normalized Difference Latent Index)

NDLI telah terbukti sebagai indikator yang efektif dalam menilai potensi evapotranspirasi permukaan. Evapotranspirasi permukaan mencerminkan ketersediaan air dan kondisi kelembapan lahan. Keunggulan NDLI terletak pada karakteristiknya yang unik dalam mengoptimalkan sensitivitas spektral terhadap parameter biofisik permukaan lahan dengan mengombinasikan tiga kanal spektral yang umum digunakan pada misi satelit, yaitu kanal hijau (Green), merah (Red), dan inframerah gelombang pendek SWIR (*Shortwave Infrared*). Nilai NDLI dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$NDLI = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

Band 8 digunakan sebagai nilai NIR. Band 11 digunakan sebagai nilai SWIR. Nilai NDLI berkisar antara -1 hingga +1. Semakin mendekati angka 1 menunjukkan ketersediaan air yang tinggi (sangat lembab), dan semakin mendekati -1 (sangat kering) menunjukkan ketersediaan air yang rendah (Nursaputra et al., 2021).

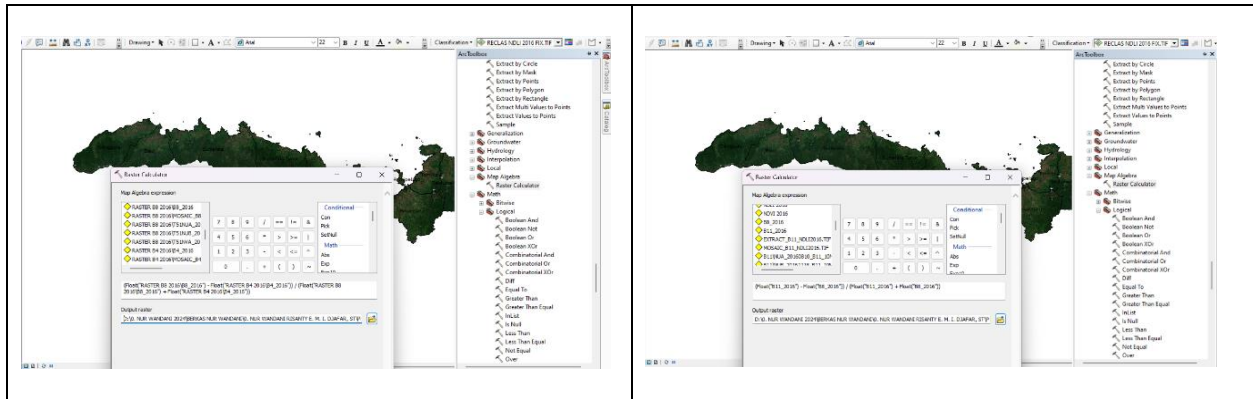
Selanjutnya mengklasifikasikan nilai NDLI Tahun 2016 dan Tahun 2025 untuk divisualisasikan dalam peta raster dengan skala warna. Nilai NDLI dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelas untuk memudahkan interpretasi seperti pada tabel berikut.

**Tabel 8.** Klasifikasi Nilai NDLI

Nilai NDLI	Interpretasi
> 0.4	Sangat Lembab
0.2 – 0.4	Lembap
0 – 0.2	Cukup Lembap
-0.2 - 0	Kering
< -0.2	Sangat Kering

Sumber : (Meena, S. R., et al., 2019).

Perbedaan NDLI dapat diketahui dengan menghitung perubahan nilai NDLI (selisih nilai tahun 2025 – tahun 2016). Penurunan NDLI mengindikasikan meningkatnya kelembapan atau pertumbuhan vegetasi. Sedangkan kenaikan NDLI mengindikasikan pengeringan, deforestasi, atau pembangunan.



**Gambar 4.** Perhitungan NDVI dan NDLI menggunakan Raster Calculator di ArcGIS berdasarkan citra Sentinel-2

### Uji Akurasi

Uji akurasi klasifikasi NDVI dan NDLI dilakukan untuk menilai tingkat ketepatan hasil klasifikasi indeks vegetasi dalam merepresentasikan kondisi tutupan lahan di Kabupaten Gorontalo Utara pada tahun 2016 dan 2025. Pengujian akurasi dilakukan menggunakan titik sampling sebagai data validasi, yang ditentukan sebanyak 100 titik pada setiap kecamatan, sehingga total titik sampling yang digunakan berjumlah 1100 titik yang tersebar pada 11 kecamatan.

Tabel klasifikasi NDLI digunakan sebagai dasar interpretasi untuk mengonversi nilai indeks menjadi kelas tutupan lahan yang lebih mudah dipahami secara spasial (lihat tabel 9 dan 10). Penyesuaian kelas ini bertujuan untuk menggambarkan kondisi biosfisik lahan, khususnya tingkat kelembapan permukaan dan karakteristik penutup lahan, sehingga pola spasial hasil pengolahan indeks dapat dianalisis secara lebih informatif.

Namun demikian, dalam proses uji akurasi, klasifikasi disederhanakan ke dalam kelas umum, yaitu daerah bervegetasi dan tidak bervegetasi untuk NDVI, serta daerah lembab dan daerah kering untuk NDLI (Azizah Nazhifah et al., 2025). Penyederhanaan ini dilakukan untuk mengurangi potensi tumpang tindih spektral antar kelas tutupan lahan yang memiliki karakteristik indeks yang serupa, serta untuk memastikan konsistensi antara kemampuan indeks spektral dan data referensi. Dengan demikian, pendekatan ini memungkinkan evaluasi akurasi yang lebih objektif tanpa mengurangi makna interpretasi spasial dari hasil klasifikasi indeks.

Selanjutnya, uji akurasi hasil klasifikasi indeks NDVI dan NDLI dilakukan menggunakan matriks konfusi (*confusion matrix*) untuk menghitung nilai *Overall Accuracy* (OA) dan koefisien Kappa, sebagai indikator tingkat kesesuaian antara hasil klasifikasi NDVI dan NDLI dengan kondisi aktual di lapangan pada masing-masing tahun pengamatan. *Overall Accuracy* menggambarkan tingkat ketepatan klasifikasi secara keseluruhan, sedangkan koefisien Kappa digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil klasifikasi dan data referensi dengan mempertimbangkan kemungkinan kesepakatan yang terjadi secara acak.

Indeks dengan nilai validasi tertinggi dan pola spasial yang paling konsisten selanjutnya dipilih sebagai indeks utama dan yang paling representatif terhadap kondisi wilayah penelitian dalam menganalisis deteksi arah perkembangan kota di Kabupaten Gorontalo Utara.

**Tabel 9.** Kelas Tutupan Lahan Berdasarkan Nilai NDVI

Nilai NDVI	Kelas Tutupan Lahan	Penyesuaian Kelas Tutupan Lahan	Tingkat Kehijauan
-1 – 0.10	Awan, Air, Area Terbuka, Pertambangan	Lahan Terbangun, Tambak	Lahan Tidak Bervegetasi
0.10 – 0.20	Padang Rumput	Daerah Pertanian	Vegetasi Rendah
0.20 – 0.50	Semak Belukar, Semak, Perkebunan Muda, Perkebunan Tua, Hutan Sekunder Muda	Padang Rumput/Vegetasi Campuran	Vegetasi Sedang
> 0.50	Hutan Sekunder Sedang, Hutan Sekunder Tua	Hutan	Vegetasi Tinggi

Sumber : Modifikasi peneliti 2025, Jauhari et al., 2015 dalam (Rahadi et al., 2024)

**Tabel 10.** Kelas Tutupan Lahan Berdasarkan Nilai NDLI

Nilai NDLI	Kelas Tutupan Lahan	Penyesuaian Kelas Tutupan Lahan	Tingkat Kelembaban
> 0.4	Permukaan Air	Tambak	Sangat Lembab
0.2 – 0.4	Hutan Sekunder Sedang, Hutan Sekunder Tua	Hutan	Lembab
0 – 0.2	Semak Belukar, Semak, Perkebunan Muda, Perkebunan Tua, Hutan Sekunder Muda	Padang Rumput/Vegetasi Campuran	Cukup Lembab
-0.2 – 0	Padang Rumput	Daerah Pertanian	Kering
>-0.2	Area Terbuka, Pertambangan	Lahan Terbangun	Sangat Kering

Sumber : Modifikasi peneliti 2025, Jauhari et al., 2015 dalam (Rahadi et al., 2024)

#### 2.4.4 Analisis Arah dan Pola Perkembangan Kota

##### Deteksi Arah Perkembangan Kota

Analisis deteksi arah perkembangan kota dilakukan dengan mengintegrasikan peta NDVI, NDLI, perubahan lahan terbangun tahun 2016-2025, jarak terhadap jaringan jalan, jarak terhadap pusat pemerintahan yang dihitung menggunakan metode Euclidean Distance, serta elevasi sebagai faktor topografi. Seluruh data diseragamkan dalam sistem koordinat, resolusi spasial, dan cakupan wilayah analisis. Selanjutnya, peta-peta input tersebut digabungkan melalui proses overlay raster sebagai dasar analisis spasial perkembangan kawasan terbangun.

Berdasarkan peta perubahan lahan terbangun, dilakukan penentuan urban growth centroid untuk mengidentifikasi titik pusat kecenderungan pertumbuhan kota. Titik centroid ini merepresentasikan lokasi rata-rata spasial dari distribusi perubahan kawasan terbangun dan berfungsi sebagai acuan utama dalam analisis arah perkembangan kota.

Untuk mengetahui arah dominan perkembangan kota, digunakan analisis Directional Distribution (Standard Deviatonal Ellipse / SDE). Analisis ini tidak hanya menggambarkan sebaran spasial pertumbuhan kawasan terbangun, tetapi juga menunjukkan orientasi dan arah utama ekspansi kota berdasarkan nilai sudut (rotation angle) ellipse.

Interpretasi sudut Standard Deviatonal Ellipse (SDE) didasarkan pada konsep azimuth dalam sistem koordinat geografis, di mana sudut diukur searah jarum jam dari arah utara ( $0^\circ$ ). Orientasi sumbu panjang ellipse merepresentasikan arah dengan variansi spasial terbesar dari sebaran perubahan kawasan terbangun, sehingga dapat diinterpretasikan sebagai arah dominan perkembangan kota. Dalam ArcGIS, nilai sudut *Directional Distribution* diukur dalam satuan derajat, dengan orientasi dihitung searah jarum jam dari sumbu utara (north). Pembagian sudut ke dalam rentang  $0^\circ$ – $360^\circ$  mengikuti kuadran mata angin, yang memungkinkan identifikasi kecenderungan arah pertumbuhan wilayah secara spasial. Nilai sudut tersebut diinterpretasikan sebagai berikut: sudut mendekati  $0^\circ$  atau  $180^\circ$  menunjukkan arah dominan utara–selatan, sedangkan sudut mendekati  $90^\circ$  atau  $270^\circ$  menunjukkan arah dominan timur–barat.

Dalam penelitian (Cao & Kim, 2025), Elips deviasi standar merupakan alat statistik spasial yang banyak digunakan untuk menggambarkan pola sebaran fitur titik. Parameter yang tercantum pada tabel berikut memberikan ukuran kuantitatif mengenai dispersi spasial dan kecenderungan arah dari kumpulan data titik tersebut, yaitu:

- CenterX dan CenterY merepresentasikan koordinat pusat geografis (titik pusat massa) dari distribusi, baik dalam satuan bujur–lintang maupun koordinat terproyeksi.
- XStdDist dan YStdDist mengukur tingkat dispersi spasial masing-masing sepanjang sumbu utama (sumbu panjang) dan sumbu minor (sumbu pendek) elips, di mana nilai yang lebih besar menunjukkan sebaran yang lebih luas.
- Rotation menunjukkan sudut orientasi sumbu utama elips terhadap arah utara, yang mencerminkan kecenderungan arah dominan dari distribusi spasial.
- Shape\_Length dan Shape\_Area menggambarkan keliling dan luas elips, yang mencerminkan cakupan spasial serta tingkat kompleksitas distribusi.

Penelitian serupa dilakukan oleh (Arrafi et al., 2025), bahwa *Directional Distribution* merupakan salah satu alat analisis spasial yang digunakan untuk memahami pola persebaran dan arah kecenderungan spasial dari suatu fenomena geografis. Secara prinsip, *Directional Distribution* menghasilkan sebuah elips standar deviasi yang menggambarkan:

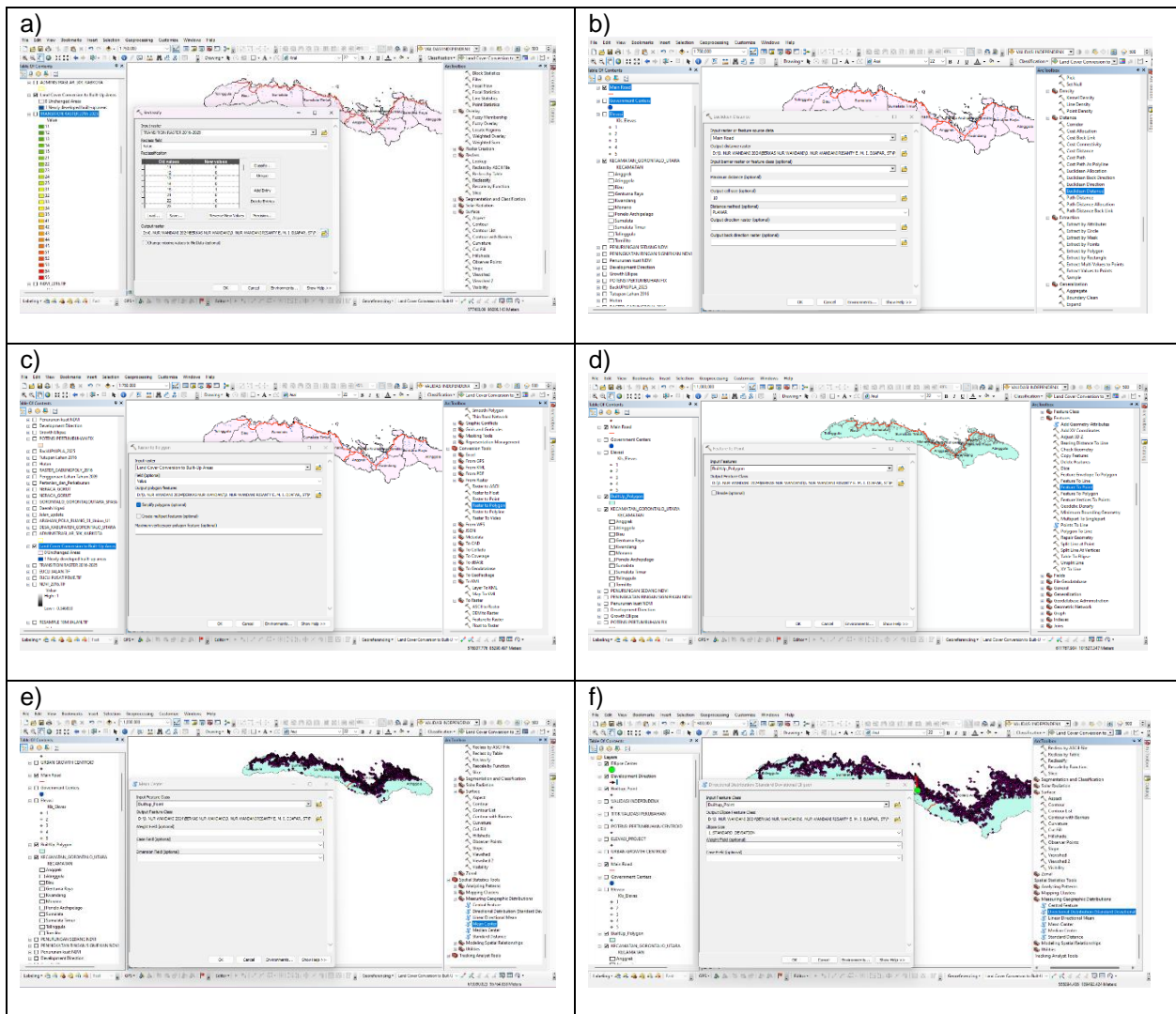
- Pusat persebaran (mean center) dari lahan terbangun, yaitu titik yang mewakili lokasi rata-rata konsentrasi perubahan lahan terbangun.
- Orientasi utama (major axis), yang menunjukkan arah dominan penyebaran atau pertumbuhan lahan terbangun.
- Orientasi minor (minor axis), yang menggambarkan arah penyebaran dengan variasi yang lebih kecil.

- d) Ukuran elips, yang merepresentasikan tingkat dispersi atau penyebaran spasial dari populasi dalam area tertentu. Perubahan lahan terbangun menjadi inputan pada alat ini untuk memprediksi arah pergeseran kota.

**Tabel 11.** Matriks distribusi spasial elips deviasi standar dan definisinya

Field	Nama	Makna
CenterX	Koordinat pusat elips sumbu X	Koordinat titik pusat massa ( <i>center of gravity</i> ) elips pada arah timur–barat, biasanya dalam satuan bujur atau koordinat terproyeksi sumbu X. Parameter ini mencerminkan “pusat rata-rata geografis” dari distribusi spasial desa dalam kategori tertentu.
CenterY	Koordinat pusat elips sumbu Y	Koordinat titik pusat massa elips pada arah utara–selatan, biasanya dalam satuan lintang atau koordinat terproyeksi sumbu Y.
XStdDist	Simpangan baku sumbu X	Menunjukkan tingkat dispersi spasial titik-titik desa pada arah **sumbu utama (sumbu panjang)***. Nilai yang lebih besar mengindikasikan distribusi spasial yang semakin memanjang. Satuan umumnya meter.
YStdDist	Simpangan baku sumbu Y	Menunjukkan tingkat dispersi titik-titik desa pada arah **sumbu minor (sumbu pendek)***. Semakin kecil nilainya, semakin terkonsentrasi distribusi pada sumbu utama.
Rotation	Sudut rotasi	Sudut (dalam derajat, °) antara sumbu panjang elips dan arah utara geografis, umumnya diukur berlawanan arah jarum jam. Parameter ini mencerminkan kecenderungan arah utama distribusi desa secara keseluruhan.
Shape Length	Keliling elips	Panjang batas elips dalam satuan meter, yang mencerminkan tingkat “kekompakan” atau kompleksitas tepi dari cakupan spasial keseluruhan.
Shape Area	Luas elips	Luas elips deviasi standar (dalam meter persegi) yang menunjukkan besarnya cakupan spasial yang “diliputi” oleh distribusi desa pada kategori tertentu. Semakin besar nilainya, semakin luas sebaran spasialnya.

Catatan : Tanda “\*\*\*” menunjukkan istilah yang berkaitan dengan sumbu utama elips (bukan simbol signifikansi statistik). Sumbu utama (sumbu panjang) merupakan arah dengan varian/dispersi maksimum dari kumpulan titik, sedangkan sumbu minor (sumbu pendek) merupakan arah tegak lurus dengan varian minimum. Oleh karena itu, XStdDist dan YStdDist masing-masing merepresentasikan simpangan baku sepanjang sumbu utama dan sumbu minor, sedangkan Rotation diukur berlawanan arah jarum jam dari utara geografis menuju sumbu utama. Satuan mengikuti sistem proyeksi data yang digunakan (meter).  
 Sumber : (Cao & Kim, 2025)



**Gambar 5.** SDE ekspansi lahan terbangun yang menunjukkan orientasi pertumbuhan dominan, a) Raster transisi biner yang menampilkan lahan terbangun (1) dan tidak mengalami perubahan (0), b) Euclidean Distance, c) Raster to Polygon, d) Feature to Point, e) Mean Center (Titik Rata-rata), f) Directional Distribution (Distribusi Arah/Standar Deviasi)

Hasil analisis *centroid* dan *Standard Deviation Ellipse* selanjutnya divisualisasikan dalam bentuk peta arah perkembangan kota, yang menunjukkan pusat pertumbuhan, pola sebaran, serta orientasi dominan ekspansi kawasan terbangun. Kemudian dianalisis secara visual perluasan permukiman dan perubahan tutupan lahan lainnya dan dikaitkan dengan teori-teori perkembangan kota menurut beberapa ahli.

Menurut Knox, P. L., & McCarthy, L. M. (2012). Faktor pendorong perkembangan kota:

- a. Pertumbuhan penduduk (alami maupun migrasi)
- b. Urbanisasi (perpindahan penduduk dari desa ke kota)
- c. Perkembangan ekonomi dan industry
- d. Peningkatan aksesibilitas dan infrastruktur
- e. Kebijakan tata ruang dan pembangunan wilayah

Teori-teori perkembangan kota :

**a. Teori Konsentris (*Concentric Zone Model*)**

Ernest Burgess (1925), Menjelaskan pertumbuhan kota berbentuk lingkaran konsentris dari pusat ke pinggiran.

**Tabel 12.** Zona Pertumbuhan Kota

Zona	Keterangan
I	CBD (Central Business District)
II	Zona transisi (perdagangan kecil, perumahan kumuh)
III	Zona pemukiman pekerja
IV	Zona pemukiman kelas menengah
V	Zona komuter/suburban

Sumber : Burgess, E. W. (1925).

**b. Teori Sektor (*Sector Model*)**

Homer Hoyt (1939), Kota tumbuh dalam bentuk sektor-sektor sepanjang jalur transportasi, bukan lingkaran.

**c. Teori Inti Ganda (*Multiple Nuclei Model*)**

Harris dan Ullman (1945), Perkembangan kota tidak hanya berpusat di satu titik (CBD), tetapi memiliki beberapa pusat kegiatan (nuclei) seperti kawasan industri, pemukiman elit, kawasan perdagangan, dll.

**d. *Urban Sprawl* dan Perkembangan Pinggiran Kota**

Ewing, R. (1997), *Urban sprawl* adalah penyebaran pembangunan kota ke daerah pinggiran dengan pola pemanfaatan lahan yang luas dan tidak terkonsentrasi.

#### 2.4.5 Pemodelan Perubahan Lahan dengan CLUE-S

Model *Conversion of Land Use and its Effects* (CLUE) pertama kali dikembangkan oleh Veldkamp dan Fresco (1996) dan selanjutnya dikembangkan oleh Verburg et al. (1999; 2002) untuk mensimulasikan perubahan penggunaan lahan pada wilayah dengan cakupan spasial yang luas hingga skala global (Veldkamp & Fresco, 1996; Verburg et al., 1999; 2002 dalam (Warlina, 2011)).

Oleh karena perbedaan representasi data dan fitur lain untuk diaplikasikan secara regional, model CLUE tidak dapat diterapkan, sehingga dikembangkan pendekatan pemodelan CLUE-S (*the Conversion of Land Uses and its Effects at Small region extent*) dengan menggunakan resolusi spasial tidak lebih dari 1 x 1 km. Simulasi perubahan penggunaan lahan menggunakan CLUE-S dapat dijalankan dengan berbagai kondisi skenario. Penerapan menggunakan skenario yang berbeda-beda dapat mendukung dalam mengeksplorasi perubahan penggunaan lahan di masa yang akan datang (Verburg et al., 2002) dalam (Warlina, 2011).

Munculnya suatu jenis guna lahan tertentu diduga dipengaruhi oleh faktor-faktor biogeofisik dan sosial ekonomi (Warlina, 2011). Peluang terjadinya perubahan guna lahan dianalisis menggunakan regresi logistik biner dijalankan dengan metode *forward stepwise* yang bertujuan untuk mengeliminasi faktor-faktor pengaruh yang tidak signifikan dalam model. Regresi logistik biner adalah model regresi dimana variabel dependen bersifat biner atau dikotomi untuk mengetahui ada atau tidaknya pengaruh variabel independen (X) terhadap variabel dependen (Y). Fungsi regresi merupakan suatu respon monotonik garis kurva dibatasi antara 0 dan 1 dengan fungsi logistik pada persamaan berikut dalam (Pandapotan Sinurat et al., 2015).

$$P_i = E(Y) = \frac{\text{Exp}(\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_nX_i)}{1 + \text{Exp}(\beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \dots + \beta_nX_i)}$$

Dimana  $p_i$  adalah nilai probabilitas peningkatan sel penggunaan lahan sedangkan  $E(Y)$  perolehan nilai dari variabel dependen biner Y,  $\beta_0$  adalah nilai konstan yang diestimasi,  $\beta_n$  adalah koefisien yang diestimasi dari masing-masing variabel independen  $X_i$  (Pontius dan Schneider, 2001) dalam (Pandapotan Sinurat et al., 2015). Variabel dependen yang terdiri dari setiap kelas penggunaan lahan ditransformasikan dalam peta raster biner (0 dan 1) dengan resolusi piksel 100 x 100 meter. Nilai 1 menunjukkan satu kelas penggunaan lahan sedangkan nilai 0 tidak terdapat penggunaan lahan. Variabel independen berupa faktor-faktor biofisik dan sosial ekonomi diklasifikasikan berdasarkan kelas kategori masing-masing tipe data dari nilai terkecil sampai terbesar dengan metode peng-kelasan natural breaks dalam format raster dengan resolusi piksel yang sama dengan kelas penggunaan lahan (Pandapotan Sinurat et al., 2015).

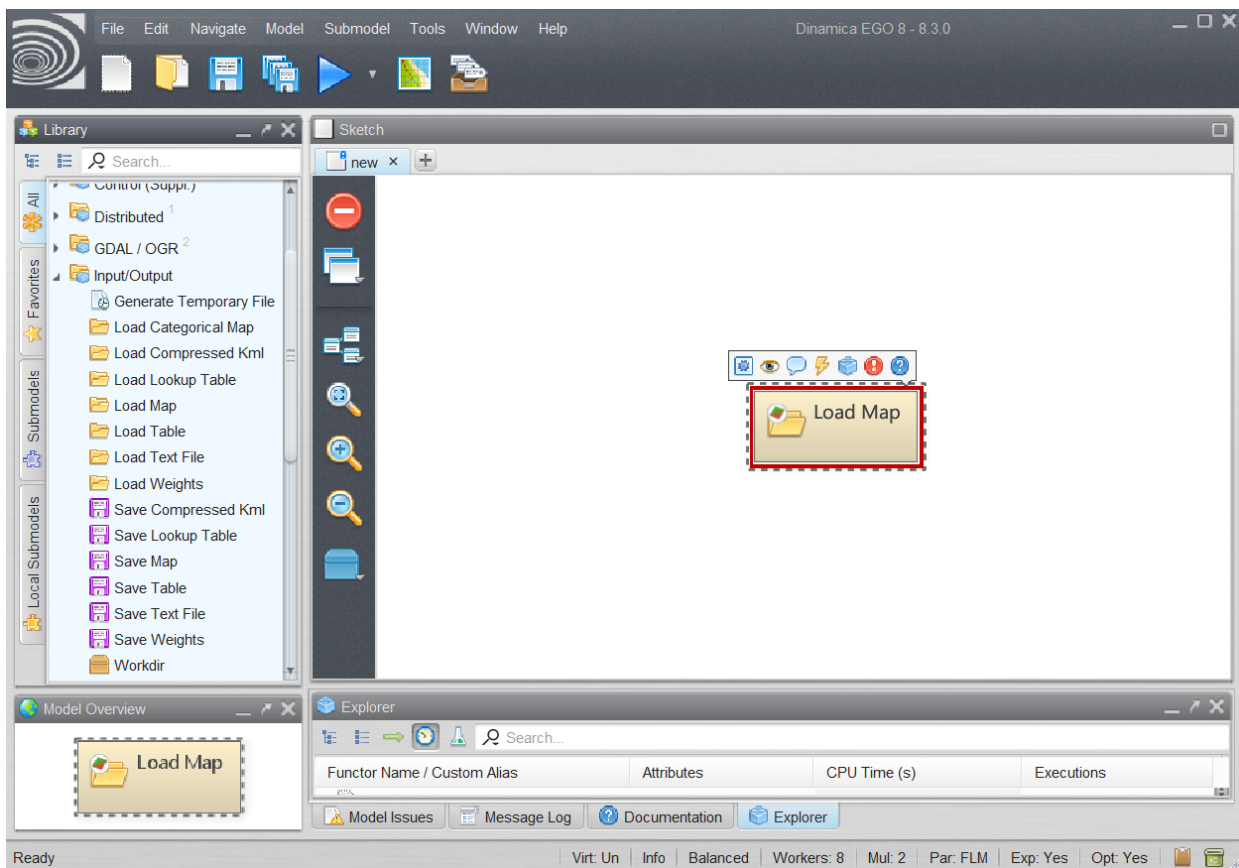
Hasil dari analisis regresi logistik diuji ketepatannya untuk masing-masing tutupan lahan dengan menggunakan metode ROC (relative operating characteristic). Nilai ROC berada pada rentang 0,5–1. Semakin besar nilai ROC, maka model regresi semakin memuaskan dan akurasi distribusi spasial tipe penggunaan lahan semakin tinggi. Secara umum, ketika nilai ROC berada pada rentang 0,5–0,7, akurasi model tergolong rendah; ketika nilai ROC berada pada rentang 0,7–0,9, akurasi model dianggap cukup

baik dan dapat dipercaya; sedangkan ketika nilai ROC lebih besar dari 0,9, model memiliki tingkat presisi yang tinggi (Manel et al., 2001) dalam (Jiang et al., 2015).

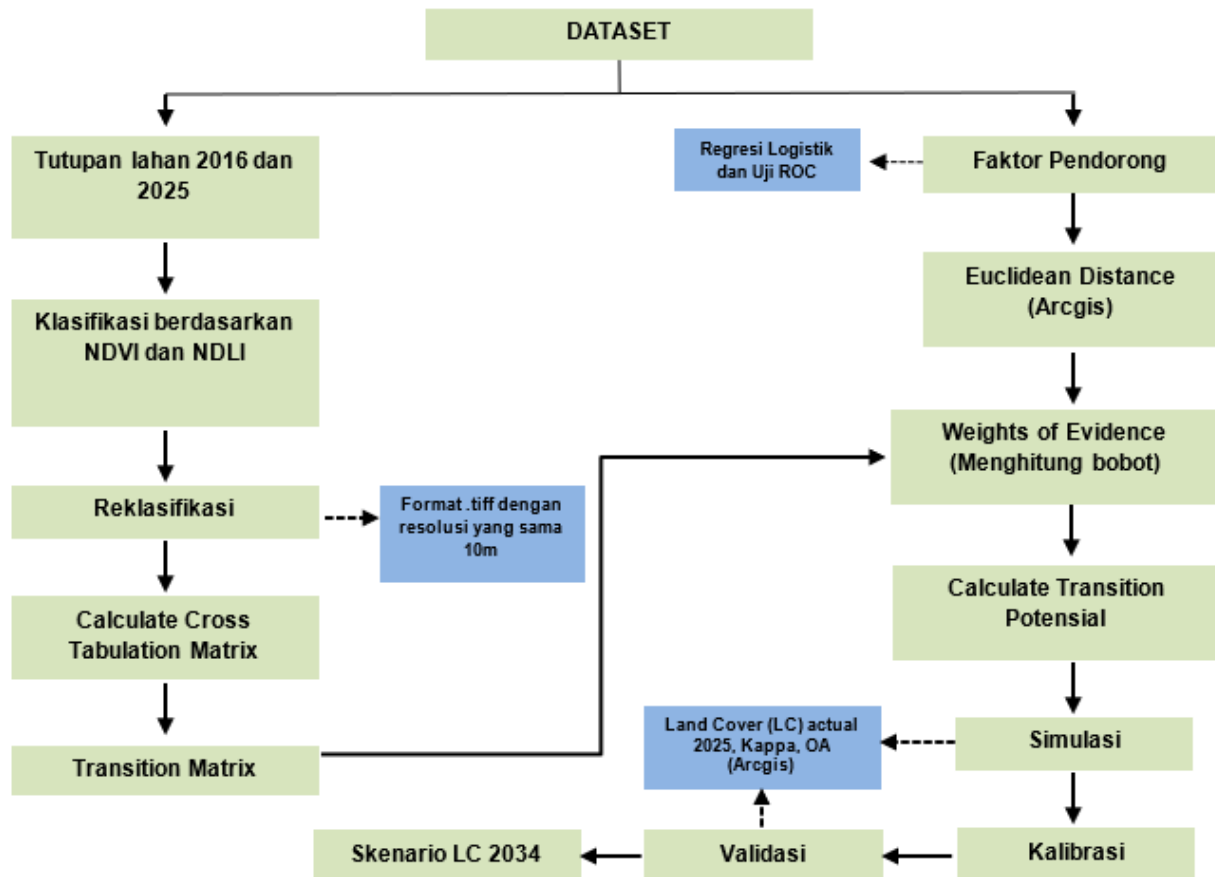
Seiring waktu, CLUE-S telah digunakan dalam berbagai studi, termasuk untuk prediksi urbanisasi, deforestasi, perubahan penggunaan lahan pertanian, serta evaluasi kebijakan lingkungan. Versi lebih lanjut dan fleksibel dari CLUE-S juga dikembangkan ke dalam platform visual berbasis cellular automata, seperti Dinamica EGO (Environment for Geoprocessing Objects), yang mempermudah pengguna tanpa keterampilan pemrograman tingkat lanjut.

Dinamica EGO merupakan platform gratis dan non-komersial yang mendukung desain model lingkungan dari skala sederhana hingga kompleks, berbasis cellular automata, map algebra, serta loop/iterasi bersarang. Fitur utamanya meliputi visual programming (diagram alir), paralelisme penuh, submodel, dan integrasi dengan R/Python (Soares-Filho et al., 2013).

Proses pemodelan dilakukan melalui beberapa tahapan menggunakan perangkat lunak Dinamica EGO versi 8 (lihat Gambar 7), yang disusun secara sistematis dan dilengkapi dengan bagan alir untuk menggambarkan keseluruhan proses pemodelan (Gambar 6).



**Gambar 6.** Tampilan Aplikasi Dinamica EGO 8



**Gambar 7.** Bagan Alir Pemodelan CLUE-S (Dinamica EGO)

### Persiapan Data

Untuk menjalankan model Dinamica EGO, hal pertama yang harus dilakukan adalah menyiapkan dataset. Dataset yang dibutuhkan untuk mensimulasikan perubahan penggunaan lahan terdiri dari 2 variabel yaitu, peta penggunaan lahan dan faktor pendorong potensial. Data penggunaan lahan yang digunakan adalah peta tutupan lahan tahun 2016 dan 2025, diperoleh dari citra sentinel-2a yang diunduh secara gratis lewat platform [Dataspace.copernicus.eu](https://dataspace.copernicus.eu) dengan resolusi spasial 10m.

Peta tahunan untuk Tahun 2016 dan 2025 digunakan untuk membuat periode historis selama 9 tahun, yang memungkinkan periode yang sama, diproyeksikan ke masa depan (dari Tahun 2025 sampai dengan Tahun 2034). Selanjutnya, peta tersebut diklasifikasikan berdasarkan metode indeks NDVI dan NDLI yang diolah pada perangkat lunak ARCGIS. Terakhir, direklasifikasi kelas lahan ke dalam kategori sesuai kebutuhan model untuk tahun 2016 dan tahun 2025 dengan resolusi dan system proyeksi yang sama, dan disimpan dengan format raster (.tif).

Selain peta tutupan lahan, variabel berikut yang menjadi input untuk pemodelan adalah faktor pendorong (driving factors) perubahan tutupan lahan seperti kemiringan lereng, ketinggian, jarak ke jalan, jarak ke permukiman dan kepadatan penduduk. Penting sebelum memulai pemodelan untuk mengolah data-data faktor pendorong tersebut dalam ARCGIS menggunakan tools Euclidean Distance. Euclidean Distance digunakan untuk menghitung jarak lurus dari setiap piksel ke fitur terdekat (misalnya jalan utama). Hasilnya berupa raster di mana setiap piksel berisi nilai jarak dan memastikan projected coordinate system sama (UTM Zone 51N), resolusi raster 10 m dan format output (.tif) agar bisa digunakan di Dinamica EGO. Dinamica akan menghitung korelasi spasial antara jarak (*Euclidean Distance*) dan lokasi perubahan lahan melalui analisis WoE.

### Calculate Cross Tabulation Matrix

Pemodelan perubahan tutupan lahan menggunakan Dinamica EGO, *cross tabulation matrix* (matriks tabulasi silang) berfungsi sebagai alat analisis untuk mengidentifikasi dan mengkuantifikasi perubahan kelas tutupan lahan dari tahun awal tahun 2016 dan tahun akhir tahun 2025. Matriks ini menggambarkan transisi spasial antar kelas tutupan lahan berdasarkan dua peta input tutupan lahan yang telah direklasifikasi sebelumnya.

Dinamica EGO melakukan perbandingan sel per sel antara peta awal dan peta akhir. Setiap pasangan nilai (nilai kelas tutupan awal dan akhir) dicatat dan dihitung frekuensinya. Hasil dari proses ini adalah sebuah matriks dua dimensi, di mana baris mewakili kelas tutupan lahan awal, dan kolom menunjukkan kelas pada waktu selanjutnya. Sebagai contoh, jika suatu wilayah mengalami konversi dari hutan menjadi permukiman, maka dalam matriks akan terdapat nilai pada posisi baris "hutan" dan kolom "permukiman" yang menunjukkan jumlah sel yang mengalami perubahan tersebut. Matriks ini sangat penting karena menjadi dasar dalam menentukan transition matrix, yang kemudian digunakan untuk mengatur probabilitas dan jumlah perubahan tutupan lahan pada langkah simulasi selanjutnya.

Selain itu, cross tabulation matrix juga membantu peneliti memahami pola dominan perubahan lahan, serta mengidentifikasi area yang stabil (tidak berubah), yang tampak pada diagonal utama matriks. Di Dinamica EGO, fitur ini dapat diakses melalui modul "*Calculate Transition Matrix*" atau "*Crosstab Map*".

## Transition Matrix

Proses tabulasi silang (*cross tabulation matrix*) dilakukan untuk menganalisis perubahan antar kelas tutupan lahan dari dua periode waktu, langkah selanjutnya dalam pemodelan menggunakan Dinamica EGO adalah penyusunan transition matrix atau matriks transisi. Matriks ini merepresentasikan jumlah atau proporsi perubahan dari satu kelas tutupan lahan ke kelas lainnya selama interval waktu tertentu.

Matriks transisi disusun dengan merujuk pada data yang dihasilkan dari cross tabulation matrix, di mana baris menunjukkan kelas awal dan kolom menunjukkan kelas tujuan dari perubahan lahan. Dinamica EGO mengolah frekuensi perubahan ini menjadi nilai absolut (jumlah piksel atau sel yang berpindah) atau nilai proporsional (persentase perubahan), tergantung pada kebutuhan pemodelan.

Dalam sistem Dinamica EGO, transition matrix menjadi komponen utama yang digunakan dalam modul simulasi. Matriks ini menentukan berapa banyak sel yang akan mengalami perubahan dari satu kategori ke kategori lainnya dalam rentang waktu simulasi berikutnya. Sebagai contoh, jika dari hasil *cross tabulation* diketahui bahwa 500 sel berubah dari lahan pertanian menjadi permukiman dalam lima tahun terakhir, maka dalam simulasi untuk lima tahun mendatang, sistem akan memprediksi konversi lahan dalam jumlah serupa, kecuali jika disesuaikan oleh faktor pembobotan atau skenario kebijakan.

## Weights of Evidence (WoE)

Penyusunan transition matrix mencerminkan pola dan kuantitas perubahan antar kelas tutupan lahan dalam periode tertentu, tahapan penting berikutnya dalam proses pemodelan menggunakan Dinamica EGO adalah analisis Weights of Evidence (WoE). Metode ini digunakan untuk menentukan probabilitas transisi antar tutupan lahan yang didasarkan pada konsep probabilitas Bayesian yang mengaitkan keberadaan sekumpulan faktor tertentu dengan probabilitas perubahan penggunaan lahan Eastman dkk., 2005 dalam (Gonzales & Hopfgartner, 2024).

Setiap jenis perubahan lahan yang telah ditentukan dalam transition matrix dianalisis secara individual untuk mengukur sejauh mana variabel seperti jarak ke jalan, ketinggian, kemiringan, jarak ke pusat kota, atau variabel sosio-ekonomi lainnya memengaruhi terjadinya perubahan tersebut.

Proses ini dilakukan dengan mengkategorikan atau mengklasifikasikan setiap faktor pendorong ke dalam interval atau kelas. Sistem kemudian menghitung bobot logaritmik berdasarkan distribusi frekuensi lokasi transisi dalam setiap kelas variabel. Hasil perhitungan ini mencakup bobot positif ( $W+$ ) yang menunjukkan kondisi yang memperbesar kemungkinan perubahan, dan bobot negatif ( $W-$ ) yang mencerminkan kondisi yang menghambat terjadinya perubahan (Riaz et al., 2024).

Hasil dari analisis WoE digunakan untuk menghasilkan transition potential maps, yaitu peta yang menunjukkan tingkat probabilitas suatu lokasi mengalami perubahan berdasarkan nilai kumulatif dari semua bobot variabel yang relevan. Peta inilah yang akan menjadi acuan dalam proses simulasi spasial di tahap selanjutnya, karena menunjukkan area-area yang paling berpotensi mengalami perubahan.

## Calculate Transition Potential

Secara umum, *transition potential* adalah nilai probabilistik yang diberikan kepada setiap piksel atau sel dalam wilayah studi, yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan sel tersebut mengalami perubahan dari satu kelas tutupan lahan ke kelas lain tertentu, sebagaimana telah didefinisikan dalam *transition matrix*. Nilai ini dihitung melalui akumulasi bobot (baik  $W+$  maupun  $W-$ ) yang dihasilkan dalam tahapan *Weights of Evidence*, untuk setiap faktor pendorong yang relevan terhadap transisi tersebut.

Dalam praktiknya, setiap lokasi akan dinilai berdasarkan keberadaan atau jaraknya terhadap variabel-variabel seperti jaringan jalan, pusat permukiman, lereng, serta elemen spasial lainnya. Nilai bobot yang diperoleh dari masing-masing faktor kemudian dijumlahkan secara linier untuk membentuk skor total pada setiap sel. Skor total ini kemudian ditransformasikan menjadi nilai probabilitas antara 0 hingga 1, yang disebut transition potential. Semakin tinggi nilai tersebut, semakin besar peluang sel tersebut mengalami perubahan dalam proses simulasi.

## Simulation

Langkah berikutnya dalam pemodelan dengan Dinamica EGO adalah menjalankan proses simulasi perubahan lahan. Tahapan ini merupakan inti dari pemodelan spasial, di mana sistem mereplikasi dinamika perubahan tutupan lahan untuk periode waktu tahun 2016 ke tahun 2025.

Dalam proses simulasi, Dinamica EGO menggunakan informasi dari beberapa komponen utama:

- a. *Transition Matrix*, yang menentukan jumlah sel yang akan berubah dari satu kelas ke kelas lainnya.
- b. *Transition Potential Map*, yang menunjukkan lokasi paling memungkinkan untuk terjadinya perubahan.

Simulasi dilakukan melalui pendekatan berbasis *cellular automata (CA)*, di mana unit spasial terkecil (sel atau piksel) diperiksa berdasarkan nilai potensi transisinya. Sistem akan mengalokasikan perubahan lahan sesuai jumlah yang telah ditentukan dalam *transition matrix*, dengan memprioritaskan lokasi yang memiliki nilai potensi tertinggi berdasarkan *transition potential map* dan menggunakan algoritma *expander* untuk memperluas area yang sudah berubah (simulasi pertumbuhan spasial) dan *patcher* untuk menciptakan pola perubahan yang lebih realistis dengan ukuran dan bentuk tertentu. Algoritma ini memberikan fleksibilitas dalam meniru pola spasial yang menyerupai perubahan tutupan lahan di dunia nyata.

Hasil dari proses ini adalah *simulated land use map* tahun 2025, yaitu peta prediktif yang menunjukkan distribusi tutupan lahan pada tahun 2025, berdasarkan kondisi historis, potensi spasial, dan kebijakan simulasi. Peta ini kemudian digunakan untuk keperluan evaluasi tata ruang, skenario pembangunan, atau validasi terhadap data aktual.

## Kalibrasi

Kalibrasi bertujuan untuk menyempurnakan parameter model agar dapat meniru pola perubahan lahan sebagaimana tercatat dalam data historis. Meskipun hanya tersedia dua peta waktu (2016 dan 2025), kalibrasi masih dapat dilakukan dengan cara:

- a. Menyesuaikan *transition matrix*, yang merepresentasikan jumlah perubahan tiap kelas lahan selama periode 2016–2025.
- b. Mengoptimalkan bobot dalam analisis *Weights of Evidence (WoE)*, sehingga peta potensi perubahan (*transition potential map*) benar-benar mencerminkan faktor-faktor yang memengaruhi perubahan lahan di wilayah studi.
- c. Mengatur parameter algoritma *cellular automata* (seperti *patch size*, *expansion*, dan *compactness*) agar pola spasial hasil simulasi menyerupai pola aktual.

Selama proses ini, dilakukan uji coba berulang (*iteratif*) untuk mengevaluasi kesesuaian antara hasil simulasi dengan kondisi aktual. Model dianggap terkalibrasi dengan baik jika menghasilkan peta simulasi yang menyerupai distribusi spasial dan kuantitas perubahan lahan yang terjadi di lapangan.

## Validasi

Langkah berikutnya adalah validasi, yaitu proses untuk menilai tingkat akurasi peta hasil simulasi tahun 2025 dibandingkan dengan peta aktual tahun 2025. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi terhadap data observasi menggunakan metrik evaluasi, seperti:

- a. *Overall Accuracy*, yang menghitung persentase keseluruhan piksel yang diklasifikasikan dengan benar (baik yang berubah maupun tidak berubah).
- b. *Kappa Statistic*, yang menilai kesesuaian antara dua peta sambil mengoreksi kemungkinan kesesuaian secara acak.

Proses validasi dilakukan melalui perbandingan peta hasil simulasi dan peta aktual menggunakan modul *Compare Maps* di Dinamica EGO, atau dengan memanfaatkan perangkat lunak tambahan seperti Arcgis untuk analisis spasial yang lebih mendalam.

## Skenario

Semua parameter skenario disesuaikan, selanjutnya Dinamica EGO akan menjalankan proses simulasi spasial sebagaimana proses standar, namun berdasarkan input skenario yang telah ditentukan. Hasilnya berupa peta prediksi tutupan lahan masa depan untuk tahun 2034. Simulasi ini bisa dijalankan beberapa kali untuk membandingkan hasil dari berbagai skenario, seperti:

- a. Skenario *Business as Usual (BAU)*: Mengasumsikan tren perubahan berlanjut tanpa intervensi kebijakan.
- b. Skenario Perlindungan ekologis: menggambarkan dampak kebijakan konservasi dan perlindungan lingkungan terhadap perubahan tutupan lahan

Tabel berikut memuat berbagai skenario yang dikembangkan, mulai dari kondisi normal atau tren berjalan (*business as usual*), hingga skenario dengan intervensi tertentu seperti pembatasan alih fungsi

lahan atau peningkatan tekanan pembangunan. Masing-masing skenario mencerminkan variasi dalam laju konversi lahan, pertumbuhan permukiman, dan perlindungan terhadap kawasan strategis seperti lahan pertanian dan hutan lindung.

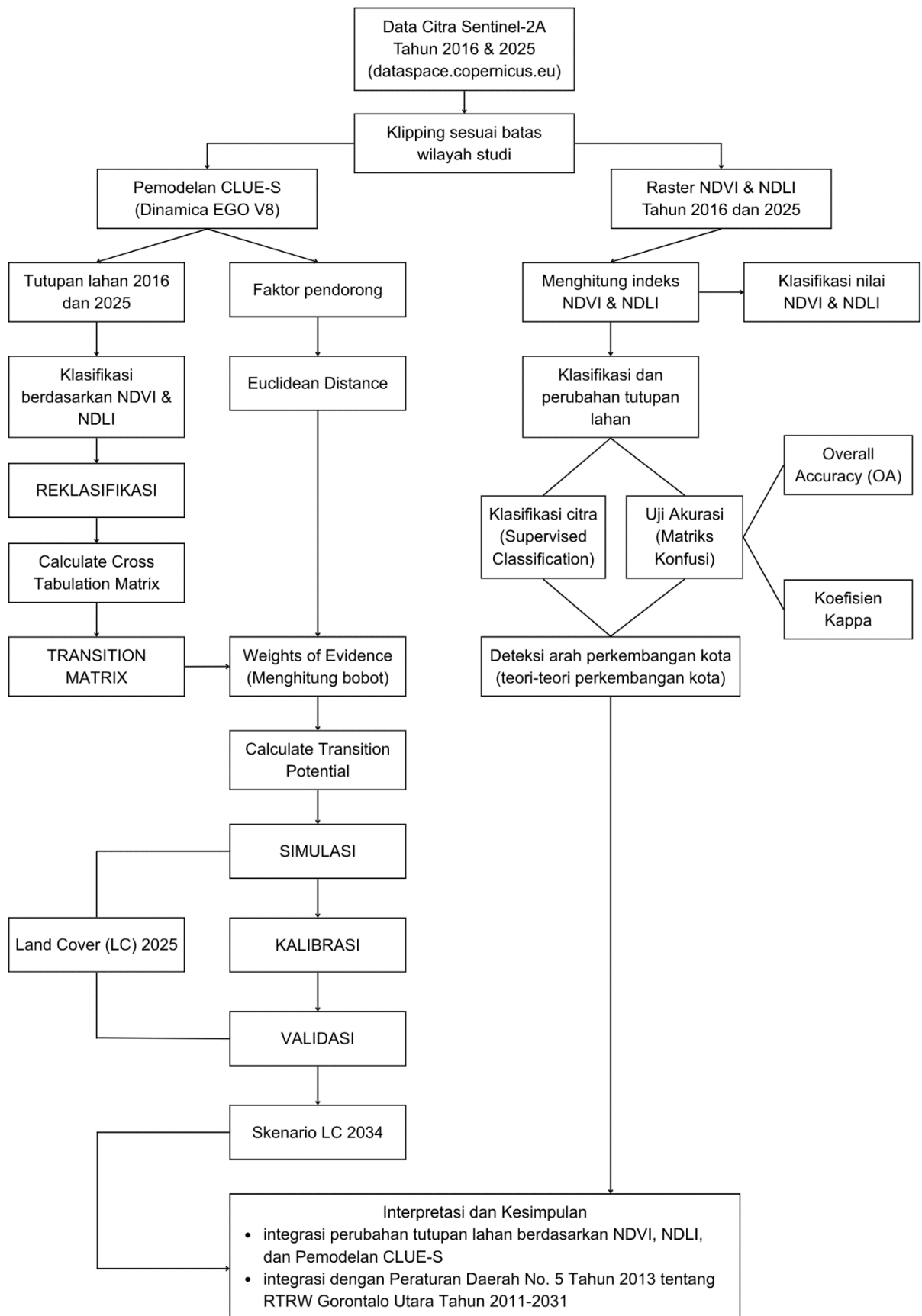
Perumusan skenario ini mempertimbangkan berbagai aspek, termasuk hasil analisis tren masa lalu, kebijakan tata ruang wilayah, serta kondisi biofisik dan sosial ekonomi setempat. Asumsi-asumsi tersebut kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak Dinamica EGO untuk menjalankan simulasi, sehingga dapat dihasilkan proyeksi tutupan lahan yang mendekati realitas dan bermanfaat dalam mendukung perencanaan wilayah yang berkelanjutan.

**Tabel 13.** Asumsi/Skenario Perubahan Tutupan Lahan dengan metode CLUE-S di Kabupaten Gorontalo Utara

Variabel	Asumsi Dasar	Skenario 1: Lanjut Tren Historis (BAU)	Skenario 2: Perlindungan Ekologis
<b>Tahun Proyeksi</b>	Proyeksi hingga tahun 2035 berdasarkan data historis 2016–2025	Tren perubahan lahan 2016–2025 dilanjutkan	Fokus pada konservasi hutan dan lahan basah
<b>Pertumbuhan Penduduk</b>	Pertumbuhan sedang (~1,2% per tahun, BPS)	Konsisten dengan pertumbuhan moderat	Dibatasi oleh kebijakan konservasi
<b>Permukiman</b>	Cenderung meningkat mengikuti pertumbuhan penduduk dan pembangunan infrastruktur	Bertambah ~10% luas dari 2025 ke 2035	Bertambah sedikit (~3%) di daerah strategis
<b>Lahan Pertanian</b>	Bisa menurun akibat konversi ke non-pertanian	Stabil atau sedikit menurun	Dijaga melalui program perlindungan lahan produktif
<b>Hutan Sekunder</b>	Rentan terhadap konversi jika tidak dilindungi	Menurun perlahan	Dipertahankan atau direstorasi melalui kebijakan perlindungan
<b>Lahan Terbangun</b>	Bertambah di sepanjang jalan utama, pesisir, dan sekitar pusat desa/kecamatan	Bertambah sesuai tren	Dibatasi oleh zona lindung dan RTRW
<b>Akses Jalan</b>	Peningkatan jaringan jalan akan mendorong perubahan tutupan	Peningkatan moderat	Peningkatan jalan dikendalikan di zona lindung
<b>Kebijakan Tata Ruang</b>	Mengacu pada RTRW Gorontalo Utara (2020–2040)	Implementasi moderat	Penegakan ketat kawasan lindung dan hutan
<b>Konservasi</b>	Masih ada upaya pelestarian hutan mangrove, DAS, dan kawasan konservasi lainnya	Upaya konservasi lemah	Prioritas tinggi pada perlindungan biodiversitas dan layanan ekosistem

#### 2.4.6 Interpretasi dan Kesimpulan

Menginterpretasikan hasil identifikasi perubahan tutupan lahan berdasarkan NDVI, NDLI dan skenario CLUE-S di Kabupaten Gorontalo Utara. Kemudian diintegrasikan dengan RTRW Kabupaten Gorontalo Utara Tahun 2011-2031. Melahirkan arahan rekomendasi kebijakan Tata Ruang wilayah berbasis spasial. Berikut *flowchart* dari tahapan analisis data perubahan tutupan lahan di Gorontalo Utara.



**Gambar 8.** Bagan Alir Tahapan Analisis