

Studi Perubahan dan Perkembangan Lahan Berdasarkan Pendekatan Land Use Transport Interaction (LUTI) di Kota Padang Menuju Kota Metropolitan Tahun 2043

Alkinol Farezki^{✉ 1}, IB Ilham Malik², Valendya Rilansari³

^{1,2,3}Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

Diunggah: 30/09/2025 | Direview: 02/12/25 | Diterima: 29/11/25

[✉] alkinolfarezkiedu@gmail.com

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan perubahan dan perkembangan penggunaan lahan di Kota Padang menuju kota metropolitan tahun 2043 dengan menggunakan pendekatan *Land Use–Transport Interaction* (LUTI). Pendekatan ini digunakan untuk memahami hubungan timbal balik antara dinamika penggunaan lahan dan sistem transportasi dalam membentuk pola perkembangan spasial kota. Penelitian dilakukan dengan pendekatan deduktif dan metode kuantitatif berbasis data spasial dan statistik. Analisis perubahan lahan dilakukan menggunakan klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) dengan metode *Maximum Likelihood Classification* terhadap citra satelit Landsat 8 multitemporal tahun 2013–2023 yang divalidasi melalui uji akurasi *confusion matrix*. Faktor pendorong perubahan lahan dianalisis menggunakan *Geospatial Multi-Criteria Analysis* (GMCA) melalui tahapan *euclidean distance*, *fuzzy logic*, dan *weighted sum* untuk menghasilkan peta probabilitas spasial perubahan lahan. Selanjutnya, simulasi perubahan dan perkembangan lahan hingga tahun 2043 dilakukan menggunakan *Land Change Modeler* dengan pendekatan *Markov Chain* dan *Cellular Automata* berbasis *Multi-Layer Perceptron*. Hasil penelitian menunjukkan terjadinya peningkatan signifikan lahan terbangun pada periode 2013–2023 yang diprediksi akan terus berkembang dan menyebar ke wilayah pinggiran kota, terutama di Kecamatan Koto Tangah, Kuranji, Pauh, dan Lubuk Kilangan, yang mencerminkan kecenderungan suburbanisasi. Pendekatan LUTI terbukti mampu mengidentifikasi pola dan arah perkembangan kota secara spasial serta berfungsi sebagai dasar preventif dalam perencanaan dan pengendalian pemanfaatan ruang untuk menyiapkan Kota Padang menuju Kota Metropolitan yang terintegrasi dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Perubahan dan Perkembangan Lahan; Interaksi Penggunaan Lahan dan Transportasi; Pemodelan Perubahan Lahan; Kota Metropolitan

Modeling Land Use Change and Urban Development Based on Land Use–Transport Interaction: A Case Study of Padang City toward a Metropolitan City by 2043

Abstract: This study aims to model land use change and urban development in Padang City toward metropolitan status by 2043 using a Land Use–Transport Interaction (LUTI) approach. The LUTI framework is employed to examine the reciprocal relationship between land use dynamics and transportation systems in shaping urban spatial development. The research adopts a deductive approach with quantitative methods based on spatial and statistical data. Land use change analysis was conducted using supervised classification with the Maximum Likelihood Classification method applied to multitemporal Landsat 8 satellite imagery from 2013 to 2023 and validated through a confusion matrix accuracy assessment. Driving factors of land use change were analyzed using Geospatial Multi-Criteria Analysis (GMCA) through Euclidean distance, fuzzy logic, and weighted sum procedures to generate a spatial probability map of land use change. Subsequently, land use change and development up to 2043 were simulated using the Land Change Modeler with Markov Chain and Cellular Automata approaches based on a Multi-Layer Perceptron. The results indicate a significant increase in built-up land during the 2013–2023 period, which is projected to continue

expanding toward the urban fringe, particularly in Koto Tangah, Kuranji, Pauh, and Lubuk Kilangan districts, reflecting a suburbanization trend. The findings demonstrate that the LUTI-based modeling approach effectively identifies spatial patterns and directions of urban development and provides a preventive analytical basis for integrated land use and transport planning to support Padang City's transition toward a sustainable and well-structured metropolitan city by 2043.

Keywords: *Land Use Change and Urban Development; Land Use-Transport Interaction; Land Change Modeler, Metropolitan City*

1. Latar Belakang

Perubahan dan perkembangan penggunaan lahan yang berlangsung cepat sering kali menghasilkan sejumlah dampak negatif yang multidimensional terhadap sistem transportasi, lingkungan, tata ruang hingga tata kelola kota (Ogunbode et al., 2024). Alih fungsi lahan yang signifikan dan terjadinya fenomena urbanisasi secara tidak terkendali memicu ketidakseimbangan permintaan pergerakan dan kapasitas infrastruktur transportasi, karena terdapat ketidaksesuaian antara tata ruang dengan praktik pembangunan yang menimbulkan konflik fungsi ruang serta tekanan terhadap infrastruktur transportasi yang tidak siap untuk melayani beban perjalanan yang meningkat (Alipour & Dia, 2023). Tata ruang yang tidak responsif terhadap dinamika perubahan penggunaan lahan cenderung menghasilkan pola spasial perkembangan kota yang dispersi dan terfragmentasi, yang pada gilirannya memperlemah efektivitas tata kelola perkotaan (D. Permana, 2023). Ketidakteraturan ini menciptakan kesulitan dalam pengelolaan infrastruktur, pengendalian dampak lingkungan, serta perencanaan tata ruang yang inklusif, sehingga menimbulkan inefisiensi biaya dan risiko kompleksitas permasalahan pembangunan yang lebih serius di masa depan (A. S. Permana et al., 2015).

Pendekatan *Land Use-Transport Interaction* (LUTI) muncul sebagai kerangka pemodelan yang secara eksplisit menangkap hubungan timbal balik antara penggunaan lahan dan sistem transportasi dalam ruang kota, dimana LUTI model memungkinkan analisis untuk mensimulasikan bagaimana perubahan pada infrastruktur transportasi mempengaruhi pola penggunaan lahan, dan sebaliknya bagaimana komposisi dan distribusi penggunaan lahan mempengaruhi permintaan transportasi dan karakter mobilitas *urban* (Sarri et al., 2023). LUTI menjadi fondasi teoritis dan metodologis untuk memahami hubungan kompleks tersebut karena ia tidak hanya memetakan pola historis tetapi juga memungkinkan eksplorasi *what-if scenarios* yang penting bagi perencanaan strategis dan mitigasi risiko dalam proses perkembangan suatu kota menuju kota yang lebih besar seperti kota metropolitan (Pyrohova et al., 2025). Dengan demikian, LUTI tidak hanya berfungsi sebagai alat pemodelan, tetapi juga sebagai *decision support system* yang memampukan perencanaan lebih terintegrasi antara kebijakan penggunaan lahan dan transportasi yang mendasari proses perkembangan kota itu sendiri, sehingga pendekatan ini mampu memberikan gambaran terkait kebutuhan untuk mengantisipasi dan mengelola kompleksitas perkembangan kota metropolitan yang efisien dalam mobilitas dan responsif terhadap tantangan lingkungan yang terus berkembang (Lopane et al., 2025).

Kenyataan dan tantangan dalam proses perkembangan kota ini berimplikasi pada kota – kota di Indonesia, salah satunya yaitu Kota Padang sebagai Kota Besar yang ada di Pulau Sumatera dan disiapkan menjadi Kota Metropolitan tahun 2023 – 2043 berdasarkan dokumen Perubahan atas Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) 2010-2030 dan Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) Kota Padang Tahun 2023-2043, serta merupakan kota inti dari Kawasan Metropolitan Palapa di Provinsi Sumatera Barat. Hal ini dapat dilihat dari data pertumbuhan dan persebaran jumlah penduduk di Provinsi Sumatera Barat, dimana Kota Padang memiliki pertumbuhan jumlah penduduk yang cukup tinggi dan meningkat signifikan dari tahun 2013 – 2023 (di luar fenomena covid-19) dengan persebaran jumlah penduduk terbanyak antara kabupaten/kota di Provinsi Sumatera Barat yang mencapai 16,38% dari total jumlah penduduk tahun 2023 (BPS Provinsi Sumatera Barat, 2023). Rumusan permasalahan terhadap status dan peran fungsi Kota Padang berdasarkan dokumen perencanaan serta fenomena demografi yang terjadi, menggambarkan dan mencirikan karakteristik kota yang akan berpotensi mengalami permasalahan dalam proses perkembangan kota (Winarsro, 2006).

Oleh karena itu, Kota Padang sebagai kota yang diperkirakan akan menjadi Kota Metropolitan di Pulau Sumatera tentu membutuhkan kebijakan dan studi mengenai perkembangan kota dalam menyikapi permasalahan kontinu berupa pertumbuhan jumlah penduduk yang terkonsentrasi di kawasan perkotaan (urbanisasi) dan mengakibatkan peningkatan kebutuhan terhadap lahan terbangun. Sebagaimana 3 (tiga) kota pendahulunya yang ada di Pulau Sumatera (Medan, Palembang dan Bandar Lampung) sudah masuk pada kategori Kota Metropolitan berdasarkan jumlah penduduk dan telah berhadapan dengan permasalahan transportasi, lingkungan dan tata ruang yang lebih intensif (Malik, 2022). Hal ini menjadi pijakan pemikiran penelitian pada lokasi studi yaitu Kota

Padang dalam melihat kota masa depan dengan langkah preventif untuk menyiapkan permasalahan perkembangan kota dari waktu ke waktu sebagai upaya pengendalian dan pemanfaatan ruang dalam menyiapkan Kota Padang menuju Kota Metropolitan tahun 2043.

2. Metode

2.1. Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang dilakukan dalam penelitian adalah pendekatan deduktif, dimana pendekatan ini secara umum bersifat ilmiah (modern), yang artinya metode utama yang digunakan untuk memperoleh kebenaran ilmiah dapat dipertanggungjawabkan dengan rasional dan empiris (Sukandarrumidi, 2012). Pendekatan deduktif merupakan metode berpikir yang menerapkan hal-hal umum (sintesis teori) terlebih dahulu untuk seterusnya dihubungkan dalam bagian-bagian yang khusus (Waruwu et al., 2025). Penerapan pendekatan deduktif yang dilakukan menggunakan metode kuantitatif untuk mengolah dan menganalisis data sekunder yaitu data kuantitatif berupa data spasial dan statistik yang dijabarkan dan dihasilkan dalam bentuk grafik, tabel dan juga gambar berupa peta. Dalam menginterpretasikan setiap hasil analisis kuantitatif digunakan analisis deskriptif kuantitatif untuk menjelaskan secara deskriptif bentuk atau *output* dari masing-masing unit analisis terhadap unit amatan yang terdapat pada setiap sasaran penelitian.

2.2. Unit Amatan dan Unit Analisis

Unit Amatan dalam penelitian adalah Kota Padang yang memiliki 11 (sebelas) kecamatan, yaitu Kecamatan Bungus Teluk Kabung, Kecamatan Koto Tangah, Kecamatan Kuranji, Kecamatan Lubuk Begalung, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kecamatan Nanggalo, Kecamatan Padang Barat, Kecamatan Padang Selatan, Kecamatan Padang Timur, Kecamatan Padang Utara, Kecamatan Pauh. Unit Analisis dalam penelitian adalah analisis pada variabel perubahan lahan, faktor pendorong (*driving faktor*) dan simulasi perubahan dan perkembangan lahan (model).

2.3. Metode Pengumpulan Data

Penelitian yang dilakukan menggunakan pendekatan deduktif, dimana merupakan metode berpikir yang menerapkan hal – hal secara umum (sintesis teori) terlebih dahulu untuk seterusnya dihubungkan pada bagian – bagian khusus, untuk memperoleh kebenaran ilmiah yang dapat dipertanggungjawabkan dengan rasional dan empiris (Sukandarrumidi, 2012). Penerapan pendekatan deduktif menggunakan metode kuantitatif untuk mengolah dan menganalisis data sekunder yaitu data kuantitatif berupa data spasial dan statistik yang digambarkan dalam bentuk grafik, tabel dan juga peta, sehingga untuk menginterpretasikan setiap hasil analisis kuantitatif digunakan analisis deskriptif kuantitatif dalam menjelaskan deskripsi output dari masing – masing unit analisis terhadap unit amatan pada setiap sasaran/variabel penelitian. Adapun kebutuhan data yang digunakan dalam penelitian sebagai berikut.

Tabel 1. Kebutuhan Data

No	Variabel	Kebutuhan Data	Jenis Data	Sumber
1	Perubahan Lahan	<i>Landsat 8 Multitemporal Satellite Imagery</i>	Raster (<i>Satellite Imagery</i>)	<i>United States Geological Survey (USGS)</i>
2	Faktor Pendorong	<i>Driving Factors:</i> Kawasan Strategis (<i>polygone</i>), Pusat Pelayanan (<i>point</i>), Pusat Permukiman (<i>polygone</i>), Jaringan Transportasi (<i>polyline</i>), Kawasan Transportasi (<i>polygone</i>)	Vektor (<i>Shapefile</i>)	<i>Public Works and Spatial Planning Agency (PUPR) of Padang City, validated by the Regional Development Planning Agency (Bappeda) of Padang City</i>

No	Variabel	Kebutuhan Data	Jenis Data	Sumber
3	Simulasi Perubahan dan Perkembangan Lahan	<i>Land Use Change Pattern: Land Cover in (2013, 2018 and 2023) and Weighted Spatial Probability Map</i>	Raster (Tiff)	<i>Results of data processing on previous variables*</i>

Berdasarkan kebutuhan data yang digunakan dalam penelitian yaitu jenis data sekunder, dimana terdapat 3 (tiga) metode pengumpulan untuk memperoleh data yang dibutuhkan yaitu pengumpulan data publik, pengumpulan data sekunder dan studi dokumen. Masing – masing variabel pada setiap sasaran akan dilakukan proses analisis berupa pengolahan data lebih lanjut berdasarkan pada input kebutuhan data. Berikut disajikan gambar kerangka analisis untuk menjelaskan proses analisis dari input, proses, output hingga capaian pada penelitian.

2.4. Metode Analisis Data

2.4.1. Analisis Maximum Likelihood Classification (*Supervised Classification*)

Klasifikasi terbimbing adalah salah satu cara analisis klasifikasi digital yang dilakukan secara umum pada data citra, dimana terjadi proses pengelompokan piksel-piksel ke dalam kelas dengan karakteristik *spektral* yang sama dan ditentukan berdasarkan nilai kecerahan (*brightness value/BV* atau *digital number/DN*) (Purwanto & Lukian, 2019). Analisis klasifikasi terbimbing atau *supervised classification* adalah klasifikasi yang dilakukan dengan arahan *supervised* (diawasi), dimana kriteria pengelompokan kelas ditetapkan berdasarkan *class signature* (pencirian kelas) yang diperoleh melalui pembuatan area contoh atau *training sample*. Hal ini menjadikan klasifikasi terbimbing berpedoman pada nilai piksel yang telah dikelompokkan kelas objek atau dibuat dalam *training sample* sehingga pemilihan *training sampel* yang kurang baik dapat menghasilkan klasifikasi yang kurang optimal (Marini et al., 2014).

Oleh karena itu, perlu dilakukan *accuracy test* (uji akurasi) untuk memvalidasi akurasi setiap kelas objek dan hasil klasifikasi keseluruhan agar memenuhi standar dan sesuai dengan arahan dalam melakukan analisis klasifikasi terbimbing terhadap data citra, dimana untuk setiap kelas objek harus memiliki akurasi $>80\%$ dan total akurasi keseluruhan dari hasil klasifikasi harus $>90\%$ (Purwanto & Lukian, 2019). Pada praktik analisis klasifikasi terbimbing yang dilakukan menggunakan uji akurasi dari hasil klasifikasi tutupan lahan dalam penelitian dengan metode *confusion matrix* (matriks kebingungan), sebagai alat evaluasi hasil kinerja atau model klasifikasi dari data *mining* dan statistik (Natun & Sumarlin, 2020).

2.4.2. Analisis Geospatial Multi-Criteria Analysis (GMCA)

Geospatial Multi-Criteria Analysis (GMCA) merupakan pendekatan analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) yang digunakan untuk mengintegrasikan berbagai faktor atau kriteria spasial yang berperan sebagai pendorong (*driving factors*) suatu fenomena keruangan melalui proses standardisasi, pembobotan, dan agregasi spasial (Bousquet et al., 2023). GMCA secara khusus dirancang untuk menangkap kompleksitas interaksi antarvariabel spasial yang memiliki tingkat pengaruh berbeda terhadap suatu proses perubahan, seperti perubahan penggunaan lahan, dengan memanfaatkan data raster atau vektor yang direpresentasikan dalam bentuk layer tematik (Afuye et al., 2024). Dalam konteks pemodelan perubahan lahan, GMCA digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan tingkat potensi atau probabilitas spasial terjadinya perubahan berdasarkan kedekatan terhadap variabel-variabel strategis seperti pusat pelayanan (sosial), kawasan strategis (ekonomi), kawasan permukiman (infrastruktur), jaringan dan kawasan transportasi (Wang et al., 2024).

Proses GMCA yang dilakukan menggunakan analisis kedekatan spasial (*Euclidean Distance*) untuk merepresentasikan pengaruh lokasi dari variabel, yang kemudian ditransformasi nilai kriterianya menggunakan pendekatan *fuzzy logic* guna mengakomodasi ketidakpastian dan sifat gradual dari fenomena spasial (Kilic et al., 2022), serta pada tahap akhir dilakukan penggabungan seluruh kriteria melalui metode pembobotan linier seperti *weighted linear combination* (*Weighted Sum*) untuk menghasilkan peta komposit berupa peta potensi perubahan lahan atau *weighted spatial probability map* (Jiang & Eastman, 2000). Dengan demikian, GMCA tidak berfungsi sebagai alat pengambilan keputusan akhir, melainkan sebagai kerangka analisis eksploratif dan kuantitatif guna

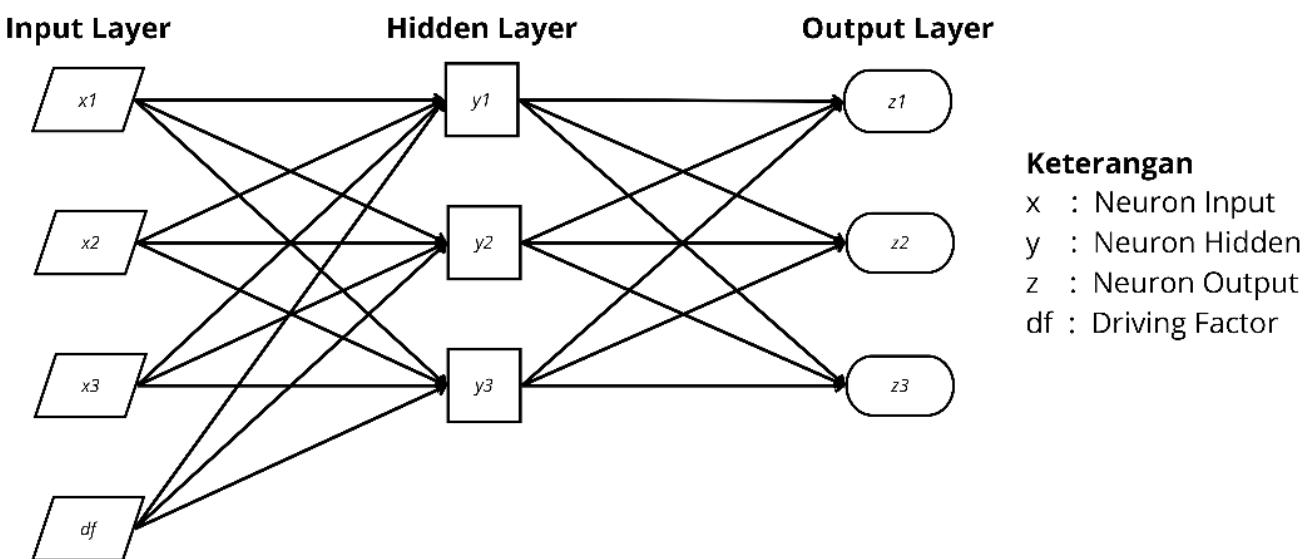
mengidentifikasi pola spasial dan faktor pendorong perubahan lahan yang selanjutnya dapat digunakan sebagai input utama dalam perwujudan spasial berdasarkan pendekatan *Land Use-Transport Interaction* untuk membuat model prediksi perubahan dan perkembangan lahan (Meng et al., 2024).

2.4.3. Analisis *Land Change Modeler* (*Multi-Layer Perceptron*)

Land Change Modeler (LCM) adalah alat yang sangat berharga untuk menganalisis dan memprediksi perubahan penggunaan dan tutupan lahan, dikembangkan oleh Clark Labs dan menjadi bagian dari perangkat lunak TerrSet, LCM menyediakan metode yang komprehensif dan terintegrasi untuk memantau perubahan lahan, menganalisis penggerak perubahan, dan memproyeksikan perubahan lahan di masa depan. Analisis *land change modeler* menggunakan beberapa tahapan dalam pemodelan perubahan lahan terdiri dari *change detection*, *driver analysis*, *transition modelling*, *change prediction* dan *accuracy assessment* (Eastman, 2017).

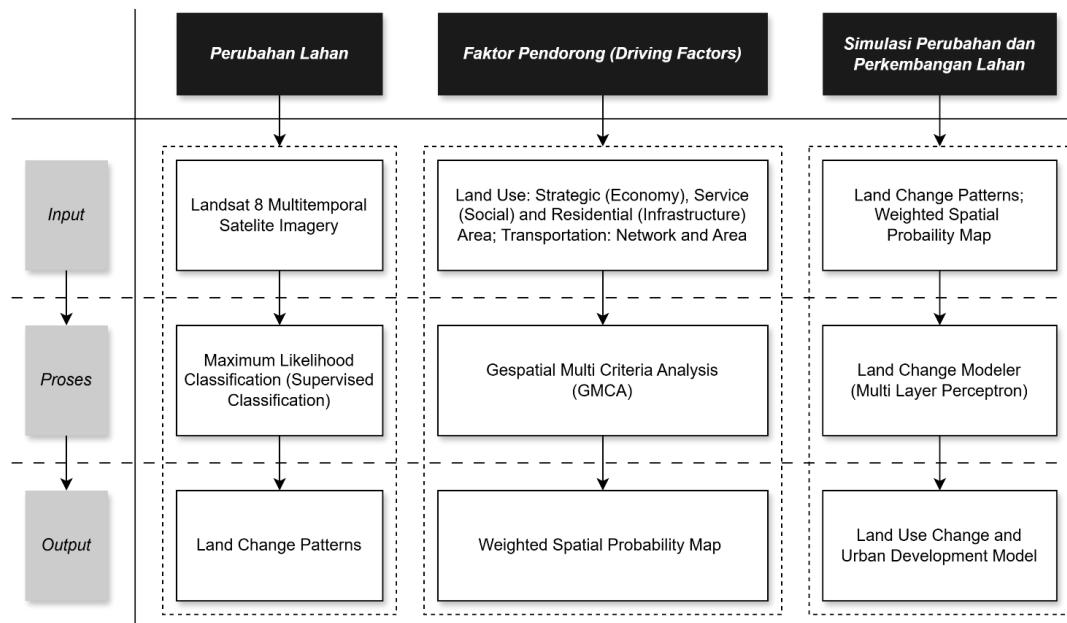
Dalam penerapannya analisis *land change modeler* menggunakan metode *markov chain* dan *cellular automata*, dimana pendekatan *markov chain* berperan dalam model probabilistik yang digunakan untuk memprediksi transisi antara kelas-kelas tutupan lahan dari satu periode waktu ke periode waktu lainnya berdasarkan data historis perubahan lahan, sedangkan *cellular automata* merupakan model berbasis *grid* yang digunakan untuk menyimulasikan perubahan spasial dan temporal dalam tutupan lahan yang menggabungkan informasi dari matriks transisi (dari *markov chain*) dengan aturan-aturan spasial yang mengatur bagaimana sel-sel di *grid* berubah (pengaruh *driving factor*) berdasarkan kondisi tetangga (*neighborhood*) (Eastman, 2017).

Hal tersebut menjadikan analisis *land change modeler* memahami dinamika spasial yang kompleks untuk membuat model prediksi perubahan lahan di masa depan berdasarkan variabel-variabel strategis secara spasial dalam perkembangan kota (Surya et al., 2020). Berikut digambarkan bentuk arsitektur analisis *land change modeler* menggunakan *multi-layer perceptron* pada aplikasi TerrSet.



Gambar 1. Ilustrasi Analisis *Land Change Modeler* Menggunakan *Multi-Layer Perceptron*

2.5. Kerangka Analisis



Gambar 2. Kerangka Analisis

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Perubahan Lahan

Perubahan tutupan lahan yang dilakukan dalam penelitian menggunakan analisis klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) dengan pengolahan data citra satelit multitemporal. Pengolahan data citra satelit multitemporal merupakan proses analisis dan interpretasi data citra satelit yang diambil pada beberapa waktu yang berbeda untuk mengidentifikasi perubahan dalam objek atau fenomena tertentu, yang mana dalam penelitian bertujuan untuk mengidentifikasi perubahan lahan di Kota Padang tahun 2013-2023. Dengan tahapan yang dilakukan dalam pengolahan data citra satelit multitemporal yaitu diantaranya tahapan praklasifikasi, analisis klasifikasi terbimbing (*supervised classification*) dan uji akurasi.

3.1.1. Tahap Pra-Klasifikasi

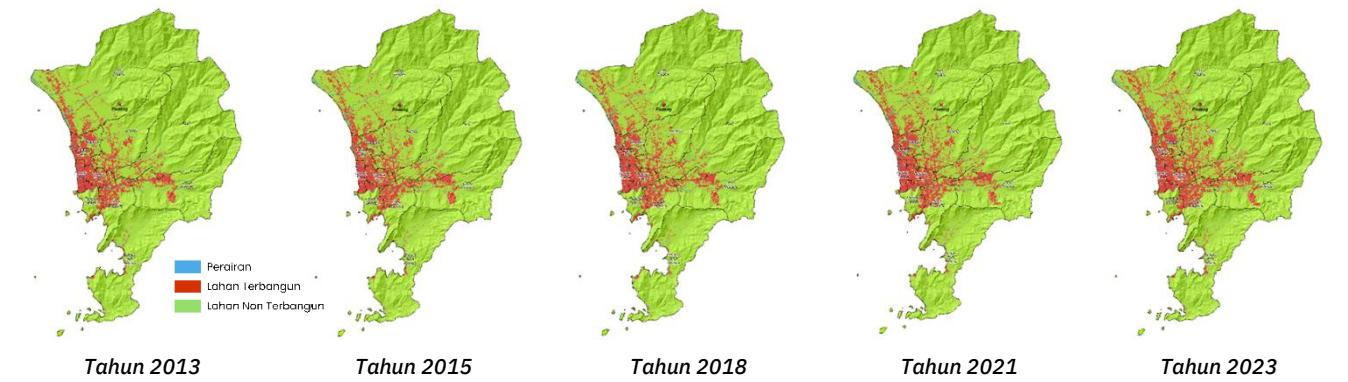
Tahapan praklasifikasi merupakan teknik pengolahan citra sebelum melakukan tahapan klasifikasi terbimbing, dimana pada tahapan ini terdiri dari koreksi citra satelit, pemotongan *area of interest* dan visualisasi kombinasi band. Dalam tahapan praklasifikasi menyesuaikan dan tergantung pada jenis data citra satelit yang akan diolah, sehingga pada penelitian ini data citra satelit yang digunakan merupakan data citra satelit *Landsat 8* yang diunduh melalui website Lembaga Survei Geologi Amerika Serikat (*United States Geological Survey*). Berikut tahapan pelaksanaan praklasifikasi yang dilakukan dalam penelitian.

Tabel 2. Hasil Pengolahan Data Citra Satelit

No	Tahapan	Hasil
1	Koreksi Citra Satelit	 <i>before image correction</i> <i>after image correction</i>
2	Pemotongan Area of Interest	 <i>before clipping</i> <i>after clipping</i>
3	Visualisasi Kombinasi Band	 <i>water color (5-6-4)</i> <i>false color (7-6-4)</i> <i>infrared color (6-5-4)</i>

3.1.2. Klasifikasi (*Supervised Classification*)

Metode yang digunakan dalam penelitian untuk memperoleh klasifikasi tutupan lahan adalah klasifikasi terbimbing atau *supervised classification*, metode ini menggunakan sampel sebagai pendekripsi atau parameter kelas tutupan lahan yang dibuat oleh pengamat atau peneliti. Dalam tahap klasifikasi terbimbing setelah dibuat sampel atau *training sample*, maka akan dilakukan metode peluang maksimum atau *Maximum Likelihood Classification* yang merupakan *tools* di ArcGIS dalam pengklasifikasian kelas tutupan lahan berdasarkan input data berupa sampel yang sudah dibuat. Berdasarkan hasil identifikasi klasifikasi tutupan lahan yaitu perairan, lahan terbangun dan lahan non terbangun, dapat diketahui besaran dan tren perubahan lahan di Kota Padang tahun 2013 – 2023.



Gambar 3 Peta Perubahan Lahan Tahun 2013 – 2023 Di Kota Padang

Berdasarkan hasil analisis klasifikasi tutupan lahan di Kota Padang tahun 2013 – 2023, diketahui bahwasannya tren perubahan lahan yang mengalami perubahan terbesar yaitu perubahan lahan pada klasifikasi lahan terbangun, dimana menunjukkan kenaikan besaran luas secara signifikan dengan jangkauan perubahan lahan mencapai +1.637 Ha, sebaliknya untuk klasifikasi lahan non-terbangun mengalami penurunan besaran luas sebesar -1.647,54 Ha, sedangkan pada klasifikasi perairan menunjukkan tren perubahan lahan yang linear atau mengalami kondisi fluktuatif pada laju dan posisi yang statis, sehingga jangkauan perubahan lahan tidak terlalu besar yang hanya mencapai +9,69 Ha. Berikut disajikan grafik tren perubahan lahan per klasifikasi tutupan lahan tahun 2013 - 2023 di Kota Padang.



Gambar 4 Grafik Tren Perubahan Lahan Tahun 2013 – 2023 Di Kota Padang

3.1.3. Uji Akurasi

Tahapan uji akurasi dilakukan setelah mendapatkan hasil klasifikasi tutupan lahan dari analisis klasifikasi terbimbing atau *supervised classification*. Pada tahapan ini bertujuan untuk menguji dan membuktikan bahwasanya hasil analisis berupa peta klasifikasi tutupan lahan dapat digunakan sebagai bahan analisis lebih lanjut dalam penelitian, dimana hasil uji akurasi dinyatakan bisa dan layak digunakan sebagai bahan analisis apabila nilai *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient* (κ) $\geq 85\%$. Dari uji akurasi terhadap hasil klasifikasi tutupan lahan tahun 2013, 2015, 2018, 2021 dan 2023 diketahui memiliki nilai rata-rata di atas $\geq 90\%$ yaitu dengan nilai koefisien kappa sebesar 93,80%, dimana teknik validasi dilakukan melalui pengecekan sampel pada Citra Satelit *Landsat 8* dan *Google Earth Pro* yang tersebar ke masing-masing kelas klasifikasi tutupan lahan dengan cara *Stratified Random* dengan bantuan *tools Create Accuracy Assessment Points* pada ArcGIS. Kemudian data validasi berupa hasil pengecekan sampel dijadikan input untuk perhitungan tabel uji akurasi dengan bantuan *tools Compute Confusion Matrix* yang menghasilkan tabel akumulasi jumlah nilai eror dan *Confusion Matrix Accuracy*.

Tabel 3. Confusion Matrix & Kappa Accuracy

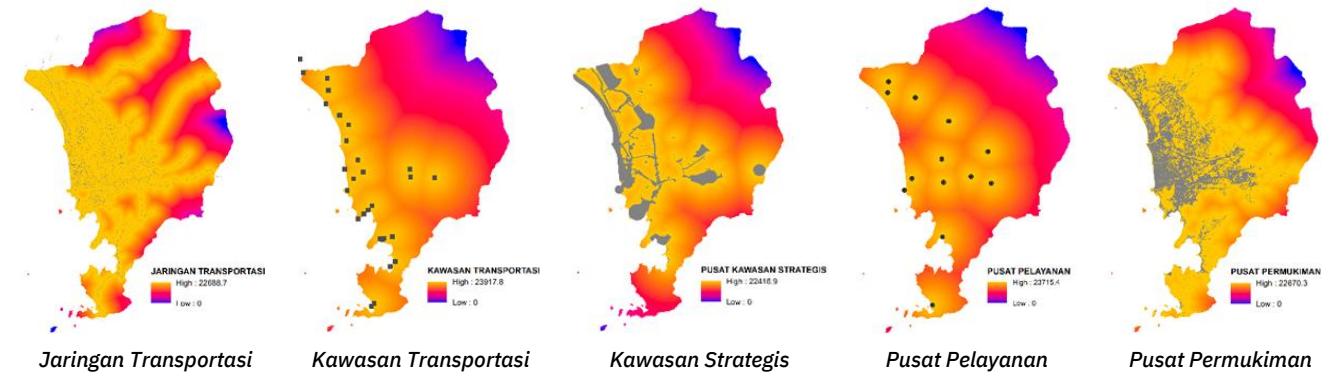
Class Value	C1	C2	C3	Total	User's Accuracy	Overall Accuracy	Kappa Accuracy
C1	24	1	0	25	96,00%		
C2	1	28	1	30	93,33%		
C3	1	0	44	45	97,78%	96,00%	93,80%
Total	26	29	45	100			
Producer's Accuracy	92,31%	96,55%	97,78%				

3.2. Analisis Faktor Pendorong (*Driving Factor*)

Dalam pengolahan *driving factor* dilakukan beberapa tahapan analisis spasial yaitu *euclidean distance*, *fuzzy logic* dan *weighted sum* untuk memperoleh jangkauan dan jarak ideal dari lokasi berupa *point*, *line* dan *polygone* sebagai model interaksi efektif antara penggunaan lahan dan transportasi atau *Land Use-Transport Interaction* (Wegener & Fürst, 1999). Oleh karena itu, dilakukan analisis *driving factor* menggunakan data turunan dari penggunaan lahan dan transportasi dalam membuat simulasi model perkotaan dengan pendekatan integrasi penggunaan lahan dan transportasi secara spasial (Black, 1981). Berikut hasil tahapan analisis *driving factor*.

3.2.1. Euclidean Distance

Euclidean distance digunakan sebagai alat ukur dalam menghitung jarak atau hubungan terdekat berdasarkan garis lurus antara dua atau lebih sumber berupa *line*, *polygone* dan *point*. Dalam penelitian, penerapan metode *euclidean distance* untuk melihat jangkauan terdekat lokasi spasial dari *driving factor*, sehingga hasil hubungan antara sel *grid* pada raster yang tumpang tindih (*overlay*) menjadi akumulasi nilai pada data *driving factor* yang memiliki tingkatan berdasarkan kedekatan lokasi spasial terhadap hasil analisis *Euclidean Distance*. Berikut tampilan hasil analisis *euclidean distance* untuk melihat lokasi terdekat sebagai hasil jangkauan input data *driving factor*.

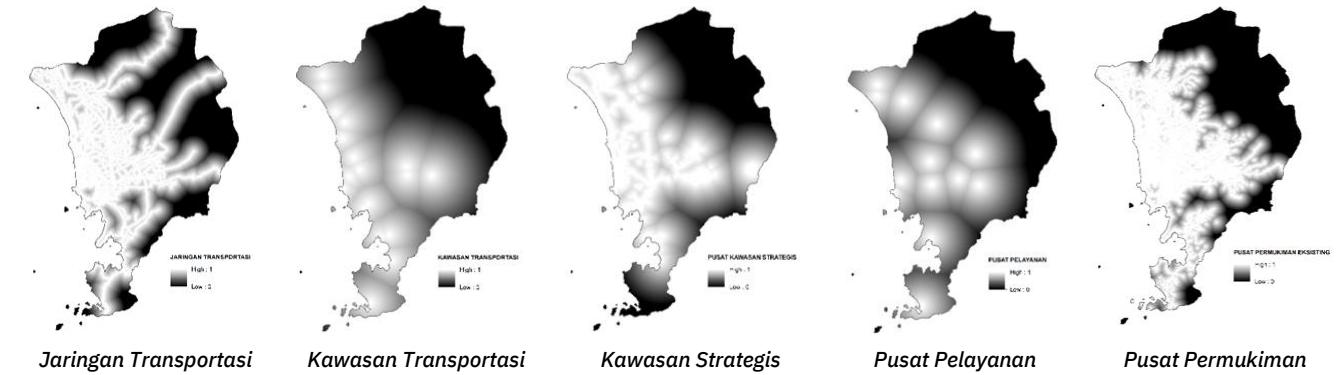


Gambar 5 Hasil Analisis *Euclidean Distance*

3.2.2. Application of Fuzzy Logic

Penerapan logika *fuzzy* pada penelitian, sebagai tahapan lanjutan dari analisis spasial *euclidean distance*, dimana dilakukan untuk memperjelas dan mempertegas kelas tingkatan suatu *grid* melalui *fuzzifikasi* atau keanggotaan *fuzzy*, yang artinya karena adanya tingkatan kelas pada *euclidean distance* terhadap *driving factor* proses *fuzzifikasi* memperjelas posisi lokasi yang termasuk dalam *driving factor* sebagai faktor pendorong perubahan lahan terbangun untuk pemodelan tutupan lahan, dimana terdapat nilai 1 (satu) dinyatakan sebagai nilai yang menjelaskan lokasi tersebut termasuk pada pendorong perubahan lahan terbangun dan nilai 0 (nol) yang menjelaskan suatu lokasi tersebut tidak termasuk pada pendorong perubahan lahan terbangun, sehingga terdapat batasan yang jelas terkait lokasi terdekat yang berada pada jangkauan ideal berdasarkan input data

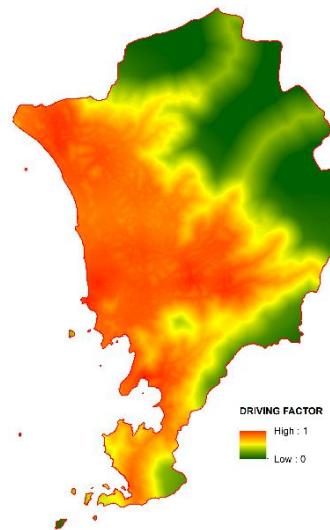
driving factor. Berikut ditampilkan gambaran penerapan logika *fuzzy* pada pembatasan kelas *driving factor* dari hasil analisis *euclidean distance*, sebagai berikut.



Gambar 6 Hasil Analisis Application of Fuzzy Logic

3.2.3. Weighted Sum

Perhitungan weighted sum merupakan langkah final setelah penerapan logika *fuzzy* dalam membangun model tutupan lahan dengan input data *driving factor*. *Weighted Sum* atau jumlah tertimbang merupakan analisis yang mampu menggabungkan atau melapisi beberapa data raster dengan pemberian bobot tertentu dan kemudian menjumlahkannya untuk mendapatkan nilai yang terintegrasi tanpa harus direklasifikasi berdasarkan hasil perhitungannya, sehingga mampu mempertahankan resolusi nilai klasifikasi hasil penerapan logika *fuzzy* pada input data *driving factor*. Oleh karena itu, hasil analisis weighted sum akan digunakan sebagai input layer dalam analisis *land change modeler* pada tahap *change prediction* untuk menggambarkan nilai yang memiliki pengaruh terhadap kemungkinan terjadinya perubahan lahan (*Weighted Spatial Probability Map*). Berikut hasil perhitungan *weighted sum* yang digambarkan berupa peta.



Gambar 7 Hasil Analisis Weighted Sum

3.2.4. Uji Korelasi Pearson's

Tahapan uji korelasi merupakan tahapan untuk menguji tingkat korelasi antara variabel masukan pada *driving factor*, dimana uji korelasi akan dilakukan antara hasil *driving factor* menggunakan *weighted sum* dengan setiap variabel masukan pada *driving factor* yaitu jaringan transportasi, kawasan transportasi, pusat kawasan strategis, pusat pelayanan dan pusat permukiman eksisting. Hal ini bertujuan untuk mengukur kekuatan dan menentukan arah hubungan dalam mengidentifikasi signifikansi statistik antar variabel, sehingga mampu memvalidasi tingkat keakuratan korelasi masukan antar variabel pada *driving factor* yang diolah sebagai faktor atau variabel independen pada model simulasi perubahan lahan (*forecasting*) yang akan dibuat dalam penelitian. Oleh karena

itu, uji korelasi yang digunakan untuk mengidentifikasi korelasi antara variabel masukan dengan hasil pengolahan *driving factor* yaitu uji korelasi *pearson's (Pearson's Correlation Test)* yang mampu memahami dan mengukur hubungan antara dua atau lebih variabel kuantitatif dalam perhitungan statistik. Berikut hasil uji korelasi *pearson's* yang dilakukan menggunakan bantuan aplikasi QGIS dengan plugin MOLUSCE (*Modules for Land Use Change Simulations*) pada menu *evaluating correlation* menggunakan *pearson's correlation test*.

Pearson's Correlation						
	Pusat Kawasan Strategis	Pusat Permukiman Eksisting	Driving Factor	Kawasan Transportasi	Jaringan Transportasi	Pusat Pelayanan
Pusat Kawasan Strategis	--	0.849967934342	0.909939233963	0.790143118735	0.672235503937	0.773696819464
Pusat Permukiman Eksisting		--	0.949636037531	0.802293180388	0.775863864686	0.827183153107
Driving Factor			--	0.90087317566	0.837549975538	0.905107417883
Kawasan Transportasi				--	0.642271535935	0.851376703699
Jaringan Transportasi					--	0.65926132397
Pusat Pelayanan						--

Gambar 8 Hasil Uji Korelasi Pearson's

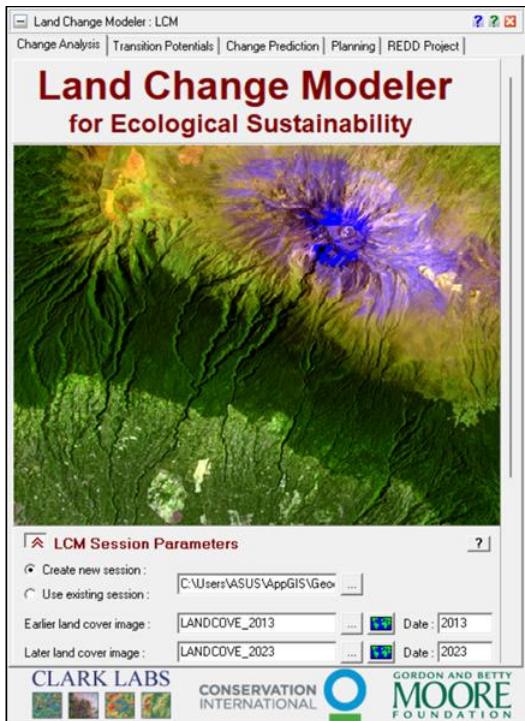
Berdasarkan dari hasil uji korelasi menggunakan *pearson's korelasi test*, diketahui bahwasanya nilai koefisien korelasi (r) bernilai positif dan berada pada interval 0,5-1,00. Hal ini menunjukkan terdapat hubungan linear yang kuat antara setiap variabel masukan dengan hasil pengolahan *driving factor*, dimana jika nilai koefisien korelasi (r) lebih besar dari 0,5 (>0,5), maka dapat dinyatakan variabel masukan dan hasil pengolahan *driving factor* layak digunakan untuk membuat model simulasi perubahan lahan tahun 2043 di Kota Padang.

3.3. Simulasi Perubahan dan Perkembangan Lahan

Simulasi perubahan lahan tahun 2023 – 2043 merupakan teknik pengolahan data spasial yang menggunakan data historis dan masukan *driving factor* untuk membuat simulasi model perubahan lahan pada tahun 2023 – 2043 (*forecasting*). Analisis *land change modeler* menggunakan pendekatan metode *Markov Chain* dan *Cellular Automata*, dimana *Markov Chain* digunakan untuk menghitung probabilitas transisi antar jenis tutupan lahan, sementara *Cellular Automata* berfungsi untuk memodelkan dinamika spasial antar sel *grid* berdasarkan masukan data berupa *driving factor* dan data historis pola perubahan tutupan lahan tahun 2013-2023 di Kota Padang.

3.3.1. Change Analysis

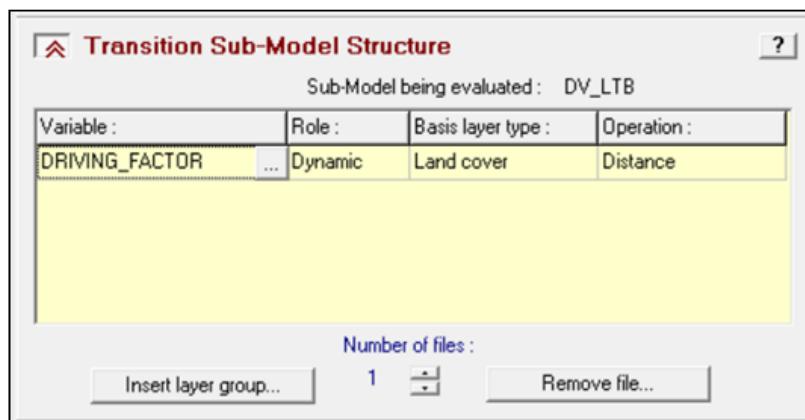
Tahapan *Change Analysis* merupakan langkah awal untuk analisis *Land Change Modeler*, dimana pada tahap ini data masukan berupa hasil klasifikasi tutupan lahan tahun sebelumnya yang berfungsi sebagai data *training* untuk memahami algoritma perubahan lahan pada wilayah penelitian yaitu Kota Padang pada tahun 2013-2023. Berikut tampilan pada bagian analisis *Land Change Modeler* untuk input data tutupan lahan tahun 2013 dan 2023.



Gambar 9 Tampilan Input Data Perubahan Lahan 2013-2023

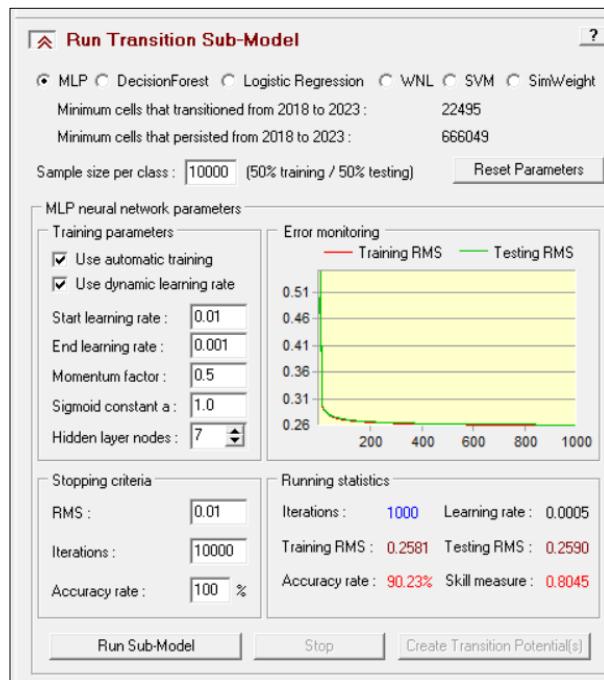
3.3.2. Transition Potentials

Tahapan *transition potentials* merupakan langkah lanjutan setelah melakukan input data pada *change analysis* terhadap tutupan lahan tahun sebelumnya yaitu tahun 2013 dan 2023. Pada tahapan awal, akan dimasukkan input data berupa *driving factor* atau faktor pengendali yang sudah diidentifikasi sebelumnya yang berfungsi untuk membangun model dan merangsang perubahan tutupan lahan pada tahun prediksi. Input variabel *driving factor* berperan sebagai *role* yang *dynamic*, sehingga tidak bersifat tetap atau menghambat perubahan tutupan lahan bahkan sebaliknya, *role dynamic* atau peran dinamis bertujuan untuk merangsang perubahan lahan sesuai rentang nilai yang diklasifikasikan pada setiap *grid* data raster dari *driving factor*. Berikut tampilan proses input data *driving factor* pada analisis *Land Change Modeler*.

Gambar 10 Input Data *Driving Factor*

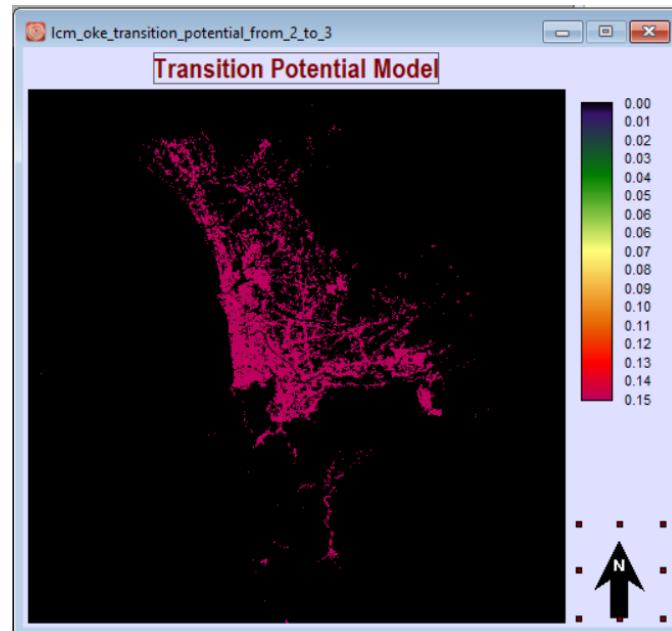
Setelah memasukkan input data *driving factor*, langkah selanjutnya dalam mengidentifikasi perubahan lahan potensial dilakukan pada bagian analisis *Transition Potentials* yaitu *run transition model* untuk mengetahui probabilitas dan potensial perubahan lahan pada *run transition model* menggunakan bantuan *Multi Layer Perceptron* (MLP) yang merupakan salah satu jenis saraf tiruan dari *neural network* dengan keterangan parameter yang sudah diatur dan disesuaikan dalam penggunaan analisis *Land Change Modeler*. Berdasarkan dari hasil *run*

transition model diperoleh nilai *accuracy rate* sebesar 90,23% dengan *iteration* atau perulangan sebanyak 1000 kali, dimana hasil *accuracy rate* > 80% dapat diterima dan digunakan sebagai pemodelan perubahan lahan pada analisis *Land Change Modeler*. Berikut tampilan bagian *run transition* model pada tahapan *transition potentials* yang telah dilakukan.



Gambar 11 Tampilan *Run Transition Potentials*

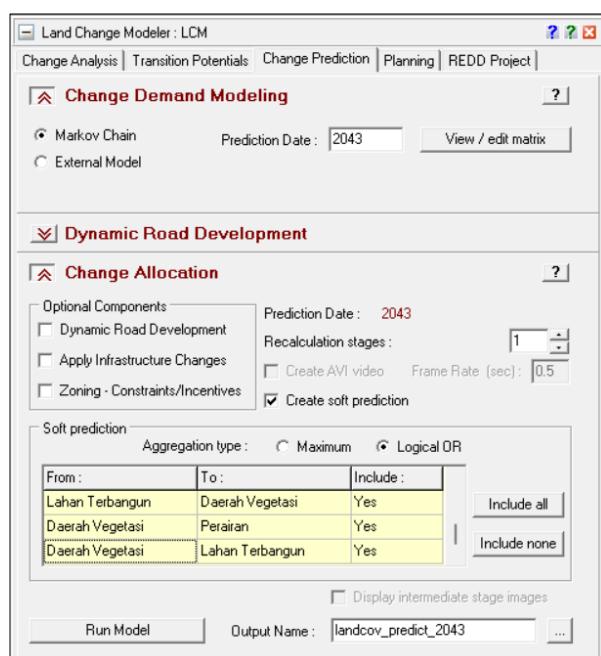
Berdasarkan hasil langkah *Run sub model* untuk *training* dan tinjauan statistik berupa *result* terhadap model yang sudah dibangun dengan input *driving factor*. Langkah selanjutnya yaitu untuk membuat gambar *map* dengan melakukan *create transition potentials* yang akan menghasilkan potensi transisi atau perubahan lahan berupa peta.



Gambar 12 Hasil Model *Transition Potential*

3.3.3. Change Prediction

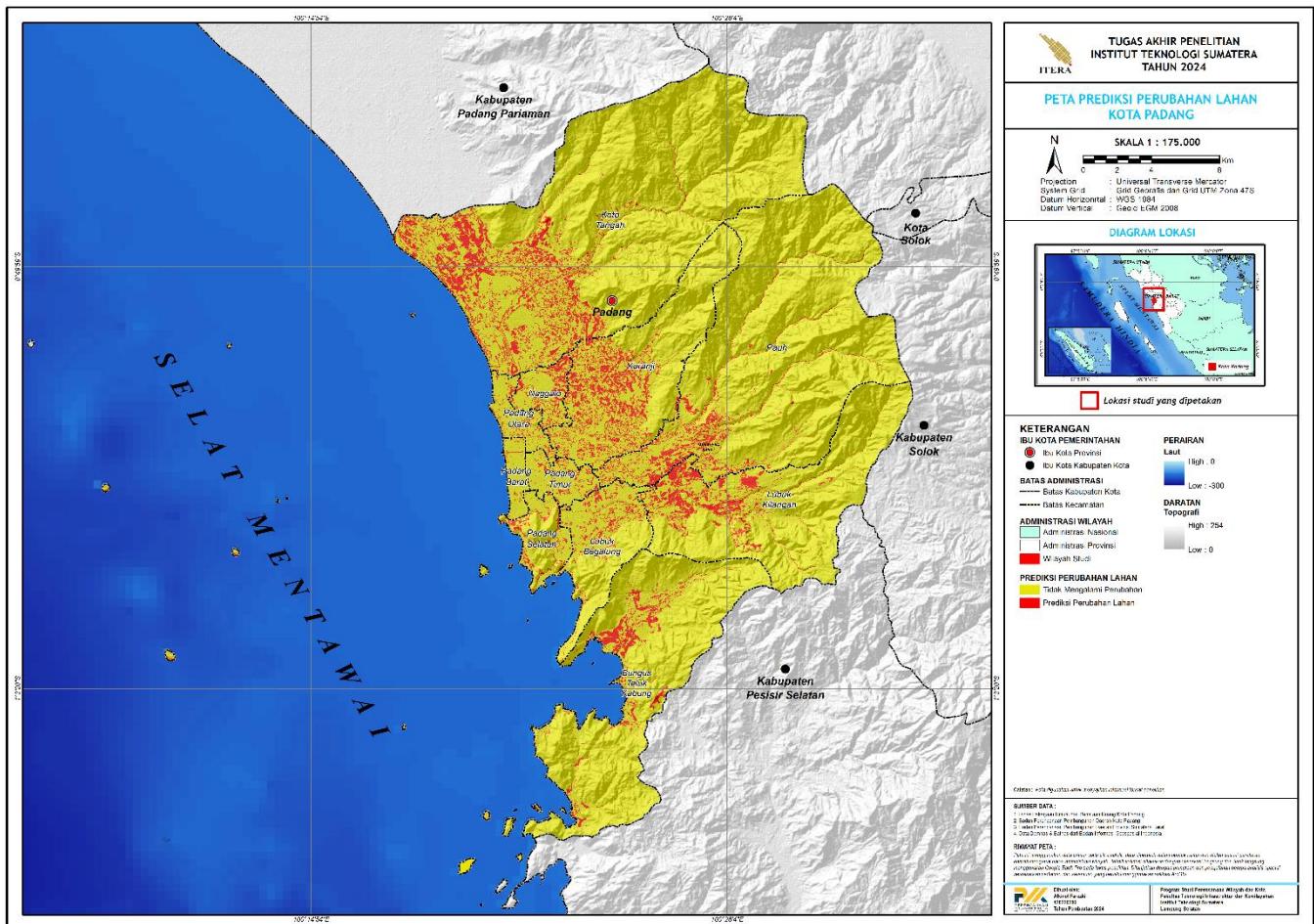
Change prediction merupakan langkah final setelah mengetahui model potensial transisi perubahan lahan, pada tahapan ini akan dipilih tahun prediksi untuk pemodelan tutupan lahan pada bagian *Change Demand Modeling*, dimana dalam membuat model perubahan lahan dengan analisis *Land Change Modeler* menggunakan metode *markov chain*. Setelah ditentukan tahun prediksi dan metode pemodelan maka tahapan selanjutnya adalah *change allocation* yang merupakan tahapan untuk menjalankan dan membuat model tutupan lahan. Berikut tampilan bagian *change allocation* dan *change demand modelling* pada tahapan *change prediction* yang sudah dilakukan.



Gambar 13 Tahapan *Change Prediction*

3.4. Model Perubahan dan Perkembangan Lahan

Prediksi perubahan lahan merupakan hasil pemodelan tutupan lahan tahun 2043 yang dibandingkan dengan tutupan lahan eksisting tahun 2023, untuk melihat perubahan per klasifikasi tutupan lahan di Kota Padang. Dalam prediksi perubahan lahan untuk membandingkan antara tutupan lahan prediksi tahun 2043 dengan tutupan lahan eksisting tahun 2023 dilakukan menggunakan teknik *overlay* di ArcGIS dalam melihat lahan yang diprediksi akan mengalami perubahan atau tetap pada masing-masing klasifikasi. Berikut hasil prediksi perubahan lahan berupa peta dan interpretasi luasan yang disajikan dalam bentuk tabel.



Gambar 14 Peta Prediksi Perubahan Lahan di Kota Padang Tahun 2043

Tabel 14 Confusion Matrix & Kappa Accuracy

		Tutupan Lahan Prediksi		
		P	LTB	LNT
Tutupan Lahan Eksisting	P	310,10	124,03	339,10
	LTB	31,00	9.165,90	1.295,57
	LNT	144,27	4.786,22	53.156,58

Keterangan:

P : Perairan

: Tidak Mengalami Perubahan

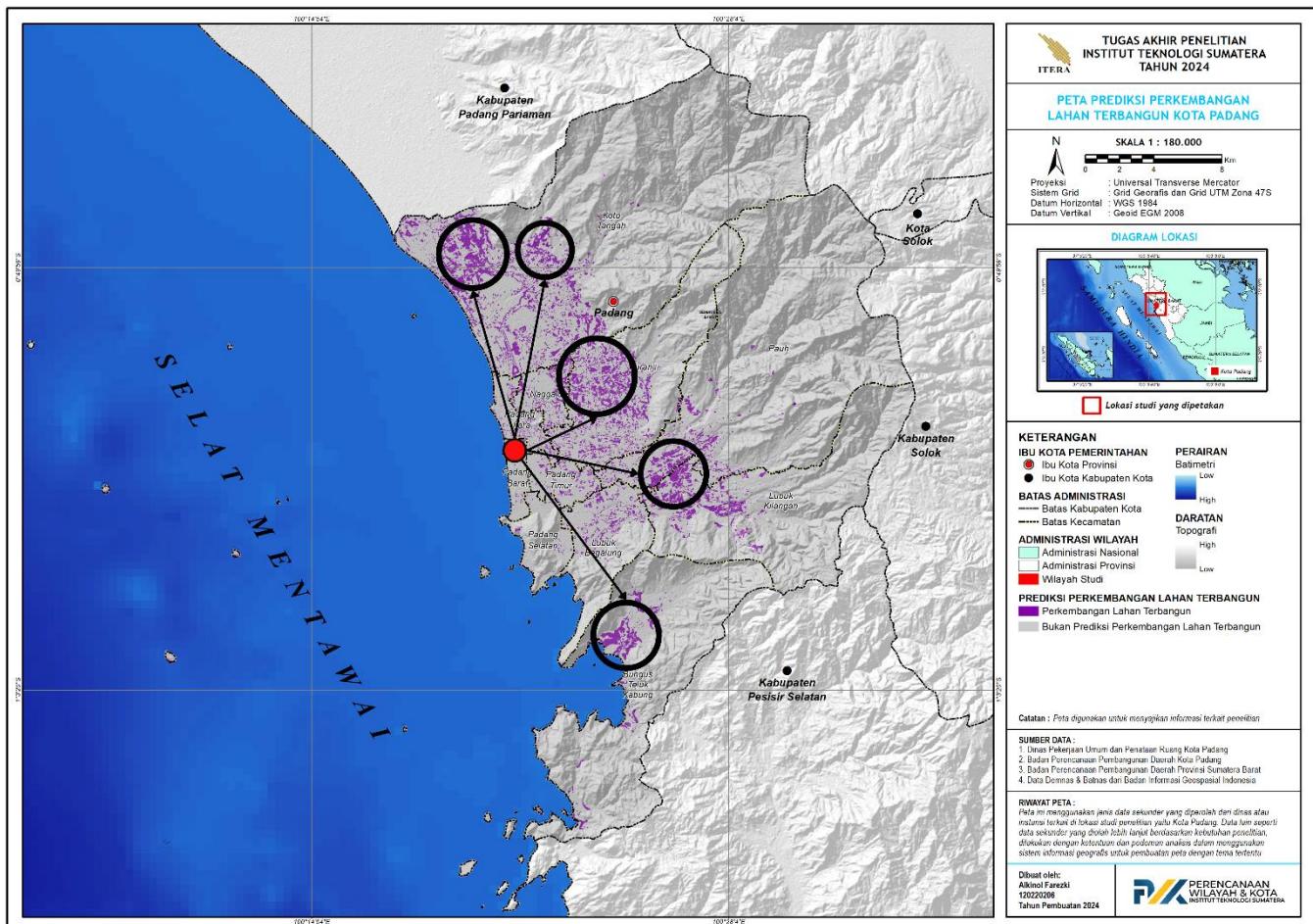
LTB : Lahan Terbangun

: Prediksi Lahan Mengalami Perubahan

LNB : Lahan Nonterbangun

Berdasarkan model prediksi perubahan lahan di Kota Padang dapat diketahui bahwasanya terjadi fenomena perkembangan lahan terbangun yang cukup signifikan pada wilayah studi Kota Padang. Prediksi perubahan lahan terbangun yang ditampilkan dengan peta, merupakan input data untuk melihat bentuk dan arah perkembangan lahan yang terjadi di Kota Padang, karena dari hasil prediksi perubahan lahan-kelas lahan terbangun merupakan kelas yang paling mengalami prediksi perubahan paling besar ke kelas lahan nonterbangun sebesar 4.786,22 Ha. Oleh karena itu, dari data tersebut dapat diketahui bahwasanya luasan distribusi prediksi perubahan lahan terbangun yang paling besar terjadi atau berubah ke lahan terbangun pada tahun 2023-2043 di Kota Padang

secara berturut-turut dari yang paling tinggi yaitu Kecamatan Koto Tangah, Kurangi, Lubuk Kilangan dan Pauh, dimana luasan lahan terbangun total yang diprediksi akan berkembang yaitu sekitar ±3.500 Ha, sementara beberapa kecamatan yang lain diprediksi mengalami perubahan masih di bawah <400 Ha, yaitu diantaranya ada Kecamatan Bungus Teluk Kabung, Nanggalo dan Lubuk Begalung, sedangkan Kecamatan Padang Barat, Kecamatan Padang Timur, Kecamatan Padang Utara dan Kecamatan Padang Selatan diprediksi mengalami perubahan lahan terbangun cenderung kecil yaitu hanya sebesar <100 Ha. Berikut ditampilkan peta bentuk dan arah perkembangan lahan terbangun di Kota Padang Tahun 2043.



Gambar 15 Peta Prediksi Perkembangan Lahan Terbangun di Kota Padang Tahun 2043

Berdasarkan peta perkembangan lahan terbangun di Kota Padang, dapat dilihat bahwasanya arah dan bentuk perkembangan lahan terbangun mulai berkembang dan mencirikan pada karakteristik atau fenomena suburbanisasi, dimana muncul dan tumbuh pusat-pusat permukiman baru di luar kawasan inti Kota Padang yang awalnya berada pada Kecamatan Padang Barat, Padang Selatan, Padang Timur dan Padang Utara. Oleh karena itu, dapat dilihat pula arah perkembangan lahan terbangun mengalami pergeseran ke kecamatan-kecamatan yang berada di bagian timur hingga utara Kota Padang, yaitu meliputi Kecamatan Koto Tangah, Kurangi, Pauh dan Lubuk Kilangan. Hal ini terjadi akibat dampak dari kebijakan spasial yang mempengaruhi masing-masing kecamatan dan kebijakan spasial yang ditetapkan merupakan input data pada pemodelan tutupan lahan yang telah dilakukan, sehingga prediksi perubahan lahan mampu menjadi indikasi sebagai skenario dalam menyikapi dan mengidentifikasi perkembangan lahan di Kota Padang menuju Kota Metropolitan tahun 2043.

4. Kesimpulan

Penelitian ini memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika perubahan dan perkembangan penggunaan lahan di Kota Padang melalui pendekatan Land Use-Transport Interaction dengan kerangka analisis

yang mengintegrasikan dimensi temporal dan spasial. Berdasarkan analisis multitemporal tahun 2013–2023, diketahui bahwa Kota Padang mengalami peningkatan signifikan lahan terbangun yang sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan intensifikasi aktivitas perkotaan. Perubahan tersebut menunjukkan adanya tekanan terhadap lahan non-terbangun yang berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan, tata ruang, dan transportasi apabila tidak dikelola secara terintegrasi.

Hasil analisis faktor pendorong perubahan lahan menunjukkan bahwa jaringan transportasi, kawasan transportasi, pusat pelayanan, kawasan strategis, dan pusat permukiman eksisting memiliki hubungan spasial yang kuat terhadap perubahan lahan terbangun. Hal ini menegaskan bahwa interaksi antara penggunaan lahan dan transportasi merupakan determinan utama dalam membentuk pola perkembangan kota. Simulasi perubahan dan perkembangan lahan hingga tahun 2043 memperlihatkan bahwa arah perkembangan Kota Padang cenderung menyebar ke wilayah timur dan utara kota, khususnya di Kecamatan Koto Tangah, Kuranji, Pauh, dan Lubuk Kilangan, yang mengindikasikan terjadinya proses suburbanisasi dan pergeseran pusat pertumbuhan dari kawasan inti kota.

Dengan demikian, pendekatan LUTI yang diimplementasikan melalui integrasi *Geospatial Multi-Criteria Analysis* dan *Land Change Modeler* terbukti mampu mengidentifikasi pola, arah dan potensi risiko perkembangan kota secara lebih dini. Model ini berfungsi sebagai basis analitis dan preventif dalam menyiapkan kebijakan pengendalian pemanfaatan ruang dan pengembangan sistem transportasi yang selaras. Temuan penelitian ini menegaskan pentingnya perencanaan kota yang berbasis integrasi penggunaan lahan dan transportasi sebagai fondasi dalam menyiapkan Kota Padang menuju kota metropolitan yang efisien, terstruktur, dan berkelanjutan pada tahun 2043.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih dan apresiasi yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota-Institut Teknologi Sumatera, atas bimbingan dan arahan akademik dari para dosen dalam proses penyusunan penelitian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang (PUPR) Kota Padang serta Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda) Kota Padang atas dukungan data dan informasi teknis yang sangat mendukung dalam proses analisis penelitian. Penulis berharap penelitian ini dapat menjadi rujukan awal dan dikembangkan lebih lanjut pada kota-kota lain di Indonesia sebagai bagian dari upaya membangun pendekatan dan tata kelola perkotaan yang lebih efektif, efisien, dan berkelanjutan berdasarkan pendekatan *Land Use-Transport Interaction* dalam menyiapkan perubahan dan perkembangan kota-kota di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Afuye, G. A., Nduku, L., Kalumba, A. M., Santos, C. A. G., Orimoloye, I. R., Ojeh, V. N., Thamaga, K. H., & Sibandze, P. (2024). Global trend assessment of land use and land cover changes: A systematic approach to future research development and planning. *Journal of King Saud University - Science*, 36(7). <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2024.103262>
- Alipour, D., & Dia, H. (2023). A Systematic Review of the Role of Land Use, Transport, and Energy-Environment Integration in Shaping Sustainable Cities. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086447>
- Black, J. (1981). Urban Transport Planning: Theory and Practice (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781351068604>
- Bousquet, M., Kuller, M., Lacroix, S., & Vanrolleghem, P. A. (2023). A critical review of multicriteria decision analysis practices in planning of urban green spaces and nature-based solutions. *Blue-Green Systems*, 5(2), 200–219. <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.132>
- BPS Provinsi Sumatera Barat. (2023). *Sumatera Barat Dalam Angka Tahun 2023*. Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Barat.
- Eastman, J. . (2017). TerrSet Geospatial Monitoring and Modeling System. *Clark University*.
- Jiang, H., & Eastman, J. R. (2000). Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, 14(2), 173–184. <https://doi.org/10.1080/136588100240903>
- Kilic, O. M., Ersayin, K., Gunal, H., Khalofah, A., & Alsubie, M. S. (2022). Combination of fuzzy-AHP and GIS techniques in land suitability assessment for wheat (*Triticum aestivum*) cultivation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(4), 2634–2644. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.12.050>
- Lopane, F. D., Kalantzi, E., Fermi, F., Chirico, F., Fiorello, D., & Batty, M. (2025). An integrated suite for strategic urban modelling: Long-term impact assessment of land use and infrastructure development. *Plos One*, 20(8 August), 1–23. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330067>
- Malik, I. I. (2022). Study on Population Growth of Big Cities in Sumatra Island. *Jurnal Arsitektur*, 12(2), 179. <https://doi.org/10.36448/ja.v12i2.2335>
- Meng, Y., Sing Wong, M., Kwan, M. P., Pearce, J., & Feng, Z. (2024). Assessing multi-spatial driving factors of urban land use transformation in megacities: a case study of Guangdong–Hong Kong–Macao Greater Bay Area from 2000 to 2018. *Geo-Spatial Information Science*, 27(4), 1090–1106. <https://doi.org/10.1080/10095020.2023.2255033>
- Natun, N. C. I., & Sumarlin. (2020). Supervised Dan Unsupervised Citra Satelit Landsat Untuk Pemetaan Penutupan Lahan. *Jurnal Manajemen*

- Informatika Jayakarta*, 5(2), 142–152.
- Ogunbode, T. O., Oyebamiji, V. O., Sanni, D. O., Akinwale, E. O., & Akinluyi, F. O. (2024). Environmental impacts of urban growth and land use changes in tropical cities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 6(January), 1–11. <https://doi.org/10.3389/frsc.2024.1481932>
- Permana, A. S., Perera, R., Aziz, N. A., & Ho, C. S. (2015). Creating the Synergy of Land Use, Transport, Energy and Environment Elements towards Climate Change Co-benefits. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 2(1), 17–28. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v2.n1.53>
- Permana, D. (2023). Spatial Planning Policy in the Control Aspect of Urban Area Development. *International Journal of Science and Society*, 5(2), 466–477. <https://doi.org/10.54783/ijsoc.v5i2.1089>
- Pyrohova, S., Nguyen, B. H., Rambaldi, A. N., Wohland, P., Bernard, A., Lieske, S., & Corcoran, J. (2025). An Integrated Land-Use, Population, and Transport Model for Strategic Regional Planning: From Research to Operational Practice. In *Applied Spatial Analysis and Policy* (Vol. 18, Issue 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s12061-025-09691-1>
- Sarri, P., Kaparias, I., Preston, J., & Simmonds, D. (2023). Using Land Use and Transportation Interaction (LUTI) models to determine land use effects from new vehicle transportation technologies; a regional scale of analysis. *Transport Policy*, 135(March), 91–111. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2023.03.012>
- Sukandarrumidi. (2012). *Metodologi Penelitian: Petunjuk Praktis Untuk Peneliti Pemula*. Gajah Mada University Press.
- Surya, B., Ahmad, D. N. A., Sakti, H. H., & Sahban, H. (2020). Land use change, spatial interaction, and sustainable development in the metropolitan urban areas, south Sulawesi province, Indonesia. *Land*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/land9030095>
- Wang, C., Wu, J., Li, M., Huang, X., Lei, C., & Wang, H. (2024). Evaluation of spatial conflicts of land use and its driving factors in arid and semiarid regions: A case study of Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 166(August), 112483. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112483>
- Waruwu, M., Puat, S. N., Utami, P. R., Yanti, E., & Rusydiana, M. (2025). Metode penelitian kuantitatif: Konsep, jenis, tahapan dan kelebihan. *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan*, 10(1), 917–932.
- Wegener, M., & Fürst, F. (1999). Land-Use Transport Interaction: State of the Art. In *Institut Fur Raumplanung*.
- Winarso, H. (Ed.). (2006). *Metropolitan di Indonesia: kenyataan dan tantangan dalam penataan ruang*. Direktorat Jenderal Penataan Ruang, Departemen Pekerjaan Umum.