

Pendekatan Spasial Cellular Automata-Markov Chain Untuk Prediksi Tutupan Lahan Dan Analisis Bahaya Banjir

Bayu Muhammad Nabiil Makarim^{1*}, Laju Gandharum², Dan Ilham Badaruddin Mataburu¹

¹Program Studi Geografi, Fakultas Ilmu Sosial dan Hukum, Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, Indonesia

²Pusat Riset Geoinformatika, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail: bayu_1411622060@mhs.unj.ac.id

Received: 18 01 2025 / Accepted: 28 06 2025 / Published online: 24 07 2025

ABSTRAK

Perubahan tutupan lahan merupakan isu lingkungan yang penting karena mempengaruhi siklus hidrologi dan meningkatkan risiko terjadinya bencana banjir, terutama di kawasan perkotaan yang mengalami urbanisasi cepat. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi perubahan tutupan lahan dan mengukur dampaknya terhadap bahaya banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta pada tahun 2030 dan 2040. Metode yang digunakan adalah kombinasi *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC) untuk memprediksi perubahan tutupan lahan, dan metode *flood inundation* untuk analisis bahaya banjir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada periode 2020-2030, luas daerah dengan bahaya banjir tertinggi bertambah sebesar 3,42 hektar, sedangkan pada periode 2030-2040 bertambah sebesar 1,35 hektar. Peningkatan bahaya banjir ini terutama disebabkan oleh deforestasi yang signifikan. Pada periode 2020-2030, deforestasi hutan menjadi lahan terbangun dan lahan pertanian mencapai 29.530,89 hektar dan 6.224,76 hektar, sedangkan pada periode 2030-2040, deforestasi hutan menjadi lahan terbangun dan lahan pertanian sebesar 25.109,73 hektar dan 8.651,16 hektar. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa deforestasi yang terus berlanjut mengurangi kekasaran permukaan lahan, sehingga memperluas daerah bahaya banjir. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan untuk mengurangi dampak negatif terhadap bahaya bencana banjir di masa mendatang.

Kata Kunci: Perubahan tutupan lahan, *Cellular Automata-Markov Chain*, Banjir, Deforestasi, Metropolitan Surakarta.

ABSTRACT

Land cover change is an important environmental issue because it affects the hydrological cycle and increases the risk of flooding, especially in urban areas experiencing rapid urbanization. This study aims to predict land cover change and measure its impact on flood hazard in the Surakarta Metropolitan Area in 2030 and 2040. The method used is a combination of Cellular Automata-Markov Chain (CA-MC) to predict land cover change and flood hazard analysis methods. The results of the study show that in the 2020-2030 period, the area with the highest flood hazard increased by 3.42 hectares, while in the 2030-2040 period it increased by 1.35 hectares. This increase in flood hazard is mainly due to significant deforestation. In the period 2020-2030, deforestation of forests into built-up land and agricultural land reached 29,530.89 hectares and 6,224.76 hectares, while in the period 2030-2040, deforestation of forests into built-up land and agricultural land amounted to 25,109.73 hectares and 8,651.16 hectares. The conclusion of this study is that continued deforestation reduces the

roughness of the land surface, thereby expanding the flood hazard area. Therefore, a more sustainable land management policy is needed to reduce the negative impact on the danger of flood disasters in the future.

Keywords: *Land Cover Change, Cellular Automata-Markov Chain, Flooding, Deforestation, Surakarta Metropolitan*

PENDAHULUAN

Perubahan tutupan lahan menjadi isu penting nasional dan internasional karena banyaknya ancaman dari kerusakan lingkungan akibat perubahan lahan yang tak terkendali (Koko et al., 2020). Perubahan tutupan lahan dipicu oleh kompleksitas faktor fisik, sosial, politik, ekonomi, dan biologi dalam ruang dan waktu yang sama (Wu et al., 2008). Di perkotaan, pertumbuhan penduduk yang cepat memicu urbanisasi, yang secara signifikan mengubah pola tutupan lahan dan mengalihkan lahan vegetasi ke penggunaan lain (Karimi et al., 2018). Perubahan tutupan lahan yang terus berlanjut bisa memicu deforestasi, menimbulkan masalah lingkungan, dan mengganggu stabilitas ekosistem. (Liping et al., 2018). Menurut Radianti et al. (2003), daratan tidak akan berubah bilamana tidak terjadinya perluasan daerah perkotaan. Oleh karena itu, diperlukan tata kelola lahan yang berkelanjutan terutama di kawasan perkotaan.

Perubahan tutupan lahan sangat berpengaruh dalam siklus hidrologi. Menurut Noori et al. (2016), Perubahan tutupan lahan berdampak negatif pada siklus hidrologi, memengaruhi puncak banjir, infiltrasi, evapotranspirasi, pengangkutan sedimen, kualitas air, pengisian air tanah, dan limpasan permukaan. Misalnya, deforestasi yang menggunduli hutan meningkatkan aliran permukaan dan sungai karena menurunnya evapotranspirasi (Adnan & Atkinson, 2011). Konsekuensi dari fenomena ini adalah waktu untuk mencapai puncak banjir akan semakin berkurang sehingga laju debit air meningkat dan menyebabkan

bertambahnya kejadian banjir. Noori et al. (2016), menyatakan bahwa ketika laju curah hujan yang sangat tinggi melebihi kapasitas infiltrasi tanah sehingga permukaan tanah melimpaskan air seperti permukaan kedap air.

Banjir terjadi secara natural ketika muncul kebetulan acak yang dipengaruhi oleh beberapa faktor iklim, walaupun tidak menutup kemungkinan bahwa pengolahan daerah aliran sungai yang dilakukan oleh manusia berpengaruh dalam menentukan tingkat keparahan banjir. Tingkat bahaya dari banjir dipengaruhi oleh kemampuan banjir untuk menyebabkan kerugian bagi manusia dan risiko banjir menunjukkan kemungkinan terjadinya banjir (Sinnakaudan et al., 2003).

Mengingat perubahan tutupan lahan yang berpengaruh besar terhadap terjadinya banjir. Perlu dilakukan pengawasan dan pengaturan terhadap perubahan tutupan lahan yang ada. Salah satu cara untuk mengawasi dan mengatur perubahan tutupan lahan adalah dengan membuat rencana yang berkualitas sehingga dapat menganalisa komponen-komponen yang saling berkaitan untuk membuat kebijakan yang tepat (Radianti et al., 2003). Diperlukan pemahaman tentang pola perubahan tutupan lahan dengan adanya informasi yang menangkap perubahan aktivitas manusia pada permukaan bumi secara sistematis dan terukur (Wulder et al., 2019).

Pengindraan jauh adalah teknik dan alat yang dapat mengetahui perubahan antropogenik (Hemati et al., 2021). Penggunaan pengindraan jauh merupakan salah satu cara yang efisien untuk

mengetahui perubahan tutupan lahan dengan periode tertentu karena penginderaan jauh memiliki data yang berkelanjutan (Andualem et al., 2018). Sistem penginderaan jauh juga menyediakan data dengan jangka waktu yang lebih luas dengan lebih cepat dan terjangkau dibandingkan dengan metode survei lapangan secara langsung (Huang et al., 2020).

Dengan diketahuinya perubahan lahan yang ada, dapat dilakukan usaha untuk memprediksi lahan di masa depan. Menurut Khawaldah et al. (2020), pemodelan prediksi perubahan tutupan lahan merupakan metode yang tepat untuk mengetahui kedinamisan tutupan lahan serta mengevaluasi kebijakan keruangan sebelumnya. Salah satu metode analisis prediksi perubahan lahan yang paling universal adalah *Cellular Automata* dan *Markov Chain* (CA-MC) yang dapat memprediksi dalam jangka pendek atau panjang disertai dengan berbagai macam skenario yang ada (Supriatna et al., 2022). Menurut Gidey et al. (2017), CA-MC memproduksi pola spasial yang bagus dibandingkan metode lain seperti *Clue-S*, *GeoMoD*, dan *Markov Chain*. Banyak penelitian di seluruh dunia memakai metode ini sebagai alat untuk menganalisis prediksi perubahan lahan seperti di Beijing (Huang et al., 2020), Warangal (Aneesha Satya et al., 2020), dan Ghana (Awotwi et al., 2018).

Analisis prediksi perubahan tutupan lahan dapat digunakan untuk memprediksi tingkat bahaya banjir di masa depan menggunakan metode *flood inundation* (Rakuasa et al., 2023; Sugandhi et al., 2023). *Flood inundation* merupakan metode modifikasi dari *tsunami inundation* yang dikembangkan oleh Berryman (2006) dengan memanfaatkan data *Digital Elevation Model* (DEM) tinggi genangan tsunami, dan tutupan lahan sebagai parameter pengubah.

Kawasan metropolitan Surakarta adalah salah satu kawasan perkotaan yang memiliki area urban yang melebar ke di segala arah (Mardiansjah et al., 2018). Kota Surakarta yang memiliki kapasitas luas terbatas membuat laju urbanisasi melebar ke daerah sekitar kota. Di sisi lain, Kota Surakarta terletak di daerah cekungan dan bersinggungan langsung dengan Sungai Bengawan Solo menyebabkan rawan terjadinya kejadian banjir (Pramitha et al., 2020). Dengan tingkat urbanisasi yang cukup tinggi di Kawasan Metropolitan Surakarta, menandakan terjadinya perubahan lahan yang berpotensi meningkatkan risiko terjadinya banjir. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis lebih mendalam tentang pengaruh perubahan tutupan lahan di masa depan terhadap analisis bahaya banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji dinamika urbanisasi dan risiko banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta dari berbagai sudut pandang. Studi oleh Mardiansjah et al. (2018) secara mendalam menganalisis pola pertumbuhan penduduk dan distribusi spasial kawasan perkotaan pada periode 1990-2010. Penelitian tersebut mengungkap bahwa proses metropolitanisasi di Surakarta menghasilkan perkembangan perkotaan yang melebar dan terfragmentasi ke kabupaten sekitar akibat keterbatasan lahan di kota inti. Analisis historis ini diperkuat oleh Pradoto et al. (2024) yang meneliti transformasi ekonomi pada periode 2000-2020 di kawasan peri-urban Sukoharjo, yang menunjukkan adanya perubahan karakteristik dari perdesaan menjadi perkotaan yang ditandai oleh perubahan mata pencaharian, penggunaan lahan pertanian, dan investasi daerah. Meskipun kedua studi tersebut berhasil memetakan pola dan pemicu perubahan di masa lalu, fokusnya masih bersifat deskriptif dan belum menggunakan model

prediktif untuk mensimulasikan perubahan tutupan lahan di masa depan serta dampaknya terhadap aspek lingkungan.

Di sisi lain, penelitian yang berfokus pada banjir juga telah dilakukan. Sulaeman et al. (2017) menganalisis genangan banjir akibat luapan Bengawan Solo dengan menggunakan model hidraulik 1D/2D HEC-RAS untuk berbagai kala ulang debit, namun lokasinya berada di Kabupaten Bojonegoro, bukan di Kawasan Metropolitan Surakarta. Sementara itu, Anna et al. (2021) telah melakukan pemodelan spasial banjir lokal khusus di wilayah Kota Surakarta menggunakan metode modifikasi rasional berdasarkan skenario intensitas curah hujan yang berbeda. Akan tetapi, pemodelan yang dilakukan oleh Anna et al. (2021) masih didasarkan pada kondisi tutupan lahan dan kapasitas drainase yang statis (saat ini), dan belum mengintegrasikan faktor dinamika perubahan tutupan lahan di masa depan sebagai variabel kunci yang memengaruhi risiko banjir.

Oleh karena itu, penelitian ini mengisi celah krusial dengan mengintegrasikan kedua domain tersebut. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, studi ini tidak hanya menganalisis perubahan tutupan lahan secara historis, tetapi juga secara spesifik menggunakan pendekatan *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC) untuk memprediksi kondisi tutupan lahan di masa depan (tahun 2030 dan 2040) di seluruh Kawasan Metropolitan Surakarta. Untuk itu, tujuan dari penelitian untuk memprediksi perubahan tutupan lahan dan mengukur dampaknya terhadap bahaya banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta pada tahun 2030 dan 2040. Selanjutnya, hasil prediksi tersebut digunakan untuk menganalisis secara langsung bagaimana perubahan tutupan lahan akan berdampak pada perluasan bahaya banjir, suatu keterkaitan yang belum dianalisis secara

prediktif dalam studi-studi sebelumnya di wilayah ini.

METODE PENELITIAN

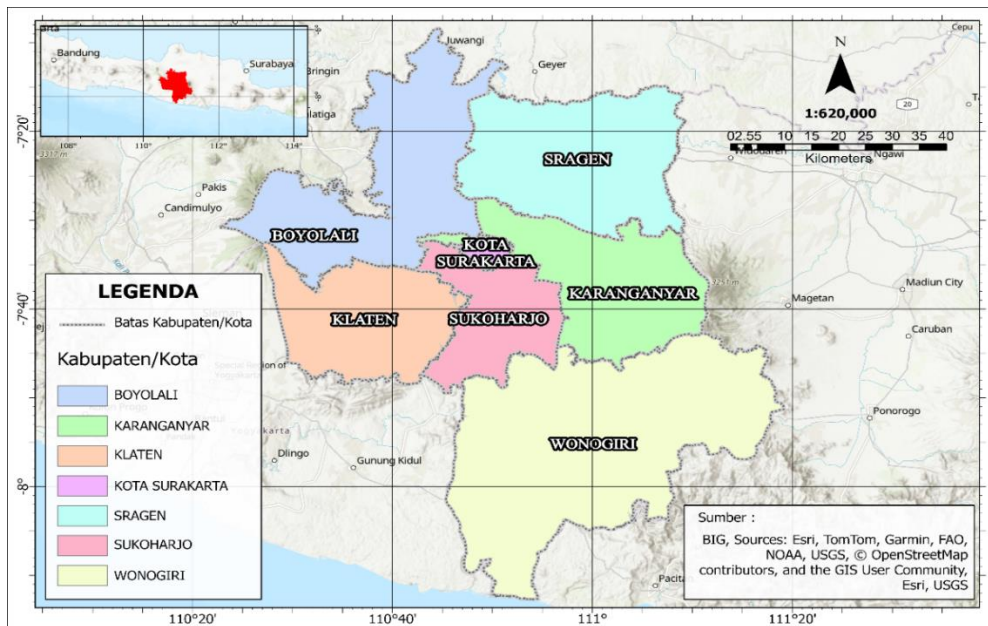
Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Kawasan Metropolitan Surakarta yang mencakup Kota Surakarta dan kabupaten di sekitarnya, yaitu Kabupaten Boyolali, Karanganyar, Klaten, Sragen, Sukoharjo, dan Wonogiri (Gambar 1). Lokasi ini dipilih karena memiliki kombinasi karakteristik fisik yang rentan dan dinamika sosial-ekonomi yang pesat, sehingga menjadi kasus yang krusial untuk diteliti. Secara fisik, wilayah Metropolitan Surakarta berada di zona depresi atau cekungan yang merupakan dataran banjir alami dari Sungai Bengawan Solo, sehingga secara alami rentan terhadap genangan. Kerentanan ini diperparah oleh dinamika sosial, di mana luas administrasi Kota Surakarta yang terbatas mendorong proses urbanisasi dan pertumbuhan penduduk meluas secara masif ke kabupaten-kabupaten di sekitarnya. Data menunjukkan bahwa antara tahun 1980 hingga 2010, jumlah penduduk perkotaan di kawasan metropolitan ini meningkat hampir tiga kali lipat, dari sekitar 1,08 juta jiwa menjadi 3,08 juta jiwa. Pertumbuhan ini sangat terkonsentrasi di kawasan pinggiran yang mengalami penambahan sebesar 1,97 juta jiwa, sementara Kota Surakarta sebagai inti hanya bertambah 31.110 jiwa pada periode yang sama.

Perluasan kawasan perkotaan yang pesat ini memicu konversi lahan vegetasi menjadi lahan terbangun, sebuah kondisi yang berpotensi besar meningkatkan risiko dan memperluas bahaya banjir. Selain urgensi tersebut, Kawasan Metropolitan Surakarta juga merupakan wilayah dengan tingkat metropolitanisasi sedang yang lebih jarang dibahas dibandingkan kota-kota metropolitan besar di Jawa seperti Jakarta (Fata Robbany et al., 2019; Indraprahasta & Derudder, 2019; Martinez

& Masron, 2020; Pratama et al., 2022; Rustiadi et al., 2021) dan Bandung (Fuadina et al., 2020; Rustiadi et al., 2021),

menjadikannya relevan untuk dianalisis lebih lanjut.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data yang digunakan tercantum pada Tabel 1. Data DEMNAS digunakan untuk menentukan kemiringan lahan (*slope*), yang merupakan salah satu faktor penting dalam analisis geospasial. Jaringan jalan dan pemukiman berfungsi sebagai faktor penggerak utama dalam model prediksi perubahan tutupan lahan, karena sering memicu perubahan lahan menjadi kawasan terbangun. Data tinggi maksimum genangan banjir dimanfaatkan untuk analisis risiko banjir serta potensi dampaknya pada area terdampak Sementara itu, tutupan lahan tahun 2000, 2010, dan 2020 digunakan untuk menganalisis perubahan dan memprediksi pola tutupan lahan di masa depan.

Penelitian ini menggunakan data tutupan lahan *Global Land Cover* (GlobeLand30). Data ini diproduksi oleh kementerian sains dan teknologi China dengan menggabungkan citra multispektral Landsat dengan citra *Chinese Environmental Disaster Allevation Satellite* (HJ-1) untuk menentukan persebaran tutupan lahan di

seluruh dunia dengan resolusi 30 meter (NGCC, 2014). Penggunaan GlobeLand30 dirasa penting mengingat tingkat akurasi keseluruhan dari *image classification* dalam penentuan tutupan lahan mencapai angka 83.51%, dan *Kappa Index of Agreement* (KIA) mencapai 0.78 dengan menggunakan lebih dari 150.000 sampel. GlobeLand30 menggunakan metode *Pixel-Object-Knowledge* (POK) dengan tiga tahapan. Tahapan pertama yaitu pengklasifikasian piksel menggunakan beberapa metode seperti *Maximum Likelihood Classifier* (MLC), *Support Vector Machine* (SVM), *threshold value*, dan lain lain. Kedua, dilakukan perhitungan rasio jumlah piksel dari objek yang tersegmentasi menggunakan metode *threshold value*. Ketiga, dilakukan verifikasi dan validasi berbasis komputer dan manusia untuk menghilangkan kesalahan klasifikasi piksel. Penelitian ini menggunakan data GlobeLand30 pada tahun 2000, 2010, dan 2020 sebagai bahan utama dalam memprediksi tutupan lahan.

Tabel 1. Data yang digunakan

No	Jenis Data	Perekaman Data	Sumber Data
1	DEMNAS	N/A	(Badan Informasi Geospasial, 2018)
2	Jaringan Jalan	2019	(Badan Informasi Geospasial, 2019)
3	Pemukiman	2019	((BPBD, 2020))
4	Tinggi Maksimum Genangan Banjir	1966	((BPBD, 2020))
5	Tutupan Lahan	2000, 2010, 2020	(GlobeLand30, UNEP/GRIZD-Geneva metadata catalogue)

Analisis Data

Analisis data yang dilakukan pada penelitian ini dibagi menjadi 4 tahap. tahap pertama adalah deteksi perubahan lahan menggunakan metode *Post-Classification Comparison* (PCC) dengan *Land Change Modeler* (LCM) pada *software* Terrset2020. Tahap kedua yaitu *scoring* dan *fuzzifying* pada setiap *driving factor*. Tahap ketiga yaitu prediksi perubahan lahan menggunakan metode *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC). Tahap keempat yaitu penentuan bahaya bencana banjir berdasarkan hasil prediksi perubahan tutupan lahan pada tahapan sebelumnya menggunakan metode *flood inundation*.

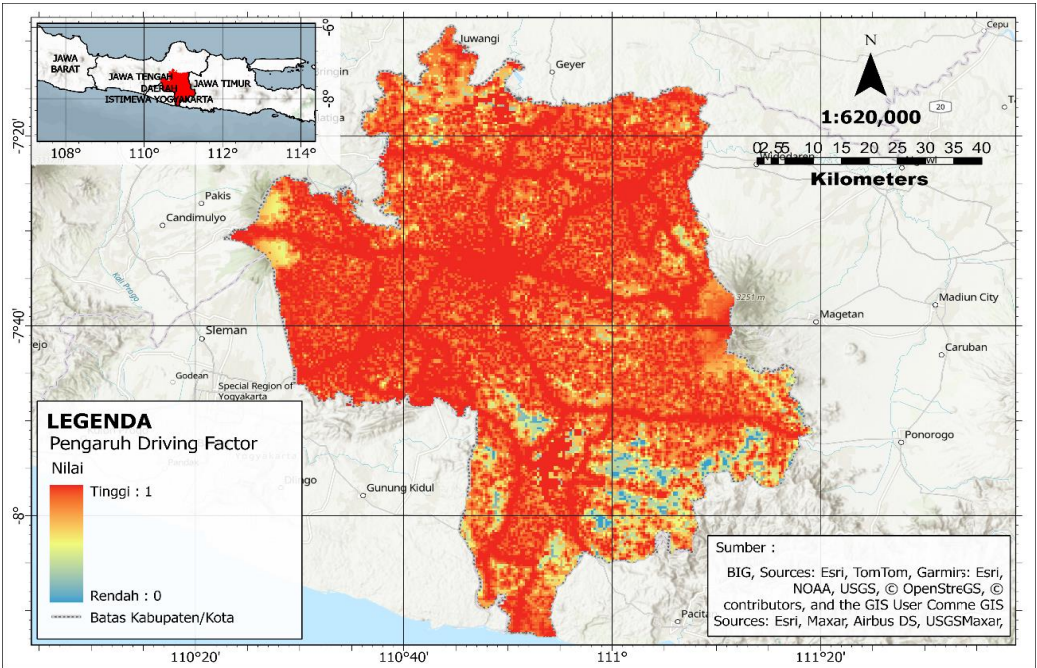
Deteksi Perubahan Tutupan Lahan

Analisis ini menggunakan metode *Post-Classification Comparison* (PCC) yang biasa digunakan dalam studi perencanaan perkotaan dan lingkungan (Hardin et al., 2007). Metode PCC membandingkan dua data klasifikasi lahan dengan cara *overlay* sehingga diperoleh kelas tutupan lahan yang berubah dalam rentang waktu dua data tersebut (Bunyangha et al., 2021; Kiggundu et al., 2018). Hasil teknik *overlay* ini berupa matriks tabulasi silang antar dua kelas tutupan lahan dari data klasifikasi lahan dengan waktu yang berbeda. Matriks tabulasi silang selanjutnya akan diolah menggunakan LCM sehingga diperoleh

luas tutupan lahan yang berubah dan bertambah/berkurangnya tiap kelas dari tutupan lahan. Terdapat tiga periode dalam deteksi perubahan tutupan lahan: periode pertama (2000-2010), periode kedua (2010-2020), dan periode ketiga (2000-2020). Deteksi ini dilakukan untuk mengetahui perubahan tutupan lahan yang paling mempengaruhi perluasan kawasan bahaya banjir. Penelitian ini mengidentifikasi enam kelas lahan, yaitu lahan terbuka, lahan terbangun, pertanian, hutan, semak belukar, dan badan air.

Penentuan Driving Factor

Faktor yang mempengaruhi perubahan tutupan lahan meliputi jarak dari jaringan jalan, sungai, pemukiman, dan kemiringan lahan. Setiap faktor berkontribusi pada pola perubahan tutupan lahan. Pemukiman berkembang sepanjang jaringan jalan, sehingga semakin dekat dengan jalan, semakin tinggi potensi perubahan menjadi lahan terbangun (Akbar & Supriatna, 2019). Dengan begitu setiap *driving factor* memiliki nilai skor yang tertera pada Tabel 2. Setelah dilakukan proses skoring, setiap faktor dikonversikan dengan menggunakan *fuzzy membership* kemudian dilakukan proses penggabungan menggunakan *fuzzy overlay*. Hasil dari fuzzifikasi akan menunjukkan rentang nilai dari 0-1 (Gambar 2).



Gambar 2. Hasil overlay driving factor

Tabel 2. Skor Driving Factor

Variabel	Kelas	Skor	Sumber Data
Jarak dari Jalan (m)	0-100	5	(Akbar & Supriatna, 2019)
	100-200	4	
	200-500	3	
	500-1000	2	
	>1000	1	
Jarak dari sungai (m)	0-25	1	(Akbar & Supriatna, 2019)
	25-50	2	
	>50	3	
Jarak dari pemukiman (m)	0-100	4	(R. Yudarwati, 2017)
	100-500	3	
	500-1000	2	
	>1000	1	
Kemiringan lahan	0-2	4	(Akbar & Supriatna, 2019)
	3-15	3	
	16-40	2	
	>40	1	

Prediksi Perubahan Tutupan Lahan

Prediksi tutupan lahan dilakukan menggunakan metode *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC) dengan bantuan perangkat lunak IDRISI-Terrset untuk tahun 2030 dan 2040. Pemodelan *Markov* merupakan model yang memperkirakan

perubahan suatu kelas ke kelas yang lain berdasarkan tutupan lahan dengan periode yang berbeda (Al-sharif & Pradhan, 2014). Luaran dari pemodelan *Markov* adalah probabilitas dari transisi tiap kelas tutupan lahan (Adhikari & Southworth, 2012). Perubahan tutupan lahan bergantung dari

tutupan lahan awal dan perhitungan matematika yang diadopsi oleh Subedi et al. (2013) (Persamaan 1, 2, dan 3).

$$L_{(x+1)} = P_{ij} \times L_{(x)} \dots\dots\dots(1)$$

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{2n} \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

$$(0 \leq P_{ij} \leq 1 \text{ and } \sum_{j=1}^n P_{ij} = 1, (i, j = 1, 2, 3 \dots n) \dots\dots(3)$$

dimana

$L_{(x+1)}$ = Prediksi tutupan lahan

P_{ij} = Probabilitas transisi

x = Waktu sebelum prediksi

$(x + 1)$ = Waktu sesudah prediksi

i = Probabilitas tutupan lahan dalam piksel

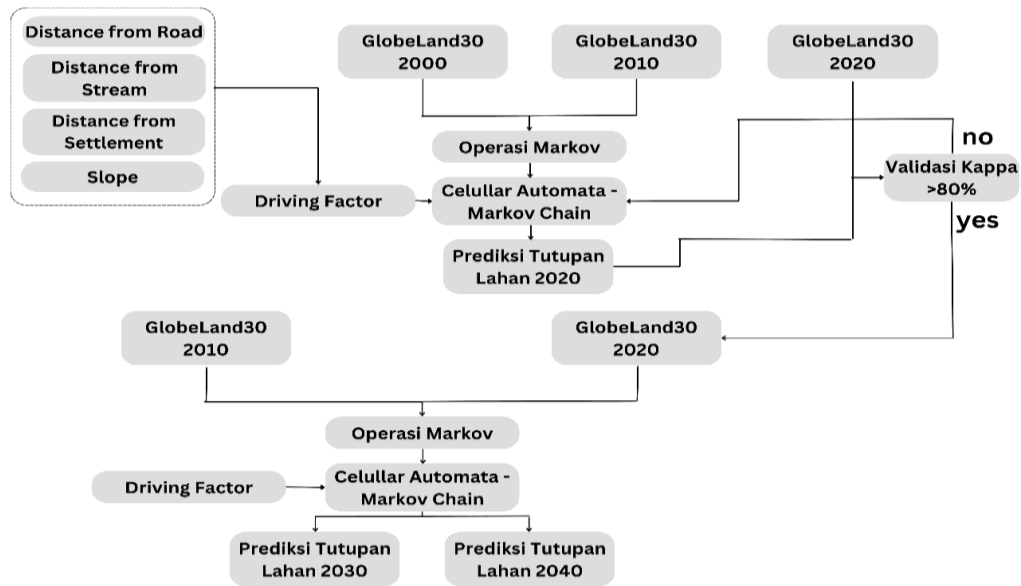
j = Tutupan lahan dalam piksel

Prediksi perubahan lahan yang bersifat dinamis dipengaruhi dengan probabilitas matriks transisi pada *Markov* model. Namun, model ini tidak memiliki fitur spasial sehingga tidak mempertimbangkan distribusi spasial dari kelas tutupan lahan. Oleh karena itu, metode CA-MC menambahkan fitur spasial dengan menggunakan *Cellular Automata* untuk membentuk faktor pembobot berbasis spasial dan mengubah nilai piksel sesuai dengan nilai piksel yang berdekatan berdasarkan matriks transisi (Halmy et al., 2015). Algoritma CA-MC melakukan analisis berbasis spasial dan temporal guna menganalisis perubahan tutupan yang dinamis pada pola ruang dan waktu dan mensimulasikan skenario di masa depan (Vázquez-Quintero et al., 2016).

Gambar 3 memperlihatkan metode *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC) yang digunakan pada penelitian ini digunakan untuk memodelkan perubahan lahan pada tahun 2000-2010 (periode 1), 2010-2020 (periode 2), dan 2000-2020 (periode 3). Metode ini dilakukan untuk mengetahui *Transition Probability Matrix*

(TPM), *Transition Area Matrix* (TAM), dan *Transition Suitability Maps* (TSM). Matriks TPM merupakan probabilitas hasil dari tabulasi silang antar citra dengan waktu yang berbeda dan diperoleh dari operasi *markov* (Supriatna et al., 2022). Matriks TPM berisikan probabilitas tiap kelas tutupan lahan yang berpotensi berubah ke kelas tutupan lahan lainnya (Koko et al., 2020). Matriks TAM berisi estimasi jumlah piksel yang kemungkinan akan berubah dalam rentang waktu tertentu, dari satu kelas tutupan lahan tertentu ke kelas tutupan lahan lainnya, berdasarkan analisis tren dan faktor penggerak yang mempengaruhi perubahan tersebut. (Ghosh et al., 2017). Sedangkan TSM adalah peta peluang atau potensi terjadinya perubahan lahan di masa depan. Matriks TPM awal diperoleh dari perubahan tutupan lahan dari tahun 2000 hingga 2010. Operasi CA-MC dilakukan dengan menyertakan *driving factor* yang relevan untuk memperoleh TSM tutupan lahan tahun 2020 secara lebih akurat. Setelah itu, perlu dilakukan proses validasi yang cermat antara TSM tutupan lahan tahun 2020 dengan kondisi tutupan lahan yang sesungguhnya, menggunakan data aktual dari tahun 2020 untuk memastikan konsistensi dan keandalan hasil yang diperoleh.

Indikator indeks statistik kappa digunakan untuk mengetahui tingkat validasi antara kedua peta. Jika nilai kappa berada di atas 70% maka model prediksi perubahan tutupan lahan memiliki tingkat akurasi yang tinggi (Guo et al., 2020). Dengan diperolehnya tingkat akurasi yang tinggi, maka dapat dilakukan prediksi perubahan tutupan lahan untuk tahun 2030 dan 2040 dengan menggunakan perbandingan tutupan lahan pada tahun 2010 dan 2020.



Gambar 3. Diagram alir penelitian dari prediksi tutupan lahan

Pemetaan Bahaya Bencana Banjir

Pemetaan bahaya bencana banjir dilakukan dengan menggunakan data DEMNAS dengan resolusi 5 meter untuk mengetahui parameter kemiringan lereng dan jaringan sungai, data tutupan lahan guna mengetahui tingkat kekasaran permukaan (Tabel 3), dan data ketinggian maksimum genangan banjir yang diperoleh dari kejadian yang pernah terjadi di masa lampau (historis). Dengan begitu penelitian ini akan menganalisis bahaya banjir yang dipengaruhi dengan perubahan tutupan lahan pada tahun 2020, 2030, dan 2040. Dengan begitu tingkat kekasaran lahan pada setiap waktu akan berbeda.

Tabel 3. Koefisien kekasaran permukaan

Jenis Tutupan Lahan	Nilai Koefisien Kekasaran
Badan Air	0,007
Semak Belukar	0,047
Hutan	0,070
Kebun/Perkebunan	0,035
Lahan	0,015
Kosong/Terbuka	
Lahan Pertanian	0,025
Lahan Terbangun	0,045
Mangrove	0,025

Sumber: (Rakuasa et al., 2022)

Analisis bahaya banjir dilakukan menggunakan metode *flood inundation*. Metode ini telah digunakan oleh Sugandhi et al. (2023) dan Rakuasa et al. (2023). Metode ini diterapkan untuk memodelkan bencana banjir dengan cara mengidentifikasi penurunan limpasan genangan banjir setiap 1 meter, berdasarkan parameter seperti koefisien kekasaran permukaan dan jarak terhadap kemiringan di sekitar sungai. Tahapan metode ini dapat dilihat pada Gambar 4. Persamaan 4 yang digunakan dalam metode ini untuk menghitung pengurangan genangan banjir adalah sebagai berikut:

$$H_{Loss} = \left(\frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \dots\dots\dots (4)$$

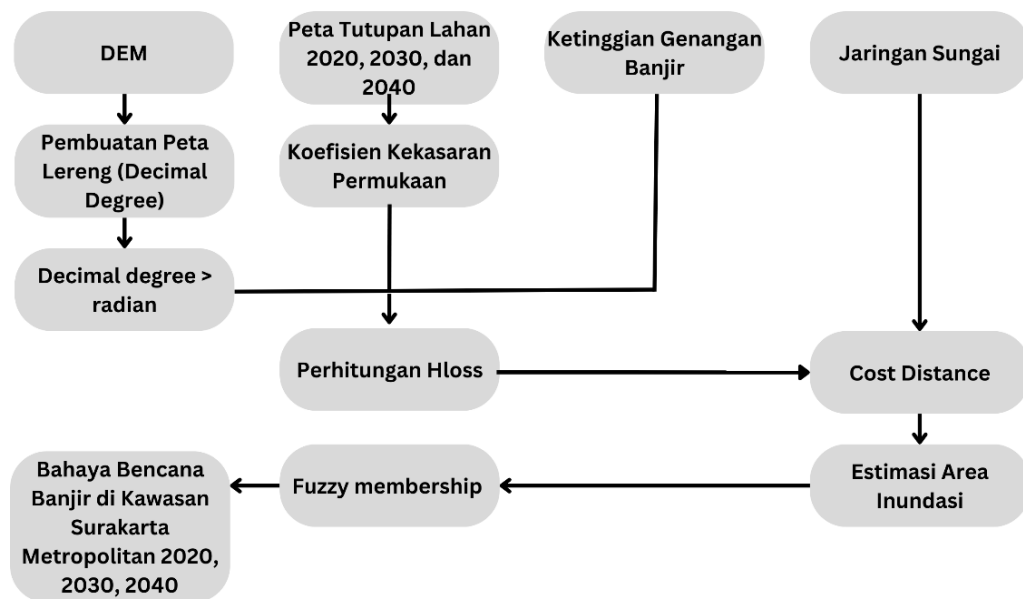
dimana

H_{Loss} = Kehilangan ketinggian banjir setiap 1 meter jarak inundasi

n = Koefisien kekasaran permukaan

H_0 = Ketinggian genangan dari sungai & saluran (m)

S = Waktu sesudah prediksi



Gambar 4. Diagram alir penelitian dari analisis bahaya banjir

HASIL DAN PEMBAHASAN

Deteksi Perubahan Tutupan Lahan

Setelah observasi perubahan tutupan lahan selama 2000-2010 (periode 1), 2010-2020 (periode 2), dan 2000-2020 (periode 3), terlihat bahwa tutupan lahan terbangun dan lahan pertanian terus meluas dalam tiga dekade. Sebaliknya, tutupan hutan, semak belukar, dan badan air menurun setiap 10 tahun. Gambar 5 menunjukkan distribusi spasial tutupan lahan pada tahun 2000, 2010, dan 2020. Luas area dari setiap kelas tutupan lahan berbeda tiap tahunnya. Tabel 4 menampilkan luas area tiap tutupan lahan dan perubahan area tiap periode, sementara Tabel 5 menunjukkan perubahan tutupan lahan pada masing-masing periode.

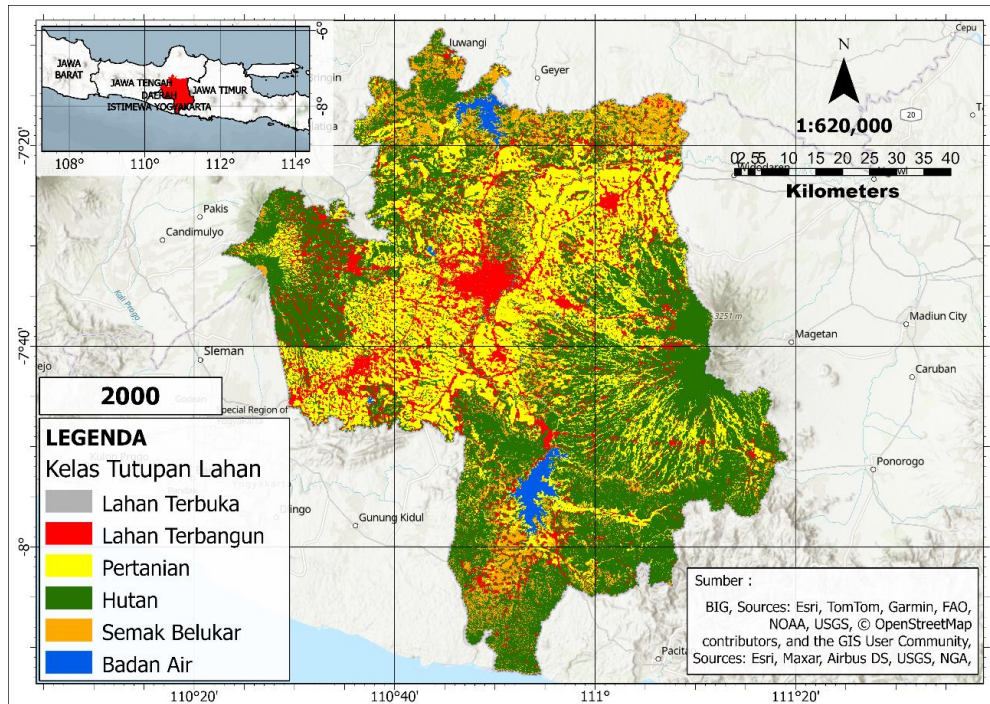
Perubahan tutupan lahan di Kawasan Metropolitan Surakarta antara tahun 2000 hingga 2020 memperlihatkan tren yang signifikan di berbagai kategori lahan. Pada tahun 2000, tutupan lahan terbesar adalah hutan yang mencakup 278.360,16 hektar atau sekitar 46% dari

total wilayah. Diikuti oleh lahan pertanian dengan luas 172.427,97 hektar (28,5%) dan lahan terbangun sebesar 80.327,98 hektar (13,28%). Lahan lainnya mencakup semak belukar (63.792,88 hektar atau 10,54%), badan air (10.176,90 hektar atau 1,68%), dan lahan terbuka yang relatif kecil yaitu 8,50 hektar (0,0014%).

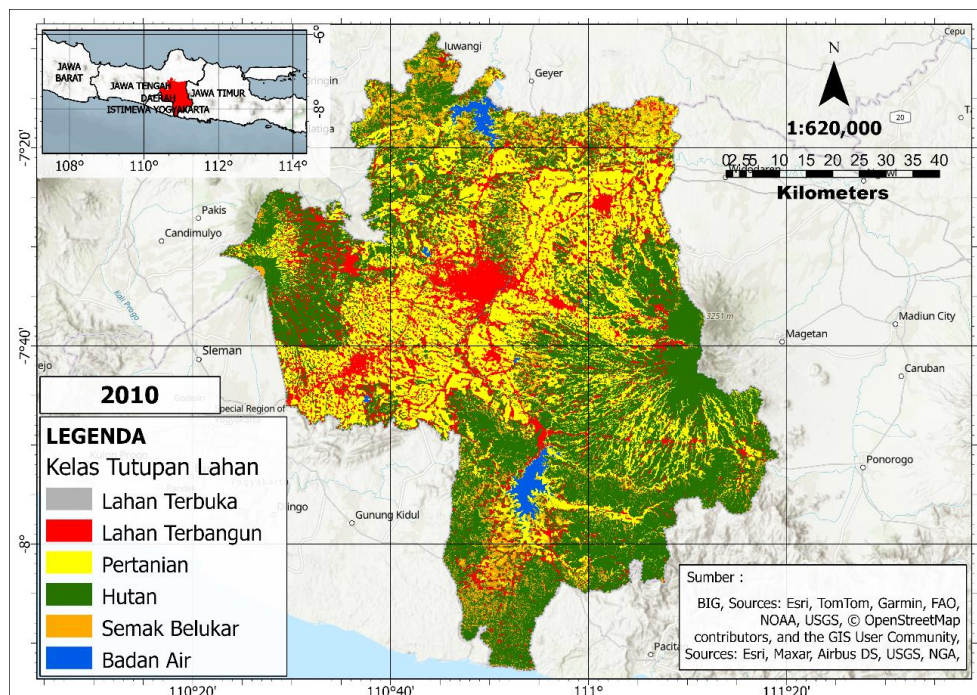
Pada tahun 2010, terjadi perubahan signifikan pada beberapa kategori. Lahan terbangun meningkat menjadi 91.859,34 hektar (15,18%), menunjukkan pertumbuhan urbanisasi. Lahan pertanian juga meningkat menjadi 183.263,08 hektar (30,29%), sementara luas hutan sedikit berkurang menjadi 272.110,22 hektar (44,97%). Perubahan ini disertai dengan penurunan luas semak belukar menjadi 48.986,96 hektar (8,1%) dan badan air menjadi 8.861,89 hektar (1,46%). Tahun 2020 menunjukkan tren yang semakin jelas di mana lahan terbangun terus meningkat secara signifikan menjadi 142.424,97 hektar (23,54%), sedangkan lahan hutan mengalami penurunan tajam ke angka 224.345,71 hektar (37,08%).

Luas lahan pertanian terus bertambah menjadi 199.877,43 hektar (33,03%), namun semak belukar kembali berkurang menjadi 31.008,30 hektar (5,12%) dan

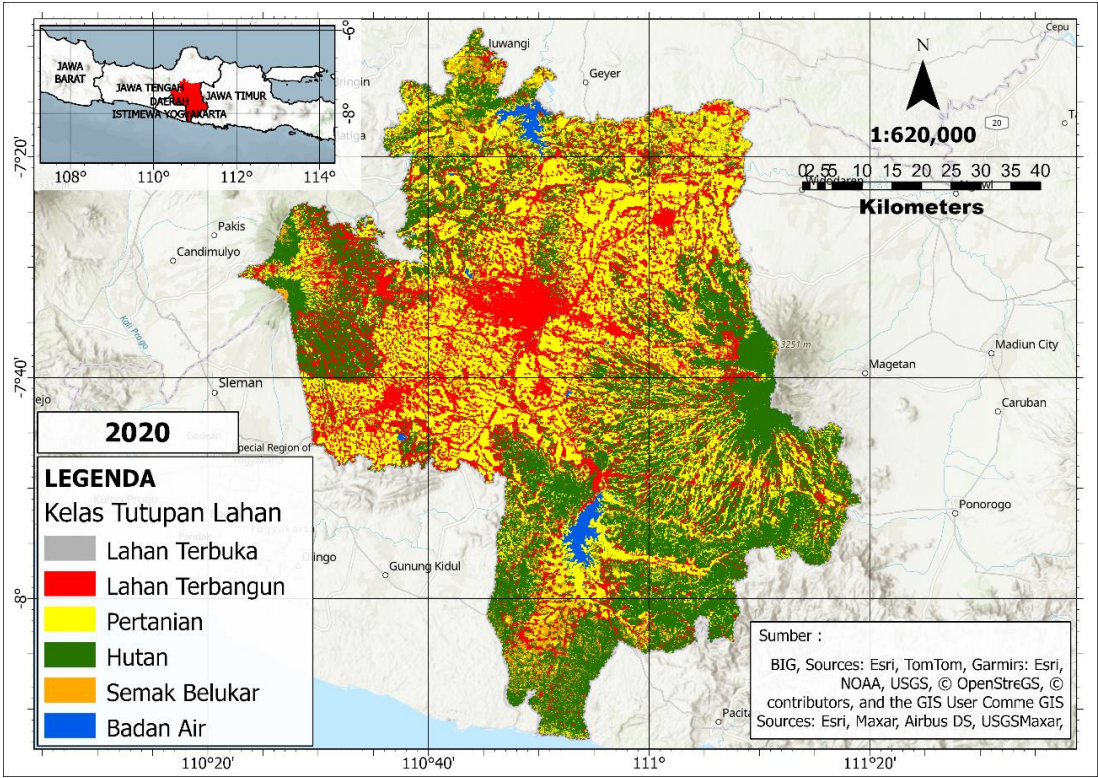
badan air menyusut ke 7.401,19 hektar (1,22%). Lahan terbuka pun menurun drastis menjadi hanya 5,84 hektar (0,00096%).



(a)

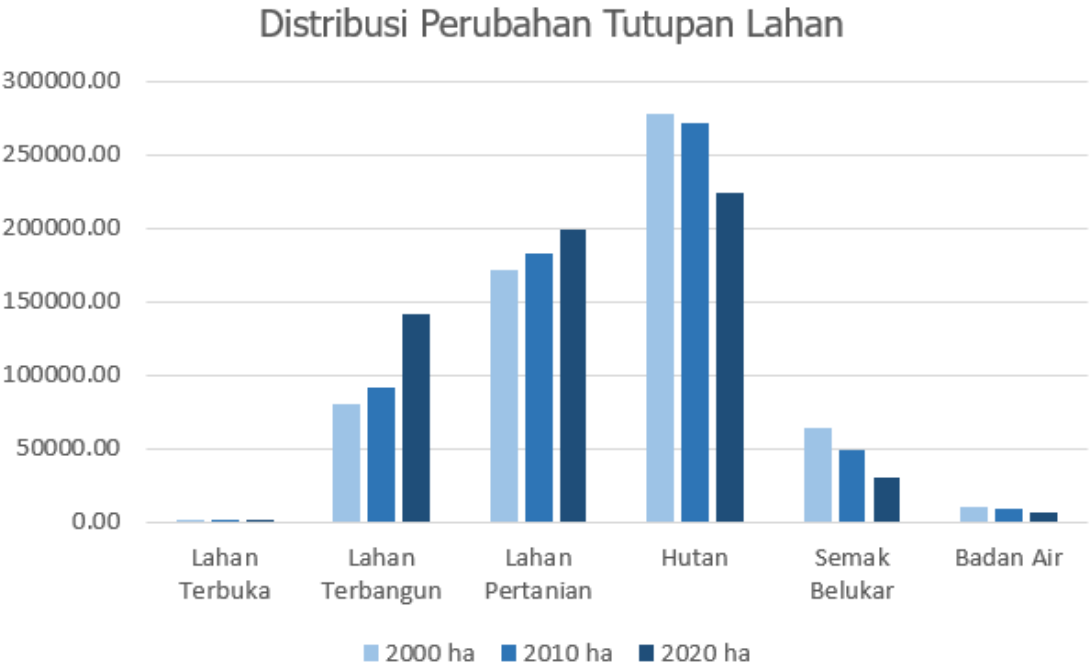


(b)



(c)

Gambar 5. Persebaran Tutupan Lahan Tahun (A). 2000, (B). 2010, Dan (C). 2020



Gambar 6. Grafik Luas Area Tutupan Lahan Tahun 2000, 2010, Dan 2020

Tabel 4. Luas Area Tutupan Lahan Tahun 2000, 2010, Dan 2020

Tahun/Periode	2000		2010		2020	
Tutupan Lahan	Hektar	%	Hektar	%	Hektar	%
Lahan Terbuka	8.50	0,00140	14,96	0,00247	5,84	0,00096
Lahan Terbangun	80.327,98	13,28	91.859,34	15,18	142.424,97	23,54
Lahan Pertanian	172.427,97	28,50	183.263,08	30,29	199.877,43	33,03
Hutan	278.360,16	46,00	272.110,22	44,97	224.345,71	37,08
Semak Belukar	63.792,88	10,54	48.986,96	8,10	31.008,30	5,12
Badan Air	10.176,90	1,68	8.861,89	1,46	7.401,19	1,22
Total	605.094,38	100	605.094,38	100	605.094,38	100

Tabel 5. Perubahan Area Tutupan Lahan Periode 1, Periode 2, Dan Periode 3

Tahun/Periode	2000-2010 (Periode 1)		2010-2020 (Periode 2)		2000-2020 (Periode 3)	
Tutupan Lahan	Hektar	%	Hektar	%	Hektar	%
Lahan Terbuka	6,46	0,00107	-9,12	-0,00151	-2,66	-0,00044
Lahan Terbangun	11.531,36	1,91	50.565,62	8,36	62.096,98	10,26
Lahan Pertanian	10.835,11	1,79	16.614,35	2,75	27.449,46	4,54
Hutan	-6.249,94	-1,03	-47.764,51	-7,89	-54.014,44	-8,93
Semak Belukar	-14.805,92	-2,45	-17.978,66	-2,97	-32.784,58	-5,42
Badan Air	-1.315,01	-0,22	-1.460,70	-0,24	-2.775,70	-0,46

Lahan terbangun mengalami kenaikan total sebesar 62.096,98 hektar (10,26%), dengan pertumbuhan paling pesat terjadi pada 2010-2020 yaitu sebesar 50.565,62 hektar (8,36%). Sementara itu, lahan pertanian meningkat secara total sebesar 27.449,46 hektar (4,54%), yang menandakan adanya ekspansi lahan agrikultur di beberapa dekade terakhir. Sebaliknya, hutan mengalami penurunan terbesar dengan total penurunan 54.014,44 hektar (-8,93%), yang menunjukkan dampak besar dari konversi lahan terhadap kawasan hutan. Kawasan Metropolitan Surakarta telah menunjukkan pola urbanisasi yang pesat, ditandai dengan peningkatan lahan terbangun dan pengurangan lahan hutan dan semak belukar, yang beralih untuk memenuhi kebutuhan permukiman dan pertanian. Perubahan-perubahan ini mengindikasikan adanya transformasi dalam penggunaan lahan yang berdampak signifikan pada

ekosistem lokal dan struktur sosial-ekonomi wilayah tersebut.

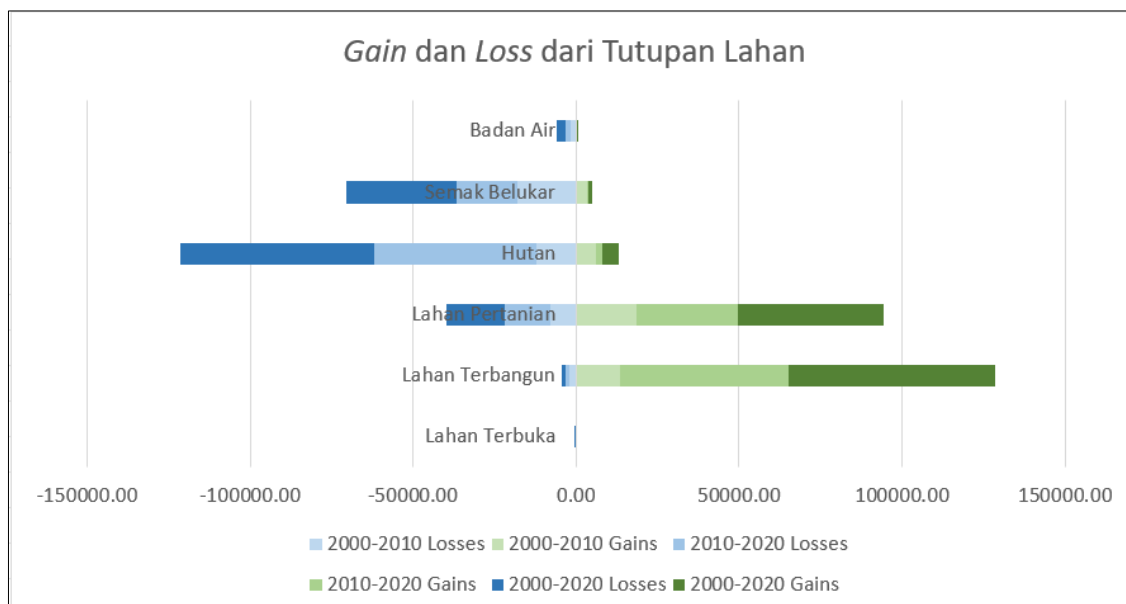
Perubahan tutupan lahan di kawasan metropolitan Surakarta selama periode 2000 hingga 2020 mencerminkan transformasi yang signifikan pada berbagai kategori lahan, dengan pola perubahan yang menunjukkan peningkatan urbanisasi serta konversi lahan alami. Tabel 6, Gambar 7, dan Gambar 8 menunjukkan data berkurangnya luas area (*loss*), bertambahnya luas area (*gain*), dan selisih dari keduanya atau penurunan/kenaikan bersih (*net change*). Lahan terbuka mengalami perubahan kecil dengan kenaikan sebesar 6,46 hektar selama periode 2000-2010, namun menurun lagi pada dekade berikutnya, sehingga menghasilkan penurunan bersih sebesar 2,66 hektar dalam dua dekade terakhir. Sementara itu, lahan terbangun menunjukkan peningkatan yang sangat besar, yaitu bertambah 11.531,36 hektar pada 2000-2010 dan 50.565,62 hektar pada

2010-2020, yang menghasilkan peningkatan bersih sebesar 62.096,98 hektar. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan aktivitas pembangunan dan perluasan wilayah urban. Lahan pertanian mengalami peningkatan signifikan, dengan penambahan 10.835,11 hektar pada 2000-2010 dan 16.614,35 hektar pada 2010-2020, totalnya mencapai 27.449,46 hektar. Ekspansi ini menunjukkan peningkatan kegiatan agrikultur di wilayah tersebut. Sebaliknya, lahan hutan berkurang drastis, kehilangan 6.249,94 hektar pada 2000-2010 dan 47.764,51 hektar pada 2010-2020, dengan total kehilangan mencapai 54.014,44 hektar,

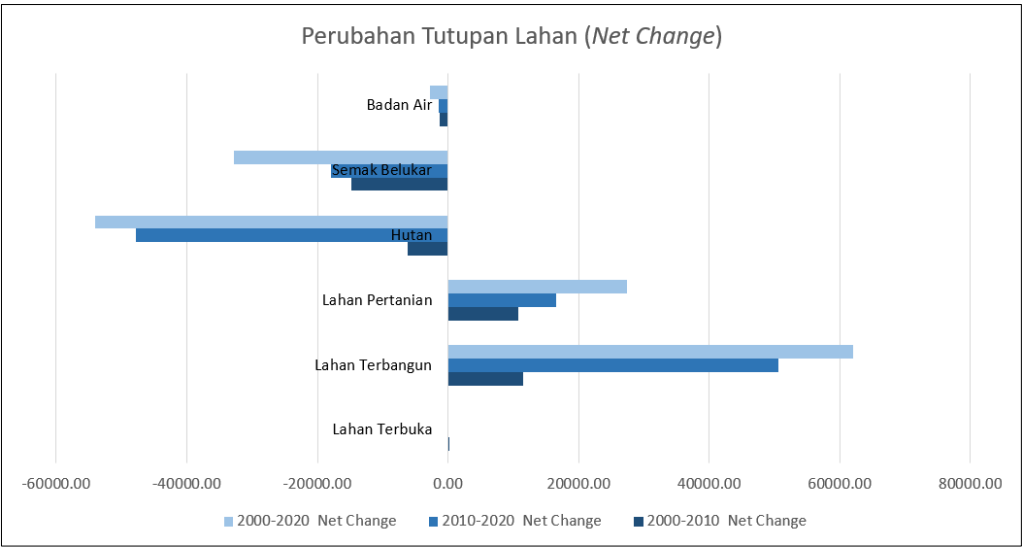
mencerminkan konversi hutan menjadi lahan terbangun dan pertanian. Semak belukar juga mengalami penurunan yang signifikan, kehilangan 14.805,92 hektar pada 2000-2010 dan 17.978,66 hektar pada 2010-2020, sehingga totalnya mencapai 32.784,58 hektar. Hal ini mengindikasikan pengurangan vegetasi liar, kemungkinan akibat pengembangan lahan. Badan air mengalami penyusutan sebesar 1.315,01 hektar pada 2000-2010 dan tambahan 1.460,70 hektar pada 2010-2020, dengan total penyusutan mencapai 2.775,70 hektar, yang mungkin disebabkan oleh pengalihan fungsi badan air atau proses alami.

Tabel 6. Bertambah, Berkurang, Dan Selisih Tiap Kelas Tutupan Lahan

Tahun/ Periode	2000-2010			2010-2020			2000-2020		
Tutupan Lahan	Berkurang	Bertambah	Selisih	Berkurang	Bertambah	Selisih	Berkurang	Bertambah	Selisih
Lahan Terbuka	-5,79	12,26	6,46	-11,52	2,40	-9,12	-6,25	3,59	-2,66
Lahan Terbangun	-2.039,32	13.570,68	11.531,36	-1.190,33	51.755,95	50.565,62	-1.195,81	63.292,79	62.096,98
Lahan Pertanian	-7.877,23	18.712,34	10.835,11	-14.119,70	30.734,05	16.614,35	-17.624,23	45.073,69	27.449,46
Hutan	-12.285,15	6.035,21	-6.249,94	-49.611,44	1.846,93	-47.764,51	-59.357,40	5.342,95	-54.014,44
Semak Belukar	-18.130,90	3.324,98	-14.805,92	-18.607,62	628,95	-17.978,66	-33.925,67	1.141,09	-32.784,58
Badan Air	-1.594,01	279,01	-1.315,01	-1.586,61	125,91	-1.460,70	-2.937,63	161,93	-2.775,70



Gambar 7. Grafik Bertambah/Berkurang Luas Area Tutupan Lahan



Gambar 8. Grafik Selisih Luas Area Tutupan Lahan

Prediksi Perubahan Tutupan Lahan

Prediksi perubahan tutupan lahan diperoleh berdasarkan *Transition Probability Matrix* (TPM) yang merupakan hasil dari Operasi *Markov* untuk periode tahun 2000 – 2010 (Tabel 7) Nilai probabilitas dari setiap kelas tutupan lahan yang berubah berkisar 0-1. Semakin mendekati nilai 1, maka kemungkinan terjadinya perubahan kelas tutupan lahan tahun awal (horizontal) menjadi kelas tutupan lahan tahun berikutnya (vertikal) semakin tinggi. Sebaliknya, Nilai diagonal pada tabulasi silang menunjukkan probabilitas tutupan lahan yang tidak berubah (tetap). Kemungkinan perubahan tutupan lahan terbuka menjadi badan air

adalah 87,2%, lahan pertanian menjadi lahan terbangun adalah 6,3%, hutan menjadi lahan terbangun adalah 13,1%, semak belukar menjadi lahan pertanian adalah 29,9%, dan badan air menjadi lahan pertanian adalah 16,2%. Kelas tutupan lahan terbangun memiliki kemungkinan untuk tidak berubah ke kelas tutupan lahan lainnya sekitar 98,5% berarti lahan terbangun memiliki kemungkinan terbesar tidak berkurang luas tutupannya. Sebaliknya, lahan terbangun selalu meluas yang mengindikasikan tingkat urbanisasi yang tinggi dipicu oleh kebutuhan manusia terutama untuk tempat tinggal yang banyak (Zhang, 2016).

Tabel 7. *Transition Probability Matrix* (TPM) Periode 2000-2010

Kelas Tutupan Lahan	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun	Lahan Pertanian	Hutan	Semak Belukar	Badan Air
Lahan Terbuka	0,0465	0,0000	0,0581	0,0000	0,0233	0,8721
Lahan Terbangun	0,0000	0,9859	0,0090	0,0045	0,0006	0,0000
Lahan Pertanian	0,0000	0,0636	0,9184	0,0095	0,0079	0,0006
Hutan	0,0000	0,1307	0,0524	0,8098	0,0070	0,0001
Semak Belukar	0,0000	0,0905	0,2993	0,0202	0,5885	0,0015
Badan Air	0,0004	0,0090	0,1617	0,0008	0,0150	0,8132

Nilai validasi secara keseluruhan antara TSM dan tutupan lahan aktual 2020 adalah 92,7% yang sudah memenuhi syarat yaitu $>70\%$. Tabel 8 menyajikan nilai luas kelas tutupan lahan asli dengan hasil prediksi. Disisi lain, nilai ketidakcocokan dari validasi ini adalah 0,0716 yang diperoleh dari nilai *quantity disagreements* yaitu 0,04 dan nilai *allocation disagreements* yaitu 0,0316 (Gambar 9). Penelitian serupa juga mendapatkan nilai ketidakcocokan yang berbeda. Dalam penelitian Bunyanga et al. (2021), diperoleh 0,033 dan 0,045 untuk *allocation* dan *quantity disagreements*. Penelitian Munthali et al. (2020), diperoleh nilai 0,02 dan 0,01 *allocation* dan *quantity disagreements*. Menurut Pontius & Millones (2011), Nilai *allocation* dan *quantity disagreements* adalah nilai absolut yang melengkapi hasil kecocokan dalam proses validasi. Dalam penelitian ini, ketidakcocokan lebih disebabkan oleh *quantity disagreement*, yang muncul karena perbedaan total kelas tutupan lahan antara TSM dan tutupan lahan aktual 2020. Sedangkan *allocation disagreement* disebabkan oleh distribusi kelas tutupan lahan yang tidak sesuai

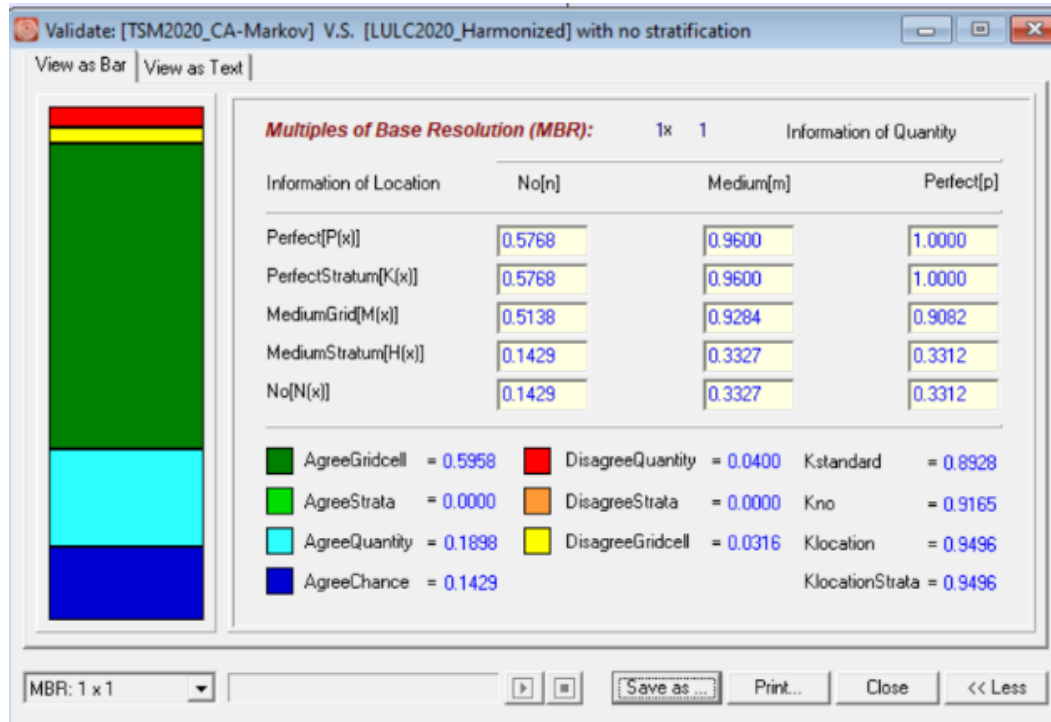
antara TSM dan tutupan lahan aktual 2020, sehingga tidak mencapai nilai maksimum yang diharapkan. (Pontius & Millones, 2011; Warrens, 2015).

Hasil dari indeks statistik kappa menunjukkan nilai akurasi yang wajar dengan nilai K_{no} yaitu 91,6%, $K_{location}$ yaitu 94,9%, $K_{locationStrata}$ yaitu 94,9%, dan $K_{standard}$ yaitu 89,3%. Hasil ini mendekati sempurna dengan nilai $>80\%$ yang berarti menunjukkan model yang digunakan sangat relevan untuk digunakan dalam memprediksi tutupan lahan di masa depan (Araya & Cabral, 2010; Singh et al., 2015; Viera & Garrett, 2005). Berdasarkan selisih luas tiap kelas pada Tabel 8, lahan pertanian dan badan air memiliki tingkat kecocokan yang tinggi dengan perbedaan -4,91% dan 4,59%. Sebaliknya, tingkat kecocokan rendah terlihat dari nilai selisih lahan terbuka yaitu 109,42%.

Gambar 10 dan Gambar 11 menunjukkan TSM tahun 2030 dan 2040 dengan model yang telah divalidasi sebelumnya. Hasil TSM ini diperoleh dari Transition Probability Matrix (TPM) yang telah divalidasi dan Transition Area Matrix (TAM) antara tahun 2010 dan 2020. Tabel 9 menunjukkan luas area sesuai dengan tutupan lahan yang dimodelkan.

Tabel 8. Komparasi Luas Area TSM Dan Tutupan Lahan Aktual 2020

Kelas Tutupan Lahan	Luas Area (ha)		Selisih	
	2020 Aktual	2020 Prediksi	Perubahan (ha)	Perubahan (%)
Lahan Terbuka	5,84	12,23	6,39	109,42
Lahan Terbangun	142.424,96	102.304,53	-40.120,43	-28,17
Lahan Pertanian	199.877,43	190.128,05	-9.749,38	-4,88
Hutan	224.376,66	267.256,59	42.879,93	19,11
Semak Belukar	31.008,3	37.652,22	6.643,92	21,43
Badan Air	7.401,19	7.740,76	339,57	4,59



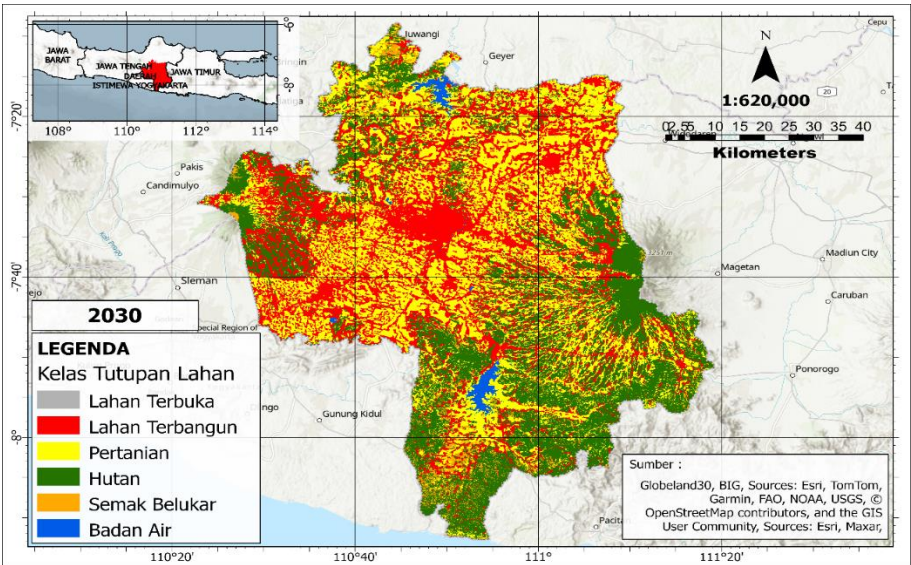
Gambar 9. Hasil Validasi TSM Dengan Tutupan Lahan Aktual 2020

Hasil simulasi yang telah dilakukan memprediksikan bahwa Pada tahun 2020, luas lahan terbuka adalah 5,84 hektar (ha), namun diperkirakan menurun secara bertahap menjadi 3,33 ha pada 2040, dengan penurunan terbesar terjadi antara 2020 dan 2030 sebesar -2,75 ha. Lahan terbangun mengalami peningkatan signifikan, dari 142.424,96 ha pada 2020 menjadi 221.835,04 ha pada 2040. Peningkatan ini terjadi terutama dalam rentang 2020 ke 2030, di mana lahan terbangun bertambah sebesar 42.720,08 ha, dengan persentase perubahan total sebesar 13,12% dari 2020 ke 2040. Sebaliknya, lahan pertanian sedikit menurun dari 199.877,43 ha pada 2020 menjadi 209.029,94 ha pada 2040, meskipun ada peningkatan kecil dari 2020 ke 2030 sebesar 7.082,21 ha. Namun, kategori yang mengalami penurunan paling signifikan adalah hutan, yang

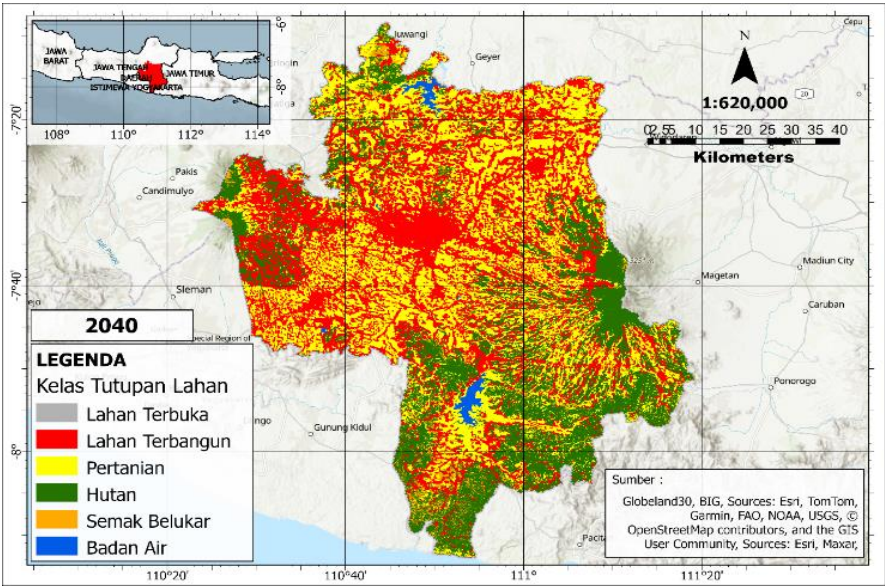
menyusut dari 224.345,71 ha pada 2020 menjadi 153.438,55 ha pada 2040, dengan penurunan terbesar (-70.907,16 ha) diproyeksikan hingga 2050. Luas semak belukar juga diperkirakan menurun secara drastis, dari 31.008,3 ha pada 2020 menjadi 15.560,52 ha pada 2040. Badan air mengalami sedikit penurunan, dari 7.401,19 ha pada 2020 menjadi 5.201,47 ha pada 2040. Secara keseluruhan, total luas lahan tetap stabil pada sekitar 605.063 ha dalam seluruh periode prediksi, meskipun terjadi distribusi ulang luas pada masing-masing kategori tutupan lahan. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivitas pemekaran lahan terbangun dan perluasan lahan pertanian berkontribusi besar dalam penyusutan luas hutan atau deforestasi. Pemekaran luas lahan terbangun di kota biasa dikaitkan dengan meningkatnya aktivitas pendidikan, sosial ekonomi, dan pertanian (Grace et al., 2015; Kugu, 2018).

Tabel 9. Luas Perubahan Tutupan Lahan Dari Tahun 2020 Ke 2040

Tahun/ Periode	2020 Aktual		2030 Prediksi		2040 Prediksi		2020 ke 2030		2030 ke 2040	
Tutupan Lahan	hektar	%	hektar	%	hektar	%	hektar	%	hektar	%
Lahan Terbuka	5,84	0,00097	3,09	0,00051	3,33	0,00055	-2,75	-	0,24	0,00004
Lahan Terbangun	142.424,96	23,54	185.145,04	30,60	221.835,04	36,66	42.720,08	7,06	36.690	6,06
Lahan Pertanian	199.877,43	33,03	206.959,64	34,20	209.029,94	34,55	7.082,21	1,17	2.070,3	0,34
Hutan	224.376,66	37,08	185.302,59	30,62	153.464,08	25,36	-	-6,46	-	-5,26
							39.074,07		31.838,51	
Semak Belukar	31.008,3	5,12	21.486,17	3,55	15.560,52	2,57	-9.522,13	-1,57	-5.925,65	-0,98
Badan Air	7.401,19	1,22	6.197,85	1,02	5.201,47	0,86	-1.203,34	-0,20	-996,38	-0,16
Total	605.094,38	100	605.094,38	100	605.094,38	100	-	-	-	-



Gambar 10. Transition Suitability Map (TSM) 2030



Gambar 11. Transition Suitability Map (TSM) 2040

Prediksi yang dilakukan pada penelitian ini sejalan dengan pola yang terjadi di masa lalu. Seperti halnya penelitian ini menggunakan rentang waktu tahun 2000 hingga 2020, menurut Pradoto et al. (2024), dalam periode waktu 2000-2020 telah terjadi urbanisasi hasil transformasi pedesaan menjadi perkotaan. Transformasi ini ditunjukkan dengan beberapa faktor seperti perubahan pada jumlah penduduk, mata pencaharian, pemanfaatan lahan pertanian, dan investasi daerah.

Pola perubahan lahan yang diprediksi oleh model ekspansi lahan terbangun yang masif di wilayah pinggiran dengan mengorbankan tutupan hutan secara jelas dapat dihubungkan dengan proses metropolitanisasi yang khas di Kawasan Metropolitan Surakarta. Studi oleh Mardiansjah et al. (2018) mengungkapkan bahwa terbatasnya luas wilayah administrasi Kota Surakarta sebagai inti telah mendorong pertumbuhan perkotaan meluas ke kabupaten-kabupaten di sekitarnya. Hasil prediksi dalam penelitian ini yang menunjukkan konsentrasi perubahan terjadi di luar kota inti adalah manifestasi spasial dari fenomena *spillover* tersebut. Lebih lanjut, perluasan ini tidak hanya didorong oleh kebutuhan permukiman, tetapi juga oleh transformasi ekonomi yang pesat. Pradoto et al. (2024) mengidentifikasi bahwa wilayah peri-urban seperti Kabupaten Sukoharjo telah menjadi target investasi besar di sektor industri dan properti. Hal ini menyebabkan pergeseran mata pencaharian dari sektor pertanian ke industri, yang secara fisik membutuhkan konversi lahan skala besar. Dengan demikian, deforestasi dan alih fungsi lahan yang ditemukan dalam model ini bukanlah proses acak, melainkan hasil dari interaksi kompleks antara tekanan demografis, keterbatasan ruang di kota inti, dan tarikan ekonomi di kawasan pinggiran yang telah berlangsung selama beberapa dekade.

Analisis Bahaya Banjir

Banjir terkait dengan penggunaan lahan yang memengaruhi proses hidrologi dan morfologi sungai, sehingga berdampak pada waktu dan volume aliran air. Kerentanan terhadap banjir dapat dilihat dari distribusi pemukiman dan kemampuan masyarakat dalam mencegah serta beradaptasi terhadap banjir. (Wells et al., 2013). Menurut Sulaeman et al. (2017), Banjir di Kota Surakarta dipengaruhi oleh aktivitas masyarakat, seperti pembuangan sampah sembarangan dan alih fungsi lahan. Selain itu, sistem drainase yang tidak memadai untuk menangani debit air saat hujan juga menjadi penyebab banjir. (Anna et al., 2021).

Berdasarkan Tabel 10 dan Tabel 11, yang menunjukkan *Transition Area Matrix* (TAM) untuk periode 2020–2030 dan 2030–2040, terlihat bahwa perubahan tutupan lahan terjadi di berbagai kategori. Dari tahun 2020 ke 2030, konversi lahan yang signifikan termasuk perubahan hutan menjadi lahan terbangun (328.121 piksel/29.530,89 hektar) dan hutan menjadi lahan pertanian (96.124 piksel/6.224,76 hektar). Perubahan serupa terjadi pada periode 2030–2040, di mana hutan (278.997 piksel/25.109,73 hektar) dan hutan (69.164 piksel/8.651,16 hektar) banyak dikonversi menjadi lahan terbangun dan lahan pertanian. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan area lahan terbangun dan pertanian di kedua periode tersebut.

Dari sisi kekasaran permukaan, Terdapat kelas tutupan lahan yang memiliki nilai koefisien kekasaran tinggi (Tabel 3) seperti hutan (0,070) dan semak belukar (0,047) berubah menjadi tutupan lahan dengan kekasaran yang lebih rendah, seperti lahan terbangun (0,045) dan lahan pertanian (0,025). Perubahan ini mengakibatkan penurunan kapasitas lahan untuk menahan air banjir meluas, karena lahan dengan koefisien kekasaran yang lebih rendah lebih mudah tergenang dan tidak efektif dalam mencegah penyebaran

air. Sebaliknya, terdapat pula perubahan tutupan lahan dengan koefisien rendah menjadi tinggi, misalnya perubahan lahan terbuka menjadi semak belukar atau hutan.

Beberapa transisi perubahan tutupan lahan yang mengalami penurunan kekasaran permukaan seperti hutan ke lahan terbangun, lahan pertanian, dan

semak belukar, selanjutnya semak belukar ke lahan terbangun, pertanian, dan badan air, serta lahan terbuka menjadi badan air. Transisi negatif ini mencapai 555.973 piksel atau 50.037,57 hektar dengan didominasi oleh deforestasi hutan yang mencapai 434.156 piksel atau 39.074,07 hektar (78.09 %) pada tahun 2030.

Tabel 10. *Transition Area Matrix (TAM) Periode Tahun 2020 -2030 (Piksel)*

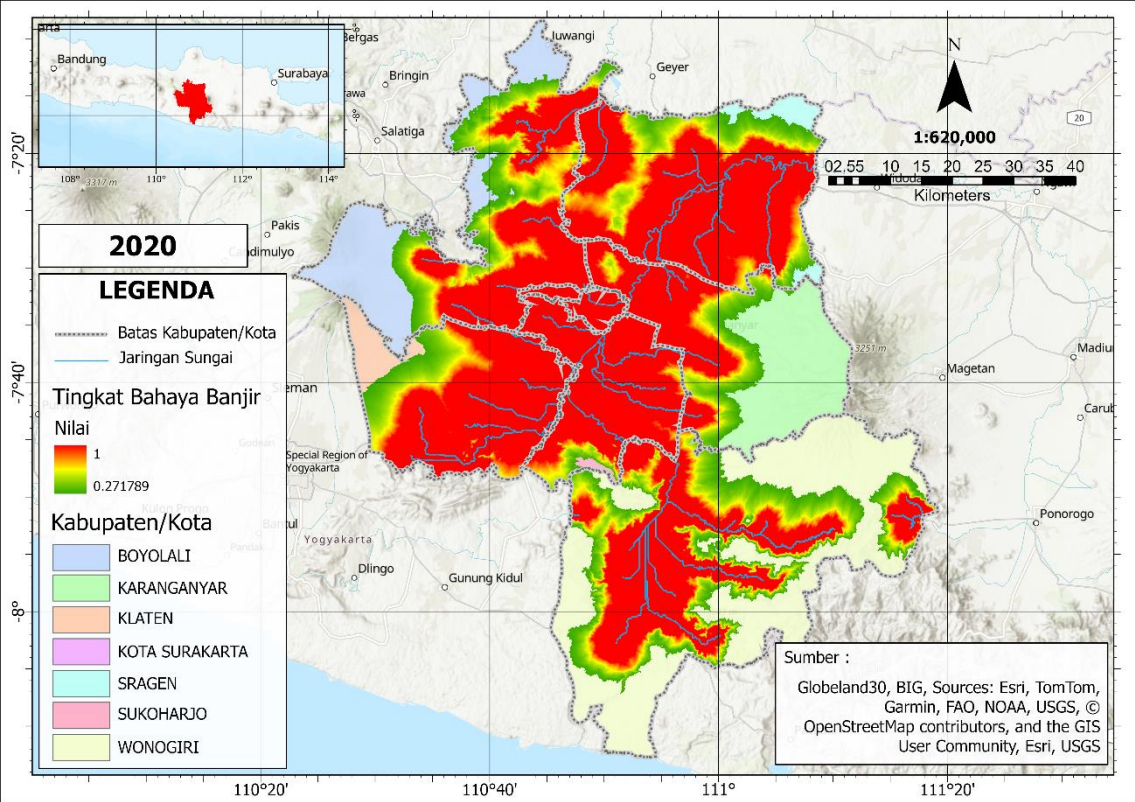
Kelas Tutupan Lahan	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun	Lahan Pertanian	Hutan	Semak Belukar	Badan Air	Total 2030
Lahan Terbuka	42	0	0	0	0	0	42
Lahan Terbangun	0	1.581.780	107.556	328.121	37.651	731	2.055.839
Lahan Pertanian	0	0	2.108.058	96.124	84.137	12.161	2.300.480
Hutan	0	0	0	2.046.545	0	0	2.046.545
Semak Belukar	1	0	139	9.911	237.868	725	248.644
Badan Air	29	0	0	0	0	68.784	68.813
Total 2020	72	1.581.780	2.215.753	2.480.701	359.656	82.401	6.720.363

Tabel 11. *Transition Area Matrix (TAM) Periode Tahun 2030 - 2040 (Piksel)*

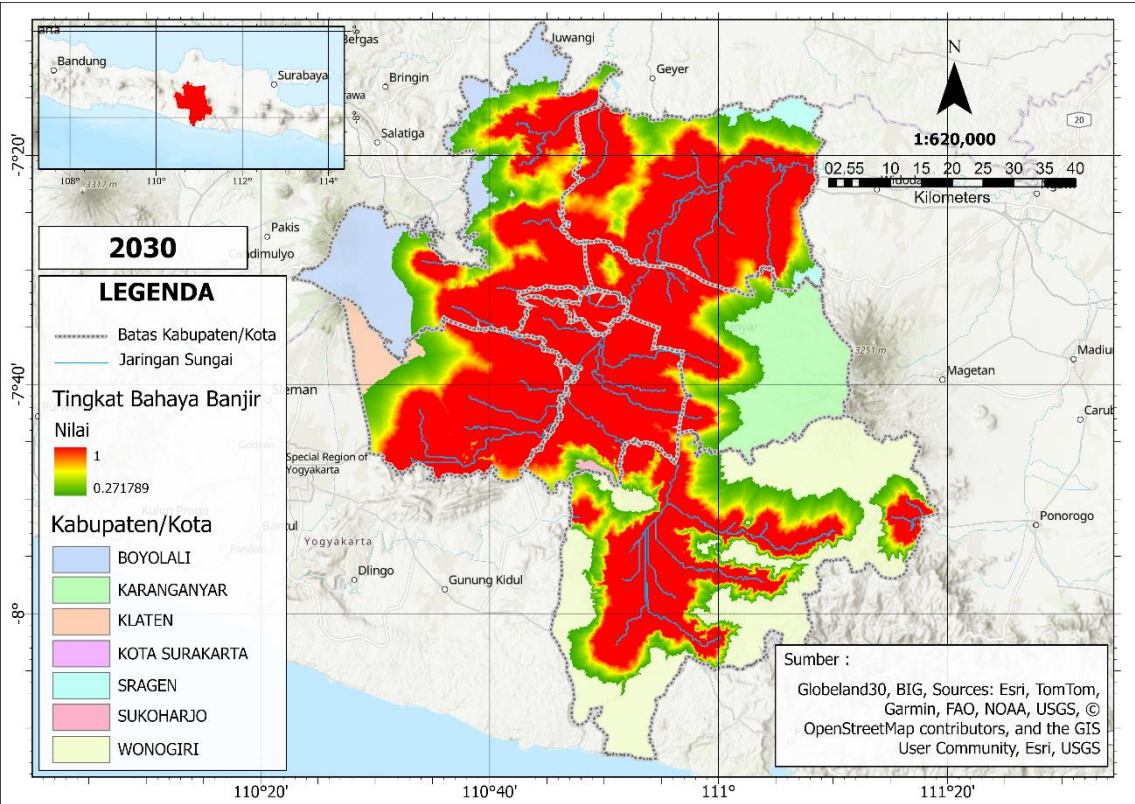
Kelas Tutupan Lahan	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun	Lahan Pertanian	Hutan	Semak Belukar	Badan Air	Total 2030
Lahan Terbuka	31	0	0	0	0	13	44
Lahan Terbangun	0	2.052.283	105.168	278.997	25.968	1.482	2.463.898
Lahan Pertanian	9	5.925	2.193.584	69.164	45.934	9.309	2.323.925
Hutan	0	154	1.537	1.690.629	1.509	0	1.693.829
Semak Belukar	0	1	279	5.600	174.761	376	181.017
Badan Air	2	0	1	0	44	57.667	57.714
Total 2020	42	2.058.363	2.300.569	2.044.390	248.216	68.847	6.720.427

Pada tahun 2040 transisi negatif mencapai 431.635 piksel atau 38.847,15 hektar dengan deforestasi mencapai 353.761 piksel atau 31.838,51 hektar (81.96 %). Sebaliknya perubahan positif atau meningkatnya kekasaran permukaan disebabkan konversi lahan terjadi pada tutupan lahan lahan terbuka menjadi lahan pertanian dan semak belukar, lalu lahan pertanian menjadi lahan terbangun dan semak belukar, serta badan air menjadi

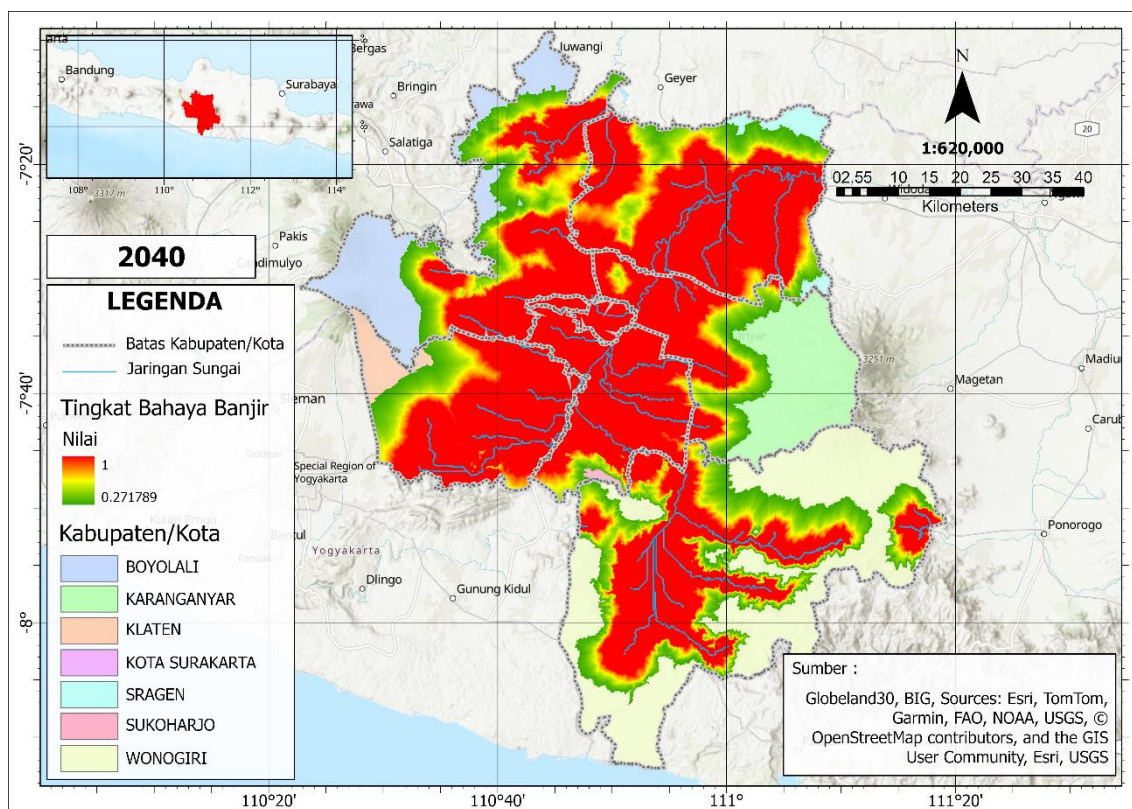
lahan terbangun, pertanian, dan semak belukar. Namun, perubahan ini tidak cukup besar untuk mengimbangi konversi negatif yang lebih dominan. Akibatnya, kemampuan lahan untuk menghalang air menurun, yang berkontribusi terhadap perluasan area banjir pada tahun 2030 dan 2040 (Gambar 12), sebagaimana terlihat dari prediksi luas area bahaya banjir yang meningkat pada Tabel 12.



(a)



(b)



(c)

Gambar 12. Peta bahaya banjir Kawasan Metropolitan Surakarta Tahun (a). 2020, (b) 2030, dan (c). 2040

Tabel 12. Luas Area Bahaya Banjir Tahun 2020 - 2040

Tahun/ Periode	Luas Area (ha)			Selisih (ha)	
Kelas Bahaya	2020	2030	2040	2020 ke 2030	2030 ke 2040
Rendah	11.568,06	11.568,87	11.569,41	0,81	0,54
Sedang	92.652,30	92.652,57	92.652,66	0,27	0,09
Tinggi	334.056,87	334.058,22	334.061,64	1,35	3,42

Hubungan sebab-akibat antara deforestasi, penurunan kekasaran permukaan, dan perluasan bahaya banjir yang ditemukan di Kawasan Metropolitan Surakarta ini konsisten dengan temuan-temuan di wilayah lain, baik dalam skala nasional maupun internasional. Sebagai contoh, studi oleh Adnan & Atkinson (2011) di sebuah DAS di Malaysia yang beriklim muson serupa menemukan bahwa konversi hutan menjadi lahan pertanian secara signifikan meningkatkan aliran air tahunan (*water yield*) hingga 117%, yang

secara langsung memperbesar potensi banjir. Temuan tersebut memperkuat argumen dalam penelitian ini bahwa hilangnya tutupan hutan yang diprediksi hingga tahun 2040 akan menjadi pemicu utama peningkatan risiko hidrologis. Menariknya, jika dibandingkan dengan pola urbanisasi di *megacity* lain di Indonesia seperti Koridor Jakarta-Bandung, terdapat perbedaan dampak yang krusial. Rustiadi et al. (2021) menyoroti bahwa ekspansi di koridor tersebut secara besar-besaran mengancam

lahan sawah strategis nasional. Sementara itu, temuan di Surakarta menunjukkan bahwa tutupan hutan dan semak belukar menjadi korban utama. Perbedaan ini mengindikasikan bahwa meskipun proses urbanisasi di Pulau Jawa memiliki pemicu yang mirip contohnya pembangunan infrastruktur dan kebijakan investasi, dampak lingkungannya bisa sangat bervariasi tergantung pada karakteristik bentang lahan dan struktur ekonomi lokal. Hal ini menegaskan pentingnya analisis berbasis kasus seperti yang dilakukan dalam penelitian ini untuk merumuskan kebijakan mitigasi bencana dan tata ruang yang spesifik dan tepat sasaran.

KESIMPULAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Cellular Automata-Markov Chain* (CA-MC) untuk memprediksi perubahan tutupan lahan dan dampaknya terhadap risiko banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta hingga tahun 2040. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan, terutama deforestasi yang terus berlangsung, telah berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan area berisiko banjir. Pada periode 2020-2030, luas area berisiko banjir tinggi bertambah sebesar 3,42 hektar, sementara pada periode 2030-2040 bertambah sebesar 1,35 hektar. Peningkatan ini disebabkan oleh konversi lahan hutan menjadi lahan terbangun dan pertanian, yang mengurangi kemampuan lahan untuk memperlambat genangan aliran banjir di permukaan.

Penelitian ini juga memprediksi bahwa urbanisasi yang pesat akan terus meningkatkan luas lahan terbangun, yang diperkirakan bertambah sebesar 42.720,08 hektar pada periode 2020-2030 dan 36.690 hektar pada periode 2030-2040. Di sisi lain, luas hutan diproyeksikan menurun secara signifikan, dengan penurunan sebesar 39.074,07 hektar pada periode

2020-2030 dan 31.838,51 hektar pada periode 2030-2040.

Deforestasi dan urbanisasi yang tidak terkendali akan terus meningkatkan risiko banjir di Kawasan Metropolitan Surakarta. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan, termasuk reforestasi, pengendalian alih fungsi lahan, dan penerapan sistem drainase yang lebih baik untuk memitigasi risiko bencana banjir di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang mendukung penyelesaian penelitian ini. Terima kasih sebesar-besarnya disampaikan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional dan Universitas Negeri Jakarta, khususnya dosen praktisi dan pembimbing atas bimbingan dan masukan berharga selama penelitian. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) dan instansi terkait lainnya yang telah menyediakan data penting untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adhikari, S., & Southworth, J. (2012). Simulating forest cover changes of bannerghatta national park based on a CA-Markov model: A remote sensing approach. *Remote Sensing*, 4(10). <https://doi.org/10.3390/rs4103215>
- Adnan, N. A., & Atkinson, P. M. (2011). Exploring the impact of climate and land use changes on streamflow trends in a monsoon catchment. *International Journal of Climatology*, 31(6). <https://doi.org/10.1002/joc.2112>
- Akbar, F., & Supriatna. (2019). Land cover modelling of Pelabuhanratu City in 2032 using cellular automata-markov chain method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental*

- Science*, 311(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/311/1/012071>
- Al-sharif, A. A. A., & Pradhan, B. (2014). Monitoring and predicting land use change in Tripoli Metropolitan City using an integrated Markov chain and cellular automata models in GIS. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(10).
<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1119-7>
- Andualem, T. G., Belay, G., & Guadie, A. (2018). Land Use Change Detection Using Remote Sensing Technology. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 9(10).
<https://doi.org/10.4172/2157-7617.1000496>
- Aneesha Satya, B., Shashi, M., & Deva, P. (2020). Future land use land cover scenario simulation using open source GIS for the city of Warangal, Telangana, India. *Applied Geomatics*, 12(3).
<https://doi.org/10.1007/s12518-020-00298-4>
- Anna, A. N., Priyana, Y., Fikriyah, V. N., Ibrahim, M. H., Ismail, K., Pamekar, M. S., & Asshodiq, A. D. T. (2021). Spatial Modelling of Local Flooding for Hazard Mitigation in Surakarta, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 21(87), 145–152.
<https://doi.org/10.21660/2021.87.j2306>
- Araya, Y. H., & Cabral, P. (2010). Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sensing*, 2(6).
<https://doi.org/10.3390/rs2061549>
- Awotwi, A., Anornu, G. K., Quaye-Ballard, J. A., & Annor, T. (2018). Monitoring land use and land cover changes due to extensive gold mining, urban expansion, and agriculture in the Pra River Basin of Ghana, 1986–2025. *Land Degradation and Development*, 29(10).
<https://doi.org/10.1002/ldr.3093>
- Berryman, K. (2006). Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand. In *Institute of Geological and Nuclear Sciences* (Issue September).
- BPBD. (2020). *Laporan Akhir Penyusunan Rencana Kontingensi Bencana Banjir Kota Surakarta Tahun 2020*.
- Bunyangha, J., Majaliwa, M. J. G., Muthumbi, A. W., Gichuki, N. N., & Egeru, A. (2021). Past and future land use/land cover changes from multi-temporal Landsat imagery in Mpologoma catchment, eastern Uganda. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3).
<https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.003>
- Fata Robbany, I., Gharghi, A., & Traub, K.-P. (2019). Land Use Change Detection and Urban Sprawl Monitoring in Metropolitan Area of Jakarta (Jabodetabek) from 2001 to 2015. *KnE Engineering*.
<https://doi.org/10.18502/keg.v4i3.5862>
- Fuadina, L. N., Rustiadi, E., & Pravitasari, A. E. (2020). The Dynamic of Land Use Changes and Regional Development in Bandung Metropolitan Area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 556(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/556/1/012002>
- Ghosh, P., Mukhopadhyay, A., Chanda, A., Mondal, P., Akhand, A., Mukherjee, S., Nayak, S. K., Ghosh, S., Mitra, D., Ghosh, T., & Hazra, S. (2017). Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling-A review. In *Remote Sensing Applications: Society and*

- Environment* (Vol. 5).
<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.01.005>
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebego, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2017). Cellular automata and Markov Chain (CA_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya, northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4). <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0397-6>
- Grace, U. M., Sawa, B. A., & Jaiyeoba, I. A. (2015). Multi-Temporal Remote Sensing of Landuse Dynamics in Zaria, Nigeria. *Journal of Environment and Earth Scienc*, 5(9), 121–138. www.iiste.org
- Guo, A., Zhang, Y., & Hao, Q. (2020). Monitoring and Simulation of Dynamic Spatiotemporal Land Use/Cover Changes. *Complexity*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3547323>
- Halmy, M. W. A., Gessler, P. E., Hicke, J. A., & Salem, B. B. (2015). Land use/land cover change detection and prediction in the north-western coastal desert of Egypt using Markov-CA. *Applied Geography*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.06.015>
- Hardin, P. J., Jackson, M. W., & Otterstrom, S. M. (2007). Mapping, measuring, and modeling Urban growth. In *Geo-Spatial Technologies in Urban Environments (Second Edition): Policy, Practice, and Pixels*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69417-5_8
- Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2021). A systematic review of landsat data for change detection applications: 50 years of monitoring the earth. In *Remote Sensing* (Vol. 13, Issue 15). <https://doi.org/10.3390/rs13152869>
- Huang, Y., Yang, B., Wang, M., Liu, B., & Yang, X. (2020). Analysis of the future land cover change in Beijing using CA–Markov chain model. *Environmental Earth Sciences*, 79(2). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8785-z>
- Indraprahasta, G. S., & Derudder, B. (2019). World City-ness in a historical perspective: Probing the long-term evolution of the Jakarta metropolitan area. *Habitat International*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.102000>
- Karimi, H., Jafarnejhad, J., Khaledi, J., & Ahmadi, P. (2018). Monitoring and prediction of land use/land cover changes using CA-Markov model: a case study of Ravansar County in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(19). <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3940-5>
- Khawaldah, H. A., Farhan, I., & Alzboun, N. M. (2020). Global Journal of Environmental Science and Management Simulation and prediction of land use and land cover change using GIS, remote sensing and CA-Markov model ARTICLE INFO. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 6(2).
- Kiggundu, N., Anaba, L. A., Banadda, N., Wanyama, J., & Kabenge, I. (2018). Assessing Land Use and Land Cover Changes in the Murchison Bay Catchment of Lake Victoria Basin in Uganda. *Journal of Sustainable Development*, 11(1). <https://doi.org/10.5539/jsd.v11n1p44>
- Koko, A. F., Yue, W., Abubakar, G. A., Hamed, R., & Alabsi, A. A. N. (2020). Monitoring and predicting spatio-temporal land use/land cover

- changes in Zaria City, Nigeria, through an integrated cellular automata and markov chain model (CA-Markov). *Sustainability (Switzerland)*, 12(24). <https://doi.org/10.3390/su122410452>
- Kugu, A. S. (2018). Urban Sprawl Pattern and Its Implications for Urban Management (Case Study : Zaria Urban Area , Nigeria). *International Journal of Architecture and Urban Development*, 8(4).
- Liping, C., Yujun, S., & Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PLoS ONE*, 13(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>
- Mardiansjah, F. H., Handayani, W., & Setyono, J. S. (2018). Pertumbuhan Penduduk Perkotaan dan Perkembangan Pola Distribusinya pada Kawasan Metropolitan Surakarta. *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 6(3). <https://doi.org/10.14710/jwl.6.3.215-233>
- Martinez, R., & Masron, I. N. (2020). Jakarta: A city of cities. *Cities*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102868>
- Munthali, M. G., Mustak, S., Adeola, A., Botai, J., Singh, S. K., & Davis, N. (2020). Modelling land use and land cover dynamics of Dedza district of Malawi using hybrid Cellular Automata and Markov model. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100276>
- NGCC. (2014). *30-Meter Global Land Cover Dataset Product Discription*.
- Noori, N., Kalin, L., Sen, S., Srivastava, P., & Lebleu, C. (2016). Identifying areas sensitive to land use/land cover change for downstream flooding in a coastal Alabama watershed. *Regional Environmental Change*, 16(6). <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0931-5>
- Pontius, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. In *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 32, Issue 15). <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Pradoto, W., Setiyono, B., Wahyono, H., & Joong Choi, M. (2024). Peri-urbanisation in Surakarta City and Economic Transformation in the Fast-Growing Region of Sukoharjo Regency. *Forum Geografi*, 38(2), 203–221. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v38i2.5497>
- Pramitha, A. A. S., Utomo, R. P., & Miladan, N. (2020). Efektivitas infrastruktur perkotaan dalam penanganan risiko banjir di Kota Surakarta. *Region : Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Perencanaan Partisipatif*, 15(1). <https://doi.org/10.20961/region.v15i1.23258>
- Pratama, A. P., Yudhistira, M. H., & Koomen, E. (2022). Highway expansion and urban sprawl in the Jakarta Metropolitan Area. *Land Use Policy*, 112. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105856>
- R. Yudarwati. (2017). Perubahan Penggunaan Lahan Dan Arah Pengendaliannya Di Kabupaten Bogor Dan Cianjur. In *Analisis pendapatan dan tingkat kesejahteraan rumah tangga petani* (Vol. 53, Issue 9).
- Radiani, J., Tasrif, M., & Rostiana, E. (2003). A dynamic model for spatial planning in metropolitan areas.

- International Conference of the System Dynamics Society.*
- Rakuasa, H., Helwend, J. K., & Sihasale, D. A. (2022). Pemetaan Daerah Rawan Banjir di Kota Ambon Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Geografi: Media Informasi Pengembangan Dan Profesi Kegeografian*, 19(2). <https://doi.org/10.15294/jg.v19i2.34240>
- Rakuasa, H., Wahab, W. A., Kamiludin, K., Jaelani, A., Ramdhani, R., & Rinaldi, M. (2023). Pemetaan Genangan Banjir di Jalan TB. Simatupang, Jakarta Selatan oleh Unit Pengelola, Penyelidikan, Pengukuran dan Pengujian (UP4) Dinas Sumber Daya Air DKI Jakarta. *Jurnal Altifani Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat*, 3(2). <https://doi.org/10.59395/altifani.v3i2.379>
- Rustiadi, E., Pravitasari, A. E., Setiawan, Y., Mulya, S. P., Pribadi, D. O., & Tsutsumida, N. (2021). Impact of continuous Jakarta megacity urban expansion on the formation of the Jakarta-Bandung conurbation over the rice farm regions. *Cities*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103000>
- Singh, S. K., Mustak, S., Srivastava, P. K., Szabó, S., & Islam, T. (2015). Predicting Spatial and Decadal LULC Changes Through Cellular Automata Markov Chain Models Using Earth Observation Datasets and Geo-information. *Environmental Processes*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s40710-015-0062-x>
- Sinnakaudan, S. K., Ab Ghani, A., Ahmad, M. S. S., & Zakaria, N. A. (2003). Flood risk mapping for Pari River incorporating sediment transport. *Environmental Modelling and Software*, 18(2). [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(02\)00068-3](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(02)00068-3)
- Subedi, P., Subedi, K., & Thapa, B. (2013). Application of a Hybrid Cellular Automaton – Markov (CA-Markov) Model in Land-Use Change Prediction: A Case Study of Saddle Creek Drainage Basin, Florida. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 1(6). <https://doi.org/10.12691/aees-1-6-5>
- Sugandhi, N., Rakuasa, H., Zainudin, Wahab, W. A., Kamiludin, Jaelani, A., Ramdhani, & Rinaldi, M. (2023). Pemodelan Spasial Limpasan Genangan Banjir dari DAS Ciliwung di Kel. Kebon Baru dan Kel. Bidara Cina DKI Jakarta. *Ulil Albab : Jurnal Ilmiah Multidisiplin*, 2(5).
- Sulaeman, A., Suhartanto, E., Litbang Sungai, B., Sumber Daya Air, P., & Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, K. (2017). Analisis Genangan Banjir Akibat Luapan Bengawan Solo Untuk Mendukung Peta Risiko Bencana Banjir Di Kabupaten Bojonegoro. *Jurnal Teknik Pengairan*, 8(2), 146–157. <https://doi.org/https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2017.008.02.1>
- Supriatna, Mukhtar, M. K., Wardani, K. K., Hashilah, F., & Manessa, M. D. M. (2022). CA-Markov Chain Model-based Predictions of Land Cover: A Case Study of Banjarmasin City. *Indonesian Journal of Geography*, 54(3). <https://doi.org/10.22146/IJG.71721>
- Vázquez-Quintero, G., Solís-Moreno, R., Pompa-García, M., Villarreal-Guerrero, F., Pinedo-Alvarez, C., & Pinedo-Alvarez, A. (2016). Detection and projection of forest changes by using the Markov Chain model and cellular automata. *Sustainability (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/su8030236>

- Viera, A. J., & Garrett, J. M. (2005). Understanding interobserver agreement: The kappa statistic. *Family Medicine*, 37(5).
- Warrens, M. J. (2015). Relative quantity and allocation disagreement measures for category-level accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 36(23). <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1110265>
- Wells, J., Meijaard, E., Abram, N., & Wich, S. (2013). *Forests, floods, people and wildlife on Borneo* (Vol. 11). UNEP.
- Wu, X., Shen, Z., Liu, R., & Ding, X. (2008). Land use/cover dynamics in response to changes in environmental and socio-political forces in the upper reaches of the Yangtze river, China. *Sensors*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/s8128104>
- Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., Belward, A. S., Cohen, W. B., Dwyer, J., Erb, A., Gao, F., Griffiths, P., Helder, D., Hermosilla, T., Hipple, J. D., Hostert, P., Hughes, M. J., ... Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>
- Zhang, X. Q. (2016). The trends, promises and challenges of urbanisation in the world. *Habitat International*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.11.018>