

Analisis Multitemporal Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Klasifikasi Resapan Air Tanah di Kota Surakarta

Sulistiani¹, I Putu Santikayasa^{1*}, Muh. Taufik¹, Rachmat Fajar Lubis²

Departemen Geofisika dan Meteorologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

²Pusat Riset Limnologi dan Sumber Daya Air, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bogor, Jawa Barat, Indonesia

* Email koresponden: ipsantika@apps.ipb.ac.id

Submit : 2023-10-20 Direvisi : 2024-02-15 Accepted: 2024-03-19

©2024 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

©2024 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Abstrak. Meningkatnya mobilitas penduduk menyebabkan peningkatan kebutuhan air serta perubahan penggunaan lahan di perkotaan. Adanya peningkatan kebutuhan air, maka sangat diperlukan sumber-sumber air baru khususnya dari air tanah. Disisi lain, perubahan lahan sangat mempengaruhi kemampuan pengisian air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara multitemporal dari perubahan penggunaan lahan tahun 2010-2040 dan mengidentifikasi kondisi resapan air tanah di Kota Surakarta. Adapun metode yang digunakan untuk prediksi *Land Use Land Cover (LULC)* yaitu menggunakan pendekatan metode *Cellular Automata - Artificial Neural Network (CA-ANN)* dimana untuk mengevaluasi hasil prediksi *LULC* menggunakan metode akurasi kappa, sedangkan untuk analisis kondisi resapan air tanah menggunakan metode skoring. Bahan yang digunakan yaitu *LULC* dari citra Landsat 7 ETM+ dan Landsat OLI tahun 2000, 2010, dan 2020, DEM, jenis tanah, kemiringan lereng, dan curah hujan. Hasil prediksi *LULC* di Kota Surakarta menunjukkan bahwa terjadi peningkatan *LULC* untuk kawasan terbangun dengan total luasan sebesar 71,08% pada tahun 2030 dan 71,83% pada tahun 2040. Selain kawasan terbangun, area vegetasi mengalami penurunan sebesar 1,26% di tahun 2040. Hasil simulasi kondisi resapan air tanah di Kota Surakarta tahun 2020 dan 2040 menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki 5 kelas klasifikasi yaitu kondisi resapan baik, normal alami, mulai kritis, agak kritis, dan kritis. Kota Surakarta didominasi oleh kelas agak kritis dan kritis dengan luasan area sebesar 17,29 km² tahun 2020 menjadi 20,85 km² tahun 2040 untuk kelas IV yaitu agak kritis, dan untuk kelas V yaitu kritis memiliki luasan area sebesar 13,91 km² tahun 2020 menjadi 15,08 km² tahun 2040.

Kata kunci: CA-ANN, Penginderaan Jauh, *LULC*, Resapan Air tanah

Abstract. Increased population mobility leads to increased water demand and changes in land use in urban areas. With the increase in water demand, new water sources, especially from groundwater, are needed. On the other hand, land use change greatly affects groundwater recharge capacity. This research aims to analyse multitemporal land use change from 2010-2040 and identify the condition of groundwater recharge in Surakarta City. The method used for *Land Use Land Cover (LULC)* prediction is using *Cellular Automata - Artificial Neural Network (CA-ANN)* method approach where to evaluate the *LULC* prediction results using the kappa accuracy method, while for the analysis of groundwater recharge condition using scoring method. The materials used are *LULC* from Landsat 7 ETM+ and Landsat OLI images in 2000, 2010, and 2020, DEM, soil type, slope, and rainfall. The prediction results of *LULC* in Surakarta City show that there is an increase in *LULC* for built-up areas with a total area of 71.08% in 2030 and 71.83% in 2040. In addition to the built-up area, the vegetation area decreased by 1.26% in 2040. Meanwhile, the simulation results of groundwater infiltration conditions in Surakarta City in 2020 and 2040 show that the research location has 5 classification classes, namely good infiltration conditions, natural normal, starting to be critical, somewhat critical, and critical. Surakarta City is dominated by the mildly critical and critical classes with an area of 17.29 km² in 2020 to 20.85 km² in 2040 for class IV which is mildly critical, and for class V which is critical has an area of 13.91 km² in 2020 to 15.08 km² in 2040.

Keywords: CA-ANN, Remote Sensing, *LULC*, Groundwater Recharge

PENDAHULUAN

Pengaruh antropogenik pada *Land Use Land Cover (LULC)* adalah salah satu faktor pendorong dari mekanisme perubahan penggunaan lahan regional (Khawaladah, 2016). Pembangunan Kota menyebabkan hilangnya lahan pertanian dan Kawasan hijau. Seperti yang disampaikan pada penelitian Liu (2005) dan Abbas *et al* (2021) yang menyebutkan bahwa secara tidak langsung pertumbuhan kota yang massif menjadi penyebab utama hilangnya lahan pertanian dan kawasan hijau, Wang *et al.*, 2020 dan Qiao *et al.*, 2020 juga menyebutkan

bahwa perubahan lahan mempengaruhi perubahan iklim dan kehidupan manusia. Pesatnya pertumbuhan penduduk perkotaan mengakibatkan munculnya fenomena urbanisasi (Abbas, 2002) yang memberikan dampak peningkatan kepadatan penduduk. Selain dampak kependudukan, perkembangan perkotaan memberikan dampak keruangan yaitu akan munculnya tuntutan kebutuhan ruang dalam rangka untuk memenuhi kebutuhan penduduk (Liu *et al.*, 2020). Di sisi lain, peningkatan lahan terbangun mampu memicu peningkatan wilayah kedap air. Hal tersebut menyebabkan

semakin menipisnya ketersediaan air tanah di suatu wilayah salah satunya di Kota Surakarta.

Wilayah Kota Surakarta telah mengalami perubahan dan tutupan lahan yang cepat dan kegiatan pembangunan yang masih terus meningkat (Wibisono *et al.*, 2022). Adanya peningkatan fasilitas kota dan aksesibilitas di kota Surakarta disebabkan karena letak kota ini sangat strategis. Dengan demikian kebutuhan lahan terbangun akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya populasi dan mobilitas penduduk. Hal tersebut secara langsung maka akan mempengaruhi kondisi hidrologi khususnya air tanah di Kota Surakarta. Kebutuhan air di Kota Surakarta juga meningkat pesat seiring dengan meningkatnya urbanisasi di kota tersebut. Pada tahun 2016, jumlah total kebutuhan air sebesar 1.163,428 liter/detik dan pada tahun 2022 sebesar 1.286,763 liter/detik (DLH Surakarta 2021). Dampak perubahan lahan terhadap resapan air tanah tidak cukup diketahui oleh masyarakat, meskipun air tanah merupakan sumber air tawar yang substansial untuk keperluan domestik, pertanian, dan komersial yang dapat memicu semakin menipisnya ketersediaan air tanah (Mengistu *et al.* 2022). Secara spasial di Kota Surakarta memiliki kawasan resapan air dengan kondisi kritis seluas 2.090 ha atau 48% dari total luas Kota Surakarta (DLH Kota Surakarta 2022). Kondisi dari kritisnya kawasan resapan tersebut dipengaruhi oleh masifnya perubahan *LULC* di Kota Surakarta.

Pemantauan perubahan *LULC* dapat diestimasi secara visual dengan memanfaatkan baik penampakan maupun estimasi serta peningkatan dan penurunan luas lahan (As-syakur *et al.*, 2008). Banyak model perubahan *LULC* spasial yang digunakan untuk menganalisis dan memproyeksikan *LULC*, seperti Dinamica (Sloan *et al.*, 2018), FLUS (Liu *et al.*, 2017), SLEUTH (Liu *et al.*, 2020), ANN-Markov Chain (Pahlavani *et al.*, 2017), CA-ANN (Yang *et al.*, 2015), dan CLUE-S (Verburg *et al.*, 2007). Xu *et al.* (2019) menghasilkan bahwa model CA-ANN memiliki akurasi lebih tinggi dibandingkan dengan *Logistic Regression (LR)* dan *Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Ini disebabkan adanya hubungan yang tidak linier pada pertumbuhan kota, dimana hal tersebut tidak bisa diatasi oleh model LR (Mustafa *et al.*, 2018). Dalam penelitian komparasi model CA yang dilakukan oleh Fariz *et al.* (2020) juga menghasilkan bahwa jika dilihat dari total nilai *false* dan *misses*, model CA dari ANN lebih baik dibanding

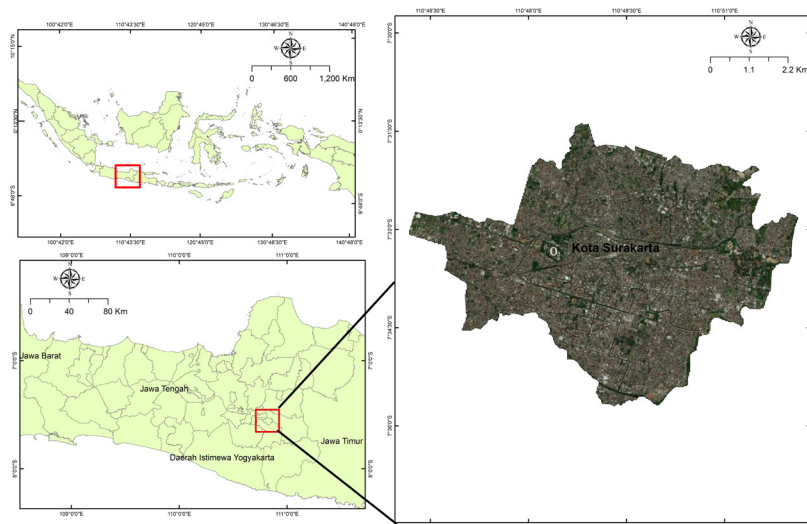
LR. Pada penelitian ini, model *Cellular Automata-Artificial Neural Network (CA-ANN)* diaplikasikan untuk melakukan prediksi perubahan *LULC* di Kota Surakarta pada tahun 2030 dan 2040 karena memiliki nilai akurasi yang tinggi serta melibatkan faktor-faktor fisik, sosial, dan ekonomi sehingga lebih masif dalam hal prediksi *LULC*. Perubahan *LULC* yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan lingkungan khususnya kondisi resapan air (Abbas *et al.*, 2021).

Penelitian mengenai pengaruh *LULC* terhadap kondisi resapan di Kota Surakarta telah dilakukan oleh peneliti terdahulu seperti yang dilakukan oleh Febrianingsih (2021) dengan judul *Analisis Daerah Resapan Air terhadap Tata Ruang Wilayah di Kota Surakarta*, dan penelitian dari Kusumastuti (2020) dengan judul *Kemampuan Ruang Terbuka Hijau Publik dalam Berkontribusi Meresapkan Genangan Air Hujan di Kota Surakarta*. Dari kedua penelitian tersebut menganalisis daerah resapan berdasarkan jenis *LULC* tertentu dan dalam kondisi eksisting saja. Dengan demikian, diperlukannya kajian yang membahas proyeksi perubahan *LULC* terhadap resapan air hingga tahun 2040 sesuai dengan Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Surakarta 2021-2041 supaya pemerintah dapat mengambil kebijakan dalam menanggapi permasalahan tersebut. Perubahan *LULC* dan kondisi resapan air perlu dimonitoring guna untuk mendukung penataan ruang dan kondisi ketersediaan air tanah di masa yang akan datang. Kebaharuan serta keunikan dari penelitian analisa pengaruh *LULC* secara multitemporal terhadap kondisi resapan air di Kota Surakarta kali ini dapat dilihat pada tujuan dan metode yang digunakan. Tujuan penelitian ini yaitu untuk memprediksi perubahan *LULC* menggunakan pendekatan metode *Cellular Automata – Artificial Neural Network (CA-ANN)*, dan mengidentifikasi kondisi daerah resapan air tanah di Kota Surakarta pada tahun 2020 dan 2040.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian

Kota Surakarta secara geografis terletak pada koordinat $110^{\circ} 45' 15''$ dan $110^{\circ} 45' 35''$ Bujur Timur dan antara $7^{\circ} 36'$ dan $7^{\circ} 56'$ Lintang Selatan. Secara administratif terletak di Provinsi Jawa Tengah dengan luas 46.72km^2 (Gambar 1). Kota Surakarta memiliki persentase kemiringan lereng yang berkisar antara 0-15% atau $0-8^{\circ}$ serta memiliki akumulasi hujan tahunan berkisar antara 2300 mm hingga 3774 mm.



Gambar 1. Lokasi penelitian di Kota Surakarta, Jawa tengah (Penulis, 2023)

Penelitian ini menggunakan data berupa peta jenis tanah, peta DEM (*Digital Elevation Model*) dengan resolusi 30 m, dan citra landsat ETM+ dan OLI (Tabel 1). Analisis data menggunakan aplikasi ENVI dan QGIS 2.18 yang terinstal dalam komputer dengan sistem operasi OS Ms Window.

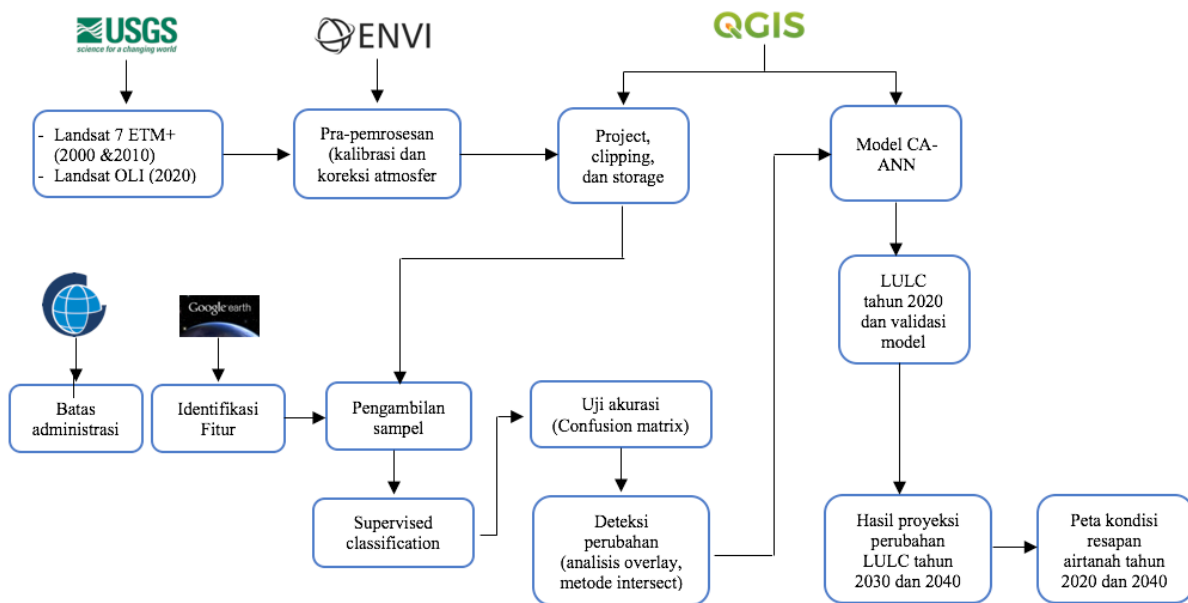
Analisis data spasial

Data yang digunakan pada penelitian ini berupa data LULC Kota Surakarta tahun 2000, 2010, dan 2020 yang diperoleh dari citra landsat 7 ETM+ dan landsat 8 OLI dengan resolusi spasial 30 m. Data penggunaan lahan ini kemudian dilakukan reklasifikasi menjadi empat kelas LULC yaitu kawasan terbangun, vegetasi, badan air, dan jalan. Data jalan dan badan air dari hasil analisis citra, kemudian digabungkan (*merging*) dengan data jalan dan badan air yang diperoleh dari peta Rupa Bumi Indonesia (RBI). Informasi jarak dari sungai dan jarak dari jalan diperoleh dari data sungai dan jalan hasil penggabungan, dimana dari kedua data ini tidak terfokus pada jenis sungai dan kelas jaringan jalan karena dalam model CA-ANN hanya mengidentifikasi dari hasil

perhitungan jarak sungai dan jalan secara general. Sedangkan data *Digital Elevation Model (DEM)* diperoleh dari DEMNAS dengan resolusi spasial 30 x 30 m, kemudian untuk kelergan diperoleh dari analisis data DEM menggunakan fungsi slope dengan satuan derajat (°) pada QGIS. Data sosial berupa kepadatan penduduk diperoleh dari instansi BPS Kota Surakarta. Sedangkan untuk skala output dari seluruh peta baik dari hasil pemodelan LULC maupun peta daerah resapan masing-masing memiliki skala 1:50000. Alur penelitian secara detail digambarkan pada Gambar 2.

Klasifikasi Land Use Land Cover (LULC)

Sebelum proses klasifikasi LULC data citra diekstraksi dan diproyeksi menggunakan proyeksi koordinat UTM WGS 1984 Zone 49S. Proses klasifikasi dilakukan dengan pendekatan klasifikasi terbimbing (*supervised classification*). Identifikasi wilayah yang masuk dalam kelas kawasan terbangun, vegetasi, badan air, dan jalan sesuai dengan hasil identifikasi visual tutupan lahan pada Tabel 2.



Gambar 2. Diagram alir metode penelitian

Tabel 1. Sumber data

Kategori	Deskripsi	Tahun	Sumber
Data Multitemporal	LULC	2000 – 2020	https://www.usgs.gov/
Faktor Sosial Ekonomi	Kepadatan penduduk	2000 – 2020	BPS Kota Surakarta
	Jaringan jalan	2000 – 2020	Peta Rupa Bumi Indonesia Skala 1:50000
Faktor Fisik	DEM		https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/
	Kelerengan (<i>Slope</i>)		Perhitungan dari DEM
	Jaringan sungai		Peta Rupa Bumi Indonesia Skala 1:50000

Tabel 2. Klasifikasi penggunaan dan tutupan lahan berdasarkan kenampakan citra

Jenis LULC	Deskripsi
Kawasan terbangun	Lahan perkotaan, permukiman, industri, dan lahan kontruksi lainnya
Vegetasi	Taman kota (RTH), sawah, dan semak belukar
Jalan	Jalan raya dan jalan di area permukiman
Badan Air	Sungai

Prediksi perubahan LULC

Prediksi perubahan LULC dianalisis menggunakan plugin *Modules for Land-Use Change Simulation (MOLUSCE)* di dalam QGIS untuk memperkirakan perubahan spatiotemporal dan menghitung transisi LULC antara interval penelitian (2000-2010, 2010-2020, dan 2000-2020). Matriks probabilitas perubahan dan transisi area menggunakan data LULC dan *driving factors*, yang mencakup kategori lanskap pada awal dan akhir tahun. Pendekatan *perceptron multilayer* digunakan untuk pemodelan potensi transisi, sedangkan untuk parameter inputan dari CA-ANN ini menggunakan data DEM, kemiringan, jarak dari sungai, dan jarak dari jalan raya (Tabel 1). Variabel-variabel ini umum digunakan dalam analisis perubahan LULC karena memberikan data yang dapat direproduksi dengan pengaruh fisik dan antropogenik pada dinamika LULC (Rizwan *et al.*, 2022).

Validasi model prediksi

Model simulasi pada dasarnya digunakan untuk mengurangi dinamika pengaruh fisik, sosial, dan ekonomi di wilayah perkotaan sehingga dinamika tersebut akan lebih mudah dipahami. Validasi yang dilakukan disini yaitu menggunakan data 2010 untuk LULC observasi tahun 2020 yaitu dari hasil pengamatan citra dan LULC hasil simulasi model tahun 2020. Dari kedua LULC tersebut kemudian dihitung berapa nilai validasinya. Pendekatan CA-ANN lebih efektif digunakan dalam prediksi perubahan LULC secara temporal dan dinamis (Rahman *et al.*, 2017). Plugin MOLUSCE secara efisien menghitung analisis perubahan LULC dan sangat cocok untuk menghitung perubahan LULC secara spatiotemporal, melakukan *transition potential modelling*, dan mensimulasikan skenario kondisi proyeksi (Tantawi *et al.*, 2019; Gismondi 2021). Saat melakukan *transition potential modelling* yaitu dengan menggunakan metode ANN dengan nilai *Neighbourhood* 1 px, *learning rate* 0,01, *maximum iterations* 100, *hidden layers* 10, dan momentum sebanyak 0,05. Sedangkan untuk validasi model dan *uncertainty* prediksi, plugin MOLUSCE menyediakan teknik validasi kappa yang

membandingkan antara LULC aktual dengan hasil proyeksi. Akurasi nilai kappa ditunjukkan pada Tabel 3.

Klasifikasi resapan air tanah

Klasifikasi resapan air tanah diperoleh dari proses skoring dan *overlay* peta tematik jenis tanah, kemiringan lereng, curah hujan, potensi resapan air tanah, dan penggunaan lahan. Nilai skor jenis tanah, kemiringan lereng (*slope*), curah hujan, dan penggunaan lahan diperoleh dari Permen LHK Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2022. Teknik skoring sendiri memiliki pengertian yaitu suatu pendekatan untuk mengukur potensi di suatu area dengan memberikan penilaian pada setiap parameter, sehingga dapat ditentukan kelas kemampuan lahan berdasarkan perhitungan nilai dari setiap parameter yang ada pada lahan tersebut (SuprptoHardjo, 1962). Metode skoring ini telah digunakan sejak abad ke-18, dimana penentuan nilainya didasarkan pada penjumlahan nilai parameter yang diacu (Pomerol *et al.*, 2000). Metode skoring merupakan salah satu metode untuk mengambil keputusan secara multi-kriteria yang sangat sering digunakan karena memiliki kelebihan sederhana dan mudah dalam pengaplikasiannya (Obuch dan Starzec, 2020). Metode ini juga digunakan untuk menilai masalah lingkungan (Yoe, 2002), termasuk dalam hal pengelolaan air dan air limbah (Turunen *et al.*, 2018). Klasifikasi resapan air tanah tahun 2020 yang dihasilkan dari skoring ini kemudian dibandingkan dengan resapan air tanah observasi dengan metode *overlay* untuk menilai kesesuaian hasil model, jika hasil menunjukkan kesesuaian maka selanjutnya dilakukan prediksi resapan air tanah tahun 2040.

1) Jenis tanah

Jenis tanah mempengaruhi proses penyerapan air; tekstur tanah berpasir dapat menyerap air lebih cepat dibandingkan tanah liat (Arsyad *et al.*, 2018) karena ukuran partikelnya yang kecil sehingga menghambat pergerakan air. Peta jenis tanah yang digunakan pada penelitian ini menggunakan skala 1:50000, sehingga Kota Surakarta terbagi menjadi 4 jenis tanah yang berbeda yaitu grumusol, regosol, alluvial, dan kompleks grumusol dan latosol. Skor jenis tanah dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Interpretasi Koefisien Kappa (Sumber: Landis dan Koch, 2012)

Indek Kappa	Keterangan
<0,20	Lemah
0,21 – 0,40	Sederhana Lemah
0,41 – 0,60	Sederhana
0,61 – 0,80	Baik
0,81 – 1,00	Sangat Baik

Tabel 4. Skor dari jenis tanah (Sumber: DJRRL, 1998)

No	Jenis Tanah	Infiltrasi	Skor	Notasi
1	Regosol	Besar	5	a
2	Alluvial dan Andosol	Agak besar	4	b
3	Latosol, podsolik merah kuning	Sedang	3	c
4	Litosol, mediteran	Agak kecil	2	d
5	Grumusol	Kecil	1	e

2) Kemiringan lereng

Kemiringan lereng mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap kemampuan resapan air, lereng yang curam akan mengalirkan air dengan cepat tanpa melalui proses infiltrasi (Nuryanti *et al.*, 2018). Sebaliknya, kemiringan yang landai akan menghambat pergerakan air limpasan. Skor lereng dapat dilihat pada Tabel 5.

3) Curah hujan

Curah hujan mempengaruhi banyaknya air yang jatuh ke permukaan tanah. Intensitas hujan yang tinggi akan mengakibatkan limpasan air permukaan lebih tinggi dari daya serap airnya (Adzhani & Tayubi, 2019). Skor curah hujan dapat dilihat pada Tabel 6.

4) Jenis penggunaan lahan

Penggunaan lahan merupakan parameter yang berkaitan erat dengan penyerapan air. Vegetasi penutup lahan akan meningkatkan daya serap air sehingga

mencegah peningkatan aliran air permukaan (Fauzi *et al.*, 2023). Skor penggunaan lahan dapat dilihat pada Tabel 7.

5) Klasifikasi Potensi Air tanah

Potensi air tanah adalah air yang terdapat dalam lapisan batuan yang disebut akuifer. Dimana mampu menampung dan mengalirkan air. Informasi mengenai potensi air tanah dapat ditemukan dalam peta hidrogeologi yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral.

Klasifikasi kondisi resapan diperoleh dari hasil perbandingan antara nilai infiltrasi potensial dengan nilai infiltrasi aktual. Perolehan nilai infiltrasi potensial dari hasil skoring pada masing-masing atribut yaitu peta jenis tanah, kemiringan lereng, curah hujan, dan potensi resapan air tanah. Sedangkan untuk nilai infiltrasi aktual diperoleh dari klasifikasi jenis tutupan lahan (Tabel 7). Klasifikasi kondisi resapan tersaji pada Tabel 9.

Tabel 5. Skor dari kemiringan lereng (Sumber: DJRRL, 1998)

No	Kemiringan lereng (%)	Infiltrasi	Skor	Notasi
1	0 – 8	Besar	5	a
2	8 – 15	Agak besar	4	b
3	15 – 25	Sedang	3	c
4	25 – 45	Agak kecil	2	d
5	>45	Kecil	1	e

Tabel 6. Skor dari curah hujan (Sumber: Chow, 1968)

No	Curah hujan (mm/tahun)	Infiltrasi	Skor	Notasi
1	>5000	Besar	5	a
2	4500 – 5000	Agak besar	4	b
3	3500 – 4500	Sedang	3	c
4	2500 – 3500	Agak kecil	2	d
5	<2500	Kecil	1	e

Tabel 7. Skor dari penggunaan lahan (Sumber: DJRRL, 1998)

No	Jenis penggunaan lahan	Infiltrasi	Skor	Notasi
1	Hutan lahan kering primer, hutan lahan kering sekunder	Besar	5	A
2	Perkebunan	Agak besar	4	B
3	Semak belukar	Sedang	3	C
4	Pertanian lahan kering, pertanian lahan campuran, lading, lahan kering	Agak kecil	2	D
5	Badan air, kawasan terbangun, persawahan	Kecil	1	E

Tabel 8. Klasifikasi potensi air tanah (Sumber: DJRRL, 1998)

Potensi air tanah	Infiltrasi	Skor	Notasi
Tinggi di akuifer dangkal	Besar	4	a
Sedang di akuifer dangkal	Agak besar	3	b
Rendah di akuifer dangkal	Sedang	2	c
Nihil di akuifer dangkal	Kecil	1	d

Tabel 9. Klasifikasi kondisi daerah resapan (Sumber: Permen LHK, 2022)

Kelas	Deskripsi	Keterangan	Kode
I	Baik	eA, eB, eC, eD, dA, dB, dC, cA, cB, bA	Resapan baik (R_b)
II	Normal alami	aA, bB, cC, dD, eE	Resapan normal alami (R_n)
III	Mulai kritis	aB, bC, cD, dE	Resapan mulai kritis (R_{mk})
IV	Agak kritis	aC, bD, cE	Resapan agak kritis (R_a)
V	Kritis	aD, bE	Resapan kritis (R_{kr})
VI	Sangat kritis	aE	Resapan sangat kritis (R_{sk})

Tabel 10. Area LULC dari tahun 2000 – 2020 (km²)

Jenis LULC	2000		2010		2020	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
Kawasan terbangun	31,27	66,93	31,66	67,77	32,54	69,65
Vegetasi	9,55	20,44	8,37	17,92	7,28	15,58
Jalan	5,2	11,13	5,84	12,50	6,05	12,95
Badan air	0,7	1,50	0,85	1,82	0,85	1,82

Kelas I terjadi ketika nilai infiltrasi aktual lebih tinggi daripada infiltrasi potensial, kelas II terjadi ketika nilai infiltrasi aktual sama dengan infiltrasi potensial, kelas III terjadi ketika nilai infiltrasi aktual menurun satu tingkat dari infiltrasi potensial, kelas IV terjadi jika nilai infiltrasi aktual menurun dua tingkat dari nilai infiltrasi potensial, kelas V terjadi jika nilai infiltrasi aktual menurun tiga tingkat dari nilai infiltrasi potensial, dan yang terakhir untuk kelas V terjadi ketika nilai infiltrasi aktual berubah dari sangat besar menjadi sangat kecil (Permen LHK, 2022).

Proyeksi resapan air tanah

Proyeksi resapan air tanah dianalisis berdasarkan perubahan penggunaan lahan dengan asumsi faktor-faktor pendukung lainnya bersifat konstan. Dengan demikian, analisis resapan air tanah pada periode proyeksi yaitu tahun 2040 dihitung menggunakan data jenis tanah, kemiringan lereng, curah hujan, dan potensi air tanah pada kondisi eksisting dan data penggunaan lahan pada periode proyeksi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis perubahan spasiotemporal

Secara umum jenis penggunaan lahan yang mendominasi di Kota Surakarta adalah kawasan terbangun seperti industri, jasa, dan permukiman. Seperti yang terlihat pada tabel 10 menunjukkan perubahan penggunaan lahan, dimana jenis penggunaan lahan kawasan terbangun memiliki perubahan yang cukup besar dengan persentase sebesar 69,65%. Berkebalikan dengan jenis penggunaan lahan vegetasi yang mengalami penurunan yang cukup signifikan dengan luasan dari 9,55 km² menjadi 7,28 km². Badan jalan mengalami peningkatan 1,82% selama 2000 – 2020, sedangkan untuk badan air mengalami peningkatan di tahun 2010 sebesar 0,32% dan setelah itu konstan hingga tahun 2020.

Pola perubahan LULC diidentifikasi dengan cara *overlay* peta penggunaan lahan tahun yang akan diinterpretasi dengan menggunakan program GIS. Perubahan LULC tahun 2000 – 2020 yang terjadi didominasi oleh kenaikan kawasan terbangun. Tabel 11 menunjukkan angka perubahan atau

selisih dari luasan periode studi dan gambar 4 menunjukkan area spasiotemporal LULC di Kota Surakarta. Tabel 12 menunjukkan kontribusi jenis LULC terhadap perubahan LULC tahun 2000 – 2020, terdapat perubahan penggunaan lahan kawasan terbangun menjadi badan air sebagai contohnya di Taman Balekambang. Taman tersebut merupakan bekas bangunan yang terbengkalai yang ditutup tahun 1995. Saat ini menjadi kawasan wisata dan terdapat danau buatan seluas 16 ha (Dyah, 2018). Terdapat perubahan vegetasi menjadi badan air juga terjadi pada Danau Candradimuka Kecamatan Banjarsari, dimana dulunya berupa hutan dan permukiman dan saat ini menjadi waduk seluas 2 ha. Tahun 2014 Kota Surakarta mengalami perluasan Jalan Slamet Riyadi dari 4 menjadi 6 jalur, sehingga terdapat perubahan dari vegetasi menjadi badan jalan. Selain itu, juga terdapat pembangunan *fly over* Palur yang harus mengorbankan sejumlah pepohonan dan penggusuran sejumlah bangunan. Jenis LULC badan air juga mengalami perubahan salah satunya menjadi vegetasi, sebagai contohnya adalah penanaman pohon rindang di sepanjang bantaran Sungai Bengawan Solo sehingga bantaran sungai ini sebagai ruang terbuka hijau bagi warga (Prakoso, 2022).

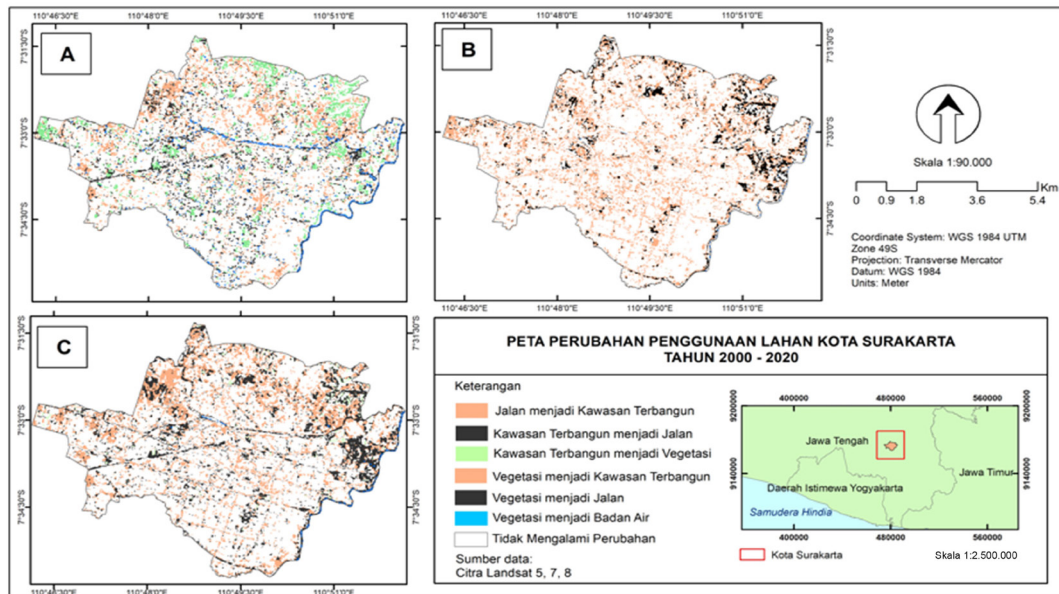
Hasil validasi model LULC

Pemodelan LULC dilakukan dengan menggunakan Modul *MOLUSCE* pada QGIS. Hasil pemodelan berupa peta proyeksi LULC tahun 2020 yang nantinya akan dibandingkan dengan peta LULC 2020 observasi (Gambar 5). Perbandingan antara luaran model dengan observasi ini diuji dengan menggunakan metode uji akurasi kappa (Tabel 13).

Hasil perhitungan model dengan kondisi lahan ekisting memiliki sedikit perbedaan sebagaimana dalam Gambar 5 dibawah. Kondisi LULC observasi memiliki persentase vegetasi 3% lebih besar dibanding hasil dari model. Adapun untuk kawasan terbangun, badan air, dan jalan memiliki perbedaan persentase yang tidak terlalu besar. Hal tersebut terjadi karena penggunaan parameter yang digunakan. Setelah didapatkan hasil prediksi dari LULC 2020 berdasarkan data tahun 2010 kemudian dilakukan uji validasi dengan metode perhitungan akurasi kappa terhadap LULC observasi tahun 2020 yang

Tabel 11. Perubahan *LULC* tahun 2000 – 2020 berdasarkan data

Jenis <i>LULC</i>	2000 – 2010	2010 – 2020	2000 – 2020
	Km ²	Km ²	Km ²
Kawasan terbangun	0,39	0,88	1,27
Vegetasi	-1,12	-1,09	-2,27
Jalan	0,64	0,21	0,85
Badan air	0,15	0,00	0,15



Gambar 4. Perubahan *LULC* di Kota Surakarta: (a) peta perubahan tahun 2000 – 2010, (b) peta perubahan tahun 2010 – 2020, (c) peta perubahan tahun 2000 – 2020

Tabel 12. Kontribusi dari jenis *LULC* terhadap perubahan *LULC* tahun 2000 – 2020 (%)

Jenis <i>LULC</i>	Kawasan terbangun	Vegetasi	Jalan	Badan air
Kawasan terbangun	0,00	14,29	44,21	0,80
Vegetasi	9,76	0,00	19,47	34,24
Jalan	7,93	4,17	0,00	0,00
Badan air	1,76	0,96	0,00	0,00

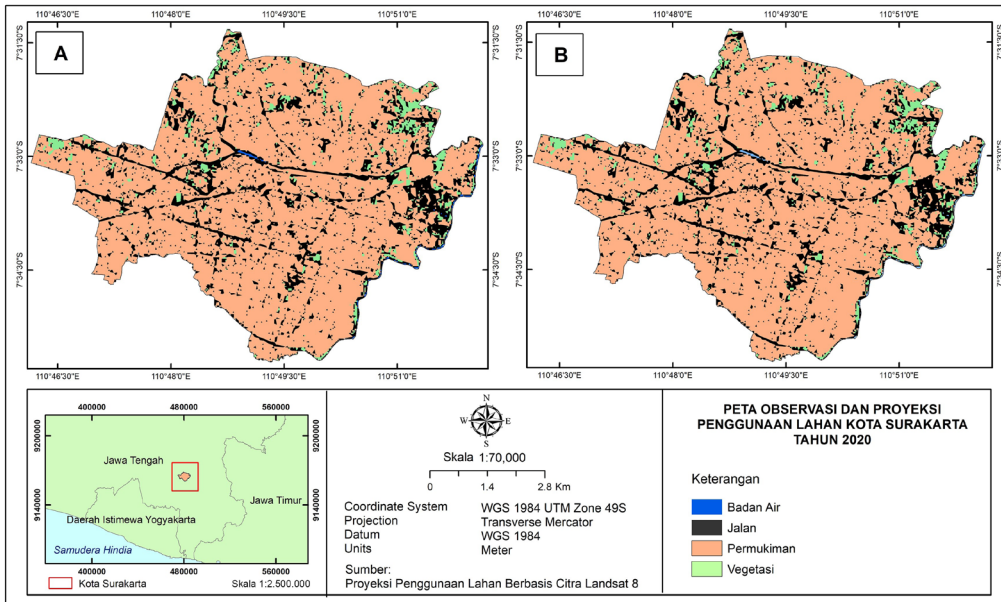
menghasilkan nilai sebesar 0,82 (Tabel 13). Nilai kappa tersebut dapat diinterpretasi bahwa pemodelan memiliki kesesuaian yang baik (Landis dan Koch, 2012). Nilai validasi tersebut menunjukkan *uncertainty* hasil proyeksi masih di bawah 20%, sehingga model ini dapat diterima dan dapat digunakan untuk melakukan proyeksi kedepan berdasarkan data *LULC* tahun 2010 dan 2020.

Proyeksi *LULC*

Perubahan dinamis di negara-negara berkembang muncul karena kurangnya kesadaran mengenai penggunaan sumber daya lingkungan dan eksploitasi berlebihan tanpa mempertimbangkan risiko di masa depan. Hal ini berasal dari kelemahan kebijakan hukum yang tidak memadai (Belihu *et al.*, 2020). Demikian pula dengan Kota Surakarta yang mengalami perubahan penggunaan lahan, sehingga diperlukannya model prediksi perubahan penggunaan lahan selama 20 tahun kedepan. Ini merujuk pada Peraturan Pemerintah Nomor 26

Tahun 2008 tentang RTRW Nasional yang berfungsi sebagai panduan dalam perencanaan pembangunan nasional dan pengaturan tata ruang di tingkat provinsi, kabupaten, dan kota. Dokumen Rencana Detail Tata Ruang Kawasan Kota Surakarta juga mencakup periode 20 tahun, yaitu dari 2021-2041.

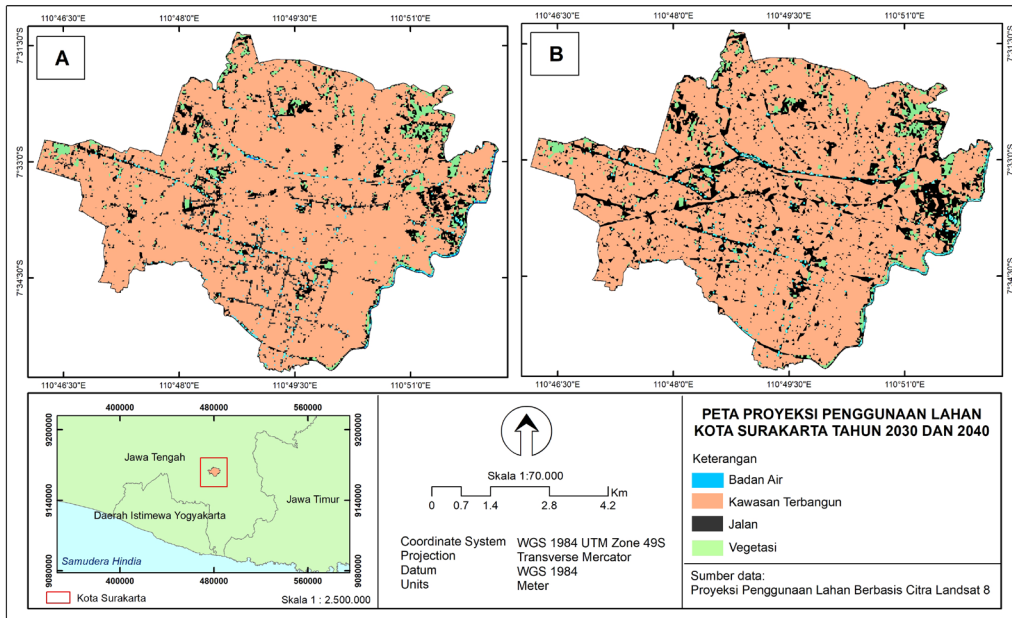
Hasil prediksi *LULC* tahun 2030 dan 2040 berdasarkan metode ANN menunjukkan jenis *LULC* Kawasan terbangun yang mendominasi di Kota Surakarta dengan luasan 33,21 km² tahun 2030 dan 33,56 km² tahun 2040, sedangkan untuk vegetasi mengalami penurunan sebesar 1,26%, serta untuk badan jalan mengalami peningkatan sebesar 0,51% pada tahun 2040. Kawasan terbangun akan terus meningkat khususnya di daerah yang memiliki akses jalan yang selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Nabila (2023) yang menjelaskan bahwa semakin dekat penggunaan lahan dengan jalan, perubahan penggunaan lahan tersebut akan berlangsung lebih cepat.



Gambar 5. LULC tahun 2020: (a) kondisi observasi (eksisting) (b) kondisi model (proyeksi)

Tabel 13. LULC tahun 2020 kondisi eksisting dan proyeksi

Jenis LULC	Observasi		Model		Nilai Kappa (Overall)
	Km ²	%	Km ²	%	
Kawasan Terbangun	31,27	66,93	31,66	67,77	0,82
Vegetasi	9,55	20,44	8,37	17,92	
Jalan	5,2	11,13	5,84	12,50	
Badan Air	0,7	1,50	0,85	1,82	



Gambar 6. Proyeksi LULC tahun 2030 dan 2040

Tabel 14. Akurasi dari LULC prediksi

Jenis LULC	2030		2040	
	Km ²	%	Km ²	%
Kawasan Terbangun	33,21	71,08	33,56	71,83
Vegetasi	6,13	13,12	5,54	11,86
Jalan	6,53	13,98	6,77	14,49
Badan Air	0,85	1,82	0,85	1,82

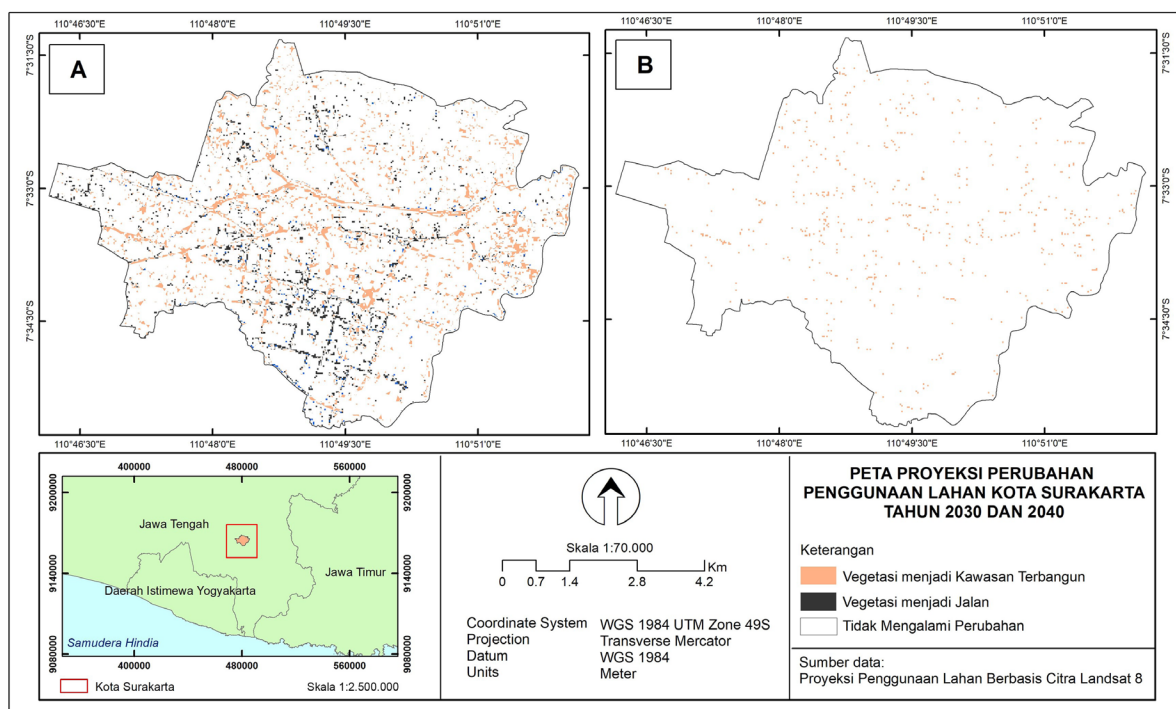
Prediksi perubahan LULC

Analisis perubahan LULC membahas terkait variasi dinamis spasial dari pola LULC selama periode penelitian. Hasil dari tahun 2020 hingga 2030 menunjukkan perubahan luasan yang signifikan di area vegetasi dan kawasan terbangun, sedangkan untuk perubahan LULC tahun 2030-2040 menunjukkan terjadi perubahan yang didominasi pada jenis kawasan terbangun. Faktor sosial dan fisik menjadi faktor utama dalam perubahan dan pemanfaatan penggunaan lahan, seperti yang terlihat pada Gambar 7 bahwa kawasan terbangun lebih mendominasi di area sepanjang jalan dan vegetasi yang menyebar di area pinggiran kota. Selain itu, hal ini selaras dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Fitriana *et al.*, (2017) bahwa lahan peruntukkan kawasan terbangun di Kota Surakarta mengalami peningkatan di tahun 2030. Selain itu, dalam penelitian Wibisono *et al.*, (2022) juga menjelaskan bahwa pada tahun 2030-2040 perkembangan fisik wilayah permukiman mengarah ke selatan menuju ke Kabupaten Sukoharjo dan arah barat.

Hasil kondisi daerah resapan air

Perubahan penggunaan lahan berdampak secara langsung pada resapan dan dinamika air tanah (Scanlon *et al.*, 2005). Hal tersebut juga disebabkan karena minimnya kebijakan penggunaan lahan berkontribusi terhadap degradasi air tanah

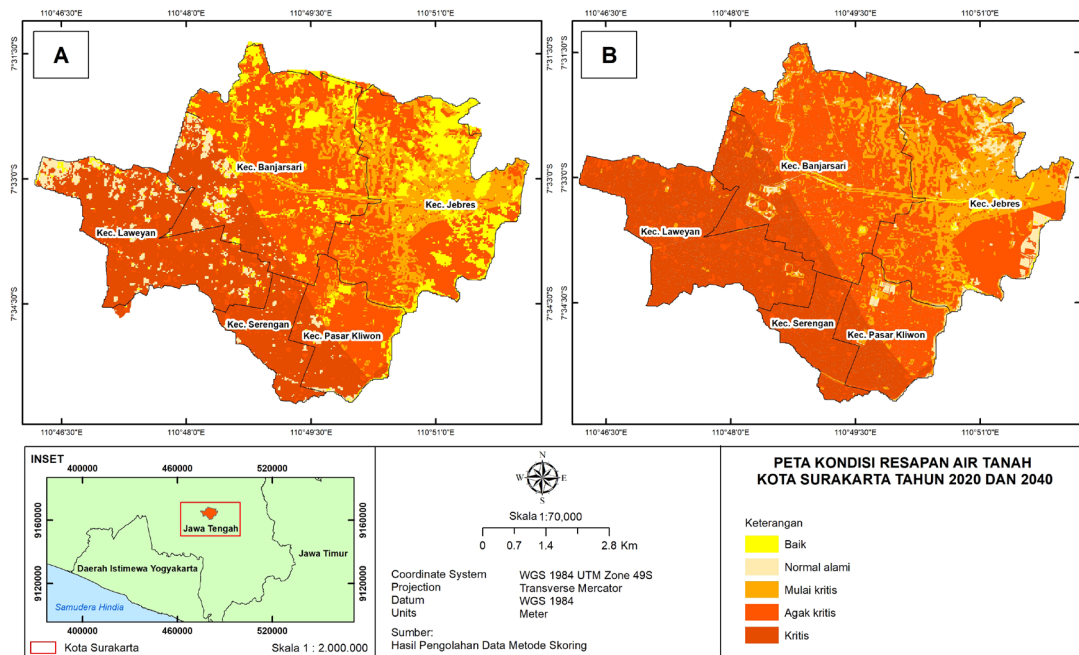
di perkotaan (Sajjad *et al.*, 2022). Kondisi daerah resapan air terdiri enam kelas kondisi yang disebutkan dalam Permen LHK Republik Indonesia Tahun 2022. Kondisi daerah resapan di Kota Surakarta didominasi oleh kelas IV yaitu agak kritis dengan luas dari 17,29 km² tahun 2020 menjadi 20,85 km² di tahun 2040 yang menyebar di seluruh area studi. Sedangkan untuk kelas V yaitu kritis memiliki luas dari 13,91 km² tahun 2020 menjadi 15,08 km² di tahun 2040 yang ada di bagian barat yaitu Kecamatan Laweyan dan Serengan, serta sebagian kecil di Kecamatan Banjarsari dan Pasar Kliwon. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Alfandhani *et al.*, (2021) bahwa kritisnya kondisi resapan di suatu daerah dikarenakan padatnya kawasan terbangun dan minimnya vegetasi yang ada di wilayah tersebut. Jenis tutupan lahan sangat mempengaruhi besar kecilnya infiltrasi, artinya jika tutupan vegetasinya memiliki kerapatan yang tinggi maka infiltrasi yang terjadi juga besar begitupula sebaliknya (Abbas *et al.*, 2021). Selain itu jenis tanah juga sangat berpengaruh pada proses penentuan kondisi daerah resapan air (Pandiangan *et al.*, 2021), dimana di area tersebut didominasi oleh jenis tanah grumusol yang notabennya memiliki nilai infiltrasi kecil dengan nilai skor 1. Sedangkan jenis tanah yang memiliki tingkat infiltrasi atau kemampuan resapan air yang baik yaitu tanah yang didominasi oleh material pasir (Sejati, 2020).



Gambar 7. Peta perubahan LULC: a) Tahun 2020 – 2030; dan b) Tahun 2030 – 2040

Tabel 15. Kondisi daerah resapan tahun 2020 dan 2040 di Kota Surakarta

Kelas	Keterangan	Luas 2020 (Km ²)	Luas 2040 (Km ²)
I	Baik	5,81	0,33
II	Normal alami	1,94	1,53
III	Mulai kritis	7,77	8,93
IV	Agak kritis	17,29	20,85
V	Kritis	13,91	15,08



Gambar 8. Kondisi resapan air tanah: a) tahun 2020; dan b) tahun 2040

KESIMPULAN

Penggunaan model CA-ANN dalam proses proyeksi perubahan *Land Use Land Cover (LULC)* dapat mensimulasikan dengan baik yang ditunjukkan pada nilai akurasi kappa yang $> 0,81$ yang masuk dalam kategori sangat baik. Proyeksi perubahan *LULC* di Kota Surakarta tahun 2030 – 2040 menunjukkan adanya penurunan luasan yang signifikan pada jenis *LULC* vegetasi sebesar $0,59 \text{ km}^2$. Sementara untuk kawasan terbangun mengalami kenaikan luasan area sebesar $0,35 \text{ km}^2$. Selain itu untuk luasan badan air tetap yaitu sebesar $0,85 \text{ km}^2$ dan jalan mengalami kenaikan sebesar $0,24 \text{ km}^2$. Perubahan penggunaan lahan tersebut sebagai dasar dalam menentukan daerah resapan air dengan proses skoring dari parameter jenis tanah, kemiringan lereng, curah hujan, potensi air tanah, dan jenis *LULC*. Kota Surakarta memiliki 5 jenis kondisi resapan air yaitu baik, normal alami, mulai kritis, agak kritis, dan kritis. Berdasarkan hasil simulasi, Kota Surakarta didominasi oleh kondisi resapan agak kritis dan kritis yaitu kelas IV dan V baik untuk kondisi eksisting maupun proyeksi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Sekolah Pascasarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Institut Pertanian Bogor yang sudah mendukung secara penuh dalam aspek akademik. Sekaligus penulis berterima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang telah mendanai dan mendukung penelitian ini sampai selesai.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis pertama mendesain metode penelitian, analisis data, interpretasi hasil, dan menulis naskah. Sedangkan untuk penulis kedua, ketiga, dan keempat memodifikasi naskah, review publikasi, dan mendesain analisis data.

DAFTAR PUSTAKA

[DLH] Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta 2021. (2021). *Indeks Kualitas Lingkungan Hidup Kota Surakarta Tahun 2021*. Surakarta: Dinas Lingkungan Hidup

- [DLH] Dinas Lingkungan Hidup Kota Surakarta 2022. (2022). *Indeks Kualitas Lingkungan Hidup Kota Surakarta Tahun 2022*. Surakarta: Dinas Lingkungan Hidup
- [DJRRL] Direktorat Jenderal Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan. (1998). *Keputusan Direktorat Jenderal Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan Nomor : 041/Kpts/V/1998 Tanggal 21 April 1998, tentang Pedoman Penyusunan Rencana Teknik Lapangan Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah Daerah Aliran Sungai. Dirjen Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan, Departemen Kehutanan*. Jakarta.
- [LHK] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI. (2022). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 2022 tentang Penyusunan Rencana Umum Rehabilitasi Hutan dan Lahan Daerah Aliran Sungai dan Rencana Tahunan Rehabilitasi Hutan dan Lahan*. Jakarta
- Abbas, A. (2002). *Diktat Untuk Kalangan Sendiri : Sosiologi Perkotaan*. Padang: Jurusan Sosiologi Universitas Andalas.
- Abbas, Z., Guang, Y., Yuanjung, Z., & Yaolong, Z. (2021). Spatiotemporal Change and Future Scenario of *LULC* using the CA-ANN Approach: A Case Study of the Greater Bay Area, China. *Land*, 10(6), 584, <https://doi.org/10.3390/land10060584>
- Adzhani, M.D., & Tayubi, Y.R. (2019). Analisis Curah Hujan terhadap Debit Air Sungai di daerah Aliran Sungai Citarum. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, pp. 459-471
- Alfandhani, R.S., Hizbaron, D.R., & Widyastuti, M. (2021). Kajian Pengaruh Kondisi Daerah Resapan Air pada Pola Pemanfaatan Ruang di Sub DAS Jlantah-Walikuln pada Wilayah DAS Bengawan Solo Hulu. *Jurnal Pendidikan Tambusai*, 5(3), 11236-11244
- Arsyad, U., Barkey, R., Wahyuni., & Matandung, K.K. (2018). Karakteristik Tanah Longsor di daerah Aliran Sungai tangka. *Jurnal Hutan dan Masyarakat*, 10(1), 203-2014
- As-syakur, A.R., Suarna, W.I., Adnyana, I.W.S., Rusna, I.W., Laksmiwati, I.A.A., & Diara, I.W. (2008). Studi Perubahan Lahan di DAS Bandung. *Bumi Lestari Journal of Environment*, 10 (2): 200 – 207
- Belihu, M., Tekleab, S., Abate, B., & Bewket, W. (2020). Hydrologic Response to Land Use Land Cover Change in the Upper Gibadi Watershed , Rift Valley Lakes Basin, Ethiopia. *Hydro Research*, 3: 85-94

- Chow, V.T., Maidment D.R., & Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill International Edition. Civil Engineering Series. 572 p
- Dyah. (2018, 9 Juni). *Taman Balekambang, Solo. Riwayatmu Kini*. Diakses pada 17 Februari 2024, dari <http://www.sukasukadee.com/2018/06/taman-balekambang-solo-riwayatmu-kini.html>
- Fariz, T.R., Nurhidayati, E., Damayanti, H.N., & Safitri, E. (2020). Komparasi Model Cellular Automata dalam Memprediksi Perubahan Lahan Sawah di Kabupaten Purworejo. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 6(2): 157-167
- Fauzi, R.G.N., Utomo, D.H., & Taryana, D. (2018). Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Debit Puncak di Sub DAS Penggung Kabupaten Jember. *Jurnal Pendidikan geografi*, 23(1), 50-61
- Febriansih, W., Priyana, Y., Cholil, M., & Sigit, A.A. (2021). Analisis Daerah Resapan Air terhadap Tata Ruang Wilayah di Kota Surakarta. Publikasi Geografi
- Fitriana, A.L., Subiyanto, S., & Firdaus, H.S. (2017). Model Cellular Automata Markov untuk Prediksi Perkembangan Fisik Wilayah Permukiman Kota Surakarta menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Geodesi Undip*, 6(4), 246-253
- Gismondi, M. (2021). MOLUSCE-an Open Source Land Use Change Analyst. FOSS4G. diakses tanggal 10 Januari 2023 dari <https://2013.foss4g.org/conf/programme/presentations/107/>
- Hastono, F.D., Sudarsono, S., & Sasmito, B. (2012). Identifikasi Daerah Resapan Air dengan Sistem Informasi geografis (Studi Kasus: Sub DAS Keduang). *Jurnal Geodesi Undip*, 1(1), doi: <https://doi.org/10.14710/jgundip.2012.2232>
- Khawaldah, H.A. (2016). A Prediction of Future Land Use/Land Cover in Amman Area using GIS-Based Markov Model and Remote Sensing. *Journal of Geographic Information System*, 8(3), 412-427, doi: 10.4236/jgis.2016.83035.
- Kusumastuti, A.L., Yudana, G., & Rini, E.F. (2020). Kemampuan Ruang Terbuka Hijau Publik dalam Berkontribusi Meresapkan Genangan Air Hujan di Kota Surakarta. *Journal of Urban and Regional Planning*, 1(1), 20-30
- Landis, J.R., & Koch, G.G. (2012). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, 33(1), 159-74
- Liu, J., Hanqin, T., Mingliang, L., Dafang, Z., Jerry, M.M., & Zengxiang, Z. (2005). China's Changing Landscape during the 1990s: Large-scale Land Transformations Estimated with Satellite Data. *Advancing Earth and Space Sciences*, 32(2), <https://doi.org/10.1029/2004GL021649>
- Liu, X., Liang, X., Li, X., Xu, X., Ou, J., Chen, Y., Li, S., Wang, S., & Pei, F. (2017). A Future Land Use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects. *Landsc. Urban Plan.* 168, 94-116, doi: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.019>
- Liu, X., Wei, M., & Zeng, J. (2020). Simulating urban Growth Scenario Based on Ecological Security Pattern: A Case Study in Quanzhou, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 17, 7282, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17197282>
- Mengistu, T.D., Chung, I., Kim, M.G., Chang, S.W., & Lee, J.E. (2022). Impacts and Implications of Land Use Land Cover Dynamics on Groundwater Recharge and Surface Runoff in East Africa Watershed. *Water*. 14, 2068, <https://doi.org/10.3390/w14132068>
- Mustafa, A., Van Rompaey, A., Cools, M., Saadi, I., & Teller, J. (2018). Addressing the Determinants of Built-up Expansion and Densification Processes at the Regional Scale. *Urban studies*, 55(15): 3279-329
- Nabila, D.A. (2023). Pemodelan Prediksi dan Kesesuaian Perubahan Penggunaan Lahan dengan menggunakan Cellular Automata-Artificial Neural Network. *Jurnal Tunas Agraria*, 6(1), 41-55
- Nuryanti, Tanesib, J.L., & Warsito, A. (2018). Pemetaan Daerah Rawan Banjir dengan Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Geografi di Kecamatan Kupang Timur Kabupaten Kupang Provinsi Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Fisika*, 3(1), ISSN: 2503-5274
- Obuch, S.K., & Starzec, M. (2020). Statistical Approach to the Problem of Selecting the Most Appropriate Model for Managing Stormwater in Newly Designed Multi-Family Housing Estate. *Resources*, 9(9), 110. <https://doi.org/10.3390/resources9090110>
- Pahlavani, P., Askarian, O.H., & Bigdeli, B. (2017). A Multiple Land Use Change Model Based on Artificial Neural network, Markov Chain, and Multi Objective Land Allocation. *Earth Obs. Geomat. Eng.* 1, 82-99
- Pandiangan, N.L., Diara, I.W., & Kusmiyarti, T.B. (2021). Analisis Daerah Resapan Air Kecamatan Sukasada Kabupaten Buleleng menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Agroteknologi Tropika*, 10(3), 324-336
- Prakoso, T.S. (2022, 29 Desember). *10.000 Pohon Ditanam di 4 Wilayah di Bantaran Bengawan Solo*. Diakses pada 17 Februari 2024, dari <https://soloraya.solopos.com/10-000-pohon-ditanam-di-4-wilayah-di-bantaran-bengawan-solo-termasuk-klaten-1510674>
- Pomerol, J.C., & Barba-Romero, S. (2000). *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practices*. Springer Science, LCC: New York, USA
- Qiao, Z., Luo, L., Yuanwei, Q., Xinliang, X., Binwu, W., & Zhenjie, L. (2020). The Impact of Urban Renewal on Land Surface Temperature Changes: A Case Study in the Main City of Guangzhou, China. *Remote Sens*, 12(5), 794, <https://doi.org/10.3390/rs12050794>
- Rahman, M.T.U., Tabassum, F., Rasheduzzaman, M., Saba, H., Sarkar, L., Ferdous, J., Uddin, S.Z., & Islam, A.Z. (2017). Temporal Dynamics of Land Use/Land Cover Change and its prediction using CA-ANN model for Southwestern Coastal Bangladesh. *Environmental Monitoring and Assessment*, 565, doi: 10.1007/s10661-017-6272-0
- Sajjad, M.M., Wang, J., Abbas, H., Ullah, I., Khan, R., & Ali, F. (2022). Impact of Climate and Land Use Change on Groundwater Resources, Study of Faisalabad District, Pakistan. *Atmosphere*, 13: 1097. <https://doi.org/10.3390/Atmos13071097>
- Scanlon, B.R., Robert, C.R., David, A.S., David, E.P., & Kevin, F.D. (2005). Impact of Land Use and Land Cover Change on Groundwater Recharge and Quality in the Southwestern US. *Global Change Biology*, 11, 1577-1593. Doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.010126.x
- Seiler, K.P., & Gat, J.R. (2007). *Groundwater Recharge From Run-off, Infiltration and Percolation*. The Netherlands: Springer.
- Sejati, S.P. (2020). Potensi Pencemaran Air Tanah Bebas pada Sebagian Kawasan Resapan Air di Lereng Selatan Gunung Api Merapi. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 25(1), 25-38
- Sloan, S., Zamora, P.J.C., Labbate, G., Asner, G.P., Imbach, P. (2018). The Cost and Distribution of Forest Conservation for National Emissions Reductions. *Glob. Environ. Chang.* 53, 39-51, doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.09.002>
- SuprptoHardjo, M. (1962). *Suatu Cara Penilaian Kemampuan Wilayah*. UGM-Bakosurtanal
- Tantawi, A.M., Bao, A., Chang, C., & Liu, Y. (2019). Monitoring and Predicting Land Use/Cover Changes in the Aksu-Tarim River Basin, Xinjiang-China (1990-2030). *Environmental Monitoring and Assessment*, 480, doi: 10.1007/s10661-019-7478-0
- Turunen, V., Sorvari, J., & Mikola, A. (2018). A Decision Support Tool for Selecting the Optimal Sewage Sludge Treatment. *Chemosphere*, 193, 521-529
- Verburg, P.H., & Overmars, K.P. (2007). Dynamic Simulation of Land-Use Change Trajectories with the CLUE-s Model. *Modell. Land Use Chang.* 90, 321-335.
- Wang, L., & Zong, L.Y. (2020). Changes in Land Use Influenced by Anthropogenic Activity. *Environmental Science*, <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.37>

- Wibisono, P., Miladan, N., & Utomo, R.P. (2022). Hubungan Perubahan Kerapatan vegetasi dan Bangunan terhadap Suhu Permukaan Lahan; Studi Kasus di Aglomerasi Perkotaan Surakarta. *Desa-Kota Jurnal Perencanaan Wilayah, Kota, dan Permukiman*. 5(1), 148-162
- Xu, T., Gao, J., & Coco, G. (2019). Simulation of urban expansion via integrating artificial neural network with Markov chain – cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*. DOI: 10.1080/13658816.2019.1600701
- Yang, X., Chen, R., & Zheng, X.Q. (2015). Simulating Land Use Change by Integrating ANN-CA Model and Landscape Pattern Indices. *Geomat. Nat. hazards Risk*. 7, 918-932, doi: <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.1001797>
- Yoe, C. (2002). *Trade-off Analysis Planning and Procedures Guidebook; Document No. IWR 01-R-2*; U.S. Army Institute of Water Resources : Alexandria , USA