

Prediksi perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah, Kota Ambon menggunakan *Cellular Automata Markov Chain*

Prediction of land cover change in the Wae Batu Merah watershed, Ambon City using Cellular Automata Markov Chain

Heinrich Rakuasa^{1*}, Melianus Salakory¹, Marhelin Chostansa Mehdil¹

¹Program Studi Pendidikan Geografi, Universitas Pattimura, Ambon, Indonesia

Abstrak.

DAS Wae Batu Merah secara geografis berada di pusat Kota Ambon dan sangat berpotensi memicu alih fungsi lahan yang nantinya akan berdampak pada penurunan kualitas air, pencemaran air, banjir dan erosi yang semakin meningkat ke depannya. Tujuan penelitian ini yaitu menganalisis perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah pada tahun 2012, 2017 dan tahun 2022 serta memprediksi tutupan lahan tahun 2031. Metode yang digunakan yaitu *Cellular Automata Markov Chain* (CA-MC) dengan 5 faktor pendorong perubahan tutupan lahan di antaranya kemiringan lereng, ketinggian lahan, jarak dari sungai, jarak *point of interest* (POI) dan jarak dari jalan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dari tahun 2012, 2017, 2022, 2031 tutupan permukiman dan lahan terbuka terus mengalami pertambahan luasan berbeda dengan tutupan lahan pertanian dan bukan pertanian yang mengalami penurunan luasan. Nilai akurasi kappa pada model mencapai 91%. Hasil model tahun 2031 menunjukkan bahwa jenis tutupan lahan permukiman memiliki luas 392,09 ha, lahan terbuka memiliki luas 35,31 ha, daerah pertanian memiliki luas 104,59 ha, daerah bukan pertanian memiliki luas 118,35 dan jenis tutupan lahan perairan memiliki luas 4,69 ha.

Kata kunci: *Cellular Automata Markov Chain*, Kota Ambon, tutupan lahan, DAS Wae Batu Merah

Abstract.

The Wae Batu Merah watershed is located in the center of Ambon City and has the potential to trigger land-use change which will have an impact on decreasing water quality, water pollution, flooding, and erosion which will increase in the future. The objective of this study was to analyze land-cover changes in the Wae Batu Merah watershed in 2012, 2017, and 2022 and predict land cover in 2031. The method used was *Cellular Automata Markov Chain* (CA-MC) with 5 factors driving land cover changes including slope, elevation, distance from the river, point of interest (POI), and distance from the road. The results showed that from 2012, 2017, 2022, and 2031 the residential and open land-cover continued to increase in area, in contrast to the land-cover of agricultural areas and non-agricultural areas which a decrease in area. The kappa accuracy value in the model reaches 91%. The results of the model year 2031 show that residential land cover types have an area of 392.09 ha, open land has an area of 35.31 ha, agricultural areas have an area of 104.59 ha, non-agricultural areas have an area of 118.35 and aquatic land cover types have an area of 4.69 ha.

Keywords: *Cellular Automata Markov Chain*, Ambon City, land cover, Wae Batu Merah watershed

1. PENDAHULUAN

Sebagai ibukota provinsi, kota Ambon menjadi pusat kegiatan di provinsi Maluku. Hal ini memengaruhi kondisi demografi Kota Ambon yang dinamis terhadap dinamika jumlah penduduk (BPS 2021). Pertumbuhan penduduk yang pesat dan tidak terkendali, ditambah dengan perkembangan industri dan pertumbuhan ekonomi terus menerus mengubah pola penggunaan lahan/tutupan lahan di suatu daerah (Dutta *et al.* 2019). Penggunaan lahan/penutupan lahan merupakan salah satu variabel penting yang memengaruhi kehidupan manusia dan lingkungan fisik (Kapitza *et al.* 2022).

*Korespondensi Penulis
Email : heinrichrakuasa001@gmail.com

Menurut Zhou *et al.* (2022) perubahan penggunaan/tutupan lahan adalah salah satu manifestasi langsung dari interaksi antara aktivitas manusia dan lingkungan alam serta merupakan subjek inti dari perubahan lingkungan yang terjadi. Mwabumba *et al.* (2022) juga menambahkan bahwa perubahan tutupan lahan bersifat kompleks dan disebabkan oleh banyak faktor, termasuk faktor fisik dan manusia (Aquilué *et al.* 2017). Pertumbuhan jumlah penduduk di perkotaan yang sangat tinggi membawa dampak terhadap meningkatnya kebutuhan sarana-prasarana yang berujung pada tingginya kebutuhan penggunaan lahan (Namara *et al.* 2022).

Daerah aliran sungai (DAS) merupakan salah satu sumber daya alam yang sangat penting untuk keberlanjutan ekosistem dan pembangunan keberlanjutan (Yu *et al.* 2011; Wada *et al.* 2020). DAS telah menjadi salah satu subjek utama yang menarik untuk pengelolaan lingkungan dan perencanaan penggunaan lahan karena dapat digunakan sebagai indikator dari dampak aktivitas manusia terhadap sistem perairan (Xu *et al.* 2020). Keadaan sumber daya air sebagai faktor pendorong utama yang menentukan perkembangan ekonomi dan kesejahteraan penduduk di sekitarnya, dengan demikian pengelolaan yang menangani isu-isu lingkungan yang terkait dengan sumber daya air menjadi bagian yang sangat serius untuk diperhatikan (Ross and Randhir 2022).

DAS cenderung mendapat tekanan seiring dengan meningkatnya pertumbuhan penduduk dan perkembangan luasan lahan permukiman yang pesat mengakibatkan terjadinya penurunan daya dukung lingkungan (Tan *et al.* 2022) dan kerusakan lingkungan di DAS (Shang and Wu 2022). Berdasarkan hasil penelitian-penelitian sebelumnya tentang perubahan tutupan lahan menunjukkan bahwa pertumbuhan penduduk dan ekspansi lahan permukiman sebagai pendorong utama terjadi perubahan tutupan lahan di DAS (Girma *et al.* 2022). Hal ini terutama tercermin dalam pengembangan dan perluasan lahan permukiman di DAS, yang menyebabkan terjadinya degradasi lingkungan ekologis (Liu *et al.* 2022).

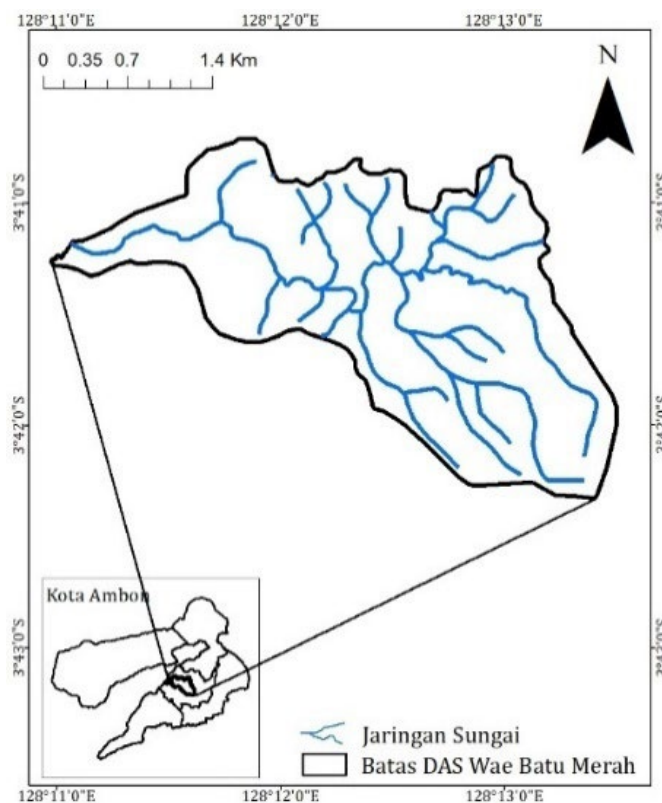
Penelitian ini dilakukan di DAS Wae Batu Merah yang berada di Kecamatan Sirimau yang memiliki jumlah penduduk terbanyak di Kota Ambon yaitu 1.916,795 jiwa/km² (BPS 2021). DAS Wae Batu Merah merupakan salah satu DAS terbesar di Kota Ambon (Kaihena *et al.* 2021). Letak geografis DAS Wae Batu Merah berada di pusat Kota Ambon dan sangat berpotensi memicu alih fungsi lahan yang nantinya akan

berdampak pada penurunan kualitas air, pencemaran air, banjir dan erosi yang semakin meningkat ke depannya (Bandjar *et al.* 2016; Osok *et al.* 2018). Oleh karena itu, pemanfaatan dan efisiensi tutupan lahan wilayah DAS harus ditingkatkan berdasarkan perencanaan tutupan lahan yang rasional dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (Tian *et al.* 2016), sehingga perlu adanya peningkatan dan pengelolaan potensi pengembangan wilayah berdasarkan rencana tata ruang yang sudah diatur (Mohamed and Worku 2019). Tujuan penelitian yaitu menganalisis perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah pada tahun 2012, 2017 dan tahun 2022 serta memprediksi tutupan lahan tahun 2031 dengan menggunakan model *Cellular Automata Markov Chain*.

2. METODOLOGI

2.1. Lokasi kajian dan waktu penelitian

Penelitian dilakukan di DAS Wae Batu Merah yang secara geografis terletak pada $3^{\circ}40'30''$ LS - $3^{\circ}42'30''$ LS dan $128^{\circ}11'00''$ LS - $128^{\circ}13'30''$ LS. DAS Wae Batu Merah memiliki luas 655,03 ha. Penelitian dilakukan selama 1 bulan terhitung dari bulan April – Mei 2022. Secara spasial lokasi penelitian disajikan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Lokasi penelitian.

2.2. Prosedur analisis data

Data yang digunakan untuk menganalisis perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah tahun 2012, 2017 dan 2022 terdiri dari citra satelit IKONOS tahun 2012 dan citra SPOT 6 tahun 2017 dan 2022, diperoleh dari BAPPEKOT Ambon yang sebelumnya sudah dilakukan koreksi radio metrik dan geometrik serta telah dilakukan komposit band RGB. Peta tutupan lahan tahun 2022 kemudian dilakukan validasi lapangan untuk melihat keadaan sebenarnya dari hasil model. Validasi dilakukan dengan *plotting* beberapa lokasi yang dianggap dapat mewakili kondisi visual dari tutupan lahan. Dalam proses ini pengambilan data dilaksanakan pada 25 titik pengamatan untuk mempresentasikan tutupan lahan di daerah penelitian.

Data *driving factors* yang digunakan untuk memprediksi tutupan lahan pada tahun 2031 di DAS Wae Batu Merah terdiri dari data *Digital Elevation Model* (DEM) Nasional lembar 2612-23 yang diperoleh dari situs resmi Badan Informasi Geospasial, digunakan untuk mengklasifikasi ketinggian lahan dan kemiringan lereng. Data vektor Rupa Bumi Indonesia (RBI) Kota Ambon Skala 1: 50.000, yang diperoleh dari situs resmi Badan Informasi Geospasial, digunakan untuk mengklasifikasi variabel jarak dari sungai dan jarak dari jalan. Citra SPOT 6 tahun 2022 digunakan untuk mengklasifikasi variabel *point of interest* (fasilitas kesehatan dan fasilitas pendidikan). Data Pola Ruang Rencana Tata Ruang Wilayah Kota Ambon tahun 2011-2031 yang diperoleh dari situs resmi (GISTARU - Sistem Informasi Geospasial Tataruang) Kementerian Agraria dan Tata Ruang / Badan Pertanahan Nasional digunakan untuk memvalidasi model tutupan lahan tahun 2031. Menurut Putri and Supriatna (2021), faktor penggerak (*driving factors*) digunakan untuk mengendalikan pergerakan setiap *pixel* dalam sebuah pemodelan prediksi tutupan lahan di tahun tertentu.

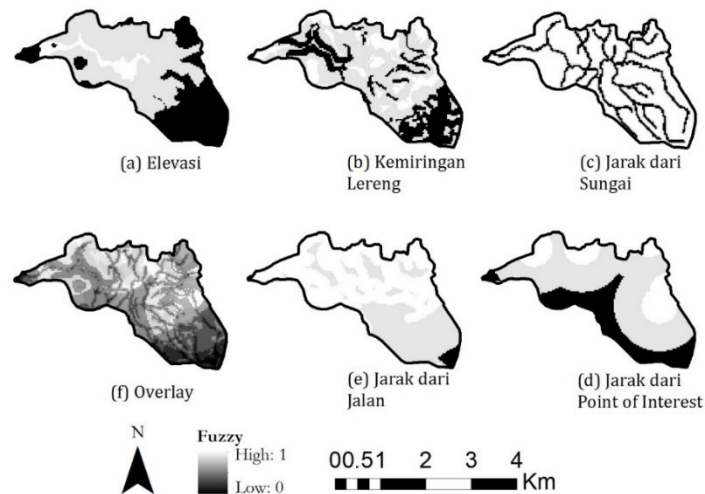
Proses pengolahan data tutupan lahan dimulai dari proses interpretasi visual dan digitasi *on screen* citra satelit yang ada yang dilakukan di *software* ArcMap 10.8. Digitasi dilakukan untuk mendapatkan data luas wilayah terbangun tahun 2012, 2017 dan 2022 aktual dan fraksi penggunaan lahan temporal. Klasifikasi tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah mengacu pada SNI 7465:2010 (Badan Standarisasi Nasional 2010) yang terdiri dari permukiman, lahan terbuka, lahan pertanian, bukan lahan pertanian dan perairan.

Proses pengolahan data *driving factors* dimulai dari proses klasifikasi pembobotan, analisis *fuzzy* untuk menghasilkan *output* berupa *driving factors* (**Gambar 2**), keseluruhan proses ini dilakukan di *software ArcMap 10.8*. Menurut Irawan *et al.* (2019) setiap *driving factors* mempunyai pengaruh yang berbeda terhadap setiap jenis perubahan tutupan lahan di suatu daerah tertentu, maka dilakukan *weighting* atau pembobotan (**Tabel 1**), untuk menghitung kekuatan *driving factors*.

Tabel 1. Klasifikasi *driving factors*.

No	Parameter	Klasifikasi	Bobot
1	Kemiringan lereng	0 – 3 %	4
		3 – 15 %	3
		15-40 %	2
		>40 %	1
2	Ketinggian lahan	0-7 mdpl	2
		7-25 mdpl	3
		25-100 mdpl	4
		100-500 mdpl	5
3	Jarak dari sungai	>500 mdpl	1
		0-100 m	1
		101-200 m	2
		201-300 m	3
		301-500 m	4
4	Jarak <i>Point of Interest</i> (POI)	>500 m	5
		0 – 2000 m	3
		2001-2500 m	2
5	Jarak dari jalan	>2500 m	1
		0-25 m	5
		25-50 m	4
		50-100 m	3
		100-1000 m	2
		>1000 m	1

Keterangan: Modifikasi dari Akbar and Supriatna (2019), Lisanyoto *et al.* (2019), Pratami *et al.* (2019), Supriatna *et al.* (2016) dan Supriatna *et al.* (2020).

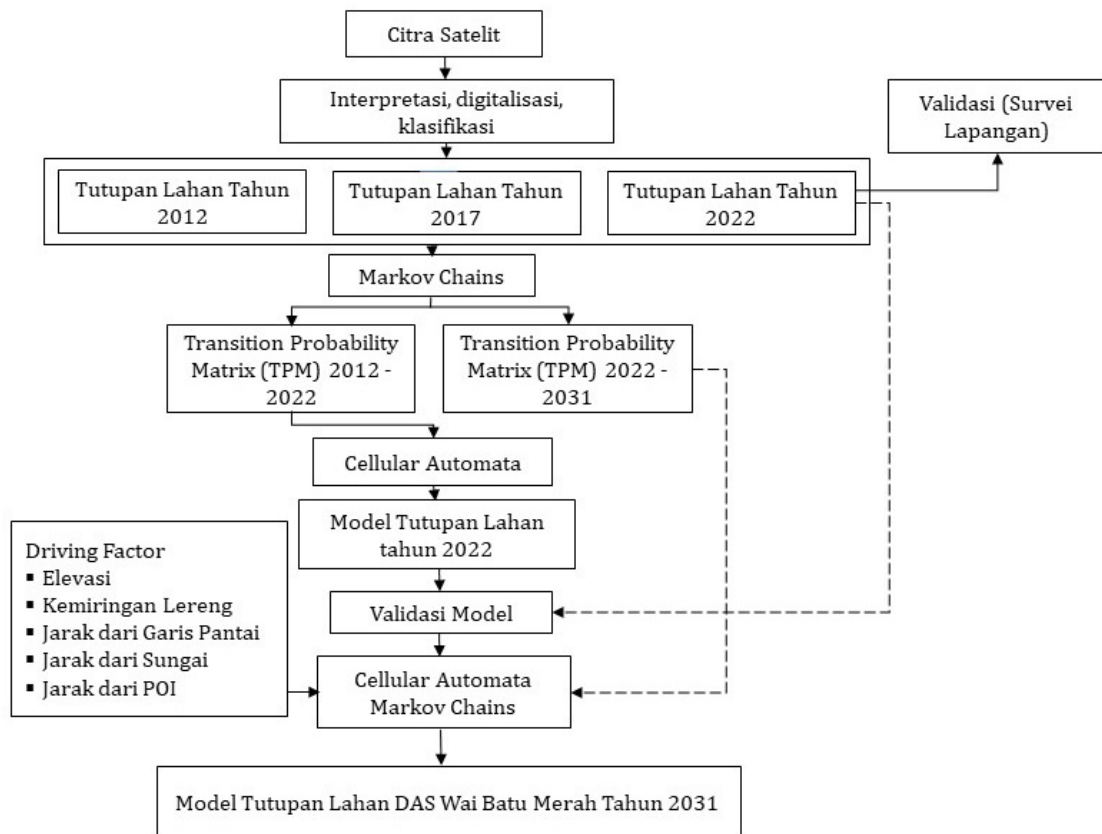


Gambar 2. *Driving factors.*

Fuzzy adalah *logical system* yang bertujuan untuk melakukan formalisasi dari perkiraan terhadap penalaran yang direpresentasikan dalam bentuk kadar kepentingan yang memiliki rentang nilai 0-1 (Boolean) (Zadeh 1994). Menurut Peter *et al.* (2021) logika dalam *fuzzy* merupakan hal yang sangat baik untuk menafsirkan data yang terjadi terus menerus secara efektif dan efisien. Ini merupakan cara yang baik untuk melakukan pemodelan berbasis *cellular automata* karena menggunakan komputasi secara paralel yang terdiri dari sel yang saling terkoneksi dan memiliki nilai yang kontinu (terus menerus), sehingga pada penelitian ini penulis mengolah data *driving factors* menggunakan konsep logika *fuzzy*.

Nilai *fuzzy driving factors* dalam penelitian ditampilkan dalam derajat keabuan dari hitam sampai putih, nilai dijadikan kontinu, sehingga semakin putih nilai *fuzzy* maka akan semakin sesuai dan semakin hitam semakin tidak sesuai (Akbar and Supriatna 2019). Penelitian ini menggunakan *Cellular Automata Markov Chain* (CA-MC) untuk memprediksi tutupan lahan DAS Wae Batu Merah tahun 2031. *Cellular Automata Markov Chain* (CA-MC) merupakan model dinamis yang digunakan untuk simulasi spasial dengan waktu yang telah ditentukan (Palmate *et al.* 2022). Pemodelan perubahan penggunaan lahan/tutupan lahan dengan aplikasi model *CA-Markov Chain* merupakan salah satu cara untuk memprediksi perubahan penggunaan lahan/tutupan lahan yang telah banyak diterapkan oleh banyak peneliti di dunia (Ghosh *et al.* 2017). Pemodelan CA-MC dipilih karena memiliki kemampuan prediksi secara spasial temporal dan statistik yang sangat baik dan akurat yang bersifat dinamis (Mustafa *et al.* 2021).

Pembuatan model tutupan lahan tahun 2022 dan 2031 dilakukan pada *software* pemodelan *Idrisi Selva 17* pada proses pembuatan model diperlukan kemampuan untuk menggunakan *tools* yang ada dalam *software* ini yaitu LCM (*Land Change Modeller*). Setelah model dihasilkan maka dilakukan pengujian akurasi model menggunakan perhitungan *K-standard* (*Kappa Coefficient*) di *software Idrisi Selva 17*. Jika hasil akurasi simulasi tercapai $>75\%$ maka tidak perlu dilakukan pengulangan proses akurasi dan dapat dilanjutkan ke proses pemodelan selanjutnya (Supriatna *et al.* 2016). Validasi model 2022 diperlukan untuk mengetahui apakah model dapat digunakan untuk membuat model kedua. Uji akurasi dilakukan dengan membandingkan data tutupan lahan *existing* (tahun 2022) sebagai data dasar (*ground truth image*) dan hasil model 2022. Selengkapnya proses penelitian dapat dilihat pada **Gambar 3**.

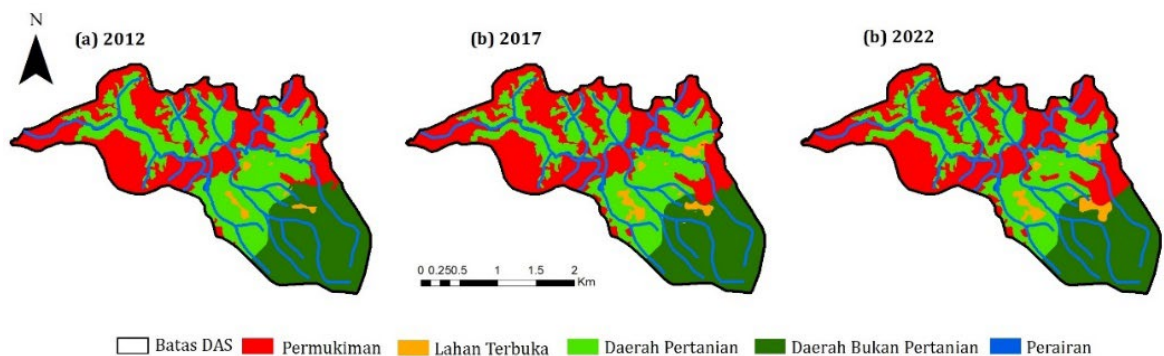


Gambar 3. Alur kerja.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Perubahan tutupan lahan DAS Wae Batu Merah Tahun 2012, 2017 dan 2022

Perubahan tutupan lahan DAS Wae Batu tahun 2012-2022 menunjukkan peningkatan pada jenis tutupan permukiman dan lahan terbuka, sedangkan jenis tutupan lahan daerah pertanian dan tutupan lahan daerah bukan pertanian mengalami penurunan luasan (**Gambar 4** dan **Tabel 2**). Hal ini dipengaruhi oleh terus meningkatnya jumlah penduduk yang bermukim di daerah aliran sungai yang membuat semakin tinggi kebutuhan akan lahan terbangun/permukiman.



Gambar 4. Tutupan lahan DAS Wae Batu Merah tahun 2012, 2017 dan 2022

Tingginya pertambahan jumlah penduduk di DAS Wae Batu Merah dapat meningkatkan kebutuhan lahan yang diwujudkan dalam bentuk pembangunan secara fisik, fasilitas ekonomi ataupun fasilitas sosial (Osok *et al.* 2018). Secara spasial luasan perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah pada tahun 2012, 2017 dan 2022 dapat dilihat pada **Gambar 4** dan **Tabel 2**.

Tabel 2. Komposisi luas tutupan lahan DAS Wae Batu Merah (ha).

Jenis tutupan lahan	Tahun 2012	Tahun 2017	Tahun 2022
Permukiman	246,32	267,85	283,46
Lahan terbuka	9,15	16,04	20,39
Daerah pertanian	235,81	218,36	203,49
Daerah bukan pertanian	159,06	148,06	143,01
Perairan	4,69	4,69	4,69
Total luas		655,03	

Berdasarkan **Gambar 4** dan **Tabel 2**, diketahui jenis tutupan lahan permukiman dan tutupan lahan terbuka terus mengalami penambahan luasan pada setiap tahunnya dan untuk jenis tutupan lahan daerah pertanian dan jenis tutupan lahan daerah bukan pertanian terus mengalami penurunan luasan dan jenis tutupan lahan perairan tidak mengalami penambahan dan pengurangan luasan pada tahun 2012, 2017 sampai 2022.

3.2. Model tutupan lahan tahun 2022

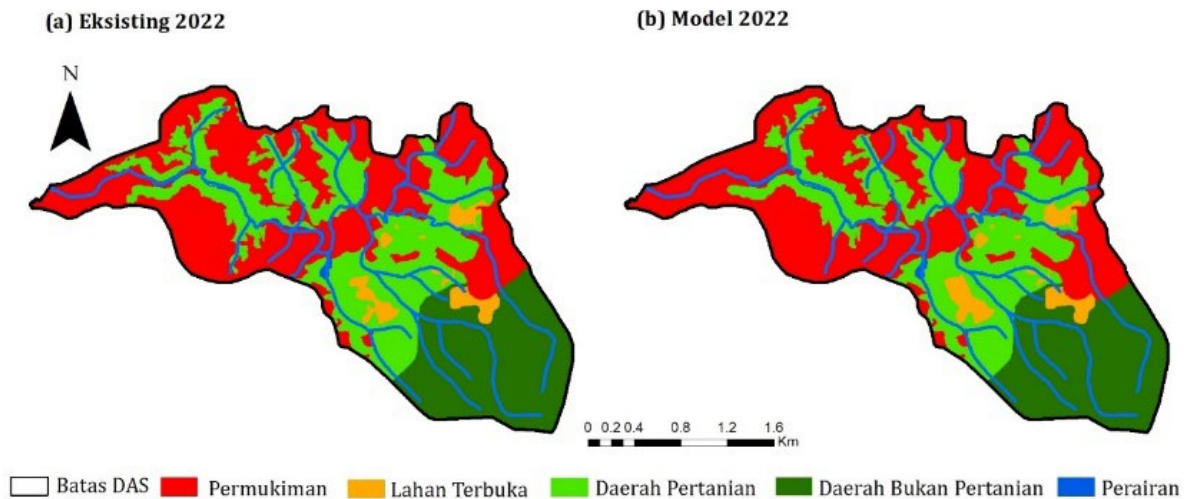
Pemodelan tutupan lahan tahun 2022 dilakukan dengan *Markov Chain Cellular Automata (CA-Markov)*, menggunakan *driving factors* yang sudah dibuat pada tahap sebelumnya. Proses ini dilakukan pada *software Idrisi Selva Edition 17* menggunakan *tools markov* dan *CA-markov*. Kemudian besarnya kemungkinan terjadi perubahan pada sebuah tutupan lahan disebut dengan *Transition Probability Matrix (TPM)* atau biasa disebut dengan nilai *markovian (Markov Chains Value)*. Baris pada matriks probabilitas menunjukkan asal dari tutupan lahan, sedangkan kolom menunjukkan tujuan perubahan tutupan lahan.

Berdasarkan **Tabel 3**, diketahui bahwa dari kelima tutupan lahan tersebut dapat dilihat bahwa tutupan lahan yang memiliki nilai TPM terbesar untuk kemungkinan berubah menjadi permukiman yaitu lahan pertanian dengan nilai TPM: 0,1734, lahan terbuka memiliki nilai TPM yaitu 0,0375 untuk berubah menjadi permukiman sedangkan daerah bukan pertanian dan perairan memiliki nilai TPM yaitu 0 yang menunjukkan tidak terjadi alih fungsi tutupan lahan. Semakin besar nilai probabilitas pada tutupan lahan tujuan, maka akan semakin besar kemungkinan tutupan lahan untuk berubah.

Tabel 3. *Transition probability matrix (TPM) 2012–2022.*

	Permukiman	Lahan Terbuka	Daerah Pertanian	Daerah Bukan Pertanian	Perairan
Permukiman	0,8500	0,0375	0,0375	0,0375	0
Lahan terbuka	0,0375	0,8500	0,0375	0,0375	0
Daerah pertanian	0,1734	0,0556	0,7706	0,0004	0
Daerah bukan pertanian	0	0,1638	0	0,8362	0
Perairan	0	0	0	0	1

Berdasarkan **Gambar 5** di atas dapat dilihat bahwa hasil pemodelan tutupan lahan tahun 2022 memiliki perbandingan luasan dengan tutupan lahan *existing* 2022, luasan permukiman dan lahan terbuka pada hasil pemodelan lebih luas dibandingkan dengan tutupan lahan *existing*. Hal ini berbanding terbalik pada kelas daerah pertanian dan daerah bukan pertanian, luasan kelas tutupan lahan *existing* 2022 lebih luas dibandingkan dengan hasil pemodelan dan kelas tutupan lahan perairan memiliki luasan yang tetap (**Tabel 4**).

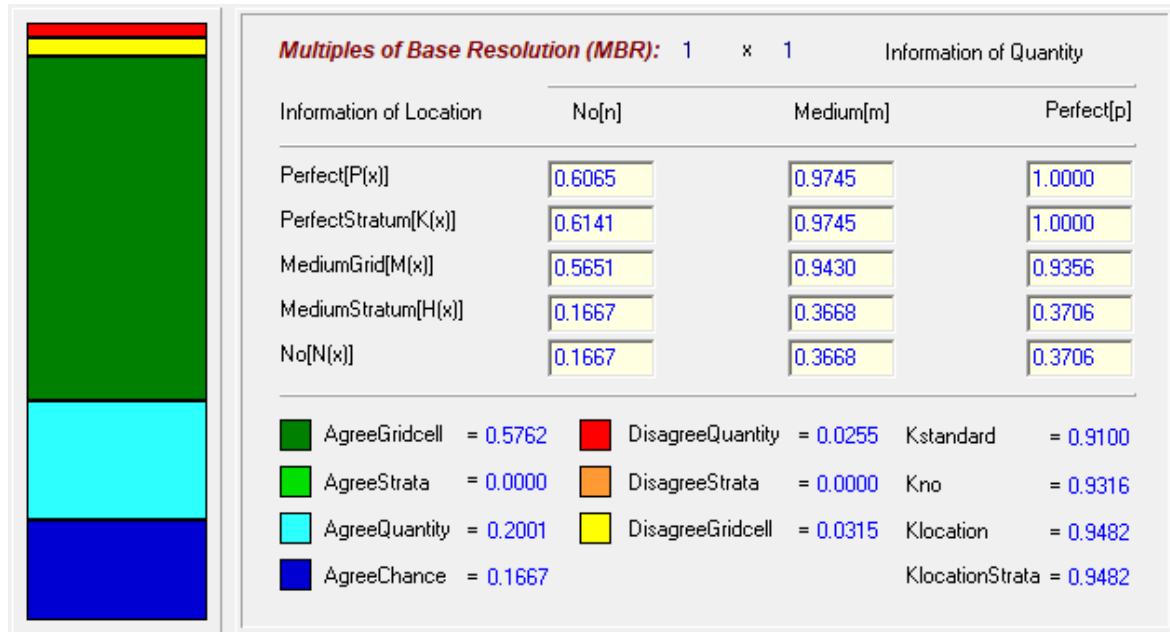


Gambar 5. Perbandingan model tahun 2022 dan tutupan lahan *existing* tahun 2022.

Tabel 4. Perbandingan luas tutupan lahan *existing* 2022 dan hasil model.

No	Jenis tutupan lahan	Model 2022	Existing 2022
1	Permukiman	299,76	283,46
2	Lahan terbuka	22,47	20,39
3	Daerah pertanian	189,29	203,49
4	Daerah bukan pertanian	138,82	143,01
5	Perairan	4,69	4,69
Total luas		655,03	

Hasil model tutupan lahan tahun 2022 sebagai data dasar (*reference image*) dilakukan uji akurasi atau uji *kappa* dengan data tutupan lahan tahun 2022 *existing* sebagai data sebagai pembanding (*comparison image*).



Gambar 6. Uji Kappa Model 2022.

Gambar 6 menunjukkan hasil uji akurasi tutupan lahan tahun 2022 *existing* dan 2022 model yang menunjukkan bahwa nilai kappa yang dihasilkan sebesar 0,9100 atau 91,00%, artinya hasil uji akurasi yang diperoleh sangat baik. Hasil uji akurasi yang menunjukkan sangat baik tersebut menjadikan rancangan model terkonfirmasi untuk dilanjutkan menjadi model tutupan lahan tahun 2031.

3.3. Model tutupan lahan tahun 2031

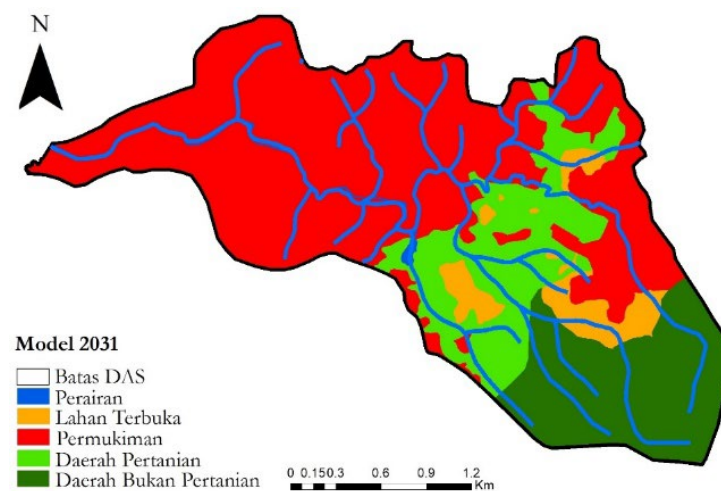
Pemodelan ke tahun 2031 merupakan pemodelan kedua, dalam tahap ini menggunakan *driving factors* yang sama pada pemodelan pertama, namun menggunakan nilai *markovian* yang berbeda. Selengkapnya *transition probability matrix* tahun 2022 ke tahun 2031 dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Transition probability matrix (TPM) 2022–2031.

	Permukiman	Lahan Terbuka	Daerah Pertanian	Daerah Bukan Pertanian	Perairan
Permukiman	0,8498	0,0005	0,1497	0	0
Lahan terbuka	0,1526	0,8474	0	0	0
Daerah pertanian	0,1963	0,0319	0,7715	0,0003	0
Daerah bukan pertanian	0,0838	0,1406	0,0017	0,7740	0
Perairan	0	0	0	0	1

Berdasarkan **Tabel 4** dijelaskan bahwa angka 1 pada TPM tutupan lahan perairan berarti tutupan lahan tersebut akan tetap menjadi perairan. Dari kelima tutupan lahan tersebut dapat dilihat bahwa tutupan lahan yang memiliki nilai TPM terbesar untuk kemungkinan berubah menjadi permukiman yaitu daerah pertanian dengan nilai TPM yaitu 0,1963, lahan terbuka memiliki nilai TPM yaitu 0,1526 untuk berubah menjadi permukiman, daerah bukan pertanian memiliki nilai TPM yaitu 0,0838 untuk berubah menjadi permukiman, sedangkan perairan memiliki nilai TPM yaitu 0 yang menunjukkan bahwa tidak terjadi perubahan dari tutupan lahan satu ke tutupan lahan lainnya.

Berdasarkan hasil pengolahan model tutupan lahan DAS Wae Batu Merah di tahun 2031 menggunakan *Cellular Automata Markov Chain* (**Gambar 7**) jenis tutupan lahan permukiman memiliki luas 392,09 ha, lahan terbuka memiliki luas 35,31 ha, daerah pertanian memiliki luas 104,59 ha, daerah bukan pertanian memiliki luas 118,35 ha dan jenis tutupan lahan perairan memiliki luas 4,69 ha.



Gambar 7. Model tutupan lahan tahun 2031 DAS Wae Batu Merah.

Hasil pemodelan prediksi tutupan lahan DAS Wae Batu Merah tahun 2031 sangat penting. Nantinya informasi tersebut dapat dijadikan sebagai dasar dan pijakan dalam pengambilan kebijakan terkait penataan dan pemanfaatan ruang serta dapat mengoptimalkan pengelolaan DAS yang *sustainable* dan sebagai langkah awal dalam upaya mitigasi bencana alam. Peningkatan luasan lahan permukiman di Kota Ambon khususnya di Daerah Aliran Sungai (DAS) dari tahun ke tahun akan menyebabkan penurunan daya dukung lingkungan (Tan *et al.* 2022) dan kerusakan lingkungan (Shang and Wu 2022).

Oleh karena itu hasil analisis dan prediksi perubahan tutupan lahan ini dapat memberikan solusi dalam penataan penggunaan lahan Kota Ambon ke depan yang *sustainable* berdasarkan aspek ekologis serta upaya-upaya konservasi guna mendukung perencanaan penggunaan lahan serta pengalokasian penggunaan lahan yang tepat di samping melakukan kegiatan konservatif sebagai upaya preventif dalam penggunaan lahan yang berbasis ekologis.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Selama 15 tahun terakhir dari tahun 2012, 2017 dan 2022 perubahan tutupan lahan DAS Wae Batu Merah terus mengalami peningkatan. Tutupan lahan yang konsisten mengalami peningkatan luasan adalah tutupan lahan terbangun yaitu pada tahun 2012 luas permukiman yaitu 246,32 ha, bertambah menjadi 267,85 ha pada tahun 2017 dan kemudian mengalami pertambahan luasan menjadi 283,46 ha pada tahun 2022. Jenis tutupan lahan terbuka juga terus mengalami peningkatan luasan, pada tahun 2012 lahan terbuka memiliki luas 9,15 ha mengalami peningkatan pada tahun 2017 menjadi 16,04 ha dan pada tahun 2022 total luasan lahan terbuka menjadi 20,39 ha. Hal ini berbeda dengan jenis tutupan lahan pertanian yang terus mengalami penurunan luasan yaitu 235,81 ha pada tahun 2012, kemudian menjadi 218,36 ha pada tahun 2017 dan terus mengalami penurunan pada tahun 2022 menjadi 203,49 ha.

Jenis tutupan lahan daerah bukan pertanian juga terus mengalami penurunan luasan yaitu 159,06 ha pada tahun 2012 menjadi 1148,06 ha pada tahun 2017 dan terus mengalami penurunan yaitu 143,01 ha pada tahun 2022, sedangkan tutupan lahan perairan tetap memiliki luas 4,69 ha atau tidak mengalami penurunan maupun pertambahan luasan. Hasil uji akurasi model tutupan lahan tahun 2022 mendapatkan nilai kappa yaitu sebesar 0,9100 atau 91,00%, artinya hasil uji akurasi yang diperoleh sangat baik dan dapat digunakan untuk pembuatan model tutupan lahan tahun 2031. Berdasarkan prediksi model *Cellular Automata Markov Chain* tahun 2031 jenis tutupan lahan permukiman memiliki luas 392,09 ha, lahan terbuka memiliki luas 35,31 ha, daerah pertanian memiliki luas 104,59 ha, daerah bukan pertanian memiliki luas 118,35 dan jenis tutupan lahan perairan memiliki luas 4,69 ha. Lahan permukiman akan terus mengalami pertambahan luasan seiring terjadinya pertumbuhan penduduk dan tingginya permintaan lahan untuk permukiman di DAS Wae Batu Merah.

Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan dalam pengambilan kebijakan terkait penataan dan pemanfaatan ruang pada daerah aliran sungai (DAS) DAS Wae Batu Merah ke depannya.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih pada Departemen Geografi Universitas Indonesia, Program Studi Pendidikan Geografi Universitas Pattimura, dan Departemen Biologi, Universitas Pedagogis Negeri Herzen yang sudah bekerja sama dalam penelitian ini.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Akbar F and Supriatna. 2019. Land cover modelling of Pelabuhanratu City in 2032 using cellular automata-markov chain method [Proceeding]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science 311.
- Aquilué N, Cáceres M, Fortin MJ, Fall A and Brotons L. 2017. A spatial allocation procedure to model land-use/land-cover changes: Accounting for occurrence and spread processes. *Ecological Modelling* 344:73–86.
- [BPS] Badan Pusat Statistik. 2021. Kota Ambon dalam angka 2021. Badan Pusat Statistik. Kota Ambon.
- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. 2010. SNI 7645-2010 tentang klasifikasi penutupan lahan. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Bandjar A, Osok RM, Rachman G dan Sutapa IW. 2016. Strategi, mapping resiko, dan implementasi adaptasi perubahan iklim dan pengurangan risiko bencana untuk ketahanan di Kecamatan Sirimau Kota Madya Ambon. *BIMAFIKA: Jurnal MIPA, Kependidikan dan Terapan* 6(1).
- Dutta DK, Rahman A, Paul S and Kundu A. 2019. Changing pattern of urban landscape and its effect on land surface temperature in and around Delhi. *Environmental Monitoring and Assessment* 191(551).
- Ghosh P, Mukhopadhyay A, Chanda A, Mondal P, Akhand A, Mukherjee S, Nayak SK, Ghosh S, Mitra D, Ghosh T and Hazra S. 2017. Application of cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- a review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 5:64–77.
- Girma R, Fürst C and Moges A. 2022. Land use land cover change modeling by

- integrating artificial neural network with cellular Automata-Markov chain model in Gidabo river basin, main Ethiopian rift. *Environmental Challenges* 6:1-15.
- Irawan IA, Supriatna S, Manessa MDM and Ristya Y. 2019. Prediction model of land cover changes using the cellular automata – markov chain affected by the BOCIMI Toll Road in Sukabumi Regency [Proceeding]. The 1st International Conference on Geodesy, Geomatics, and Land Administration 2019:247-256.
- Kaihena M, Talakua CM, Pagaya J and Talakua SM. 2021. Analysis of water pollution in microbiology aspect of some watersheds at Ambon City, Maluku Province. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 805(1):1-13.
- Kapitza S, Golding N and Wintle BA. 2022. A fractional land use change model for ecological applications. *Environmental Modelling & Software* 147.
- Lisanyoto L, Supriatna and Sumadio W. 2019. Spatial model of settlement expansion and its suitability to the landscapes in Singkawang City, West Kalimantan Province. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 338: 12034.
- Liu Q, Niu J, Wood JD and Kang S. 2022. Spatial optimization of cropping pattern in the upper-middle reaches of the Heihe River basin, Northwest China. *Agricultural Water Management* 264: 107479.
- Mohamed A and Worku H. 2019. Quantification of the land use/land cover dynamics and the degree of urban growth goodness for sustainable urban land use planning in Addis Ababa and the surrounding Oromia special zone. *Journal of Urban Management* 8(1): 145–158.
- Mustafa A, Ebaid A, Omrani H and McPhearson T. 2021. A multi-objective Markov Chain Monte Carlo cellular automata model: simulating multi-density urban expansion in NYC. *Computers, Environment and Urban Systems* 87: 101602.
- Mwabumba M, Yadav BK, Rwiza MJ, Larbi I and Twisa S. 2022. Analysis of land use and land-cover pattern to monitor dynamics of Ngorongoro world heritage site (Tanzania) using hybrid cellular automata-Markov model. *Current Research in Environmental Sustainability* 4: 100126.
- Namara I, Hartono DM, Latief Y and Moersidik SS. 2022. Policy development of river water quality governance toward land use dynamics through a risk management approach. *Journal of Ecological Engineering* 23(2): 25–33.

- Osok RM, Talakua SM dan Supriadi D. 2018. Penetapan kelas kemampuan lahan dan arahan rehabilitasi lahan Das Wai Batu Merah Kota Ambon Provinsi Maluku. *Agrologia* 7(1): 32-41.
- Palmate SS, Wagner PD, Fohrer N and Pandey A. 2022. Assessment of uncertainties in modelling land use change with an integrated cellular automata–markov chain model. *environmental Modeling & Assessment* 27(2): 275–293.
- Peter A, Zachariah B, Damuut LP and Abdulkadir S. 2021. Efficient traffic control system using fuzzy logic with priority [Proceeding]. *International Conference on Information and Communication Technology and Applications* 1350: 660–674.
- Pratami M, Susiloningtyas D and Supriatna S. 2019. Modelling cellular automata for the development of settlement area Bengkulu City. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science* 311(1):12073.
- Ross ER and Randhir TO. 2022. Effects of climate and land use changes on water quantity and quality of coastal watersheds of Narragansett Bay. *Science of The Total Environment* 807(3):151082.
- Shang C and Wu J. 2022. A legendary landscape in peril: Land use and land cover change and environmental impacts in the Wulagai River Basin, Inner Mongolia. *Journal of Environmental Management* 301:113816.
- Supriatna S, Supriatna J, Koestoer RH and Takarina ND. 2016. Spatial dynamics model for sustainability landscape in Cimandiri Estuary, West Java, Indonesia [Proceeding]. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 227: 19–30.
- Supriatna S, Fauzia S, Marko K, Manessa MDM and Ristya Y. 2020. Spatial dynamics of tsunami prone areas in Pariaman City, West Sumatera. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* 17(2):1474–1491.
- Tan S, Liu Q and Han S. 2022. Spatial-temporal evolution of coupling relationship between land development intensity and resources environment carrying capacity in China. *Journal of Environmental Management* 301:113778.
- Tian G, Ma B, Xu X, Liu X, Xu L, Liu X, Xiao L and Kong L. 2016. Simulation of urban expansion and encroachment using cellular automata and multi-agent system model—A case study of Tianjin metropolitan region, China. *Ecological Indicators* 70:439–450.

- Wada CA, Pongkijvorasin S and Burnett KM. 2020. Mountain-to-sea ecological-resource management: Forested watersheds, coastal aquifers, and groundwater dependent ecosystems. *Resource and Energy Economics* 59(6):101146.
- Xu D, Lyon SW, Mao J, Dai H and Jarsjö J. 2020. Impacts of multi-purpose reservoir construction, land-use change and climate change on runoff characteristics in the Poyang Lake basin, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 29:100694.
- Yu W, Zang S, Wu C, Liu W and Na X. 2011. Analyzing and modeling land use land cover change (LUCC) in the Daqing City, China. *Applied Geography* 31(2):600–608.
- Zadeh LA. 1994. Fuzzy logic, neural networks, and soft computing. *Communications of the ACM* 37(3):77–84.
- Zhou Y, Wu T and Wang Y. 2022. Urban expansion simulation and development-oriented zoning of rapidly urbanising areas: A case study of Hangzhou. *Science of The Total Environment* 807:150813.