

# Prediksi Perkembangan Permukiman Berbasis *Cellular Automata* dengan Batasan Kawasan Rawan Banjir di Perkotaan Kabupaten Bojonegoro

Dwiky Satrio Septawicaksono dan Nursakti Adhi Pratomoatmojo  
Departemen Perencanaan Wilayah dan Kota,  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
*e-mail*: pratomoatmojo@urplan.its.ac.id

**Abstrak**—Banjir di Kabupaten Bojonegoro terjadi hampir setiap tahun. Pada fakta tahun 2016 banjir merendam 3.627 rumah yang tersebar di 15 kecamatan dengan potensi kerugian mencapai Rp 4.681.950,-. Terutama pada kecamatan yang diarahkan untuk pengembangan Permukiman seperti Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Dander, dan Kecamatan Kapas dengan jumlah penduduk terpapar bahaya banjir sebanyak 229.894 jiwa pada tahun 2018. Jumlah tersebut menyebabkan Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Dander, dan Kecamatan Kapas termasuk kedalam jumlah penduduk terpapar yang paling tinggi. Ketiga kecamatan tersebut merupakan kawasan perkotaan Kabupaten Bojonegoro. Oleh sebab itu penelitian ini bertujuan untuk memprediksikan pola perkembangan penggunaan lahan permukiman pada tahun 2038 dengan mempertimbangkan daerah bahaya bencana banjir di Perkotaan Kabupaten Bojonegoro dengan menggunakan metode *Cellular Automata*. Dalam proses prediksi penelitian ini menggunakan variabel kedekatan dalam membangun peta transisi perkembangan lahan permukimannya. Prediksi perubahan penggunaan lahan yang dilakukan menggunakan metode *Cellular Automata* menghasilkan prediksi perkembangan permukiman tahun 2038 pada bertambah menjadi 576,6 Ha dengan prosentase pertambahan keseluruhannya sebesar 30%. Jika dilihat prosentase pada Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Kapas, dan Kecamatan Dander prosentase pertumbuhannya masing-masing sebesar 21,48%; 13,95%; dan 18,72% dari tahun 2006. Hasil dari pemodelan tahun 2016 memiliki *overall accuracy* sebesar 97%, yang termasuk kedalam kategori model yang sangat baik. Model dengan batasan zona banjir ini dapat memodelkan permukiman seluas 49.09 Ha di tahun 2038 tidak berkembang di wilayah bahaya banjir.

**Kata Kunci**—Bahaya Bencana Banjir, *Cellular Automata*, Perkembangan Penggunaan Lahan

## I. PENDAHULUAN

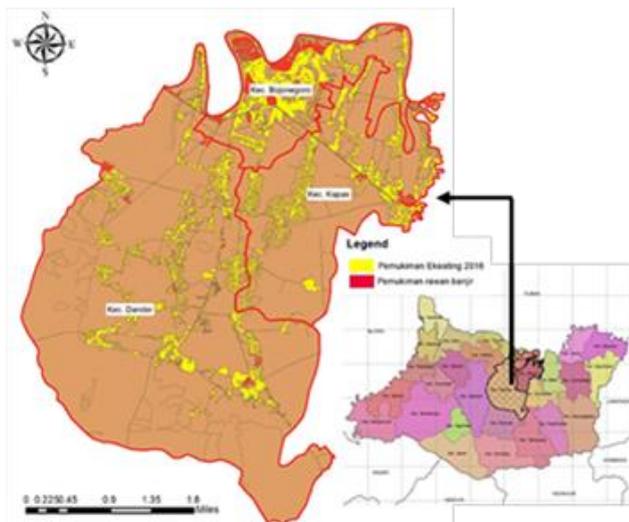
**B**ENCANA yang disebabkan oleh fenomena perubahan iklim dapat mengakibatkan kerugian besar pada infrastruktur, serta dapat berpengaruh pada ekonomi nasional dan regional [1]. Perubahan iklim tersebut menyebabkan berubahnya pola hujan yang ditandai dengan penundaan musim hujan, serta ketika musim penghujan berakhir lebih cepat.

Disamping itu, walaupun musim penghujan lebih pendek, intensitasnya semakin tinggi hal ini akan mempengaruhi sebuah wilayah yang berbasis sungai, seperti Bojonegoro [2].

Kabupaten Bojonegoro, termasuk kabupaten terluas yang dilewati oleh sungai Bengawan Solo, 24.753 Ha wilayahnya merupakan Daerah Aliran Sungai (DAS). Hampir setiap tahunnya Kabupaten Bojonegoro dilanda banjir apabila sungai Bengawan Solo sedang meluap. Banjir yang terjadi pada 16 Desember 2016 merendam 3.627 rumah di 81 desa yang tersebar di 15 kecamatan. Jumlah pengungsinya sebanyak 3.369 jiwa dengan korban mencapai 452 luka ringan dan 4 korban meninggal. Potensi kerugian dalam bencana tersebut diperkirakan mencapai Rp 4.681.950,- [3].

UU No. 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang menyatakan bahwa dalam penyusunan rencana tata ruang, terutama bagi kawasan permukiman, harus memperhatikan dan menghindari kawasan rawan bencana. Di Kabupaten Bojonegoro arahan pengembangan permukiman diatur dalam RTRW Kabupaten Bojonegoro tahun 2011 – 2031. Dimana arahan pengembangan permukiman ini diarahkan pada Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Kapas, dan Kecamatan Dander. Orientasi wilayah dari ketiga kecamatan dapat dilihat pada Gambar 1. Berdasarkan data BPBD Kabupaten Bojonegoro pada tahun 2018 menunjukkan bahwa Kecamatan Bojonegoro dan Kecamatan Dander merupakan dua kecamatan yang memiliki total penduduk terpapar dan total kerugian fisik akibat bencana banjir paling tinggi di Kabupaten Bojonegoro. Untuk Kecamatan Kapas memiliki jumlah penduduk terpapar dengan jumlah total 54.176 penduduk dengan total kerugian 235 miliar rupiah pada tahun 2018. Jika kerugian fisik dari ketiga wilayah digabungkan nilainya mencapai 831 miliar rupiah. Hal ini mengindikasikan bahwa perkembangan permukiman di Kabupaten Bojonegoro belum menghindari kawasan rawan bencana.

Undang-Undang RI, nomor 1 Tahun 2011 menyebutkan bahwa pemilihan lokasi yang tepat untuk permukiman mempunyai makna strategis dan penting dalam aspek keruangan. Oleh sebab itu agar perubahan penggunaan lahan di masa mendatang dapat dikontrol, kita perlu memahami dinamika spasial perubahan dan interaksi dengan penggunaan lahan lainnya [4]. Pemodelan perubahan penggunaan lahan, terutama jika dilakukan secara spasial-eksplisit, terintegrasi dan multi-skala, adalah teknik penting untuk proyeksi jalur alternatif ke depan, untuk melakukan eksperimen yang menguji pemahaman tentang proses kunci bagaimana perubahan penggunaan lahan terjadi [5] [6] [7]. Terdapat



Gambar 1. Orientasi wilayah studi Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Kapas, dan Kecamatan Dander yang di Kabupaten Bojonegoro.

banyak metode yang mampu mendeteksi perubahan penggunaan lahan seperti contohnya Markov Change, Land Change Modeller, Composite Analysis, Image Differencing, Image serta Rationing [8] [9]. Pemodelan ini telah banyak dilakukan dalam beberapa tahun terakhir untuk mengetahui peramalan pengembangan kedepan, mengevaluasi rencana masa depan dan mengidentifikasi wilayah konservasi yang terancam keberadaannya [10] [9].

Pada penelitian ini digunakan teknik pemodelan *Cellular Automata (CA)*. Metode CA merupakan metode yang dapat membangun model dengan mudah dari proses spasial yang kompleks, pada ilmu alam dan juga ilmu geografi [11]. CA merupakan konsep yang dapat menggambarkan adanya transisi/pergerakan dari setiap elemen atau objek yang dinamakan automaton [9]. Secara sederhana, automaton (bentuk tunggal automata) adalah suatu mekanisme pemrosesan diskrit. Mekanisme yang dimaksud adalah kemampuan untuk berubah berdasarkan sekumpulan aturan-aturan yang diterapkan pada dirinya sendiri (objek) dan juga berbagai masukan dari luar [12]. Konsep CA ini merupakan metode terbaik dalam simulasi spasial, termasuk simulasi *landuse* dengan kemampuan mengakomodasi pendekatan *bottom-up* atau *top-down* [13].

Terdapat beberapa *software* yang dapat digunakan untuk memodelkan perubahan penggunaan lahan dengan teknik CA diantaranya adalah IDRISI, LandChange Modeller, Metronamica, LanduseSim, dan masih banyak lagi. Sedangkan dalam penelitian ini pemodelan perubahan penggunaan lahan permukiman, digunakan LanduseSim versi 2.3.1. LanduseSim sebagai *software modelling* penggunaan lahan menjadi *software* yang dapat digunakan untuk simulasi spasial yang masif untuk *urban sprawl* dan prediksi perubahan penggunaan lahan yang menggunakan iterasi computer [14]. Pada penelitian-penelitian CA sebelumnya dengan menggunakan LanduseSim menghasilkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Diantaranya adalah hasil simulasi dari Santoso pada tahun 2018 mengenai model dinamika spasial Penggunaan lahan sawah di Kabupaten Subang dengan rentang akurasi sebesar 96,03%-96,06% [7]. Selain itu penelitian dari Al-Darwish pada tahun 2018 yang memprediksi pertumbuhan kota dan pengaruhnya pada

lingkungan sekitar dengan studi kasus Ibb City di Yemen menghasilkan validasi sebesar 93,76% [15].

Berdasarkan dari perkembangan penggunaan lahan permukiman yang belum mempertimbangkan wilayah bahaya banjir perlu dilakukan penelitian mengenai prediksi perkembangan lahan permukiman dengan mempertimbangkan bencana banjir di Kabupaten Bojonegoro agar diketahui bagaimana perkembangan permukiman agar menjauhi wilayah bahaya banjir dan dapat dijadikan pemerintah sebagai pertimbangan untuk pengendalian perubahan penggunaan lahan khususnya permukiman pada kecamatan yang diarahkan untuk perkembangan permukiman di Kabupaten Bojonegoro.

## II. METODE PENELITIAN

### A. Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini metode pengumpulan datanya dikelompokkan kedalam jenis data yang didapatkan yaitu jenis data primer dan data sekunder. Data primer didapatkan dari survei dan wawancara. Sedangkan data sekunder didapatkan melalui perantara, yang dalam penelitian ini berasal dari instansi pemerintah dan citra satelit. Dalam penelitian ini data primer berupa wawancara digunakan untuk analisis Delphi dan AHP.

### B. Pertumbuhan lahan tahun 2006 – 2016

Untuk mengetahui pertumbuhan lahan permukiman di wilayah yang diarahkan untuk pengembangan permukiman Kabupaten Bojonegoro dilakukan dengan pendekatan *overlay*. Fungsi *overlay* merupakan suatu analisis dari minimal dua data spasial yang digunakan sebagai data masukan yang kemudian menghasilkan suatu data spasial baru [16]. Dalam prediksi tren, jumlah pertumbuhan dapat dihasilkan dari perbandingan peta penggunaan lahan dua tahun [14]. Perbandingan peta yang digunakan dalam penelitian ini adalah penggunaan lahan eksisting tahun 2016 dan penggunaan lahan eksisting tahun tahun 2006. Hasil *overlay* diharapkan menghasilkan peta transisi untuk setiap pertumbuhan penggunaan lahan.

### C. Penyusunan Peta Potensi Transisi

Peta potensi transisi pada pemodelan perubahan penggunaan lahan adalah peta penting sebagai basis pertumbuhan penggunaan lahan tertentu [14]. Peta transisi untuk memodelkan pertumbuhan lahan tertentu dibuat menggunakan teknik *Multi Criteria Evaluation (MCE)* dengan memperhitungkan faktor pendorong [17]. Sedangkan dalam analisis spasial biasa disebut dengan SMCE. SMCE adalah salah satu metode dalam proses pengambilan keputusan dalam perencanaan wilayah yang menggunakan model simulasi dengan beberapa kriteria dan faktor [18].

Penelitian ini menggunakan variabel aksesibilitas sebagai faktor pendorong. Perhitungan faktor pendorong aksesibilitas dilakukan dengan menstandarisasi peta jarak menggunakan *Fuzzy Set* untuk menghasilkan nilai riil antara 0 – 1 [17]. *Fuzzy set* terdiri dari dua jenis yaitu *Monotonically Increasing* dan *Monotonically Decreasing*. *Monotonically Increasing* menghasilkan variabel bernilai riil dengan potensi perkembangan terbaik jika semakin jauh dengan variabel pendorong. Sedangkan *Monotonically Decreasing*

menghasilkan variabel bernilai riil dengan potensi perkembangan terbaik jika semakin dekat dengan variabel pendorong. Berikut adalah proses standarisasi dari tools *fuzzy set* dalam LanduseSim [14]:

*Linear Monotonically Increasing*

$$S_{std_{x,y}} = \frac{S_{i_{x,y}}}{max.S_i} \quad (1)$$

*Linear Monotonically Decreasing*

$$S_{std_{x,y}} = -\left(\frac{S_{i_{x,y}}}{max.S_i} - 1\right) \quad (2)$$

Keterangan:

$S_{std_{x,y}}$  = Nilai yang sudah distandardisasi pada sel tertentu (x,y)

$S_{i_{x,y}}$  = Angka kesesuaian/ nilai jarak pada sel tertentu (x,y)

$max.S_i$  = Nilai maksimum dari angka kesesuaian/ nilai jarak

Setelah itu setiap peta jarak dan bobotnya yang sudah relevan di-overlay sehingga akan dihasilkan peta pertumbuhan penggunaan lahan [17]. Untuk memastikan pendekatan ilmiah dalam proses pembobotan, metode yang paling dapat dipercaya atau dengan perspektif stakeholder dapat digunakan *Analytical Hierarchical Process* (AHP). Faktor/variabel pendorong dapat dikumpulkan dengan beberapa cara seperti berbasis literatur, analisis faktor konfirmatori, regresi logistik, analisis Delphi, dan sebagainya [17]. Dalam penelitian ini pengumpulan variabel pendorong menggunakan analisis Delphi. Rumus matematis dalam perhitungan hasil peta potensi perubahan dapat dilihat dalam persamaan (3).

$$TP_{i_{x,y}} = \sum_{z=0}^n \left( N_{i(z \rightarrow n)_{x,y}} \cdot ITP_{i(z \rightarrow n)_{x,y}} \right) \quad (3)$$

$TP_{i_{x,y}}$  = Nilai potensi transisi dari penggunaan lahan *I* pada sel tertentu (x,y) (*sum operation of filter*)

$N_{i(z \rightarrow n)_{x,y}}$  = Proses *Neighbourhood filter* oleh filter tertentu dan merupakan akumulasi pada pusat sel (x,y), sedangkan *n* merupakan angka total dari sel *neighbourhood* dengan atau tanpa pusat sel

$ITP_{i(z \rightarrow n)_{x,y}}$  = Nilai *initial transition potential map* untuk penggunaan lahan tertentu *i*. atau bisa diwakilkan dengan peta kesesuaian untuk penggunaan lahan tertentu yang berkembang

**D. Neighborhood Filter**

Proses inti pada LanduseSim adalah mekanisme iterasi ketetanggaan (*neighborhood filter operation*), dimana peta penggunaan lahan diolah dengan beberapa efek dan kriteria *neighborhood*. Ukuran *neighborhood* mendefinisikan tingkat interaksi antara penggunaan lahan dan dinamika dalam sistem pemodelan [19]. Sehingga dalam penelitian ini untuk sistem operasi *neighborhood* digunakan filter 3x3 dengan bobot yang sama 1 pada semua sel dan mekanisme operasi SUM. Artinya, pada masing-masing inti *cell* hanya akan memberikan pengaruh pada satu *cell* tetangga di sekitarnya. Proses CA dengan filter 3x3 dapat memberikan hasil perubahan lahan yang lebih kompak dibandingkan 5x5 atau 7x7 [20].

**E. Mengatur Zoning Constraint Map**

Tahap ini merupakan tahapan lanjutan untuk membatasi area potensial pertumbuhan pada model. Zoning Constraint Map adalah pembatas permanen dari pertumbuhan penggunaan lahan atau tutupan lahan tertentu. Peta zoning ini dipersiapkan untuk peta kawasan rawan banjir dengan memberikan nilai 0 pada area kawasan terdampak, sedangkan area di luar zonasi tersebut diberi nilai 1 yang artinya dapat terkonversi. Pengaturan zoning constraint map ini akan meng-update Peta Transisi.

**F. Simulasi dengan metode Cellular Automata**

Proses simulasi perubahan penggunaan lahan yang dibantu dengan *software* LanduseSim dilakukan dengan mensimulasikan perkembangan lahan 2006. Dengan tahun akhir simulasi tahun 2038. Sehingga dilakukan iterasi sebanyak 32 kali untuk menghasilkan peta prediksi perubahan penggunaan lahan setiap tahunnya dari tahun 2006 ke 2038. Pada proses iterasi *Cellular Automata* untuk mensimulasikan pertumbuhan dari *landuse* tertentu dalam LanduseSim di hasilkan dengan perhitungan matematika dalam persamaan (4)

$$LU_{x,y}^{t+1} = f \left( LU_{x,y}^t, TP_{i_{x,y}}, G_{i_{x,y}}, C_{i_{x,y}}, E_{i_{x,y}}, Z_{i_{x,y}}, TS \right) \quad (4)$$

$LU_{x,y}^{t+1}$  = Pertumbuhan baru (keadaan yang berubah) dari penggunaan lahan *I* pada waktu t+1 pada sel tertentu (x,y).

$LU_{x,y}^t$  = Keadaan kelas penggunaan lahan sebelum simulasi pada sel tertentu (x,y).

$TP_{i_{x,y}}$  = Peta potensi transisi dari penggunaan lahan *I* pada sel tertentu (x,y).

$G_{i_{x,y}}$  = Jumlah pertumbuhan sel yang diharapkan dari penggunaan lahan *i* pada waktu t+1.

$C_{i_{x,y}}$  = Konstrain pertumbuhan lahan yang dapat diwakili dari penggunaan lahan tertentu yang tak bisa dikonversikan oleh penggunaan lahan *i* atau zona yang dibutuhkan untuk dilindungi atau dikonservasi. Area konstrain biasanya digunakan untuk mewakili penggunaan lahan tertentu yang tidak memungkinkan untuk dikonversi oleh lahan *i*.

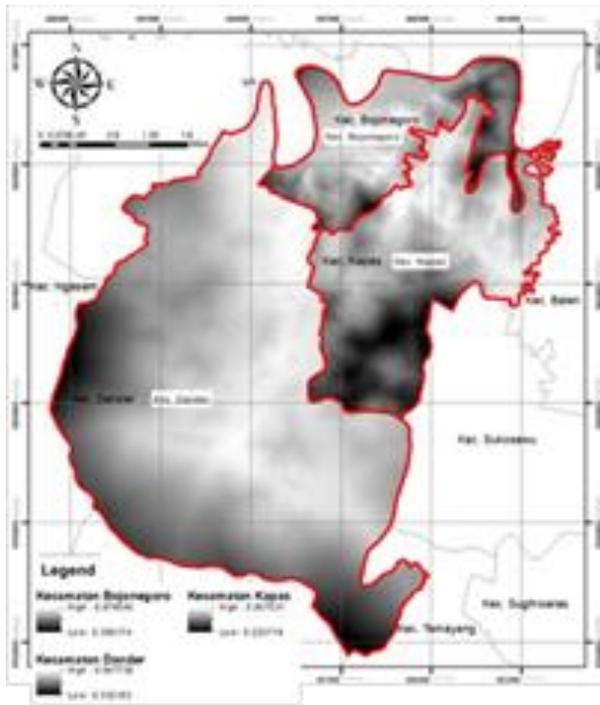
$E_{i_{x,y}}$  = *Elasticity of change* untuk penggunaan lahan tertentu untuk dikonversikan menjadi penggunaan lahan (*i*)

$Z_{i_{x,y}}$  = istem zonasi seperti rencana penggunaan lahan, area bencana, zona pertumbuhan yang dipromosikan

$TS$  = *Time-step* dari iterasi *cellular automata*

**G. Validasi Model**

Validasi model bertujuan untuk mengetahui keakuratan dari model yang telah dihasilkan. Akurasi klasifikasi diukur berdasarkan persentase jumlah piksel yang dikelaskan secara benar dibagi dengan jumlah total piksel yang digunakan (jumlah piksel yang terdapat di dalam diagonal marik dengan jumlah seluruh piksel yang digunakan [21]. Validasi ini dapat dilakukan dengan beberapa teknik salah satunya adalah *overall accuracy* (akurasi keseluruhan). Akurasi keseluruhan merupakan suatu nilai dari salah satu alat yang digunakan untuk penilaian keakuratan model spasial tematik [7]. Dasar perhitungan matematis untuk nilai AK memiliki nilai *cutoff* sebesar 85% sebagai batas penerimaannya [7].



Gambar 2. Peta transisi perkembangan lahan permukiman hasil pembobotan fuzzy set.

Tabel 1. Perubahan penggunaan lahan tahun 2006 - 2016

Jenis Penggunaan Lahan	Luas Tahun 2006 (Ha)	Luas Tahun 2016 (Ha)	Pengaruh Pada Perubahan (Ha)
Permukiman	1912.28	2092.61	180.33
Fasilitas Umum	91.27	105.80	14.53
Industri/ Pergudangan	22.51	23.07	0.56
Tanah Kosong/ Padang Rumput	72.32	99.85	27.53
Sawah	10413.22	10398.09	-15.13
Kebun	4775.63	4653.46	-122.17
Ladang	1126.28	1081.64	-44.64
Jalan	270.05	270.05	0
Jalur Kereta Api	19.83	19.83	0
Danau	25.67	25.67	0
Sungai	117.86	117.86	0
Semak Belukar	249.43	249.43	0
Total	19096.35	19096.35	

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Perubahan Lahan 2006 – 2016

Sebelum dilakukan simulasi, perlu diketahui tren perubahan lahan pada tahun sebelumnya. Untuk itu dilakukan *overlay* pada peta tahun 2006 dan 2016. Peta digitasi tahun 2006 dan tahun 2016 tersebut di-*overlay* dengan bantuan *toolbox intersect* pada *software* ArchGis versi 10.1. Melalui hasil *overlay* tersebut dapat dilihat kecenderungan perubahan penggunaan lahan di wilayah studi. Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa penggunaan lahan permukiman bertambah pada tahun 2006 memiliki luas 1912,28 dan tahun 2016 bertambah menjadi 2092,61. Pertambahan permukiman ini dalam kurun waktu 10 tahun adalah sebesar 180,34 Ha. Secara lengkap perubahan masing-masing penggunaan lahan dari tahun 2006 ke tahun 2016 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 2. Estimasi pertumbuhan lahan permukiman pada tahun 2038 di wilayah studi

Lahan Permukiman	Estimasi Pertumbuhan (ha)	Pertumbuhan dalam Cell
Kecamatan Bojonegoro	252,59	25.259
Kecamatan Kapas	111,61	11.161
Kecamatan Dander	212,87	21.287

#### B. Pembentukan Peta Transisi

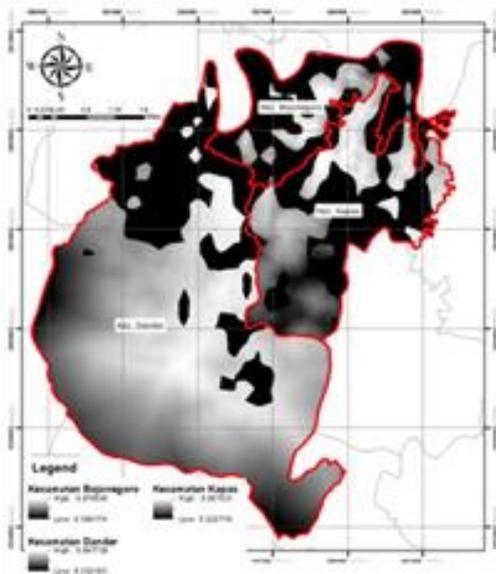
Dalam pembentukan peta transisi membutuhkan bobot variabel untuk di-*overlay*. Hasil dari Delphi dan AHP menghasilkan variabel dan bobot pengaruh pertumbuhan lahan permukiman yang diantaranya Daerah Rawan Bencana (0,103), Kedekatan dengan Pasar/Pusat Belanja (0,044), Kedekatan dengan Kota Kecamatan (0,031), Kedekatan dengan Kota Kabupaten (0,062), Kedekatan dengan Rumah Sakit (0,04), Kedekatan dengan Jalan (0,135), Kedekatan dengan Sekolah (0,065), Permukiman (0,137), Industri (0,05), Jaringan Listrik (0,116), Jaringan Air Bersih (0,129), Pemakaman (0,016), dan Terminal/Stasiun (0,072). Sedangkan hasil dari peta transisi yang berasal dari variabel dan bobot tersebut dapat dilihat dari Gambar 2.

Dalam perhitungan permukiman yang diekspektasikan untuk tumbuh dalam satuan cell, pertumbuhan lahan permukiman yang sudah didapatkan dalam kurun waktu 10 tahun yaitu sebesar 180,34 Ha dijadikan sebagai acuan. Penelitian ini mengkonversi peta digitasi vector menjadi format raster dengan resolusi sekitar 100 meter<sup>2</sup> (10mx10m) untuk setiap sel. Hal ini didasarkan pada digitasi penggunaan lahan pada skala 1:5000 dari citra satelit. Oleh sebab itu seperti penelitian yang terdahulu oleh Pratomoatmojo (2018) [14], pertumbuhan permukiman yang diekspektasikan untuk tumbuh pada tahun 2038 akan dikonversikan kedalam resolusi 10mx10m setiap satu cell. Karena simulasi dilakukan pada masing-masing kecamatan sehingga pertumbuhan permukiman yang diekspektasikan untuk tumbuh juga dihitung pada masing-masing kecamatan. Tabel 2 menunjukkan estimasi pertumbuhan dalam hektar dan luas permukiman yang diekspektasi untuk tumbuh dalam cell.

Selain mengatur luasan penggunaan lahan yang diprediksi bertambah, juga diatur penggunaan lahan yang menjadi konstrain atau lahan yang tidak dapat dikonversi menjadi penggunaan lahan yang diprediksi bertambah. Berikut adalah penggunaan lahan yang menjadi konstrain atau penggunaan lahan yang tidak dapat dikonversi oleh permukiman diantaranya adalah fasilitas umum, industri, jalan, jalur kereta api, sungai, dan danau/bendungan.

#### C. Mengatur Constraint Zone

Dalam pengaturan *constraint zone* peta hasil *Transition Rules* yang merupakan peta transisi perkembangan lahan permukiman kemudian di *overlay* dengan *constraint zone* berupa wilayah bahaya banjir. Tahap ini akan menghasilkan peta transisi perkembangan lahan yang hanya berkembang pada wilayah yang aman dari bahaya banjir



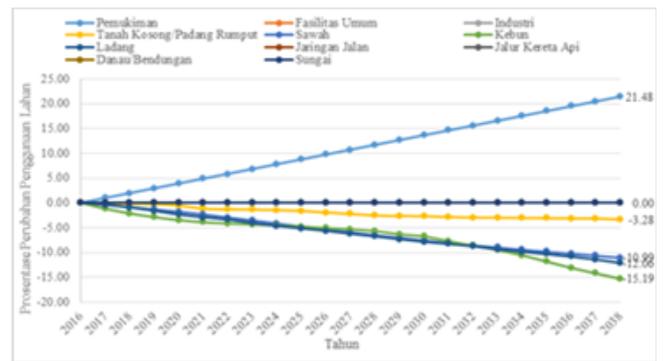
Gambar 3. Peta raster hasil pembobotan yang dioverlay dengan zona bahaya banjir kelas tinggi.

**D. Hasil Simulasi Pertumbuhan Permukiman**

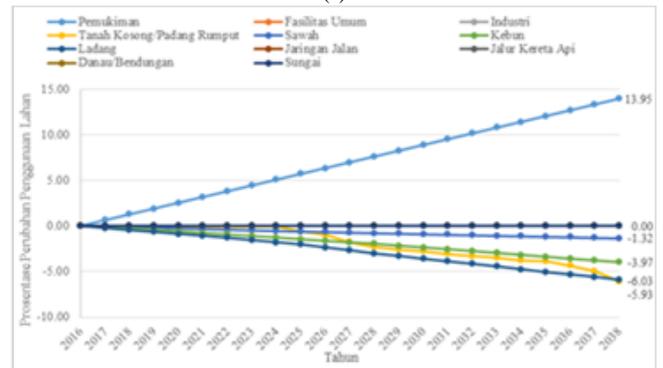
Pada tahap simulasi prediksi perubahan penggunaan lahan permukiman digunakan *software* LanduseSim untuk membantu memodelkan perkembangan penggunaan lahan permukimannya. Tahapan pemodelan yang dilakukan terdiri dari dua tahap. Tahap pertama modelkan penggunaan lahan dari tahun 2006 ke tahun 2016 untuk melihat tingkat validitas model. Setelah diketahui jika validasi sudah baik maka akan dilanjutkan untuk memodelkan penggunaan lahan dari tahun 2006 ke tahun 2038. Hasil dari pemodelan pada tahun 2016 menunjukkan bahwa nilai akurasi keseluruhannya adalah 97% sehingga model memiliki nilai cut off diatas 85%.

Dari pemodelan perkembangan lahan permukiman dengan pertimbangan wilayah bahaya banjir di wilayah studi didapatkan hasil bahwa penggunaan lahan permukiman yang paling tinggi bertambah adalah di Kecamatan Bojonegoro dengan prosentase mencapai 21,48%. Dan yang paling rendah adalah perkembangan permukiman di Kecamatan Kapas yang hingga tahun 2038 hanya naik sebesar 13,95%. Sedangkan Kecamatan Dander pertumbuhan permukimannya memiliki prosentase kenaikan 18,72% pada tahun akhir jika dibandingkan dengan tahun 2006. Hal ini sejalan dengan kondisi eksisting pada saat ini dimana permukiman banyak berkembang di Kecamatan Bojonegoro. Kemudian Kecamatan Dander yang juga mulai tumbuh permukiman-permukiman pengembang seperti Citra Regency Dander dan Bumi Damai Regency. Sedangkan untuk penggunaan lahan yang berkurang di setiap kecamatan juga berbeda satu sama lainnya. Pada Kecamatan Bojonegoro yang berkurang adalah lahan sawah, ladang, perkebunan, dan tanah kosong. Lebih jelasnya dapat dilihat dalam grafik yang ada pada Gambar 4.

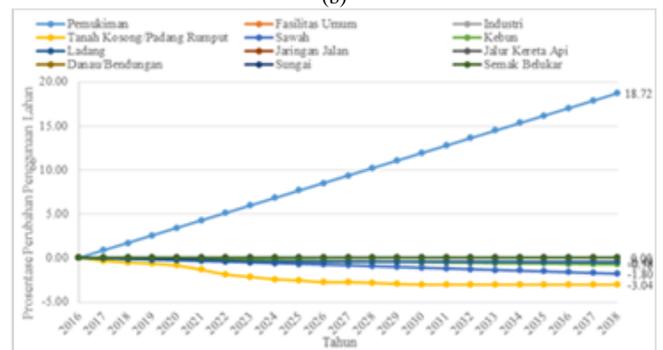
Jika dilihat secara keseluruhan pertumbuhan permukiman di wilayah studi yaitu Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Dander dan Kecamatan Kapas bertambah dari 1958,16 Ha pada tahun 2006, menjadi 2534,8 Ha pada tahun 2038. Sehingga total penambahan permukiman di wilayah studi adalah 576,64 Ha dengan prosentase pertumbuhan totalnya sebesar 30% dari tahun awal. Penggunaan lahan yang berubah menjadi permukiman dari tahun 2006 ke tahun 2038



(a)



(b)



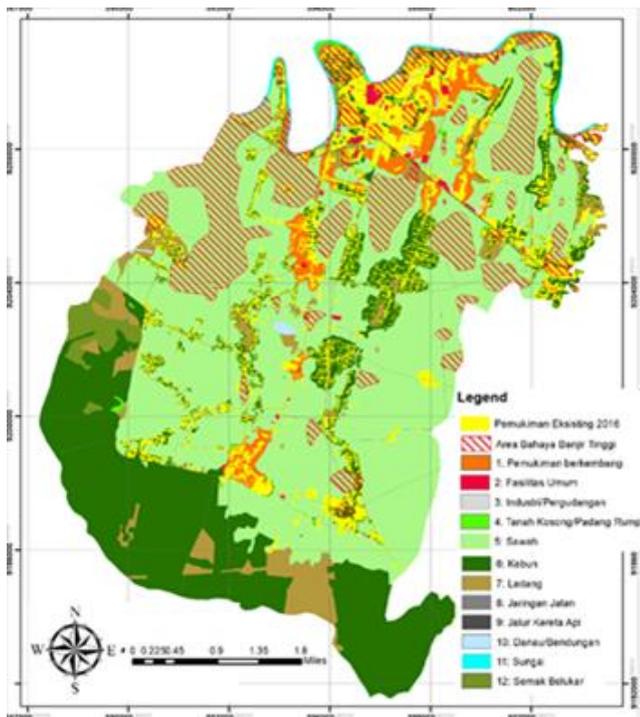
(c)

Gambar 4. Grafik perubahan penggunaan lahan tahun 2016 – 2038 (a) Kecamatan Bojonegoro (b) Kecamatan Kapas (c) Kecamatan Dander.

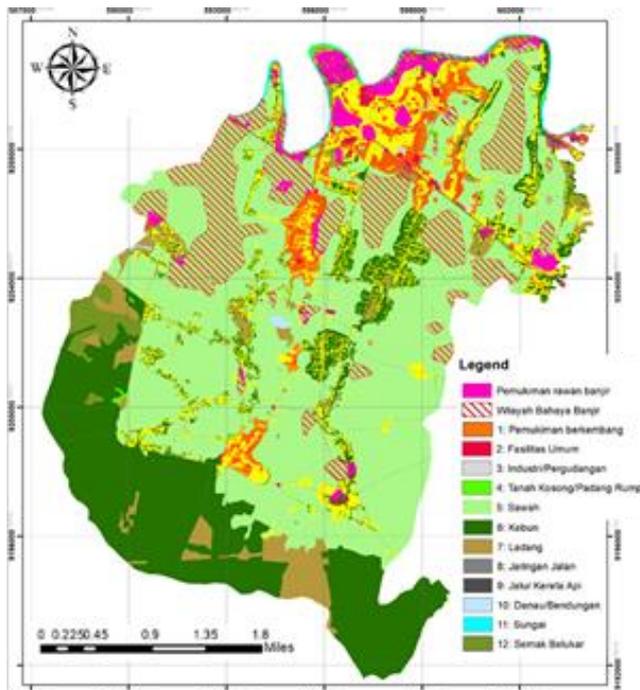
adalah penggunaan lahan jenis kebun, ladang, sawah dan tanah kosong/ padang rumput.

Penggunaan lahan yang paling banyak berubah menjadi permukiman adalah penggunaan lahan kebun yang berubah hingga 309,63 Ha pada tahun 2006 ke tahun 2038. Sedangkan lahan kedua yang paling banyak berubah menjadi permukiman adalah penggunaan lahan sawah sebesar 217.8 Ha. Pada Gambar 5 dapat dilihat hasil dari model perkembangan lahan permukiman dengan pertimbangan wilayah bahaya banjir.

Hasil dari peta simulasi yaitu Gambar 5 telah ditunjukkan kepada stakeholder dari Dinas Bina Marga dan Tata Ruang Kabupaten Bojonegoro bidang Tata Ruang untuk dikonfirmasi apakah model perkembangan permukiman yang dihasilkan masuk akal jika dibandingkan dengan kondisi saat ini dan dengan dokumen perencanaan di wilayah studi. Hasil dari wawancara menghasilkan bahwa sebagian besar perkembangan permukiman sudah sesuai dengan peta rencana dan masuk akal. Namun pada wilayah-wilayah tertentu seperti di Jalan Veteran, dimana pada simulasi tumbuh permukiman di sekitarnya, simulasi kurang sesuai



Gambar 5. Peta hasil simulasi pemodelan perkembangan lahan permukiman dengan pertimbangan wilayah bahaya banjir di Kabupaten Bojonegoro



Gambar 6. Peta model tanpa *constraint* persebaran permukiman tahun 2038 yang masuk wilayah bahaya banjir kelas tinggi

dengan dokumen rencana. Sebab dalam rencananya, jalan veteran tersebut akan dijadikan sebagai wilayah perdagangan dan jasa.

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan kembali, namun dalam pemodelan yang kedua tidak memperhitungkan *constraint zone*. Pemodelan tanpa *constraint zone* dilakukan agar dapat membandingkan model perkembangan permukiman yang menggunakan zona bahaya banjir sebagai *constraint* dan tidak menggunakan *constraint* zona bahaya banjir. Model tanpa zona bahaya banjir ini juga dimodelkan pada masing-masing kecamatannya. Hasil dari peta model

tanpa *constraint zone* dapat dilihat pada Gambar 6.(b) Hasil validasi keseluruhan model tanpa konstrain zona bahaya banjir memiliki nilai diatas 90%. Hasil validasi keseluruhannya di Kecamatan Bojonegoro, Kecamatan Kapas, dan Kecamatan Dander masing-masing memiliki nilai 94,41%; 98,11%; dan 98,46%. Nilai tersebut berarti model perkembangan permukiman tanpa konstrain zona bahaya banjir memiliki model yang dapat diterima. Berlanjut pada perbandingannya, model dengan konstrain zona bahaya banjir memiliki permukiman seluas 272,76 Ha yang masuk zona bahaya banjir. Sedangkan model tanpa zona penghambat bahaya banjir memiliki permukiman seluas 321,85 Ha yang masuk dalam zona bahaya banjir. Dari sini dapat disimpulkan bahwa model dengan konstrain zona bahaya banjir dapat menekan permukiman seluas 49.09 Ha untuk tumbuh.

#### IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian yang dilakukan untuk menjawab prediksi perkembangan permukiman berbasis CA dengan batasan kawasan banjir di perkotaan Kabupaten Bojonegoro berhasil dilakukan. Hasil pemodelan menghasilkan AK untuk Penggunaan lahan 2016 sebesar 97%, hasil tersebut dapat diklasifikasikan sebagai model yang baik. Model dari lahan permukiman yang disimulasikan untuk menjauhi daerah rawan banjir pada tahun 2038, memiliki luas 2534,8 Ha yang pada awalnya tahun 2016 luasannya hanya 764,92 Ha. Jika dibandingkan, model dengan konstrain zona bahaya banjir memiliki permukiman seluas 272,76 Ha yang masuk zona bahaya banjir. Sedangkan model tanpa konstrain zona bahaya banjir memiliki permukiman seluas 321,85 Ha yang masuk dalam zona bahaya banjir. Yang memiliki arti bahwa model dengan konstrain zona bahaya banjir dapat menekan permukiman seluas 49.09 Ha untuk tumbuh.

Namun terdapat beberapa kendala yang ditemukan diantaranya. Kendala pertama yang dialami adalah data peta yang didapatkan memiliki klasifikasi lahan yang berbeda antara tahun 2006 dengan tahun 2016 sehingga perlu dilakukan digitasi ulang dan pengecekan ulang untuk memastikan bahwa peta penggunaan lahan sudah sesuai dengan kondisi penggunaan lahan eksisting. Selain itu metode Delphi yang digunakan untuk menentukan variabel pengaruh pertumbuhan lahan permukiman memerlukan waktu yang cukup lama untuk menghasilkan konsensus antara stakeholder expert. Kendala yang ketiga adalah data peta wilayah bahaya banjir di Kabupaten Bojonegoro belum siap untuk diolah, sehingga perlu dilakukan pengolahan ulang untuk mengetahui wilayah bahaya banjir.

Prediksi perkembangan permukiman berbasis CA dengan batasan kawasan banjir di perkotaan Kabupaten Bojonegoro dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan oleh Pemerintah Kabupaten Bojonegoro untuk mengendalikan perkembangan permukiman agar permukiman yang bertambah dapat diatur untuk menjauhi kawasan bahaya bencana banjir. Namun dalam penelitian ini pemodelan yang dilakukan hanya memodelkan penggunaan lahan permukiman sedangkan penggunaan lahan lain yang berpotensi untuk berkembang tidak dimodelkan. Oleh sebab

itu untuk penelitian selanjutnya dapat memodelkan penggunaan lahan lain yang berpotensi untuk berkembang.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Fuchs, *Cities at risk: Asia's coastal cities in an age of climate change.*, vol. 96, Honolulu, 2010.
- [2] M. Anggraeni, I. R. Dwi Ari, E. B. Santosa and R. Widyanti, "Climate Change & Home Location Preferences in Flood Prone Areas of Bojonegoro Regency," *Procedia Environmental Sciences*, pp. 703-711, 2014.
- [3] E. Sayu Mimanggar Mirahesti, "Evaluasi Perencanaan Prabencana Banjir Bengawan Solo Kabupaten Bojonegoro Tahun 2014," *Jurnal Berkala Epidemiologi*, pp. 262-274, Mei 2016.
- [4] E. Lambin and P. Meyfroidt, "Land use transition: Socio-ecological feedback versus socio-economic change," *Land Use Policy*, vol. 27, pp. 108-118, 2010.
- [5] H. Geist and E. Lambin, "What drives tropical deforestation? A meta-analysis of proximate and underlying causes of deforestation based on sub-national case study evidence, University of Louvain-la-Neuve, 2001.
- [6] A. Vedkamp and E. Lambin, "Predicting land-use change," *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 85, pp. 1-6, 2001.
- [7] P. B. K. Santoso, "Model Dinamika Spasial Penggunaan Lahan Sawah Di Kabupaten Subang Provinsi Jawa Barat," 2018.
- [8] F. Rismara, *Landuse Change and Its Impact to Water Availability*, Bogor: Bogor Agricultural University, 2014.
- [9] R. Yudarwati, *Perubahan Penggunaan Lahan Dan Arahan Pengendaliannya Di Kabupaten Bogor Dan Cianjur*, Bogor, 2016.
- [10] Y. Nong and Q. Du, "Urban Growth Pattern Modelling Using Logistic Regression," *Geo-spatial Information Spatial*, vol. 14, pp. 62-67, 2011.
- [11] D. O'Sullivan, "Exploring Spatial Process Dynamics Using Irregular Cellular Automaton Models," *Geographical Analysis*, pp. 1-18, 2001.
- [12] A. Deliar, "Pemodelan Hibrid Dalam Prediksi Dinamika Perubahan Tutupan Lahan (Studi Kasus: Wilayah Bandung)," *Teknik Geodesi dan Geomatika*, 2010.
- [13] N. A. Pratomoatmojo, "LanduseSim Sebagai Aplikasi Pemodelan dan Simulasi Spasial Perubahan Penggunaan Lahan Berbasis Sistem Informasi Geografis dalam Konteks Perencanaan Wilayah dan Kota," *Seminar Asional Cities*, pp. 69-79, 2014.
- [14] P. N A, "LanduseSim Algorithm: Land use change modelling by means of Cellular Automata and Geographic Information System," *Earth and Environmental Science*, pp. 1-12, 2018.
- [15] Y. Al-Darwish, H. Ayad, D. Taha and D. Saadallah, "Predicting the future urban growth and its impacts on the surrounding environment using urban simulation models: Case study of Ibb city - Yemen," *Alexandria Engineering Journal*, pp. 2887 - 2895, 2018.
- [16] M. A. Marfai and dkk, "Pemodelan Spasial Bahaya Banjir Rob Berdasarkan Skenario Perubahan Iklim Dan Dampaknya Di Pesisir Pekalongan," *Jurnal Bumi Lestari*, vol. 13, pp. 244-256, 2013.
- [17] P. N A, "LanduseSim Methods: Land use class hierarchy for simulations of multiple land use growth," *Earth and Environmental Science*, vol. 202, pp. 1-9, 2018.
- [18] A. Wibowo and J. Semedi, "Model Spasial Dengan Smce Untuk Kesesuaian Kawasan Industri (Studi Kasus Di Kota Serang)," *Globè*, vol. 13, pp. 50-59, 2011.
- [19] S. S. Gharbia, S. A. Alfatah, L. Gill, P. Johnston and F. Pilla, "Land use scenarios and projections simulation using an integrated GIS cellular automata algorithms," *Model. Earth Syst. Environ*, pp. 1 - 20, 2016.
- [20] N. A. Pratomoatmojo, *Land Use Change Modelling Under Tidal Flood Scenario by Means of Markov-Cellular Automata in Pekalongan Municipal*, Universitas Gajah Mada, 2012.
- [21] A. Nurwanda, "Proyeksi Perubahan Tutupan Lahan Dan Dampaknya Terhadap Diversitas Lanskap Di Kabupaten Batanghari Provinsi Jambi," 2016.