



## Simulasi Kebakaran Hutan dan Lahan di Provinsi Riau Menggunakan *Cellular Automata*

Roni Al Maududi<sup>1</sup>, Rini Widia Putri Z<sup>2</sup>

Teknik Informatika, Universitas Indraprasta PGRI, Indonesia<sup>1</sup>

Teknik Informatika, Universitas Indraprasta PGRI, Indonesia<sup>2</sup>

email: ronialmaududi@gmail.com<sup>1</sup>, r.widia.putri@gmail.com<sup>2</sup>

Received 17 Agustus 2022, Accepted 21 September 2022, Published 30 September 2022

### Abstrak

Salah satu penyebab terjadi besarnya kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau adalah kesengajaan manusia untuk mengalihkan fungsi hutan, sehingga muncul titik - titik api di daerah yang berpotensi terjadinya kebakaran hutan dan lahan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mensimulasikan kebakaran hutan dan lahan yang terjadi di Provinsi Riau menggunakan *Cellular Automata* dengan memanfaatkan foto citra satelit. Lahan di Provinsi Riau dibagi menjadi 5 keadaan (state), yaitu: lahan kering, lahan basah, lahan yang sedang terbakar, lahan yang sudah terbakar, dan lahan perairan. Metode yang digunakan untuk simulasi kebakaran hutan ini adalah metode *Cellular Automata* untuk mensimulasikan pergerakan api saat kebakaran. Metode ini mampu menjelaskan pola penyebaran api sel utama kebakaran dari sel tetangganya. Di akhir penelitian, akan diperlihatkan hasil simulasi dan pergerakan api dari tempat munculnya titik api pada foto citra satelit Provinsi Riau sesuai dengan keadaan tutupan lahan. Hasil penelitian ini adalah penggambaran dari situasi nyata kebakaran yang terjadi di Provinsi Riau berdasarkan munculnya titik api dan pola pergerakannya.

**Kata Kunci:** Simulasi; Lahan; *Cellular Automata*.

### Abstract

One of the causes of the large number of forest and land fires in Riau Province is human intent to divert forest functions, so that hotspots appear in areas that have the potential for forest and land fires. The purpose of this study was to simulate forest and land fires that occurred in Riau Province using *Cellular Automata* by utilizing satellite imagery. Land in Riau Province is divided into 5 states, namely: dry land, wet land, land that is being burned, land that has been burned, and land of water. The method used for simulating forest fires is the *Cellular Automata* to simulate the movement of fire during a fire. This method is able to explain the pattern of fire spread of the main cell fire from neighboring cells. At the end of the study, the simulation results and the movement of fire from where the hotspots appear on satellite images of Riau Province will be shown according to the state of the land cover. The results of this study are a description of the real situation of fires that occurred in Riau Province based on the emergence of hotspots and their movement patterns.

**Keywords:** Simulation; Land; *Cellular Automata*.

## PENDAHULUAN

Luas hutan di Indonesia hampir 52% dari luas daratannya. Namun pada kenyataannya setiap tahun terjadi penyusutan luas hutan di Indonesia. Penyebab berkurangnya luas hutan di Indonesia adalah kebakaran hutan. Kebakaran hutan sudah menjadi bencana rutin yang terjadi di Indonesia. Hampir semua kawasan perhutanan yang tersebar di pulau-pulau Indonesia mengalami kebakaran setiap tahunnya.

Kebakaran hutan dan lahan adalah bencana alam yang sering terjadi di Indonesia, terutama pada musim kemarau. Kebakaran ini menyebabkan kerusakan lingkungan yang sangat besar, kerugian ekonomi, dan masalah sosial. Faktanya, kebakaran hutan dan lahan yang besar mengakibatkan dampak asap yang menghancurkan di luar batas administrasi negara (bencana transnasional) [1].

Provinsi Riau merupakan salah satu wilayah dengan kebakaran hutan dan lahan yang cukup tinggi dan terjadi setiap tahun. Hasil data luas kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau dari pantauan Karhutla *Monitoring System*, area yang terbakar pada tahun 2015 yakni sekitar 183.808,59 Ha, pada tahun 2016 sekitar 85.219,51 Ha, pada 2017 sekitar 6.866,09 Ha, pada tahun 2018 sekitar 37.236,27 Ha hingga pada tahun 2019 sekitar 76.267,00 Ha [2]. Sedangkan berdasarkan data terkini yang diambil dari situs resmi Pemerintah Daerah Provinsi Riau, pada tahun 2020 dan 2021 kebakaran hutan dan lahan mengalami penurunan yang signifikan yaitu masing - masing 1.600,41 Ha dan 1.400,08 Ha.

Kebakaran yang sering terjadi di Provinsi Riau juga banyak disebabkan karena munculnya titik api pada daerah - daerah yang memiliki potensi terjadinya kebakaran hutan atau lahan. Hal ini karena adanya pembukaan hutan atau lahan untuk perkebunan atau tempat tinggal dengan cara membakar, sehingga api dapat membesar tak terkendali dan menyebar ke daerah dan tempat - tempat yang semula tidak termasuk yang diinginkan untuk dibuka. Selain itu, munculnya titik api dapat juga disebabkan oleh faktor alami yang terjadi terutama di musim kemarau. Pada penelitian ini akan disimulasikan kebakaran hutan yang terjadi di Provinsi Riau dimulai dari munculnya titik api hingga terjadinya kebakaran hutan atau lahan dan penyebarannya berdasarkan tutupan lahan yang ada di Provinsi Riau dan foto citra satelit. Faktor terpenting yang mempengaruhi laju penyebaran dan bentuk nyala api kebakaran hutan adalah jenis bahan bakar (jenis vegetasi) dan kelembaban, kecepatan dan arah angin, topografi hutan (kemiringan dan hambatan alami), kontinuitas bahan bakar (ketebalan vegetasi), dan bercak yang merupakan fenomena di mana bahan yang terbakar dipindahkan oleh angin atau alasan lain seperti terlemparnya biji pinus yang menyala ke area yang tidak berdekatan dengan nyala api [3]. Api liar (*wild fire*) mungkin terjadi bermil - mil jauhnya dari komunitas perkotaan, tetapi kondisi dapat memungkinkan api yang ditinggikan untuk mendarat di dalam komunitas yang berpotensi menyulut vegetasi atau struktur di dalam zona ini [4].

Metode yang akan digunakan untuk memodelkan serta mensimulasikan pergerakan api adalah metode *Cellular Automata*. *Cellular Automata* adalah sebuah model yang mampu menjelaskan interaksi dalam ruang dan waktu pada suatu sistem yang kompleks seperti pada sistem fisis, biologis, kimiawi, sosial, dan ekonomi. Keunggulan dari model ini adalah mampu menghasilkan suatu pola sederhana hingga pola yang kompleks dengan prinsip yang sederhana. Dikutip dari situs Wolfram, *Cellular Automata* merupakan pemodelan matematika dari suatu sistem fisis di mana ruang, waktu dan keadaan pada sistem tersebut dijadikan diskrit. *Cellular Automata* adalah idealisasi dari sebuah sistem fisik di mana ruang dan waktu bersifat diskrit dan kuantitas fisik hanya mengambil satu set nilai yang terbatas. Secara informal, *Cellular Automata* adalah kisi sel, masing-masing yang mungkin dalam sejumlah keadaan diskrit yang telah ditentukan sebelumnya [5]. *Cellular Automata*, menerapkan gagasan utama dari *Cellular Automaton* yang diusulkan oleh Von Neumann dan kemudian dirinci oleh Wolfram, dan *Cellular Automata* merepresentasikan sebuah alat yang cocok untuk memodelkan perilaku pergerakan api karena fitur intrinsik dari *Cellular Automata* [6]. Dengan mengadopsi pendekatan *Cellular Automata*, sistem dapat digambarkan sebagai sejumlah besar individu interaktif (dipetakan ke sel pada *Cellular Automata* 2 dimensi) dengan perilaku yang relatif sederhana. Ketika individu dimodelkan bersama, interaksi sederhana mereka menghasilkan perilaku yang lebih kompleks. Perilaku yang lebih kompleks ini kemudian harus sesuai dengan perilaku yang disaksikan dalam sistem secara keseluruhan dalam kenyataan [7]. *Cellular Automata* didefinisikan oleh *grid* dengan *state* awal dan sejumlah *rules* untuk transisi *state*. Umumnya, *Cellular Automata* terdiri dari empat elemen, yang dapat dianggap sebagai tupel  $(X, S, N, f)$  [8]. Unit terkecil dari *Cellular Automata* disebut sel. *Cellular Automata* merupakan sebuah tupel  $A$  dengan  $A = \{X, S, N, f\}$  dan  $X, S, N, f$  adalah elemen-elemen dari *Cellular Automata*, di mana masing - masing merepresentasikan *Grid* ( $X$ ), *States* ( $S$ ), *Neighborhood* ( $N$ ), dan *Rules* ( $f$ ).

Pemodelan dan simulasi kebakaran hutan dan penyebaran api secara umum sudah banyak dibahas dan dilakukan, baik menggunakan model deterministik, stokastik, *Cellular Automata*, dan lainnya seperti yang sudah dilakukan oleh [9], [10], [11], [12], [13], [14], dan [15]. Dalam artikelnya [9] menunjukkan bagaimana teknik pemodelan mikroskopik seperti *Cellular Automata* yang dihubungkan dengan sistem informasi geografi (GIS) dan data meteorologi dapat digunakan untuk memprediksi secara efisien evolusi dari nyala api di pegunungan dan permukaan tanah hutan liar yang heterogen. Sementara [10] dalam artikelnya mengembangkan sebuah model matematis untuk memprediksi laju penyebaran dan intensitas kebakaran yang dapat diterapkan pada berbagai jenis bahan bakar liar disajikan dari tahap konseptual melalui evaluasi dan demonstrasi hasil hingga model bahan bakar hipotesis. Model ini dikembangkan untuk dan sekarang digunakan sebagai dasar untuk menilai penyebaran dan intensitas kebakaran dalam Sistem Peringkat Bahaya Kebakaran

Nasional. [11] menyajikan suatu model yang dapat memprediksi penyebaran api di hutan homogen dan tidak homogen dan dapat dengan mudah memasukkan kondisi cuaca dan topografi lahan. Sebuah algoritma telah dibangun berdasarkan model yang diusulkan dan digunakan untuk penentuan titik api di sejumlah hutan hipotetis, yang ditemukan sesuai dengan pengalaman penyebaran api di hutan nyata. Dalam artikelnya, [12] mengatakan bahwa banyak model fisik yang ada untuk penyebaran api di lapisan bahan bakar berpori menggunakan prinsip konservasi energi yang diterapkan pada bahan bakar yang dipanaskan sebelumnya. Umumnya, radiasi dianggap sebagai mekanisme dominan dari pemanasan awal bahan bakar. Di sisi lain kemiringan dan efek angin serta kelembaban vegetasi awal harus diperhitungkan untuk mendapatkan tingkat penyebaran api yang dapat diandalkan. Model penyebaran asap dan api di dalam Gedung yang luas menggunakan *Cellular Automata* telah dilakukan oleh [13] yang membahas tentang proteksi kebakaran bangunan saat ini merupakan topik penting untuk penyelidikan ilmiah karena kemungkinan kejadian yang tidak diinginkan yang dapat terjadi di dalam pabrik industri, bangunan umum besar atau fasilitas transportasi, seperti kebakaran, ledakan, pelepasan racun, dan lainnya. Bahkan insiden kecil dapat secara serius membahayakan kehidupan, barang dan lingkungan. Khususnya, api dan asap yang menyebar di gedung-gedung besar merupakan ancaman hebat yang dapat dipelajari dengan menggunakan simulasi komputer untuk mengurangi efek parahnya. Berdasarkan pengukuran *real-time* aliran udara utama di dalam gedung, kami mengembangkan instrumen cepat dan interaktif yang dirancang untuk penyelidikan penyebaran asap/api di gedung-gedung besar. Inti dari metode ini diwakili oleh dua automata seluler yang saling berhubungan dengan aturan transisi adaptif. Dalam artikelnya [14] membangun suatu model resiko kebakaran hutan berbasis faktor-faktor penyebab kebakaran sebagai suatu inovasi alternatif dalam mendukung pengendalian kebakaran hutan. Analisis regresi linier variabel prediktor biofisik dan perilaku manusia (antropogenik) terhadap kejadian kebakaran hutan di Jambi menunjukkan pengaruh signifikan sebesar 80,5% dengan bentuk persamaan:  $Y = 2,380 - 0,02 X_1 + 2,45 X_2 - 0,67 X_3 - 1,07 X_4 - 0,79 X_5 - 0,32 X_6 - 0,18 X_7 + 1,17 X_8$ . Analisis *confussion matrix* menegaskan akurasi model spasial resiko kebakaran hutan yang terbentuk dengan tingkat akurasi 80,24% dan secara spasial sebagian besar wilayah Provinsi Jambi termasuk dalam kategori risiko tinggi kebakaran hutan. Artikel yang ditulis oleh [15] mengembangkan sebuah kode kebakaran untuk tujuan pemodelan kebakaran lahan liar melalui *Large Eddy Simulation* (LES) dan penggunaan pendekatan level-set untuk melacak nyala api. Kinetika kimia terperinci telah dipertimbangkan melalui pendekatan *strained flamelet laminar* untuk proses pembakaran yang mencakup pertimbangan hasil volatil beracun seperti CO, CO<sub>2</sub> dan produksi jelaga.

Tujuan dari penulisan artikel ini adalah untuk mensimulasikan penyebaran kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau dengan titik api yang muncul di suatu area menggunakan *Cellular Automata*, mengetahui jenis keadaan lahan (*state*) pada penyebaran kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau, dan mengetahui faktor – faktor alami dan buatan pada penyebaran kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau.

## METODOLOGI

Jenis dan metode pada penelitian ini adalah simulasi. Simulasi dilakukan untuk menggambarkan pola penyebaran api pada kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau dengan hanya melihat faktor tutupan lahan melalui foto citra satelit. Simulasi dilakukan menggunakan program Matlab dengan menggunakan metode *Cellular Automata* untuk melihat pola penyebaran api pada kebakaran hutan yang terjadi. Prosedur simulasi diawali dengan pembuatan model yang akan disimulasikan, selanjutnya menentukan parameter apa saja yang perlu ditetapkan, kemudian menulis kode program yang akan dieksekusi, selanjutnya menampilkan hasil simulasi dan menjelaskan hasil simulasi.

Desain pada penelitian ini menggunakan model deterministik *Cellular Automata*. Model deterministik *Cellular Automata* merepresentasikan alat yang tepat untuk memodelkan kebiasaan dari titik api karena adanya fitur intrinsik pada *Cellular Automata* seperti kesederhanaan bentuk dan potensi yang besar pada *Cellular Automata* dalam memodelkan sistem yang kompleks[6].

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau ini, digunakan beberapa asumsi, yaitu:

- a. Simulasi ini masih belum mempertimbangkan arah angin yang terjadi dan seberapa cepatnya angin yang berhembus.
- b. Simulasi ini menggunakan model deterministik *Cellular Automata*.
- c. Faktor yang mempengaruhi penyebaran api pada kebakaran hanya dipengaruhi oleh jenis tutupan lahan di Provinsi Riau berdasarkan foto citra satelit.
- d. Kebakaran hutan yang terjadi dapat melewati sungai karena ada cabang pohon yang melewati sungai.

Pada simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau ini diterapkan *Cellular Automata*, dengan citra satelit Provinsi Riau sebagai masukan yang sudah diolah yang menunjukkan sebaran tutupan lahan dengan berbagai tingkat kekeringan. Untuk penyederhanaan, tutupan lahan tersebut hanya dibagi menjadi 2 kelompok berdasarkan nilai ambang (*thresholding*) pada matriks nilai warna merah (*red channel*) dari data citra masukan berformat .jpg. Wilayah dengan nilai warna merah antara 150–200 dikelompokkan sebagai tutupan lahan basah dan yang di atas angka 200 sebagai tutupan lahan kering.

Proses perambatan kebakaran dimodelkan masih dengan cara yang sederhana sebagai proses perubahan yang mencakup 6 kategori atau 6 keadaan (*state*):

1. Wilayah tutupan lahan basah (*state 1*, warna hijau).
2. Wilayah tutupan lahan kering (*state 2*, warna kuning).
3. Wilayah tutupan lahan yang sedang terbakar (*state 3*, warna merah)
4. Wilayah tutupan lahan yang habis terbakar (*state 4*, warna hitam).
5. Wilayah tutupan lahan kosong dan tidak mungkin terbakar (*state 5*, warna putih).
6. Wilayah perairan/laut yang tidak mungkin terbakar (*state 6*, warna biru)

Pada saat awal, wilayah yang ditunjukkan oleh data citra masukan dikelompokkan menjadi 4 jenis tutupan lahan: tutupan lahan basah, tutupan lahan kering, tutupan lahan kosong, dan lautan. Selama proses kebakaran terjadi perubahan *state*: wilayah yang tadinya tutupan lahan basah, akibat panas api akan berubah menjadi tutupan lahan kering, lalu terbakar. Wilayah yang pada awalnya sudah merupakan tutupan lahan kering akan langsung beralih ke *state* terbakar.

Elemen - elemen *Cellular Automata* yang ada dalam simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau ini sebagai berikut:

1. *Grid (X)*

*Grid (X)* pada simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau ini berupa matriks yang berukuran 477 baris dan 432 kolom berdasarkan masukan foto citra satelit Provinsi Riau berukuran  $432 \times 477$  *pixel* yang telah diolah menjadi grafik dengan warna dasar RGB.

2. *State(S)*

*State* yang digunakan untuk simulasi ini ada 6, yaitu  $E = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , dengan keterangan masing - masing sebagai berikut:

1. 1 menyatakan tutupan lahan basah (warna hijau).
2. 2 menyatakan tutupan lahan kering (warna kuning).
3. 3 menyatakan tutupan lahan yang sedang terbakar (warna merah)
4. 4 menyatakan tutupan lahan yang habis terbakar (warna hitam).
5. 5 menyatakan tutupan lahan kosong dan tidak mungkin terbakar (warna putih).
6. 6 menyatakan wilayah perairan/laut yang tidak mungkin terbakar (warna biru)

3. *Neighborhood (N)*

$(i - 1, j + 1)$	$(i, j + 1)$	$(i + 1, j + 1)$
$(i - 1, j)$	$(i, j)$	$(i + 1, j)$
$(i - 1, j - 1)$	$(i, j - 1)$	$(i + 1, j - 1)$

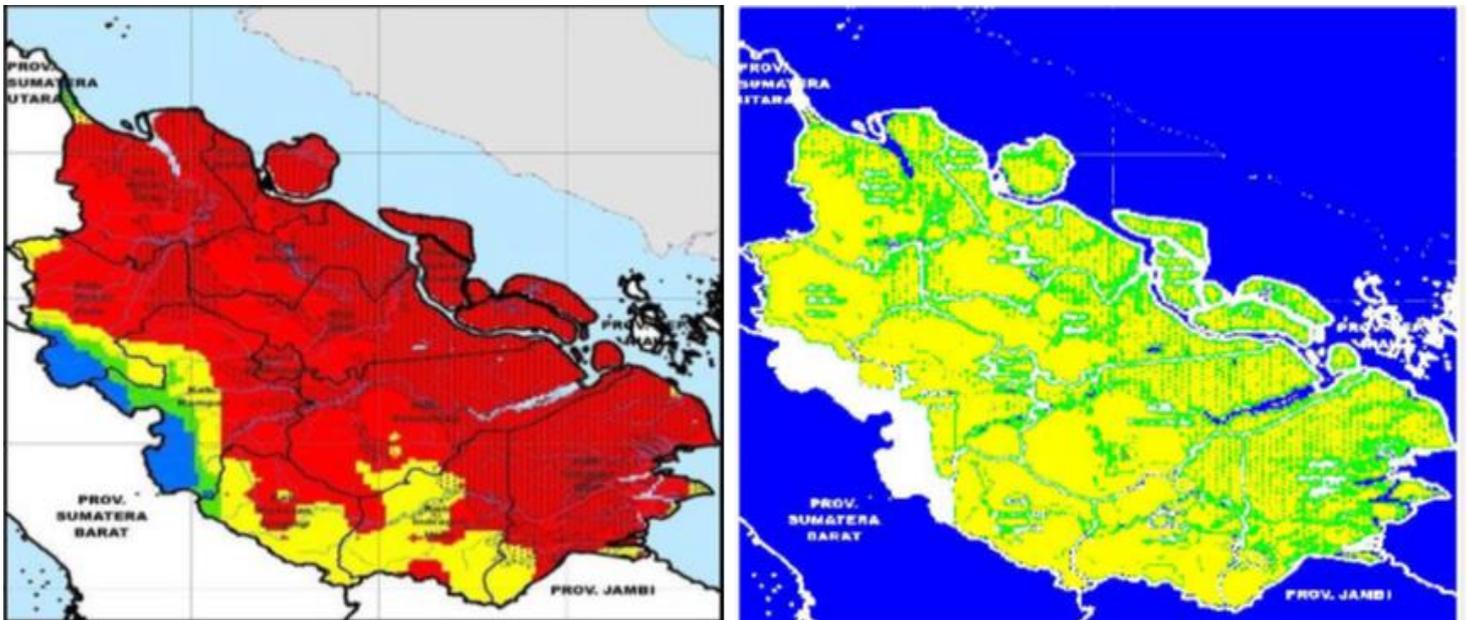
Gambar1. *Neighborhood (U)* simulasi kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau

#### 4. Rules (f)

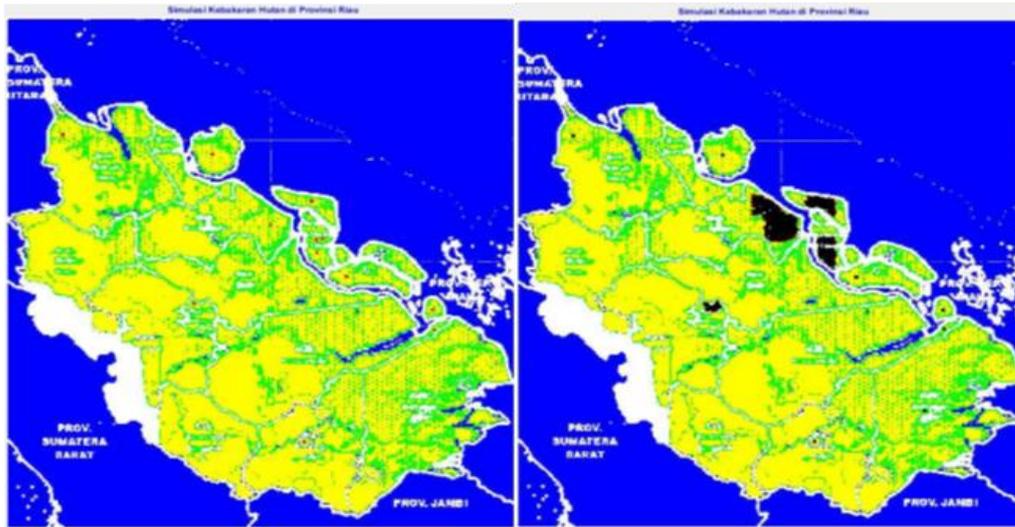
1. Sel pada *state* 1 akan berubah menjadi *state* 2 pada iterasi selanjutnya.
2. Sel pada *state* 2 akan berubah menjadi *state* 3 pada iterasi selanjutnya.
3. Sel pada *state* 3 akan berubah menjadi *state* 4 pada iterasi selanjutnya.
4. Sel yang telah berubah menjadi *state* 4 akan tetap pada iterasi selanjutnya.
5. Sel pada *state* 4, 5, dan 6 akan tetap pada setiap iterasinya.

Berikut merupakan hasil simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau menggunakan metode *Cellular Automata* dengan banyak perubahan *state* adalah 50:

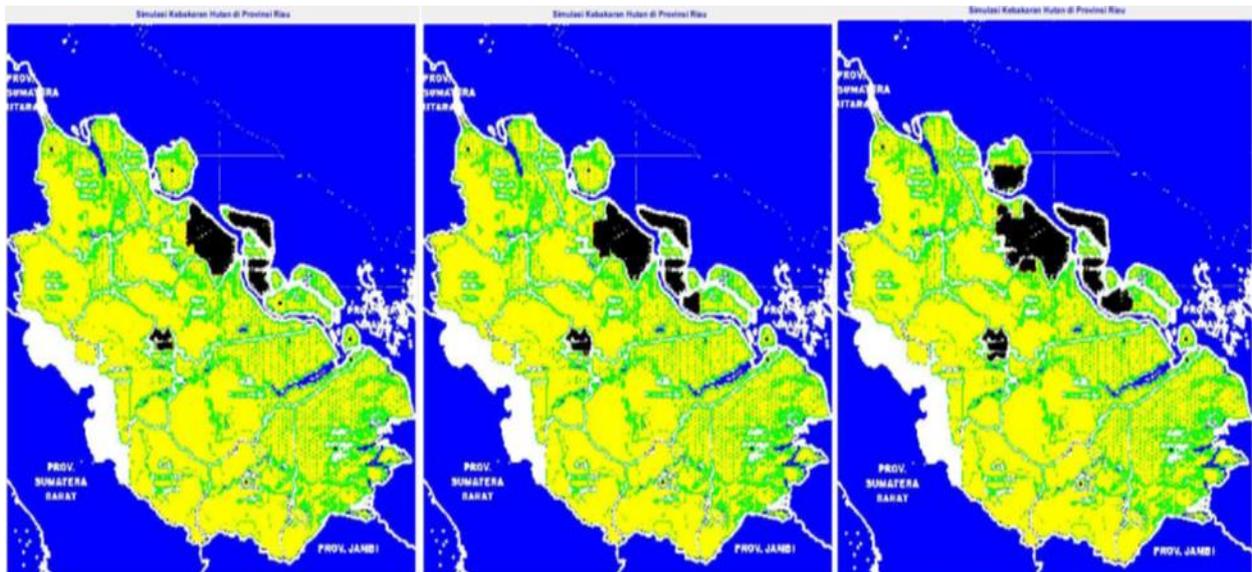
1. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=1$ , munculnya titik api.
2. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=15$ , api mulai menyebar ke area yang belum terbakar.
3. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=25$ , api semakin menyebar ke area sekitar yang belum terbakar.
4. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=35$ , api masih menyebar ke area sekitar yang belum terbakar dan ada daerah yang apinya sudah berhenti menyebar.
5. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=50$ , api masih menyebar ke area sekitar yang belum terbakar dan ada daerah yang apinya sudah berhenti menyebar dan simulasi berhenti.



**Gambar 2. Citra Satelit Provinsi Riau sebelum diolah (kiri) dengan pembagian lahan yang mudah dan sulit terbakar berwarna merah dan kuning dan setelah diolah (kanan) lahan yang mudah terbakar menjadi berwarna hijau dan kuning**



Gambar 3. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=1$  (kiri) mulai munculnya titik api dan mulai menyebar dan  $k=15$  (kanan) lahan sedang terbakar dan habis terbakar



Gambar 4. Kondisi *state* tutupan lahan pada iterasi  $k=25$  (kiri),  $k=35$  (tengah),  $k=50$  (kanan) semakin banyak muncul titik api dan lahan yang terbakar semakin meluas

Hasil simulasi kebakaran hutan di Provinsi Riau menggunakan *Cellular Automata* menunjukkan kondisi *state* yang terus mengalami perubahan selama iterasi. Dimulai dari munculnya titik api di area yang mudah untuk terbakar (iterasi  $k=1$ ) dan kemudian menyebar ke area sekitar (*neighborhood*) yang belum terbakar tetapi juga rentan dan mudah untuk terbakar, hingga akhirnya pada daerah yang dibatasi oleh perairan maupun tutupan lahan kosong yang tidak terbakar api berhenti menyebar (iterasi  $k=15, 25, 35$ ) dan daerah yang sekitarnya masih mudah terbakar titik api terus menyebar hingga iterasi berhenti ( $k=50$ ). Jika iterasi dilanjutkan, dengan jumlah titik api yang muncul hampir bersamaan di setiap area pada peta,

maka akan memberikan hasil yang berbeda, hingga pada akhirnya hampir 100% daerah tutupan lahan pada citra satelit Provinsi Riau baik yang mudah dan sangat mudah terbakar akan menjadi habis terbakar.

Hasil dari simulasi ini masih jauh dari kenyataan di lapangan, karena simulasi ini hanya menggunakan model sederhana tanpa melibatkan faktor – faktor penting lainnya, seperti kecepatan dan arah bertiupnya angin, kemungkinan terbakarnya tutupan lahan, densitas hutan dan lahan, jenis dan varian dari pepohonan dan tanaman yang tumbuh, banyak titik api yang muncul, tinggi area tempat titik api muncul dan menyebar dan lainnya. Faktor – faktor tersebut dapat ditambahkan untuk penelitian selanjutnya yang lebih mendalam.

## SIMPULAN

Simpulandari hasil penelitian ini adalah: 1. *Cellular Automata* dengan model sederhana dapat digunakan untuk mensimulasikan penyebaran api pada kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau sesuai dengan foto citra satelit yang digunakan dengan pembagian lahan yang mudah dan sulit untuk terbakar; 2. Penyebaran api pada kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau dibagi menjadi beberapa *state*, yaitu basah, kering, sedang terbakar, habis terbakar, lahan kosong dan tidak mungkin terbakar; 3. Terdapat pengaruh faktor – faktor alami yang dapat mempengaruhi penyebaran api pada kebakaran hutan dan lahan di Provinsi Riau, seperti faktor jenis tutupan lahan, dan faktor buatan seperti pembakaran hutan dengan sengaja untuk pembukaan lahan yang menjadi penyebab munculnya titik api di lahan dan hutan Provinsi Riau.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Yusuf, H. Hapsoh, S. H. Siregar, and D. R. Nurrochmat, "Analisis Kebakaran Hutan Dan Lahan Di Provinsi Riau," *Din. Lingkung. Indones.*, vol. 6, no. 2, p. 67, 2019.
- [2] T. A. Pratiwi, M. Irsyad, R. Kurniawan, S. Agustian, and B. S. Negara, "Klasifikasi Kebakaran Hutan Dan Lahan Menggunakan Algoritma Naïve Bayes Di Kabupaten Pelalawan," *CESS (Journal Comput. Eng. Syst. Sci.)*, vol. 6, no. 1, p. 139, 2021.
- [3] A. Alexandridis, D. Vakalis, C. I. Siettos, and G. V. Bafas, "A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990," *Appl. Math. Comput.*, vol. 204, no. 1, pp. 191–201, 2008.
- [4] H. A. Perryman, "A mathematical model of spot fires and their management implications," 2009.
- [5] S. Athanassopoulos, C. Kaklamanis, G. Kalfoutzos, and E. Papaioannou, "Cellular Automata: Simulations Using Matlab," *ICDS 2012 Sixth Int. Conf. Digit. Soc.*, no. c, pp. 63–68, 2012.
- [6] J. Quartieri, N. E. Mastorakis, G. Iannone, and C. Guarnaccia, "A Cellular Automata model for fire spreading prediction," *Int. Conf. Urban Plan. Transp. - Proc.*, pp. 173–179, 2010.
- [7] X. Li and W. Magill, "Modeling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach," *Complex. Int.*, vol. 8, pp. 1–14, 2000.
- [8] L. Bodrožić, D. Stipaničev, and M. Šerić, "Forest fires spread modeling using cellular automata approach," ... *Split. Dep. Model. ...*, 2006.
- [9] A. Alexandridis, L. Russo, D. Vakalis, G. V. Bafas, and C. I. Siettos, "Wildland fire spread modelling using cellular automata: Evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics," *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 20,

- no. 5, pp. 633–647, 2011.
- [10] R. C. Rothmell, "A Mathematical Model for Predicting Fire Spread," *United States Dep. Agric. For. Serv. Res. Pap.*, p. 46, 1972.
- [11] I. Karafyllidis and A. Thanailakis, "A model for predicting forest fire spreading using cellular automata," *Ecol. Modell.*, vol. 99, no. 1, pp. 87–97, 1997.
- [12] E. Gidey, O. Dikinya, R. Sebege, E. Segosebe, and A. Zenebe, "Cellular automata and Markov Chain (CA\_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya, northern Ethiopia," *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 3, no. 4, pp. 1245–1262, 2017.
- [13] L. Ferragut, I. Asensio, and S. Monedero, "Modelling slope, wind and moisture content effects on fire spread," *ECCOMAS 2004 - Eur. Congr. Comput. Methods Appl. Sci. Eng.*, pp. 1–11, 2004.
- [14] D. I. Curiac, O. Baniyas, C. Volosencu, and D. Pescaru, "Cellular automata based simulation for smoke and fire spreading in large buildings," *Int. Conf. Dev. Energy, Environ. Econ. - Proc.*, no. 0, pp. 89–94, 2010.
- [15] R. B. Widodo, "Pemodelan Spasial Resiko Kebakaran Hutan ( Studi Kasus," *Pembang. Wil. dan Kota*, vol. 10, no. 2, pp. 127–138, 2014.