

Metode Cellular Automata Dan Metode Beda Hingga Untuk Model Simulasi Pola Kebakaran Hutan

Eva Rosidah¹, Muliady Faisal^{2*}, Indira Anggriani³

¹ Matematika, JMTI, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: 02161010@student.itk.ac.id

² Matematika, JMTI, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: muliadyfaisal@lecturer.itk.ac.id

³ Matematika, JMTI, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan. Email: indira@lecturer.itk.ac.id

Abstract

Forests are immense natural resources that exist on the planet's surface. Forest resources, on the other hand, are currently declining at an alarming rate as a result of global warming. Global warming is anticipated to continue to increase the number of forest fires and the land burned by them around the planet. East Kalimantan has lost 64,207 hectares of land to forest and field fires between 2014 and 2019, ranking it seventh among Indonesian provinces with the biggest area of forest and land fires. This results in losses in a variety of categories, including the economy, the environment, and health. Based on these problems, a way is needed to design and develop effective ways to deal with the increasing forest fires. Precautionary policies to minimize the possibility of fire explosions by managing available resources to contain the possible spread of fires. The model of the forest fire pattern can be simulated using the cellular automata method and the finite difference method. This study uses land cover map data for Bukit Soeharto Forest Park with a map area of 38x51 km. Fire simulations in the cellular automata method without the influence of vegetation and wind running as many as 54 time step with the burned area as much as 99.65% of the total cells. For the simulation of cellular automata method with the influence of vegetation and wind at a speed of 2 m/s as many as 51 time steps with 88.33% of the burned area of the total cells have been burned. For the simulation of cellular automata method with the influence of vegetation and wind at a speed of 5 m/s as many as 58 time steps with an area of burning area of 83.18% of the total cells have been burned. The schematic form is created for the explicit method difference scheme using 2 dimension heat equation is $T_{i,j}^{n+1} = dT_{i-1,j}^n + (1 - 4d)T_{i,j}^n + dT_{i+1,j}^n + dT_{i,j-1}^n + dT_{i,j+1}^n$.

Keywords: Cellular Automata, Finite Difference, Forest Fire

Abstrak

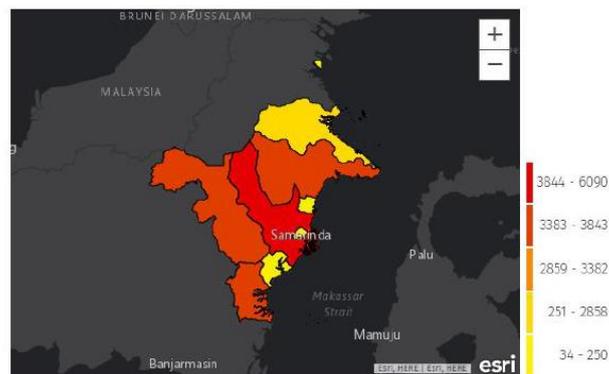
Hutan adalah sumber daya alam yang sangat besar yang ada di permukaan planet ini. Di sisi lain sumber daya hutan, saat ini menurun pada tingkat yang mengkhawatirkan sebagai akibat dari pemanasan global. Pemanasan global diperkirakan akan terus meningkatkan jumlah kebakaran hutan dan lahan yang terbakar di sekitar planet ini. Kalimantan Timur telah kehilangan 64.207 hektar lahan akibat kebakaran hutan dan lahan antara tahun 2014 dan 2019, menempati urutan ketujuh diantara provinsi-provinsi di Indonesia dengan luas kebakaran hutan dan lahan terbesar. Hal ini mengakibatkan kerugian dalam berbagai kategori, termasuk ekonomi, lingkungan, dan kesehatan. Berdasarkan permasalahan tersebut dibutuhkan suatu cara untuk merancang dan mengembangkan cara-cara efektif untuk menangani kebakaran hutan yang terus meningkat. Kebijakan pencegahan untuk meminimalkan kemungkinan ledakan api dengan mengatur sumber daya yang tersedia untuk menahan kemungkinan penyebaran kebakaran. Model dari pola kebakaran hutan dapat disimulasikan dengan menggunakan metode *cellular automata* dan metode beda hingga. Penelitian ini menggunakan data peta tutupan lahan Taman Hutan Raya Bukit Soeharto dengan peta area 38x51 km. Api simulasi dalam metode cellular automata tanpa pengaruh vegetasi dan aliran angin sebanyak 54 kali langkah dengan luas terbakar sebanyak 99,65% dari total sel. Ada 51 langkah waktu terbakar dalam simulasi metode cellular automata dengan pengaruh vegetasi dan angin pada kecepatan 2 m/s, terhitung 88,33 persen dari total area terbakar dari total sel. Ada 58 langkah waktu terbakar dalam simulasi teknik cellular automata dengan pengaruh vegetasi dan angin pada kecepatan 5 m/s, terhitung 83,18 persen dari total sel. Sedangkan bentuk skema dibuat untuk skema perbedaan metode eksplisit menggunakan persamaan panas 2 dimensi yaitu $T_{i,j}^{n+1} = dT_{i-1,j}^n + (1 - 4d)T_{i,j}^n + dT_{i+1,j}^n + dT_{i,j-1}^n + dT_{i,j+1}^n$.

Kata Kunci: Cellular Automata, Beda Hingga, Kebakaran Hutan.

1. Pendahuluan

Hutan merupakan sumber daya luas yang ada dipermukaan bumi. Namun, sumber daya hutan saat ini mengalami penurunan yang memprihatinkan, terutama di wilayah Indonesia. Menurut (Astuti, 2020) Kalimantan Timur merupakan provinsi dengan hutan terluas ketiga di Indonesia. Hutan seluas 14.651.053 hektar ini memiliki banyak manfaat bagi kehidupan, baik secara langsung maupun tidak langsung. Kalimantan Timur telah kehilangan 64.207 hektar lahan akibat kebakaran hutan dan lahan antara tahun 2014 dan 2019. Kalimantan timur menempati urutan ketujuh atau provinsi dengan kebakaran hutan dan lahan terbanyak di Indonesia (Sipongi, 2019). Akibatnya, kita perlu mencari cara untuk membuat dan membangun solusi yang efektif untuk mengatasi meningkatnya jumlah kebakaran hutan. Kebijakan penanggulangan kebakaran dapat dibagi menjadi dua kategori: preventif dan operasional. Kebijakan untuk mengurangi risiko ledakan api dengan membatasi sumber listrik penyebaran api. Ketika kebakaran terjadi, operasi yang lebih taktis diperlukan, seperti distribusi mekanisme pertahanan yang efisien dan evakuasi desa. Kasus, pertempuran strategis dan taktik melawan kebakaran hutan memiliki banyak manfaat dari model matematika yang bisa digunakan untuk memprediksi penyebaran api dalam ruang dan waktu. Selain itu, model seperti itu juga akan berguna dalam kasus kebakaran yang dikendalikan yang sering digunakan sebagai alat manajemen *rangeland* yang penting di area seperti savannah (Alexandridis, Vakalis, Siettos, & V, 2008).

Berdasarkan global forest watch terhitung dari Maret 2019 sampai dengan Maret 2020 Kalimantan Timur memiliki 20.393 titik peringatan kebakaran (*fire alert*) yang tersebar ditunjukkan pada Gambar 1 dengan dukungan faktor lain yang tepat banyaknya potensi *fire alert* ini dapat menimbulkan kebakaran hutan yang dapat meminimalisir kerugian (Global Forest Watch, 2020)



(Global Forest Watch, 2020).

Gambar 1. Fire alert di Kalimantan Timur

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui simulasi pola kebakaran hutan menggunakan metode *cellular automata* dan metode beda hingga. *Cellular automata* pertama kali diperkenalkan oleh John von Neumann sekitar tahun 1940-an dan telah digunakan secara luas sebagai model untuk menyelesaikan sistem yang kompleks. *Cellular automata* adalah suatu model dari sistem fisik dimana ruang dan waktu adalah diskrit dan interaksi yang terjadi bersifat lokal. *Cellular automata* dapat digunakan untuk mengetahui penyebaran api sedangkan metode beda hingga sebagai penyelesaian numerik untuk mengetahui penyebaran panasnya.

2. Metode

Model *cellular automata* direferensikan oleh Alexandris dkk, (2008). *Cellular Automata* menggunakan jaringan persegi dengan propagasi ke delapan tetangga terdekat dan terdekat berikutnya untuk mensimulasikan sistem. Untuk keadaan diskrit potensial, setiap sel digambarkan sebagai sel yang terbakar, sel dengan bahan bakar yang belum terbakar, sel kosong, dan sel yang telah terbakar. Model ini terdiri dari empat prinsip evolusi yang mempertimbangkan kualitas bahan bakar dan kondisi angin. Berikut ini adalah prinsip-prinsip yang diikuti pada setiap langkah waktu. Sel yang tidak dapat dibakar

tidak akan berubah. Sebuah sel yang sekarang terbakar akan dibakar sepenuhnya pada langkah waktu berikutnya. Sel yang telah dibakar tidak dapat dibakar kembali. Jika sebuah sel sekarang terbakar dan tetangga terdekatnya memiliki bahan bakar vegetatif, api dapat menyebar ke tetangganya dengan probabilitas P_{burn} , yang merupakan fungsi dari variabel yang menentukan penyebaran api. Probabilitas sel spesifik P_{burn} didasarkan pada probabilitas referensi konstan yang dapat ditingkatkan

atau diturunkan menggunakan pembebanan diferensial. Probabilitas referensi konstan P_0 adalah peluang bahwa sel di sekitar sel yang terbakar akan mulai terbakar tanpa bantuan angin atau tumbuh-tumbuhan. Model matematika untuk P_{burn} dipersentasekan sebagai berikut:

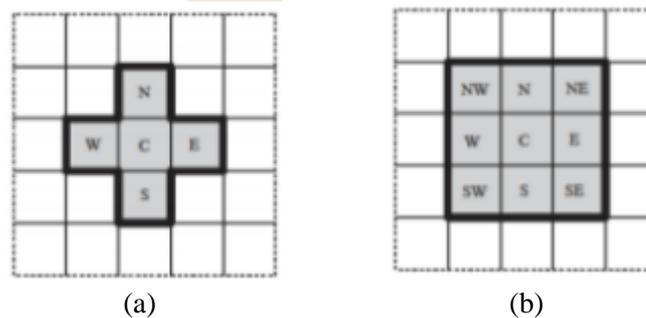
$$P_{burn} = P_0(1 + P_{veg})P_w \quad (1)$$

dengan

$$P_w = \exp[V(c_1 + c_2(\cos \cos(\theta) - 1))] \quad (2)$$

dimana V adalah kecepatan angin, c_1 dan c_2 adalah koefisien, θ adalah sudut antara arah angin dan arah sebaran api.

Setiap sel tetangga tertentu yang menentukan bagaimana sel berevolusi. Modelnya menggunakan sel tetangga Von Neumann dan ketetangganan Moore untuk mempersentasekan persebaran api.



Gambar 2. Arah persebaran api berdasarkan;
(a) ketetangganan Von Neumann (b) ketetangganan Moore

Skema eksplisit persamaan panas 2 dimensi digunakan untuk menyelesaikan simulasi menggunakan metode beda hingga. Nilai pada suatu titik dihitung secara langsung dari nilai pada beberapa titik di sekitarnya pada nilai yang diketahui sebelumnya menggunakan skema eksplisit, yang memungkinkan nilai pada langkah waktu berikutnya ditentukan. Turunan dari fungsi variabel ($T(x, t)$) dalam ruang dan waktu diberikan di bawah ini.

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{T^{n+1} - T^n}{\Delta t} \quad (3)$$

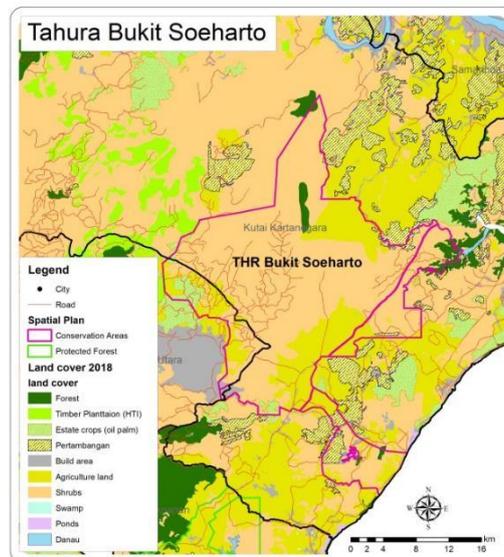
$$\frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} = \frac{T_{i-1}^n - 2T_i^n + T_{i+1}^n}{\Delta x^2} \quad (4)$$

Setelah itu, kedua persamaan ini akan digabungkan untuk membentuk persamaan panas dua dimensi yang ditunjukkan di bawah ini (Triatmodjo, 2002).

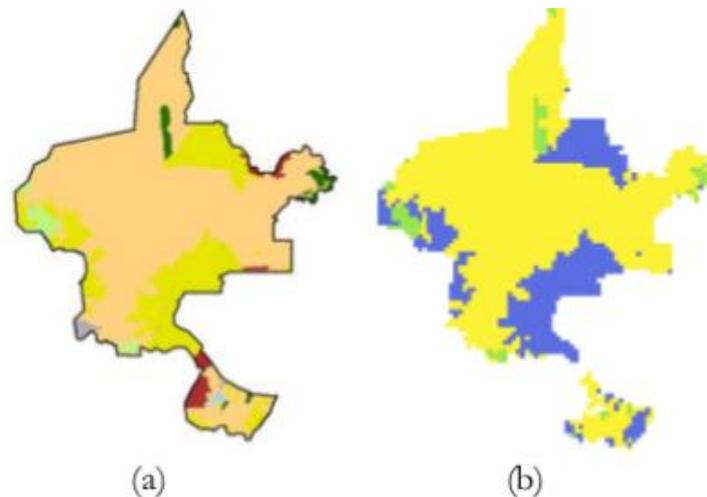
$$\rho c_p \frac{\partial u}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

3. Hasil dan Pembahasan

Peta tutupan lahan Bukit Soeharto yang meliputi area seluas 38 x 51 km persegi, dibagi menjadi empat zona tutupan lahan yang masing-masing diwakili oleh rona yang berbeda. Perkebunan dan hutan tanaman menempati zona pertama (hijau), semak belukar membentuk zona kedua (kuning), lahan pertanian menempati zona ketiga (biru), dan wilayah tanpa vegetasi membentuk zona keempat (putih). Setelah itu, tutupan lahan diubah menjadi sel persegi berdasarkan pengelompokan vegetasi, dengan masing-masing sel mewakili panjang 0,5 km, dengan total 76 x 102 sel.

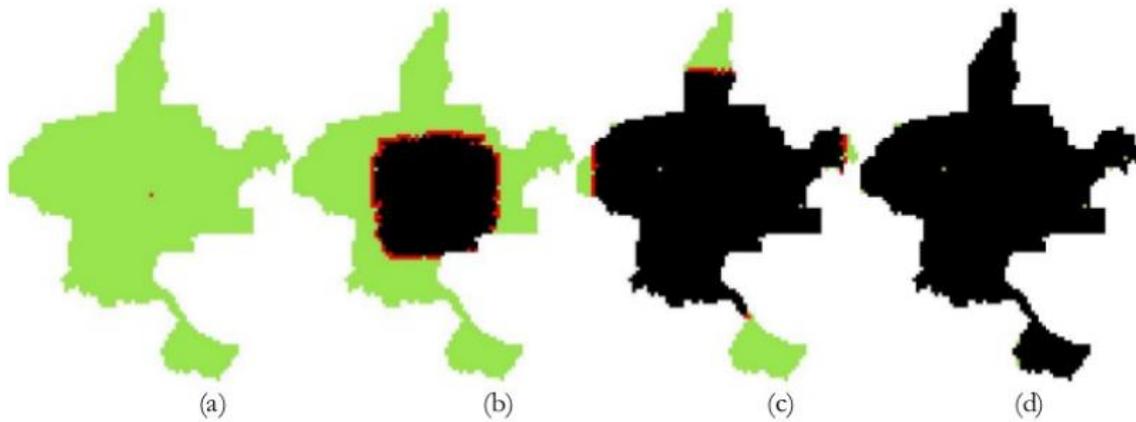


Gambar 3. Peta Tahura Bukit Soeharto



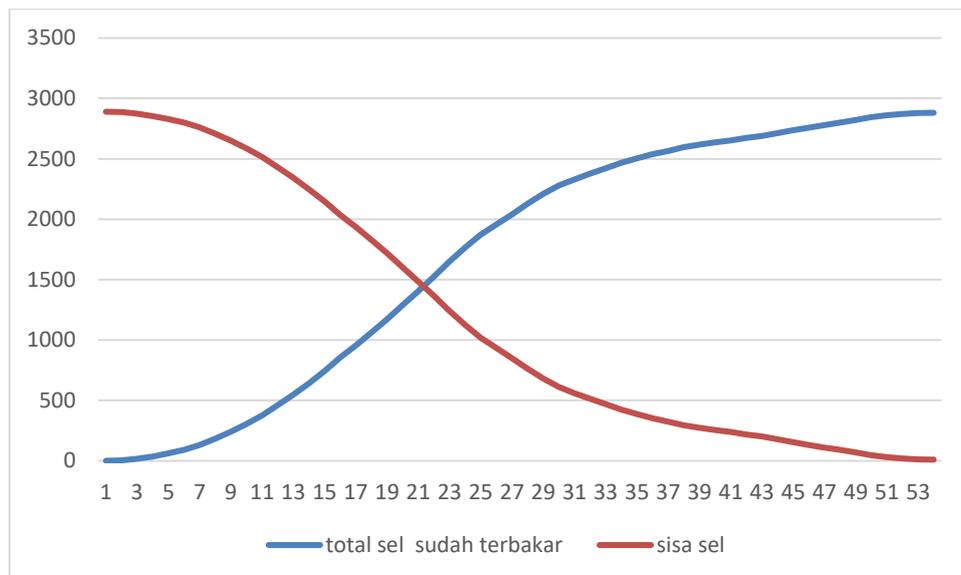
Gambar 4. Daerah tutupan lahan
(a) Peta Bukit Soeharto (b) Pengelompokan vegetasi

Simulasi cellular automata tanpa pengaruh angin dan vegetasi mengasumsikan bahwa setiap sel memiliki jenis vegetasi yang sama. Hasil simulasi dengan 54 langkah waktu dihasilkan menggunakan *software Python*.



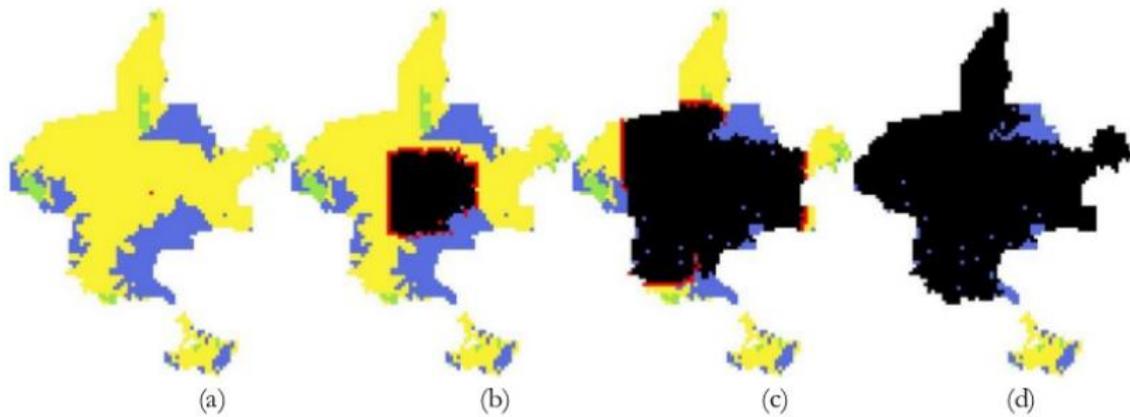
Gambar 5. Simulasi kebakaran hutan, pada
(a) $t = 0$; (b) $t = 17$; (c) $t = 34$; dan (d) $t = 54$

Pada simulasi ini banyaknya sel yang terbakar hingga langkah waktu ke 54 adalah sebesar 99,65% atau sebanyak 2881 sel dari total 2891 sel. Hal ini berarti dalam 54 langkah waktu atau 19,9 jam sebesar 720,25 km telah habis terbakar. Perbandingan sel yang sudah terbakar dengan sisanya untuk setiap Langkah waktu dapat dilihat pada Gambar 6.

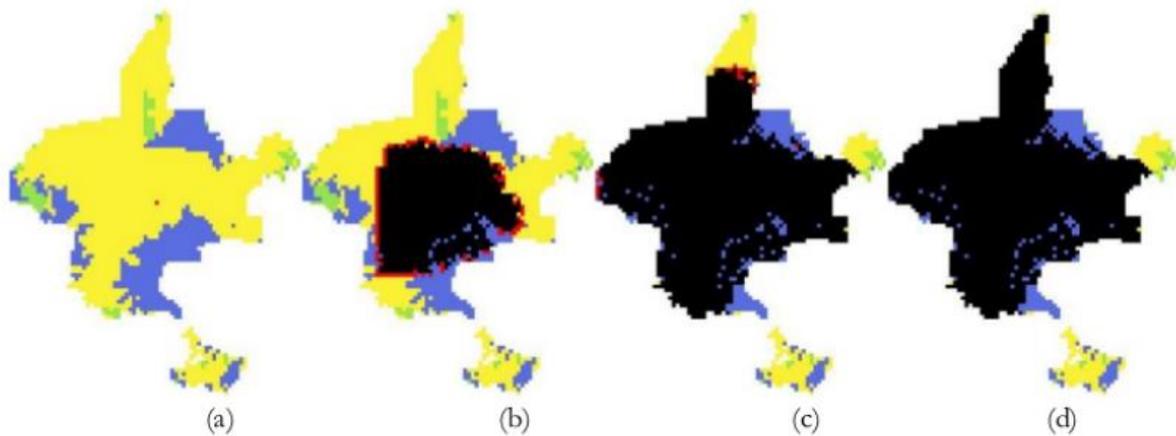


Gambar 6. Perbandingan jumlah sel yang sudah terbakar dengan sisa sel

Untuk melihat hubungan antara kecepatan dan arah angin, simulasi *cellular automata* dengan pengaruh angin dan vegetasi menggunakan delapan arah angin dengan $v = 2 \text{ m/s}$ dan $v = 5 \text{ m/s}$. Gambar berikut menunjukkan hasil simulasi menggunakan *software Python*.

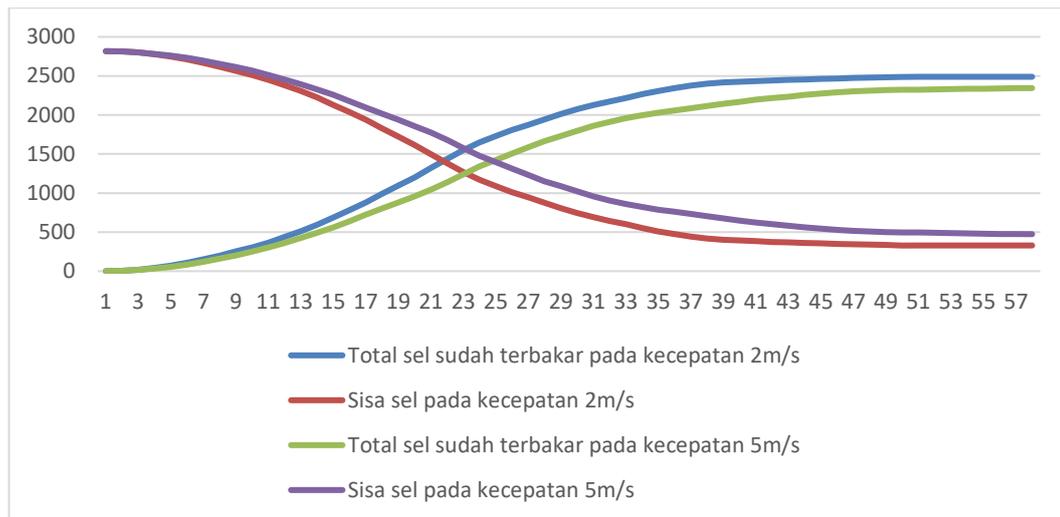


Gambar 7. Simulasi kebakaran hutan, pada
(a) $t = 0$; (b) $t = 18$; (c) $t = 36$; dan (d) $t = 54$ pada $v = 2 \text{ m/s}$



Gambar 8. Simulasi kebakaran hutan, pada (a) $t = 0$; (b) $t = 19$; (c) $t = 38$; dan (d) $t = 58$ pada
 $v = 5 \text{ m/s}$

Saat angin dengan kecepatan 2 m/s , 88,33 persen sel terbakar dalam 54 langkah waktu atau 18,8 jam, atau 2489 sel dari total 2818 sel, dan area seluas $622,25 \text{ km}$ terbakar habis. Saat angin dengan kecepatan 5 m/s , 83,18 persen atau 2344 sel dari total 2818 sel dikonsumsi dalam 58 langkah waktu atau 21,39 jam, meliputi area seluas 586 km . Pengaruh arah mata angin juga dapat diamati pada area area yang terbakar dimana wilayah yang dominan terbakar berada pada jalur barat daya dan semakin terlihat lebih jelas untuk kecepatan yang lebih tinggi. Perbandingan sel yang sudah terbakar dengan sisanya dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Perbandingan jumlah sel yang sudah terbakar dengan sisa sel

Penggunaan metode beda hingga untuk penyelesaian permasalahan persamaan panas sebagai sebuah cara untuk penyelesaian berupa nilai hampiran. Pada metode beda hingga, akan ditemui persamaan - persamaan beda hingga yang akan membentuk persamaan beda parsial dalam persamaan panas. Penyelesaian numerik persamaan panas pada penelitian ini menggunakan metode beda hingga skema eksplisit *forward time central space* (FTCS). Hasil diskritisasi waktu dengan hampiran beda maju menjadi,

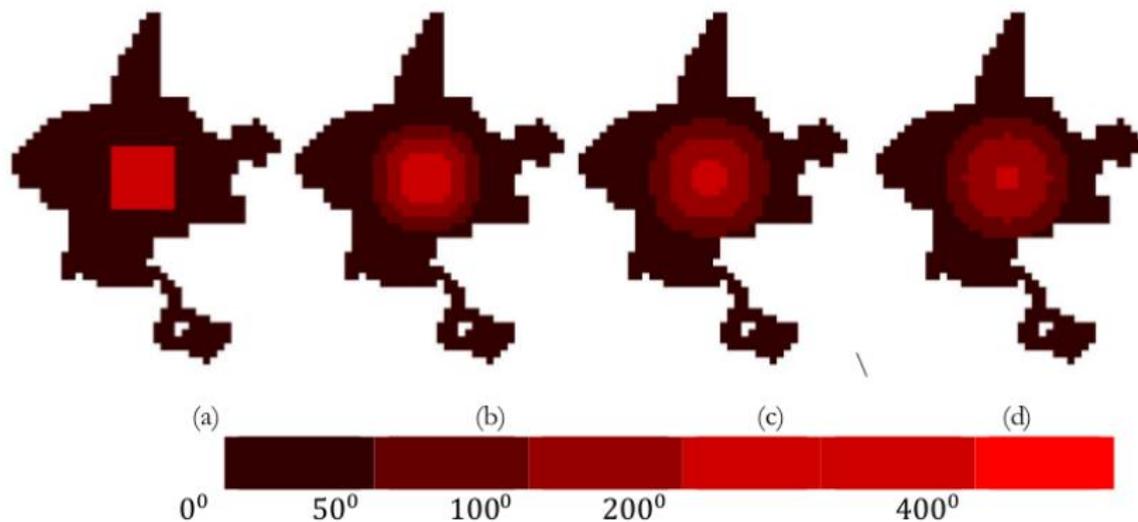
$$T_{i,j}^{n+1} = dT_{i-1,j}^n + (1 - 4d)T_{i,j}^n + dT_{i+1,j}^n + dT_{i,j-1}^n + dT_{i,j+1}^n \quad (6)$$

Penelitian ini melakukan uji kestabilan dengan analisis stabilitas Von Neumann dan diperoleh syarat kestabilan dari Persamaan (6) adalah $d \leq 0.25$. Untuk menghitung nilai diskrit dari Persamaan (6) dipilih nilai parameter pada tabel

Tabel 1. Parameter Untuk Simulasi Beda Hingga

Parameter	Nilai	Sumber
k	0,139	jo, Sulisty, Listyanto, & Tomy, 2006)
c_p	1500	(Engineering ToolBox, 2003)
ρ	0.0429	ardja, Fatawi, Sutisna, Mori, & Ohta, 2000)

Nilai parameter diatas didapatkan nilai $K = \frac{k}{c_p \rho} = 0.00216 \text{ m/s}$ dan diberikan nilai Δt sebesar 0.25 dengan menggunakan *software python* didapatkan hasil simulasi pola kebakaran menggunakan metode beda hingga skema eksplisit persamaan panas berikut:



Gambar 10. Simulasi kebakaran hutan pada
(a) $t = 0$; (b) $t = 4.000$; (c) $t = 8.000$; dan (d) $t = 10.000$

Pada Gambar 10. ketika $t = 0$ titik kebakaran berukuran pada $T_{i,j} = 300^{\circ}$ untuk $15 \leq i \leq 23$ dan $21 \leq j \leq 29$ dan $T_{i,j} = 28.1^{\circ}$ untuk i, j lainnya yang masih ada di dalam daerah Bukit Soeharto dan bernilai 0 untuk lainnya. Dari hasil simulasi didapatkan pola yang terbentuk untuk 10000 langkah waktu atau dengan $\Delta x = 0.25$ maka total waktunya ada 2500 detik. Untuk tiap langkah waktu didapatkan suhu maksimal yang ditunjukkan pada table berikut,

Tabel 2. Suhu maksimal setiap satuan waktu

t	Time Total (s)	Max Temperature ($^{\circ}\text{C}$)
0	0	300
1000	250	299.8383
2000	500	297.7653
3000	750	292.0433
4000	1000	283.0613
5000	1250	272.1133
6000	1500	260.3662
7000	1750	248.5964
8000	2000	237.2456
9000	2250	226.5333
10000	2500	216.5459

Pada Tabel 2. terlihat suhu maksimal akan terus menurun dikarenakan penyebaran panas ke area yang lebih rendah.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan yang terdapat pada bab sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi untuk metode CA tanpa pengaruh vegetasi dan angin berjalan sebanyak 54 langkah waktu atau 19,9 jam dengan luas area yang terbakar sebesar 720,25 km atau 99,65% dari total sel. Metode beda hingga skema eksplisit hanya dapat disimulasikan untuk kasus tanpa pengaruh vegetasi dan angin, sehingga Tahura Bukit Soeharto diasumsikan hutan homogen, dan didapatkan skema eksplisit

nya yaitu $T_{i,j}^{n+1} = dT_{i-1,j}^n + (1 - 4d)T_{i,j}^n + dT_{i+1,j}^n + dT_{i,j-1}^n + dT_{i,j+1}^n$ dengan syarat kestabilan $d \leq 0.25$.

2. Untuk simulasi metode CA dengan pengaruh vegetasi dan angin pada kecepatan 2 m/s sebanyak 51 langkah waktu atau selama 18,8 jam dengan luas area sebesar 622,25 km atau 88,33% dari total sel telah habis terbakar. Untuk simulasi metode CA dengan pengaruh vegetasi dan angin pada kecepatan 5 m/s sebanyak 58 langkah waktu atau selama 21,39 jam dengan luas area sebesar 586 km atau 83,18% dari total sel telah habis terbakar. Pengaruh arah mata angin juga dapat diamati pada area area yang terbakar di mana wilayah yang dominan terbakar berada pada jalur barat daya, Karena semakin kencang kekuatan angin nilai P_{wind} semakin besar.

1.

2.

3. Referensi

4.

- Sugiharayu, L., & Rusdiana, O. (2011). Perbandingan Simpanan Karbon pada Beberapa Penutupan Lahan di Kabupaten Paser, Kalimantan Timur Berdasarkan Sifat Fisik dan Sifat Kimia Tanahnya. *Silvikultur Tropika*.
- Sipongi. (2019). *Rekapitulasi Luas Kebakaran Hutan dan Lahan (Ha) Per Provinsi Di Indonesia Tahun 2014-2019*. Retrieved Januari 7, 2020, from <http://sipongi.menlhk.go.id>
- Alexandridis, A., Vakalis, D., Siettos, C. I., & V, B. G. (2008). A cellular Automata Model for Forest Fire Spread Prediction: The Case of The Wildfire That Swept Through Spetses Island in 1990. *Elsevier*, 191-201.
- Global Forest Watch*. (2020, Maret 5). Retrieved from <http://fires.globalforestwatch.org/>
- Triatmodjo, B. (2002). *Metode Numerik Dilengkapi Program Komputer*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Prasojo, A., Sulistyio, J., Listyanto, & Tomy. (2006). Konduktivitas Panas Empat Jenis Kayu Dalam Kondisi Kadar Air yang Berbeda. *Prosiding Seminar Nasional Masyarakat Peneliti Kayu Indonesia (MAPEXI) XIV*.
- Engineering ToolBox. (2003, July 10). *Specific Heat of some common Substances*. Retrieved from https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html
- Guhardja, E., Fatawi, M., Sutisna, M., Mori, T., & Ohta, S. (2000). *Rainforest Ecosystem of East Kalimantan: El Nino, Drought, Fire and Human Impacts*. Jerman: Springer.