

MODEL CELLULAR AUTOMATA UNTUK MASALAH EVAKUASI PEDESTRIAN DI GEDUNG TERPADU FMIPA UNP DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KEPANIKAN

Syafina Putri Marliza

Matematika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan dan Alam, Universitas Negeri Padang
e-mail: marliza.syafina@gmail.com

Defri Ahmad

Matematika, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan dan Alam, Universitas Negeri Padang
*Penulis Korespondensi: defri_math@fmipa.unp.ac.id

Abstrak

Dalam situasi darurat di gedung yang padat penduduknya, evakuasi pejalan kaki menjadi masalah penting. Penelitian ini menghadirkan model *cellular automata* yang menggabungkan dan memberikan wawasan mendalam tentang dinamika evakuasi dengan mengevaluasi lantai statis dan dinamis, transisi ruang, serta dampak kepanikan. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan signifikan dalam waktu evakuasi antara situasi normal dan panik, dengan peningkatan kepadatan pejalan kaki pada kondisi panik dan waktu evakuasi yang dramatis. Penelitian ini menekankan pentingnya mempertimbangkan faktor kepanikan dalam perencanaan evakuasi, berkontribusi pada desain bangunan yang lebih aman dan protokol darurat yang lebih efektif. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu evakuasi pada kondisi panik mengalami peningkatan dibanding kondisi normal. Perbedaan ini menggarisbawahi kepanikan dapat dipertimbangkan sebagai faktor yang mempengaruhi dinamika evakuasi dalam situasi darurat di gedung yang padat penduduknya

Kata Kunci: Evakuasi Pejalan Kaki, *Cellular Automata*, Panik, Bidang Lantai, Probabilitas Transisi.

Abstract

In emergency situations in densely populated buildings, pedestrian evacuation becomes a critical issue. This research presents a cellular automata model that combines and provides deep insights into evacuation dynamics by evaluating static and dynamic floor layouts, spatial transitions, and the impact of panic. Simulation results indicate significant differences in evacuation time between normal and panic situations, with increased pedestrian density in panic conditions and dramatic evacuation times. This study emphasizes the importance of considering panic factors in evacuation planning, contributing to safer building designs and more effective emergency protocols. Furthermore, the research findings show that evacuation time increases during panic conditions compared to normal conditions. This difference underscores that panic can be considered as a factor influencing the dynamics of evacuation in emergency situations in densely populated buildings.

Keywords: Pedestrian Evacuation, Cellular Automata, Panic, Floor Field, Transition Probabilities.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, meningkatnya jumlah bencana yang disebabkan oleh perubahan kondisi alam dan campur tangan manusia telah memunculkan banyak ide untuk menyelamatkan nyawa dari dampak bencana. Proses evakuasi merupakan upaya pemindahan dari tempat berbahaya ke tempat yang aman dengan menaati ketentuan atau prosedur yang berlaku dari suatu tempat atau bangunan (Lyonnais 2012).

Situasi panik adalah keadaan dimana situasi disekitarnya menjadi tidak terkendali, dipicu oleh insiden fisik dan benturan (Perrotta 2019). Pada

dasarnya situasi panik dapat disebabkan oleh kesalahan lingkungan dan kesalahan manusia. Kesalahan lingkungan dapat dikelompokkan pada penyebab eksternal, seperti gempa bumi, bangunan runtuh, pemadaman listrik, kebakaran, dan lainnya. Sementara itu, kesalahan manusia dapat dikelompokkan pada penyebab internal seperti pengeboman, kemacetan antrian, keterlambatan pemberitahuan darurat, dll (Ibrahim and Hassan 2017).

Dalam situasi panik, tindakan spontan dapat menyebabkan dampak kecemasan yang menyebar dari satu individu ke individu lain serta menyebabkan sejumlah besar cedera karena

tabrakan fisik (Ibrahim et al. 2017) (Chraibi, Seyfried, and Schadschneider 2010). Lingkungan yang tertutup, terbatas dan padat seperti gedung dapat menimbulkan kepanikan pejalan kaki, yang akan mempengaruhi perilaku pejalan kaki, dan dapat menyebabkan kecelakaan selama proses evakuasi (Ibrahim et al. 2019).

Evakuasi di dalam ruangan memiliki sebuah permasalahan tersendiri. Selain faktor dari struktur bangunan itu sendiri perilaku manusia itu sendiri juga menjadi permasalahan dalam evakuasi (Muarifin, Harsono, and Barakbah 2022). Hal pertama yang dilakukan jika terjadi keadaan darurat adalah mencari jalan keluar dari gedung padat pedestrian dengan jalur yang tepat dan aman. Untuk itu diperlukan perhatian khusus dalam menangani hal ini, terutama untuk Gedung Terpadu FMIPA UNP yang merupakan salah satu gedung padat pedestrian di kampus UNP.

Karena kepanikan dapat menular dan dapat ditularkan, maka penyebaran kepanikan dapat digambarkan dengan menggunakan model matematis. Model matematika adalah proses menggambarkan masalah dunia nyata sebagai persamaan matematika (Arif 2017). Untuk permasalahan penyebaran kepanikan saat proses evakuasi pejalan kaki, maka digunakan model *Cellular Automata* untuk memodelkan penyebaran kepanikan tersebut. *Cellular Automata* adalah model simulasi diskrit yang paling banyak digunakan dalam evakuasi pejalan kaki (Nitzsche 2013). Model ini menganggap ruang sebagai kisi-kisi dengan sel-sel terpisah yang dapat ditempati pejalan kaki. *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 (Yue et al. 2007). *Cellular Automata* adalah suatu model dari sistem fisik dimana ruang dan waktu adalah diskrit dan interaksi yang terjadi bersifat lokal (Shalihah et al. 2018).

Tujuan penelitian ini adalah untuk menyelidiki dinamika perilaku pejalan kaki saat dilakukan evakuasi darurat. Sampai saat ini, berbagai jenis model *Cellular Automata* telah diadopsi untuk mensimulasikan pejalan kaki (Burstedde et al. 2016). Sebagian besar model *Cellular Automata* mewakili pejalan kaki sebagai sistem partikel

ganda. Berdasarkan asumsi ini, perilaku pejalan kaki (terutama aturan pemilihan rute) serupa antar individu. Pada kenyataannya, sebagai sebuah sistem sosial, keselamatan dan efisiensi evakuasi pejalan kaki sangat dipengaruhi oleh efek perilaku yang heterogen dari karakteristik individu. Kepanikan itu selalu disebabkan oleh ketegangan atau perilaku agresif pejalan kaki (Li and Han 2015).

KAJIAN TEORI

1. Evakuasi

Evakuasi merupakan upaya yang dilakukan karena adanya sebuah penyebab yang memaksa suatu individu atau kelompok individu melakukan pengungsian. Ada beberapa hal yang menyebabkan dilakukannya sebuah evakuasi, bisa berupa fenomena alam dan fenomena geologi. Fenomena alam yang dapat menyebabkan dilakukannya evakuasi seperti cuaca ekstrim, badai, angin ribut, kebakaran karena kekeringan, sedangkan fenomena geologi seperti gempa bumi, aktivitas gunung api, dan tsunami. Selain itu evakuasi juga bisa disebabkan dari dampak aktivitas manusia seperti kecelakaan industri, dan kegagalan teknologi. Evakuasi dilakukan untuk dapat menekan resiko dan konsekuensi yang ada meskipun kejadian bencana belum tentu mengenai daerah tersebut (Abraham, Rachmawati, and Mei 2015).

2. Pemodelan

Model matematika adalah sebuah aktivitas perumusan representasi atas masalah nyata yang sedang dipelajari ke dalam bentuk atau konsep matematika (Arif 2017). Sederhananya model matematika merupakan usaha untuk menggambarkan suatu fenomena ke dalam bentuk rumus matematis sehingga mudah untuk dipelajari dan dilakukan perhitungan. Pemodelan matematika dapat diterapkan dalam berbagai bidang, antara lain bidang fisika, bidang biologi, bidang ekonomi, bidang epidemik, dan bidang kimia. (Arif 2017)

Model adalah representasi yang disederhanakan dari suatu objek, benda atau ide. Model berisi informasi tentang sistem yang dibuat untuk mempelajari sistem yang sebenarnya. Model dapat menjadi tiruan dari objek, sistem, atau peristiwa dunia nyata yang hanya berisi informasi

yang dianggap relevan dengan penelitian. Dalam pemodelan, model dirancang untuk menggambarkan perilaku sebenarnya dari sistem, idealnya untuk menjelaskan atau menunjukkan hubungan penting yang terlibat.

3. Cellular Automata

a. Definisi Cellular Automata

Cellular Automata (CA) merupakan suatu model dari sistem fisik dimana ruang dan waktu adalah diskrit dan interaksi yang terjadi bersifat lokal. Disamping kesederhanaan strukturnya, CA juga dapat digunakan untuk memperlihatkan fenomena kompleks yang dinamis dan dapat menerangkan berbagai macam proses dan sistem fisik. Model CA terdiri dari satu, dua atau n -dimensi yang terdiri dari sel-sel seragam dan tetap. Model CA yang sering digunakan yaitu model satu dan dua dimensi dikarenakan model CA dengan dimensi yang lebih tinggi akan mengalami kesulitan dalam memvisualisasikannya (Steven, 2015). Model CA yang umum digunakan dapat membagi ruang menjadi sel persegi. Setiap sel bisa kosong atau hanya ditempati oleh satu pejalan kaki atau rintangan. Individu umumnya hanya dapat bergerak satu langkah untuk setiap satuan waktu.

Unsur-unsur pembentuk Cellular Automata (Putra et al. 2008) meliputi:

1) Geometri

Geometri adalah bentuk sel serta bentuk sistem yang disusun oleh sel-sel tersebut. Geometri CA terdiri atas dimensi CA tersebut dalam n -dimensi array ($n = 1,2,3, \dots$), dan bentuk geometri dari masing-masing sel penyusunnya. Bentuk geometri sel Cellular Automata yang biasa digunakan untuk mempresentasikan ruang adalah segi empat satu dimensi atau sel segi empat dua dimensi.

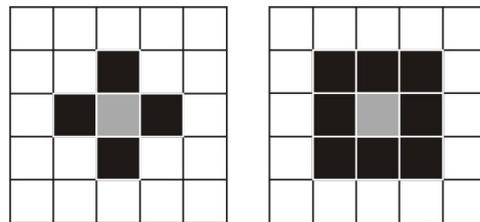
2) State Set

State Set merupakan himpunan status atau keadaan yang dimiliki oleh masing-masing sel CA. Status dapat berupa angka atau sifat tertentu. Jika masing-masing sel merepresentasikan ruang yang cukup untuk satu pejalan kaki, maka status sel dapat berupa keberadaan pejalan kaki tersebut yang dapat dilambangkan dengan bilangan 0 untuk sel dalam keadaan kosong dan 1 untuk sel yang terisi oleh pejalan kaki.

3) Neighbourhood

Neighbourhood merupakan ketetanggaan antara

sel yang dapat mempengaruhi status suatu sel pada CA. Umumnya *neighbourhood* suatu sel menjangkau sel-sel yang berada di sekitarnya. Secara umum, terdapat dua *neighbourhood* dalam CA dua dimensi, yakni Von Neumann *neighborhood* dan Moore *neighborhood*. Pada model Von Neumann *neighborhood*, sebuah sel mempunyai empat sel tetangga (berwarna hitam) yang berada pada arah utara, timur, selatan, dan barat. Sedangkan model Moore *neighborhood* mempunyai delapan sel tetangga dengan tambahan di arah barat laut, tenggara, barat daya, dan timur laut.



(a) Von Neumann *neighborhood*; (b) Moore *neighborhood*

Gambar 1. Neighborhood Cellular Automata

4) Fungsi Transisi

Fungsi transisi adalah aturan yang menentukan bagaimana status suatu sel berubah berdasarkan status sel tersebut dan status sel tetangganya sekarang. Fungsi transisi diterapkan terhadap semua sel secara serentak (paralel). Pada umumnya fungsi transisi yang sama diterapkan kepada semua sel.

b. Karakteristik Cellular Automata

Cellular Automata memiliki karakteristik-karakteristik umum yang menggambarkan sistem Cellular Automata. Menurut Ilachinski (2001), Cellular Automata memiliki beberapa karakteristik umum, diantaranya:

- 1) Bentuk geometri sel diskrit, bentuk geometri sistem Cellular Automata terdiri dari n -dimensi array ($n = 1,2,3, \dots$).
- 2) Homogenitas, semua sel dalam Cellular Automata adalah ekuivalen.
- 3) Status sel diskrit, status setiap sel berupa salah satu dari himpunan terbatas keadaan diskrit.
- 4) Interaksi lokal, setiap sel hanya berinteraksi dengan sel-sel yang berada pada lingkungan lokal (sel-sel tetangganya).
- 5) Dinamik diskrit, status setiap sel diperbarui dalam setiap satuan waktu diskrit menurut sebuah fungsi transisi yang telah didefinisikan

dengan mempertimbangkan status sel-sel tetangganya.

Keunggulan CA yakni dapat memprediksi perubahan suatu kondisi dinamik yang bergantung pada aturan sederhana dan berkembang hanya menurut aturan tersebut dari waktu ke waktu. Keterbatasan CA adalah lebih menunjukkan proses pertumbuhan dan prediksi tumbuhnya suatu sel namun tidak memberikan informasi penyebab tumbuhnya yaitu hubungan kekerabatan antar variabel terikat dan variabel bebasnya. Oleh karena itu metode ini sering dikombinasikan dengan metode lain guna mengatasi kelemahan untuk meningkatkan ketelitiannya (Lestari and Salim 2020).

4. Bidang Lantai

Dasar dari *Cellular Automata* adalah perpindahan objek dari sel ke sel tetangga disekitarnya dengan aturan tertentu pada satuan waktu diskrit. Dalam aturan menentukan perpindahan objek ke sel tetangga dibutuhkan nilai dari sel tersebut sebagai acuan. (Muarifin, Harsono, and Barakbah 2022)

a. Bidang Lantai Statis (*Statis Floor Field*)

Bidang lantai statis menggambarkan jarak terpendek dari sel saat ini terhadap pintu keluar yang biasa dinotasikan dengan simbol $S_{i,j}$. Sehingga untuk bobot dari bidang lantai statis yakni semakin mendekati pintu keluar maka nilai bobot akan semakin tinggi. Bidang lantai statis tidak berpengaruh terhadap keberadaan objek dan waktu. Untuk mengisi nilai dari setiap sel dapat dihitung sebagai berikut:

$$\tilde{S}_{ij} = \min_l \sqrt{(x_{ij} - x_{El})^2 + (y_{ij} - y_{El})^2}. \quad (1)$$

Dimana x_{El} dan y_{El} adalah koordinat dari pintu keluar. Setelah semua jarak nilai dari setiap sel telah dihitung maka akan dicari nilai maksimal dari setiap sel.

$$m := \max_{ij} \tilde{S}_{ij}. \quad (2)$$

Dengan didapatkannya nilai maksimum sel maka akan dilakukan tahap berikutnya yaitu penghitungan bobot setiap sel dari bidang lantai statis dengan menggunakan persamaan

$$S_{ij} = m - \tilde{S}_{ij}. \quad (3)$$

Substitusikan persamaan (2) terhadap persamaan (3) sehingga didapat:

$$S_{ij} = \max_{ij} \tilde{S}_{ij} - \tilde{S}_{ij}. \quad (4)$$

Kemudian substitusikan persamaan (1)

terhadap persamaan (4) dan diperoleh:

$$S_{ij} = \max_{ij} \left\{ \min_l \sqrt{(x_{ij} - x_{El})^2 + (y_{ij} - y_{El})^2} \right\} - \min_l \sqrt{(x_{ij} - x_{El})^2 + (y_{ij} - y_{El})^2} \quad (5)$$

b. Bidang Lantai Dinamis (*Dynamic Floor Field*)

Bidang lantai dinamis digunakan untuk merepresentasikan interaksi antara objek (pedestrian) dan untuk bidang lantai dinamis dinotasikan dengan D . Bidang lantai dinamis adalah jejak virtual yang ditinggalkan oleh pejalan kaki dan memiliki dinamikanya sendiri melalui difusi dan pembusukan. Difusi adalah sebuah proses dimana salah satu dari sel tetangga akan bertambah nilainya 1. Pembusukan adalah proses untuk membuat nilai dari sel menjadi 0. Pada saat kondisi objek meninggalkan sebuah jejak maka jejak tersebut akan diikuti oleh objek lain yang dekat dengannya, akan tetapi dalam beberapa waktu ada kemungkinan jejak itu akan menghilang dan tidak lagi diikuti oleh objek lain. Bidang lantai dinamis dari sel (i, j) dilambangkan sebagai D_{ij} .

Pada keadaan awal ($t = 0$), semua sel memiliki nilai bidang lantai dinamis nol, yaitu $D_{ij} = 0$. Setiap langkah pejalan kaki akan mempengaruhi bidang lantai dinamis D_{ij} . jika seorang pejalan kaki berpindah dari sel (i, j) ke salah satu sel tetangga, D_{ij} dari tempat awal akan bertambah satu:

$$D_{ij} \rightarrow D_{ij} + 1. \quad (6)$$

Oleh karena itu D hanya memiliki nilai bilangan bulat non-negatif. Dengan menggunakan bidang lantai dinamis maka akan memberi efek jika sebuah sel sering dilewati oleh objek pejalan kaki maka sel tersebut akan memiliki peluang yang lebih besar untuk dilewati oleh objek lain. Ini sangat relevan dalam proses evakuasi untuk memberikan efek saling mengikuti objek lain jika terjadi bencana, kondisi ini terkait dengan sifat panik yang memiliki kecenderungan mengikuti pejalan kaki yang lain.

5. Probabilitas Transisi

Probabilitas transisi adalah probabilitas titik pusat yang ditentukan oleh pergerakan pejalan kaki berpindah ke sel tetangganya. Jika ada sel kosong di sekitar pejalan kaki, pejalan kaki akan memilih sel tetangga dengan probabilitas terbesar untuk bergerak; jika tidak, pejalan kaki akan tetap tinggal. Probabilitas transisi sel tergantung pada keadaan sel dan interaksi bidang lantai statis, bidang lantai dinamis, dan bidang difusi darurat

(Yang, Wang, and Qin 2015). Nilai probabilitas transisi untuk sel dilambangkan sebagai p_{ij} dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$p_{ij} = NM_{ij}D_{ij}S_{ij}(1 - n_{ij}). \quad (7)$$

Dimana p_{ij} merupakan probabilitas untuk berpindah, N adalah parameter normalisasi, M_{ij} adalah preferensi pergerakan pejalan kaki, D_{ij} adalah nilai bidang lantai dinamis pada index i,j , S_{ij} adalah nilai bidang lantai statis pada index i,j , dan n_{ij} adalah indikator untuk sel tetangga, dilambangkan 1 jika sel tetangga terisi oleh objek lain dan 0 jika kosong.

$$p_{ij} = N \exp(k_D D_{ij}) \exp(k_S S_{ij})(1 - n_{ij}). \quad (8)$$

N adalah parameter normalisasi yang menyesuaikan jumlah probabilitas semua tetangga menjadi satu. Untuk nilai N dapat dihitung dengan:

$$N = \left[\sum_{(i,j)} \exp(k_D D_{ij}) \exp(k_S S_{ij})(1 - n_{ij}) \right]^{-1}. \quad (9)$$

Dimana k_D adalah koefisien bidang lantai dinamis dan k_S adalah koefisien bidang lantai statis.

METODE

Jenis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder berupa gambar detail Gedung Terpadu FMIPA UNP yang didapat melalui pihak Rektorat UNP. Adapun teknik pengolahan data yang dilakukan dengan model *Cellular Automata*:

- 1) Mengidentifikasi masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu masalah terkait model *cellular automata* untuk masalah evakuasi pedestrian di Gedung Terpadu FMIPA UNP dengan mempertimbangkan kepanikan.
- 2) Membuat model 2D Gedung Terpadu FMIPA UNP dengan menggunakan data gedung.
- 3) Menentukan jarak setiap sel dari posisi awal menuju pintu keluar dengan menggunakan prinsip bidang lantai statis.
- 4) Menghitung bobot bidang lantai dinamis setiap sel.
- 5) Menentukan perubahan posisi pejalan kaki dengan prinsip probabilitas transisi.
- 6) Melakukan simulasi dengan menggunakan software MATLAB.
- 7) Menginterpretasikan model *cellular automata* untuk masalah evakuasi pedestrian di Gedung Terpadu FMIPA UNP dengan

mempertimbangkan kepanikan berdasarkan hasil simulasi.

- 8) Membuat kesimpulan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Penelitian ini fokus pada simulasi evakuasi pedestrian menggunakan model *Cellular Automata*. Program simulasi evakuasi ini dikembangkan dengan bahasa pemrograman MATLAB. Implementasinya melibatkan beberapa komponen utama yang mempengaruhi perilaku pejalan kaki saat evakuasi, yaitu *grid* seluler, bidang lantai statis, bidang lantai dinamis, dan perhitungan probabilitas transisi.

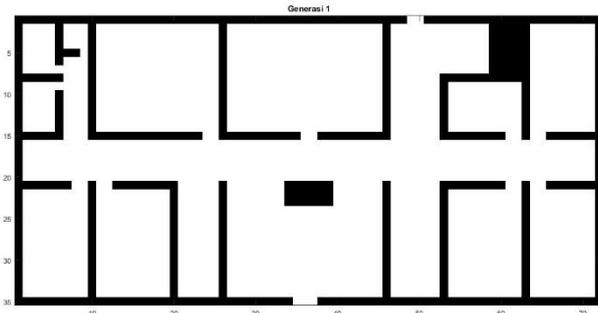
Algoritma simulasi evakuasi menggunakan *Cellular Automata* dijelaskan sebagai berikut:

- a) Pertama, atur jumlah pejalan kaki di dalam gedung, inialisasi posisi pintu keluar, waktu pengamatan, dan parameter ks dan kd . Parameter-parameter ini mempengaruhi perilaku pejalan kaki yang tergiring atau tanpa arah saat evakuasi. Nilai ks kurang dari 1 mengindikasikan pengetahuan terbatas tentang tata letak gedung, yang mengakibatkan kesulitan mencari jalan keluar. Nilai ks lebih dari 1 menunjukkan pengetahuan yang memadai dan kesadaran akan lokasi keluar. Parameter kd memiliki pengaruh yang berbeda. Nilai kd lebih dari 1 dapat menyebabkan pejalan kaki bergerak bersama secara berdekatan. Peningkatan ks cenderung mengarahkan pejalan kaki menuju pintu keluar, sementara peningkatan kd dapat menghasilkan kerumunan pejalan kaki.
- b) Selanjutnya, hitung jarak setiap sel ke pintu keluar menggunakan bidang lantai statis dan hitung bidang lantai dinamis untuk setiap sel. Bidang lantai statis dihitung berdasarkan jarak dari setiap sel di *grid* menuju pintu keluar terdekat. Sedangkan bidang lantai dinamis menggambarkan kepadatan pejalan kaki di setiap sel *grid*. Kedua bidang ini berkontribusi pada perhitungan probabilitas pergerakan pejalan kaki.
- c) Kemudian, periksa sel-sel tetangga menggunakan *Moore Neighbourhood*. Sel tetangga yang dipilih harus memiliki probabilitas transisi lebih tinggi daripada sel

tetangga lainnya. Probabilitas transisi menentukan kemungkinan pergerakan pejalan kaki dari satu sel ke sel lainnya, dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti bidang lantai statis dan dinamis.

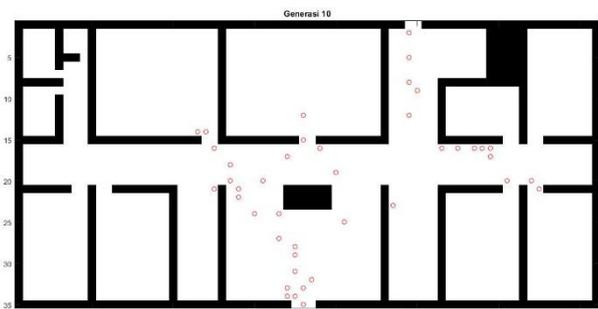
- d) Lakukan perulangan sampai pejalan kaki terakhir keluar dari gedung jika masih ada pejalan kaki di dalamnya.

Simulasi evakuasi Gedung Terpadu FMIPA UNP menggunakan *Cellular Automata* disajikan dalam Gambar 1.

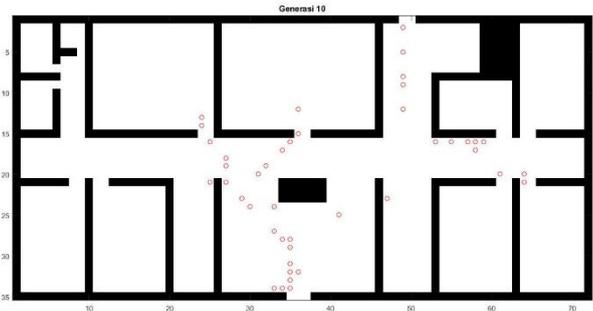


Gambar 2. Simulasi Evakuasi Gedung Terpadu FMIPA UNP Lantai 1

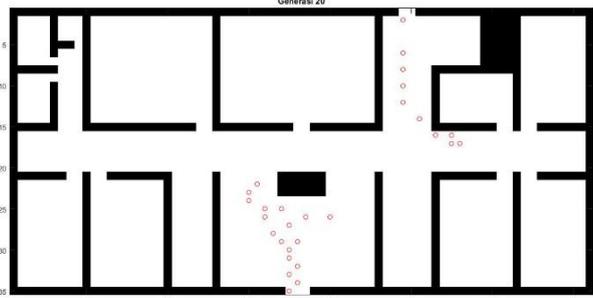
Gambar 1 terlihat estimasi setiap ruangan dan pintu keluar di lantai 1 Gedung Terpadu FMIPA UNP. Dalam gambar ini, sel-sel berwarna hitam menggambarkan hambatan berupa dinding, sementara lingkaran merah melambangkan pejalan kaki. Terdapat dua pintu keluar, di mana pintu keluar utama terletak pada sumbu x, sementara pintu keluar alternatif terletak di seberangnya. Luas total gedung ini adalah 44 x 21 meter persegi. Untuk simulasi ini, sebanyak 50 orang diinputkan ke dalam gedung.



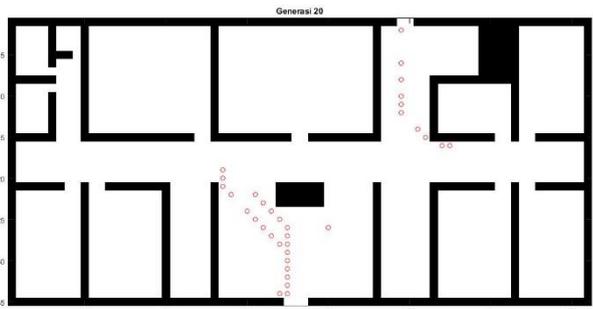
Gambar 3. Simulasi pada $t = 10$ dalam Kondisi Normal



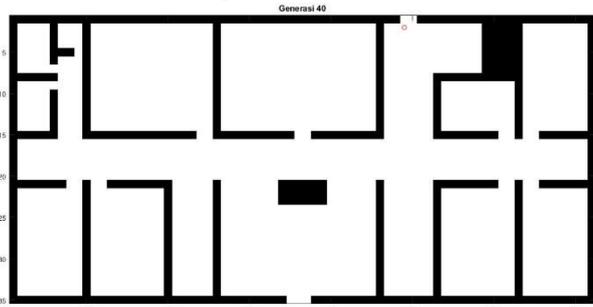
Gambar 4. Simulasi pada $t = 10$ dalam Kondisi Panik



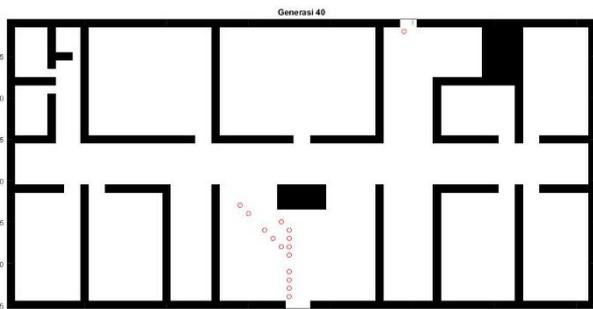
Gambar 5. Simulasi pada $t = 20$ dalam Kondisi Normal



Gambar 6. Simulasi pada $t = 20$ dalam Kondisi Panik



Gambar 7. Simulasi pada $t = 40$ dalam Kondisi Normal



Gambar 8. Simulasi pada $t = 40$ dalam Kondisi Panik

Dalam simulasi terdapat perbedaan mencolok antara kondisi normal dan kondisi panik. Simulasi evakuasi ditampilkan pada waktu yang sama dengan pengaturan parameter yang berbeda. Menurut Mu'arifin dkk, nilai ks kurang dari 1 mengindikasikan pengetahuan terbatas tentang tata letak gedung, yang mengakibatkan kesulitan mencari jalan keluar. Nilai ks lebih dari 1 menunjukkan pengetahuan yang memadai dan kesadaran akan lokasi keluar. Nilai kd lebih dari 1 dapat menyebabkan pejalan kaki bergerak bersama secara berdekatan. Peningkatan ks cenderung mengarahkan pejalan kaki menuju pintu keluar, sementara peningkatan kd dapat menghasilkan kerumunan pejalan kaki. Pada simulasi ini, parameter yang digunakan pada kondisi normal adalah $ks = 2$ dan $kd = 1$, sementara pada kondisi panik, parameter yang digunakan adalah $ks = 1$ dan $kd = 0$. Meskipun pada pandangan awal, tidak terlihat perbedaan yang jelas antara kedua kondisi tersebut, namun analisis lebih lanjut akan membantu kami memahami dampak parameter-parameter ini terhadap dinamika evakuasi. Dalam kondisi normal, waktu evakuasi berlangsung sekitar 42 detik, dengan seluruh pejalan kaki berhasil keluar dari gedung. Hal ini mengindikasikan tingkat efisiensi evakuasi yang tinggi dalam situasi normal. Namun, dalam kondisi panik, waktu evakuasi meningkat menjadi sekitar 68 detik. Perbedaan dalam pola pergerakan pejalan kaki juga sangat mencolok antara kedua kondisi tersebut. Dalam kondisi normal, pejalan kaki terlihat bergerak secara berkelompok, membentuk kelompok-kelompok yang berjalan bersama. Di sisi lain, dalam kondisi panik, pejalan kaki bergerak tanpa berkelompok, mengikuti jejak pejalan kaki sebelumnya.

Hasil akhir simulasi menegaskan bahwa penanganan dan perencanaan evakuasi dalam situasi darurat sangat penting untuk meningkatkan keselamatan individu dan meminimalkan risiko yang mungkin terjadi. Dampak signifikan dari faktor kepanikan pada perilaku pejalan kaki selama evakuasi memperlihatkan perlunya strategi evakuasi yang lebih baik dalam menghadapi situasi darurat.

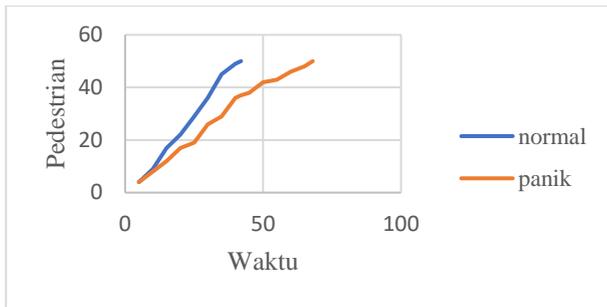
Pembahasan

Dalam model ini, akan direpresentasikan Gedung Terpadu FMIPA UNP sebagai *grid cell* yang memiliki geometri segi empat. Setiap sel *cellular automata* dapat diisi oleh satu pejalan kaki, hambatan, ataupun kosong. Status sel dilambangkan dengan angka. Sel diinisialisasikan dengan nilai -2, -1, 0, atau 1 yang menunjukkan sel hambatan, sel pintu keluar, sel kosong, dan sel dengan pejalan kaki, seperti pada tabel berikut.

Tabel 1. Status Sel dan Penjelasannya

Nilai	Konstanta	Arti
-2	Hambatan	Sel dengan hambatan berupa tembok atau meja yang tidak bisa dilewati pejalan kaki
-1	Pintu keluar	Sel yang menjadi sel tujuan pejalan kaki
0	Kosong	Sel kosong tanpa adanya hambatan maupun pejalan kaki
1	Pejalan kaki	Sel berisi pejalan kaki

Asumsi dalam pengujian ini adalah menggunakan pintu keluar sebagai titik evakuasi. Menurut Mu'arifin dkk, nilai ks kurang dari 1 mengindikasikan pengetahuan terbatas tentang tata letak gedung, yang mengakibatkan kesulitan mencari jalan keluar. Nilai ks lebih dari 1 menunjukkan pengetahuan yang memadai dan kesadaran akan lokasi keluar. Parameter kd memiliki pengaruh yang berbeda. Nilai kd lebih dari 1 dapat menyebabkan pejalan kaki bergerak bersama secara berdekatan. Peningkatan ks cenderung mengarahkan pejalan kaki menuju pintu keluar, sementara peningkatan kd dapat menghasilkan kerumunan pejalan kaki. Dalam penelitiannya saat kondisi panik Mu'arifin menggunakan parameter ks bernilai 1 dan kd bernilai 2. Sedangkan saat dalam kondisi normal parameter ks bernilai 2 dan kd bernilai 1 (., Harsono, and Barakbah 2016). Dalam ujicoba ini menggunakan 50 orang pejalan kaki. Dalam kondisi normal, parameter yang digunakan ks 2 dan kd 1. Sedangkan saat kondisi panik, parameter yang digunakan ks 1 dan kd 0.



Gambar 9. Kurva Perbandingan Waktu Evakuasi pada Kondisi Normal dan Panik

Pada Gambar 2, disajikan perbandingan waktu evakuasi dalam simulasi. Garis waktu biru menggambarkan kondisi normal, dengan waktu evakuasi sekitar 42 detik. Sementara itu, garis waktu merah menggambarkan kondisi panik, di mana waktu evakuasi meningkat menjadi sekitar 68 detik. Perbedaan yang signifikan antara kedua kondisi ini mengindikasikan bahwa faktor kepanikan berdampak besar pada waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi dalam simulasi.

Penting untuk mencatat bahwa interaksi antara faktor-faktor kunci seperti kepadatan, faktor kepanikan, dan probabilitas transisi dalam simulasi evakuasi *cellular automata* memainkan peran sentral dalam menggambarkan dinamika evakuasi secara komprehensif. Kepadatan mencerminkan seberapa padat individu berkumpul di suatu area, dan dapat menghambat pergerakan selama evakuasi. Di sisi lain, faktor kepanikan dapat mengakibatkan perilaku yang berbeda, seperti dalam pengambilan keputusan untuk bergerak. Probabilitas transisi mengindikasikan sejauh mana individu beralih antar sel dalam setiap iterasi waktu, dan juga memiliki dampak signifikan. Interaksi kompleks antara faktor-faktor ini dapat menghasilkan beragam skenario evakuasi, di mana tingkat kepadatan yang tinggi bisa diperparah oleh tingkat kepanikan yang tinggi, atau ketika kepadatan tinggi dikompensasi oleh probabilitas transisi yang efektif.

Selanjutnya, dalam simulasi evakuasi gedung, desain gedung memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi evakuasi. Lebar koridor berpengaruh pada kapasitas pergerakan individu, dan pintu keluar yang ditempatkan dengan strategis dan mudah diakses dapat memfasilitasi evakuasi yang cepat dan aman. Melalui interaksi yang kompleks antara faktor-faktor ini, simulasi evakuasi *cellular automata* memberikan wawasan

tentang bagaimana komponen-komponen ini bekerja bersama-sama untuk memengaruhi hasil evakuasi secara keseluruhan dalam skenario darurat di Gedung Terpadu FMIPA UNP.

PENUTUP

SIMPULAN

Model *cellular automata* yang mengintegrasikan pendekatan bidang lantai statis dan dinamis, serta probabilitas transisi, berhasil memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang evakuasi pedestrian. Model ini mampu menggambarkan pergerakan individu dengan mempertimbangkan perubahan kondisi lantai dan transisi antar-ruang, serta mengakomodasi faktor kepanikan. Dari hasil simulasi evakuasi pedestrian di Gedung Terpadu FMIPA UNP dengan mempertimbangkan kepanikan, ditemukan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi dalam kondisi normal adalah sekitar 42 detik, sedangkan dalam kondisi panik waktu yang dibutuhkan adalah sekitar 68 detik. Perbandingan hasil simulasi antara model dengan dan tanpa pendekatan kepanikan menunjukkan bahwa faktor kepanikan memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi evakuasi. Simulasi dengan pendekatan kepanikan menunjukkan bahwa individu cenderung mengalami penundaan dalam pengambilan keputusan dan pergerakan yang kurang efisien, yang mengakibatkan peningkatan waktu evakuasi secara keseluruhan. Hasil ini mengindikasikan bahwa kepanikan memiliki potensi untuk menghambat proses evakuasi yang optimal. Kesimpulan ini menyoroti pentingnya mempertimbangkan faktor kepanikan dalam perencanaan evakuasi dan tanggap darurat. Model simulasi ini dapat digunakan sebagai alat untuk mengidentifikasi area-area yang rentan, menguji skenario berbeda, dan mengembangkan strategi evakuasi yang lebih efektif. Dengan demikian, hasil penelitian ini memiliki implikasi penting dalam meningkatkan keselamatan dan keamanan dalam situasi darurat di gedung-gedung dengan banyak orang.

SARAN

Adapun dari penelitian yang telah dilakukan ini, penulis memberikan saran agar penelitian ini dapat menjadi dasar untuk simulasi lebih lanjut

dengan skenario yang lebih kompleks. Variasi dalam tingkat kepadatan, tingkat kepanikan, dan desain gedung dapat memberikan wawasan lebih lanjut tentang dinamika evakuasi.

DAFTAR PUSTAKA

- . Muarifin, Tri Harsono, and Aliridho Barakbah. 2016. "Evacuation System in a Building Using Cellular Automata for Pedestrian Dynamics." *EMITTER International Journal of Engineering Technology* 3(1).
- Abraham, Adam, Rini Rachmawati, and Estuning Tyas Wulan Mei. 2015. "Penentuan Jalur Evakuasi Dan Titik Kumpul Partisipatif Dalam Upaya Pengurangan Resiko Bencana Gunung Merapi." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53(9): 1-16.
- Arif, Muhammad. 2017. *Pemodelan Sistem*. 1st ed. ed. Herlambang Rahmadhani. Yogyakarta. https://books.google.co.id/books?hl=en&lr=&id=LVxDDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT11&dq=pengertian+pemodelan&ots=_Igz45hQSk&sig=orvW4ZTsWkOfCdzyKpz7APpufj8&redir_esc=y#v=onepage&q=pengertian+pemodelan&f=true.
- Burstedde, C., K. Klauack, A. Schadschneider, and J. Zittartz. 2016. "Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton . Physica A Two-Dimensional Cellular Automaton." *Physica A* 295(February): 507-25.
- Chraïbi, Mohcine, Armin Seyfried, and Andreas Schadschneider. 2010. "Generalized Centrifugal-Force Model for Pedestrian Dynamics." *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 82(4): 1-9.
- Ibrahim, Najihah et al. 2017. "Cellular Automaton Based Simulation in Panic and Normal Situations : A Case Study on the University Lecture Hall." (November): 400-405.
- Ibrahim, Najihah, and Fadratul Hafinaz Hassan. 2017. "Features of Microscopic Pedestrian Movement in a Panic Situation Based on Cellular Automata Model." *AIP Conference Proceedings* 1891.
- Ibrahim, Najihah, Fadratul Hafinaz Hassan, Ahmad Sufiril Azlan Mohamed, and Ahamad Tajudin Khader. 2019. "The Impact of Spatial Layout Design on the Pedestrian Movement during Panic Situation: Pedestrian Survival Prediction." *Journal of Physics: Conference Series* 1201(1).
- Lestari, Della Ayu, and Herli Salim. 2020. "EFEKTIVITAS PEMODELAN AUTOMATA SELULER UNTUK PREDIKSI AREA YANG DIBANGUN DI WILAYAH PESISIR KOTA BENGKULU EFFECTIVENESS OF MODELING CELLULAR AUTOMATA FOR BUILT-UP AREA PREDICTION IN BENGKULU CITY COASTAL AREA Wilayah Pesisir Merupakan Wilayah Yang Unik Ka." 1(1): 15-24.
- Li, Dewei, and Baoming Han. 2015. "Behavioral Effect on Pedestrian Evacuation Simulation Using Cellular Automata." *Safety Science* 80: 41-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ssci.2015.07.003>.
- Lyonnais, Hanif. 2012. "Metode Pencarian Lintasan Terpendek Graf Untuk Evakuasi Bencana." *Makalah IF2091 Struktur Diskrit - Sem. I Tahun 2011/2012* (13510108): 1-5.
- Muarifin, Muarifin, Tri Harsono, and Ali Ridho Barakbah. 2022. "Pemodelan Evakuasi Pejalan Kaki Di Ruang Koridor Dengan Cellular Automata Studi Kasus Gempa Bumi." *Techno.Com* 21(2): 390-99.
- Nitzsche, Christian. 2013. "Cellular Automata Modeling for Pedestrian Dynamics." (August): 37.
- Perrotta, Giulio. 2019. "Panic Disorder: Definitions, Contexts, Neural Correlates and Clinical Strategies." *Current Trends in Clinical & Medical Sciences* 1(2).
- Putra, Syopiansyah Jaya et al. 2008. "Algoritma Cellular Automata (Ca) Dan Backtracking Untuk." 6(2): 200-216.
- Shalihah, Afifah, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom, and Model Matematika. 2018. "Pemodelan Dan Simulasi Penyebaran Penyakit Demam Berdarah Dengue (Dbd) Di Kota Bandung Menggunakan Cellular Automata Modeling and Simulation of Spread Dengue Fever Disease (Dhf)." 5(3): 6259-66.
- Yang, Xiao, Binxu Wang, and Zheng Qin. 2015. "Floor Field Model Based on Cellular Automata for Simulating Indoor Pedestrian Evacuation." *Mathematical Problems in Engineering* 2015.
- Yue, Hao, Herui Hao, Xiaoming Chen, and Chunfu Shao. 2007. "Simulation of Pedestrian Flow on Square Lattice Based on Cellular Automata Model." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 384(2): 567-88.

