

**PEMODELAN EVAKUASI PEDESTRIAN  
DENGAN METODE *AGENT-BASED*  
*MODELING DAN SOCIAL FORCE MODEL***

**TESIS**

Karya tulis sebagai salah satu syarat kelulusan tahap magister dari  
Program Studi Sains Komputasi ITB

oleh:

**Alya Mutiara Firdausyi  
NIM 20920007**



Program Studi Sains Komputasi  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Institut  
Teknologi Bandung  
2023

**LEMBAR PENGESAHAN**

**Tesis**

**Program Studi Sains Komputasi – Institut Teknologi**

**Bandung**

Judul Penelitian Tugas Akhir

**PEMODELAN EVAKUASI PEDESTRIAN DENGAN  
METODE *AGENT-BASED MODELING* DAN *SOCIAL  
FORCE MODEL***

Nama Mahasiswa : Alya Mutiara Firdausyi

NIM : 20920007

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 3 Agustus 2023

Pembimbing I

Dr.rer.nat. Sparisoma Viridi, S.Si

NIP 19731201 199903 1 002

## Daftar Isi

<b>Daftar Isi</b>	<b>iii</b>
<b>Daftar Tabel</b>	<b>v</b>
<b>Daftar Gambar</b>	<b>vii</b>
<b>1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang . . . . .	1
1.2 Rumusan Masalah . . . . .	3
1.3 Tujuan Penelitian . . . . .	4
1.4 Batasan Masalah . . . . .	4
1.5 Metode Penelitian . . . . .	4
1.6 Sistematika Penulisan . . . . .	4
<b>2 DASAR TEORI</b>	<b>6</b>
2.1 Pemodelan Pedestrian . . . . .	6
2.1.1 Perilaku Kolektif . . . . .	6
2.1.2 Klasifikasi Model . . . . .	9
2.2 Simulasi Berbasis Agen . . . . .	12
2.2.1 Sistem Kompleks dan <i>Emergence</i> . . . . .	12
2.2.2 Karakteristik ABM . . . . .	13
2.2.3 Komponen ABM . . . . .	14
2.2.4 Verifikasi dan Validasi . . . . .	16
2.3 Model Gaya Sosial . . . . .	18
2.3.1 <i>Driving Effect</i> . . . . .	19
2.3.2 <i>Obstacle Effect</i> . . . . .	20
2.3.3 <i>Territorial Effect</i> . . . . .	21
2.3.4 <i>Attractive Effect</i> . . . . .	22
2.3.5 Sudut Pandang Efektif . . . . .	23
2.3.6 Total Efek . . . . .	24
2.4 Karakteristik Evakuasi . . . . .	25
<b>3 METODOLOGI PENELITIAN</b>	<b>33</b>
3.1 Konstruksi Model . . . . .	33
3.1.1 Perangkat Lunak . . . . .	34

*Daftar Isi*

---

3.1.2	Lingkungan dan Waktu . . . . .	36
3.1.3	Properti . . . . .	37
3.1.4	Perilaku Agen . . . . .	39
3.2	Simulasi . . . . .	43
3.2.1	Diagram Alir . . . . .	43
3.2.2	Parameter . . . . .	44
3.2.3	Skenario . . . . .	45
<b>4</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>49</b>
4.1	Verifikasi . . . . .	49
4.2	Pengaruh Kepadatan Pedestrian . . . . .	53
4.3	Pengaruh Ukuran Pintu Keluar . . . . .	57
<b>5</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>59</b>
5.1	Kesimpulan . . . . .	59
5.2	Saran . . . . .	60
<b>Daftar Pustaka</b>		<b>61</b>
Pustaka . . . . .		61
<b>A</b>	<b>Data Simulasi</b>	<b>64</b>
A.1	Data Variasi Densitas . . . . .	64
A.2	Data Variasi Pintu Keluar . . . . .	64
<b>B</b>	<b>Data Pendukung</b>	<b>70</b>
B.1	Faktor Beban Penghuni . . . . .	70

## Daftar Tabel

1.1	Beberapa pendekatan simulasi dinamika pedestrian (Capelle, 2018) . . . . .	2
3.1	Deskripsi <i>patches</i> pada simulasi dengan NetLogo. . . . .	37
3.2	Jenis agen dalam simulasi evakuasi. . . . .	38
3.3	Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia. . . . .	39
3.4	Properti <b>persons</b> dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini. . . . .	40
3.5	Properti <i>patch</i> dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini. . . . .	41
3.6	Nilai parameter model gaya sosial. . . . .	45
3.7	Penjelasan konstanta model gaya sosial. . . . .	46
3.8	Variasi pintu keluar. . . . .	47
4.1	Kapasitas penghuni maksimum berdasarkan aturan IBC. . . . .	55
A.1	Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran 81 m <sup>2</sup> . .	64
A.2	Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran 100 m <sup>2</sup> . .	65
A.3	Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran 225 m <sup>2</sup> . .	65
A.4	Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran 400 m <sup>2</sup> . .	66
A.5	Data total waktu evakuasi pada luas ruangan 225 m <sup>2</sup> dengan densitas populasi 0.1 - 5 orang/meter <sup>2</sup> . . . . .	66
A.6	Data kecepatan rata-rata dan kecepatan berdasarkan perhitungan Predtechenskii and Milinskii (1978) pada luas ruangan 225 m <sup>2</sup> dengan densitas populasi 0.1 - 5 orang/meter <sup>2</sup> . . . . .	67
A.7	Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 1 pintu keluar di sisi kiri. . . . .	67
A.8	Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 2 pintu keluar di sisi kiri. . . . .	68
A.9	Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 3 pintu keluar di sisi kiri. . . . .	68
A.10	Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 2 pintu keluar di sisi kiri dan kanan. .	68
A.11	Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 3 pintu keluar di sisi kiri, atas, dan bawah. . . . .	69

*Daftar Gambar*

---

A.12 Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas 100 m <sup>2</sup> dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 4 pintu keluar di sisi kiri, kanan, atas, dan bawah. . . . .	69
B.1 Maksimum area ruangan per penghuni berdasarkan 2021 <i>International Building Code</i> (Council, 2021). . . . .	70

## Daftar Gambar

2.1	Fenomena penyumbatan ketika pedestrian melewati pintu (Rzezonka, 2022). . . . .	7
2.2	Jalur pedestrian yang terbentuk dari dua arah kelompok yang berlawanan (Bacik, Bacik, & Rogers, 2023). . . . .	8
2.3	Fenomena osilasi pada pedestrian: a) jika seorang pedestrian berhasil melewati pintu, pedestrian lain dengan arah yang sama akan lebih mudah mengikutinya, b) setelah beberapa saat, pedestrian dari arah berlawanan dapat melewati pintu dan diikuti oleh pedestrian lain pada arah yang sama (Helbing & Molnár, 1995). . . . .	8
2.4	Tingkatan pemodelan perilaku pedestrian (Chraibi, Tordeux, Schadschneider, & Seyfried, 2019). . . . .	9
2.5	Klasifikasi pendekatan pemodelan pedestrian. Garis merah menunjukkan pemodelan berdasarkan aturan, sedangkan garis hijau menunjukkan pemodelan berdasarkan percepatan (Schadschneider, Chraibi, Seyfried, Tordeux, & Zhang, 2018). . . . .	11
2.6	Efek penggerak (panah merah) untuk agen $\alpha$ (titik biru) dengan kecepatan aktual mengarah ke kanan (panah biru) (Capelle, 2018). . . . .	20
2.7	Potensial tolak-menolak $U_{\alpha i}$ yang dihasilkan oleh objek $i$ pada agen $\alpha$ dengan $R = 0.2$ m dan $U_{\alpha i}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$ (Capelle, 2018). . . . .	21
2.8	Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain (Capelle, 2018). . . . .	23
2.9	Kecepatan bergantung usia dan jenis kelamin berdasarkan penelitian Ando et al. (1988). . . . .	29
2.10	Kecepatan berjalan berdasarkan kepadatan populasi (Ando et al., 1988). . . . .	29
2.11	Pengaruh populasi pada aliran yang turun dari tangga pada evakuasi tidak terkontrol (Engineers, 2002). . . . .	30
2.12	Total waktu evakuasi yang diprediksi dan diamati untuk bangunan perkantoran tinggi (Engineers, 2002). . . . .	31
3.1	Diagram alir langkah-langkah penelitian. . . . .	33
3.2	Tampilan antarmuka program NetLogo. . . . .	35
3.3	Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo. . . . .	36
3.4	Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi. . . . .	38

3.5	Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan. . . . .	42
3.6	Diagram alir simulasi evakuasi pedestrian. . . . .	43
3.7	Denah bangunan yang digunakan pada variasi pintu keluar: a) bangunan dengan satu pintu keluar di sisi A, b) bangunan dengan dua pintu keluar di sisi A, c) bangunan dengan tiga pintu keluar di sisi A, d) bangunan dengan dua pintu keluar masing-masing di sisi A dan C, e) bangunan dengan tiga pintu masing-masing di sisi A, B, dan D, serta f) bangunan dengan empat pintu masing-masing di sisi A, B, C, dan D. . . . .	48
4.1	Tampilan NetLogo untuk simulasi evakuasi 200 agen dengan parameter mengacu pada penelitian Helbing and Molnár (1995). . . .	50
4.2	Posisi agen <b>person</b> 109 pada saat $t = 0$ <i>tick</i> . . . . .	50
4.3	Nilai properti yang dimiliki oleh agen <b>person</b> 109 pada saat $t = 0$ <i>tick</i> . . . . .	51
4.4	Nilai properti yang dimiliki oleh agen <b>person</b> 109 pada saat $t = 1$ <i>tick</i> . . . . .	51
4.5	Evakuasi 200 agen dari bangunan dengan nilai parameter mengacu pada penelitian Helbing and Molnár (1995): a) $t = 0$ <i>tick</i> , b) $t = 10$ <i>tick</i> , c) $t = 50$ <i>tick</i> , d) $t = 100$ <i>tick</i> . . . . .	52
4.6	Perbandingan perilaku agen ketika nilai $v_0$ (a) 0.0, (b) 0.3, dan (c) 1.0. . . . .	53
4.7	Perbandingan perilaku agen ketika nilai $u_0$ (a) 0.0, (b) 1.6, dan (c) 20.0. . . . .	53
4.8	Perbandingan total waktu evakuasi terhadap densitas populasi agen. . . . .	54
4.9	Rata-rata total waktu evakuasi ( <i>tick</i> ) pada ruangan berukuran 225 $m^2$ dengan variasi densitas. . . . .	55
4.10	Perbandingan kecepatan rata-rata antara hasil simulasi dengan Persamaan 2.25 yang dirumuskan oleh Predtechenskii and Milinskii (1978). . . . .	57
4.11	Perbandingan total waktu evakuasi terhadap tata letak pintu keluar. . . . .	58

## DAFTAR SINGKATAN DAN ISTILAH

<i>2D</i>	2 Dimensi
<i>3D</i>	3 Dimensi
<i>CD</i>	<i>Central Differencing</i>
<i>CV</i>	<i>Control Volume</i>
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>CSF</i>	<i>Continuous Surface Force</i>
<i>DRP</i>	<i>Digital Rock Physics</i>
<i>E</i>	<i>East</i>
<i>HD</i>	<i>Hybrid Differencing</i>
<i>LBM</i>	<i>Lattice Boltzmann Method</i>
<i>MD</i>	<i>Molecular Dynamics</i>
<i>N</i>	<i>North</i>
<i>NS</i>	<i>Navier-Stoke</i>
<i>PDE</i>	<i>Partial Differential Equation</i>
<i>S</i>	<i>South</i>
<i>SCAL</i>	<i>Special Core Analysis Laboratory</i>
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
<i>SP</i>	<i>Single Phase</i>
<i>Swr</i>	<i>Residual Water Saturation</i>
<i>Swirr</i>	<i>Irreducible Water Satuarion</i>
<i>UD</i>	<i>Upwind Differencing</i>
<i>W</i>	<i>West</i>

## DAFTAR SIMBOL

$\vec{u}$	Vektor kecepatan arah x
$\vec{v}$	Vektor kecepatan arah y
$\vec{w}$	Vektor kecepatan arah z
$\rho$	Densitas
$x$	Posisi x
$y$	Posisi y
$z$	Posisi z
$t$	Waktu
$p$	Tekanan
$\phi$	Properti Fluida
$\Phi$	Porositas
$\tau$	Tegangan Geser
$s$	Laju Deformasi Linear
$\lambda$	Viskositas Statis
$\mu$	Viskositas Dinamis
$S$	Gaya Eksternal
$V$	Volume
$\Gamma$	Konstanta Difusi
$\vec{n}$	Vektor Arah Bidang
$\mathbf{f}$	<i>Body Force</i>
$\mathbf{T}$	Tensor Tegangan Viskos
$\mathbf{t}_s$	Tegangan <i>Interfacial</i>
$\sigma$	Koefisien Tegangan Permukaan
$\alpha$	Indikator Fluida
$k$	Kelengkungan
$\mathbf{g}$	Konstanta Gravitasi
$\mathbf{f}_g$	Gaya Gravitasi
$\mathbf{f}_\sigma$	Gaya Permukaan
$p_d$	Tekanan Dinamis
$\theta$	Sudut Kontak
$K$	Permabilitas
$k_r$	Permeabilitas Relatif
$\Delta P$	Beda Tekanan

## *Daftar Simbol*

---

$A$	Luas Penampang
$Q$	Debit
$F$	Fluks Konveksi
$D$	Fluks Difusi
$Sw$	Saturasi Air
$R$	Radius
$V_\alpha$	Volume Fraksi Fluida
$R_{eff}$	Radius Effektif Pori
$\kappa$	Keliling Matrix

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Manajemen keadaan darurat yang baik merupakan hal penting dalam perencanaan peristiwa yang berpotensi membahayakan nyawa. Langkah awal yang dapat dilakukan adalah dengan mengidentifikasi keadaan darurat yang mungkin terjadi, sehingga perencanaan evakuasi dapat dilakukan dengan lebih matang (Siyam, Alqaryouti, & Abdallah, 2020). Menurut UU no 29 tahun 2014 tentang Pencarian dan Pertolongan, evakuasi adalah proses memindahkan korban dari lokasi kejadian bencana ke tempat yang lebih aman hingga mendapatkan penanganan lanjut dari pihak yang berwenang. Tidak adanya perencanaan evakuasi yang baik dan efektif dapat memengaruhi tindakan dan perilaku manusia, terlebih pada tempat tanpa mitigasi bencana yang baik. Kerumunan dapat bereaksi secara tidak terduga ketika merasa panik dan kacau, seringkali berusaha untuk berpindah ke tempat yang dirasa lebih aman secepat mungkin tanpa pemikiran yang panjang dan matang. Hal ini dapat menyebabkan banyaknya korban berjatuhan, mulai dari korban luka hingga korban jiwa, serta adanya kerusakan-kerusakan yang terjadi pada fasilitas bangunan.

Contoh kasus yang menunjukkan pentingnya perencanaan evakuasi adalah kejadian di Stadion Kanjuruhan Kota Malang pada Oktober 2022 yang menelan korban sebanyak 794 orang (Itah, 2022), perayaan Halloween di Itaewon, Korea Selatan pada 30 Oktober 2022 dengan 156 orang tewas (Indonesia, 2022), dan kejadian lain seperti konser musik, acara olahraga, demonstrasi, dan lain sebagainya. Menurut Widodo et al. (2022) dalam publikasinya yang berjudul The Kanjuruhan Stadium's Stampede Tragedy: Disaster Management Preventive, ia mengemukakan bahwa berdasarkan evaluasi risiko, ditemukan bahwa kapasitas yang tersedia pada stadion tidak dapat mengatasi kerentanan yang ada sehingga mengakibatkan timbulnya risiko yang signifikan. Selain itu, tidak adanya skenario terburuk yang disiapkan mengakibatkan munculnya upaya yang kurang tepat dalam penanganan kejadian luar biasa sehingga banyak korban berjatuhan yang tidak dapat dihindari.

Konsekuensi dari kejadian luar biasa yang terjadi akhir-akhir ini menyebabkan meningkatnya kesadaran akan pentingnya desain bangunan yang terkait dengan

## Bab 1. Pendahuluan

---

keselamatan dan keamanan. Perencanaan bangunan juga perlu diperluas fokusnya pada peningkatan keselamatan penghuni selama terjadi bencana atau keadaan darurat selain berfokus pada desain sistem konstruksi, penggunaan materian, tata letak, dan sirkulasi (Sagun, Anumba, & Bouchlaghem, 2013).

Model simulasi evakuasi memungkinkan analisis perilaku banyak individu tanpa perlu melakukan uji coba pada situasi nyata. Beberapa pendekatan telah dikembangkan untuk memecahkan masalah evakuasi, seperti menggunakan model matematik, *cellular automata*, kisi gas, dinamika fluida, model gaya sosial, *game theory*, eksperimen hewan, dan lainnya. Pendekatan-pendekatan ini merupakan model simulasi konvensional dengan asumsi bahwa agen memiliki karakteristik homogen. Namun, salah satu kelemahan dari pendekatan ini adalah lingkungan yang ideal tidak selalu dapat mewakili karakteristik dinamis dari perilaku evakuasi masyarakat di dunia nyata, yang dapat mengakibatkan penyimpangan dalam hasil analisis.

Model evakuasi berbasis agen membedakan diri dari model simulasi konvensional, karena memperlakukan setiap individu sebagai agen otonom yang memiliki karakteristik dan perilaku tersendiri. Agen dapat mengambil tindakan berdasarkan situasi dan lingkungan mereka. Keberagaman perilaku individu ini dapat menyebabkan kemunculan suatu fenomena atau pola (*emergence*) yang termasuk pada perilaku kolektif. Salah satu keuntungan dari model evakuasi berbasis agen adalah kemampuannya untuk memodelkan pengambilan keputusan dan perilaku sosial individu, serta bagaimana perilaku tersebut dipengaruhi oleh karakteristik struktur bangunan (Siyam et al., 2020).

**Tabel 1.1:** Beberapa pendekatan simulasi dinamika pedestrian (Capelle, 2018).

Pendekatan	Skala	Ruang & Waktu	Agen
Dinamika fluida	Makroskopis	Kontinu	Homogen
<i>Cellular automata</i>	Mikroskopis	Diskrit	Homogen & Heterogen
Kisi gas	Mikroskopis	Diskrit	Homogen
Gaya sosial	Mikroskopis	Diskrit & Kontinu	Homogen
<i>Game theory</i>	Mikroskopis	Diskrit	Homogen
Eksperimen hewan	Mikroskopis	-	Homogen
<i>Agent-based modeling</i>	Mikroskopis	Diskrit & Kontinu	Heterogen

Variasi dari model kendali klasik adalah simulasi agen berdasarkan partikel *self-driven*. Setiap agen akan berjalan pada kecepatan yang konstan namun dapat merespon gangguan acak dengan mengadopsi arah rata-rata gerak agen lain di

lingkungannya. Salah satu model gerakan lokal yang paling banyak digunakan berdasarkan asumsi partikel *self-driven* adalah model gaya sosial. Model ini digunakan untuk merepresentasikan perilaku yang muncul dari pedestrian menggunakan gaya sosial yang mengukur motivasi suatu agen individu untuk bertindak. Hal ini diimplementasikan dalam model evakuasi dengan perubahan temporal yang sistematis dari kecepatan ideal agen menggunakan besaran vektor yang berupa model gaya sosial. Oleh karena itu, model gaya sosial digunakan untuk mewakili efek dari lingkungan (interaksi antar agen serta agen dengan lingkungan) pada masing-masing agen individu (Cuesta, Abreu, & Alvear, 2016).

Gaya sosial dideskripsikan sebagai kecenderungan psikis pedestrian untuk memiliki ruang personal, keinginan untuk berpindah menuju lokasi tertentu serta menghindari suatu objek dan pedestrian lainnya. Karena model gaya sosial pada dasarnya merupakan bagian dari model dinamika partikel, konstanta kopling dan faktor proporsionalitasnya memiliki satuan Newtonian (Ha & Lykotrafitis, 2012). Selain gaya sosial, pedestrian juga dapat memiliki gaya fisikal yang digambarkan sebagai interaksi antara pedestrian dengan objek fisik lainnya.

Pada penelitian ini, penulis memadukan pemodelan pemodelan berbasis agen dengan model gaya sosial untuk menggambarkan perilaku manusia dalam situasi evakuasi ketika terjadi kebakaran di gedung. Pemilihan model gaya sosial didasarkan pada fitur fleksibilitasnya, di mana masing-masing gaya dapat dipisahkan dan dianalisis secara terpisah. Dengan kombinasi pemodelan agen dan gaya sosial, setiap agen dapat memiliki karakteristik yang unik serta mencerminkan gaya sosial dan fisikal masing-masing.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, rumusan masalah yang dijadikan sebagai bahasan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh penggunaan model gaya sosial pada simulasi evakuasi pedestrian berbasis agen?
2. Bagaimana pengaruh variasi denah bangunan terhadap proses evakuasi?
3. Bagaimana distribusi dan jumlah agen dapat memengaruhi waktu evakuasi?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tesis ini adalah sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi pengaruh penggunaan model gaya sosial pada simulasi evakuasi pedestrian berbasis agen.
2. Menjelaskan pengaruh variasi denah bangunan terhadap proses evakuasi.
3. Menjelaskan pengaruh distribusi dan jumlah agen terhadap waktu evakuasi.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bangunan yang digunakan merupakan simplifikasi 2 dimensi dari ruang pertemuan (*hall, assembly room*) tanpa meja dan kursi (*standing space*).
2. Satuan NetLogo dikonversi menjadi satuan internasional dengan perbandingan 1 *patch* bernilai 0.5 meter dan 1 *tick* bernilai 5 detik.
3. Karakteristik agen yang merepresentasikan manusia terbatas pada yang didefinisikan di bagian Metodologi Penelitian.
4. Simulasi dilakukan hanya pada keadaan darurat di mana agen akan langsung melakukan evakuasi tanpa adanya pergerakan arbitrari.

### 1.5 Metode Penelitian

Penelitian dimulai dari studi teoretis mengenai fenomena kebakaran pada suatu gedung, dinamika pejalan kaki, serta perilaku manusia ketika melakukan evakuasi dalam kondisi darurat. Kemudian dilakukan penulisan kode dan perancangan simulasi dengan menggunakan program NetLogo yang mengombinasikan pendekatan model berbasis agen dan model gaya sosial, serta menentukan skenario dan atribut yang akan digunakan pada proses simulasi.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan ini terdiri dari lima bab. Bab 1 berisi Pendahuluan yang menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dari penelitian, ruang lingkup dari penelitian, serta sistematika penulisan. Bab 2 mendeskripsikan mengenai

## Bab 1. Pendahuluan

---

dasar teori penelitian ini berdasarkan kajian pustaka yang dilakukan. Bab 3 menjelaskan mengenai pengembangan model dan metode penelitian yang dilakukan. Bab 4 merupakan Hasil dan Pembahasan yang memaparkan hasil dari penelitian dan analisis data yang diperoleh. Serta Bab 5 yang memberikan kesimpulan dari hasil penelitian dan saran untuk penelitian lebih lanjut yang dapat dilakukan.

## BAB 2

### DASAR TEORI

#### 2.1 Pemodelan Pedestrian

Sejak peneliti mulai mempelajari pengaruh pintu keluar darurat, studi tentang sifat empiris gerakan dan evakuasi pedestrian sudah ada sejak lebih dari 100 tahun yang lalu. Pada awalnya, data diperoleh melalui pengamatan lapangan di berbagai tempat. Beberapa peneliti menyatu dengan kerumunan dan mengukur kecepatan mereka dalam arus untuk mewakili kecepatan aliran pedestrian yang sesuai. Metode lain yang populer adalah merekam gerakan pejalan kaki di tempat-tempat transportasi umum seperti stasiun kereta bawah tanah dan trotoar, kemudian menganalisis karakter makroskopiknya dengan pengamatan visual dan perhitungan manual. Meskipun studi awal ini menyediakan data yang melimpah mengenai dinamika pedestrian secara kuantitatif maupun kualitatif, kelemahan umum dari data tersebut adalah presisi dan keandalannya. Tidak diketahui apakah data dari individu-individu dapat mewakili sifat global dari aliran pejalan kaki. Namun, dengan perkembangan teknologi, seperti ilmu komputer dan teknik pengolahan citra, dan harga yang terjangkau, memungkinkan pengumpulan data empiris dengan presisi dan kualitas yang lebih tinggi.

Salah satu tujuan utama dari teori dinamika pedestrian adalah deskripsi kuantitatif dari fenomena yang diamati. Hal ini memerlukan definisi kuantitas yang dapat diamati yang memberikan deskripsi akurat dari sifat-sifat yang relevan dari pejalan kaki.

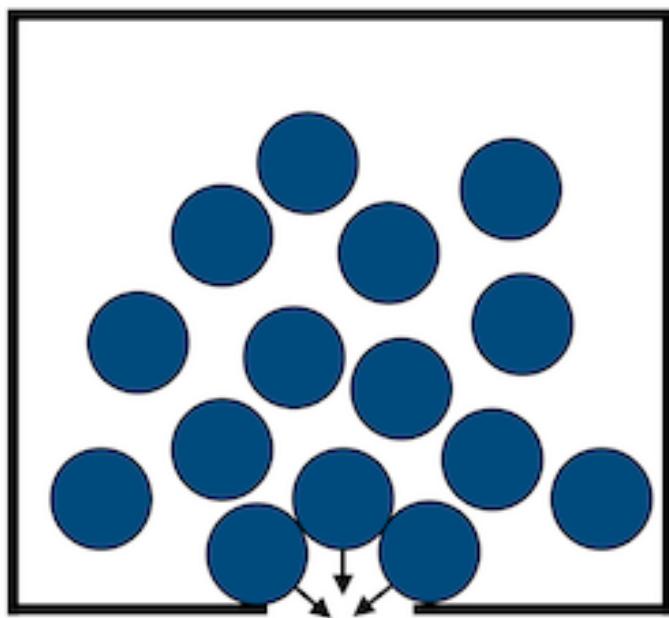
##### 2.1.1 Perilaku Kolektif

Dinamika pejalan kaki menunjukkan berbagai perilaku kolektif dan fenomena *self-organization* yang besar. Meskipun ini adalah fenomena makroskopik, fenomena ini merupakan konsekuensi dari interaksi makroskopik antara individu. Oleh karena itu, mereka dapat dianggap sebagai uji tolak ukur untuk setiap model dinamika pejalan kaki.

Menurut Helbing and Johansson (2011) dan Schadschneider et al. (2009), terdapat enam pengaruh perilaku kolektif yang dapat muncul akibat fenomena *self-organize* pada dinamika pedestrian sebagai berikut.

- Penyumbatan (*jamming* atau *clogging*)

Efek ini terjadi pada kepadatan tinggi di lokasi dengan kapasitas yang terbatas yang disebut *bottlenecks*. Contohnya adalah pada penyempitan jalanan dan pada pintu keluar. Kepadatan ini tidak dipengaruhi oleh dinamika mikroskopis dari agen, melainkan sebagai hasil dari prinsip pengecualian: ruang yang ditempati oleh satu partikel tidak tersedia bagi partikel lain.



**Gambar 2.1** Fenomena penyumbatan ketika pedestrian melewati pintu (Rzezonka, 2022).

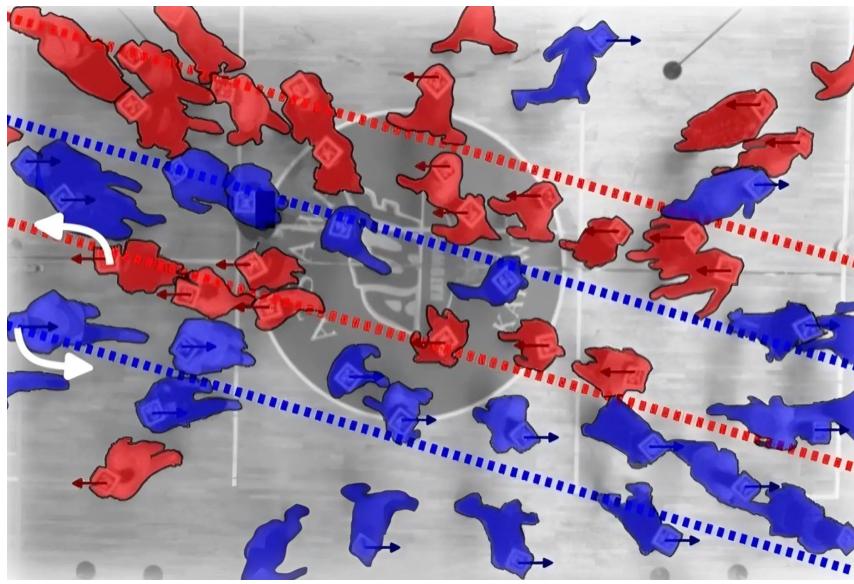
- Gelombang kepadatan (*density waves*)

Gelombang kerapatan dalam kerumunan pedestrian secara umum dapat dicirikan sebagai variasi kerapatan quasi-periodik dalam ruang dan waktu. Selain itu, pada kepadatan tinggi kerumunan dapat berperilaku seperti massa fluida. Contohnya adalah gerakan di koridor yang padat.

- Pembentukan jalur (*lane formation*)

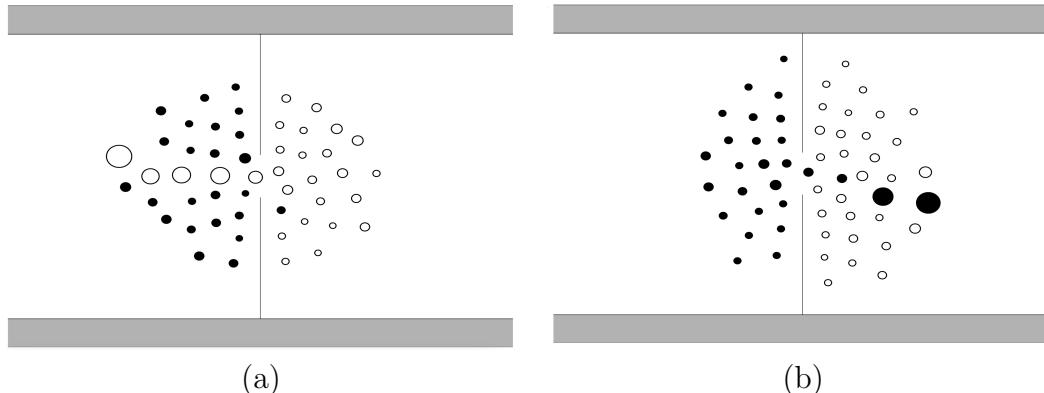
Ketika kelompok pedestrian berjalan pada arus yang berlawanan yang disebut *counterflow*, jalur yang bervariasi secara dinamis akan terbentuk di mana orang bergerak hanya dalam satu arah. Dengan cara ini, gerakan akan menjadi lebih nyaman dan memungkinkan kecepatan berjalan yang lebih tinggi, karena interaksi yang kuat dengan pedestrian yang datang dari arah berlawanan berkurang.

- Osilasi (*oscillations*)



**Gambar 2.2** Jalur pedestrian yang terbentuk dari dua arah kelompok yang berlawanan (Bacik et al., 2023).

Pada *bottleneck* di arus yang berlawanan (misalnya di pintu), sering teramati perubahan arah gerakan yang osilasi. Ketika seorang pedestrian melewati *bottleneck*, menjadi lebih mudah bagi yang lain untuk mengikuti arah yang sama. Hal ini berubah ketika seseorang dapat melewati *bottleneck* dari arah sebaliknya.



**Gambar 2.3** Fenomena osilasi pada pedestrian: a) jika seorang pedestrian berhasil melewati pintu, pedestrian lain dengan arah yang sama akan lebih mudah mengikutinya, b) setelah beberapa saat, pedestrian dari arah berlawanan dapat melewati pintu dan diikuti oleh pedestrian lain pada arah yang sama (Helbing & Molnár, 1995).

- Pola di persimpangan (*patterns at intersection*)

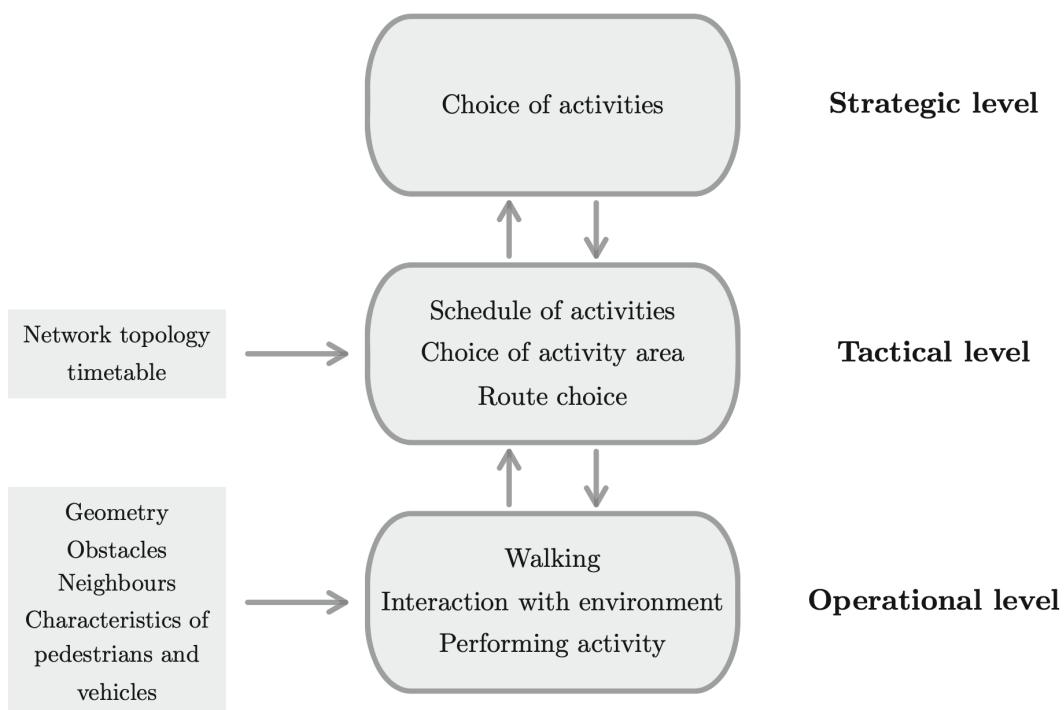
Ketika beberapa arus pedestrian bergerak dalam arah yang berbeda bertemu, berbagai pola gerakan kolektif dapat terbentuk. Pola-pola ini dapat

memungkinkan gerakan yang lebih lancar, seperti munculnya pola bulatan pada persimpangan empat dan lengkungan pada persimpangan tiga.

### 2.1.2 Klasifikasi Model

Suatu klasifikasi atau kategorisasi yang sering digunakan dalam dinamika pedestrian memperhatikan tiga level perilaku yang berbeda. Pada level strategis (*strategic level*), pejalan kaki memutuskan aktivitas apa yang ingin mereka lakukan dan urutan aktivitas tersebut. Dengan pilihan yang dibuat pada level strategis, level taktis (*tactical level*) berkaitan dengan keputusan jangka pendek yang dibuat oleh pedestrian, misalnya memilih rute dengan memperhitungkan hambatan, kerapatan pejalan kaki, dan sebagainya. Terakhir, level operasional (*operational level*) menggambarkan perilaku berjalan dari pedestrian, misalnya keputusan cepat yang perlu diambil untuk menghindari tabrakan, dan sebagainya (Chraibi et al., 2018).

Proses pada level strategis dan taktis biasanya dianggap sebagai faktor-faktor luar pada simulasi pedestrian. Pada tahapan ini, informasi dari disiplin lain seperti sosiologi, psikologi, dan lain-lain diperlukan.



**Gambar 2.4** Tingkatan pemodelan perilaku pedestrian (Chraibi et al., 2019).

Pemodelan pada tingkat operasional biasanya didasarkan pada variasi model dari fisika. Sebenarnya, gerakan kerumunan pedestrian memiliki kesamaan dengan fluida atau aliran material granular. Tujuannya adalah untuk menemukan model yang sesederhana mungkin namun pada saat yang sama dapat mereproduksi perilaku “realistik” dalam arti bahwa pengamatan empiris direproduksi. Oleh karena itu, berdasarkan pengalaman dari fisika, pedestrian sering dimodelkan sebagai “partikel” sederhana yang saling berinteraksi. Ekstensi ke model “partikel pintar” dengan banyak parameter dan mekanisme untuk interaksi dengan tetangga dan lingkungan biasanya disebut sebagai sistem multi-agenn. Agen berinteraksi satu sama lain dan dengan lingkungan. Mereka dapat memiliki keadaan internal yang mencerminkan tujuan dan perilaku umum mereka.

Ada beberapa karakteristik yang sering digunakan untuk mengelompokkan metode atau pendekatan model pedestrian.

### 1. Mikroskopis vs makroskopis

Pada model mikroskopis, setiap individu direpresentasikan secara terpisah yang memungkinkan untuk menggunakan berbagai jenis pedestrian dengan properti individu yang berbeda. Sedangkan pada model makroskopik, individu yang berbeda tidak dapat dibedakan. Pada pendekatan ini, keadaan sistem dijelaskan oleh rata-rata waktu dan ruang dari kepadatan, kecepatan, dan aliran.

### 2. Diskrit vs kontinu

Terdapat tiga variabel dasar untuk mendeskripsikan sistem pedestrian, yaitu ruang, waktu, dan variabel keadaan yang dapat berupa diskrit atau kontinu.

### 3. Deterministik vs stokastik

Pada pendekatan deterministik, gerakan pada waktu tertentu ditentukan oleh keadaan saat ini. Pada model stokastik, gerakan ditentukan oleh probabilitas sehingga agen dapat bereaksi secara berbeda dalam situasi yang sama. Aturan perilaku stokastik seringkali menghasilkan representasi sistem kompleks seperti kerumunan pejalan kaki. Di sisi lain, stokastisitas dalam model mencerminkan kurangnya pengetahuan tentang proses fisik yang mendasari, misalnya pengambilan keputusan pejalan kaki.

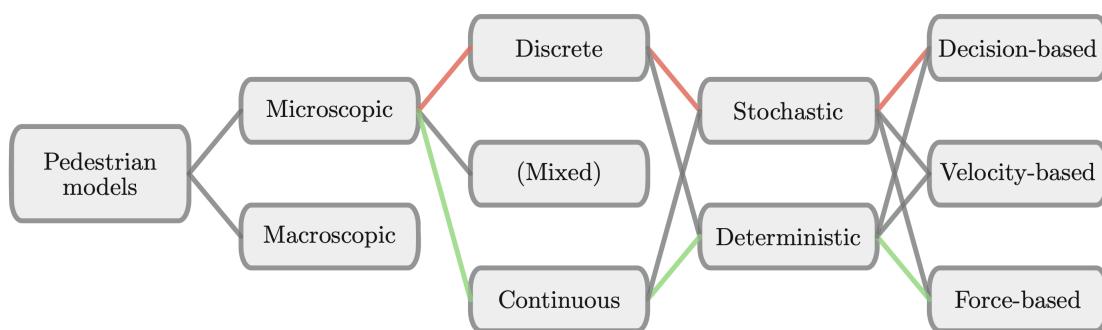
### 4. Berdasarkan aturan vs berdasarkan percepatan vs berdasarkan kecepatan

Dalam kelas model yang besar, mulanya perlu ditentukan kecepatan atau

percepatan baru yang kemudian memungkinkan untuk menghitung posisi baru seorang pejalan kaki dengan integrasi. Biasanya ini memerlukan solusi dari persamaan diferensial orde satu dan orde dua. Model tersebut bisa dikategorikan sebagai model berdasarkan kecepatan atau berdasarkan percepatan. Pada model berdasarkan percepatan, interaksi dasar dideskripsikan dalam bentuk gaya: agen merasa adanya gaya yang dikeluarkan oleh agen lain atau lingkungannya. Pada model berdasarkan kecepatan, kecepatan dan arah agen bergantung pada jarak dan posisi tetangga di sekitar serta hambatan. Untuk model lain yang tidak termasuk dalam keduanya, penentuan posisi baru tidak memerlukan solusi dari persamaan diferensial. Sebaliknya, posisi baru ditentukan dari aturan-aturan tertentu, misalnya pertimbangan arah gerakan dan posisi pedestrian lain atau hambatan. Pendekatan pada ini termasuk pada model berdasarkan aturan atau keputusan. Fokusnya terletak pada properti intrinsik agen dan aturan yang ada diambil dari psikologi. Seringkali yang tidak ada batasan jelas yang membedakan pendekatan berbasis aturan dengan lainnya.

### 5. Heuristik vs *first-principles*

Model heuristik biasanya mencakup beberapa interaksi yang relevan. Interaksi ini didefinisikan oleh parameter model yang digunakan untuk menyesuaikan data empiris. Model first-principles diturunkan dari beberapa postulat yang dianggap mendasar. Seringkali, perbedaan yang jelas antara kedua pendekatan tidak mungkin dilakukan.



**Gambar 2.5** Klasifikasi pendekatan pemodelan pedestrian. Garis merah menunjukkan pemodelan berdasarkan aturan, sedangkan garis hijau menunjukkan pemodelan berdasarkan percepatan (Schadschneider et al., 2018).

## 2.2 Simulasi Berbasis Agen

Model adalah suatu representasi yang menyederhanakan suatu sistem dari dunia nyata yang tidak mencakup seluruh detail dan faktor acak yang ada. Sedangkan model komputasi adalah proses pemodelan yang mengubah *input* menjadi *output* melalui manipulasi *input* berdasarkan suatu algoritma. Tujuan dari model adalah untuk membantu memahami dan menguji fenomena dunia nyata dengan lebih efisien dan terstruktur daripada hanya melalui observasi. Implementasi model menunjukkan bagaimana model tekstual dapat diterjemahkan menjadi simulasi komputasi melalui penulisan kode. Selain model tekstual, ada juga model konseptual yang menjelaskan proses, objek, atau peristiwa melalui gambar atau diagram.

Penggambaran dengan menggunakan agen memiliki kemudahan dalam pemahaman dibandingkan dengan penggambaran matematis, karena model agen dibangun dari objek individu dan aturan perilaku sederhana, sementara persamaan matematis dibangun dari simbol matematis. Hal ini disebabkan karena manusia cenderung lebih memahami pengalaman berupa interaksi objek individu daripada rasio-rasio yang terdapat pada persamaan matematis.

*Agent Based Modeling* (ABM) atau simulasi berbasis agen adalah paradigma pemodelan komputasi yang menjelaskan perilaku dan interaksi agen. Dalam simulasi berbasis agen, terdapat tiga komponen penting yang memiliki peran dalam implementasinya, yaitu agen, lingkungan, dan interaksinya.

### 2.2.1 Sistem Kompleks dan *Emergence*

Teori sistem kompleks memperkenalkan prinsip dan alat untuk menjelaskan kompleksitas dunia serta menjelaskan sistem kompleks sebagai sistem yang terdiri dari banyak elemen individu yang saling berinteraksi. Melalui interaksi antara elemen-elemen ini, terbentuklah fenomena *emergence* yang menjadi karakteristik sistem kompleks. Frasa *emergence* atau *emergent* pada sistem kompleks didefinisikan sebagai munculnya suatu struktur, pola, dan sifat baru yang terkait melalui interaksi elemen yang terdistribusi. Struktur yang muncul tidak dapat disimpulkan hanya dari sifat-sifat elemen individunya saja, tetapi juga muncul dari interaksi antar elemen. Struktur seperti itu merupakan properti dari suatu sistem yang terbentuk dan seringkali merupakan timbal balik dari setiap elemen individu yang menyusun sistem tersebut.

Suatu pola global yang muncul secara spontal dari interaksi antarelemen serta tidak adanya orkestrasi dari koordinator terpusat—dengan kata lain sistem tersebut mengorganisir dirinya sendiri atau melakukan “*self-organizes*”—merupakan ciri-ciri penting dari fenomena *emergence*. Adanya struktur atau aturan pada tingkat mikro akan menyebabkan munculnya pola yang beraturan pada tingkat makro. Kemunculan makrostruktur yang terdiri dari banyak elemen jika terganggu akan menyebabkan suatu reformasi yang dinamis. Pada sistem kompleks, aturan dapat muncul tanpa adanya perencanaan sebelumnya.

*Agent-based modeling* (ABM) merupakan salah satu metode komputasional yang dapat digunakan untuk memodelkan suatu sistem kompleks. Dalam ABM, agen adalah entitas komputasi yang memiliki properti atau karakteristik dan dapat mewakili elemen apapun dalam suatu sistem. Agen memiliki aturan perilaku dan bergerak sesuai dengan properti dan aturannya masing-masing pada waktu universal. Jika kondisi tertentu terpenuhi, agen dapat menunjukkan suatu perilaku berdasarkan aturan yang ada. Tujuan dari ABM adalah membuat agen-agen dan aturan yang akan menghasilkan perilaku target. Terkadang aturan tersebut belum diketahui, atau simulasi juga dilakukan hanya untuk melakukan eksplorasi terhadap perilaku sistem, sehingga ABM dapat digunakan untuk memahami suatu fenomena melalui eksperimen dengan aturan dan properti yang ditetapkan.

### 2.2.2 Karakteristik ABM

Berikut merupakan beberapa karakteristik dari teknik simulasi berbasis agen.

1. Pemodelan menggunakan ABM dapat dilakukan untuk populasi yang heterogen, sedangkan pemodelan berdasarkan persamaan umumnya menggunakan asumsi homogenitas.
2. Hasil simulasi menggunakan ABM adalah diskrit dan tidak kontinyu. Model kontinyu seringkali tidak dapat menggambarkan situasi dunia nyata. Sebagai contoh, pada pemodelan dinamika populasi, persamaan akan memperlakukan populasi sebagai kuantitas yang kontinyu ketika pada kenyataannya populasi merupakan kumpulan dari individu-individu diskrit.
3. Dalam implementasi ABM, tidak diperlukan pengetahuan mendetail mengenai pola global yang akan dihasilkan dari perilaku masing-masing individunya. Sebaliknya, diperlukan pemahaman perilaku individu untuk menentukan aturan-aturan sederhana pada entitas yang digunakan yang

kemudian dapat memberikan hasil agregat yang dapat diobservasi melalui proses simulasi.

4. ABM secara spesifik tidak menjelaskan mengenai agregat atau pola perilaku yang muncul dari interaksi entitas yang terlibat, melainkan menjelaskan mengenai perilaku individu atau agennya sehingga hubungan antara ABM dengan kenyataan lebih sesuai dan lebih mudah dijabarkan pada seseorang tanpa latar belakang komputasi.
5. ABM mampu memberikan hasil yang lebih mendetail dibandingkan dengan metode pemodelan berdasarkan persamaan, dengan menghasilkan detail pada tingkat individu dan perlakunya serta mengamati pola pada hasil akhir keseluruhannya (pendekatan *bottom-up*).
6. Mudah memasukkan sifat acak ke dalam model dengan menggunakan ABM karena keputusan yang akan diambil oleh agen dapat dibuat berdasarkan probabilitas.
7. ABM mengizinkan individu untuk menyimpan riwayat interaksinya sehingga mereka dapat mengubah perilaku dan strategi pengambilan keputusannya berdasarkan peristiwa yang telah terjadi (*adaptive agent*).

Simulasi berbasis agen menyediakan lebih banyak keuntungan dibanding teknik lainnya dalam memodelkan suatu fenomena. Namun pada kasus tertentu, ABM dapat menjadi metode yang kurang tepat digunakan karena beberapa alasan, seperti ABM membutuhkan komputasi yang sangat intensif karena memodelkan banyak individu dalam waktu yang sama sehingga dibutuhkan daya yang sangat besar. Selain itu, semakin banyak detail yang ada pada suatu model, semakin banyak keputusan yang harus dibuat dan parameter yang harus ditentukan untuk mengontrol tingkat detail tambahan. Mengalibrasi parameter-parameter bebas ini serta memastikan ketepatannya dapat menjadi proses yang memakan waktu.

### 2.2.3 Komponen ABM

Ide utama dari pemodelan berbasis agen adalah bahwa sistem kompleks dapat dimodelkan dan dijelaskan dengan membuat agen beserta lingkungannya, kemudian mendeskripsikan properti dari masing-masing agen melalui aturan-aturan yang ditetapkan serta menentukan interaksi antar-agennya atau antara agen dengan lingkungannya. Terdapat tiga komponen utama dari ABM, yaitu agen, lingkungan, dan interaksi, serta dua komponen tambahan yaitu *observer* dan

*schedule.*

### 1. Agen

Agen merupakan entitas mendasar dari pemodelan berbasis agen. Dua aspek penting yang mendefinisikan agen adalah properti atau ciri-ciri yang dimiliki serta tindakan atau perilaku (*action, behavior*) yang dapat dilakukan. Properti agen merupakan keadaan internal dan eksternal agen seperti data dan deskripsinya, sedangkan perilaku agen adalah hal-hal yang dapat dilakukan oleh agen, seperti mengubah keadaan lingkungan atau memengaruhi agen lain maupun dirinya sendiri.

### 2. Lingkungan

Lingkungan merupakan kondisi dan habitat yang mengelilingi agen selama mereka bergerak dan berinteraksi di dalam model. Lingkungan dapat memengaruhi pengambilan keputusan agen, dan sebaliknya, dapat terpengaruh oleh keputusan yang diambil oleh agen. Implementasi lingkungan dapat dilakukan melalui berbagai cara. Pertama, lingkungan dapat memiliki properti dan perilakunya sendiri yang menyebabkan masing-masing bagian dalam suatu lingkungan dapat memiliki properti yang berbeda sehingga agen yang berada di lingkungan tertentu akan melakukan tindakan yang berbeda berdasarkan interaksi lokalnya. Yang kedua adalah lingkungan yang berperan sebagai sebuah agen yang utuh dengan kesatuan properti dan tindakan global. Pendekatan lain yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan lingkungan yang berasal dari luar NetLogo, seperti *geographic information systems* (GIS), *social network analysis* (SNA), dan lingkungan lain di mana ABM dapat diimplementasikan.

### 3. Interaksi

Terdapat lima interaksi yang dapat dilakukan antara agen dengan agen atau agen dengan lingkungan. Yang pertama adalah *agent-self interaction* atau interaksi agen dengan dirinya sendiri. Agen melihat dan mempertimbangkan keadaannya saat ini dan menentukan apakah yang akan dilakukan selanjutnya. Contoh dari interaksi ini adalah *birth* atau kelahiran agen baru dan *death* atau matinya agen yang sudah ada.

Yang kedua adalah *environtment-self interaction* atau interaksi lingkungan dengan dirinya sendiri. Interaksi ini terjadi ketika lingkungan berubah sendiri ketika berada di kondisi tertentu yang merupakan hasil dari kalkulasi. Contohnya adalah skenario ketika rumput tumbuh jika jumlah rumput di

suatu lingkungan mencapai nilai minimum tertentu.

Kemudian ada *agent-agent interaction* atau interaksi yang terjadi antara dua atau lebih agen. Contohnya adalah dalam pemodelan predator-mangsa, interaksi yang terjadi antara predator yang berupa agen memburu mangsa yang merupakan agen lainnya, serta interaksi berupa kompetisi antar-predator yang berusaha mendapatkan mangsa sebagai makanannya.

Keempat adalah *environment-environment interaction* atau interaksi antara bagian yang berbeda dari lingkungan. Contoh pemodelan yang menggunakan interaksi ini adalah difusi.

Yang terakhir adalah *agent-environment interaction* atau interaksi yang terjadi ketika agen memanipulasi atau menguji bagian lingkungan tempatnya berada, atau ketika lingkungan berubah ketika mengobservasi agen yang berada di dalamnya. Interaksi ini memerlukan agen untuk mengobservasi lingkungannya. Contohnya adalah model semut yang berburu makanan. Semut harus mengobservasi lingkungannya untuk mencari lingkungan yang potensial sebagai sumber makanan, sehingga kemudian dapat mengambil makanannya dan terjadi interaksi antara lingkungan dengan agen.

#### 4. Pengamat

Pengamat atau *observer* adalah agen khusus yang mengontrol jalannya model. Pengamat bertanggung jawab untuk memastikan bahwa model yang digunakan berjalan sesuai dengan langkah-langkah dan aturan yang dibuat. Pengamat memberikan perintah kepada agen dan lingkungan untuk memanipulasi data atau mengambil suatu tindakan tertentu. Meskipun disebut agen khusus, pengamat tidak memiliki properti walaupun dapat mengakses properti global yang ada. Selain itu, pengamat juga dapat menentukan perspektif mana yang akan digunakan untuk mengamati model, apakah akan fokus pada suatu agen tertentu atau secara keseluruhan.

##### 2.2.4 Verifikasi dan Validasi

Akurasi suatu model dapat dievaluasi melalui tiga tahapan simulasi, yaitu validasi, verifikasi, dan replikasi. Verifikasi model adalah proses menentukan apakah model yang diimplementasikan sesuai dengan target yang dimiliki oleh model konseptual. Proses ini sama dengan memastikan bahwa model telah diterapkan dengan benar. Validasi model adalah suatu proses menentukan apakah model yang telah

diimplementasikan dapat sesuai dan menjelaskan fenomena yang terjadi di dunia nyata. Dengan memastikan bahwa model yang diimplementasikan sesuai dengan model konseptual dan memiliki *output* yang tepat dengan dunia nyata, maka ketepatan dan kesesuaian dari suatu model meningkat (Wilensky & Rand, 2015).

### Verifikasi

Secara umum, tujuan dari dilakukannya verifikasi adalah untuk mengeliminasi adanya kesalahan atau *bugs* dari kode yang telah dibuat. Panduan umum untuk melakukan verifikasi model dimulai dengan pembangunan model sederhana yang berkembang secara bertahap dan bertambah kompleksitasnya. Hal ini disebabkan karena memverifikasi model yang sederhana akan lebih mudah dilakukan dibandingkan dengan model yang kompleks. Jika pengembangan yang diberikan pada model merupakan tambahan yang inkremental atau bertahap, model akan lebih mudah diverifikasi.

Pada tahap ini seringkali dibutuhkan diagram alir atau *pseudocode* untuk menjelaskan model secara konseptual untuk kemudian mengimplementasikannya dalam kode. Beberapa uji coba diperlukan untuk memastikan bahwa kode dari model sesuai dengan fenomena yang diinginkan. Salah satu cara untuk menguji model yang telah dibangun adalah dengan melakukan analisis sensitivitas.

Analisis sensitivitas adalah suatu analisis untuk mengetahui seberapa sensitif (robust) suatu model terhadap berbagai kondisi; seberapa besar perubahan yang terjadi pada hasil pemodelan jika suatu nilai parameter diubah. Hal ini dapat dilakukan dengan mengubah nilai input suatu model, memvariasikan parameter-parameter yang sudah dimiliki dalam suatu model, menambahkan parameter baru ke dalam suatu model, atau mengubah lingkungan yang digunakan dalam model.

Dokumentasi dan pengujian sensitivitas suatu output model berdasarkan perubahan pada nilai parameter-parameternya merupakan hal yang sangat penting dilakukan karena dua hal. Yang pertama, analisis seperti ini dapat membantu menunjukkan seberapa kuat suatu model merepresentasikan fenomena dunia nyata. Yang kedua, analisis akan membantu memahami pentingnya suatu proses dalam pemodelan. Sensitivitas tinggi terhadap suatu parameter menunjukkan bahwa proses yang terhubung dengan parameter tersebut mengontrol keluaran model dan perilaku sistem lebih dari yang dilakukan proses lain. Dengan demikian, analisis sensitivitas merupakan suatu alat diagnosis yang membantu

lebih memahami model.

### Validasi

Validasi merupakan proses memastikan bahwa terdapat korelasi antara model yang telah diimplementasikan dengan kenyataan. Sifat validasi adalah kompleks, bertingkat, dan relatif. Pada dasarnya, model merupakan simplifikasi dari kenyataan, sehingga tidak memungkinkan untuk memasukkan seluruh komponen dan detail karakteristik yang terdapat pada dunia nyata ke dalam model. Hal yang penting untuk diperhatikan adalah penting untuk mengingat pertanyaan model konseptual dan memvalidasi aspek model yang berhubungan dengan pertanyaan ini.

Terdapat dua tingkatan pada proses validasi (Rand & Rust, 2011). Tingkatan pertama adalah tingkat di mana proses validasi terjadi. *Microvalidation* adalah memastikan perilaku dan mekanisme yang diberikan pada agen di model sesuai dengan analogi perilaku individu di kenyataan. *Macrovalidation* adalah proses memastikan bahwa agregat atau properti yang muncul (*emergent*) sesuai dengan properti agregat di dunia nyata. Tingkatan kedua adalah tingkat detail dari proses validasi. *Face validation* merupakan proses menampilkan bahwa mekanisme dan properti dari model serupa dengan mekanisme dan properti pada dunia nyata. *Empirical validation* memastikan bahwa model menghasilkan data yang dapat didemonstrasikan dan sesuai dengan pola data pada dunia nyata.

## 2.3 Model Gaya Sosial

Model gaya sosial atau *social force model* (SFM) merupakan pemodelan perilaku pedestrian berdasarkan gaya sosio-psikologis dan fisis (Helbing & Molnár, 1995). SFM mengasumsikan bahwa semua pedestrian memiliki perilaku seperti partikel dan menggunakan vektor gaya untuk menggambarkan gaya dan motivasi intrinsiknya. Berdasarkan model ini, gerakan pedestrian dipengaruhi oleh empat efek utama. Pertama, *the driving effect*  $\vec{f}_\alpha^0$  yang menunjukkan keinginan agen  $\alpha$  untuk mencapai tujuan dan tetap bergerak pada kecepatan yang diinginkan  $v_\alpha^0$ . Kedua, *the territorial effect*  $\vec{f}_{\alpha\beta}$  yang menunjukkan keinginan agen untuk mempertahankan jarak tertentu dari agen lain. Ketiga, *the obstacle effect*  $\vec{f}_{\alpha B}$  yang menunjukkan preferensi agen untuk menghindari hambatan atau rintangan. Terakhir, *the interaction effect*  $\vec{f}_{\alpha i}$  yang menunjukkan gaya tarikan dari agen atau objek lain.

Sebagai catatan, pada penelitian ini pejalan kaki pada “dunia nyata” akan disebut dengan istilah “pedestrian”, sedangkan istilah “agen” akan merujuk pada individu pada simulasi.

Pada dasarnya, SFM memiliki prinsip yang serupa dengan hukum kedua Newton yang menjelaskan gerak benda. Dalam SFM, efek-efek yang ada akan memengaruhi keputusan agen dan menghasilkan tindakan tertentu. Oleh karena itu, persamaan 2.1 akan berlaku untuk massa agen  $m_\alpha$  yang konstan selama simulasi. Selanjutnya, efek  $f$  pada persamaan dapat diterjemahkan sebagai fungsi percepatan yang memengaruhi gerak agen.

$$\vec{F} = m_\alpha \vec{f} \quad (2.1)$$

### 2.3.1 Driving Effect

Ketika seorang agen  $\alpha$  menuju suatu tujuan tertentu  $\vec{r}_\alpha^0$ , normalnya ia akan mengambil jalan terpendek yang tidak perlu memutar atau berubah arah. Gerakan agen ini biasanya akan mengikuti lintasan yang berbentuk poligon dengan sisi  $\vec{r}_\alpha^1, \dots, \vec{r}_\alpha^n = \vec{r}_\alpha^0$ . Jika  $\vec{r}_\alpha^k$  merupakan sisi selanjutnya yang dituju, maka arah yang dituju  $\vec{e}_\alpha(t)$  adalah:

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)|}, \quad (2.2)$$

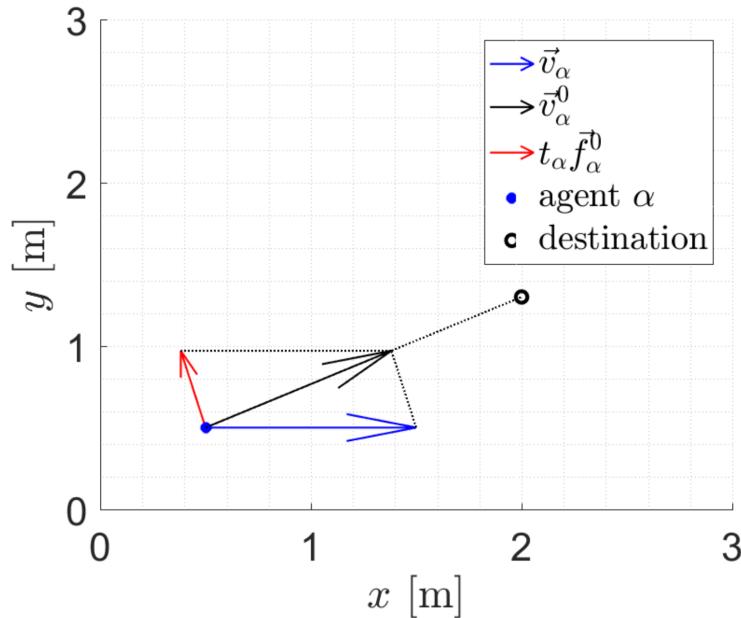
di mana  $\vec{r}_\alpha(t)$  menunjukkan posisi aktual agen  $\alpha$  pada waktu  $t$ . Lebih lanjut, tujuan yang diinginkan oleh pedestrian umumnya berupa suatu gerbang atau daerah dibanding dengan suatu titik  $\vec{r}_\alpha^k$ , sehingga setiap saat  $t$  ia akan mengarah ke titik terdekat  $\vec{r}_\alpha^k(t)$  dari gerbang atau area tujuan.

Efek penggerak atau *the driving effect*  $\vec{D}_\alpha$  memastikan agen  $\alpha$  memiliki gerak yang sesuai dengan kecepatan yang diinginkan  $v_\alpha^0$  dan memiliki arah menuju tujuan yang diinginkan  $\vec{e}_\alpha^0$ .

$$\vec{D}_\alpha(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha^0 - \vec{v}_\alpha) \quad (2.3)$$

dengan  $\tau_\alpha$  adalah waktu relaksasi yang memodulasi seberapa cepat seorang agen akan mencapai kecepatan idealnya  $\vec{v}_\alpha^0(t) = v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha(t)$ . Semakin kecil nilai  $\tau_\alpha$ , agen akan bersikap lebih agresif dan nilai  $\vec{D}_\alpha$  akan semakin besar. Jika tidak ada efek lain yang berlaku, waktu yang dibutuhkan agen untuk mencapai kecepatan ideal-nya adalah  $\tau_\alpha$  detik. Ketika magnitudo dari kecepatan aktual  $\vec{v}_\alpha$  lebih besar dari kecepatan

ideal  $v_\alpha^0$ , efek penggerak akan memperlambat agen. Sebaliknya, efek penggerak akan mempercepat agen ketika kecepatan aktual lebih kecil dari kecepatan idealnya.



**Gambar 2.6** Efek penggerak (panah merah) untuk agen  $\alpha$  (titik biru) dengan kecepatan aktual mengarah ke kanan (panah biru) (Capelle, 2018).

Efek penggerak akan memperhitungkan arah yang diinginkan. Ketika agen bergerak ke arah yang menyimpang dari tujuannya, efek penggerak cenderung menarik gerakan agen agar berubah menuju tujuannya. Berdasarkan gambar 2.6, vektor kecepatan agen tidak mengarah ke tujuan, melainkan ke kanan, seperti yang ditunjukkan oleh panah berwarna biru. Perubahan arah agen dapat terjadi ketika efek penggerak diperlakukan seperti gaya yang menarik agen untuk mengarah ke tujuan dan diberlakukan untuk masing-masing sumbu  $x$  dan  $y$  nya.

$$\begin{bmatrix} D_x \\ D_y \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} m_\alpha \begin{bmatrix} v_\alpha^0 e_{\alpha x}^0 - v_{\alpha x} \\ v_\alpha^0 e_{\alpha y}^0 - v_{\alpha y} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### 2.3.2 *Obstacle Effect*

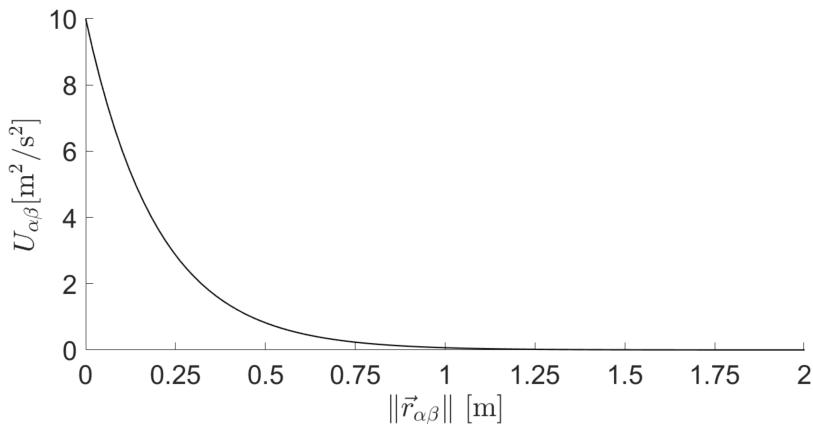
Pedestrian akan cenderung menjaga jarak dari pembatas seperti dinding atau jalan, serta menghindari halangan atau objek lain. Hal ini mengakibatkan efek tolak-menolak yang dijelaskan oleh *obstacle effect* seperti pada persamaan 2.5 ini. Efek tolak-menolak yang dihasilkan akan membuat agen menjauhi halangan,

seperti yang diperlihatkan oleh suku  $-\nabla_{\vec{r}_{\alpha i}}$ .

$$\vec{O}_{\alpha i}(\vec{r}_{\alpha i}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha i}} U_{\alpha i}(|\vec{r}_{\alpha i}|) \quad (2.5)$$

Pada persamaan 2.5,  $U_{\alpha i}$  menunjukkan potensial tolak-menolak yang nilainya akan menurun secara eksponensial dengan jarak antara agen  $\alpha$  dan objek  $i$  yang terdekat dengan agen  $\alpha$ , ( $|\vec{r}_{\alpha i}|$ ). Pengurangan eksponensial ini diilustrasikan dalam gambar 2.7 dengan panjang karakteristik  $R = 0.2$  m dan nilai  $U_{\alpha i}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$ .

$$U_{\alpha i}(|\vec{r}_{\alpha i}|) = U_{\alpha i}^0 e^{-\frac{|\vec{r}_{\alpha i}|}{R}} \quad (2.6)$$



**Gambar 2.7** Potensial tolak-menolak  $U_{\alpha i}$  yang dihasilkan oleh objek  $i$  pada agen  $\alpha$  dengan  $R = 0.2$  m dan  $U_{\alpha i}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$  (Capelle, 2018).

### 2.3.3 Territorial Effect

Umumnya pedestrian akan merasa tidak nyaman ketika terdapat pedestrian lain yang tidak dikenal mendekat ke dalam ruang pribadinya. Oleh karena itu pedestrian cenderung menjaga jarak tertentu dari pedestrian lain. Efek tolak-menolak ini dijabarkan pada persamaan 2.7 di bawah sebagai efek teritorial.

$$\vec{T}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha\beta}} V_{\alpha\beta}[b(\vec{r}_{\alpha\beta})] \quad (2.7)$$

Semakin dekat seorang pedestrian dengan orang asing, semakin kuat efek tolakan  $\vec{f}_{\alpha\beta}$  akan terjadi. Efek ini berbanding lurus dengan potensi tolakan  $V_{\alpha\beta}$ , yang serupa

dengan potensi halangan  $U_{\alpha\beta}^0$ . Helbing pada penelitiannya mendefinisikan potensi tolakan sebagai berikut.

$$V_{\alpha\beta}[b(\vec{r}_{\alpha\beta})] = V_{\alpha\beta}^0 e^{-b/\sigma} \quad (2.8)$$

Dalam potensial ini,  $\sigma$  adalah panjang karakteristik untuk potensial teritorial, didefinisikan sebagai  $\sigma = 0.3$  m.  $b$  menyatakan sumbu semi-pendek sebuah ellips yang memperhitungkan jarakn antara agen  $\alpha$  dan agen  $\beta$ ,  $|\vec{r}_{\alpha\beta}|$ , serta kecepatan agen  $\beta$ ,  $\vec{v}_\beta$ . Ketika agen  $\beta$  memiliki kecepatan yang lebih tinggi, ia akan membutuhkan lebih banyak ruang untuk langkah selanjutnya  $s_\beta = v_\beta \Delta t$ , sehingga  $b$  akan bertambah. Jarak antara agen-agen tersebut didefinisikan sebagai  $\vec{r}_{\alpha\beta} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta$ . Sehingga  $b$  dinyatakan sebagai berikut.

$$b = \frac{\sqrt{(|\vec{r}_{\alpha\beta}| + |\vec{r}_{\alpha\beta} - v_\beta \vec{e}_\beta \Delta t|)^2 - (v_\beta \Delta t)^2}}{2} \quad (2.9)$$

Efek teritorial diilustrasikan dalam gambar 2.8. Mulanya, agen-agen terdistribusi dengan rapat satu sama lain pada  $\#t = 1$ . Karena adanya efek teritorial, agen-agen akan bergerak menjauh satu sama lain. Ketika jarak di antara mereka semakin besar, efek teritorial menjadi lebih rendah dan agen-agen mulai bergerak lebih lambat ( $\#t = 1$  hingga  $\#t = 10$ ).

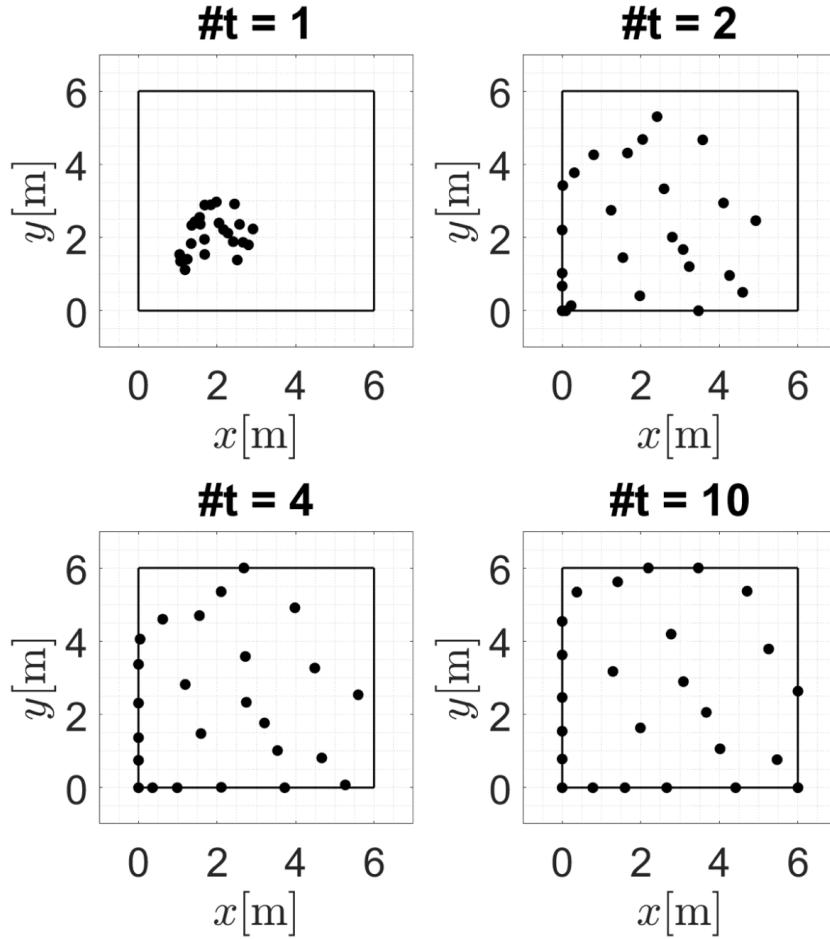
#### 2.3.4 Attractive Effect

Pedestrian juga dapat tertarik pada suatu objek (misalnya hiasan) atau pedestrian lainnya (misanya teman). Helbing menjelaskan efek atraktif seperti pada persamaan berikut.

$$\vec{A}_{\alpha i}(|\vec{r}_{\alpha i}|, t) = -\nabla_{\vec{r}_{\alpha i}} W_{\alpha i}(|\vec{r}_{\alpha i}|, t) \quad (2.10)$$

Dengan  $\vec{r}_{\alpha i} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i$  adalah jarak antara agen  $\alpha$  dengan objek  $i$ . Besarnya efek atraktif  $|\vec{A}_{\alpha i}|$  ini menurun dengan  $t$  ketika agen kehilangan ketertarikan pada objek  $i$ .

Karena efek atraktif ini seringkali diabaikan pada kebanyakan studi, pada penelitian ini nilai efek ini tidak diperhitungkan.



**Gambar 2.8** Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain (Capelle, 2018).

### 2.3.5 Sudut Pandang Efektif

Baik efek teritorial maupun efek atraktif memiliki nilai lebih besar untuk objek yang terlihat di arah gerakan  $\vec{e}_\alpha$  daripada objek yang berada di belakang agen  $\alpha$ . Untuk memperhitungkan perbedaan ini, Helbin memperkenalkan istilah bobot persepsi  $w_\phi$ . Di sini,  $2\phi$  adalah sudut pandang efektif dan  $c_\phi$  adalah faktor bobot untuk situasi di luar sudut pandang efektif, dengan  $0 < c_\phi < 1$  dengan objek di belakang agen akan memiliki nilai kostanta yang semakin kecil. Oleh karena itu,  $w_\phi$  didefinisikan seperti dalam persamaan berikut.

$$w_\phi(\vec{e}, \vec{f}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \vec{e} \cdot \vec{f} \geq |\vec{f}| \cos \phi \\ c_\phi & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.11)$$

Sehingga efek teritorial  $\vec{T}_{\alpha\beta}$  dan efek atraktif  $\vec{A}_{\alpha i}$  akan menjadi seperti berikut.

$$\vec{T}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta) = w_\phi(\vec{e}_\alpha, -\vec{T}_{\alpha\beta}) \vec{T}_{\alpha\beta}(\vec{T}_\alpha - \vec{T}_\beta) \quad (2.12)$$

$$\vec{A}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i, t) = w_\phi(\vec{e}_\alpha, \vec{A}_{\alpha i}) \vec{A}_{\alpha i}(\vec{A}_\alpha - \vec{A}_i, t) \quad (2.13)$$

### 2.3.6 Total Efek

Jumlah dari keempat efek yang telah dijabarkan menghasilkan gerakan suatu agen yang sesuai dengan hukum kedua Newton.

$$\sum \vec{f} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{dm\vec{v}}{dt} \quad (2.14)$$

Helbing dan Mólnar mengasumsikan bahwa semua efek memengaruhi pengambilan keputusan agen ada waktu yang bersamaan. Oleh karena itu, total efek dapat diperoleh dengan menjumlahkan seluruh efek yang ada. Selain itu, terdapat dua asumsi tambahan. Pertama, massa  $m_\alpha$  dari setiap individu agen dapat dianggap konstan. Kedua, jumlah dari keempat efek  $\vec{f}$  terkait dengan gaya  $\vec{F} = m\vec{f}$  sehingga terdapat penyesuaian pada hukum kedua Newton menjadi:

$$\sum \vec{f}_\alpha = \frac{d\vec{f}_\alpha}{dt} \quad (2.15)$$

Selanjutnya, persamaan gerakan untuk agen  $\alpha$  dapat dibuat dengan menjumlahkan semua efek sebagai berikut.

$$\vec{f}_\alpha(t) = \vec{D}_\alpha + \sum_i \vec{O}_{\alpha i} + \sum_\beta \vec{T}_{\alpha\beta} + \sum_i \vec{A}_{\alpha i} \quad (2.16)$$

Kecepatan preferensi agen  $\alpha$ ,  $w_\alpha$ , dihitung dari jumlah semua efek dan fluktuasi opsionalnya. Fluktuasi pada persamaan ini akan mewakili variasi perilaku acak yang mungkin timbul. Fluktuasi acak akan memainkan peran ketika terdapat dua keputusan yang sifatnya setara, misalnya memutuskan apakan akan melewati rintangan ke sisi kiri atau kanan. Dalam simulasi Helbin dan Mólnar, fluktuasi dianggap bernilai 0.

$$\frac{d\vec{w}_\alpha}{dt} = \vec{f}_\alpha(t) + \text{fluktuasi} \quad (2.17)$$

$$\frac{d\vec{w}_\alpha}{dt} = \vec{D}_\alpha(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) + \sum \vec{O}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_B) + \sum \vec{T}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta) + \sum \vec{A}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i, t) \quad (2.18)$$

Kemudian, kecepatan baru yang diinginkan  $\vec{w}_\alpha(t + \Delta t)$  ditentukan dengan menghitung perubahan kecepatan aktual  $\vec{v}_\alpha(t)$  akibat total efek  $\vec{f}_\alpha(t)$ .

$$\vec{w}_\alpha(t + \Delta t) = \vec{f}_\alpha(t)\Delta t + \vec{v}_\alpha(t) \quad (2.19)$$

Posisi agen  $\alpha$  dijelaskan oleh vektor  $\vec{r}_\alpha$ , yang didefinisikan sebagai berikut.

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \vec{v}_\alpha(t) = \vec{w}_\alpha(t)g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{|\vec{w}_\alpha|}\right) \quad (2.20)$$

Pada simulasi ini, setiap agen dibatasi oleh kecepatan maksimum yang diperbolehkan ( $v_\alpha^{max}$ ). Pembatasan ini diterapkan dengan mereduksi kecepatan aktual  $\vec{v}_\alpha$  dari kecepatan preferensi  $\vec{w}_\alpha$ . Di sini, vektor satuan  $\hat{w}_\alpha$  didefinisikan sebagai  $\hat{w}_\alpha = \vec{w}_\alpha/|\vec{w}_\alpha|$ .

$$g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{|\vec{v}_\alpha|}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } |\vec{v}_\alpha| \leq v_\alpha^{max} \\ v_\alpha^{max}/|\vec{v}_\alpha| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.21)$$

Sebagai hasilnya, posisi baru setiap agen  $\alpha$  dihitung untuk setiap iterasi waktu langkah adalah sebagai berikut.

$$\vec{r}_\alpha(t + \Delta t) = \vec{v}_\alpha(t)\Delta t + \vec{r}_\alpha(t) \quad (2.22)$$

## 2.4 Karakteristik Evakuasi

Respon pedestrian dalam menghadapi bahaya bergantung pada masing-masing sifatnya yang dapat dipengaruhi oleh kebiasaan, familiaritas, hubungan sosial, visibilitas, pengalaman individu, pencahayaan dan ukuran jalan, polusi, dan

sebagainya. Ketika pedestrian memutuskan untuk melakukan evakuasi, mereka harus melewati suatu jarak tertentu untuk menuju tempat yang lebih aman atau keluar dari bangunan melalui pintu keluar. Pergerakan pedestrian dapat memengaruhi waktu yang dibutuhkan untuk menyelamatkan diri sehingga tidak dapat diabaikan dalam perencanaan evakuasi (Shen, 2003).

Karakteristik pergerakan pedestrian dan perkiraan waktu evakuasi merupakan bagian penting yang harus dipertimbangkan ketika melakukan kalkulasi. Kepadatan, kecepatan, dan aliran adalah salah satu karakteristik pergerakan yang dimiliki pedestrian. Berikut merupakan penjelasan beberapa karakteristik pergerakan pedestrian (Engineers, 2002).

1. **Kepadatan ( $D$ ):** jumlah pedestrian pada suatu area dengan satuan  $person/m^2$  dan merupakan indikasi derajat keramaian pada rute keluar.
2. **Kecepatan ( $v$ ):** jarak yang ditempuh pedestrian per satuan waktu ( $m/s$ ).
3. **Aliran ( $F$ ):** jumlah orang yang melewati suatu titik referensi per satuan waktu ( $person/s$ ). Terdapat dua jenis aliran sebagai berikut.
  - (a) **Aliran spesifik ( $F_s$ ):** aliran pedestrian yang melewati suatu titik referensi per satuan waktu per satuan lebar efektif. Aliran spesifik dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F_s = v \times D \quad (2.23)$$

Dengan  $v$  adalah kecepatan pergerakan dan  $D$  adalah kepadatan populasi.

- (b) **Aliran terhitung ( $F_c$ ):** perkiraan laju aliran pedestrian yang melewati titik tertentu dalam rute evakuasi. Aliran terhitung dapat dituliskan sebagai berikut.

$$F_c = F_s \times W \quad (2.24)$$

Dengan  $F_s$  adalah aliran spesifik dan  $W$  adalah lebar efektif.

Informasi yang dapat diandalkan terkait laju aliran untuk pergerakan darurat selama evakuasi kehidupan nyata jarang diperoleh karena bahaya yang dapat timbul ketika mengumpulkan informasi tersebut. Oleh karena itu, muncullah metode prediktif yang didasarkan pada observasi pemodelan evakuasi atau manipulasi pergerakan individu (DeCicco, 2019). Berikut merupakan beberapa teori mengenai keterkaitan

antara kepadatan populasi dengan dimensi ruang dan laju pedestrian.

1. Fruin (1971)

Penelitian yang dilakukan Fruin berkaitan dengan aliran pedestrian, termasuk ukuran dan bentuk tubuh pedestrian, antrian, laju aliran dalam kaitan dengan lebar jalur dalam memperkirakan pergerakan di tangga dan permukaan horizontal. Informasi ini digunakan untuk menghasilkan *level of service* yang menggambarkan hubungan antara kepadatan aliran dengan kecepatan pedestrian. Premisnya adalah ketika kepadatan populasi meningkat, kemampuan untuk bergerak akan menurun sehingga menghasilkan *level of service* yang lebih rendah.

2. Predtechenskii and Milinskii (1978)

Predtechenskii dan Milinskii menghasilkan penelitian mengenai aliran populasi yang diperoleh dari 7000 observasi. Temuan mereka didasarkan pada penggunaan grafik aliran/densitas yang dihasilkan dalam konteks jumlah orang di dalam gedung dan lebar lorong. Hal ini terdiri dari menghitung ukuran populasi pada area tertentu sehingga diperoleh nilai densitasnya, kemudian menurunkan kecepatan dan laju aliran dari data densitas yang diperoleh.

$$v = (112D_a^4 - 380D_a^3 + 434D_a^2 - 217D_a + 57)/60 \quad (2.25)$$

$$v_e = v \times (1.49 - 0.36D_a) \quad (2.26)$$

Dengan  $v$  adalah kecepatan berjalan pada kondisi normal ( $m/s$ ) dan  $v_e$  merupakan kecepatan horizontal pada kondisi darurat ( $m/s$ ). Sedangkan  $D_a$  merupakan densitas tanpa dimensi yang diperoleh dari:

$$D_a = \frac{N \times P_h}{A} \quad (2.27)$$

di mana  $N$  adalah total pedestrian,  $P_h$  adalah area yang ditinggali pedestrian, dan  $A$  adalah luas ruangan tempat pedestrian berada (Almeida, Kokkinogenis, & Rossetti, 2012).

Salah satu perbedaan signifikan antara Predtechenskii and Milinskii dengan peneliti lainnya terdapat pada definisi densitas yang berupa luas area yang ditempati oleh individu, sehingga densitasnya memiliki satuan  $m^2/m^2$ . Predtechenskii and Milinskii menjabarkan densitas maksimum yang dapat

dicapai adalah  $0.92 \text{ m}^2/\text{m}^2$ , dengan kata lain 92% kapasitas lantai telah terisi. Pada studinya, Predtechenskii and Milinskii menjelaskan bahwa populasi besar dapat menyebabkan kepadatan yang berlebihan.

3. Nelson and Maclennan (1996)

Maclennan dan Nelson menjelaskan pergerakan keramaian berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Fruin (1971), Predtechenskii and Milinskii (1978), dan Paul (DeCicco, 2019). Penelitian tersebut dilakukan berdasarkan asumsi bahwa kecepatan pedestrian akan bergantung pada densitas populasi. Sebagai hasilnya, aliran populasi akan memengaruhi densitas populasi dan kecepatan pergerakannya. Mereka menyatakan *region of interest* pada kepadatan populasi antara  $0.54 \text{ person}/\text{m}^2$  hingga  $3.8 \text{ person}/\text{m}^2$ , di mana pada kepadatan di bawah  $0.54 \text{ p}/\text{m}^2$  pedestrian dapat mempertahankan kecepatan idealnya, sedangkan pada kepadatan di atas  $3.8 \text{ p}/\text{m}^2$  pedestrian akan kesulitan untuk bergerak. Berikut merupakan persamaan yang menggambarkan keterkaitan antara kecepatan dan densitas.

$$v = k - akD \quad (2.28)$$

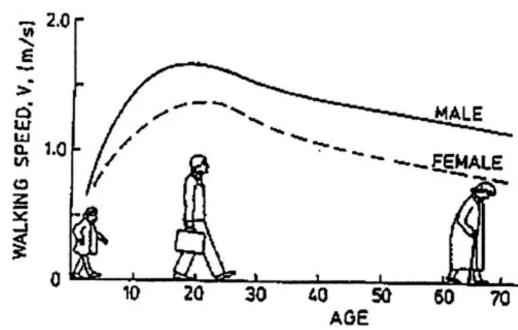
Di mana  $v$  adalah kecepatan pedestrian,  $D$  adalah densitas pedestrian per satuan luas,  $k$  adalah konstanta bergantung kemiringan bidang yang bernilai 1.4 untuk pintu keluar, koridor, dan bidang miring, serta  $a$  bernilai 0.266.

4. Ando et al. (1988)

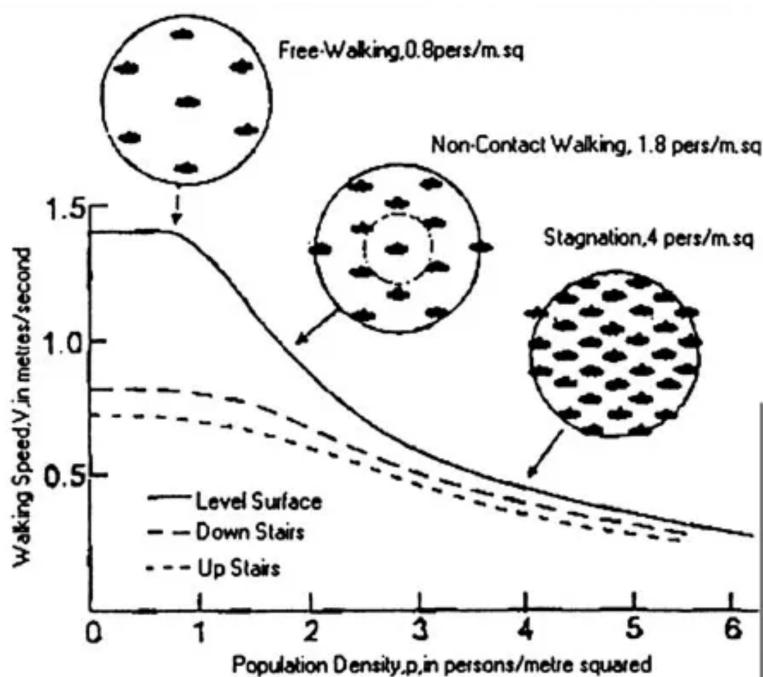
Penelitian yang dilakukan mengenai pergerakan kerumunan pada arah yang umum melalui stasiun kereta dengan populasi tinggi. Mereka memproduksi kecepatan berjalan yang bergantung kepadatan kerumunan yang memiliki hasil serupa dengan yang dilakukan Predtechenskii and Milinskii (1978). Gambar 2.9 menunjukkan korelasi antara kecepatan dengan usia dan jenis kelamin, serta Gambar 2.10 yang menunjukkan pengaruh kepadatan populasi pada kecepatan berjalan pedestrian.

Menurut Ando et al. (1988), kecepatan pria dan wanita akan bergantung pada usianya dengan puncak berada pada rentang usia 20-an. Selain itu, terdapat kecenderungan bahwa kecepatan pria lebih tinggi secara umum dibanding dengan kecepatan berjalan wanita.

Ando et al. (1988) menjelaskan bahwa pada kondisi ekstrim tertentu, kecepatan populasi dapat menyentuh  $15 \text{ orang}/\text{meter}^2$ . Kemudian, stagnansi



**Gambar 2.9** Kecepatan bergantung usia dan jenis kelamin berdasarkan penelitian Ando et al. (1988).



**Gambar 2.10** Kecepatan berjalan berdasarkan kepadatan populasi (Ando et al., 1988).

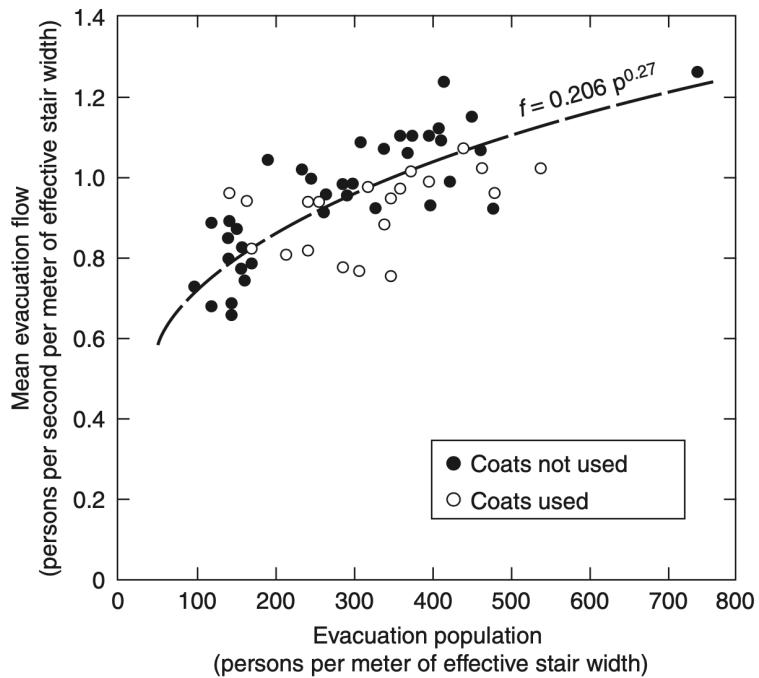
mulai terlihat ketika densitas menyentuh 4 orang/meter<sup>2</sup> dan akan semakin sulit bergerak ketika densitas populasi semakin besar.

Penelitian lain dilakukan oleh Pauls (1987) yang melihat keterkaitan antara kepadatan dengan aliran populasi pada bangunan tinggi. Alih-alih menggunakan model matematika untuk menghitung waktu evakuasi, Pauls mengamati sebanyak mungkin latihan evakuasi di gedung perkantoran tinggi dan kemudian mengembangkan hubungan yang paling menjelaskan apa yang diamati (Shen, 2003). Ia menjelaskan bahwa terdapat lebar efektif yang mengindikasikan lebar yang sesungguhnya dapat digunakan oleh pedestrian ketika melalui suatu jalur dan merupakan efek dari adanya tepian dinding, sehingga lebar jalur perlu dikurangi

sebesar 150 mm dari tepian dinding dan 90 mm dari titik tengah pegangan tangga. Selain itu, ia menggunakan persamaan regresi yang menjelaskan keterkaitan antara aliran evakuasi dengan densitas populasi yang dituliskan dalam persamaan berikut (Pauls, 1987).

$$f = 0.206p^{0.27} \quad (2.29)$$

Di mana  $f$  adalah rata-rata aliran evakuasi dari lebar efektif (orang/meter sekon) dan  $p$  adalah jumlah populasi per lebar efektif tangga yang digunakan (orang/meter). Gambar 2.11 menunjukkan plot grafik rata-rata aliran evakuasi (orang per sekon per meter lebar efektif tangga) terhadap jumlah populasi evakuasi tiap satuan lebar efektif tangga.



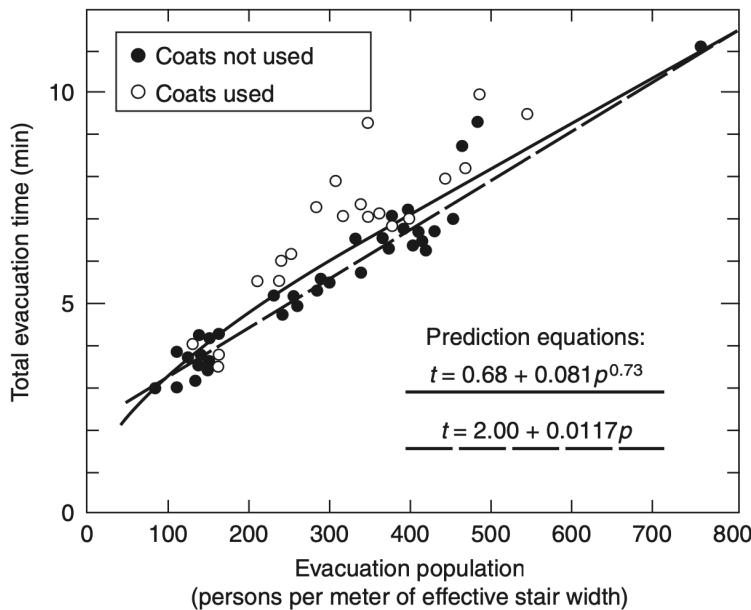
**Gambar 2.11** Pengaruh populasi pada aliran yang turun dari tangga pada evakuasi tidak terkontrol (Engineers, 2002).

Kemudian, untuk memperhitungkan total waktu evakuasi, Pauls menjelaskan dalam persamaan berikut.

$$t = 0.68 + 0.081p^{0.73} \quad (2.30)$$

Dengan  $t$  adalah waktu evakuasi minimum dalam satuan menit untuk

menyelesaikan evakuasi tidak terkontrol yang melewati tangga dan  $p$  adalah jumlah populasi per lebar efektif tangga. Pada Persamaan 2.30, suku pertama merupakan waktu awalan yang dibutuhkan untuk evakuasi hingga setengah rata-ratanya. Gambar 2.12 menunjukkan plot grafik prediksi total waktu evakuasi terhadap aliran populasi pada tangga.



**Gambar 2.12** Total waktu evakuasi yang diprediksi dan diamati untuk bangunan perkantoran tinggi (Engineers, 2002).

IBC menjelaskan aturan ukuran lebar jalan keluar dari tangga dan komponen lain (pintu, gerbang, koridor, gang, dan bidang landai) dengan cara mengalikan beban penghuni dengan kapasitas jalan keluar. Untuk bangunan tanpa alat penyiram (*sprinkler*) dan alarm darurat, faktor kapasitas jalan keluar adalah sebesar 0.2 inci per individu, atau setara dengan 0.00508 meter. Total lebar jalan keluar hasil perhitungan dapat dibagi ke beberapa pintu keluar dengan masing-masing pintu keluar memiliki minimum lebar yang sesuai (Council, 2021).

Untuk menentukan kapasitas jalan keluar dari sebuah pintu, atau seberapa banyak orang yang dapat diakomodasi, dapat dilakukan dengan cara membagi lebar pintu keluar dengan 0.2 inci per individu. Sebagai contoh, pada pintu dengan lebar 32 inci, kapasitas pintu keluar yang dimiliki adalah sebesar  $32 \text{ inci} / 0.2 \text{ inci per individu} = 160 \text{ individu}$ . Minimal lebar yang harus dimiliki oleh pintu keluar adalah sebesar 32 inci atau 0.8128 meter. Dalam beberapa kasus, pada fasilitas kesehatan memerlukan ukuran minimum pintu keluar yang lebih besar (Greene, 2014).

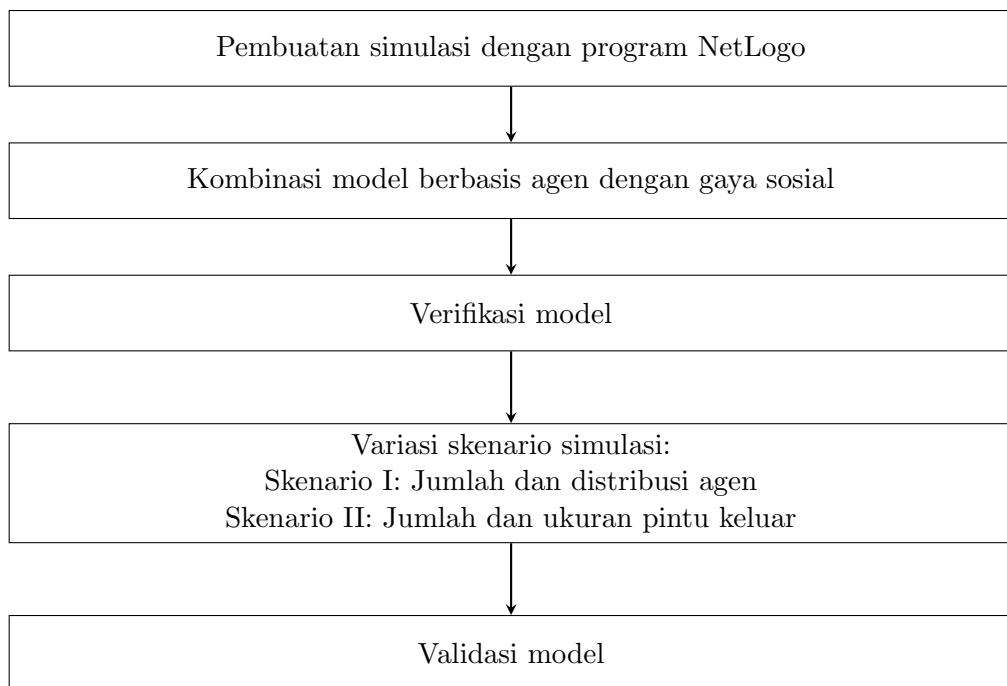
Jumlah pintu keluar yang dibutuhkan dalam sebuah bangunan menurut *International Building Code* (IBC) berbeda bergantung kapasitas atau beban penghuninya. Untuk bangunan dengan beban penghuni rendah dengan maksimal 49 orang, satu pintu keluar dapat digunakan. Untuk ruangan yang lebih besar dengan kapasitas lebih dari 49 orang, dibutuhkan pintu keluar kedua. Sedangkan untuk ruangan dengan kapasitas tinggi, IBC menentukan diperlukan minimal tiga pintu keluar untuk kapasitas 501 hingga 1000 orang dan minimal empat pintu keluar untuk kapasitas lebih dari 1000 orang (Greene, 2014; Council, 2021). Jika dibutuhkan lebih dari satu jalan keluar, sarana jalan keluar harus dikonfigurasi sedemikian rupa sehingga hilangnya satu pintu keluar tidak akan mengurangi kapasitas atau lebar menjadi kurang dari 50 persen dari kapasitas yang dibutuhkan.

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Konstruksi Model

Bagian ini akan menjelaskan berbagai model dan strategi simulasi yang digunakan pada penelitian ini. Secara umum, langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.



**Gambar 3.1** Diagram alir langkah-langkah penelitian.

Penelitian ini dibagi menjadi 4 bagian utama, dimulai dari pembuatan simulasi dengan menggunakan program simulasi NetLogo (Wilensky, 1999) untuk mempersiapkan lingkungan, agen, dan parameter yang akan digunakan. Pendekatan yang digunakan dalam simulasi merupakan kombinasi antara pemodelan berbasis agen dengan model gaya sosial. ABM digunakan untuk merepresentasikan karakteristik dan pengambilan keputusan masing-masing individu, sedangkan SFM digunakan untuk menggambarkan pergerakan agen. Selanjutnya dilakukan verifikasi untuk memastikan bahwa model yang telah diimplementasikan sesuai dengan kenyataan. Simulasi akan dilakukan secara berulang dengan variasi skenario yang memiliki parameter yang berbeda-beda. Skenario pertama merupakan simulasi dengan variasi jumlah dan distribusi usia

agen untuk menggambarkan kecepatan agen melakukan evakuasi berdasarkan properti masing-masing jenis agen. Skenario kedua merupakan simulasi dengan variasi jumlah dan ukuran pintu keluar untuk melihat pengaruh pintu keluar terhadap *bottleneck* pedestrian yang berusaha keluar dari bangunan. Untuk menilai hasil simulasi, pada seluruh skenario dilihat nilai total waktu evakuasi serta rata-rata waktu evakuasi yang dibutuhkan serta dilakukan validasi model berdasarkan uji statistik.

### 3.1.1 Perangkat Lunak

Lingkungan yang digunakan pada penelitian ini akan dibuat dengan menggunakan perangkat lunak NetLogo yang merupakan program simulasi multi-agen dan pemodelan lingkungan yang dikembangkan oleh Uri Wilensky di *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* (CCL) Universitas Northwestern (Wilensky, 1999). NetLogo memiliki aplikasi yang luas dan tidak hanya didesain untuk memodelkan proses evakuasi, namun juga mampu menyimulasikan model dari konsep-konsep dasar. NetLogo dipilih karena memiliki bahasa pemrograman yang mudah dipelajari dan memberikan visualisasi yang baik untuk menggambarkan interaksi ABM.

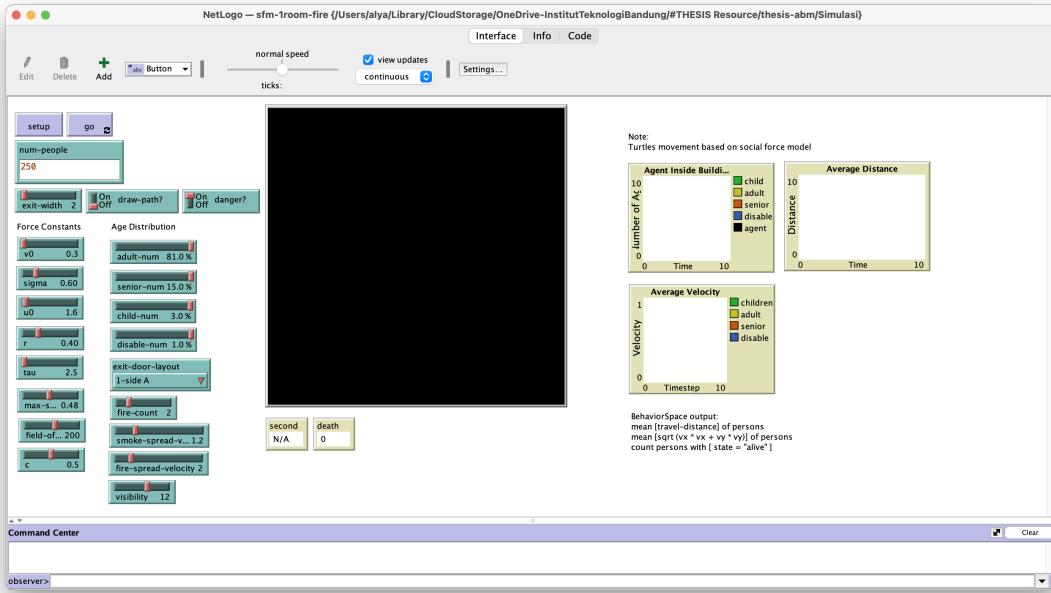
Berikut merupakan terminologi dasar yang sering digunakan di NetLogo.

- *Turtles*: Agen yang dapat bergerak di dalam dunia atau lingkungan yang diciptakan, seringkali digunakan untuk merepresentasikan target utama penelitian. Dalam penelitian ini penggunaan kata agen, pedestrian atau pejalan kaki, dan *turtles* akan digunakan beriringan.
- *Patches*: Serangkaian *grid* atau sel-sel yang membentuk dunia (*world*) dua dimensi dan terutama digunakan untuk mewakili lingkungan fisis dari dunia nyata.
- *Links*: Agen khusus yang memiliki dua ujung untuk menghubungkan dua turtles yang berbeda dan dapat digunakan untuk merepresentasikan hubungan sosial dan fisik.
- *Observer*: Pusat kendali yang mengontrol aktivitas agen dan memberi instruksi selama proses simulasi.

Selain itu, digunakan juga BehaviorSpace yang terintegrasi dengan NetLogo untuk melakukan eksperimen dengan model. BehaviorSpace merupakan salah satu *tools*

### Bab 3. Metodologi Penelitian

---



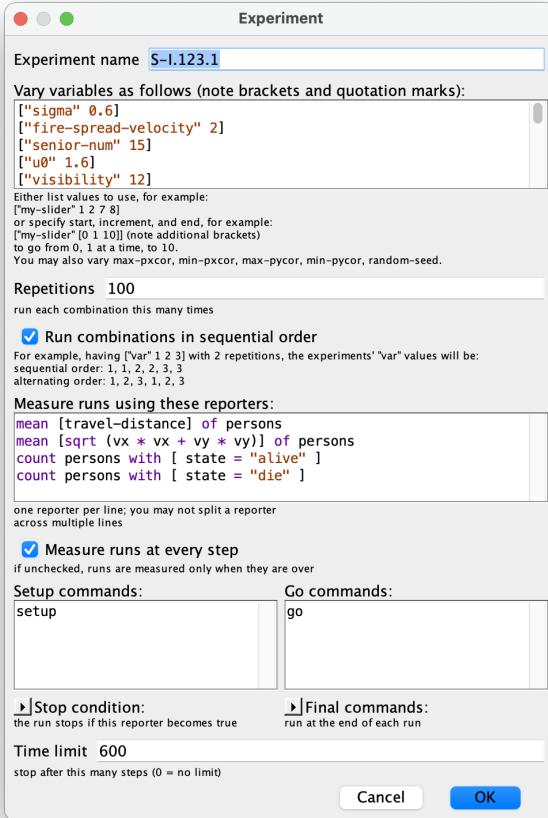
**Gambar 3.2** Tampilan antarmuka program NetLogo.

yang disediakan oleh NetLogo untuk menjalankan suatu model berkali-kali secara sistematis dengan kemampuan untuk memvariasikan pengaturan model berdasarkan nilai parameter-parameternya, serta mencatat hasil dari setiap model yang dijalankan. Proses ini disebut sebagai *parameter sweeping* yang memungkinkan untuk mengeksplorasi berbagai ruang pada model dari kemungkinan perilaku agen dan menentukan kombinasi pengaturan mana yang menyebabkan suatu perilaku yang diinginkan (Railsback & Grimm, 2019).

Dengan mengisi beberapa variabel sederhana yang terdapat pada kotak dialog BehaviorSpace, beberapa fungsi dapat dijalankan sebagai berikut.

1. Membuat skenario dengan cara mengubah nilai dari variabel global model.
2. Menghasilkan ulangan atau *repetition* dari setiap skenario.
3. Mengukur suatu output simulasi berdasarkan perintah yang diberikan.
4. Mengumpulkan hasil dari setiap hasil *running* model.
5. Membatasi lamanya proses simlasi dijalankan.
6. Menjalankan perintah NetLogo pada setiap akhir proses simulasi.

Pada Gambar 3.3, kotak *variables* mendefinisikan berbagai pengaturan parameter



**Gambar 3.3** Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo.

simulasi yang digunakan. Setiap parameter dapat memiliki satu atau lebih nilai yang mana simulasi akan dijalankan dengan variasi nilai yang telah ditetapkan. Terdapat jumlah pengulangan simulasi dan pengukuran yang berupa suatu *command* yang akan mengekstraksi *output* yang diinginkan.

### 3.1.2 Lingkungan dan Waktu

Penelitian ini menggunakan *world* berbentuk persegi panjang dua dimensi yang terdiri dari sel-sel yang berukuran sama. Simulasi ini terdiri dari beberapa susunan ruang yang berbeda bergantung pada skenario yang digunakan. *World* yang digunakan direpresentasikan dalam koordinat kartesian dengan sumbu x dan sumbu y. Masing-masing agen atau *turtles* dapat menempati satu atau berada di antara dua atau lebih sel karena gerakan agen yang kontinu. Agen dapat mengakses informasi mengenai sel tempat mereka berada dan sel sekitarnya. Agen tetangga (*neighbors*) dapat berupa agen yang berada di sekitar sel yang ditempati

agen  $i$ , atau agen yang berada di jarak sesuai dengan karakteristik yang dideklarasikan di dalam simulasi.

Setiap proses simulasi dimulai dengan pengaturan bidang lantai untuk membentuk *world* yang akan digunakan. Pada tahap ini, beberapa struktur dibentuk untuk menggambarkan suatu ruang tempat agen berada. Deskripsi dari beberapa struktur patches berbeda terdapat pada Tabel 3.1 berikut.

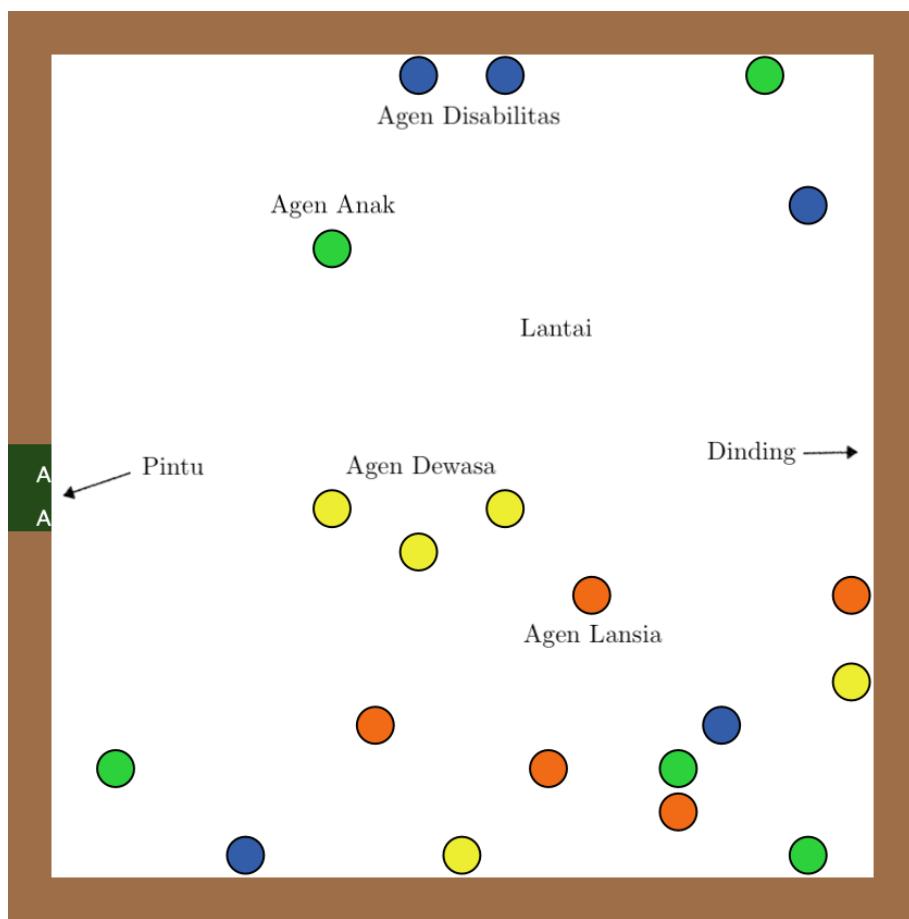
**Tabel 3.1:** Deskripsi *patches* pada simulasi dengan NetLogo.

Struktur	Deskripsi	Warna	Karakteristik
<i>Floor</i>	Tempat agen tersebar dan bergerak	Putih	Dapat ditinggali dan dilewati oleh agen
<i>Walls/Obstacle</i>	<i>Patches</i> yang membatasi ruang gerak agen dan membentuk ruangan	Coklat	Tidak dapat dilewati oleh agen
<i>Doors</i>	<i>Patches</i> yang berlaku sebagai pintu ruangan dan harus dilewati ketika agen berpindah ruangan	Biru muda	Dapat dilewati oleh agen
<i>Exits</i>	Tujuan akhir agen yang berlaku sebagai pintu keluar bangunan	Hijau	Agen yang tiba di <i>patches</i> ini telah berhasil keluar bangunan

Satuan ruang dalam NetLogo berupa *patches* dan satuan waktunya berupa *ticks*. Oleh karena itu, diperlukan konversi dari satuan internasional menjadi satuan *patches* dan *ticks* untuk menentukan nilai parameter kecepatan agen dalam proses simulasi. Untuk menentukan besaran pengali antara satuan internasional dengan satuan NetLogo, dilakukan sebuah simulasi sederhana dengan menggunakan agen tunggal yang berada pada posisi acak di dalam ruangan dan bergerak menuju pintu keluar. Jika tubuh manusia dewasa diasumsikan sebagai sebuah lingkaran dengan diameter 0.5 meter yang merepresentasikan panjang bahu, maka rasio waktu yang diperoleh adalah 1 detik akan setara dengan 5 tick pada NetLogo.

### 3.1.3 Properti

Agen pada NetLogo disebut *turtle* dan dapat dibagi menjadi beberapa *breed* atau jenis agennya. Pada simulasi ini, jenis agen yang digunakan adalah **persons** yang merepresentasikan pedestrian yang terlibat dalam proses evakuasi. Agen akan tersusun dari komposisi kategori usia yang berbeda, yaitu anak, dewasa, lansia, dan disabilitas. Masing-masing kategori agen memiliki nilai parameter yang



**Gambar 3.4** Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi.

berbeda-beda yang akan memengaruhi gerakannya dalam proses simulasi. Deskripsi mengenai kategori agen dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut dan ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar 3.4.

**Tabel 3.2:** Jenis agen dalam simulasi evakuasi.

Agen	Warna	Deskripsi
Child	Hijau	Mewakili anak-anak dengan rentang usia < 18 tahun
Adult	Kuning	Dewasa normal dengan rentang usia 18 - 50 tahun
Senior	Oranye	Manusia lanjut usia dengan rentang usia > 50 tahun
Disable	Biru	Pedestrian dengan disabilitas

Berdasarkan Coffas et al. (2022), berikut merupakan kecepatan rata-rata yang dimiliki oleh pedestrian berdasarkan kategori usianya. Sesuai dengan skala NetLogo yang telah ditetapkan yaitu satu *patch* setara dengan 0.5 m dan satu tick setara dengan 0.2 s, maka perlu dilakukan konversi kecepatan dalam satuan internasional menjadi satuan NetLogo. Tabel 3.3 menunjukkan nilai kecepatan

agen berdasarkan kategori usianya.

**Tabel 3.3:** Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia.

Kategori	Kecepatan SI ( $m/s$ )	Kecepatan NetLogo ( $patch/tick$ )
Anak	$0.90 \pm 0.30$	$0.36 \pm 0.12$
Dewasa	$1.25 \pm 0.30$	$0.5 \pm 0.12$
Lansia	$0.8 \pm 0.30$	$0.32 \pm 0.12$
Disabilitas	$0.79 \pm 0.32$	$0.316 \pm 0.128$

Untuk membantu agen `persons` agar dapat memiliki perilaku yang menyerupai manusia atau pedestrian di dunia nyata ketika melakukan evakuasi, beberapa properti ditambahkan dalam simulasi, sebagai berikut dalam tabel 3.4.

Sebagai hasil dari pembagian permukaan *patch* menjadi area kecil, elemen lainnya yang diwakili dalam model ini akan diskalakan untuk menyesuaikan dengan pengali dari nilai-nilai ini. Dalam penelitian ini, setiap *patch* memiliki beberapa properti atau karakteristik yang membedakan fungsi suatu *patch* dengan *patch* lainnya dan akan memengaruhi perilaku agen dalam pergerakannya menuju tujuan. Daftar properti yang dimiliki oleh *patch* dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut.

### 3.1.4 Perilaku Agen

Seperti yang telah disebutkan pada Tabel 2.4, perilaku pedestrian selama proses evakuasi darurat merupakan hasil dari proses hierarki pengambilan keputusan yang termasuk dalam tingkat strategis, taktis, dan operasionalnya. Gambar 3.5 menunjukkan diagram alir proses hierarki pengambilan keputusan dari simulasi evakuasi berbasis agen yang akan digunakan pada penelitian ini.

Ketika proses simulasi dilakukan, seluruh agen akan menyadari bahwa mereka sedang berada dalam kondisi darurat. Ketika dihadapkan dengan keadaan seperti itu, secara natural agen akan memutuskan menuju tempat yang lebih aman, dalam hal ini keluar dari bangunan. Kedua tahapan ini merupakan proses pengambilan keputusan pada tingkat strategis di mana agen mengambil dan mengartikan informasi dari lingkungannya serta memutuskan untuk memilih pintu keluar yang akan digunakan (Tong & Bode, 2023). Setelah itu agen akan memilih rute untuk mendekati target, yang dalam simulasi ini didorong oleh *driving effect*. Tahapan ini berada pada tingkat taktis, di mana agen menentukan rute yang dipilih berdasarkan preferensinya. Selanjutnya agen akan menghindari halangan atau agen lain dengan *obstacle effect* dan *territorial effect* pada model gaya sosial.

**Tabel 3.4:** Properti persons dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini.

Variabel	Nilai	Deskripsi
agent-type	child / adult / senior / disable	Kategori usia agen.
color	lime / yellow / orange / blue	Merepresentasikan kategori usia agen. <i>Lime</i> untuk agen anak, <i>yellow</i> agen dewasa, <i>orange</i> agen lansia, dan <i>blue</i> untuk agen dengan disabilitas.
xcor dan ycor	[−20, 20]	Koordinat posisi agen di dalam lingkungan.
travel-distance	$\mathbb{R}_+$	Menyimpan jarak yang ditempuh agen dari posisi awal menuju posisi saat ini. Pada awal simulasi bernilai 0 untuk seluruh agen. Pada akhir simulasi, <b>travel-distance</b> menyajikan total jarak yang telah ditempuh agen selama proses simulasi.
init-direction	[0,360]	Sudut arah tuju agen pada saat inisialisasi simulasi.
vx dan vy	sin init-direction dan cos init-direction	Vektor kecepatan aktual agen. Nilainya akan terus diperbarui seiring dengan pergerakan agen pada setiap <i>timestep</i> .
desired-direction	[0, 360]	Sudut hadap agen terhadap pintu keluar.
driving-forcex dan driving-forcey	$\mathbb{R}$	Efek penggerak yang memiliki gaya tarik antara agen dengan tujuannya (pintu keluar).
obstacle-forcex dan obstacle-forcey	$\mathbb{R}$	Efek halangan yang memiliki gaya tolak-menolak antara agen dengan objek halangan.
territorial-forcex dan territorial-forcey	$\mathbb{R}$	Efek territorial yang memiliki gaya tolak-menolak antara agen dengan agen lainnya.
max-speed	0.36 + <b>random-float</b> 0.24 - 0.12 / 0.5 + <b>random-float</b> 0.24 - 0.12 / 0.32 + <b>random-float</b> 0.24 - 0.12 / 0.316 + <b>random-float</b> 0.256 - 0.128	Kecepatan ideal yang ingin dicapai oleh agen mengacu pada Tabel 3.3. Angka setelah <b>random-float</b> menunjukkan standar deviasi. Masing-masing agen akan memperoleh <b>max-speed</b> yang berbeda akibat adanya nilai standar deviasi acak yang dijumlahkan dari kecepatan ideal acuan.

Tahapan ini berada pada tingkat operasional di mana agen akan berusaha menghindari halangan agar tidak berbenturan dengan objek lain. Agen akan secara rutin mengecek apakah sudah berada di tempat yang lebih aman untuk

**Tabel 3.5:** Properti *patch* dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini.

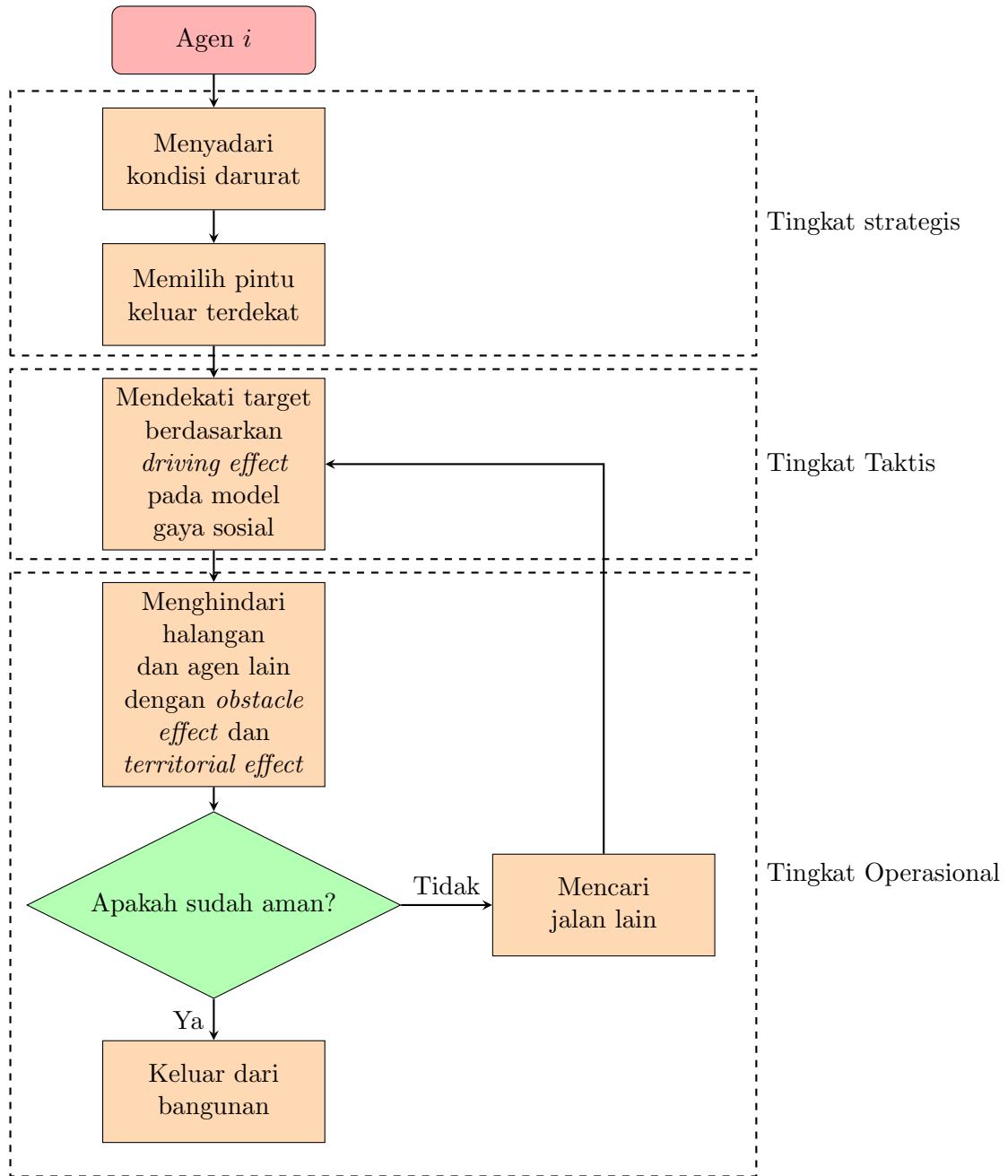
Variabel	Nilai	Deskripsi
pcolor	white / brown / green - 3	pcolor menentukan warna pada tampilan lingkungan simulasi. <i>Patch</i> dengan nilai <i>white</i> digunakan untuk merepresentasikan lantai yang dapat ditempati oleh agen, <i>patch</i> dengan nilai pcolor <i>brown</i> merepresentasikan dinding yang tidak dapat dihuni oleh agen dan berlaku sebagai penghalang, sedangkan pcolor bernilai <i>green</i> - 3 menunjukkan pintu keluar yang dituju oleh agen.
name	floor / wall / door	name mengindikasikan apakah <i>patch</i> merupakan bagian dari lantai, dinding, dan pintu.
patch-id	0 / -1 / 1	patch-id mewakili masing-masing jenis <i>patch</i> . Nilai 0 untuk lantai, -1 untuk dinding, dan 1 untuk pintu keluar.
plabel	A / B / C / D	plabel mengindikasikan indeks pintu keluar yang digunakan. A untuk pintu keluar pada sisi kiri, B untuk pintu keluar sisi atas, C untuk pintu keluar sisi kanan, dan D untuk pintu keluar sisi bawah.

mengakhiri proses pengambilan keputusan pada simulasi.

Pergerakan pedestrian disimulasikan menggunakan model gaya sosial berdasarkan teori yang telah dipaparkan pada Bab 2. Pada model gaya sosial, kecepatan ideal (*desired speed*) menunjukkan kecepatan yang ingin dicapai oleh pedestrian secepat mungkin, namun bukan berarti pedestrian yang memiliki kecepatan ideal yang sama akan memiliki kecepatan aktual yang sama. Dalam simulasi ini, kecepatan masing-masing pedestrian bervariasi seiring waktu dan kondisi yang ada. Kecepatan ideal yang berbeda akan memastikan adanya variasi kecepatan maksimum yang berbeda dari waktu ke waktu untuk mencerminkan karakteristik pergerakan pedestrian.

Salah satu keterbatasan menggunakan model gaya sosial adalah kemungkinan tidak dapat mencerminkan perilaku pedestrian yang realistik. Sebagai contoh, kurangnya mekanisme pelambatan diri dalam model gaya sosial dapat menyebabkan pedestrian yang disimulasikan untuk terus bergerak mendorong pejalan kaki lainnya, serta kurangnya mekanisme penghindaran tabrakan membuat

**Gambar 3.5** Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan.



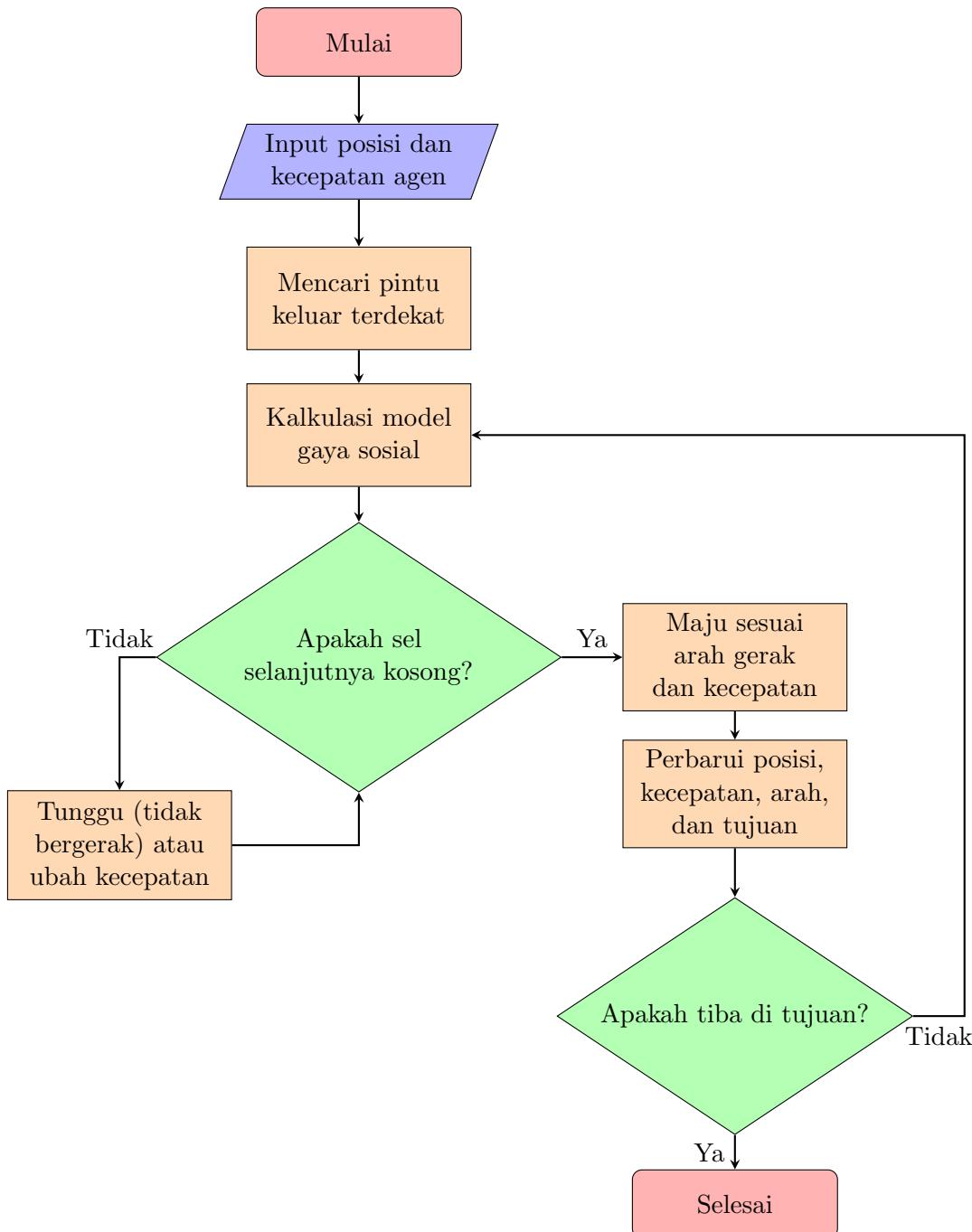
dinamika pedestrian menjadi kurang realistik (Tong & Bode, 2023).

## 3.2 Simulasi

### 3.2.1 Diagram Alir

Secara umum, langkah-langkah pergerakan agen ketika proses simulasi evakuasi dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.6.

**Gambar 3.6** Diagram alir simulasi evakuasi pedestrian.



Masing-masing pedestrian akan memiliki properti berupa koordinat posisi dalam ruangan dan kecepatan ideal yang diinginkan. Nilai dari properti ini akan sangat bergantung pada kategori usia yang dimiliki oleh agen, apakah agen termasuk dalam kategori usia anak, dewasa, lansia, ataukah disabilitas.

Untuk menentukan pintu keluar terdekat, agen akan membandingkan nilai *patch-id* dari seluruh *patch* yang ada di ruangan dan mencari *patch-id* yang bernilai 1. Proses ini menyerupai ketika seseorang melihat sekelilingnya dan mengidentifikasi struktur bangunan untuk mengetahui arah pintu keluar. Kemudian agen akan membandingkan jarak dari masing-masing *patch* yang memiliki properti pintu dan memilih *patch* yang memiliki jarak terendah.

Setelah memperoleh satu pintu keluar terdekat sebagai tujuan, agen akan mulai menghitung gaya-gaya sosial yang ada, seperti *driving effect* untuk mendekat ke tujuan, *obstacle effect* untuk menghindari halangan, serta *territorial effect* untuk menghindari pedestrian lainnya. Kalkulasi gaya sosial ini akan menghasilkan kecepatan dan arah gerak yang akan diambil oleh agen. Selanjutnya agen akan memeriksa apakah sel tujuannya tersebut kosong dan tidak ada agen lain yang menempati. Jika sel selanjutnya tidak kosong, agen akan menunggu atau mengubah arah geraknya. Jika sel tujuannya kosong, agen akan bergerak menempati sel tersebut dan memperbarui posisi, kecepatan, arah, dan tujuannya. Kemudian agen akan memeriksa apakah sudah berada di pintu keluar tujuannya atau belum. Jika belum, agen akan kembali menghitung gaya sosial untuk menentukan langkah selanjutnya. Jika agen sudah tiba di pintu keluar, agen akan menghilang dari tampilan NetLogo dan dianggap telah berhasil keluar dari bangunan.

### 3.2.2 Parameter

Model evakuasi pedestrian dengan mengembangkan simulasi berbasis agen dan model gaya sosial seperti yang telah dijabarkan secara teori pada Bab II disimulasikan dengan menggunakan komputer untuk pedestrian yang saling berinteraksi ketika melakukan evakuasi. Helbing and Molnár (1995) memperkenalkan beberapa nilai parameter model gaya sosial yang dipilih berdasarkan kompatibilitas dengan data empiris, seperti yang terdapat pada Tabel 3.6 berikut.

Pada simulasi, parameter-parameter ini diatur menggunakan *slider* sebelum proses simulasi dimulai. Konversi antar satuan internasional dan satuan NetLogo diperlukan berdasarkan asumsi yang telah ditetapkan yaitu 1 meter setara dengan

**Tabel 3.6:** Nilai parameter model gaya sosial.

Parameter Model	Nilai Satuan Internasional	Konversi Satuan Netlogo
$v^0$	$1.34 m s^{-1}$	0.5 patch/tick
$v_{\alpha}^{max}$	$1.3 \cdot v_{\alpha}^0$	0.65 patch/tick
$V_{\alpha\beta}^0$	$2.1 m^2/s^2$	0.336 patch <sup>2</sup> /tick <sup>2</sup>
$\sigma$	$0.3m$	0.6 patch
$U_{\alpha\beta}^0$	$10 m^2/s^2$	1.6 patch <sup>2</sup> /tick <sup>2</sup>
$R$	$0.2m$	0.4 patch
$\tau_{\alpha}$	$0.5s$	2.5 tick
$2\phi$	200	200
$c$	0.5	0.5

2 patches dan 1 detik bernilai 5 ticks, sehingga nilai parameter model gaya sosial dalam satuan NetLogo dapat dilihat pada Tabel 3.6 pada kolom Konversi Satuan NetLogo serta penjelasan masing-masing parameter dan rentang nilai yang dapat digunakan pada Tabel 3.7.

### 3.2.3 Skenario

Proses simulasi evakuasi dianggap telah selesai ketika seluruh agen berhasil dievakuasi menuju tempat yang lebih aman. Secara umum, area yang aman merupakan lokasi yang tidak terkena atau terpengaruh oleh adanya bahaya atau bencana. Pada penelitian ini, area yang aman diasumsikan sebagai lokasi yang berada di luar gedung. Sehingga parameter simulasi evakuasi telah berakhir adalah ketika seluruh agen meninggalkan bangunan. Seluruh proses evakuasi pada simulasi ini diasumsikan dilakukan secara individu yang memilih pintu keluar terdekat, artinya masing-masing agen yang terdapat pada proses simulasi tidak memiliki relasi dan tidak mengenal satu sama lainnya.

### Variasi Densitas Populasi

Skenario pertama melihat perbedaan waktu evakuasi ketika jumlah populasi divariasikan berdasarkan luas lingkungan yang digunakan. Distribusi usia yang digunakan adalah 81.0% merupakan agen dewasa, 15.0% merupakan agen lansia, 3.0% adalah agen berusia anak, dan 1.0% adalah agen dengan disabilitas yang mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Cotfas et al. (2022).

**Tabel 3.7:** Penjelasan konstanta model gaya sosial.

Parameter	Konstanta	Nilai	Deskripsi
v0	$V_{\alpha\beta}^0$	[0, 10]	Potensial tolak menolak antara agen dengan agen lain yang terdapat pada efek teritorial.
sigma	$\sigma$	[0, 2]	Panjang karakteristik untuk potensial tolak menolak pada efek teritorial.
u0	$U_{\alpha\beta}^0$	[0, 20]	Potensial tolak menolak antara agen dengan objek lain (halangan) yang terdapat pada efek halangan.
r	$R$	[0, 1]	Panjang karakteristik pada efek halangan.
tau	$\tau_\alpha$	[0, 30]	Waktu relaksasi yang memodulasi seberapa cepat seorang agen akan mencapai kecepatan idealnya. Semakin kecil nilainya, agen akan bersikap lebih agresif.
max-speed	$v_\alpha^0$	[0, 1.44]	Kecepatan pergerakan agen. Masing-masing distribusi usia agen memiliki kecepatan berjalan sesuai dengan Tabel 3.3, pada slider digunakan kecepatan berlari manusia normal sebesar 13 km/h yang jika dikonversi akan menjadi 1.44 patch/tick.
field-of-view	$2\phi$	[0, 360]	Sudut pandang efektif yang menunjukkan sudut pandangan agen.
c	$c_\phi$	[0, 1]	Faktor bobot untuk situasi di luar sudut pandang efektif, di mana objek di belakang agen akan memiliki nilai konstanta yang semakin kecil.

### Variasi Tata Letak Pintu

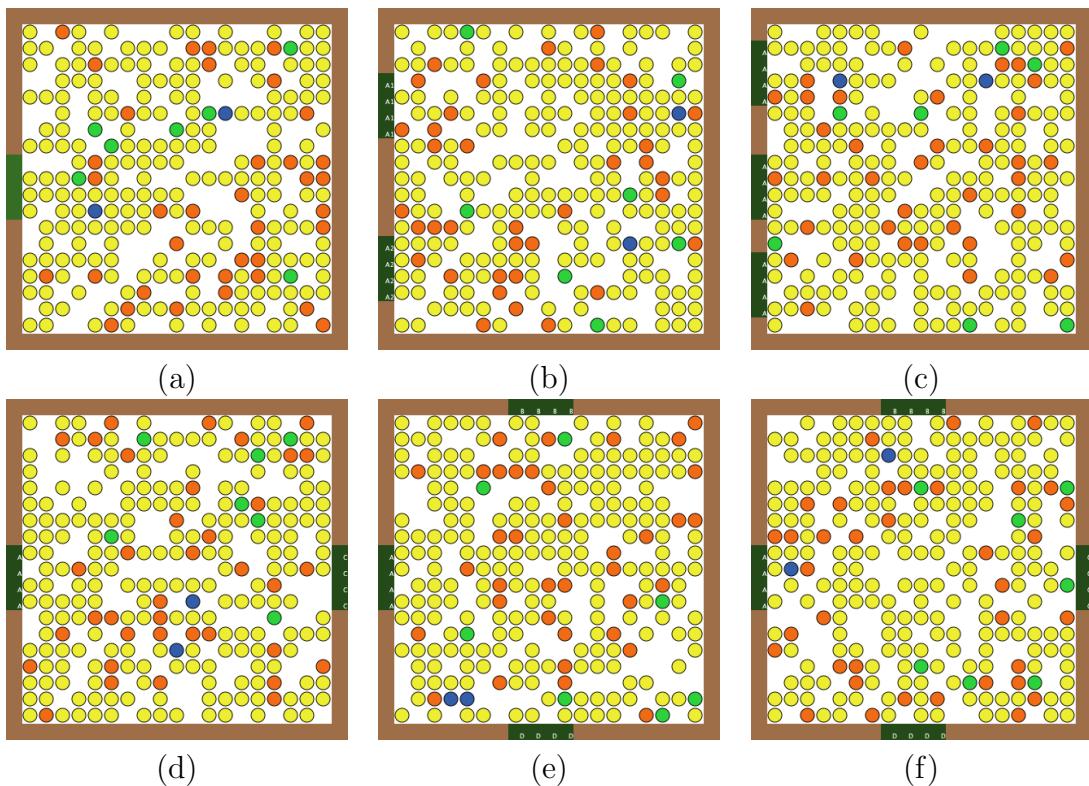
Skenario kedua melihat pengaruh ukuran, jumlah, dan lokasi pintu keluar terhadap total waktu evakuasi. Denah bangunan yang akan digunakan adalah bangunan dengan satu ruangan berukuran  $21 \times 21$  *patch* yang merepresentasikan ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$ . Keberadaan pintu keluar pada bangunan divariasi seperti pada Tabel 3.8 berikut.

Skenario S-II.1. hingga S-II.3. mengasumsikan bahwa pintu keluar hanya terdapat pada salah satu sisi dinding saja, yaitu sisi dinding kiri (A). Pada skenario tersebut, ukuran lebar pintu divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap waktu variasi, apakah semakin lebar ukuran pintu akan mempercepat proses evakuasi.

**Tabel 3.8:** Variasi pintu keluar.

Skenario	Denah
S-II.1.	1 buah sisi A
S-II.2.	2 buah sisi A
S-II.3.	3 buah sisi A
S-II.4.	1 buah sisi A dan C
S-II.5.	1 buah sisi A, B, dan D
S-II.6.	1 buah sisi A, B, C, dan D

Skenario S-II.4. hingga S-II.6. merupakan variasi jumlah dan lokasi pintu keluar pada sisi lainnya. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah penambahan pintu keluar pada lokasi yang berbeda dapat memberikan pengaruh pada total waktu evakuasi dan jarak tempuh yang harus diambil oleh agen ketika melakukan evakuasi.



**Gambar 3.7** Denah bangunan yang digunakan pada variasi pintu keluar: a) bangunan dengan satu pintu keluar di sisi A, b) bangunan dengan dua pintu keluar di sisi A, c) bangunan dengan tiga pintu keluar di sisi A, d) bangunan dengan dua pintu keluar masing-masing di sisi A dan C, e) bangunan dengan tiga pintu masing-masing di sisi A, B, dan D, serta f) bangunan dengan empat pintu masing-masing di sisi A, B, C, dan D.

## BAB 4

# HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan simulasi yang diimplementasikan menggunakan NetLogo dengan agen **persons** merepresentasikan pedestrian yang tersebar secara acak di lingkungan berupa ruangan persegi 2D.

### 4.1 Verifikasi

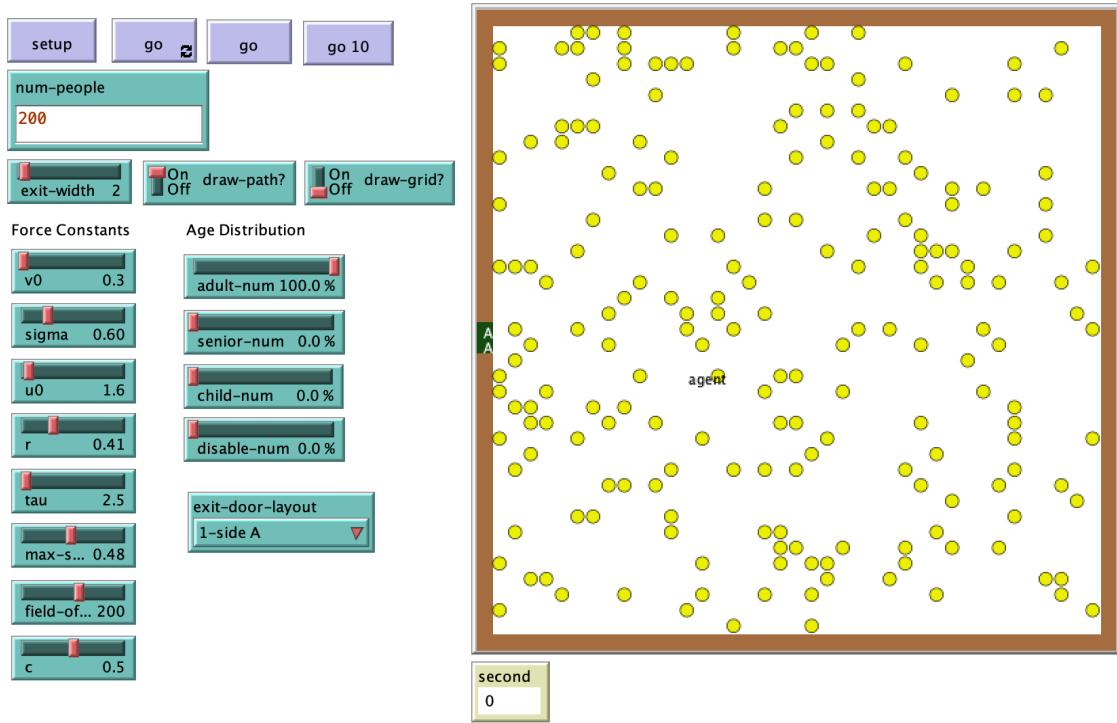
Proses verifikasi dilakukan pada ruangan berukuran  $41 \times 41$  dengan masing-masing *patch* berukuran  $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ .

Mulanya, kesesuaian model dengan kenyataan diverifikasi dengan cara menjalankan beberapa simulasi dengan variasi parameter-parameter yang didefinisikan pada model. Perubahan nilai dapat dilakukan untuk parameter yang berpengaruh pada model gaya sosial, serta parameter simulasi seperti jumlah agen, distribusi usia, dan ukuran pintu keluar. Helbing and Molnár (1995) telah mendefinisikan beberapa nilai parameter model gaya sosial, seperti yang telah dijabarkan pada Bab 3. Berikut merupakan hasil simulasi dengan jumlah agen 200 dan ukuran pintu keluar 2 *patch*.

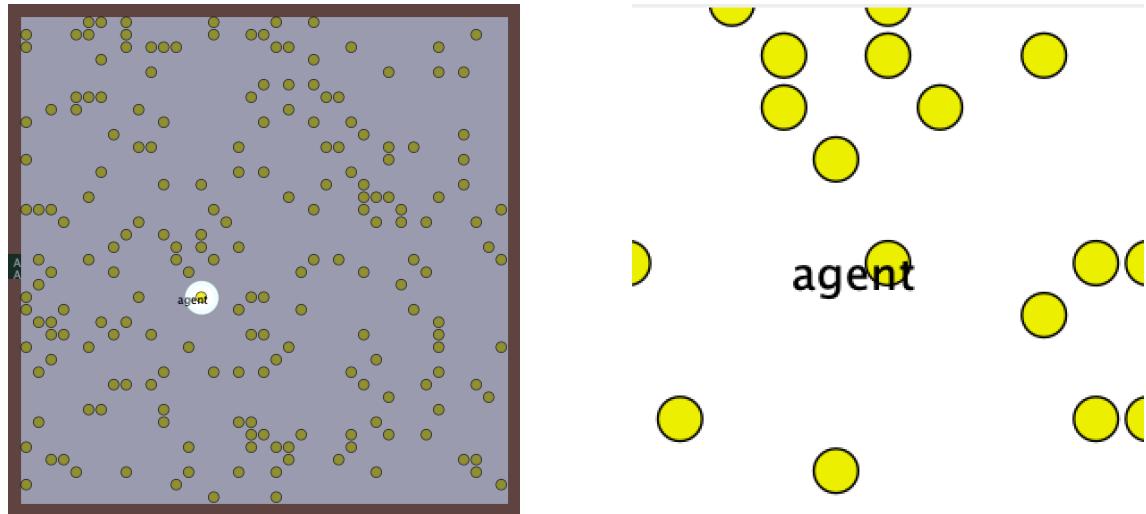
Ketika tombol *setup* ditekan, NetLogo akan mulai memproses simulasi dengan cara membangun lingkungan dan meletakkan agen secara tersebar dan acak di dalam ruangan berdasarkan properti dan aturan yang telah didefinisikan. Pada saat ini, agen hanya memiliki kecepatan ideal yang diinginkan dan belum mengarah pada pintu keluar terdekat. Ketika tombol *go* ditekan, setiap agen akan menghitung keempat efek gaya sosial yang akan menentukan arah geraknya dan memasukkan nilainya pada properti agen **persons**.

Pada awal simulasi, variabel-variabel yang berkaitan dengan model gaya sosial bernilai 0 karena agen belum melakukan kalkulasi model gaya sosial untuk menentukan arah geraknya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada saat  $t = 1\text{ tick}$ , agen telah melakukan kalkulasi model gaya sosial yang memberikan kecepatan dan arah gerak sehingga posisi agen akan bergeser seperti tampak pada Gambar 4.4.

Properti agen ini akan terus diperbarui hingga agen berhasil menuju tujuannya atau dengan kata lain berhasil keluar dari bangunan. Pada Gambar 4.5, tampak



**Gambar 4.1** Tampilan NetLogo untuk simulasi evakuasi 200 agen dengan parameter mengacu pada penelitian Helbing and Molnár (1995).



**Gambar 4.2** Posisi agen person 109 pada saat  $t = 0$  tick.

perbedaan posisi dan jejak lintasan yang telah dilalui agen ketika menuju pintu keluar. Jejak lintasan terpadat berpusat di sekitar pintu keluar karena *patch* di sekitar pintu keluar akan selalu dilalui oleh agen dalam perjalanannya. Patch yang memiliki lintasan agen terbanyak ini juga bisa disebut sebagai *hotspot*. Pada dunia nyata, *hotspot* biasa terjadi di bagian-bagian ruangan yang sering dilalui atau di

## Bab 4. Hasil Simulasi

---

who	109
color	45
heading	198
xcor	-5
ycor	-3
shape	"circle3"
label	"agent"
label-color	0
breed	persons
hidden?	false
size	1
pen-size	1
pen-mode	"up"
moved?	0
agent-type	"adult"
travel-distance	0

vx	0.5150380749100542
vy	0.8571673007021123
desired-direction	0
driving-forcex	0
driving-forcey	0
obstacle-forcex	0
obstacle-forcey	0
territorial-forcex	0
territorial-forcey	0
max-speed	0.49457275231986086

**Gambar 4.3** Nilai properti yang dimiliki oleh agen person 109 pada saat  $t = 0$  tick.

who	109
color	45
heading	198
xcor	-4.89814972290217
ycor	-2.5160281739684245
shape	"circle3"
label	"agent"
label-color	0
breed	persons
hidden?	false
size	1
pen-size	1
pen-mode	"down"
moved?	0
agent-type	"adult"
travel-distance	0.49457275231986086

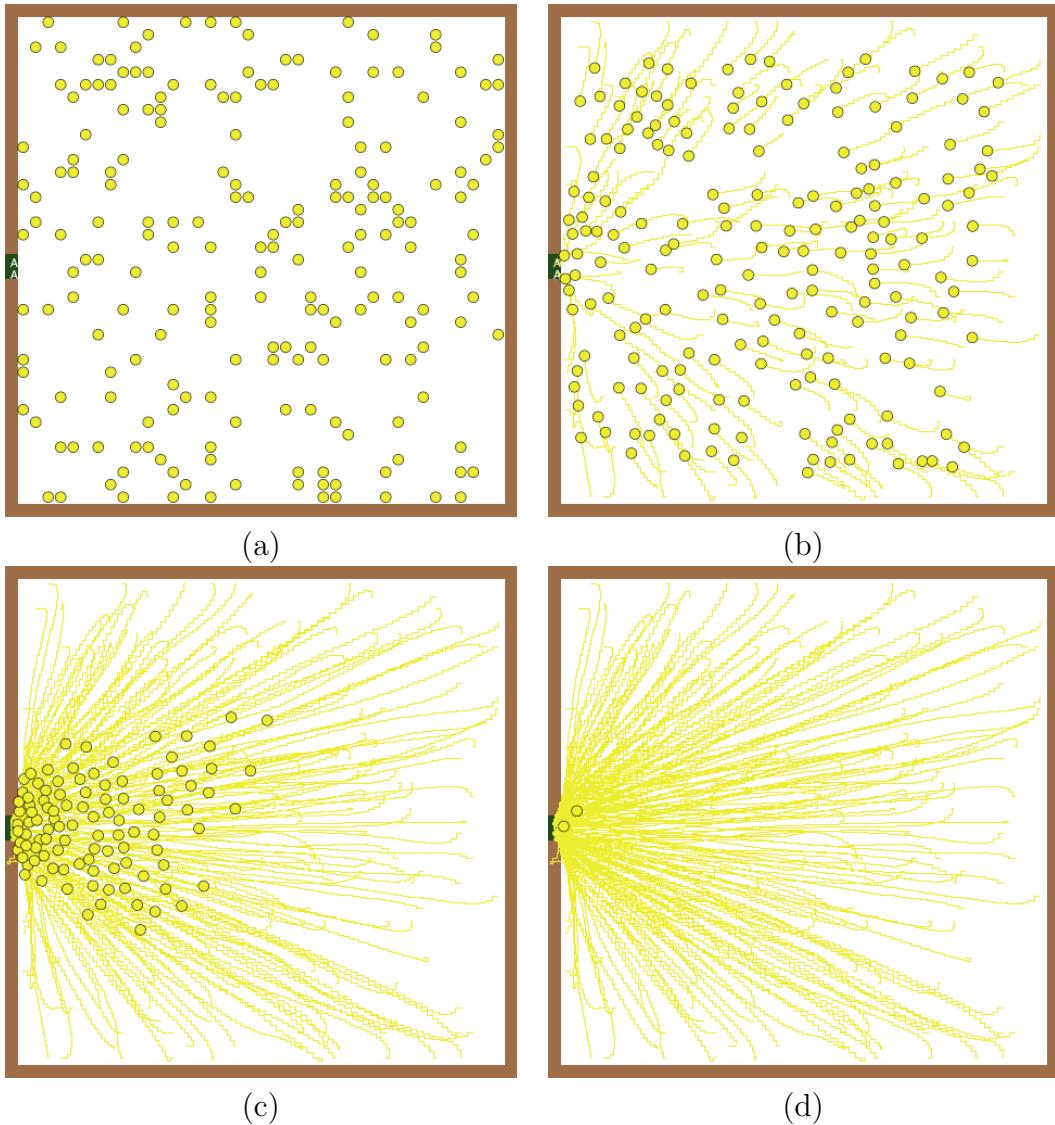
vx	0.10185027709782994
vy	0.4839718260315756
desired-direction	277.59464336859145
driving-forcex	-0.40210895437076105
driving-forcey	-0.3167210903599463
obstacle-forcex	1.0340390689975017E-15
obstacle-forcey	4.978095293182652E-17
territorial-forcex	-2.1954509402507093E-4
territorial-forcey	-0.004873204614401087
max-speed	0.49457275231986086

**Gambar 4.4** Nilai properti yang dimiliki oleh agen person 109 pada saat  $t = 1$  tick.

lokasi yang memiliki objek yang menarik minat pedestrian.

Selanjutnya, ketika parameter model gaya sosial diubah nilainya, maka akan berpengaruh terhadap perilaku agen ketika melakukan evakuasi.

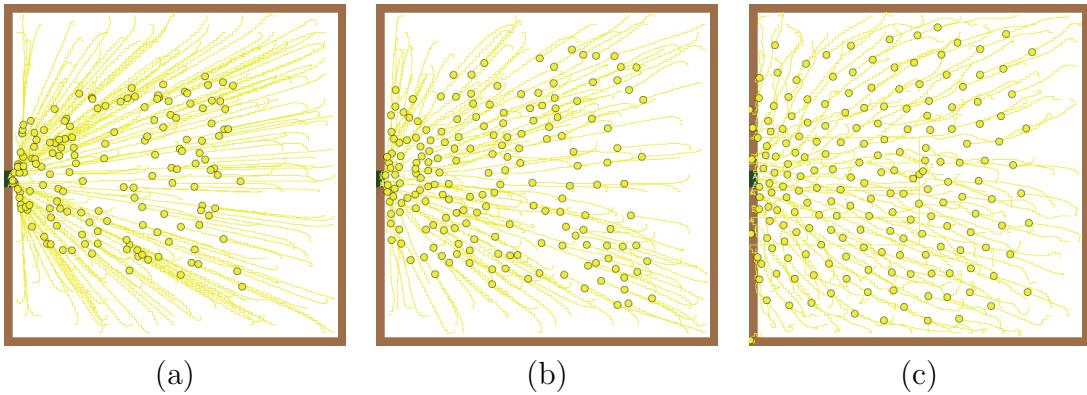
Parameter  $V_\alpha^0 \beta$  atau  $v_0$  merupakan potensial tolak menolak antara agen dengan agen lain. Semakin besar nilainya, maka jarak yang tercipta antaragen akan semakin besar. Namun nilai  $v_0$  yang terlalu kecil akan membuat agen kehilangan ruang personalnya dan tumpang tindih dengan agen lainnya. Parameter ini perlu



**Gambar 4.5** Evakuasi 200 agen dari bangunan dengan nilai parameter mengacu pada penelitian Helbing and Molnár (1995): a)  $t = 0$  tick, b)  $t = 10$  tick, c)  $t = 50$  tick, d)  $t = 100$  tick.

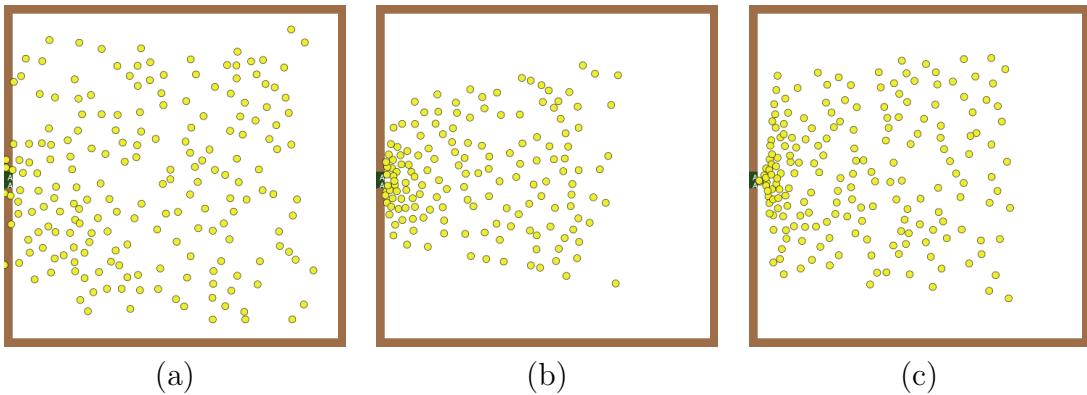
diatur agar tidak bernilai terlalu besar maupun terlalu kecil supaya dapat merepresentasikan kenyataan. Begitu pula dengan  $\sigma$  atau **sigma** yang merupakan panjang karakteristik untuk potensial tolak menolak pada efek teritorial.

Pada efek halangan (*obstacle effect*), terdapat parameter  $U_\alpha^0 \beta$  atau  $u_0$  yang merupakan potensial tolak menolak antara agen dengan objek lain. Semakin besar nilainya, maka akan semakin besar jarak yang tercipta antara objek halangan dengan agen. Pada simulasi, dapat terlihat perbedaan perilaku agen ketika nilai  $u_0$  terlalu kecil atau terlalu besar. Dapat dilihat pada Gambar 4.7, ketika nilai  $u_0$  terlalu kecil, agen akan dapat berada di atas dinding yang berlaku sebagai



**Gambar 4.6** Perbandingan perilaku agen ketika nilai  $v_0$  (a) 0.0, (b) 0.3, dan (c) 1.0.

hambatan (Gambar 4.7 (a)). Sedangkan apabila nilai  $u_0$  terlalu besar, agen akan cenderung memiliki jarak yang terlalu lebar dengan dinding.

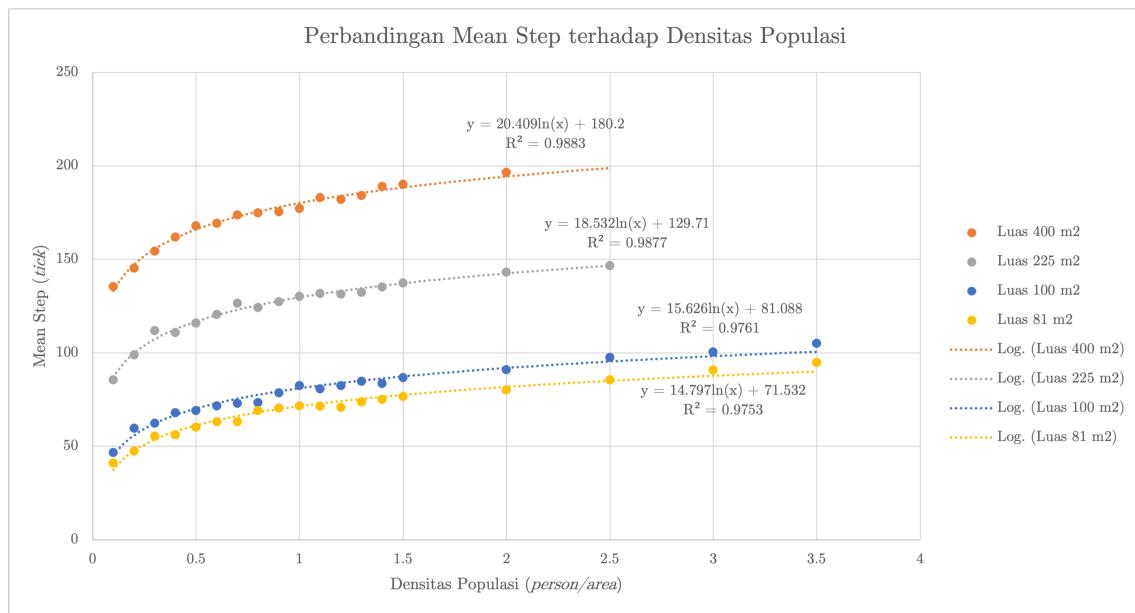


**Gambar 4.7** Perbandingan perilaku agen ketika nilai  $u_0$  (a) 0.0, (b) 1.6, dan (c) 20.0.

## 4.2 Pengaruh Kepadatan Pedestrian

Simulasi dilakukan dengan menggunakan ukuran *world* yang bervariasi, yaitu  $19 \times 19$  untuk merepresentasikan  $81 \text{ m}^2$ ,  $21 \times 21$  yang mewakili  $100 \text{ m}^2$ ,  $31 \times 31$  yang merepresentasikan  $225 \text{ m}^2$ , serta  $41 \times 41$  yang mewakili  $400 \text{ m}^2$ . Densitas populasi dihitung dari pembagian total agen dengan luas area yang digunakan. Data variasi densitas yang digunakan terdapat pada Lampiran A di akhir dokumen. Grafik perbandingan hasil masing-masing simulasi dapat dilihat pada Gambar 4.8 berikut.

Gambar 4.8 menunjukkan perbandingan hasil simulasi dari masing-masing densitas pada setiap luas ruangan yang berbeda serta regresi data yang berupa fungsi logaritmik. Pada gambar terlihat bahwa pada densitas populasi rendah, peningkatan total waktu evakuasi berakselerasi dengan cepat dan akan melambat



**Gambar 4.8** Perbandingan total waktu evakuasi terhadap densitas populasi agen.

seiring dengan peningkatan densitas yang digunakan. Hal ini selaras dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Pauls (1987) di mana fungsi untuk menentukan total waktu evakuasi memiliki peningkatan yang tidak linear dan secara umum dapat dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$f(x) = a_1 \ln(x) + b_1 \quad (4.1)$$

Untuk menentukan kapasitas penghuni yang dapat diakomodasi suatu ruangan sesuai dengan batas keamanan dan keselamatan, *International Building Code* (IBC) menjelaskan perhitungan beban penghuni atau *occupant load calculation*. Tujuan dari perhitungan beban penghuni adalah untuk memastikan keamanan penghuni apabila terjadi baha, misalnya kebakaran (Council, 2021). Perhitungan ini memperhitungkan fungsi penggunaan ruang serta desain dan konstruksi bangunan, misalnya sebagai tempat perkumpulan, perkantoran, gudang, ruang kelas, dan sebagainya. Selain itu, jumlah penghuni dapat pula digunakan untuk menentukan jumlah minimum pintu keluar, lebar pintu keluar, ukuran sistem pemadam kebakaran, dan fitur keselamatan lain yang harus disediakan (*Occupant Load Calculation*, n.d.).

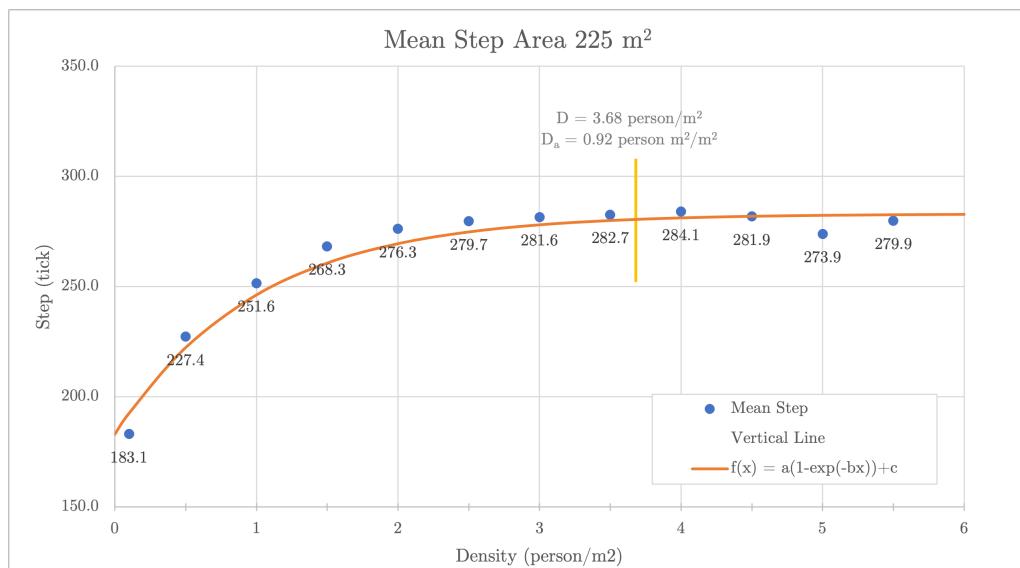
Nilai kapasitas maksimum yang dapat diakomodasi diperoleh dari pembagian luas area ruangan dengan *occupant load factor* dari masing-masing jenis bangunan.

Berdasarkan IBC, *occupant load factor* dari bangunan yang memiliki fungsi sebagai tempat pertemuan tanpa adanya kursi adalah sebesar 7 kaki atau setara dengan  $0.464 \text{ m}^2$  (lihat Lampiran B). Sehingga total penghuni maksimum dalam batas aman untuk masing-masing luas ruangan yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebagai berikut.

Area ( $\text{m}^2$ )	Kapasitas Maksimum (person)	Densitas Maksimum (person/ $\text{area}$ )
81	174	2.148
100	215	2.15
225	484	2.151
400	862	2.155

**Tabel 4.1:** Kapasitas penghuni maksimum berdasarkan aturan IBC.

Simulasi lanjutan dilakukan menggunakan ruangan berukuran  $225 \text{ m}^2$  dengan densitas lebih besar untuk melihat pengaruh jumlah populasi di atas batas penghuni maksimum yang ditetapkan IBC, seperti pada Tabel A.5 di Lampiran A.



**Gambar 4.9** Rata-rata total waktu evakuasi (*tick*) pada ruangan berukuran  $225 \text{ m}^2$  dengan variasi densitas.

Dari Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa peningkatan waktu evakuasi semakin melambat setelah melewati densitas  $2 \text{ person}/\text{m}^2$  dan cenderung memiliki nilai yang stagnan. Hal ini sesuai dengan rekomendasi IBC di mana maksimum densitas yang dapat diakomodasi suatu ruangan untuk menjaga keamanan dan keselamatannya adalah berkisar pada  $2 \text{ person}/\text{m}^2$  (Engineers, 2002). Selain itu,

hal ini juga selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh Fruin (1971) yang menjelaskan bahwa semakin meningkat kepadatan populasi pada suatu area, maka kemampuan bergerak pedestrian akan menurun.

Pada simulasi, agen memiliki energi tertentu yang akan terus berkurang seiring dengan waktu yang dihabiskan ketika agen terhimpit. Sehingga semakin lama agen berdesak-desakan atau terhimpit dengan agen lain, maka energinya akan berangsur-angsur berkurang yang kemudian dapat menyebabkan agen meninggal. Pada densitas lebih dari 4, salah satu kemungkinan yang menyebabkan total waktu evakuasi tidak berubah secara signifikan adalah adanya agen-agen yang meninggal akibat kondisi pintu keluar yang terlalu berdesakan, sehingga jumlah agen yang dapat melakukan evakuasi berkurang dan mempersingkat proses evakuasi sampai agen hidup terakhir keluar dari ruangan.

Total waktu evakuasi ini dapat dirumuskan secara umum dalam persamaan eksponensial sebagai berikut.

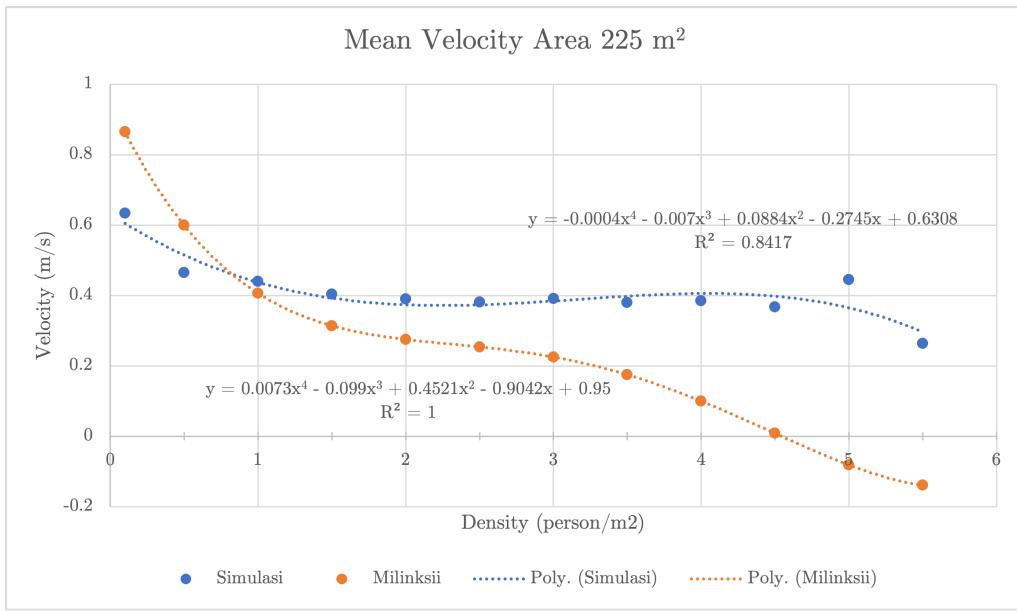
$$f(x) = a_2(1 - e^{-b_2x}) + c_2 \quad (4.2)$$

Rata-rata kecepatan simulasi diperoleh dari rata-rata kecepatan seluruh agen pada seluruh proses evakuasi sejak  $t = 0$  hingga proses evakuasi berakhir. Gambar 4.10 merupakan grafik rata-rata kecepatan agen pada setiap densitas populasi.

Dari Gambar 4.10 terlihat bahwa data kecepatan rata-rata yang diperoleh dari hasil simulasi memiliki trend polinomial orde 4 dan selaras dengan perumusan kecepatan berdasarkan pengaruh densitas yang telah dijabarkan oleh Predtechenskii and Milinskii. Sehingga fungsi kecepatan bergantung densitas dapat dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$f(x) = a_3x^4 + b_3x^3 + c_2x^2 + d_3x + e_3 \quad (4.3)$$

Hasil perhitungan kecepatan dengan menggunakan persamaan 2.25 pada densitas yang lebih besar dari 4 orang/meter<sup>2</sup> menghasilkan nilai negatif. Hal ini selaras dengan penelitian Predtechenskii and Milinskii di mana ia menjelaskan bahwa densitas maksimum yang dapat dicapai adalah sebesar 3.68 orang/meter<sup>2</sup> untuk luas area 225 m<sup>2</sup>, atau setara dengan 92% area telah terisi individu.



**Gambar 4.10** Perbandingan kecepatan rata-rata antara hasil simulasi dengan Persamaan 2.25 yang dirumuskan oleh Predtechenskii and Milinskii (1978).

### 4.3 Pengaruh Ukuran Pintu Keluar

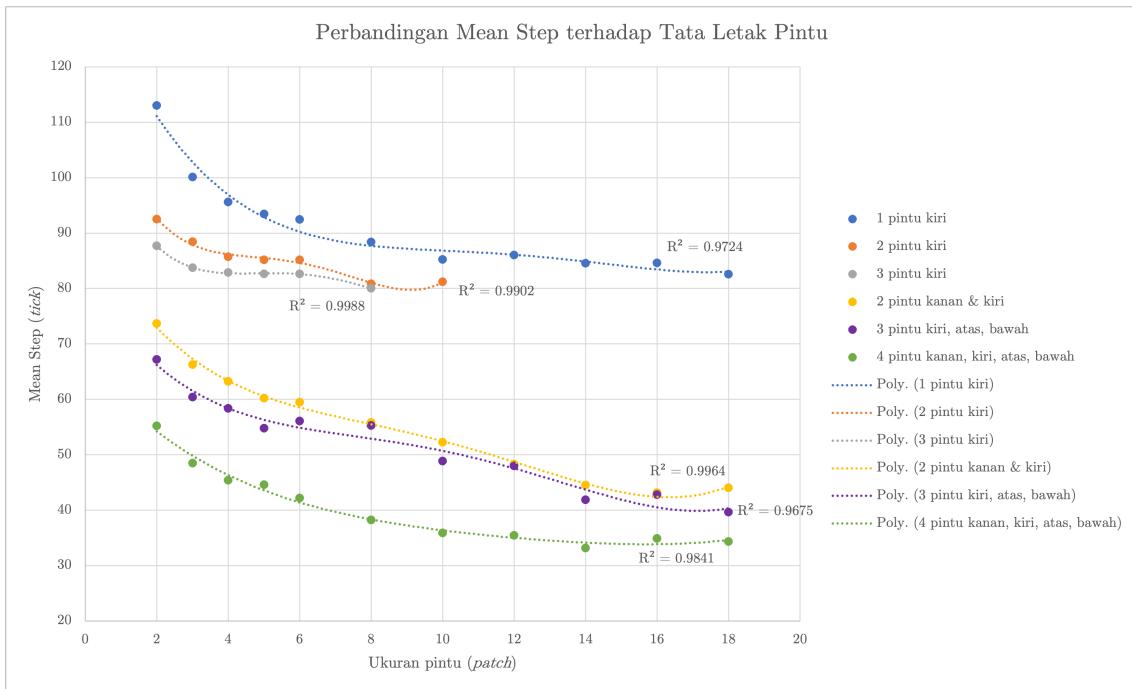
Simulasi dilakukan dengan menggunakan ukuran *world* sebesar  $20 \times 20$  yang dikonversikan menjadi  $100 \text{ m}^2$  dengan melibatkan agen sebanyak 250 orang. Tata letak pintu keluar divariasikan untuk mengetahui pengaruh posisi, jumlah, dan ukuran pintu keluar terhadap total waktu evakuasi yang dibutuhkan. Masing-masing variasi disimulasikan sebanyak 50 kali untuk diambil nilai rata-ratanya.

Gambar 4.11 menunjukkan perbandingan rata-rata total waktu evakuasi yang dibutuhkan agen terhadap variasi tata letak pintu keluar. Pada gambar terlihat bahwa tata letak pintu keluar yang menghasilkan total waktu evakuasi paling kecil adalah pada bangunan dengan 4 pintu keluar yang tersebar di seluruh sisinya. Sedangkan jumlah pintu keluar yang bervariasi pada sisi bangunan yang sama tidak memberikan perbedaan total waktu evakuasi yang signifikan.

Pada awal penambahan ukuran lebar pintu, total waktu evakuasi menurun dengan cepat namun mulai melambat ketika lebar pintu sebesar 6 patch. Selanjutnya perubahan total waktu evakuasi tidak berubah secara signifikan seiring dengan pertambahan ukuran lebar pintu keluar. Hal ini dapat diartikan terdapat suatu lebar optimal yang dapat dimiliki oleh pintu keluar sehingga evakuasi dapat berlangsung dengan cepat tanpa perlu menyediakan pintu keluar yang terlalu

## Bab 4. Hasil Simulasi

---



**Gambar 4.11** Perbandingan total waktu evakuasi terhadap tata letak pintu keluar.

besar.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penggunaan pemodelan berbasis agen (ABM) dapat menjadi alternatif dalam memodelkan suatu fenomena dalam kehidupan nyata. Dengan membuat suatu model berdasarkan interaksi para agen yang memiliki karakteristik masing-masing, dapat diamati suatu pola yang muncul (*emergent*) tanpa melalui proses matematika yang rumit.

Penelitian ini menggunakan kombinasi pemodelan berbasis agen dan model gaya sosial untuk memodelkan proses simulasi dari suatu bangunan satu ruang dengan variasi luas, jumlah agen terlibat, dan tata letak pintu keluar untuk mengetahui pengaruhnya terhadap proses evakuasi. Dari hasil simulasi dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut.

1. Perbedaan luas ruangan dengan densitas yang sama akan menghasilkan total waktu evakuasi yang berbeda namun memiliki tren data yang sama. Durasi evakuasi ini sangat dipengaruhi oleh jumlah agen yang terlibat dalam proses simulasi. Selain itu, posisi awal agen juga akan sangat memengaruhi waktu evakuasi. Semakin banyak agen yang berada pada sekitar pintu keluar, maka akan semakin cepat proses evakuasi berlangsung.
2. Pada densitas populasi rendah, peningkatan total waktu evakuasi berakselerasi dengan cepat dan akan melambat seiring dengan peningkatan densitas yang digunakan.
3. Tidak adanya *benchmark* parameter energi pada agen yang jelas menyebabkan energi yang dimiliki oleh agen akan berkurang dengan fungsi probabilitas yang kurang menggambarkan kondisi nyata. Hal ini dapat memengaruhi proses simulasi evakuasi yang mengakibatkan banyak agen yang tidak dapat melakukan proses evakuasi dan waktu evakuasi yang didapatkan menjadi tidak valid.
4. Peletakan pintu keluar yang lebih efektif mengurangi durasi evakuasi adalah ketika pintu keluar diletakkan di sisi yang berbeda satu sama lain. Selain itu, lebar pintu keluar dapat memengaruhi durasi evakuasi sampai pada lebar

tertentu perbedaannya tidak lagi signifikan.

## 5.2 Saran

Kurangnya *real data* mengenai evakuasi pada kehidupan nyata mengakibatkan sulitnya memvalidasi pemodelan berbasis agen. Untuk memperluas cakupan tersebut, selanjutnya perlu dilakukan eksperimen atau pemodelan dengan menggunakan karakteristik agen dan lingkungan yang lebih menggambarkan kondisi aktualnya. Selain itu perlu ditambahkan berbagai variasi yang menggambarkan kondisi evakuasi yang nyata seperti struktur bangunan yang lebih rumit dan adanya sistem-sistem penanda bahaya seperti alarm atau pengumuman.

Kurangnya kapasitas perangkat komputasi yang digunakan menyebabkan terbatasnya variasi simulasi yang dapat dilakukan. Sehingga ke depannya dapat dilakukan simulasi dengan densitas yang lebih besar untuk menggambarkan kondisi kerumunan tinggi seperti konser musik dan demo.

## Pustaka

- Almeida, J. E., Kokkinogenis, Z., & Rossetti, R. J. F. (2012, June). Netlogo implementation of an evacuation scenario. In *7th iberian conference on information systems and technologies (cisti 2012)* (p. 1-4).
- Ando, K., Ota, H., & Oki, T. (1988). Forecasting the flow of people. *Railway Research Review*, 45(8), 8–14.
- Bacik, K., Bacik, B. S., & Rogers, T. (2023, 3). Lane nucleation in complex active flows. *Science*, 379(6635), 923–928. Retrieved from <https://www.science.org/doi/pdf/10.1126/science.add8091?download=true> doi: 10.1126/science.add8091
- Capelle, M. (2018). *Impementation and validation of the social force model for crowd behavior* (Unpublished master's thesis). Delft University of Technology.
- Chraibi, M., Tordeux, A., Schadschneider, A., & Seyfried, A. (2019). *Modelling of Pedestrian and Evacuation Dynamics*. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8763-4\\_705](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8763-4_705) doi: 10.1007/978-1-4939-8763-4\{\_}705
- Cotfas, L.-A., Delcea, C., Iancu, L.-D., Ioanas, C., & Ponsiglione, C. (2022, 1). Large Event Halls Evacuation using an Agent-Based Modeling Approach. *IEEE Access*, 10, 49359–49384. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/access.2022.3172285> doi: 10.1109/access.2022.3172285
- Council, I. C. (2021). *2021 International Building Code Study Companion*.
- Cuesta, A., Abreu, O., & Alvear, D. (2016). *Evacuation Modeling Trends*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20708-7> doi: 10.1007/978-3-319-20708-7
- DeCicco, P. R. (2019). *Evacuation from Fires*. Retrieved from <https://doi.org/10.4324/9781315228006> doi: 10.4324/9781315228006
- Engineers, S. O. F. P. (2002). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. National Fire Protection Assn.
- Fruin, J. J. (1971). *Pedestrian planning and design* (Tech. Rep.). MAUDEP.
- Greene, L. (2014, 12). *Decoded: Calculating the egress width of door openings*. Retrieved 25 July 2023, from <https://idighardware.com/2014/12/decoded-calculating-the-egress-width-of-door-openings/>
- Ha, V., & Lykotrafitis, G. (2012, 4). Agent-based modeling of a multi-room multi-floor building emergency evacuation. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391(8), 2740–2751. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2011.12.034> doi: 10.1016/j.physa.2011.12.034
- Helbing, D., & Johansson, A. (2011). Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics.

- Extreme Environmental Events*, 697–716. Retrieved from [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6\\_37](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-7695-6_37) doi: 10.1007/978-1-4419-7695-6\\_{-}37
- Helbing, D., & Molnár, P. (1995, 5). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51(5), 4282–4286. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.51.4282> doi: 10.1103/physreve.51.4282
- Indonesia, B. N. (2022, 10). *Tragedi Halloween di Itaewon, Korsel: setidaknya 154 orang meninggal akibat berdesakan*. Retrieved from <https://www.bbc.com/indonesia/dunia-63443917>
- Itah, I. (2022, 10). *Korban Meninggal Tragedi Kanjuruhan Jadi 135 Orang*. Retrieved from <https://www.republika.co.id/berita/rk8lk4348/korban-meninggal-tragedi-kanjuruhan-jadi-135-orang>
- Nelson, H., & MacLennan, H. (1996). Emergency movement. *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2nd Edition)*, 3286-3295.
- Occupant load calculation*. (n.d.). Retrieved 25 July 2023, from <https://archimondrian.com/occupant-load-calculation/>
- Pauls, J. (1987). Calculating evacuation times for tall buildings. *Fire Safety Journal*, 12(3), 213-236. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711287900075> doi: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(87\)90007-5](https://doi.org/10.1016/0379-7112(87)90007-5)
- Predtechenskii, V., & Milinskii, A. (1978). *Planning for foot traffic flow in buildings* (D. V. Kotekar, Ed.). Springfield, Virginia: Stroizdat.
- Railsback, S., & Grimm, V. (2019). *Agent-Based and Individual-Based Modeling: A Practical Introduction, Second Edition* (2nd ed.). Princeton University Press.
- Rand, W., & Rust, R. T. (2011, 9). Agent-based modeling in marketing: Guidelines for rigor. *International Journal of Research in Marketing*, 28(3), 181–193. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2011.04.002> doi: 10.1016/j.ijresmar.2011.04.002
- Rzezonka, J. (2022, 6). *Bottleneck Flow and Clogging*. Civil Safety Research (IAS-7). Retrieved from <https://www.fz-juelich.de/en/ias/ias-7/research-1/divisions/pedestrian-dynamics-modeling/intro/modeling-the-interactions-of-pedestrians/bottleneck-flow-and-clogging>
- Sagun, A., Anumba, C. J., & Bouchlaghem, D. (2013, 6). Designing Buildings to Cope with Emergencies: Findings from Case Studies on Exit Preferences. *Buildings*, 3(2), 442–461. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/buildings3020442> doi: 10.3390/buildings3020442
- Schadschneider, A., Chraibi, M., Seyfried, A., Tordeux, A., & Zhang, J. (2018).

- Pedestrian Dynamics: From Empirical Results to Modeling.* Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05129-7\{\\_}4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05129-7_4) doi: 10.1007/978-3-030-05129-7\{\_}4
- Schadschneider, A., Klüpfel, H., Kretz, T., Rögsch, C., & Seyfried, A. (2009, 1). Fundamentals of Pedestrian and Evacuation Dynamics. *IGI Global eBooks*, 124–154. doi: 10.4018/978-1-60566-226-8.ch006
- Shen, T.-S. (2003). *Building Planning Evaluations for Emergency Evacuation* (Unpublished doctoral dissertation). Worcester Polytechnic Institute.
- Siyam, N., Alqaryouti, O., & Abdallah, S. (2020, July). Research Issues in Agent-Based Simulation for Pedestrians Evacuation. *IEEE Access*, 8, 134435-134455. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/access.2019.2956880> doi: 10.1109/access.2019.2956880
- Tong, Y., & Bode, N. W. F. (2023, 1). Simulation investigation on crowd evacuation strategies for helping vulnerable pedestrians at different stages of egress. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 84, 103479. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103479> doi: 10.1016/j.ijdrr.2022.103479
- Widodo, P., Subagia, D., Maarif, S., Parlina, N., Hawadi, L. F., & Yuliatiningtyas, S. (2022, December 4). The kanjuruhan stadium's stampede tragedy: Disaster management perspective. *Res Militaris*, 12(4).
- Wilensky, U. (1999). *NetLogo. center for connected learning and computer-based modeling, northwestern university, evanston, il.*
- Wilensky, U., & Rand, W. (2015). *An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo (The MIT Press)* (Illustrated ed.). The MIT Press.

## LAMPIRAN A

### Data Simulasi

#### A.1 Data Variasi Densitas

**Tabel A.1:** Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran  $81 \text{ m}^2$ .

Patch size	Area ( $\text{m}^2$ )	Person	Density (P/A)	Mean Step ( <i>ticks</i> )
$19 \times 19$	81	8	0.1	41.14
$19 \times 19$	81	16	0.2	47.6
$19 \times 19$	81	24	0.3	55.56
$19 \times 19$	81	32	0.4	56.32
$19 \times 19$	81	41	0.5	60.36
$19 \times 19$	81	49	0.6	63.26
$19 \times 19$	81	57	0.7	63.26
$19 \times 19$	81	65	0.8	69.24
$19 \times 19$	81	73	0.9	70.58
$19 \times 19$	81	81	1	71.8
$19 \times 19$	81	89	1.1	71.52
$19 \times 19$	81	97	1.2	71.06
$19 \times 19$	81	105	1.3	73.92
$19 \times 19$	81	113	1.4	75.3
$19 \times 19$	81	122	1.5	76.8
$19 \times 19$	81	162	2	80.18
$19 \times 19$	81	203	2.5	85.72
$19 \times 19$	81	243	3	90.88
$19 \times 19$	81	284	3.5	94.98

#### A.2 Data Variasi Pintu Keluar

**Tabel A.2:** Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran  $100 \text{ m}^2$ .

Patch size	Area ( $\text{m}^2$ )	Person	Density (P/A)	Mean Step (ticks)
$21 \times 21$	100	10	0.1	46.74
$21 \times 21$	100	20	0.2	59.7
$21 \times 21$	100	30	0.3	62.4
$21 \times 21$	100	40	0.4	68.06
$21 \times 21$	100	50	0.5	69.32
$21 \times 21$	100	60	0.6	71.74
$21 \times 21$	100	70	0.7	73.16
$21 \times 21$	100	80	0.8	73.46
$21 \times 21$	100	90	0.9	78.68
$21 \times 21$	100	100	1	82.5
$21 \times 21$	100	110	1.1	80.76
$21 \times 21$	100	120	1.2	82.54
$21 \times 21$	100	130	1.3	84.84
$21 \times 21$	100	140	1.4	83.66
$21 \times 21$	100	150	1.5	86.88
$21 \times 21$	100	200	2	91.02
$21 \times 21$	100	250	2.5	97.6
$21 \times 21$	100	300	3	100.58
$21 \times 21$	100	350	3.5	105.18

**Tabel A.3:** Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran  $225 \text{ m}^2$ .

Patch size	Area ( $\text{m}^2$ )	Person	Density (P/A)	Mean Step (ticks)
$31 \times 31$	225	23	0.1	85.68
$31 \times 31$	225	45	0.2	98.96
$31 \times 31$	225	68	0.3	111.88
$31 \times 31$	225	90	0.4	110.98
$31 \times 31$	225	113	0.5	116.1
$31 \times 31$	225	135	0.6	120.6
$31 \times 31$	225	158	0.7	126.6
$31 \times 31$	225	180	0.8	124.3
$31 \times 31$	225	203	0.9	127.52
$31 \times 31$	225	225	1	130.28
$31 \times 31$	225	248	1.1	131.8
$31 \times 31$	225	270	1.2	131.52
$31 \times 31$	225	293	1.3	132.54
$31 \times 31$	225	315	1.4	135.42
$31 \times 31$	225	338	1.5	137.48
$31 \times 31$	225	450	2	143.34
$31 \times 31$	225	563	2.5	146.8

**Tabel A.4:** Hasil simulasi variasi jumlah agen pada bangunan berukuran  $400 \text{ m}^2$ .

Patch size	Area ( $\text{m}^2$ )	Person	Density (P/A)	Mean Step ( <i>ticks</i> )
$41 \times 41$	400	40	0.1	135.48
$41 \times 41$	400	80	0.2	145.48
$41 \times 41$	400	120	0.3	154.48
$41 \times 41$	400	160	0.4	162.12
$41 \times 41$	400	200	0.5	167.96
$41 \times 41$	400	240	0.6	169.32
$41 \times 41$	400	280	0.7	173.76
$41 \times 41$	400	320	0.8	174.98
$41 \times 41$	400	360	0.9	175.6
$41 \times 41$	400	400	1	177.24
$41 \times 41$	400	440	1.1	183.14
$41 \times 41$	400	480	1.2	182.22
$41 \times 41$	400	520	1.3	184.2
$41 \times 41$	400	560	1.4	189.06
$41 \times 41$	400	600	1.5	190.18
$41 \times 41$	400	800	2	196.64

**Tabel A.5:** Data total waktu evakuasi pada luas ruangan  $225 \text{ m}^2$  dengan densitas populasi  $0.1 - 5$  orang/ $\text{meter}^2$ .

Area ( $\text{m}^2$ )	Person	Density (person/ $\text{m}^2$ )	Mean Step ( <i>tick</i> )
225	23	0.1	183.1
225	113	0.5	227.4
225	225	1	251.6
225	338	1.5	268.3
225	450	2	276.3
225	563	2.5	279.7
225	675	3	281.6
225	788	3.5	282.7
225	900	4	284.1
225	1013	4.5	281.9
225	1125	5	273.9
225	1238	5.5	279.9

**Tabel A.6:** Data kecepatan rata-rata dan kecepatan berdasarkan perhitungan Predtechenskii and Milinskii (1978) pada luas ruangan  $225 \text{ m}^2$  dengan densitas populasi 0.1 - 5 orang/meter $^2$ .

Area (m $^2$ )	Agen (person)	Densitas (person/m $^2$ )	Kecepatan rata-rata (m/s)	Kecepatan Milinskii (m/s)
225	23	0.1	0.63281316	0.86400594
225	113	0.5	0.46504103	0.59902344
225	225	1	0.43945681	0.40625
225	338	1.5	0.40386438	0.31386719
225	450	2	0.3897627	0.275
225	563	2.5	0.38088314	0.25371094
225	675	3	0.39114768	0.225
225	788	3.5	0.37958446	0.17480469
225	900	4	0.38468199	0.1
225	1013	4.5	0.36723922	0.00839844
225	1125	5	0.44411127	-0.08125
225	1238	5.5	0.26343818	-0.1392578

**Tabel A.7:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 1 pintu keluar di sisi kiri.

Pintu	Area	Person	Exit width (patch)	Mean Step (tick)
1A	100	200	1	209
1A	100	250	2	113
1A	100	250	3	100.12
1A	100	250	4	95.6
1A	100	250	5	93.44
1A	100	250	6	92.46
1A	100	250	8	88.34
1A	100	250	10	85.24
1A	100	250	12	86.02
1A	100	250	14	84.52
1A	100	250	16	84.58
1A	100	250	18	82.58

Lampiran A. Data Simulasi

---

**Tabel A.8:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 2 pintu keluar di sisi kiri.

Pintu	Area	Person	Exit width (patch)	Mean Step (tick)
2A	100	200	1	137
2A	100	250	2	92.52
2A	100	250	3	88.42
2A	100	250	4	85.74
2A	100	250	5	85.16
2A	100	250	6	85.16
2A	100	250	8	80.86
2A	100	250	10	81.2

**Tabel A.9:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 3 pintu keluar di sisi kiri.

Pintu	Area	Person	Exit width (patch)	Mean Step (tick)
3A	100	200	1	202
3A	100	250	2	87.68
3A	100	250	3	83.72
3A	100	250	4	82.88
3A	100	250	5	82.64
3A	100	250	6	82.64
3A	100	250	8	80

**Tabel A.10:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 2 pintu keluar di sisi kiri dan kanan.

Pintu	Area	Person	Exit width (patch)	Mean Step (tick)
AC	100	200	1	99.5
AC	100	250	2	73.6383
AC	100	250	3	66.27083
AC	100	250	4	63.24
AC	100	250	5	60.18
AC	100	250	6	59.48
AC	100	250	8	55.8
AC	100	250	10	52.24
AC	100	250	12	48.3
AC	100	250	14	44.52
AC	100	250	16	43.14
AC	100	250	18	44.04

**Tabel A.11:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 3 pintu keluar di sisi kiri, atas, dan bawah.

Pintu	Area	Person	Exit width ( <i>patch</i> )	Mean Step ( <i>tick</i> )
1ABD	100	200	1	121.3333
1ABD	100	250	2	67.2
1ABD	100	250	3	60.38
1ABD	100	250	4	58.32
1ABD	100	250	5	54.76
1ABD	100	250	6	56.06
1ABD	100	250	8	55.26
1ABD	100	250	10	48.84
1ABD	100	250	12	47.96
1ABD	100	250	14	41.86
1ABD	100	250	16	42.76
1ABD	100	250	18	39.62

**Tabel A.12:** Data durasi evakuasi pada ruangan dengan luas  $100 \text{ m}^2$  dan agen terlibat sebanyak 250 orang serta 4 pintu keluar di sisi kiri, kanan, atas, dan bawah.

Pintu	Area	Person	Exit width ( <i>patch</i> )	Mean Step ( <i>tick</i> )
1ABCD	100	200	1	120
1ABCD	100	250	2	55.18
1ABCD	100	250	3	48.44
1ABCD	100	250	4	45.38
1ABCD	100	250	5	44.6
1ABCD	100	250	6	42.18
1ABCD	100	250	8	38.22
1ABCD	100	250	10	35.84
1ABCD	100	250	12	35.46
1ABCD	100	250	14	33.18
1ABCD	100	250	16	34.86
1ABCD	100	250	18	34.32

## LAMPIRAN B

### Data Pendukung

#### B.1 Faktor Beban Penghuni

**Tabel B.1:** Maksimum area ruangan per penghuni berdasarkan 2021 *International Building Code* (Council, 2021).

Fungsi ruangan	Faktor beban penghuni*
Area penyimpanan aksesoris, ruang peralatan mekanik	300 bruto
Bangunan agrikultur	300 bruto
Hanggar pesawat	500 bruto
Terminal pesawat	
Pengambilan bagasi	20 bruto
Penanganan bagasi	300 bruto
Ruang terbuka	100 bruto
Ruang tunggu	15 bruto
Galeri pameran dan museum	30 net
Ruang pertemuan tanpa kursi tetap	
Terkonsentrasi (hanya kursi–tidak tetap)	7 net
Ruang berdiri (tanpa meja dan kursi)	5 net
Tidak terkonsentrasi (meja dan kursi)	15 net
Kawasan bisnis	150 bruto
Penitipan anak	35 net
Asrama	50 bruto
Dapur	200 bruto
Edukasi	
Ruang kelas	20 net
Ruangan lain	50 net
Ruang olahraga	50 bruto
Pabrik dan area manufaktur	200 bruto
Area industri	100 bruto
Area institusi kesehatan	
Ruang rawat inap	240 bruto
Ruang rawat jalan	100 bruto
Pertokoan	60 bruto
Tempat parkir	200 bruto
Pemukiman	200 bruto
Panggung	15 net
Gudang	500 bruto