

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

Nama Mahasiswa : Alya Mutiara Firdausyi

NIM : 20920007

Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 7 Juli 2023

Pembimbing I

Dr.rer.nat Sparisoma Viridi, S.Si
NIP 19731201 199903 1 002

Abstrak

Batuan reservoir yang tersaturasi oleh hidrokarbon merupakan sebuah sistem kompleks pada skala makroskopik maupun skala mikroskopik. Kompleksitas dari batuan dan sifat dari fluida yang mengisi batuan tersebut dapat menentukan distribusi hidrokarbon, dan laju aliran fluida di dalam reservoir. Sebuah sampel batuan (*core*) yang diambil dapat mewakili sebuah reservoir dan dapat diuji. Salah satu tujuan dari pengujian itu adalah untuk mendapatkan parameter fisis dari batuan reservoir tersebut seperti permeabilitas relatif, tekanan kapiler, porositas, dan berbagai parameter batuan reservoir dan fluida yang mengisinya. Parameter fisis tersebut sejauh ini didapatkan dari *Special Core Analysis* (SCAL). SCAL merupakan analisis sampel batuan yang hanya bisa dilakukan di laboratorium. Parameter yang diukur di SCAL sangat banyak sehingga dapat memakan waktu satu tahun atau lebih. Karena banyak kekurangan dari metode SCAL, berkembanglah metode *Digital Rock Physics* (DRP). DRP merupakan metode pengujian yang berdasarkan simulasi pada perhitungan fisis dan perilaku dari aliran fluida pada medium berpori. Salah satu metode untuk simulasi aliran fluida adalah Metode Volume Hingga (FVM). FVM merupakan metode pendekatan kontinum yang berbasis integral persamaan yang mengatur aliran fluida. Pendekatan integrasi ini menandakan terjadinya kesetimbangan pada volume kontrol. Pada Tugas Akhir ini, persamaan yang akan dicari solusinya adalah persamaan Navier-Stokes fluida multifasa dengan menggunakan metode *Volume of Fluid*. Simulasi akan diterapkan pada citra digital mikro-CT 3D batuan Berea *Sandstone* yang divariasikan ukurannya yaitu ukuran $32 \times 32 \times 32$, $64 \times 64 \times 64$, dan $128 \times 128 \times 128$. Studi sensitivitas ini dilakukan untuk mengetahui ukuran efektif citra dalam menghitung parameter fisis batuan yaitu permabilitas relatif. Simulasi perhitungan permeabilitas relatif dilakukan dengan skema *Drainage* (Fluida *non-wetting* mendesak fluida *wetting*). Kurva permabilitas relatif yang didapatkan cukup baik jika dibandingkan dengan hasil eksperimen maupun hasil simulasi lain.

Kata kunci:

Daftar Isi

Abstrak	ii
Daftar Isi	iii
Daftar Tabel	iv
Daftar Gambar	v
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Metode Penelitian	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
2 DASAR TEORI	6
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
3 METODOLOGI PENELITIAN	26
3.1 Konstruksi Model	26
3.1.1 Perangkat Lunak	27

Daftar Isi

3.1.2	Lingkungan dan Waktu	29
3.1.3	Properti	30
3.1.4	Perilaku Agen	32
3.2	Simulasi	35
3.2.1	Diagram Alir	35
3.2.2	Parameter	38
3.2.3	Skenario	38
4	HASIL AWAL	40
4.1	Verifikasi	40
4.2	Hasil Simulasi	42
5	KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1	Kesimpulan Sementara	46
5.2	Rencana	46
Daftar Pustaka		47
Pustaka		47

Daftar Tabel

1.1	Beberapa pendekatan simulasi dinamika pedestrian (Capelle, 2018)	3
3.1	Deskripsi <i>patches</i> pada simulasi dengan NetLogo.	30
3.2	Jenis agen dalam simulasi evakuasi.	31
3.3	Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia.	32
3.4	Properti persons dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini.	33
3.5	Properti <i>patch</i> dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini.	34
3.6	Nilai parameter model gaya sosial.	38
3.7	Penjelasan konstanta model gaya sosial.	39
4.1	Data waktu yang dibutuhkan agen untuk melakukan evakuasi.	44
4.2	Data jarak yang ditempuh agen ketika melakukan evakuasi.	44
4.3	Data kecepatan agen ketika melakukan evakuasi.	45

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 α (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 α 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
3.1	Diagram alir langkah-langkah penelitian.	26
3.2	Tampilan antarmuka program NetLogo.	28
3.3	Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo.	29
3.4	Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi.	31
3.5	Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan.	35
3.6	Diagram alir simulasi evakuasi pedestrian.	37
4.1	Tampilan NetLogo untuk simulasi evakuasi 200 agen dengan parameter mengacu pada penelitian Helbing and Molnár (1995).	40
4.2	Posisi agen <code>person</code> 109 pada saat $t = 0\text{tick}$	41
4.3	Nilai properti yang dimiliki oleh agen <code>person</code> 109 pada saat $t = 0\text{tick}$	41
4.4	Nilai properti yang dimiliki oleh agen <code>person</code> 109 pada saat $t = 1\text{tick}$	42

Daftar Gambar

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). Evakuasi adalah proses memindahkan korban dari lokasi kejadian bencana ke tempat yang lebih aman hingga mendapatkan bantuan 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. Dalam perencanaan pembangunan suatu lokasi maupun bangunan, perencanaan evakuasi bencana-termasuk kebakaran-sangat penting dipersiapkan dengan matang sebagai suatu tindakan pencegahan jatuhnya korban.

Di Indonesia, sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan telah diatur dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum nomor 26/PRT/M/2008 tanggal 30 Desember 2008. Bab I, bagian 1, pasal 1 memberikan definisi tentang sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan. Ini adalah sistem yang terdiri dari peralatan, bahan, dan sarana yang terdapat pada bangunan untuk melindungi dari bahaya kebakaran. Sistem proteksi kebakaran pasif meliputi pemilihan bahan dan komponen bangunan, pemisahan bangunan

berdasarkan tingkat ketahanannya terhadap api, dan perlindungan untuk jendela dan pintu. Sistem proteksi kebakaran aktif meliputi sistem deteksi kebakaran, peralatan pemadam kebakaran seperti sprinkler dan selang air pemadam, serta alat pemadam kimia seperti APAR dan alat pemadam khusus. Evakuasi kebakaran adalah bagian dari sistem proteksi kebakaran aktif yang akan dilakukan ketika kebakaran terjadi untuk meminimalisir kerugian dan kerusakan.

Evaluasi efektivitas rute evakuasi dapat dilakukan dengan melaksanakan *fire drill* atau simulasi kebakaran. Tujuannya adalah untuk mengajarkan proses evakuasi yang aman serta memastikan bahwa rute yang dipilih merupakan yang paling efektif. Namun, seringkali metode seperti ini dinilai kurang memadai dalam menggambarkan situasi pada keadaan kebakaran sesungguhnya, karena tidak adanya sumber bahaya yang nyata seperti api, sehingga orang cenderung melakukan simulasi ini sebatas formalitas saja (Koester, 2016). Akibatnya skenario evakuasi yang tampak baik saat simulasi belum tentu berlaku ketika terjadi keadaan darurat yang sesungguhnya, karena faktor kepanikan dan ketidakmampuan berpikir logis yang seringkali muncul dalam situasi panik.

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. Penelitian dilakukan pada bangunan dengan menggunakan simplifikasi suatu ruangan persegi panjang dua dimensi.
2. Satuan NetLogo dikonversi menjadi satuan internasional dengan rasio 1 *patch* bernilai 0.5 meter dan 1 *ticks* bernilai 5 detik.
3. Karakteristik agen yang merepresentasikan manusia terbatas pada yang didefinisikan di bagian Metodologi Penelitian.
4. Simulasi merupakan simplifikasi kejadian di dunia nyata yang memiliki atribut dan kondisi terbatas.
5. Parameter-parameter selain yang digunakan pada model gaya sosial merupakan parameter dengan asumsi.

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 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.

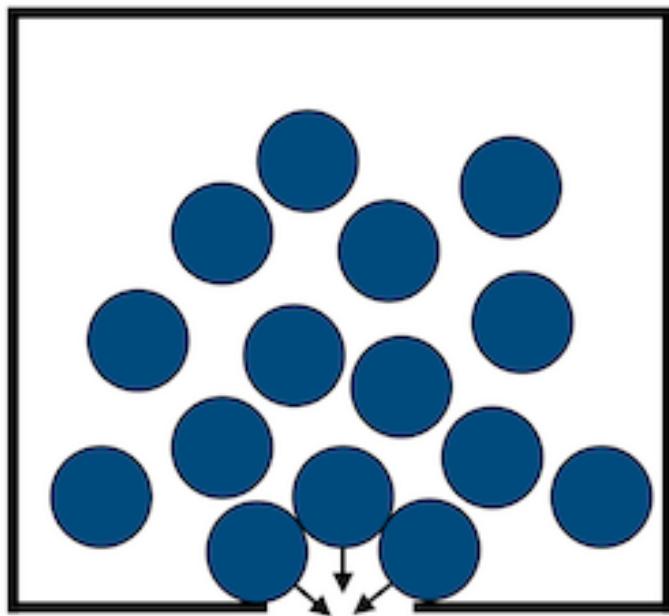
2.1.1 Perilaku Kolektif

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).

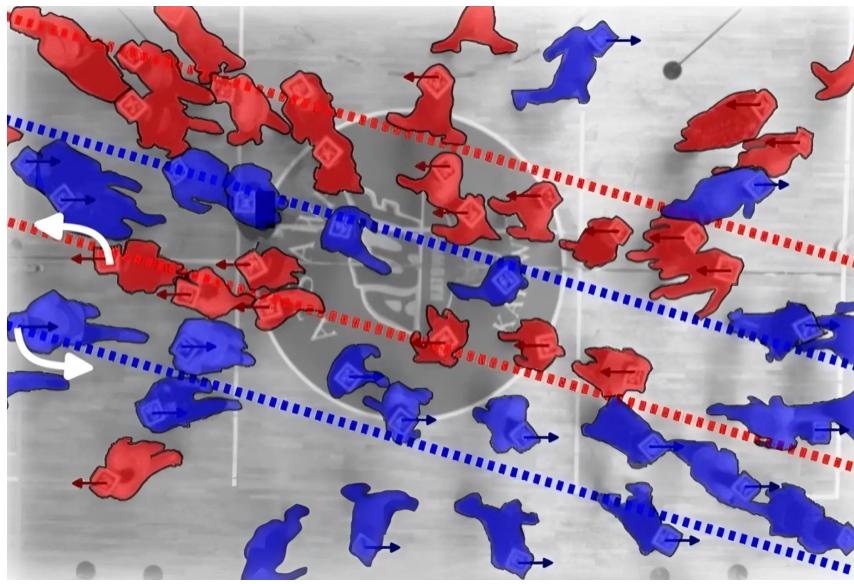
- Gelombang kepadatan (*density waves*)

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*)

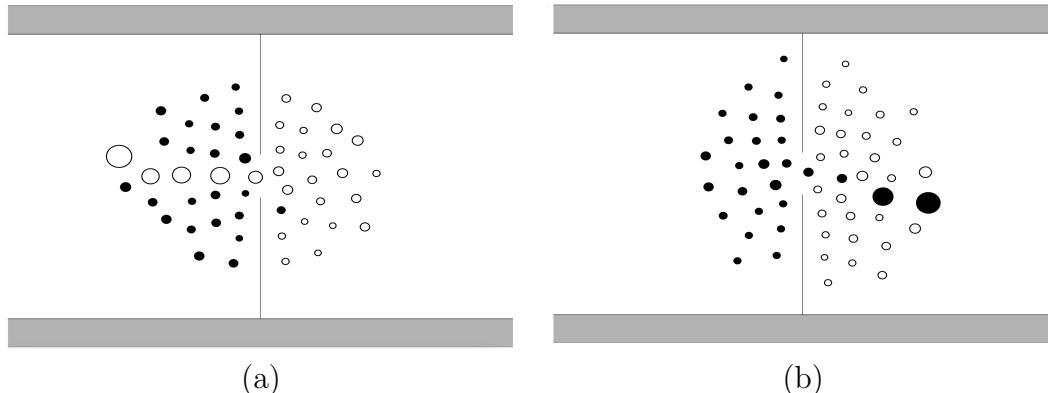
Ketika kelompok pedestrian berjalan pada arus yang berlawanan yang disebut *counterflow*, jalur yang bervariasi secara dinamis akan terbentuk di mana orang bergerak hanya dalam satu arah. Dengan cara ini, gerakan akan menjadi lebih nyaman dan memungkinkan kecepatan berjalan yang lebih tinggi, karena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

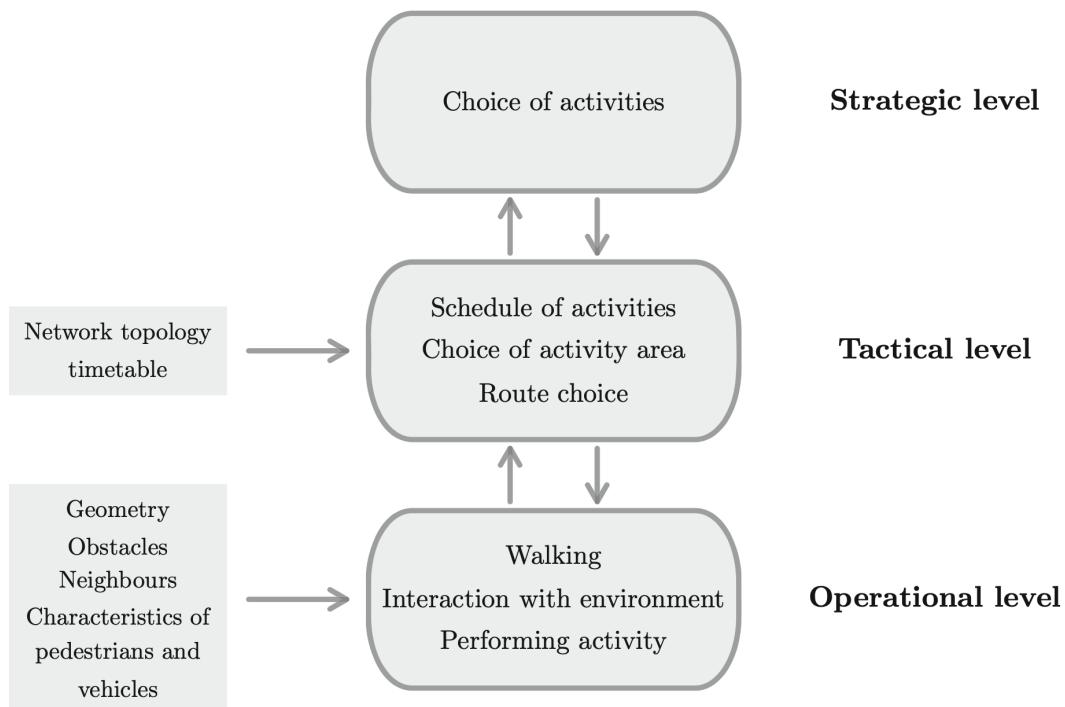
Ketika beberapa arus pedestrian bergerak dalam arah yang berbeda bertemu, berbagai pola gerakan kolektif dapat terbentuk. Pola-pola ini dapat

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 jenius 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.

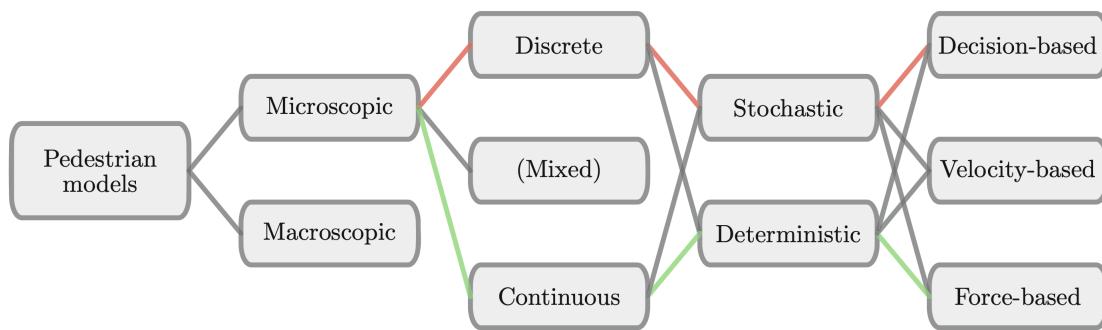
4. Berdasarkan aturan vs berdasarkan percepatan vs berdasarkan kecepatan

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 antarelemen. 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 keadaan 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 diketaui, 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}_α^0 yang menunjukkan keinginan agen α untuk mencapai tujuan dan tetap bergerak pada kecepatan yang diinginkan v_α^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_α 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 α menuju suatu tujuan tertentu \vec{r}_α^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}_α^k merupakan sisi selanjutnya yang dituju, maka arah yang dituju $\vec{e}_\alpha(t)$ adalah:

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

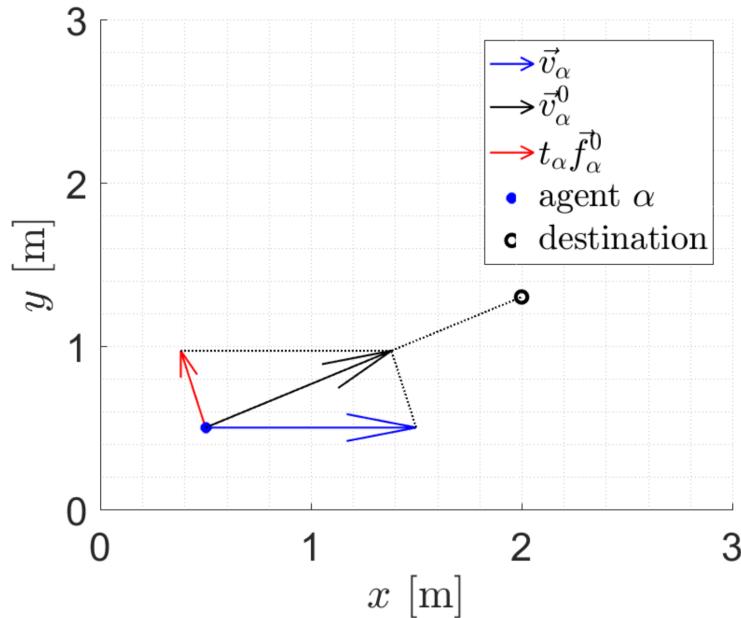
di mana $\vec{r}_\alpha(t)$ menunjukkan posisi aktual agen α pada waktu t . Lebih lanjut, tujuan yang diinginkan oleh pedestrian umumnya berupa suatu gerbang atau daerah dibanding dengan suatu titik \vec{r}_α^k , sehingga setiap saat t ia akan mengarah ke titik terdekat $\vec{r}_\alpha^k(t)$ dari gerbang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

Efek penggerak atau *the driving effect* \vec{D}_α memastikan agen α memiliki gerak yang sesuai dengan kecepatan yang diinginkan v_α^0 dan memiliki arah menuju tujuan yang diinginkan \vec{e}_α^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 τ_α 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 τ_α , agen akan bersikap lebih agresif dan nilai \vec{D}_α akan semakin besar. Jika tidak ada efek lain yang berlaku, waktu yang dibutuhkan agen untuk mencapai kecepatan ideal-nya adalah τ_α detik. Ketika magnitudo dari kecepatan aktual \vec{v}_α lebih besar dari kecepatan

ideal v_α^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 α (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*

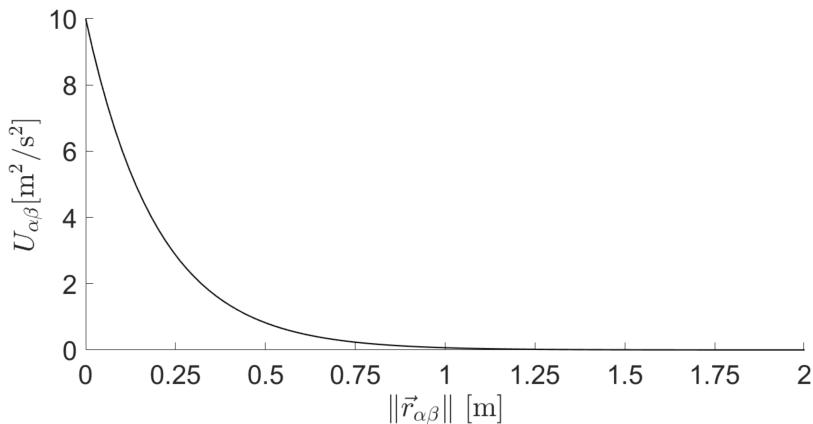
Pedestrian akan cenderung menjaga jarak dari pembatas seperti dinding atau jalan, serta menghindari halangan atau objek lain. Hal ini mengakibatkan efek tolak-menolak yang dijelaskan oleh *obstacle effect* seperti pada persamaan 2.5 ini. Efek tolak-menolak yang dihasilkan akan membuat agen menjauhi halangan,

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 α dan objek i yang terdekat dengan agen α , ($|\vec{r}_{\alpha i}|$). 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 α 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, σ adalah panjang karakteristik untuk potensial teritorial, didefinisikan sebagai $\sigma = 0.3$ m. b menyatakan sumbu semi-pendek sebuah ellips yang memperhitungkan jarakn antara agen α dan agen β , $|\vec{r}_{\alpha\beta}|$, serta kecepatan agen β , \vec{v}_β . Ketika agen β 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 $\#t = 10$).

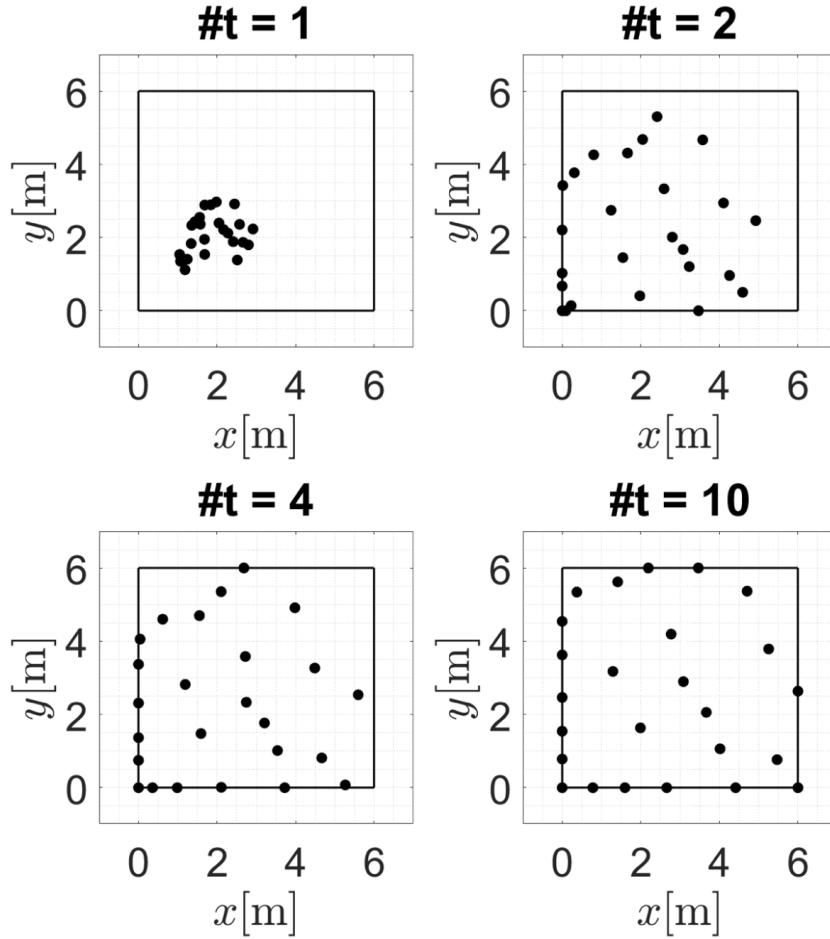
2.3.4 Attractive Effect

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 α 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}_α daripada objek yang berada di belakang agen α . Untuk memperhitungkan perbedaan ini, Helbin memperkenalkan istilah bobot persepsi w_ϕ . Di sini, 2ϕ adalah sudut pandang efektif dan c_ϕ 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_ϕ 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_α 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 α 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 α , w_α , 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 α dijelaskan oleh vektor \vec{r}_α , 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_α^{max}). Pembatasan ini diterapkan dengan mereduksi kecepatan aktual \vec{v}_α dari kecepatan preferensi \vec{w}_α . Di sini, vektor satuan \hat{w}_α 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 α dihitung untuk setiap iterasi waktu langkah adalah sebagai berikut.

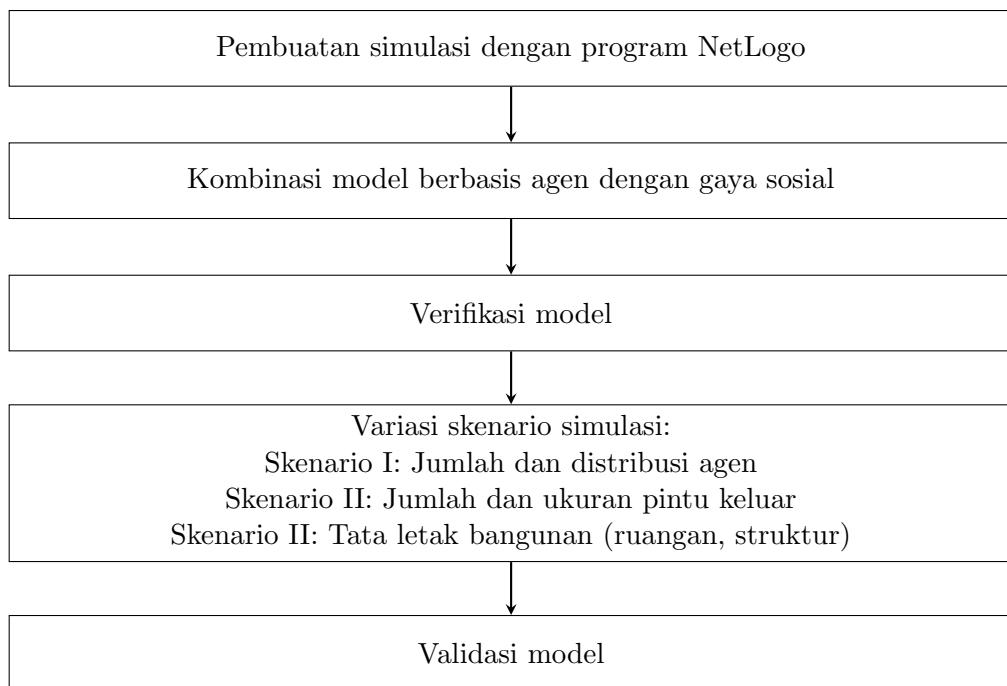
$$\vec{r}_\alpha(t + \Delta t) = \vec{v}_\alpha(t)\Delta t + \vec{r}_\alpha(t) \quad (2.22)$$

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. Serta skenario ketiga yang memvariasikan tata letak bangunan seperti jumlah ruangan, jumlah lantai, serta jenis struktur seperti tangga. 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

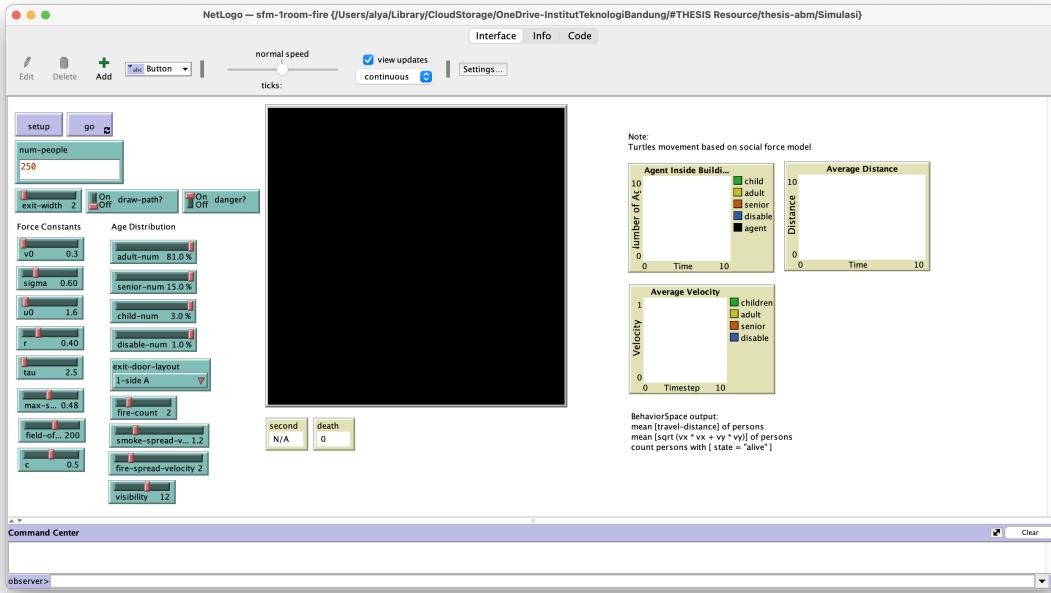
Lingkungan yang digunakan pada penelitian ini akan dibuat dengan menggunakan perangkat lunak NetLogo yang merupakan program simulasi multi-agen dan pemodelan lingkungan yang dikembangkan oleh Uri Wilensky di *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* (CCL) Universitas Northwestern (Wilensky, 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

Bab 3. Metodologi Penelitian

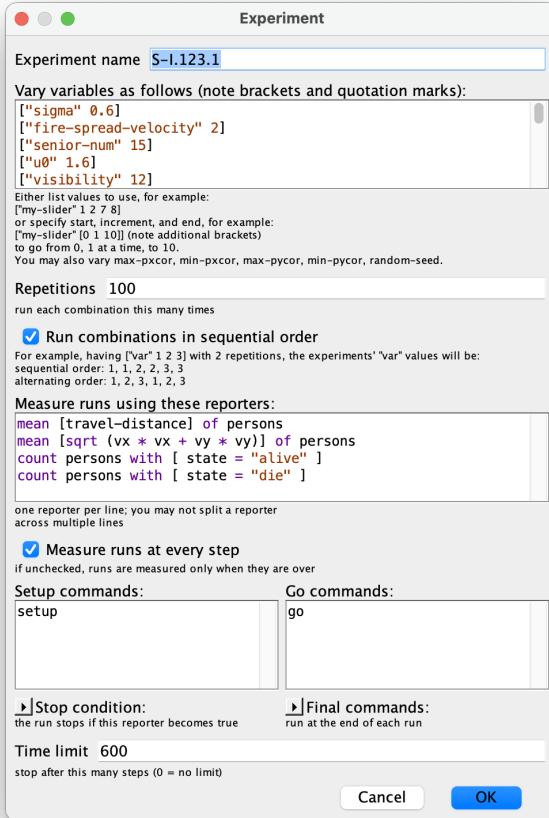


Gambar 3.2 Tampilan antarmuka program NetLogo.

melakukan eksperimen dengan model. BehaviorSpace merupakan salah satu *tools* 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.



Gambar 3.3 Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo.

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

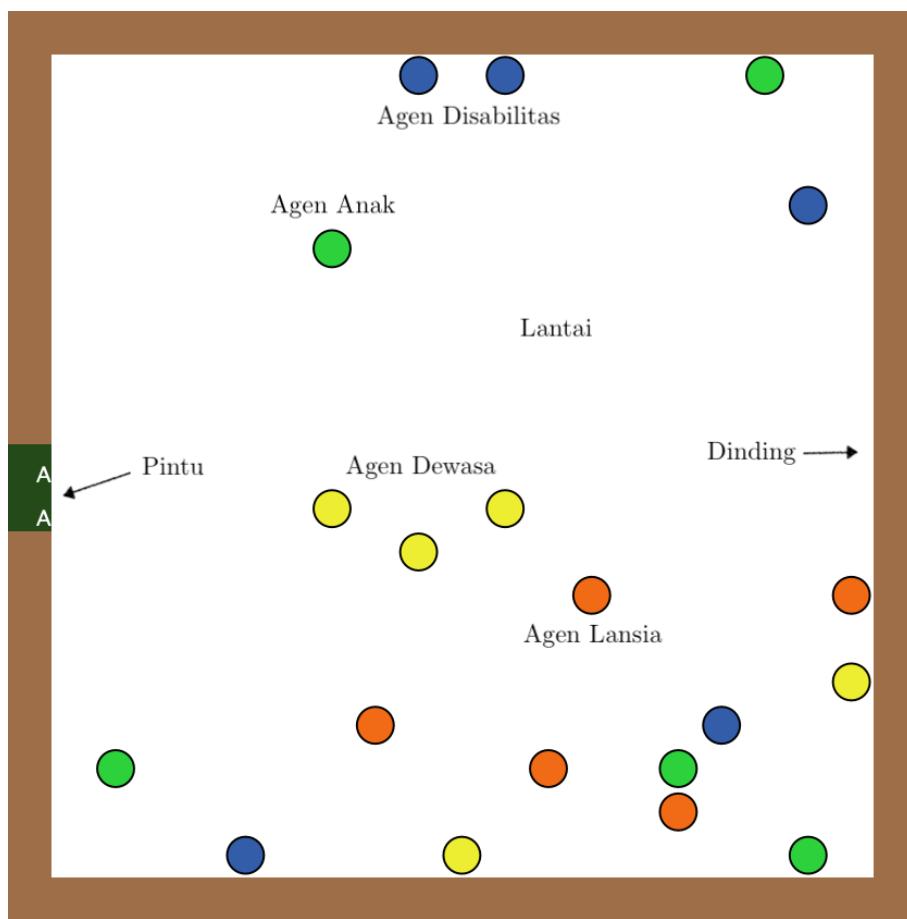
Tabel 3.1: Deskripsi *patches* pada simulasi dengan NetLogo.

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,



Gambar 3.4 Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi.

dan disabilitas. Masing-masing kategori agen memiliki nilai parameter yang 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 Cotfas 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 ± 0.30	0.36 ± 0.12
Dewasa	1.25 ± 0.30	0.5 ± 0.12
Lansia	0.8 ± 0.30	0.32 ± 0.12
Disabilitas	0.79 ± 0.32	0.316 ± 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 naluriah 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

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

Variabel	Nilai	Deskripsi
agent-type	child / adult / senior / disable	Menunjukkan kategori usia agen.
color	lime / yellow / orange / blue	Masing-masing warna akan 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.
init-direction	[0,360]	Merupakan sudut arah tuju agen pada saat inisialisasi simulasi.
vx dan vy	sin init-direction dan cos init-direction	Merupakan vektor kecepatan aktual agen. Nilainya akan terus diperbarui seiring dengan pergerakan agen pada setiap <i>timestep</i> .
max-speed	0.36 + random-float 0.24 - 0.12 / 0.5 + random-float 0.24 - 0.12 / 0.32 + random-float 0.24 - 0.12 / 0.316 + random-float 0.256 - 0.128	Nilainya menunjukkan kecepatan ideal yang ingin dicapai oleh agen dan mengacu pada 3.3. Angka setelah <i>random-float</i> menunjukkan standar deviasi. Masing-masing agen akan memperoleh <i>max-speed</i> yang berbeda akibat adanya nilai standar deviasi acak yang dijumlahkan dari kecepatan ideal acuan.

atau agen lain dengan *obstacle effect* dan *territorial effect* pada model gaya sosial. 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 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.

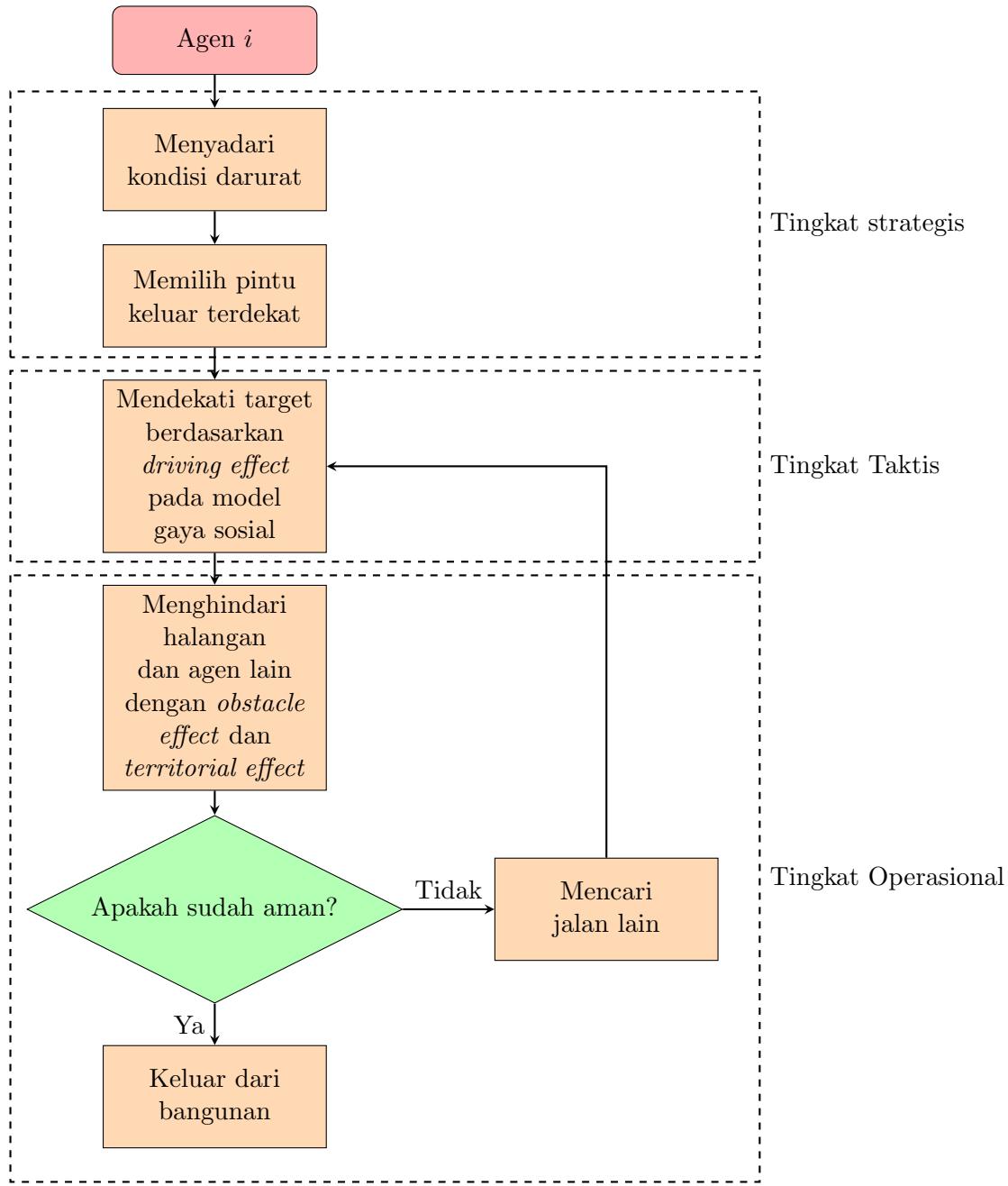
Tabel 3.5: Properti *patch* dalam simulasi evakuasi pada penelitian ini.

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.

Kecepatan ideal yang berbeda akan memastikan adanya variasi kecepatan maksimum yang berbeda dari waktu ke waktu untuk mencerminkan karakteristik pergerakan pedestrian. Dalam simulasi ini, kecepatan ideal yang diinginkan oleh pejalan kaki ditentukan berdasarkan Tabel ?? yang telah diuraikan sebelumnya.

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

Gambar 3.5 Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan.



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.

Masing-masing pedestrian akan memiliki properti berupa koordinat posisi dalam

Algorithm 1 Algoritma model gaya sosial.

Require: *current-patch*

Ensure: *v*

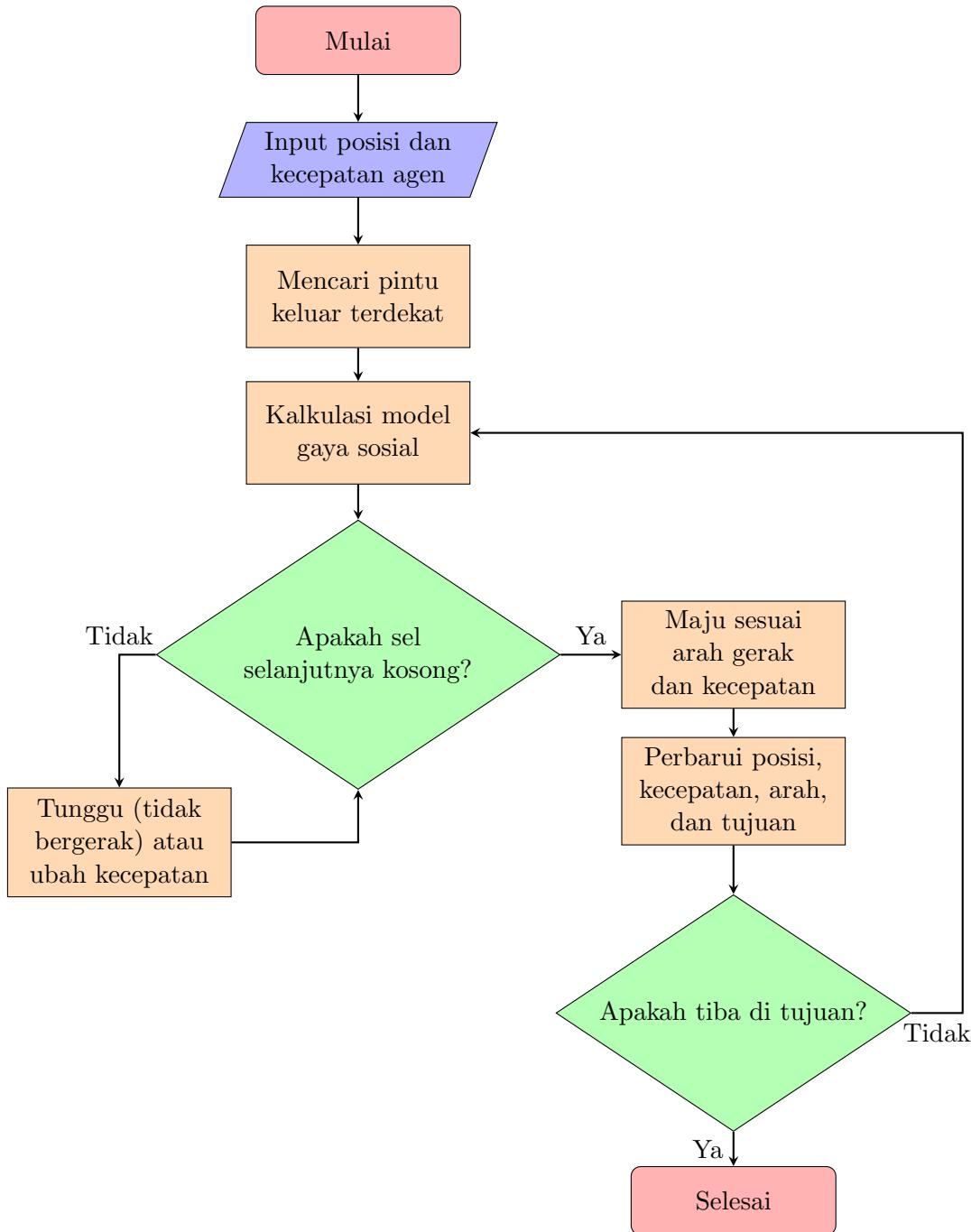
- 1: inisialisasi;
- 2: $\tau \leftarrow$ waktu relaksasi
- 3: *max-speed* \leftarrow kecepatan maksimum pedestrian
- 4: Tentukan arah yang diinginkan;
- 5: **if** nearest *patch-id* is *exists* or *doors* **then**
- 6: *goal* = *door-patch*
- 7: **end if**
- 8: Tentukan driving force;
- 9: $driving\ force \leftarrow \frac{1}{\tau} \times max-speed \times distance - v$
- 10: Tentukan obstacle force;
- 11: **if** *patch-id* is *walls* or *obstacles* **then**
- 12: *obstacle-force* $\leftarrow u_0 * \exp - \frac{distance}{r}$
- 13: **end if**
- 14: Tentukan territorial force;

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

Gambar 3.6 Diagram alir simulasi evakuasi pedestriant.



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.

Tabel 3.6: Nilai parameter model gaya sosial.

Parameter Model	Nilai Satuan Internasional	Konversi Satuan NetLogo
v^0	1.34 ms^{-1}	0.5 patch/tick
v_{α}^{max}	$1.3 \cdot v_{\alpha}^0$	0.65 patch/tick
$V_{\alpha\beta}^0$	$2.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$	0.336 patch ² /tick ²
σ	0.3 m	0.6 patch
$U_{\alpha\beta}^0$	$10 \text{ m}^2/\text{s}^2$	1.6 patch ² /tick ²
R	0.2 m	0.4 patch
τ_{α}	0.5 s	2.5 tick
2ϕ	200	200
c	0.5	0.5

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 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 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

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	σ	[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	τ_α	[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_α^0	[0, 1.44]	Kecepatan pergerakan agen. Masing-masing distribusi usia agen memiliki kecepatan berjalan sesuai dengan tabel ??, pada slider digunakan kecepatan berlari manusia normal sebesar 13 km/h yang jika dikonversi akan menjadi 1.44 patch/tick.
field-of-view	2ϕ	[0, 360]	Sudut pandang efektif yang menunjukkan sudut pandangan agen.
c	c_ϕ	[0, 1]	Faktor bobot untuk situasi di luar sudut pandang efektif, di mana objek di belakang agen akan memiliki nilai konstanta yang semakin kecil.

memiliki relasi dan tidak mengenal satu sama lainnya.

Terdapat empat skenario yang dipertimbangkan dengan mengubah beberapa aspek berbeda, yaitu: 1) variasi jumlah dan distribusi agen, 2) variasi jumlah dan ukuran pintu keluar, serta 3) variasi tata letak bangunan seperti jumlah ruangan, jumlah lantai, dan adanya struktur-struktur tambahan seperti tangga. Setiap skenario dibagi menjadi sub-skenario untuk menunjukkan bagaimana variasi dalam indikator yang dipilih akan berdampak pada hasil keseluruhan. Setiap skenario akan disimulasikan sebanyak 100 dengan menggunakan BehaviorSpace dan nilai akhir yang dilaporkan merupakan hasil rata-rata dari keseluruhan simulasi.

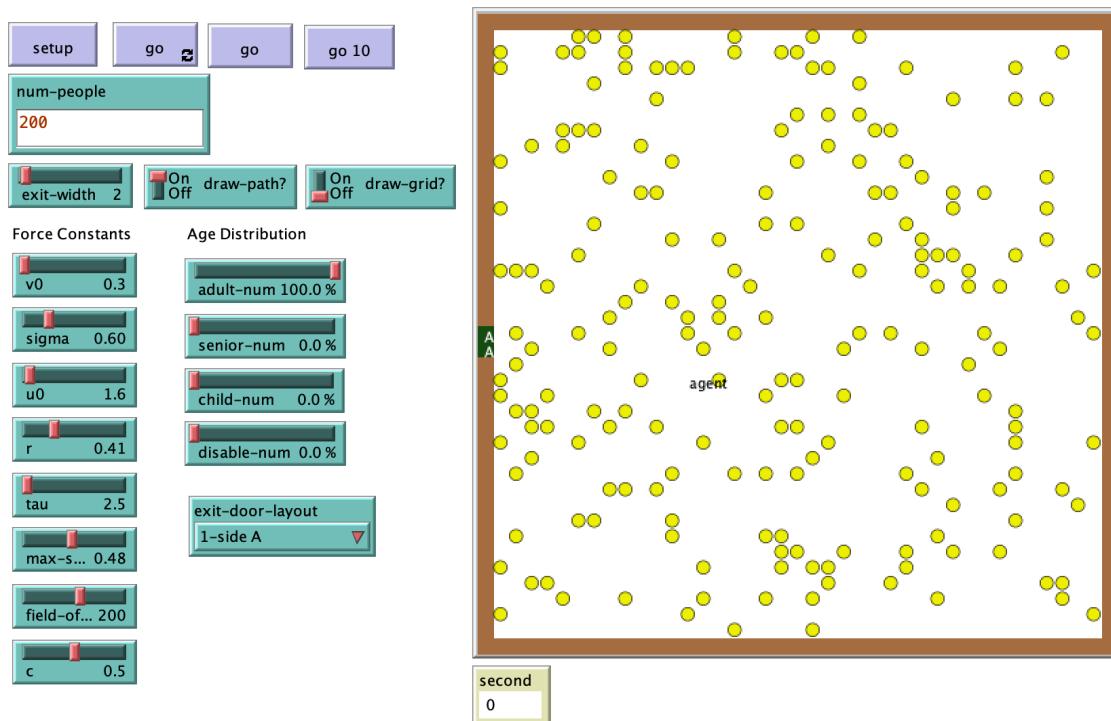
BAB 4

HASIL AWAL

4.1 Verifikasi

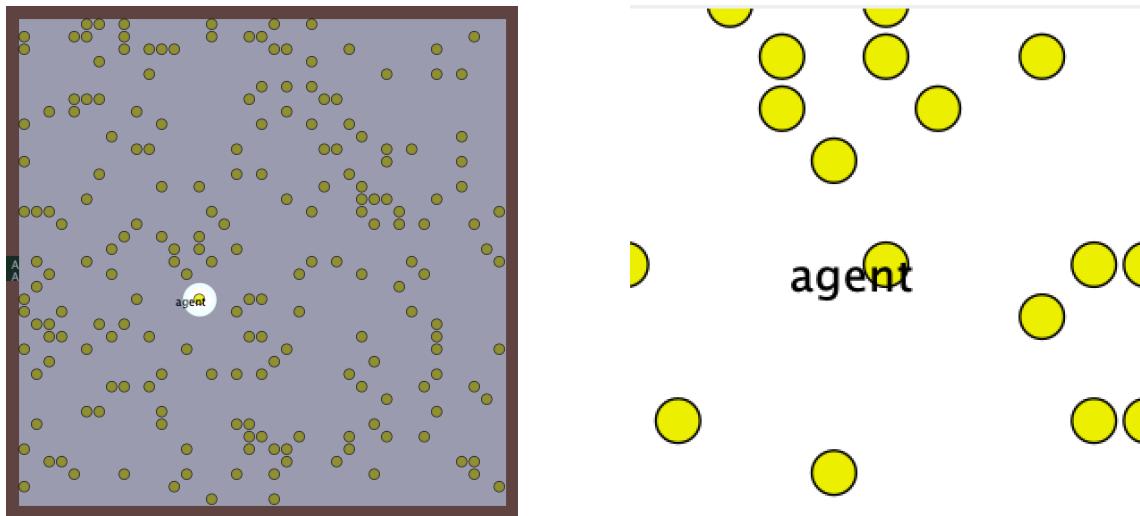
Pada penelitian ini, model diimplementasi menggunakan NetLogo versi 6.3.0 dengan agen `persons` merepresentasikan pedestrian yang tersebar secara acak di sebuah lingkungan berupa ruangan berukuran 41×41 dengan masing-masing *patch* berukuran $0.5m \times 0.5m$.

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*.



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

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*.



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

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.

Pada awal simulasi, variabel-variabel yang berkaitan dengan model gaya sosial bernilai 0 karena agen belum melakukan kalkulasi model gaya sosial untuk

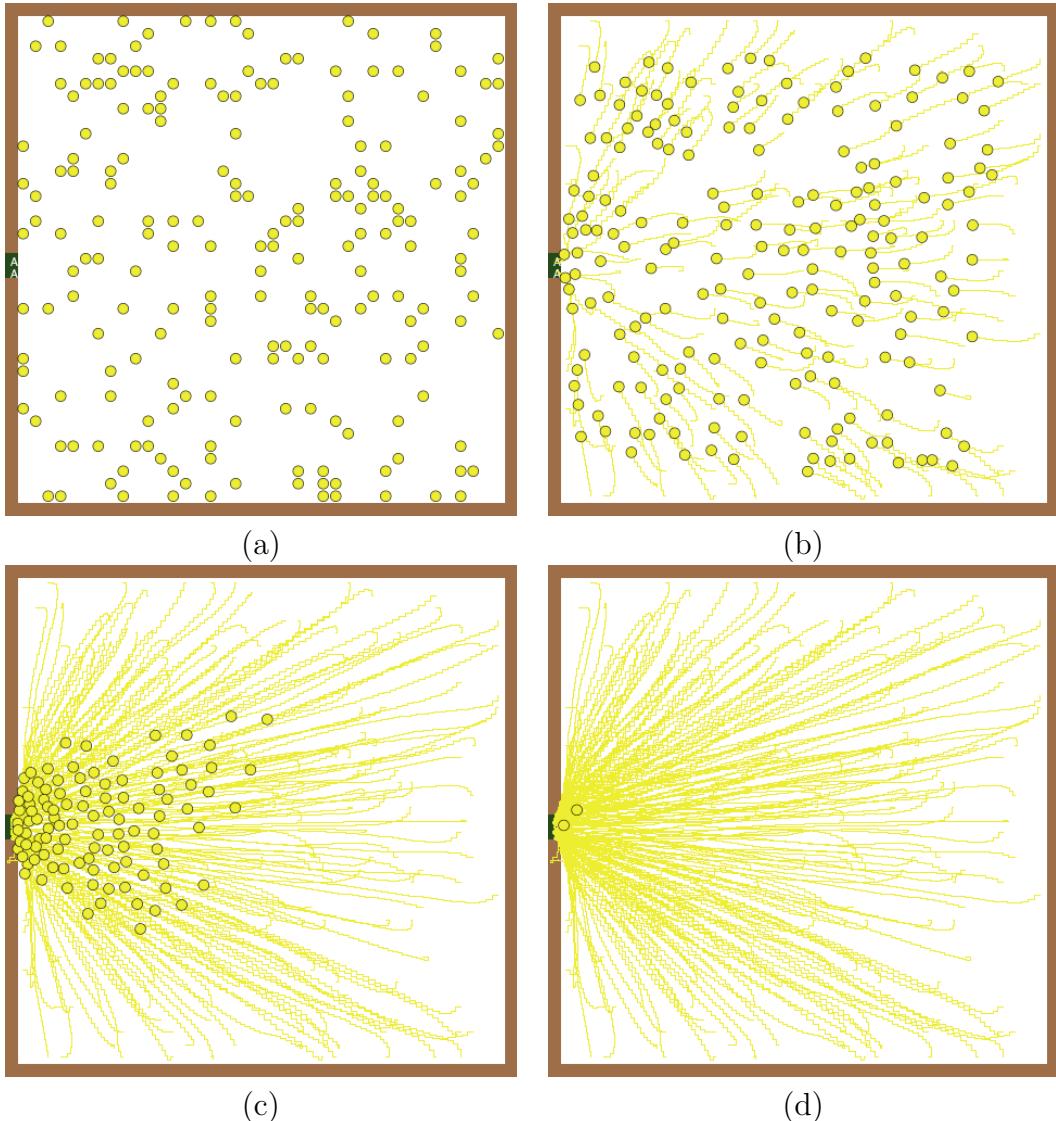
menentukan arah geraknya seperti yang dapat dilihat pada Gambar 4.3. Pada saat $t = 1\text{tick}$, agen telah melakukan kalkulasi model gaya sosial yang memberikan kecepatan dan arah gerak sehingga posisi agen akan bergeser seperti tampak pada Gambar 4.4.

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 $t = 1\text{tick}$.

Properti agen ini akan terus diperbarui hingga agen berhasil menuju tujuannya atau dengan kata lain berhasil keluar dari bangunan. Pada Gambar 4.5, tampak 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 perjalannya. 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 lokasi yang terdapat objek yang menarik minat pedestrian.

4.2 Hasil Simulasi



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

Tabel 4.1: Data waktu yang dibutuhkan agen untuk melakukan evakuasi.

Skenario	Waktu evakuasi (<i>tick</i>)		
	Min	Mean	Max
adult-50	82	97.29 ± 6.41	112
adult-100	91	102.1 ± 4.2	112
adult-200	98	109.13 ± 11.7	208
child-50	120	150.55 ± 12.7	176
child-100	139	161.69 ± 9.07	182
child-200	164	176.02 ± 5.93	189
senior-50	144	177.04 ± 16.3	215
senior-100	161	191.61 ± 10.6	216
senior-200	196	217.07 ± 8.18	238
disability-50	146	187.02 ± 17.9	228
disability-100	183	204.46 ± 10.8	229
disability-200	218	232.19 ± 6.76	250

Tabel 4.2: Data jarak yang ditempuh agen ketika melakukan evakuasi.

Skenario	Jarak (<i>patch</i>)		
	Min	Mean	Max
adult-50	33.56	39.21 ± 2.06	43.24
adult-100	35.32	39.54 ± 1.80	43.01
adult-200	28.08	40.93 ± 7.46	100.05
child-50	28.81	38.02 ± 3.45	43.55
child-100	28.96	39.41 ± 2.39	43.46
child-200	22.62	37.81 ± 5.07	43.25
senior-50	31.19	37.73 ± 2.76	43.37
senior-100	20.45	38.18 ± 4.01	43.10
senior-200	19.97	35.52 ± 6.23	43.25
disability-50	26.27	37.76 ± 3.09	42.70
disability-100	26.02	38.11 ± 3.42	42.84
disability-200	18.97	35.41 ± 6.61	43.28

Tabel 4.3: Data kecepatan agen ketika melakukan evakuasi.

Skenario	Kecepatan agen (<i>patch/tick</i>)		
	Min	Mean	Max
adult-50	0.26	0.33 ± 0.03	0.42
adult-100	0.23	0.30 ± 0.03	0.36
adult-200	0.20	0.28 ± 0.04	0.56
child-50	0.12	0.17 ± 0.02	0.26
child-100	0.13	0.16 ± 0.01	0.20
child-200	0.09	0.15 ± 0.02	0.19
senior-50	0.07	0.13 ± 0.02	0.21
senior-100	0.08	0.13 ± 0.01	0.16
senior-200	0.07	0.12 ± 0.01	0.15
disability-50	0.10	0.12 ± 0.02	0.18
disability-100	0.06	0.11 ± 0.01	0.15
disability-200	0.06	0.11 ± 0.01	0.13

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan Sementara

5.2 Rencana

Pustaka

- 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). *Implementation 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 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
- 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
- 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 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>
- Koester, C. (2016, 6). *Fire drills: Evaluating employee exit strategies*. Retrieved 2 February 2023, from <https://ohsonline.com/articles/2016/03/01/fire-drills-evaluating-employee-exit-strategies>

- drills-evaluating-employee-exit-strategies.aspx
- 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>
- 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 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
- 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
- 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.