

**PEMODELAN EVAKUASI KERUMUNAN
PADA KEBAKARAN GEDUNG 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

Daftar Isi

Daftar Isi	ii
Daftar Tabel	iii
Daftar Gambar	iv
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2 DASAR TEORI	5
2.1 Pemodelan Pedestrian	5
2.1.1 Perilaku Kolektif	5
2.1.2 Klasifikasi Model	7
2.2 Simulasi Berbasis Agen	10
2.2.1 Sistem Kompleks dan <i>Emergence</i>	11
2.2.2 Karakteristik ABM	12
2.2.3 Komponen ABM	12
2.2.4 Verifikasi, Validasi, dan Replikasi	14
2.2.5 Analisis Sensitivitas	15
2.3 Model Gaya Sosial	15
2.3.1 <i>Driving Effect</i>	16
2.3.2 <i>Obstacle Effect</i>	17
2.3.3 <i>Territorial Effect</i>	18
2.3.4 <i>Attractive Effect</i>	19
2.3.5 Sudut Pandang Efektif	20
2.3.6 Total Efek	21
2.4 Protokol ODD	22
3 METODOLOGI PENELITIAN	28
3.1 Konstruksi Model	28

Daftar Isi

3.1.1	Perangkat Lunak	29
3.1.2	Lingkungan dan Waktu	30
3.1.3	Properti Agen	31
3.1.4	Perilaku Agen	34
3.2	Simulasi	34
3.2.1	Diagram Alir	34
3.2.2	Parameter	35
3.2.3	Skenario	37
3.2.4	Validasi	41
4	HASIL SIMULASI	43
4.1	Skenario 1	43
4.1.1	Hasil Simulasi	43
4.2	Skenario 2	43
4.2.1	Hasil Simulasi	43
4.3	Skenario 3	43
5	KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Saran	46
Daftar Pustaka		47
Pustaka		47

Daftar Tabel

1.1	Deskripsi <i>patches</i> pada simulasi dengan NetLogo.	3
3.1	Deskripsi <i>patches</i> pada simulasi dengan NetLogo.	32
3.2	Jenis agen dalam simulasi evakuasi.	32
3.3	Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia dengan satuan internasional.	33
3.4	Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia dengan satuan NetLogo.	34
3.5	Nilai parameter model gaya sosial.	36
3.6	Penjelasan konstanta model gaya sosial.	39
3.7	Skenario ke-1 variasi jumlah dan distribusi agen.	40
3.8	Skenario ke-2 variasi jumlah dan distribusi agen.	41
4.1	Waktu evakuasi yang dibutuhkan pada skenario pertama.	43
4.2	Waktu evakuasi yang dibutuhkan agen pada skenario kedua.	44
4.3	Kecepatan agen saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.	44
4.4	Jarak yang ditempuh agen saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.	44
4.5	Jumlah korban yang meninggal saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.	45

Daftar Gambar

2.1	Fenomena penyumbatan ketika pedestrian melewati pintu.	6
2.2	Jalur pedestrian yang terbentuk dari dua arah kelompok yang berlawanan.	7
2.3	Tingkatan pemodelan perilaku pedestrian.	8
2.4	Klasifikasi pendekatan pemodelan pedestrian. Garis merah menunjukkan pemodelan berdasarkan aturan, sedangkan garis hijau menunjukkan pemodelan berdasarkan percepatan.	10
2.5	Efek penggerak (panah merah) untuk agen α (titik biru) dengan kecepatan aktual mengarah ke kanan (panah biru).	17
2.6	Potensial tolak-menolak $U_{\alpha B}$ yang dihasilkan oleh objek B pada agen α dengan $R = 0.2$ m dan $U_{\alpha B}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$	18
2.7	Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain.	20
2.8	Komponen protokol ODD sesuai urutan.	24
3.1	Diagram alir langkah-langkah penelitian.	28
3.2	Tampilan antarmuka program NetLogo.	30
3.3	Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo.	31
3.4	Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi.	32
3.5	Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan.	35
3.6	Diagram alir simulasi evakuasi pedestrian.	37
3.7	Konstanta model gaya sosial sebagai parameter simulasi.	38
3.8	Denah bangunan yang digunakan pada skenario kedua: a) bangunan dengan satu pintu keluar di dinding sisi A dengan ukuran 2 patch, b) bangunan dengan satu pintu keluar di dinding sisi A dengan ukuran 5 patch, c) bangunan dengan satu pintu keluar di dinding sisi A dengan ukuran 15 patch, d) bangunan dengan dua pintu keluar di dinding sisi A dengan ukuran 2 patch, e) bangunan dengan dua pintu keluar di dinding sisi A dengan ukuran 5 patch, f) bangunan dengan dua pintu keluar di dinding sisi A dan C dengan ukuran 3 patch, g) bangunan dengan tiga pintu keluar di dinding sisi A, B, dan D dengan ukuran 3 patch, h) bangunan dengan empat pintu keluar di dinding sisi A, B, C, dan D dengan ukuran 3 patch.	42

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. 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: Deskripsi *patches* pada simulasi dengan NetLogo.

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

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.

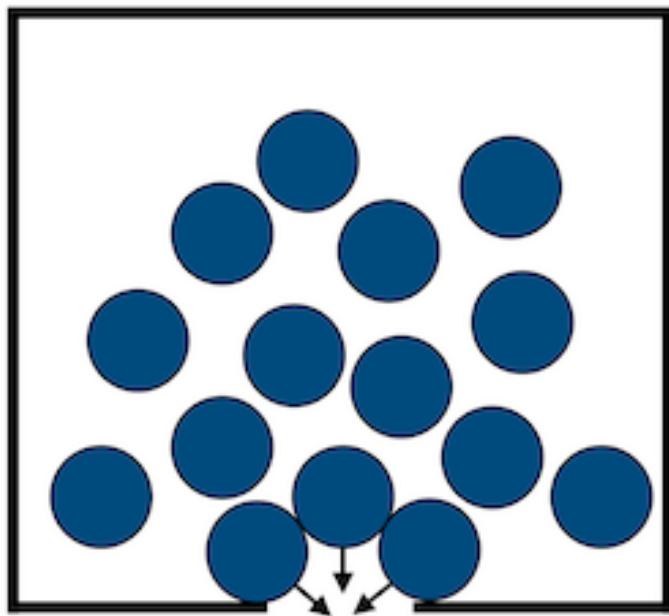
2.1.1 Perilaku Kolektif

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 (Schadschneider, Klüpfel, Kretz, Rösch, & Seyfried, 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.

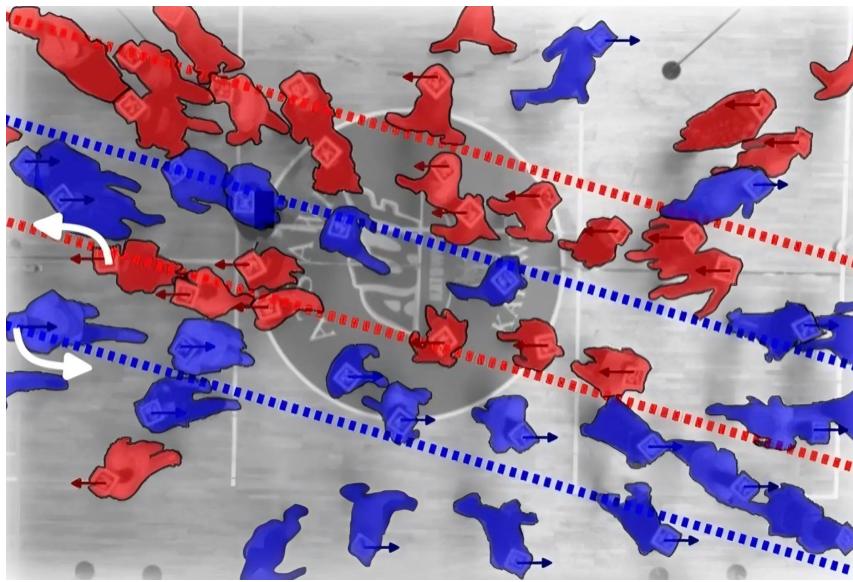
- Gelombang kepadatan (*density waves*)

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 pedestri yang terbentuk dari dua arah kelompok yang berlawanan.

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.

- Pola di persimpangan (*patterns at intersection*)

Ketika beberapa arus pedestri 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 dua.

- Situasi darurat dan panik (*emergency situation and panic*)

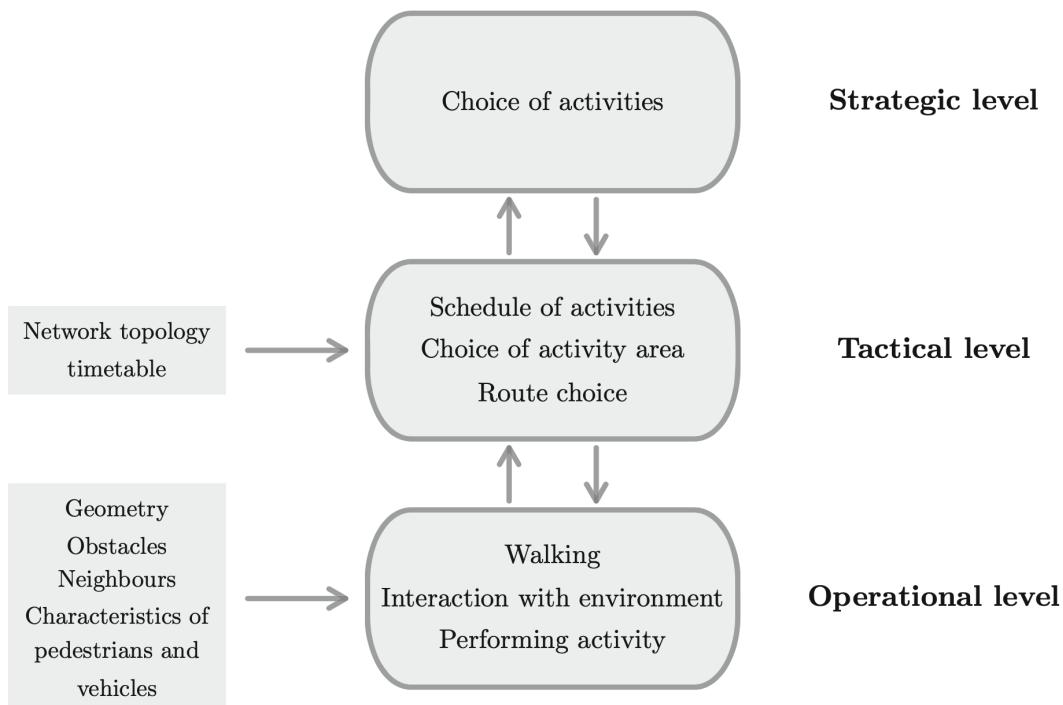
Dalam situasi darurat, media sering mengaitkan “panik” dengan perilaku egois, asosial, dan irasional yang memengaruhi suatu kelompok. Namun, pada kenyataannya, ditemukan bahwa karakteristik ini tidak berperan. Selanjutnya, dari pandang statistik, tidak ada data yang cukup untuk memutuskan relevansi efek-efek ini dalam situasi darurat karena hampir tidak mungkin melakukan eksperimen “realistik”.

2.1.2 Klasifikasi Model

Suatu klasifikasi atau kategorisasi yang sering digunakan dalam dinamika pedestri 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 2.3 Tingkatan pemodelan perilaku pedestriant.

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-agensi. 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.

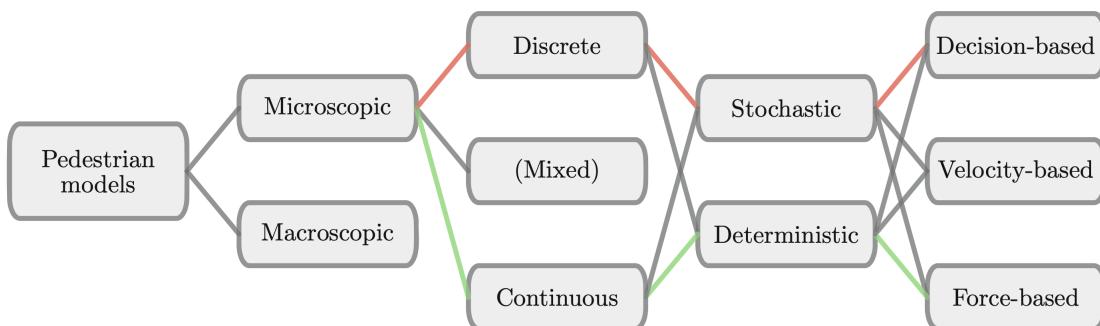
4. Berdasarkan aturan vs berdasarkan percepatan vs berdasarkan kecepatan

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 2.4 Klasifikasi pendekatan pemodelan pedestrian. Garis merah menunjukkan pemodelan berdasarkan aturan, sedangkan garis hijau menunjukkan pemodelan berdasarkan percepatan.

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 teksual 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 spontan 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 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.

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-agenn 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 perlakunya 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, Validasi, dan Replikasi

Akurasi suatu model dapat dievaluasi melalui tiga tahapan simulasi, yaitu validasi, verifikasi, dan replikasi. Validasi model adalah suatu proses menentukan apakah model yang telah diimplementasikan dapat sesuai dan menjelaskan fenomena yang terjadi di dunia nyata. 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. Terakhir, replikasi model merupakan implementasi model konseptual yang sudah ada sebelumnya yang dilakukan oleh peneliti lain. 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.

2.2.5 Analisis Sensitivitas

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.

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 memvariasikan parameter-parameter yang sudah dimiliki dalam suatu model atau menambahkan parameter baru ke dalam suatu model.

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. Selain itu, pada literatur lain efek pada SFM dinotasikan dengan menggunakan F dan f , namun pada penelitian ini F akan digunakan untuk menjelaskan gaya sedangkan f akan merujuk pada efek.

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:

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

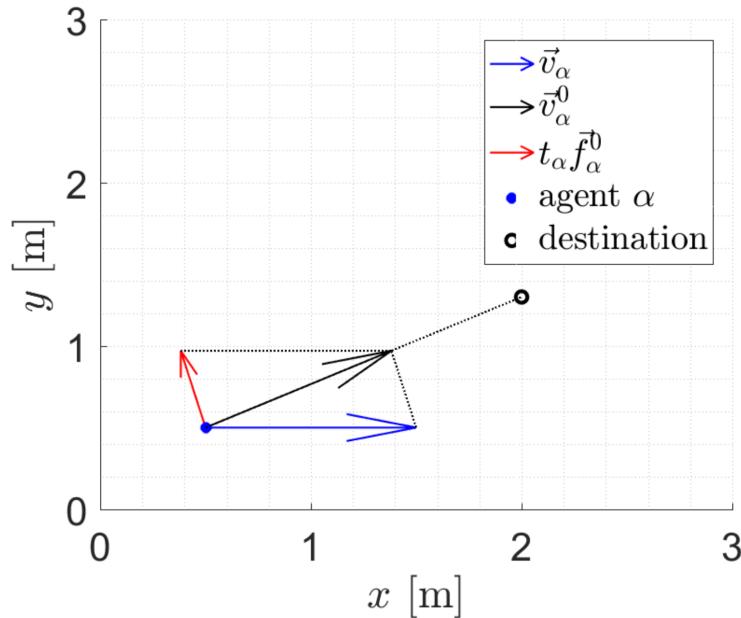
di mana $\vec{r}_\alpha(t)$ menunjukkan posisi aktual agen α pada waktu t . Lebih lanjut, tujuan yang diinginkan oleh pedestrian umumnya berupa suatu gerbang atau daerah dibanding dengan suatu titik \vec{r}_α^k , sehingga setiap saat t ia akan mengarah ke titik terdekat $\vec{r}_\alpha^k(t)$ dari gerbang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

Efek penggerak atau *the driving effect* \vec{f}_α^0 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 .

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

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{f}_α^0 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 2.5 Efek penggerak (panah merah) untuk agen α (titik biru) dengan kecepatan aktual mengarah ke kanan (panah biru).

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 2.5, 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.

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

2.3.2 *Obstacle Effect*

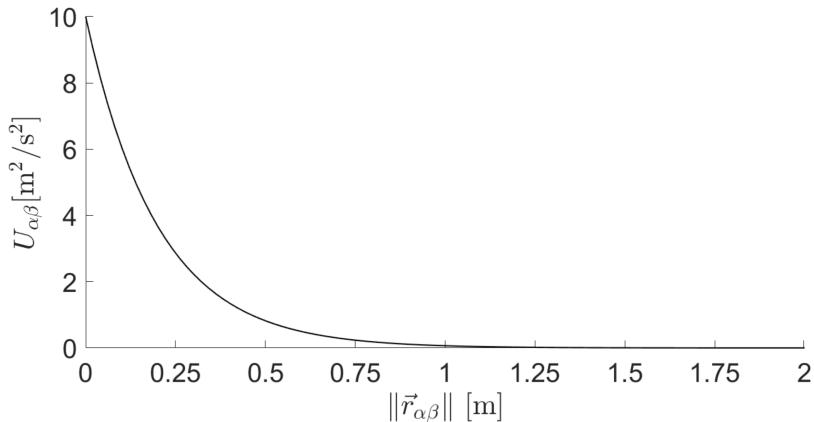
Pedestrian akan cenderung menjaga jarak dari pembatas seperti dinding atau jalan, serta menghindari halangan atau objek lain. Hal ini mengakibatkan efek tolak-menolak yang dijelaskan oleh *obstacle effect* seperti pada persamaan 2.5 ini. Efek tolak-menolak yang dihasilkan akan membuat agen menjauhi halangan,

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

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

Pada persamaan 2.5, $U_{\alpha B}$ menunjukkan potensial tolak-menolak yang nilainya akan menurun secara eksponensial dengan jarak antara agen α dan objek B yang terdekat dengan agen α , ($|\vec{r}_{\alpha B}|$). Pengurangan eksponensial ini diilustrasikan dalam gambar 2.6 dengan panjang karakteristik $R = 0.2$ m dan nilai $U_{\alpha B}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$.

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



Gambar 2.6 Potensial tolak-menolak $U_{\alpha B}$ yang dihasilkan oleh objek B pada agen α dengan $R = 0.2$ m dan $U_{\alpha B}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$.

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.

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

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 2.7. 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 $\#t = 10$).

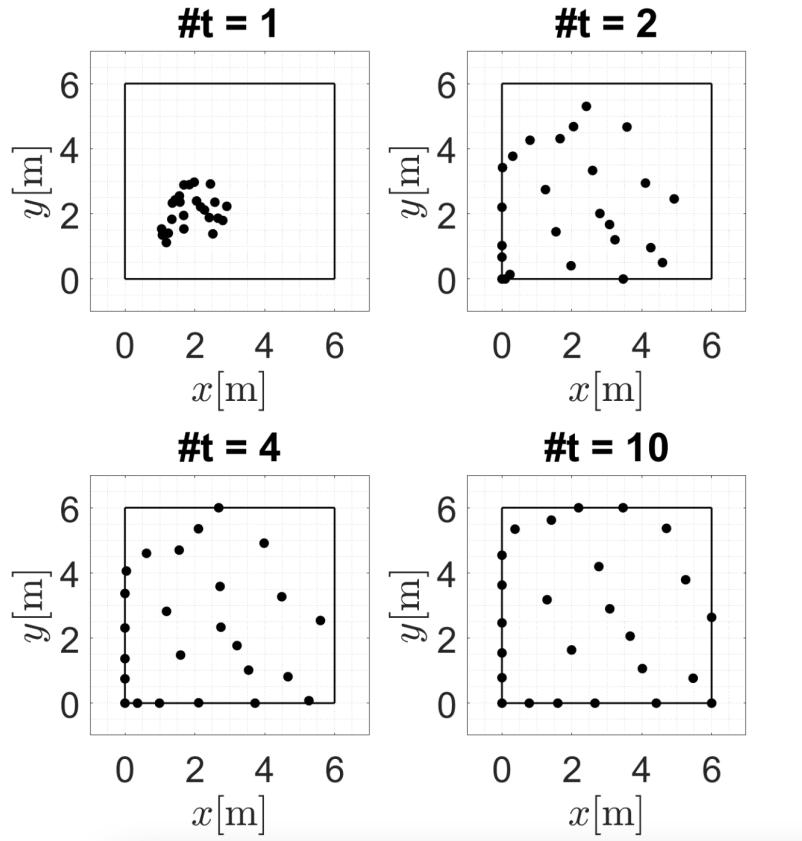
2.3.4 Attractive Effect

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

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

Dengan $\vec{r}_{\alpha i} = \vec{r}_\alpha - \vec{r}_i$ adalah jarak antara agen α dengan objek i . Besarnya efek atraktif $|\vec{f}_{\alpha i}|$ 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 2.7 Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain.

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 $\vec{f}_{\alpha\beta}$ dan efek atraktif $\vec{f}_{\alpha i}$ akan menjadi seperti berikut.

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

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

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.

$$\vec{f}_\alpha(t) = \vec{f}_\alpha^0 + \sum_B \vec{f}_{\alpha B} + \sum_\beta \vec{f}_{\alpha\beta} + \sum_i \vec{f}_{\alpha i} \quad (2.16)$$

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.

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

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

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.

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

2.4 Protokol ODD

Menjelaskan suatu model berbasis persamaan dapat dilakukan dengan menuliskan serta menjabarkan persamaan dan nilai variabel yang digunakan. Berbeda dengan ABM, hal ini sulit dilakukan karena model dapat berupa suatu permasalahan kompleks dan tidak ada notasi tradisional yang dapat digunakan seperti persamaan diferensial. Namun terdapat protokol yang standar digunakan untuk menjelaskan model yang dirancang dengan menggunakan ODD (*Overview, Design*

concept, Details). Protokol ini tidak hanya berguna untuk menjelaskan simulasi yang menggunakan ABM, namun juga sebagai kerangka berpikir untuk merumuskan dan mengembangkan model (Grimm).

Protokol ODD didesain untuk menciptakan deskripsi atas suatu model yang berdasarkan fakta yang lengkap, cepat, mudah dipahami, dan terstruktur sehingga informasi dapat dijabarkan dalam urutan yang konsisten. ODD sebagai perumusan model dapat membantu menentukan formulasi keputusan dasar seperti apa saja komponen yang harus ada pada suatu model, perilaku apa saja yang harus dimiliki oleh agen, dan apa saja keluaran yang diinginkan.

Protokol ODD dimulai dengan tiga elemen, yaitu *overview* atau gambaran garis besar mengenai model dan bagaimana model tersebut dibangun, diikuti dengan elemen *design concepts* atau konsep desain yang menggambarkan karakteristik esensial ABM, dan diakhiri dengan elemen *details* atau rincian dari model yang membuat deskripsi suatu model menjadi lengkap. Ketika merumuskan ODD, terdapat tujuh komponen yang harus dilengkapi sesuai urutan.

Berikut merupakan pertanyaan yang dapat digunakan untuk menjawab masing-masing komponen protokol ODD.

1. *Purpose and patterns*

Apakah tujuan dari model yang dibangun? Pola apakah yang digunakan untuk menentukan apakah model berguna untuk mencapai atau menjawab tujuan yang telah dijabarkan?

2. *Entities, state variables, and scales*

Apa sajakah entitas atau agen yang akan digunakan pada model? Dengan variabel, atau atribut, atau properti apakah entitas ini dikarakterisasikan? Bagaimanakah resolusi temporal dan spasial serta jangkauan pada model?

3. *Process overview and scheduling*

Apakah yang akan dilakukan oleh entitas pada model? Perilaku apakah yang akan dijalankan oleh agen selama proses simulasi berjalan? Perubahan apa sajakah yang terjadi di lingkungan? Bagaimanakah waktu digambarkan di dalam simulasi?

4. *Design concept*

(a) *Basic principles*.

Bagaimanakah konsep umum, teori, hipotesis, atau pendekatan model

Elements of the ODD protocol	
Overview	1. Purpose and patterns
	2. Entities, state variables, and scales
	3. Process overview and scheduling
Design concepts	4. Design concepts <ul style="list-style-type: none"> • Basic principles • Emergence • Adaptation • Objectives • Learning • Prediction • Sensing • Interaction • Stochasticity • Collectives • Observation
	5. Initialization
	6. Input data
Details	7. Submodels

Gambar 2.8 Komponen protokol ODD sesuai urutan.

yang mendasari pemodelan? Bagaimana model terkait dengan pemikiran sebelumnya mengenai permasalahan yang ditangani? Bagaimana prinsip-prinsip yang digunakan tergabung pada desain model? Apakah model menerapkan prinsip-prinsip dalam desainnya, atau membahasnya sebagai topik studi?

(b) *Emergence.*

Hasil atau keluaran utama apakah yang dimodelkan sebagai fenomena

yang timbul dari sifat adaptif atau perilaku individu?

(c) *Adaptation.*

Sifat adaptif apa yang dimiliki oleh individu? Aturan apa yang dimiliki untuk membuat keputusan atau mengubah perilaku sebagai respons terhadap perubahan dalam diri atau lingkungan mereka? Apakah sifat-sifat ini secara eksplisit berusaha meningkatkan beberapa ukuran keberhasilan individu mengenai tujuannya? Apakah mereka menyebabkan individu memproduksi perilaku yang dapat diamati yang secara implisit diasumsikan secara tidak langsung menunjukkan kesuksesan atau ketepatan?

(d) *Objectives.*

Jika sifat adaptif secara eksplisit bertindak untuk meningkatkan beberapa ukuran keberhasilan individu dalam memenuhi tujuan, tujuan apakah yang diinginkan dan bagaimana cara mengukurnya? Ketika individu membuat keputusan dengan menimbang prioritas dan mengurutkan alternatif, kriteria apa yang digunakan?

(e) *Learning.*

Apakah individu atau agen mampu mengubah sifat adaptif dari waktu ke waktu sebagai konsekuensi dari pengalaman mereka? Jika demikian, bagaimanakah hal tersebut dapat terjadi?

(f) *Prediction.*

Bagaimana agen memprediksi kondisi masa depan yang akan dialami? Jika sesuai, model internal yang diasumsikan digunakan agen untuk memperkirakan kondisi masa depan atau konsekuensi dari keputusan mereka? Prediksi tersembunyi apakah yang tersirat dalam asumsi internal pada model ini?

(g) *Sensing.*

Variabel keadaan internal dan lingkungan apa yang dianggap dirasakan serta dipertimbangkan dalam keputusan agen? Variabel keadaan apa yang dapat diterima dan dirasakan oleh individu dan entitas lain? Jika agen merasakan satu sama lain melalui jejaring sosial, apakah struktur jaringan itu dipaksakan atau timbul dengan sendirinya? Apakah mekanisme agen memperoleh informasi dimodelkan secara eksplisit, atau apakah individu hanya diasumsikan mengetahui variabel-variabel

ini?

(h) *Interaction.*

Jenis interaksi apa saja yang diasumsikan di antara agen-agen? Apakah ada interaksi langsung di mana individu bertemu dan mempengaruhi individu lain atau interaksi tidak langsung, misalnya kompetisi? Jika interaksi tersebut melibatkan komunikasi, bagaimana komunikasi tersebut direpresentasikan pada model?

(i) *Stochasticity.*

Proses apa yang dimodelkan dengan menggunakan asumsi bahwa mereka acak atau sebagian acak? Apakah stokastik digunakan? Apakah digunakan untuk menyebabkan suatu peristiwa atau perilaku agar terjadi dengan frekuensi tertentu?

(j) *Collectives.*

Apakah individu membentuk atau menjadi bagian dari agregasi yang mempengaruhi dan dipengaruhi oleh individu lainnya? Bagaimana fenomena kolektivitas direpresentasikan? Apakah fenomena kolektif tersebut merupakan properti yang muncul dari interaksi individu seperti kawanan burung yang berkumpul sebagai hasil hari perilaku masing-masing individunya, atau hanya merupakan definisi dari pembuat model seperti kumpulan individu dengan properti tertentu yang didefinisikan untuk memisahkan jenis entitas dengan variabel keadaan dan sifatnya sendiri?

(k) *Observation.*

Data apakah yang dikumpulkan dari ABM untuk diuji, dipahami, dan dianalisis, serta bagaimana dan kapan data tersebut dikumpulkan? Apakah seluruh data keluaran digunakan secara bebas atau hanya data tertentu yang dijadikan sampel dan digunakan untuk dibandingkan dengan hasil dari studi empiris?

5. *Initialization*

Bagaimana model dipersiapkan dan diatur di awal simulasi? Seberapa banyak entitas dan jenisnya yang ada pada awal simulasi? Apa nilai pasti dari variabel keadaan yang dimiliki oleh masing-masing entitas? Apakah awal simulasi selalu memiliki pengaturan yang sama ataukah bervariasi? Apakah nilai awal dipilih secara acak atau berdasarkan data empiris?

6. *Input data*

Variabel apakah yang dimasukkan dan digunakan dalam model? Apakah model menggunakan masukan dari sumber eksternal seperti *files* data atau model lain untuk merepresentasikan proses yang berubah seiring berjalannya waktu?

7. *Submodels*

Apa saja submodel yang mewakili proses yang telah dijabarkan pada bagian *Process overview and scheduling*? Apa parameter model, dimensi, dan nilai referensi yang digunakan? Bagaimana submodel dirancang atau dipilih serta bagaimana mereka diparameterisasi dan kemudian diuji?

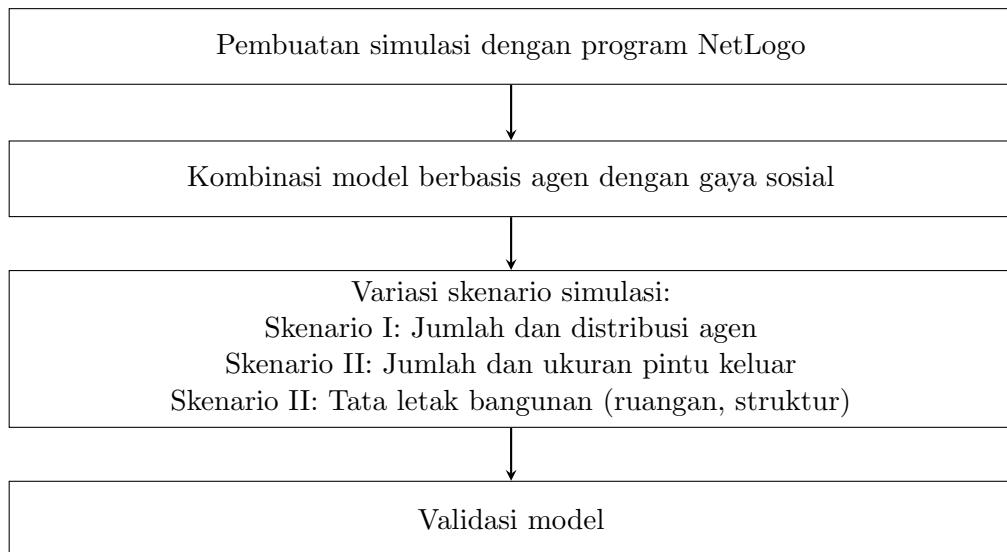
BAB 3

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. 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 untuk dilakukan validasi.

3.1.1 Perangkat Lunak

Lingkungan yang digunakan pada penelitian ini akan dibuat dengan menggunakan perangkat lunak NetLogo yang merupakan program simulasi multi-agenn 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.

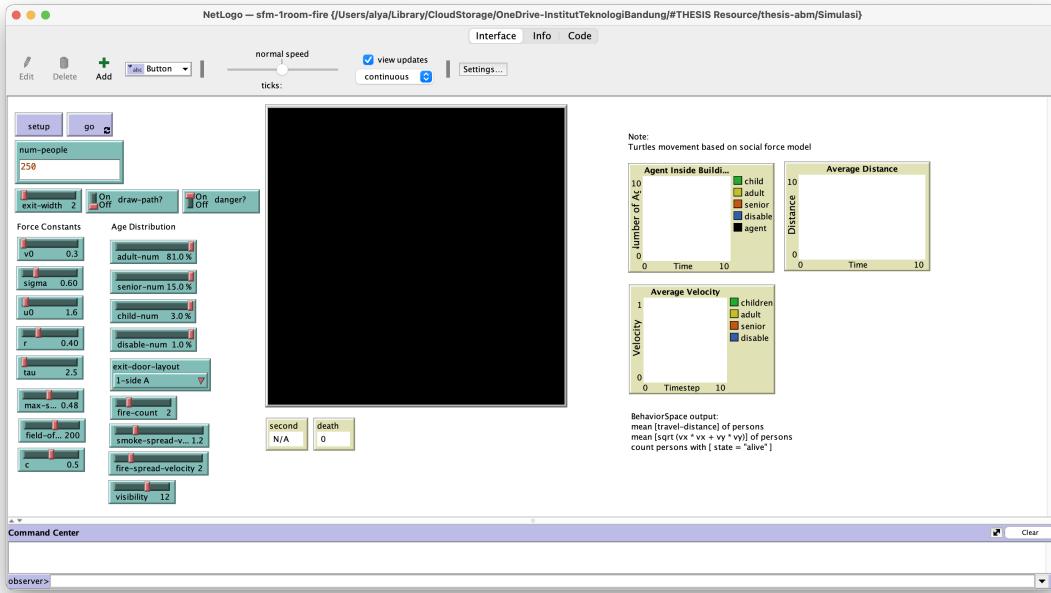
Berikut merupakan terminologi dasar yang sering digunakan di NetLogo.

- *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 menjalankan model berkali-kali, secara sistematis memvariasikan pengaturan model yang dijalankan.

BehaviorSpace merupakan salah satu *tools* yang disediakan oleh NetLogo untuk

Bab 3. Metodologi Penelitian



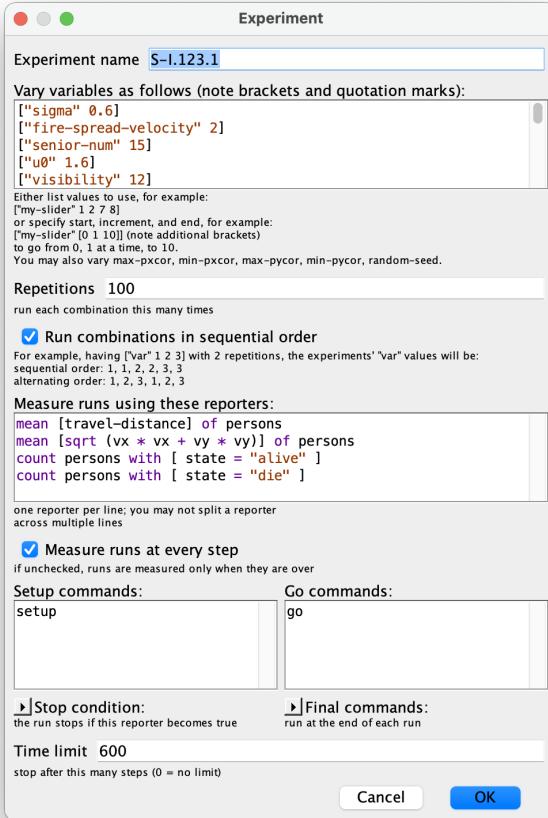
Gambar 3.2 Tampilan antarmuka program NetLogo.

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.

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



Gambar 3.3 Tampilan antarmuka BehaviorSpace pada program NetLogo.

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.

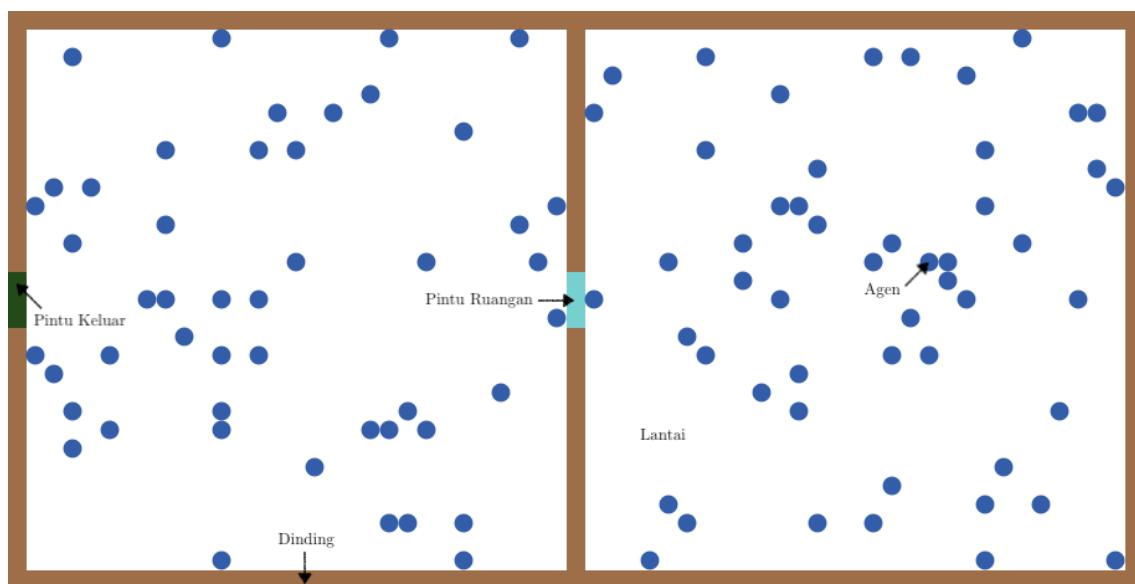
3.1.3 Properti Agen

Terdapat beberapa jenis agen yang digunakan dalam simulasi ini, seperti pada Tabel 3.2 berikut.

Satuan ruang dalam NetLogo berupa *patches* dan satuan waktunya berupa *ticks*.

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

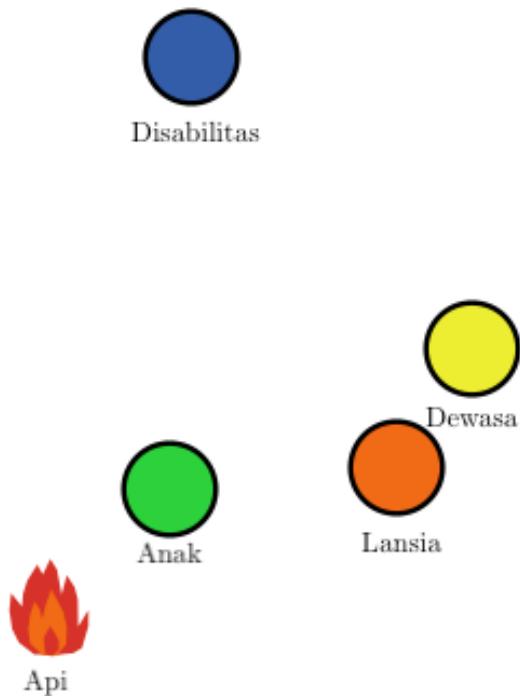
Struktur	Deskripsi	Warna	Karakteristik
<i>Floor</i>	Tempat agen tersebar dan bergerak	Putih	Dapat ditinggali dan dilewati oleh agen
<i>Walls/Obstacle</i>	<i>Patches</i> yang membatasi ruang gerak agen dan membentuk ruangan	Coklat	Tidak dapat dilewati oleh agen
<i>Doors</i>	<i>Patches</i> yang berlaku 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



Gambar 3.4 Ilustrasi lingkungan yang digunakan untuk simulasi.

Tabel 3.2: Jenis agen dalam simulasi evakuasi.

Agen	Warna	Deskripsi
<i>Child</i>	Hijau	Mewakili anak-anak dengan rentang usia < 18 tahun
<i>Adult</i>	Kuning	Dewasa normal dengan rentang usia 18 - 50 tahun
<i>Senior</i>	Oranye	Manusia lanjut usia dengan rentang usia > 50 tahun
<i>Disable</i>	Biru	Pedestrian dengan disabilitas
<i>Fire</i>	Api	Api sebagai sumber bahaya yang dapat menyebar dan menghasilkan asap



Oleh itu, diperlukan konversi dari satuan internasional menjadi satuan *patches* dan *ticks* yang digunakan, begitu pula sebaliknya. Berdasarkan Cotfas et al. (2022), berikut merupakan kecepatan rata-rata yang dimiliki oleh pedestrian berdasarkan kategori usianya.

Tabel 3.3: Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia dengan satuan internasional.

Kategori	Kecepatan rata-rata (m/s)
Anak	0.90 ± 0.30
Dewasa	1.25 ± 0.30
Lansia	0.8 ± 0.30
Disabilitas	0.79 ± 0.32

Untuk mengonversi satuan NetLogo dengan satuan internasional, dilakukan sebuah simulasi sederhana dengan agen tunggal untuk mengetahui rasio perbandingan kecepatan *patches/ticks* dengan m/s . Jika tubuh manusia dewasa diasumsikan sebagai sebuah lingkaran dengan diameter 0.5 meter yang merepresentasikan panjang bahu dan tiap *ticks* pada NetLogo menggambarkan 5 detik, maka masing-masing kecepatan agen akan berubah seperti pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4: Kecepatan berjalan rata-rata pedestrian sesuai kategori usia dengan satuan NetLogo.

Kategori	Kecepatan rata-rata (<i>patch/ticks</i>)
Anak	0.36 ± 0.12
Dewasa	0.5 ± 0.12
Lansia	0.32 ± 0.12
Disabilitas	0.316 ± 0.128

3.1.4 Perilaku Agen

Seperti yang telah disebutkan pada Tabel 2.3, 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.

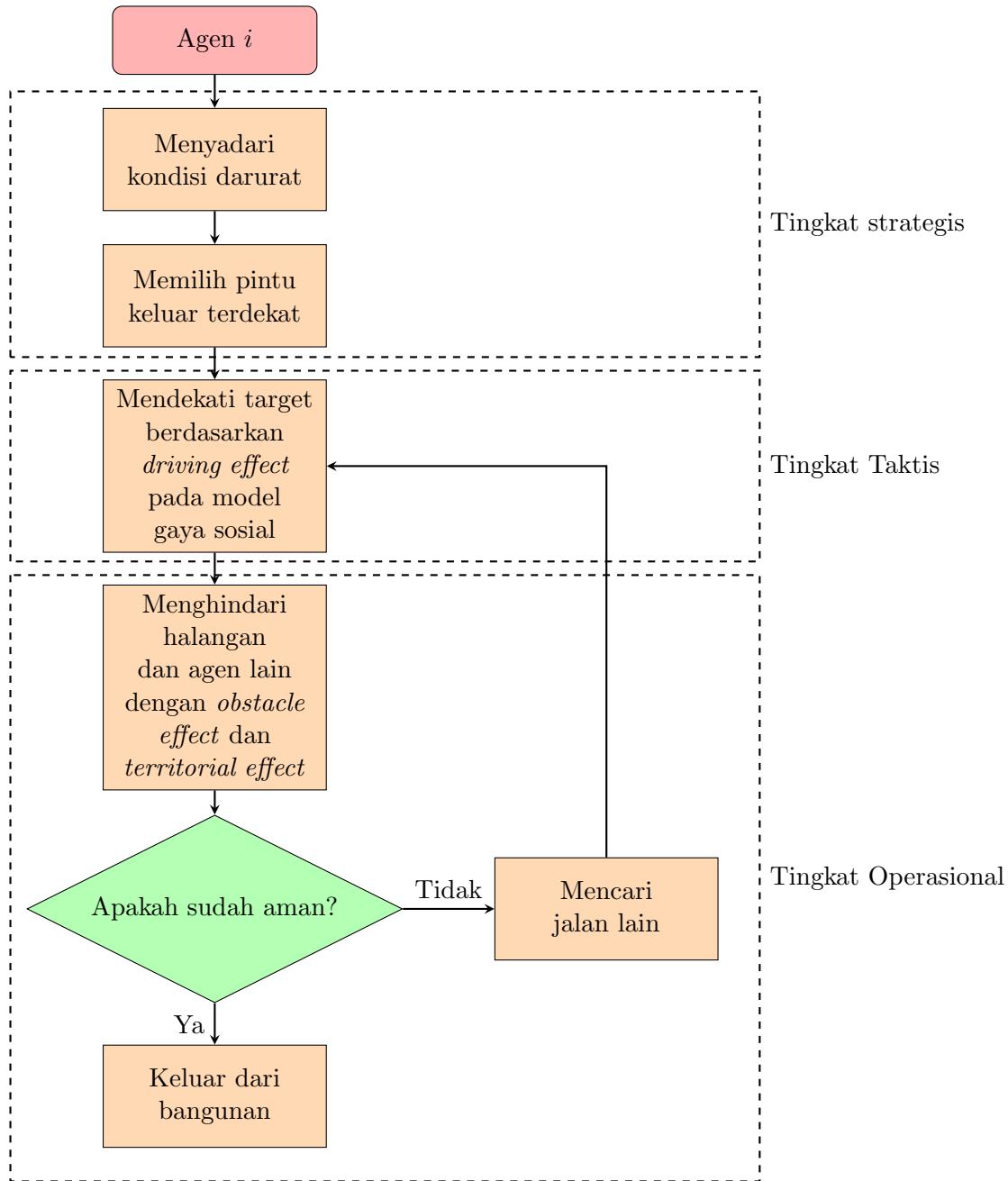
Ketika proses simulasi dilakukan, seluruh agen akan menyadari bahwa mereka sedang berada dalam kondisi darurat. Ketika dihadapkan dengan keadaan seperti itu, secara naluriah agen akan memutuskan menuju tempat yang lebih aman, dalam hal ini keluar dari bangunan. Kedua tahapan ini merupakan proses pengambilan 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, 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. Tahapan ini merupakan tingkat sosial 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.

3.2 Simulasi

3.2.1 Diagram Alir

Secara garis besar, berikut merupakan proses evakuasi agen dari bangunan yang ditunjukkan Gambar 3.6 di bawah.

Gambar 3.5 Diagram alir perilaku agen berdasarkan hierarki pengambilan keputusan.



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 disimulasi 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

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;

empiris, seperti yang terdapat pada Tabel 3.5 berikut.

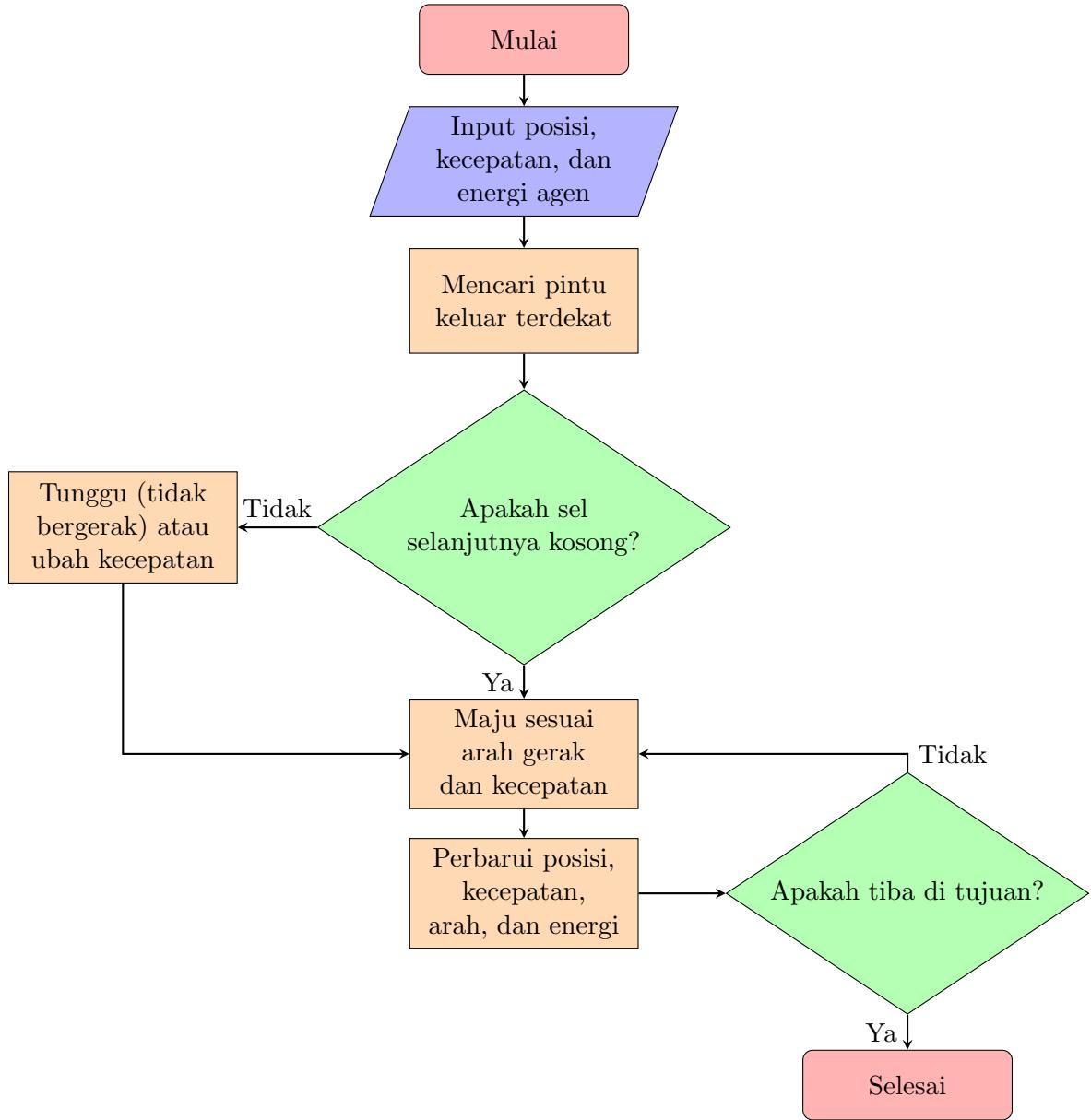
Tabel 3.5: Nilai parameter model gaya sosial.

Parameter Model	Nilai Satuan Internasional	Konversi Satuan NetLogo
v^0	$1.34ms^{-1}$	0.5 patch/tick
v_{α}^{max}	$1.3 \cdot v_{\alpha}^0$	0.65 patch/tick
$V_{\alpha\beta}^0$	$2.1m^2/s^2$	0.336 patch ² /tick ²
σ	$0.3m$	0.6 patch
$U_{\alpha\beta}^0$	$10m^2/s^2$	1.6 patch ² /tick ²
R	$0.2m$	0.4 patch
τ_{α}	$0.5s$	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 bernilai 2 patches dan satu detik bernilai 5 ticks, sehingga nilai parameter model gaya sosial dalam satuan NetLogo dapat dilihat pada Tabel 3.5 pada kolom Konversi Satuan NetLogo.

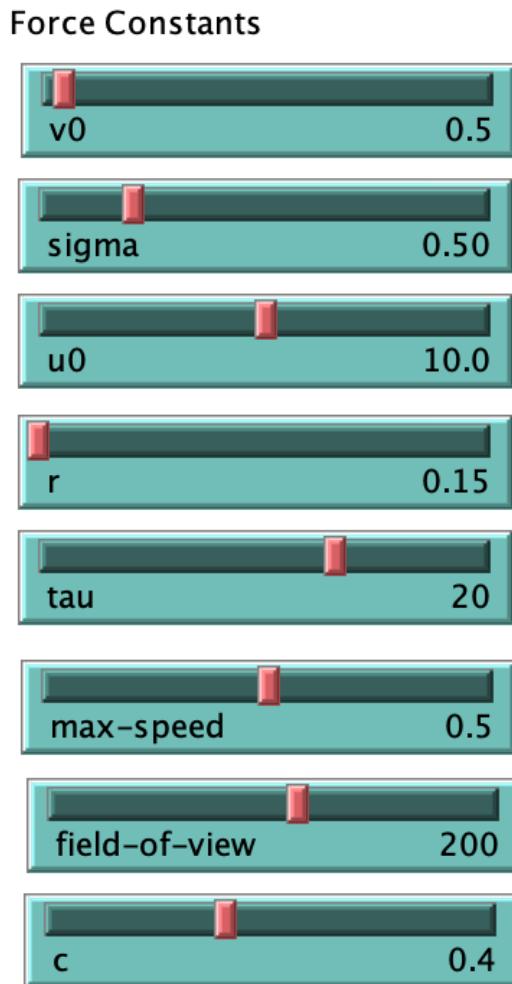
Tabel 3.6 merupakan penjelasan mengenai masing-masing parameter model gaya sosial yang mewakili suatu konstanta berdasarkan dasar teori yang sudah dibahas pada Bab 2, serta rentang nilai yang dapat digunakan dalam proses simulasi.

Gambar 3.6 Diagram alir simulasi evakuasi pedestrian.



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 bahan 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



Gambar 3.7 Konstanta model gaya sosial sebagai parameter simulasi.

terdekat, artinya masing-masing agen yang terdapat pada proses simulasi tidak 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.

Tabel 3.6: 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 3.4, 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.

Skenario 1

Skenario pertama melihat perbedaan waktu evakuasi ketika jumlah dan distribusi usia agen yang bervariasi pada sebuah bangunan dengan satu ruangan dan satu pintu keluar seperti pada Gambar ???. Tabel 3.7 menampilkan daftar sub-skenario yang akan digunakan.

Skenario dengan distribusi agen 81.0% merupakan agen dewasa, 15.0% adalah agen lansia, 3.0% merupakan agen berusia anak-anak, dan 1.0% lainnya merupakan agen dengan disabilitas adalah acuan distribusi yang akan digunakan pada simulasi dengan skenario 2 dan 3. Variasi jumlah populasi agen dan distribusi usia agen akan berdampak pada lamanya waktu evakuasi dilakukan, di mana jumlah agen

Tabel 3.7: Skenario ke-1 variasi jumlah dan distribusi agen.

Skenario	Jumlah Agen	Distribusi Agen			
		Dewasa	Lansia	Anak	Disabilitas
S-I.1.1.	50	81%	15%	3%	1%
S-I.1.2.	50	60%	30%	9%	1%
S-I.1.3.	50	45%	45%	9%	1%
S-I.1.4.	50	35%	35%	29%	1%
S-I.1.5.	50	15%	81%	3%	1%
S-I.2.1.	250	81%	15%	3%	1%
S-I.2.2.	250	60%	30%	9%	1%
S-I.2.3.	250	45%	45%	9%	1%
S-I.2.4.	250	35%	35%	29%	1%
S-I.2.5.	250	15%	8%	3%	1%
S-I.3.1.	500	81%	15%	3%	1%
S-I.3.2.	500	60%	30%	9%	1%
S-I.3.3.	500	45%	45%	9%	1%
S-I.3.4.	500	35%	35%	29%	1%
S-I.3.5.	500	15%	81%	3%	1%

akan menggambarkan kepadatan populasi sedangkan distribusi usia agen akan menggambarkan kecepatan berjalan agen pada masing-masing kategorinya.

Pada simulasi skenario pertama, lingkungan yang digunakan adalah sebuah bangunan dengan satu ruangan dan satu pintu keluar yang memiliki ukuran lebar sebesar 2 *patch* dan terletak pada sisi kiri bangunan. Ruangan yang digunakan memiliki ukuran 41×41 .

Skenario 2

Untuk skenario kedua yaitu variasi jumlah dan ukuran pintu keluar, digunakan jumlah populasi agen acuan sebesar 300 agen dengan distribusi usia 81.0% merupakan agen dewasa, 15.0% merupakan agen lansia, 3.0% merupakan agen berusia anak-anak, dan 1.0% merupakan agen dengan disabilitas. Denah bangunan yang akan digunakan adalah bangunan dengan satu ruangan berukuran 41×41 patch. Keberadaan pintu keluar pada bangunan divariasi seperti pada Tabel 3.8 berikut.

Skenario S-II.1.1. hingga S-II.1.3. mengasumsikan bahwa pintu keluar hanya terdapat pada salah satu sisi dinding saja, yaitu sisi dinding kiri (A). Pada ketika

Tabel 3.8: Skenario ke-2 variasi jumlah dan distribusi agen.

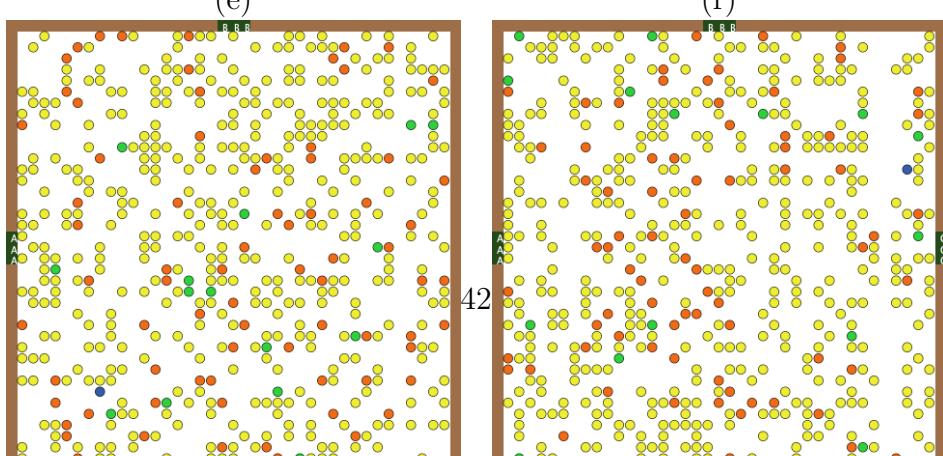
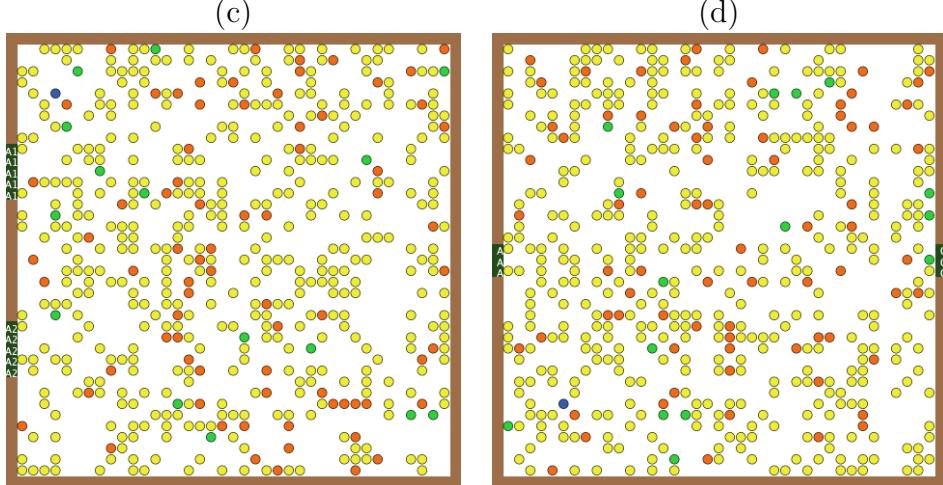
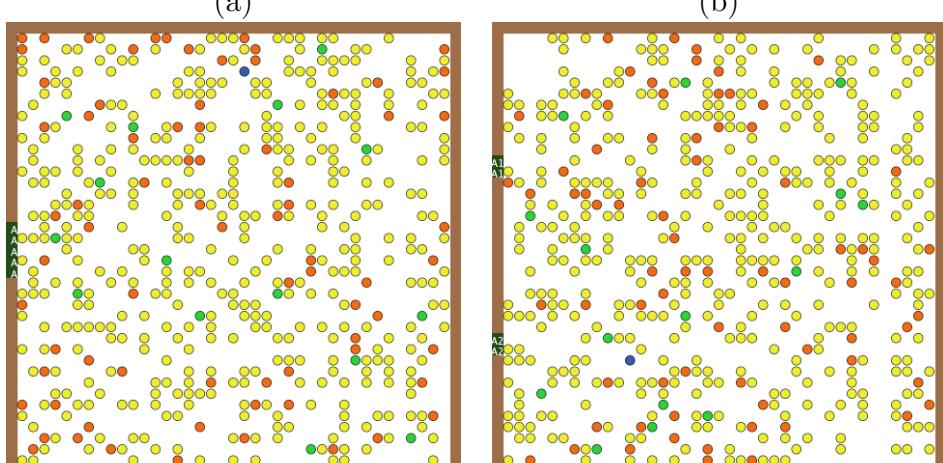
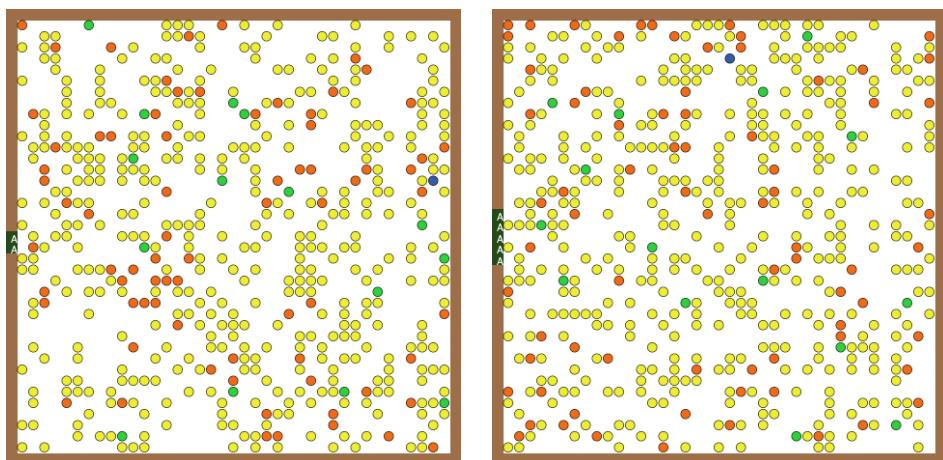
Skenario	Denah	Ukuran pintu (patch)			
		A	B	C	D
S-II.1.1.	1 buah sisi A	2	-	-	-
S-II.1.2.	1 buah sisi A	5	-	-	-
S-II.1.3.	1 buah sisi A	15	-	-	-
S-II.2.1.	2 buah sisi A	2 & 2	-	-	-
S-II.2.2	2 buah sisi A	5 & 5	-	-	-
S-II.3.1.	1 buah sisi A dan C	3	-	3	-
S-II.4.1.	1 buah sisi A, B, dan D	3	3	-	3
S-II.5.1.	1 buah sisi A, B, C, dan D	3	3	3	3

skenario tersebut, ukuran lebar pintu keluar divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap waktu evakuasi, apakah semakin lebar ukuran pintu keluar akan mempercepat proses evakuasi. Skenario S-II.2.1. dan S-II.2.2. merupakan variasi ukuran lebar pintu dengan jumlah pintu pada salah satu sisi yang bertambah, dalam hal ini adalah dinding sisi A. Sedangkan skenario S-II.3.1., S-II.4.1., dan S-II.5.1. 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 keluar dari bangunan.

Skenario 3

Skenario ketiga merupakan variasi denah dan infrastruktur bangunan, ketika bangunan

3.2.4 Validasi



BAB 4

HASIL SIMULASI

4.1 Skenario 1

4.1.1 Hasil Simulasi

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada bangunan dengan satu ruang menggunakan parameter variasi jumlah dan distribusi usia agen, diperoleh data berupa waktu evakuasi dan kecepatan agen sebagai berikut.

Tabel 4.1: Waktu evakuasi yang dibutuhkan pada skenario pertama.

Skenario	Waktu Evakuasi (tick)		
	Min	Mean	Max
S-I.1.1	92	139.1 ± 27.8	219
S-I.1.2	105	151.5 ± 23.5	198
S-I.1.3	108	163.4 ± 23.2	216
S-I.1.4	120	160.6 ± 20.4	208
S-I.1.5	126	172.9 ± 17.6	212

4.2 Skenario 2

4.2.1 Hasil Simulasi

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada bangunan dengan satu ruang menggunakan parameter variasi pintu jumlah dan ukuran pintu keluar, diperoleh data berupa waktu evakuasi, kecepatan agen, jarak tempuh menuju pintu keluar, serta jumlah korban sebagai berikut.

4.3 Skenario 3

Tabel 4.2: Waktu evakuasi yang dibutuhkan agen pada skenario kedua.

Skenario	Waktu evakuasi (tick)		
	Min	Mean	Max
S-II.1.1	230.00	337.80 ± 43.30	430.00
S-II.1.2	255.00	330.37 ± 37.35	411.00
S-II.1.3	269.00	324.51 ± 35.31	494.00
S-II.2.1	241.00	321.44 ± 34.34	392.00
S-II.2.2	243.00	324.86 ± 40.94	448.00
S-II.3.1	165.00	213.35 ± 22.38	265.00
S-II.4.1	150.00	202.62 ± 30.83	384.00
S-II.5.1	119.00	159.36 ± 41.42	393.00

Tabel 4.3: Kecepatan agen saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.

Skenario	Kecepatan agen (patch/tick)		
	Min	Mean	Max
S-II.1.1	37.97	65.75 ± 12.35	96.05
S-II.1.2	47.19	67.39 ± 11.70	114.04
S-II.1.3	41.40	65.67 ± 10.18	90.25
S-II.2.1	42.39	64.50 ± 10.68	81.67
S-II.2.2	39.85	67.12 ± 23.39	273.51
S-II.3.1	30.79	45.70 ± 7.44	79.30
S-II.4.1	28.49	48.10 ± 23.86	218.65
S-II.5.1	21.94	40.57 ± 30.39	227.20

Tabel 4.4: Jarak yang ditempuh agen saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.

Skenario	Kecepatan agen (patch/tick)		
	Min	Mean	Max
S-II.1.1	0.00	0.09 ± 0.06	0.22
S-II.1.2	0.01	0.10 ± 0.07	0.33
S-II.1.3	0.01	0.10 ± 0.07	0.26
S-II.2.1	0.01	0.09 ± 0.07	0.24
S-II.2.2	0.00	0.09 ± 0.08	0.61
S-II.3.1	0.01	0.13 ± 0.05	0.23
S-II.4.1	0.02	0.15 ± 0.09	0.60
S-II.5.1	0.00	0.17 ± 0.10	0.60

Tabel 4.5: Jumlah korban yang meninggal saat melakukan evakuasi pada skenario kedua.

Skenario	Jumlah korban (agen)		
	Min	Mean	Max
S-II.1.1	0.00	3.96 ± 6.97	40.00
S-II.1.2	0.00	3.81 ± 6.48	37.00
S-II.1.3	0.00	3.30 ± 4.44	21.00
S-II.2.1	0.00	3.39 ± 4.90	25.00
S-II.2.2	0.00	3.82 ± 5.61	25.00
S-II.3.1	0.00	0.69 ± 2.01	16.00
S-II.4.1	0.00	0.67 ± 1.95	16.00
S-II.5.1	0.00	0.30 ± 0.77	4.00

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

5.2 Saran

Pustaka

- 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
- 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>
- Schadschneider, A., Klüpfel, H., Kretz, T., Rötsch, 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.*