

SIMULASI BERBASIS AGEN PADA EVAKUASI KEBAKARAN DI GEDUNG SASANA BUDAYA GANESHA ITB

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 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2 DASAR TEORI	5
2.1 <i>Pemodelan Pedestrian</i>	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>	10
2.2.2 Karakteristik ABM	11
2.2.3 Komponen ABM	12
2.2.4 Verifikasi, Validasi, dan Replikasi	14
2.2.5 Analisis Sensitivitas	14
2.3 Model Gaya Sosial	14
2.3.1 <i>Driving Effect</i>	15
2.3.2 <i>Obstacle Effect</i>	17
2.3.3 <i>Territorial Effect</i>	18
2.3.4 <i>Attractive Effect</i>	18
2.3.5 Sudut Pandang Efektif	19
2.3.6 Total Efek	20
2.4 Protokol ODD	22
3 METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Konstruksi Model	27

3.1.1	Perangkat Lunak	27
3.1.2	Lingkungan dan Waktu	27
4	HASIL SIMULASI	29
5	KESIMPULAN DAN SARAN	30
5.1	Kesimpulan	30
5.2	Saran	30

Daftar Tabel

1.1	Karakteristik dari pendekatan untuk pemodelan evakuasi.	3
-----	---	---

Daftar Gambar

2.1	Tingkatan pemodelan perilaku pedestrian.	7
2.2	Klasifikasi pendekatan pemodelan pedestrian. Garis merah menunjukkan pemodelan berdasarkan aturan, sedangkan garis hijau menunjukkan pemodelan berdasarkan percepatan.	9
2.3	Efek penggerak (panah merah) untuk agen α (titik biru) dengan kecepatan aktual mengarah ke kanan (panah biru).	16
2.4	Potensial tolak-menolak $U_{\alpha B}$ yang dihasilkan oleh objek B pada agen α dengan $R = 0.2$ m dan $U_{\alpha B}^0 = 10\text{m}^2/\text{s}^2$	17
2.5	Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain.	19
2.6	Komponen protokol ODD sesuai urutan.	23

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 et al., 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 berjatuh, 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 (BBC News 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).

Pada penelitian ini, penulis memadukan pemodelan pemodelan berbasis agen

Tabel 1.1: Karakteristik dari pendekatan untuk pemodelan evakuasi.

Pendekatan	Skala	Ruang dan Waktu	Individu/Kelompok
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

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 dan 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 interaksi antara suatu agen dengan agen lainnya (antar-manusia) serta agen dengan lingkungannya?
2. Bagaimana kondisi dan keadaan kerumunan (normal atau panik) memengaruhi interaksi dan perilaku manusia selaku agen?
3. Bagaimana simulasi berbasis agen dapat merepresentasikan evakuasi di dunia nyata?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian dilakukan menggunakan simplifikasi denah gedung Sasana Budaya Ganesha ITB.
2. Penelitian dilakukan dengan mengasumsikan manusia sebagai entitas yang memiliki fisik homogen.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dalam tesis ini adalah sebagai berikut.

1. Mengidentifikasi interaksi antara agen satu dengan agen lainnya serta interaksi agen dengan lingkungan.
2. Menjelaskan pengaruh perbedaan kondisi kerumunan (normal atau panik) pada perilaku manusia.
3. Menjelaskan aplikasi simulasi berbasis agen pada permasalahan di dunia nyata.

1.5 Metode Penelitian

Penelitian dimulai dari studi teoretis mengenai fenomena kebakaran pada suatu gedung, perilaku manusia ketika terjadi bencana kebakaran, serta pemodelan berbasis agen. Kemudian dilakukan perancangan denah gedung yang akan menjadi objek penelitian menggunakan perangkat lunak QGIS, serta menentukan parameter dan atribut yang akan digunakan pada simulasi. Simulasi dikembangkan dengan menggunakan perangkat lunak NetLogo dengan objek berupa lingkungan Gedung Sasana Budaya Ganesha ITB dan agen berupa manusia dan api.

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.

Schadschneider et al. (2009) membedakan enam pengaruh perilaku kolektif yang dapat muncul akibat fenomena *self-organize* pada dinamika pedestrian sebagai berikut.

- Penyumbatan (*jamming*)

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.

- 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*)

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 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 dua.

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

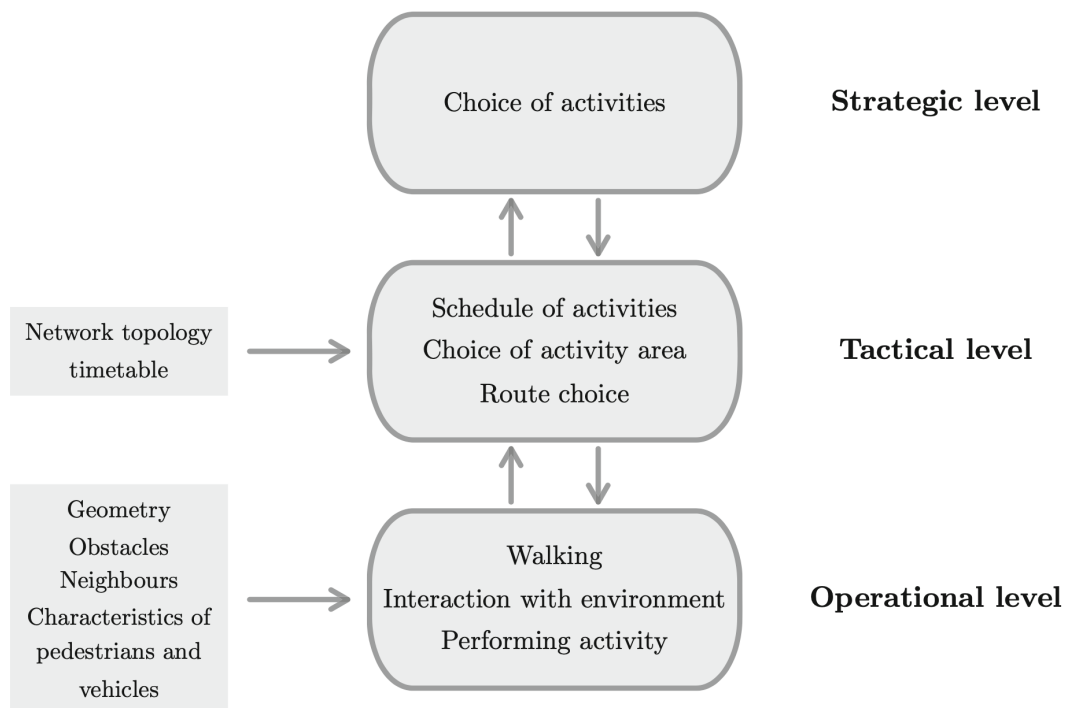
Dalam situasi darurat, media sering mengaitkan “panik” dengan perilaku egois, asosial, dan irasional yang memengaruhi suatu kelompok. Namun, pada kenyataannya, ditemukan bahwa karakteristik ini tidak berperan.

Selanjutnya, dari sudut pandang statistik, tidak ada data yang cukup untuk memutuskan relevansi efek-efek ini dalam situasi darurat karena hampir tidak mungkin melakukan eksperimen “realistis”.

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 2.1 Tingkatan pemodelan perilaku pedestrian.

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 “realistis” 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-agen. Agen berinteraksi satu sama lain dan dengan lingkungan. Mereka dapat memiliki keadaan internal yang mencerminkan tujuan dan perilaku umum mereka.

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

1. Mikroskopis vs makroskopis

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

2. Diskrit vs kontinu

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

3. Deterministik vs stokastik

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

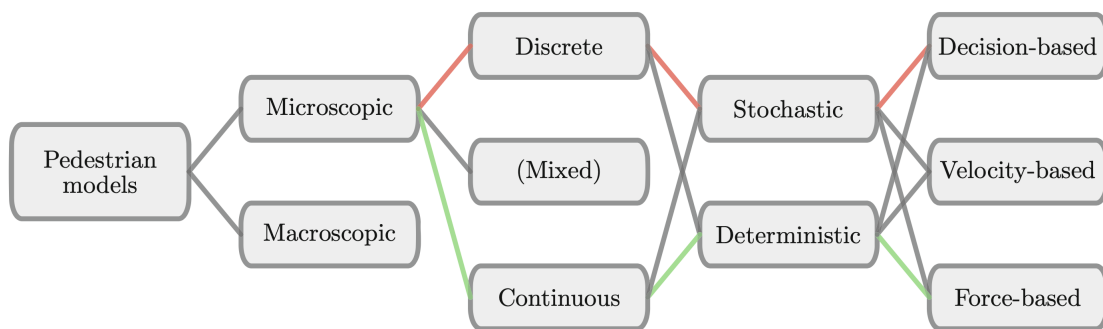
4. Berdasarkan aturan vs berdasarkan percepatan vs berdasarkan kecepatan

Dalam kelas model yang besar, mulanya perlu ditentukan kecepatan atau

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

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

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



Gambar 2.2 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 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 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 kontinu. Model kontinu seringkali tidak dapat menggambarkan situasi dunia nyata. Sebagai contoh, pada pemodelan dinamika populasi, persamaan akan memperlakukan populasi sebagai kuantitas yang kontinu 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-agen 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 *environment-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 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:

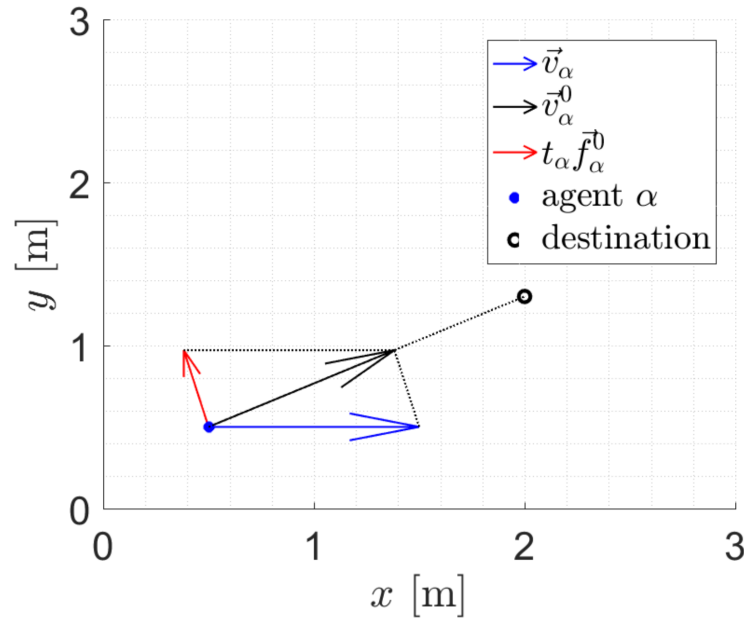
$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)|}, \quad (2.2)$$

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 .

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

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 2.3 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 2.3, 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.

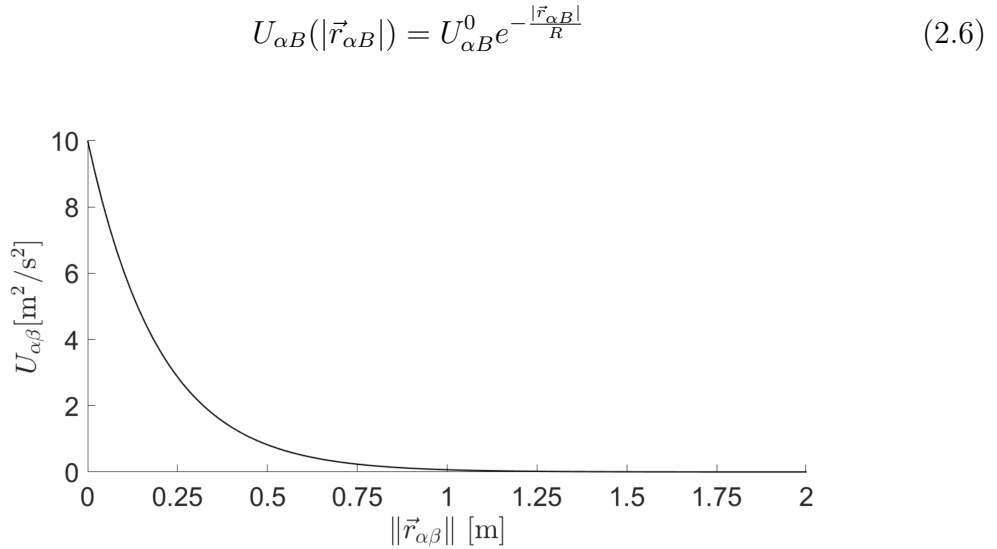
$$\begin{bmatrix} F_x^0 \\ F_y^0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} m_\alpha \begin{bmatrix} v_\alpha^0 e_{\alpha x}^0 - v_{\alpha x} \\ v_\alpha^0 e_{\alpha y}^0 - v_{\alpha y} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

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 2.4 dengan panjang karakteristik $R = 0.2$ m dan nilai $U_{\alpha B}^0 = 10 \text{ m}^2/\text{s}^2$.



Gambar 2.4 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.

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

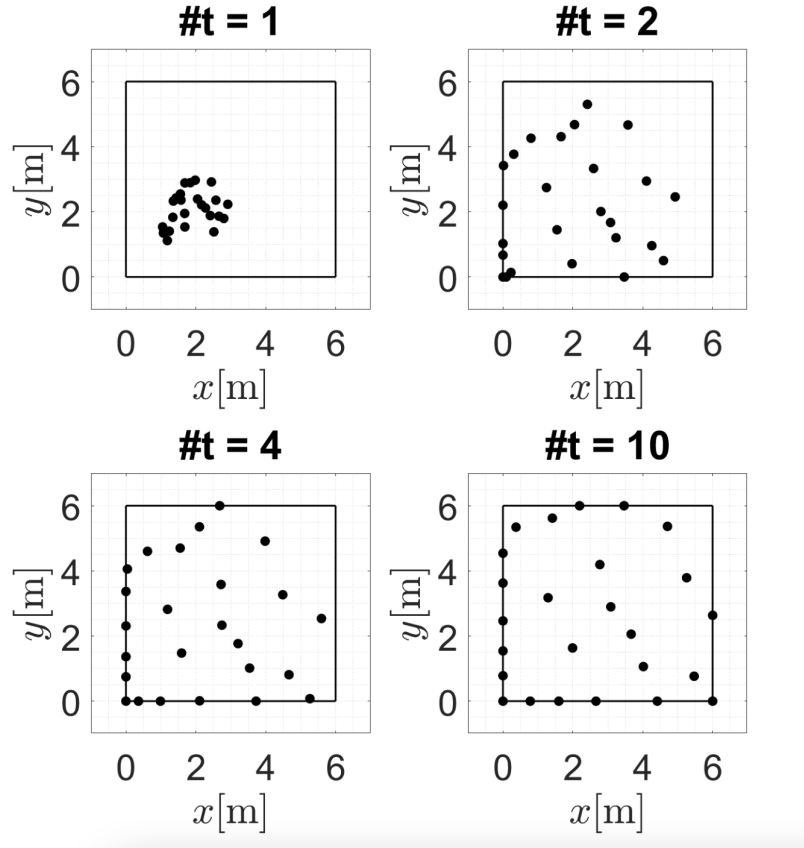
Dalam potensial ini, σ adalah panjang karakteristik untuk potensial teritorial, didefinisikan sebagai $\sigma = 0.3$ m. b menyatakan sumbu semi-pendek sebuah elips yang memperhitungkan jarakn antara agen α dan agen β , $|\vec{r}_{\alpha\beta}|$, serta kecepatan agen β , \vec{v}_{β} . Ketika agen β memiliki 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 2.5. 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



Gambar 2.5 Efek territorial menyebabkan agen saling menjauh dan menjaga jarak tertentu satu sama lain.

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.

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 konstanta 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 Mólнар 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.

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

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 apakah akan melewati rintangan ke sisi kiri atau kanan. Dalam simulasi Helbin dan Mólnar, fluktuasi dianggap bernilai 0.

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

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

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 $\hat{w}_\alpha = \vec{w}_\alpha/|\vec{w}_\alpha|$.

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

Sebagai hasilnya, posisi baru setiap agen α dihitung untuk setiap iterasi waktu

langkah adalah sebagai berikut.

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

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*

	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
Details	5. Initialization
	6. Input data
	7. Submodels

Gambar 2.6 Komponen protokol ODD sesuai urutan.

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 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 dari 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.

3.1.1 Perangkat Lunak

Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak NetLogo (Willensky, 1999). 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, 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.

3.1.2 Lingkungan dan Waktu

Penelitian ini menggunakan *world* berbentuk persegi dua dimensi yang terdiri dari sel-sel yang berukuran sama. Dalam simulasi ini digunakan *world* berukuran 50×50 sel dalam bentuk kisi, sehingga terdapat total 225 sel, di mana masing-masing sel akan direpresentasikan dalam koordinat kartesian dengan

sumbu x dan sumbu y. Masing-masing agen atau *turtles* akan tinggal di atas setiap sel dan memiliki informasi mengenai sel tempat mereka berada dan sel sekitarnya. Agen tetangga (*neighbors*) dapat berupa agen yang berada di sekitar sel tempat agen tersebut berada, atau agen yang berada di kejauhan, sesuai dengan karakteristik yang dideklarasikan di dalam kode. Simulasi akan dilakukan secara diskrit dan terdapat *timestamp* dalam setiap gerakan agen.

BAB 4

HASIL SIMULASI

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

5.2 Saran