

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	i
Daftar Tabel	ii
Daftar Gambar	iii
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metode Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
2 DASAR TEORI	5
2.1 Simulasi Berbasis Agen	5
2.1.1 Sistem Kompleks dan <i>Emergence</i>	5
2.1.2 Karakteristik ABM	7
2.1.3 Komponen ABM	7
2.1.4 Verifikasi, Validasi, dan Replikasi	9
2.1.5 Analisis Sensitivitas	9
2.2 <i>Crowd Behavior</i>	10
2.2.1 Model Gaya Sosial	10
2.3 Protokol ODD	13
3 METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Konstruksi Model	18
3.1.1 Perangkat Lunak	18
3.1.2 Lingkungan dan Waktu	18
4 HASIL SIMULASI	20
5 KESIMPULAN DAN SARAN	21
5.1 Kesimpulan	21
5.2 Saran	21

Daftar Tabel

Daftar Gambar

2.1	Komponen protokol ODD sesuai urutan.	14
-----	--	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Manajemen keadaan darurat yang baik merupakan salah satu aktivitas kunci pada perencanaan peristiwa yang mungkin dapat membahayakan nyawa. Langkah awal yang dapat dilakukan adalah dengan mengidentifikasi keadaan darurat yang mungkin terjadi sehingga perencanaan evakuasi dapat dipersiapkan dengan lebih matang (Siyam et al., 2020). Evakuasi merupakan suatu kegiatan memindahkan korban dari lokasi terjadinya kecelakaan, bencana, maupun keadaan yang membahayakan manusia ke tempat lain yang lebih aman sampai mendapatkan penanganan lanjutan dari pihak yang berwenang. Tidak adanya perencanaan evakuasi yang aman dan efektif dapat memengaruhi proses pengambilan keputusan manusia serta perilakunya yang muncul ketika keadaan darurat terjadi di tempat yang tidak memiliki persiapan mitigasi 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, seperti kasus yang baru-baru saja terjadi di Stadion Kanjuruhan Kota Malang pada Oktober 2022 yang memakan korban sebanyak 794 orang (Itah, 2022)³, perayaan Halloween di Itaewon, Korea Selatan pada 30 Oktober 2022 dengan korban sebanyak 156 orang tewas (BBC News Indonesia, 2022), serta pada pusat-pusat keramaian 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, persyaratan teknis mengenai sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan telah diatur dalam Peraturan Menteri Pekerjaan Umum nomor 26/PRT/M/2008 tanggal 30 Desember 2008. Pada Bab I, bagian 1, pasal 1 diberikan pengertian mengenai sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan. Sistem proteksi kebakaran pada bangunan gedung dan lingkungan adalah sistem yang terdiri atas peralatan, serta kelengkapan dan sarana yang tersedia di bangunan dengan tujuan sebagai proteksi aktif maupun pasif untuk melin-

dungi bangunan dari bahaya kebakaran. Sistem proteksi kebakaran pasif dibentuk melalui pengaturan penggunaan bahan dan komponen struktur bangunan, pemisahan bangunan berdasarkan tingkat ketahanan terhadap api, serta perlindungan terhadap bukaan. Sedangkan sistem proteksi kebakaran aktif merupakan sistem yang secara lengkap terdiri dari sistem deteksi kebakaran, alat pemadam kebakaran seperti springkler dan selang air kebakaran, serta alat-alat lain berbahan kimia seperti APAR dan alat pemadam khusus. Evakuasi kebakaran merupakan salah satu sistem proteksi kebakaran aktif yang akan dilakukan ketika bahaya kebakaran telah terjadi di suatu bangunan untuk meminimalisir korban dan kerusakan yang ditimbulkan.

Evaluasi efektivitas rute evakuasi dapat dilakukan dengan melaksanakan *fire drill* atau simulasi kebakaran untuk mengajarkan proses evakuasi yang aman serta memastikan bahwa rute yang dipilih merupakan rute yang paling efektif. Namun seringkali praktik seperti ini dinilai kurang efektif dan menggambarkan situasi pada keadaan kebakaran sesungguhnya disebabkan tidak adanya sumber bahaya yang nyata seperti api, sehingga orang cenderung melakukan simulasi ini sebatas formalitas saja. Akibatnya skenario evakuasi yang tampak cukup baik ketika dilakukan simulasi dapat menjadi gagal ketika terjadi keadaan darurat yang sesungguhnya karena munculnya faktor kepanikan yang tidak terkontrol serta manusia yang akan cenderung kesulitan berpikir secara logis dalam kondisi panik.

Adanya pemodelan evakuasi memungkinkan untuk melakukan simulasi perilaku dari banyak individu tanpa perlu melakukan uji coba pada dunia nyata. Hingga saat ini terdapat beberapa pendekatan untuk memecahkan permasalahan evakuasi, misalnya dengan menggunakan model matematis, *cellular automata*, kisi gas, dinamika fluida, pemodelan berbasis aturan, eksperimen dengan hewan, dan lain sebagainya. Seluruh pendekatan yang telah disebutkan sebelumnya merupakan model simulasi konvensional dengan asumsi agen memiliki karakteristik homogen untuk mengurangi kesulitan perhitungan. Salah satu kelemahan dari pendekatan ini adalah pengaturan lingkungan yang ideal tidak dapat sepenuhnya mencerminkan karakteristik dinamis dari perilaku evakuasi masyarakat di dunia nyata, yang dapat menyebabkan beberapa penyimpangan dalam hasil analisis.

Lain halnya dengan pemodelan berbasis agen, yang dapat memodelkan suatu individu sebagai agen otonom yang memiliki karakteristik dan perilaku tersendiri serta dapat mengambil tindakan berdasarkan situasi yang dihadapi di lingkungannya. Perilaku agen yang dapat bergerak dan berinteraksi secara kompleks di tingkat in-

individu akan menyebabkan munculnya suatu fenomena atau *emergence* yang disebut perilaku kolektif. Salah satu keuntungan menggunakan pemodelan berbasis agen adalah karena kemampuannya untuk memodelkan pengambilan keputusan dan perilaku sosial suatu individu serta bagaimana perilakunya tersebut dipengaruhi oleh karakteristik struktur bangunannya (Siyam et al., 2020).

Pada penelitian ini, penulis menggunakan pemodelan berbasis agen untuk menggambarkan proses evakuasi manusia (*pedestrian*) ketika terjadi kebakaran di gedung.

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 Simulasi Berbasis Agen

Model adalah penggambaran simplifikasi suatu sistem mengenai dunia nyata yang tidak mengandung seluruh detail dan faktor acak yang terdapat pada dunia nyata, sedangkan model komputasi adalah suatu proses pemodelan dengan masukan (*input*), proses manipulasi input tersebut berdasarkan suatu algoritma, yang kemudian akan menghasilkan suatu keluaran (*output*). Fungsi dari model adalah untuk membantu memahami dan menguji suatu fenomena yang ada di dunia nyata dengan lebih runtut dan efisien dibanding hanya dengan mengobservasi realitanya. Implementasi model digunakan untuk menunjukkan suatu proses transformasi model tekstual menjadi suatu simulasi komputasi yang ditulis dalam bentuk sebuah kode. Selain model tekstual, terdapat pula model konseptual yang menjelaskan suatu proses, objek, atau peristiwa yang tidak berupa komputasi. Dengan kata lain, model konseptual dapat berupa gambar atau diagram.

Penggambaran menggunakan agen untuk menjelaskan suatu fenomena cenderung lebih mudah dipahami dibandingkan dengan menggunakan persamaan matematis. Hal ini disebabkan karena pemodelan berbasis agen dikonstruksi dari objek-objek individu dan aturan yang sederhana dalam setiap pergerakan perilakunya, sedangkan persamaan matematis dibangun dari simbol-simbol matematis. Pada kenyataannya, manusia lebih mudah mengartikan suatu pengalaman yang berupa interaksi dari banyak individu dan bukan berupa rasio-rasio yang terdapat seperti pada persamaan diferensial.

Agent Based Modeling (ABM) atau simulasi berbasis agen adalah sebuah paradigma pemodelan secara komputasi yang menjelaskan tingkah laku suatu agen beserta interaksinya. Pada simulasi berbasis agen, terdapat tiga komponen penting yang memiliki peran dalam implementasinya, yaitu agen, lingkungan, dan interaksinya.

2.1.1 Sistem Kompleks dan *Emergence*

Teori sistem kompleks mengembangkan suatu prinsip dan alat yang digunakan untuk menjelaskan kompleksitas dunia serta menjelaskan sistem kompleks sebagai suatu sistem yang terdiri dari banyak elemen individu yang saling berinteraksi satu sama

lain dan dapat memprediksi properti dan perilaku dari masing-masing elemennya. Melalui berbagai interaksi antarelemen ini terbentuklah fenomena *emergence* yang menjadi karakteristik dari sistem kompleks. Frasa *emergence* atau *emergent* pada sistem kompleks didefinisikan sebagai munculnya suatu struktur, pola, dan sifat baru yang koheren melalui interaksi dari beberapa 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.

ABM merupakan salah satu metode komputasional yang dapat digunakan untuk memodelkan suatu sistem kompleks. Teknik pemodelan ini terdiri dari agen yang berupa entitas komputasi yang memiliki properti atau suatu keadaan tertentu dan dapat merepresentasikan elemen apapun dalam suatu sistem. Misalnya, dalam peristiwa kebakaran bangunan, manusia, api, atau material pembentuk bangunan dapat berperan sebagai agen yang masing-masing memiliki properti. Seperti pada manusia, misalnya kecepatan berjalan, usia, dan jenis kelamin. Agen juga memiliki aturan terhadap perilakunya, misalnya pejalan kaki akan cenderung berjalan lurus menuju tujuannya jika tidak menemui hambatan.

Di dalam ABM juga terdapat waktu yang universal. Ketika waktu bergerak, seluruh agen akan bergerak sesuai properti dan aturannya masing-masing. Jika terdapat suatu kondisi yang terpenuhi, maka agen dapat menunjukkan suatu perilaku berdasarkan aturan yang ada. Misal, ketika pejalan kaki menemui hambatan di jalan menuju tujuannya, maka ia akan mengubah arah untuk menghindarinya. Tujuan dari ABM adalah membuat agen-agen dan aturan yang akan menghasilkan suatu 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 atur-

an dan properti yang ditetapkan.

2.1.2 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.

2.1.3 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.

2.1.4 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.

2.1.5 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 pemodel-

an. 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.

2.2 *Crowd Behavior*

2.2.1 Model Gaya Sosial

Model gaya sosial atau *social force model* (SFM) merupakan pemodelan perilaku pejalan kaki berdasarkan gaya sosio-psikologis dan fisis (Helbing & Molnár, 1995). Model ini mengasumsikan seluruh pejalan kaki bersikap seperti partikel dan menggunakan vektor gaya untuk mendeskripsikan gaya yang sesungguhnya serta motivasi intrinsiknya. Gaya-gaya yang terdapat pada SFM dapat disebabkan oleh intensi pejalan kaki untuk bergerak ke suatu arah yang spesifik pada kecepatan tertentu dengan menghindari hambatan atau rintangan serta tanpa menabrak pejalan kaki lainnya.

Ketika seorang pejalan kaki α menuju suatu tujuan tertentu \vec{r}_α^0 , normalnya ia akan mengambil jalan terpendek yang tidak perlu memutar atau berubah arah. Gerakan pejalan kaki 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:

$$\vec{r}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|}, \quad (2.1)$$

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

Hal ini dapat disebut dengan gaya dorongan (*the driving force*) dengan persamaan

dalam bentuk percepatan sebagai berikut:

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (2.2)$$

dengan τ_α adalah waktu relaksasi yang memodulasi seberapa banyak pejalan kaki menambah kecepatan menuju kecepatan yang diinginkan $\vec{v}_\alpha^0(t) := v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha(t)$ menuju arah yang diinginkan $\vec{e}_\alpha(t)$, dengan \vec{v}_α adalah kecepatan pejalan kaki pada saat ini.

Gerakan pejalan kaki α akan dipengaruhi oleh keberadaan pejalan kaki lainnya sehingga ia akan menjaga jarak tertentu dari posisi pejalan kaki lainnya berdasarkan densitas pejalan kaki pada lokasi tersebut dan kecepatan berjalan yang diinginkan v_α^0 . Masing-masing pejalan kaki akan memiliki ruang lingkup yang dapat diartikan sebagai efek teritorial (the territorial effect). Pejalan kaki umumnya akan merasa semakin tidak nyaman ketika berdekatan dengan orang asing, yang mungkin bereaksi dengan cara yang agresif. Hal ini menyebabkan timbulnya efek tolak-menolak (*repulsive effect*) pada pejalan kaki β yang dapat direpresentasikan dengan persamaan berikut:

$$\vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) = - \left(V^0 \exp \left(-\frac{b}{\sigma} \right) \right) n_{\beta\alpha} \quad (2.3)$$

dengan efek teritorial dihitung dari persamaan sebelumnya dan dijumlahkan untuk menghasilkan total efek teritorial dari seluruh pejalan kaki di sekitar. Pada persamaan 2.3, V^0 dan σ merupakan konstanta arbitrari yang dapat diatur nilainya, sedangkan variabel $n_{\beta\alpha}$ merupakan vektor unit yang mengarah ke pejalan kaki β dari pejalan kaki α . Asumsikan terdapat potensial tolak-menolak pada pejalan kaki yang mengarah ke arah gerak dan berbentuk elips. Hal ini disebabkan karena pejalan kaki membutuhkan ruang gerak untuk mengambil langkah selanjutnya, dimana sumbu semi-minor elips dinyatakan dengan b seperti pada persamaan berikut.

$$b = \frac{\sqrt{(|\vec{r}_{\alpha\beta}| + |\vec{r}_{\alpha\beta} - v_\beta \vec{e}_\beta|)^2 - (v_\beta)^2}}{2} \quad (2.4)$$

di mana $\vec{r}_{\alpha\beta}$ adalah vektor hasil pengurangan antara posisi pejalan kaki β dari posisi pejalan kaki α , v_β adalah kecepatan pejalan kaki β , dan \vec{e}_β adalah arah yang diinginkan pejalan kaki β .

Selain itu, gaya yang disebabkan oleh efek teritorial juga dimodulasi oleh jarak pandangan pejalan kaki pada arah geraknya $\vec{e}_\alpha(t)$. Jika pejalan kaki β berada pada jarak pandang pejalan kaki α , gaya teritorial karena pejalan kaki lain akan berlaku penuh. Sebaliknya, jika pejalan kaki lain tidak berada pada jarak pandang, maka

nilai gaya teritorial akan dikalikan dengan suatu konstanta c di mana $0 < c < 1$ dengan objek di belakang pejalan kaki akan memiliki nilai konstanta yang semakin kecil. Sehingga efek teritorial yang disebabkan oleh eksistensi pejalan kaki lain adalah sebagai berikut:

$$\vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) = w(\vec{e}_\alpha, \vec{f}_{\alpha\beta}) \vec{f}_{\alpha\beta} \quad (2.5)$$

$$w(\vec{e}, \vec{f}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \vec{e} \cdot \vec{f} \geq |\vec{f}| \cos \varphi \\ c & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

di mana φ adalah setengah dari jarak pandang pejalan kaki.

Sumber gaya terakhir adalah hambatan atau *obstacles force*. Persamaan gaya untuk hambatan serupa dengan persamaan pada efek teritorial sebagai berikut:

$$\vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) = - \left(U^0 \exp \left(\frac{\vec{r}_{\alpha B}}{R} \right) \right) n_{B\alpha} \quad (2.7)$$

Untuk setiap hambatan B , gaya hambatan akan dijumlahkan untuk membentuk total gaya hambatan pada pejalan kaki α , sedangkan U^0 dan R merupakan konstanta arbitrari yang digunakan untuk mengatur model simulasi. Variabel $|\vec{r}_{\alpha B}|$ merupakan jarak antara hambatan B dengan pejalan kaki α , dan $n_{B\alpha}$ adalah vektor unit yang mengarah dari pejalan kaki α ke hambatan B .

Dari gaya-gaya yang telah dijabarkan di atas, dapat diperoleh total gaya motivasi yang berlaku terhadap pejalan kaki α yaitu $\vec{F}_\alpha(t)$.

$$\vec{F}_\alpha(t) = \vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) + \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) + \vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) \quad (2.8)$$

dengan suku pertama menunjukkan *driving force*, suku kedua persamaan menunjukkan *territorial effect*, dan suku terakhir menunjukkan *obstacle force*.

Untuk mendapatkan percepatan pejalan kaki α , dilakukan diferensiasi terhadap persamaan total gaya yang diperoleh.

$$\frac{d\vec{w}_\alpha}{dt} = \vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) + \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{r}_{\alpha\beta}) + \vec{F}_{\alpha B}(\vec{r}_{\alpha B}) \quad (2.9)$$

Hasil yang diperoleh kemudian ditambahkan dengan kecepatan saat ini yang dimiliki oleh pejalan kaki α sehingga menjadi:

$$\vec{v}_\alpha(t) = \vec{v}(t) + \frac{d\vec{w}_\alpha}{dt} \quad (2.10)$$

Untuk melengkapi model dinamika pejalan kaki dengan gaya sosial, hubungan antara kecepatan aktual dengan kecepatan yang diinginkan harus diperkenalkan. Karena kecepatan aktual dibatasi oleh kecepatan maksimal pejalan kaki yang dapat diterima, hasil yang diperoleh perlu disesuaikan skalanya agar tidak melebihi.

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \vec{v}_\alpha(t) = \vec{v}_\alpha(t)g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{|\vec{v}_\alpha|}\right) \quad (2.11)$$

$$g\left(\frac{v_\alpha^{max}}{|\vec{v}_\alpha|}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } |\vec{v}_\alpha| \leq v_\alpha^{max} \\ v_\alpha^{max}/|\vec{v}_\alpha| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3 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-

	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 2.1 Komponen protokol ODD sesuai urutan.

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 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 kawan-

an 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 (Wilensky, 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