

**IMPLEMENTASI ALGORITMA RECIPROCAL VELOCITY
OBSTACLES (RVO) PADA SIMULASI EVAKUASI GEMPA PADA
GEDUNG SAINTEK UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MALANG**

SKRIPSI

Oleh :
SAYYIDAH MEUTIA ZAHRA
NIM. 210605110124



**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

**IMPLEMENTASI ALGORITMA RECIPROCAL VELOCITY
OBSTACLES (RVO) PADA SIMULASI EVAKUASI GEMPA PADA
GEDUNG SAINTEK UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MALANG**

SKRIPSI

Diajukan kepada:
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)

Oleh:
SAYYIDAH MEUTIA ZAHRA
NIM. 210605110124

**PROGRAM STUDI TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

IMPLEMENTASI ALGORITMA RECIPROCAL VELOCITY OBSTACLES (RVO) PADA SIMULASI EVAKUASI GEMPA PADA GEDUNG SAINTEK UIN MALANG

SKRIPSI

Oleh :
SAYYIDAH MEUTIA ZAHRA
NIM. 210605110124

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 26 Juni 2026

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji	: <u>Hani Nurhayati, M.T</u> NIP. 19780625 200801 2 006
Anggota Penguji I	: <u>Ahmad Fahmi Karami, M.Kom</u> NIP. 19870909 202012 1 001
Anggota Penguji II	: <u>Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE</u> NIP. 19830616 201101 1 004
Anggota Penguji III	: <u>Dr. M. Imamudin Le, MA</u> NIP. 19740602 200901 1 010

()
()
()
()

Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M.Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

HALAMAN PERSETUJUAN

IMPLEMENTASI ALGORITMA RECIPROCAL VELOCITY OBSTACLES (RVO) PADA SIMULASI EVAKUASI GEMPA PADA GEDUNG SAINTEK UIN MALANG

SKRIPSI

Oleh :
SAYYIDAH MEUTIA ZAHRA
NIM. 210605110124

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Tanggal: 26 Juni 2026

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE
NIP. 19830616 201101 1 004



Dr. M. Imamudin Lc, MA
NIP. 19740602 200901 1 010

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Supriyono, M. Kom
NIP. 19841010 201903 1 012

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sayyidah Meutia Zahra
NIM : 210605110124
Fakultas / Program Studi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Implementasi Algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) Pada Simulasi Evakuasi Gempa Pada Gedung Saintek Universitas Islam Negeri Malang

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambil alihan data, tulisan, atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan skripsi ini merupakan hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 26 Juni 2026

Yang membuat pernyataan,


F1952AOX050764779
Sayyidah Meutia Zahra
NIM. 210605110124

MOTTO

Be Free Be Happy

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah rabbil ‘alamin segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, serta kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penulis persembahkan karya sederhana ini untuk:

1. Ayah dan mama, dua orang yang menjadi alasan terbesar saya untuk erus melangkah hingga sampai di titik ini. Terima kasih atas setiap doa yang dipanjatkan dalam diam, setiap pengorbanan yang sering kali tidak pernah diceritakan, serta setiap dukungan yang selalu diberikan tanpa syarat. Di balik setiap langkah yang penulis tempuh, ada kerja keras, kasih sayang, dan harapan Ayah dan Mama yang mengiringi. Tidak ada pencapaian yang dapat menggambarkan besarnya jasa Ayah dan Mama, dan tidak ada kata yang cukup untuk membalas segala yang telah kalian berikan.
2. Kakak-kakakku tercinta, Terima kasih atas doa, dukungan, perhatian, dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis.
3. Sahabat penulis sejak MA, Terima kasih atas kebersamaan, dukungan, doa, tawa, serta cerita yang telah menemani berbagai proses kehidupan selama ini.
4. Teman-teman penulis yang tidak bisa penulis sebut satu persatu, terima kasih karena selalu mendukung dan memberikan motivasi untuk selalu semangat dalam menjalankan semua proses ini dan terima kasih sudah menjadi teman terbaik.
5. Diri sendiri, terima kasih telah bertahan sejauh ini. untuk setiap malam yagn dihabiskan dalam kelelahan, setiap pagi yang disambut dengan rasa keraguan, namun

tetap dijalani dengan keberanian. Terima kasih kepada hati yang tetap ikhlas, meski semua hal tidak sesuai dengan harapan. Terima kasih atas perjuangan, kesabaran, dan kerja keras hingga skripsi ini dapat diselesaikan tepat sebelum menginjak usia 21 tahun. Teruslah belajar, bertumbuh, dan mensyukuri setiap nikmat yang Allah SWT berikan. Terima kasih karena telah mampu menjaga amanah dan mempertanggungjawabkan setiap kepercayaan yang diberikan, termasuk menyelesaikan skripsi ini dengan usaha dan jerih payah sendiri.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun umat manusia menuju jalan yang lurus. Semoga kita semua termasuk dalam golongan yang mendapat syafaatnya di hari akhir. Skripsi yang berjudul "Implementasi Algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) pada Simulasi Evakuasi Gempa pada Gedung Saintek UIN Malang" ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer pada Program Studi Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., CAHRM., CRMP. selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M.Kes. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Supriyono, M.Kom. selaku Ketua Jurusan Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang beserta seluruh jajarannya.
4. Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE. selaku Dosen Pembimbing I yang telah dengan sabar membimbing, memberikan masukan, dan arahan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.

5. Dr. M. Imamudin, Lc., MA. selaku Dosen Pembimbing II yang telah dengan sabar membimbing, memberikan masukan, dan arahan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh dosen dan civitas akademika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan.
7. Orang tua dan keluarga penulis yang senantiasa memberikan doa, motivasi, dan dukungan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
8. Teman-teman Jurusan Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang angkatan 2021 yang telah memberikan dukungan dan semangat selama proses penyelesaian skripsi ini.
9. Semua pihak yang telah membantu dan terlibat dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi penulis dan bagi pembaca.

Malang, 26 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	Error! Bookmark not defined.
MOTTO	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
المخلص.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Pernyataan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II STUDI PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Algoritma <i>Reciprocal Velocity Obstacles</i>	10
2.2.2 <i>Agent based Modelling</i>	14
2.2.3 Simulasi Evakuasi Bencana	15
2.2.4 Perilaku Manusia dalam Kondisi Darurat.....	16
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI.....	18
3.1 Desain Simulasi	18
3.1.1 Lingkungan Simulasi.....	20
3.1.2 Desain Agen.....	23
3.2 Implementasi Sistem	25
3.2.1 Integrasi <i>NavMesh</i> dan RVO.....	25
3.2.2 Penerapan RVO.....	26
3.2.3 Parameter simulasi.....	29
3.2.4 Deteksi Tabrakan	30
3.3 Pengujian simulasi	30
3.3.1 Desain skenario	30
3.3.2 Metrik evaluasi.....	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Hasil Pengujian	33
4.1.1 Kondisi Pengujian	33
4.1.2 Skenario 1 (Semua Agen Rasional)	33
4.1.3 Skenario 2 (Kepadatan Menengah).....	38
4.1.4 Skenario 3 (Semua Agen Panik)	44

4.1.5 Skenario 4 (Kepadatan Rendah)	47
4.1.6 Skenario 5 (Kepadatan Tinggi)	50
4.2 Analisis dan Pembahasan	55
4.2.1 Pengaruh Komposisi Perilaku	55
4.2.2 Pengaruh Kepadatan	60
4.2.3 Evaluasi Performa Algoritma RVO Secara Keseluruhan	63
4.3 Integrasi Islam	68
4.3.1 <i>Muamalah Ma'a Allah</i>	69
4.3.2 <i>Muamalah ma'a an-nas</i>	70
BAB V PENUTUP	73
5.1 Kesimpulan	73
5.2 Saran	74
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 RVO dari agen B menuju agen A	12
Gambar 2.2 Diagram ORCA.....	13
Gambar 3.1 Flowchart Alur Simulasi	18
Gambar 3.2 Lingkungan Lantai 1	21
Gambar 3.3 Lingkungan Lantai 2	21
Gambar 3.4 Lingkungan Lantai 3	22
Gambar 3.5 Safe Point	23
Gambar 3.10 Desain Agen.....	24
Gambar 3.11 FSM Agen.....	24
Gambar 4.1 Kondisi Spawn Pada Skenario 1	33
Gambar 4.2 Pembagian Perlantai pada skenario 1.....	34
Gambar 4.3 Kepadatan pada area tangga.....	35
Gambar 4.4 Kecepatan Agen yang terjebak.....	37
Gambar 4.5 Log Collision Out Come Skenario 1	37
Gambar 4.6 Data Agen Gagal Skenario 1 Pada Replikasi ke-8.....	38
Gambar 4.7 Pembagian dan kondisi Spawn Pada Skenario 2.....	39
Gambar 4.8 Bottleneck Skenario 2	40
Gambar 4.9 Data Agen Gagal Skenario 2 Pada Replikasi ke-1	42
Gambar 4.10 Log Collision Out come Skenario 2.....	43
Gambar 4.11 Pembagian Perlantai pada skenario 3.....	44
Gambar 4.12 bottleneck skenario 3.....	46
Gambar 4.13 Log Collision Out Come Skenario 3	47
Gambar 4.14 Pembagian Spawn Skenario 4.....	48
Gambar 4.15 Log Collision Out Come Skenario 4	49
Gambar 4.16 Data Agen Gagal Skenario 4 Pada Replikasi ke-9.....	50
Gambar 4.17 Pembagian dan kondisi Spawn Pada Skenario 5.....	51
Gambar 4.18 Bottleneck Skenario 5	53
Gambar 4.19 Log Collision Out Come pada skenario 5	53
Gambar 4.20 Data Agen Gagal Skenario 5 Replikasi ke-10.....	54
Gambar 4.21 Perbandingan Collision Skenario 1,2, dan 3	55
Gambar 4.22 Agen Terjebak di pintu keluar ruangan.....	56
Gambar 4.23 Kondisi Skenario 2 pada $t=30$ detik.....	57
Gambar 4.24 Perbandingan Safety rate Skenario 1,2, dan 3.....	58
Gambar 4.25 Agen Gagal di Skenario 2	59
Gambar 4.26 Perbandingan Collision pada berbagai Tingkat Kepadatan	60
Gambar 4.27 Perbandingan Safety rate pada berbagai Tingkat Kepadatan.....	61
Gambar 4.28 Data Agen Gagal Skenario 4 Replikasi ke-9.....	62
Gambar 4.29 Data Agen Gagal Skenario 5 Replikasi ke-10.....	62
Gambar 4.30 Data Log Collision Out Come Skenario 1	65
Gambar 4.31 Data Log Collision Out Come Skenario 2	65
Gambar 4.32 Data Log Collision Out Come Skenario 3	66
Gambar 4.33 Data Log Collision Out Come Skenario 4	66
Gambar 4.34 Data Log Collision Out Come Skenario 5	67
Gambar 4.35 Data Agen Gagal Skenario 1 Pada Replikasi ke-6.....	67

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu	6
Tabel 3.1 Desain Skenario	31
Tabel 4.1 Hasil Skenario 1 (200 Agen).....	34
Tabel 4.2 Hasil Simulasi Skenario 2 (200 Agen).....	40
Tabel 4.3 Hasil Simulasi Skenario 3 (200 Agen).....	44
Tabel 4.4 Hasil simulasi Skenario 4 (100 Agen)	48
Tabel 4.5 Hasil simulasi Skenario 5 (300 Agen)	51
Tabel 4.6 Ringkasan Hasil Seluruh Skenario.....	64

ABSTRAK

Zahra, Sayyidah Meutia. 2026. **Implementasi Algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) pada Simulasi Evakuasi Gempa pada Gedung Saintek UIN Malang.** Skripsi. Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE; (II) Dr. M. Imamudin Lc, MA.

Kata kunci: *Reciprocal Velocity Obstacles*, simulasi evakuasi, *Navigation Mesh*.

Gempa bumi merupakan bencana yang sering terjadi di Indonesia, sehingga simulasi evakuasi pada gedung bertingkat diperlukan untuk mengevaluasi proses evakuasi dalam kondisi darurat. Penelitian ini bertujuan menganalisis performa algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) dalam mengelola tabrakan dan mempertahankan kelancaran evakuasi pada simulasi gempa di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Malang. Simulasi dikembangkan menggunakan Unity Engine dengan mengintegrasikan *Navigation Mesh* (NavMesh) sebagai sistem *pathfinding* global dan algoritma RVO sebagai mekanisme local *collision avoidance* pada model 3D gedung tiga lantai dengan dua tipe agen, yaitu rasional dan panik. Pengujian dilakukan pada lima skenario dengan variasi komposisi perilaku agen dan tingkat kepadatan, masing-masing sebanyak 10 replikasi, dievaluasi menggunakan metrik *safety rate*, total *collision*, dan rata-rata waktu evakuasi. Hasil menunjukkan bahwa seluruh skenario menghasilkan *safety rate* yang tinggi. Variasi perilaku agen memengaruhi jumlah *collision* melalui perbedaan waktu keberangkatan, sedangkan peningkatan kepadatan tidak menurunkan *safety rate* karena kegagalan evakuasi lebih dipengaruhi oleh posisi spawn. Pada seluruh skenario, algoritma RVO terbukti efektif sebagai mekanisme penghindaran tabrakan lokal dan mampu mempertahankan tingkat keberhasilan evakuasi yang tinggi, meskipun masih memiliki keterbatasan dalam menangani kemacetan pada kondisi kepadatan tinggi.

ABSTRACT

Zahra, Sayyidah Meutia. 2026. **Implementation of Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) Algorithm in Earthquake Evacuation Simulation at the Faculty of Science and Technology Building, UIN Malang**. Thesis. Department of Informatics Engineering, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisors: (I) Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE; (II) Dr. M. Imamudin Lc, MA.

Keywords: Reciprocal Velocity Obstacles, evacuation simulation, Navigation Mesh.

Earthquakes are a frequent occurrence in Indonesia, making evacuation simulations in high-rise buildings necessary to evaluate evacuation processes during emergencies. This study aims to analyze the performance of the Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) algorithm in managing collisions and maintaining a smooth evacuation during an earthquake simulation at the Faculty of Science and Technology building at UIN Malang. The simulation was developed using the Unity Engine by integrating Navigation Mesh (NavMesh) as a global pathfinding system and the RVO algorithm as a local collision avoidance mechanism in a 3D model of a three-story building with two types of agents, rational and panicked. Tests were conducted across five scenarios with varying agent behavior compositions and density levels, each run 10 times, and evaluated using the safety rate, total collisions, and average evacuation time metrics. The results showed that all scenarios yielded a high safety rate. Variations in agent behavior affect the number of collisions through differences in departure times, while increased density does not lower the safety rate because evacuation failures are more influenced by spawn positions. In all scenarios, the RVO algorithm proved effective as a local collision avoidance mechanism and was able to maintain a high evacuation success rate, although it still has limitations in handling congestion under high-density conditions.

الملخص

زهرة، سيّدة ميتيا. 2026. تطبيق خوارزمية العوائق ذات السرعة المتبادلة (RVO) في محاكاة عملية الإخلاء في حالة الزلزال بمبنى العلوم والتكنولوجيا بجامعة مالانغ الإسلامية الحكومية. أطروحة البكالوريوس. قسم هندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مالانغ الإسلامية الحكومية «مولانا مالك إبراهيم». المشرفان (I) د. إير. يونيفا مفتاح العارف، (II) د. م. إمام الدين، MA. ، Lc. ، SMIEEE ، M.T. ، S.ST.

الكلمات المفتاحية: RVO، محاكاة الإخلاء، Navigation Mesh.

تعد الزلازل من الكوارث التي تحدث بشكل متكرر في إندونيسيا، لذا فإن إجراء محاكاة عمليات الإخلاء في المباني متعددة الطوابق أمر ضروري لتقييم عملية الإخلاء في حالات الطوارئ. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أداء خوارزمية «العوائق ذات السرعة المتبادلة» (RVO) في إدارة التصادمات والحفاظ على سلامة عملية الإخلاء خلال محاكاة الزلزال في مبنى كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مالانغ الإسلامية الحكومية. تم تطوير المحاكاة باستخدام محرك *Unity Engine* من خلال دمج شبكة الملاحظة (NavMesh) كنظام عالمي لتحديد المسار وخوارزمية RVO كآلية محلية لتجنب التصادم في نموذج ثلاثي الأبعاد لمبنى مكون من ثلاثة طوابق مع نوعين من العوامل، وهما العوامل العقلانية والعوامل المذعورة. أُجريت الاختبارات على خمسة سيناريوهات متنوعة في تكوين سلوك العوامل ومستوى الكثافة، مع 10 تكرارات لكل سيناريو، وتم تقييمها باستخدام مقاييس معدل الأمان، وإجمالي التصادمات، ومتوسط وقت الإخلاء. أظهرت النتائج أن جميع السيناريوهات حققت معدل أمان مرتفعاً. تؤثر تباينات سلوك العوامل على عدد التصادمات من خلال الاختلاف في أوقات الانطلاق، في حين أن زيادة الكثافة لا تؤدي إلى انخفاض معدل السلامة لأن فشل عملية الإخلاء يتأثر بشكل أكبر بموقع ظهور العوامل. في جميع السيناريوهات، أثبتت خوارزمية RVO فعاليتها كآلية لتجنب التصادمات المحلية، كما أنها قادرة على الحفاظ على مستوى عالٍ من نجاح عملية الإخلاء، على الرغم من أنها لا تزال تعاني من بعض القيود في التعامل مع الازدحام في ظروف الكثافة العالية.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama yaitu, Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, sehingga menempatkannya dalam kawasan *Ring of Fire* yang memiliki aktivitas seismik tinggi. Kondisi geografis tersebut menyebabkan gempa bumi menjadi salah satu bencana alam yang paling sering terjadi di Indonesia. Berdasarkan data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), sepanjang tahun 2024 terjadi 7.358 gempa, termasuk 186 gempa dengan magnitudo di atas 5 magnitudo. Data ini menunjukkan bahwa Indonesia termasuk dalam kategori negara dengan risiko gempa tertinggi di dunia (Mufarida, 2024)

Fenomena gempa bumi juga disebutkan dalam Al-Qur'an sebagai bentuk peringatan agar manusia meningkatkan keimanan dan kesadaran akan kekuasaan Allah serta pentingnya bersiap menghadapi ujian-Nya. Dalam Surah Al-Zalzalah ayat 1-2, Allah berfirman:

إِذَا زُلْزِلَتِ الْأَرْضُ زِلْزَالَهَا (1) وَأُخْرِجَتِ الْأَرْضُ أَنْقَالَهَا (2)

"Apabila bumi diguncangkan dengan guncangan (yang dahsyat), dan bumi telah mengeluarkan beban-beban berat (yang dikandung)nya." (QS. Al-Zalzalah: 1-2)

M.Quraish Shihab dalam Tafsir Al-Misbah menjelaskan kata idzaa (إِذَا) yang digunakan dalam ayat pertama menunjukkan suatu peristiwa yang pasti akan terjadi. Hal ini berbeda dengan kata in (إِن) yang digunakan untuk sesuatu yang

belum tentu terjadi, serta law (لَوْ) yang merujuk pada sesuatu yang mustahil terjadi. (Meiliza Laveda, 2020)

Sementara itu, pengulangan kata al-ardh (الأرض) pada ayat kedua mengandung makna bahwa guncangan bumi dan segala sesuatu yang dikeluarkannya, baik jasad manusia maupun kandungan lainnya, berlangsung secara menyeluruh di seluruh permukaan bumi, bukan hanya pada daerah tertentu sebagaimana gempa bumi yang terjadi pada umumnya. Kedua ayat tersebut memberikan peringatan kepada manusia agar selalu siap menghadapi berbagai bencana, termasuk bencana gempa bumi. (Meiliza Laveda, 2020)

Mengingat besarnya potensi dampak gempa bumi, upaya mitigasi bencana perlu terus dikembangkan. Salah satu pendekatannya adalah simulasi berbasis komputer yang dapat digunakan untuk mengevaluasi performa algoritma navigasi agen dalam skenario evakuasi gedung bertingkat.

Proses evakuasi di dalam gedung bertingkat memiliki tantangan yang lebih kompleks dibandingkan lingkungan terbuka. Kondisi ini dipengaruhi oleh keterbatasan ruang pada koridor, kepadatan yang terjadi di area tangga maupun pintu keluar, serta adanya perbedaan respons individu saat menghadapi situasi darurat.

Penelitian Aguirre pada tahun 1998 mengenai evakuasi *World Trade Center* menunjukkan bahwa respons manusia dalam situasi darurat bersifat heterogen. Ukuran kelompok serta hubungan sosial antar individu memengaruhi waktu pengambilan keputusan untuk melakukan evakuasi, sehingga respons tidak dapat disamakan (Aguirre et al., 1998).

Tantangan ini membutuhkan sistem navigasi yang tidak hanya mampu menentukan jalur evakuasi secara global, tetapi juga dapat mengelola pergerakan antar individu secara dinamis agar kelancaran evakuasi dapat terjaga meskipun terdapat perbedaan respon antar individu.

Oleh karena itu, penelitian ini mengintegrasikan Navigation Mesh (*NavMesh*) sebagai sistem global pathfinding untuk menentukan jalur evakuasi menuju zona aman, dengan algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) sebagai mekanisme local *collision avoidance* untuk mengelola pergerakan agen agar mampu menghindari tabrakan selama proses evakuasi berlangsung. *NavMesh* bertanggung jawab atas penentuan rute, sementara RVO menangani penghindaran tabrakan di antara agen yang bergerak. (Van Den Berg et al., 2008)

Penelitian Fadil Muhammad dkk. pada tahun 2018 menunjukkan efektivitas RVO dalam simulasi evakuasi dengan agen heterogen. Namun, penelitian tersebut masih menunjukkan tingginya *collision* dan penurunan performa simulasi seiring meningkatnya jumlah agen, khususnya pada lingkungan dengan kepadatan tinggi. (Muhammad Fadil et al., 2018)

Sebagian besar penelitian RVO sebelumnya juga masih diterapkan pada lingkungan terbuka atau sederhana dengan satu lantai, dan penelitian yang mengadaptasikannya pada gedung perkuliahan bertingkat dengan variasi perilaku masih sangat terbatas.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan simulasi evakuasi gempa di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang sebagai gambaran lingkungan yang padat. Penelitian ini

menerapkan algoritma RVO dalam mengelola tabrakan dan menjaga kelancaran evakuasi pada berbagai tingkat kepadatan dan variasi perilaku agen.

1.2 Pernyataan Masalah

Bagaimana performa algoritma RVO dalam mengelola tabrakan dan mempertahankan kelancaran evakuasi pada simulasi gempa di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Malang dengan variasi perilaku agen dan tingkat kepadatan kerumunan?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis performa algoritma RVO dalam mengelola tabrakan dan mempertahankan kelancaran evakuasi pada simulasi gempa di Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Malang dengan variasi perilaku agen dan tingkat kepadatan kerumunan.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Secara teoritis, penelitian ini memperkaya literatur mengenai penerapan algoritma RVO dalam simulasi evakuasi *indoor* yang kompleks, khususnya pada kasus gempa bumi.
2. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi pengembangan simulasi evakuasi berbasis agen untuk mendukung perencanaan dan kesiapsiagaan bencana pada gedung bertingkat.

1.5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Simulasi difokuskan pada evakuasi gempa di lingkungan Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Malang yang dimodelkan dalam tiga lantai.
2. Simulasi dilakukan dalam jumlah maksimal hingga 300 agen.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai landasan untuk memahami perkembangan penelitian yang berkaitan dengan simulasi evakuasi, pemodelan perilaku agen, serta penerapan algoritma *collision avoidance* pada lingkungan multi-agen. Beberapa penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penelitian Terdahulu

No.	Judul	Nama Peneliti	Hasil penelitian	Perbedaan
1.	Research on evacuation simulation of underground commercial street based on reciprocal velocity obstacle model	(Wei Li et al., 2022)	Mengembangkan RVO dengan mekanisme node monitoring untuk mencegah stagnasi pada jalur evakuasi padat. Hasil menunjukkan bahwa distribusi pintu keluar yang simetris dan konfigurasi jalur evakuasi berpengaruh signifikan terhadap waktu evakuasi serta kepadatan kerumunan.	Fokus pada evakuasi kebakaran di lingkungan jalan komersial bawah tanah dengan satu lantai
2.	Crowd navigation for dynamic hazard avoidance in evacuation using emotional reciprocal velocity obstacles	(Fachri et al., 2024)	ERVO mengintegrasikan penyebaran emosi ke dalam RVO sehingga mampu menurunkan <i>collision</i> sebesar 43,61% dan meningkatkan realisme perilaku kerumunan dalam kondisi darurat.	Menggunakan ERVO dengan spektrum emosi kontinu, bukan perbedaan tipe agen biner.
3.	Simulation Model of Crowd Evacuation Navigation in a Multi-Obstacle Environment	(Zhongrui Ni et al., 2021)	Mengembangkan simulasi evakuasi gempa 3D berbasis sosial force yang mengintegrasikan faktor psikologis dan perilaku individu. Hasil menunjukkan bahwa penyebaran kepanikan memengaruhi pola pergerakan kerumunan dan model memiliki kesesuaian yang baik dengan data evakuasi gempa Sichuan 2008.	Keterbatasan pada bangunan satu lantai, tidak berfokus pada dinamika evakuasi gempa di gedung bertingkat.
4.	3D visual simulation of Individual and crowd behavior in earthquake evacuation	(Tingting Liu et al., 2019)	Memodelkan perilaku & emosi individu saat evakuasi gempa dengan simulasi 3D	Menggunakan sosial force model, dan bersifat simulasi interaktif.

No.	Judul	Nama Peneliti	Hasil penelitian	Perbedaan
5.	Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation	(Yanbin Han et al., 2017)	Model AERS yang dikombinasikan dengan modified shortest-path dan reinforcement learning mampu mendistribusikan aliran evakuasi secara lebih merata, sehingga mempercepat evakuasi dan mengurangi <i>bottleneck</i> .	Fokus pada optimasi pemilihan rute dengan reinforcement learning
6.	Crowds Evacuation Simulation on Heterogeneous Agent Using Agent-Based Reciprocal Velocity Obstacle	(Muhammad Fadil et al., 2018)	Menggunakan ORCA berbasis ABM untuk simulasi evakuasi multi-agen. Hasil menunjukkan RVO efektif untuk navigasi dan <i>collision avoidance</i> , namun performa menurun pada kepadatan tinggi akibat meningkatnya <i>collision</i> .	Menggunakan agen heterogen berbasis leader-follower dengan metrik <i>collision</i> , waktu simulasi, dan FPS.

Penelitian mengenai simulasi evakuasi dengan pendekatan berbasis agen telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi algoritma navigasi, model perilaku agen, dan optimasi strategi evakuasi dari berbagai sudut pandang.

Wei Li dkk. pada tahun 2022 mengembangkan simulasi evakuasi di pusat perbelanjaan bawah tanah menggunakan RVO yang ditingkatkan dengan mekanisme node monitoring untuk mencegah stagnasi simulasi pada jalur evakuasi padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi simetris pintu keluar lebih efektif dibanding sekadar menambah jumlah pintu keluar, dan bahwa konfigurasi jalur berpengaruh signifikan terhadap waktu evakuasi dan kepadatan lokal. Penelitian ini terbatas pada lingkungan satu lantai dengan skenario kebakaran, sehingga belum menggambarkan kompleksitas navigasi multi-lantai yang menjadi fokus penelitian ini. (Wei Li et al., 2022)

Fachri dkk. pada tahun 2024 memperkenalkan Emotional Reciprocal Velocity Obstacles (ERVO) yang mengintegrasikan model penyebaran emosi ke dalam mekanisme RVO. Hasil menunjukkan ERVO mampu mengurangi *collision* hingga 43,61% dibandingkan RVO standar dan menghasilkan perilaku kerumunan yang lebih realistis dalam situasi darurat multi-hazard. Perbedaan dengan penelitian ini terletak pada pendekatan model perilaku: ERVO menggunakan spektrum emosi kontinu yang menyebar antar agen, sedangkan penelitian ini membedakan perilaku agen secara biner antara tipe rasional dan panik sebagai representasi respons psikologis yang berbeda terhadap gempa. (Fachri et al., 2024)

Zhongrui Ni dkk. pada tahun 2021 mengembangkan arsitektur kognitif individu yang mengintegrasikan persepsi, motivasi, perilaku, emosi, dan kepribadian dalam simulasi evakuasi gempa 3D. Hasil menunjukkan bahwa kepanikan menyebar dalam kerumunan dan memengaruhi pola pergerakan secara kolektif. Model berbasis sosial force yang dikembangkan divalidasi terhadap data evakuasi nyata gempa Sichuan 2008 dan menunjukkan kesesuaian yang baik. Penelitian ini memiliki keterbatasan pada bangunan satu lantai dan tidak berfokus pada dinamika evakuasi di gedung bertingkat dengan tangga sebagai *bottleneck* utama. (Zhongrui Ni et al., 2021)

Tingting Liu dkk. pada tahun 2019 memodelkan perilaku dan emosi individu saat evakuasi gempa dalam simulasi 3D menggunakan sosial force model. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan karakteristik emosi dan perilaku individu menghasilkan dinamika pergerakan yang berbeda secara

signifikan. Perbedaan dengan penelitian ini adalah Liu et al. menggunakan sosial force model yang bersifat interaktif dan berbasis gaya fisik, sedangkan penelitian ini menggunakan RVO berbasis constraint kecepatan yang lebih efisien secara komputasi untuk lingkungan multi-lantai. (Tingting Liu et al., 2019)

Yanbin Han dkk. pada tahun 2017 mengembangkan model pemilihan rute berbasis available evacuation route set (AERS) dengan parameter jarak, panjang rute, kepadatan, dan kemacetan, diperkuat dengan modified shortest-path dan reinforcement learning. Hasil menunjukkan bahwa desentralisasi aliran dan pemanfaatan semua pintu keluar secara merata mempercepat evakuasi dan mengurangi *bottleneck*. Penelitian ini berfokus pada optimasi pemilihan rute dan tidak membahas mekanisme *collision avoidance* secara eksplisit, berbeda dengan penelitian ini yang mengevaluasi performa RVO sebagai algoritma *avoidance* dalam lingkungan gedung bertingkat. (Yanbin Han et al., 2017)

Fadil Muhammad dkk. pada tahun 2018 menggunakan ORCA dengan pendekatan ABM untuk mensimulasikan evakuasi bencana dengan agen heterogen yang memiliki kecepatan berbeda. Hasil menunjukkan RVO efektif untuk navigasi multi-agen, namun *collision* meningkat signifikan pada kepadatan tinggi dan performa menurun seiring bertambahnya jumlah agen. Penelitian ini tidak mensimulasikan konteks gempa secara spesifik, tidak menggunakan lingkungan gedung bertingkat, dan tidak membedakan perilaku agen berdasarkan respons psikologis. Penelitian ini menjadi landasan langsung bagi penelitian yang dikembangkan di sini, dengan tambahan konteks gempa, lingkungan multi-lantai, dan perbedaan tipe agen rasional-panik. (Muhammad Fadil et al., 2018)

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, terlihat bahwa sebagian besar studi yang menggunakan RVO diterapkan pada lingkungan terbuka, satu lantai, atau skenario kebakaran. Penelitian yang menerapkan RVO standar pada simulasi evakuasi gempa dalam lingkungan gedung perkuliahan bertingkat dengan variasi perilaku agen rasional dan panik secara eksplisit masih sangat terbatas. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan mengevaluasi performa algoritma RVO pada lingkungan gedung tiga lantai dengan tangga sebagai *bottleneck*, dua tipe agen dengan waktu mulai evakuasi yang berbeda, dan berbagai tingkat kepadatan.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Algoritma *Reciprocal Velocity Obstacles*

Algoritma *Reciprocal Velocity Obstacles* (RVO) merupakan pengembangan dari konsep *Velocity Obstacles* (VO) yang diperkenalkan oleh (Fiorini & Shiller, 1998).

Metode VO digunakan untuk mendeteksi kemungkinan tabrakan antar agen bergerak dengan mempertimbangkan posisi, arah, dan kecepatan relatif antar agen. Prinsip kerjanya dilakukan dengan membentuk *collision cone* pada ruang kecepatan yang menunjukkan himpunan kecepatan berpotensi menyebabkan tabrakan. Apabila kecepatan agen berada pada area tersebut, maka agen harus mengubah arah atau kecepatannya untuk menghindari benturan. Namun, VO memiliki kelemahan karena proses penghindaran hanya dilakukan oleh satu agen sehingga dapat mengalami perubahan arah secara berulang. (Arif et al., 2024)

Untuk mengatasi hal tersebut, Jur van den Berg mengembangkan algoritma RVO pada tahun 2008 dengan menerapkan konsep penghindaran

tabrakan secara resiprokal, di mana setiap agen berbagi tanggung jawab dalam menyesuaikan lintasan dan kecepatannya. Pendekatan ini menghasilkan simulasi kerumunan yang lebih alami dan stabil. (Van Den Berg et al., 2008)

Jika terdapat dua agen A dan B dengan posisi PA , PB serta kecepatan VA , VB , maka kecepatan relatif didefinisikan sebagai:

$$V_{rel} = V_A - V_B \quad (2.1)$$

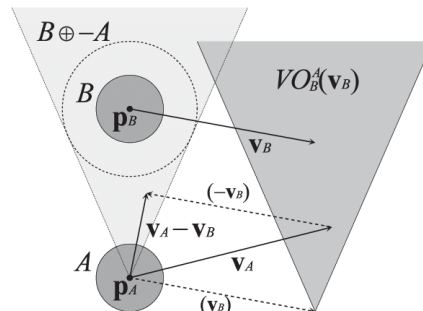
dari kecepatan relatif ini, dibentuk *collision cone* yang mendefinisikan daerah kecepatan berbahaya. Dalam VO, seluruh tanggung jawab penghindaran tabrakan dibebankan hanya kepada agen A, sehingga apabila dua agen bergerak saling menuju tujuannya, hanya satu agen yang menyesuaikan kecepatannya. Hal ini mengakibatkan perubahan arah yang berulang-ulang dan tidak wajar, terutama ketika banyak agen bergerak bersamaan dalam ruang yang padat.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, Van den Berg, Lin, dan Manocha mengembangkan algoritma RVO dengan menerapkan konsep penghindaran tabrakan secara resiprokal, di mana setiap agen berbagi tanggung jawab dalam menyesuaikan kecepatannya (Van den Berg et al., 2008). Alih-alih satu agen menanggung seluruh perubahan kecepatan, dalam RVO tanggung jawab dibagi dua sehingga setiap agen hanya perlu menyesuaikan setengah dari perubahan yang diperlukan. Kecepatan aman bagi agen A dirumuskan sebagai:

$$RVO_B^A(V_B, V_A) = \{V_A' | 2V_A' - V_A \in VO_B^A(v_B)\} \quad (2.2)$$

dengan:

- a. VA dan VB = kecepatan masing-masing agen,
- b. $RVO A|B$ = himpunan kecepatan yang menyebabkan tabrakan antara agen A terhadap agen B.



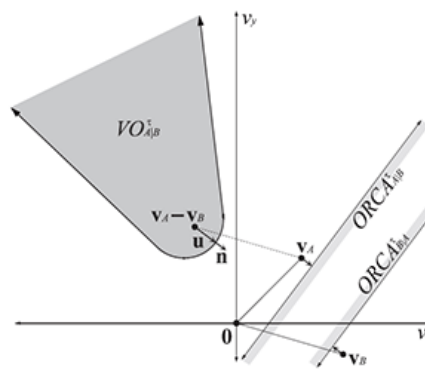
Gambar 2. 1 RVO dari agen B menuju agen A

Rumus tersebut menunjukkan bahwa kecepatan baru agen A dihitung dengan mempertimbangkan setengah dari perbedaan kecepatan antara A dan B, sehingga kedua agen sama-sama melakukan penyesuaian untuk menghindari tabrakan. Mekanisme berbagi tanggung jawab ini menghasilkan pergerakan yang lebih halus dan stabil karena setiap agen secara simultan memperhitungkan respons agen lain di sekitarnya. Hasilnya adalah simulasi kerumunan yang lebih alami tanpa osilasi pergerakan yang tidak wajar.

Konsep *collision cone* di atas merupakan dasar dari algoritma RVO klasik. Dalam perkembangannya, van den Berg dkk. (2011) memperkenalkan Optimal Reciprocal Collision Avoidance (ORCA) sebagai pengembangan lebih lanjut yang tidak lagi menggunakan *collision cone* secara langsung, melainkan merepresentasikan *constraint* kecepatan setiap agen sebagai sebuah *half-plane* dalam ruang kecepatan. Pendekatan ini lebih efisien secara komputasi karena penyelesaiannya dilakukan melalui linear programming berdimensi rendah. (Van Den Berg et al., 2011)

Penelitian ini mengimplementasikan Library RVO2 yang dikembangkan oleh University of North Carolina at Chapel Hill. Library tersebut menerapkan ORCA

sebagai mekanisme *collision avoidance* utama. Pada setiap langkah waktu simulasi, ORCA bekerja dengan membentuk *half-plane constraint* untuk setiap pasang agen yang berdekatan. Half-plane ini memisahkan ruang kecepatan menjadi dua wilayah: wilayah kecepatan yang aman dan wilayah kecepatan yang berpotensi menyebabkan tabrakan dalam rentang waktu tertentu yang disebut time horizon. Semakin panjang nilai time horizon yang digunakan, semakin jauh ke depan agen mengantisipasi kemungkinan tabrakan, namun semakin besar pula area kecepatan yang dibatasi.



Gambar 2. 2 Diagram ORCA

Setelah seluruh *half-plane constraint* dari semua agen tetangga terbentuk, ORCA menentukan *safe velocity* melalui proses linear programming berdimensi rendah. *Safe velocity* adalah hasil perhitungan ORCA terhadap kecepatan yang paling mendekati *preferred velocity*, yaitu kecepatan ideal agen menuju waypoint berikutnya pada jalur navigasi. Namun tetap memenuhi seluruh *half-plane constraint* secara bersamaan. Dengan pendekatan ini, setiap agen bergerak seefisien mungkin menuju tujuannya sekaligus menghindari tabrakan dengan agen lain di sekitarnya secara real-time.

Pendekatan RVO dan ORCA telah banyak diterapkan pada simulasi kerumunan, seperti navigasi pejalan kaki di area publik, stadion, bandara, hingga simulasi evakuasi bencana. Pada penelitian ini, algoritma digunakan untuk mengatur pergerakan agen menuju jalur evakuasi dengan mempertimbangkan interaksi antar agen secara *real-time*.

2.2.2 Agent based Modelling

Agent-Based Modelling (ABM) merupakan pendekatan simulasi yang digunakan untuk memodelkan sistem kompleks melalui interaksi antar agen otonom. Sistem dibangun dengan pendekatan bottom-up, di mana setiap agen memiliki karakteristik, tujuan, dan aturan perilaku masing-masing sehingga pola sistem secara keseluruhan terbentuk dari interaksi lokal antar agen. Agen dalam ABM dapat berupa individu, kendaraan, organisasi, maupun entitas lain yang mampu berinteraksi dengan lingkungan dan agen lainnya (Afdal et al., 2025).

Salah satu karakteristik utama ABM terletak pada kemampuan agen untuk mengambil keputusan secara mandiri berdasarkan kondisi lingkungan yang dihadapinya. Interaksi antar agen tersebut dapat menghasilkan emergent behavior, yaitu pola global yang muncul secara alami dari perilaku individual. Fenomena seperti kepadatan kerumunan, penumpukan kerumunan, dan perubahan pola pergerakan merupakan contoh perilaku emergen yang sering muncul pada simulasi berbasis agen (Bonabeau, 2002)

ABM dinilai sesuai untuk simulasi kerumunan dan evakuasi bencana karena mampu merepresentasikan heterogenitas perilaku setiap individu. Hal ini didukung oleh Macal & North (2010) yang menyatakan bahwa ABM khususnya efektif ketika perilaku

individu bersifat heterogen dan interaksi lokal antar agen menghasilkan pola sistem yang tidak dapat diprediksi dari perilaku individu saja. (MacAI & North, 2010)

Pada penelitian ini, pendekatan ABM digunakan untuk memodelkan dua jenis agen, yaitu agen rasional dan agen panik, yang memiliki pola perilaku berbeda selama proses evakuasi gempa berlangsung. Interaksi antar agen tersebut menghasilkan dinamika kerumunan yang kemudian dianalisis berdasarkan tingkat *collision*, kepadatan kerumunan, waktu evakuasi, serta tingkat keselamatan agen selama simulasi berlangsung.

2.2.3 Simulasi Evakuasi Bencana

Simulasi evakuasi bencana digunakan untuk mempelajari dinamika kerumunan saat menghadapi kondisi darurat seperti gempa bumi. Pendekatan ini memungkinkan pengujian berbagai skenario evakuasi secara terkendali sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi performa sistem navigasi dan perilaku agen dalam kondisi yang tidak dapat direplikasi secara langsung di lingkungan nyata.

Helbing et al. (2000) menunjukkan bahwa dalam kondisi darurat, individu cenderung bergerak menuju jalur keluar terdekat secara serentak, yang mengakibatkan peningkatan kepadatan pada titik-titik tertentu seperti koridor sempit, pintu keluar, dan tangga darurat. Penumpukan massa pada titik-titik tersebut, yang dikenal sebagai *bottleneck*, dapat memperlambat proses evakuasi secara signifikan dan meningkatkan risiko cedera akibat desak-desakan.

Dalam simulasi evakuasi 3D, sistem navigasi berperan penting dalam menentukan jalur pergerakan agen menuju area aman. Salah satu metode navigasi yang umum digunakan adalah *Navigation Mesh* (NavMesh), yaitu representasi

geometris area yang dapat dilalui agen dalam bentuk polygon walkable, sehingga agen dapat merencanakan rute dari posisi awal ke titik tujuan tanpa menembus dinding atau *obstacle* statis lainnya. NavMesh beroperasi pada level global dan bertanggung jawab atas perencanaan rute keseluruhan, sementara mekanisme penghindaran tabrakan antar agen ditangani secara terpisah pada level lokal.

2.2.4 Perilaku Manusia dalam Kondisi Darurat

Perilaku manusia dalam situasi darurat bersifat heterogen dan tidak dapat disamakan. Kuligowski menjelaskan bahwa sebagian besar model evakuasi sering mengabaikan perilaku-perilaku yang dilakukan penghuni sebelum dan selama pergerakan evakuasi berlangsung, seperti mencari informasi, membantu orang lain, dan menunggu kondisi yang dianggap aman. Akibatnya, asumsi yang digunakan dalam model evakuasi seringkali tidak realistis dan dapat menghasilkan estimasi waktu evakuasi yang tidak akurat. (Kuligowski et al., 2005)

Dalam kondisi darurat, sebagian orang segera bergerak menuju area aman, sementara yang lain mengalami keterlambatan sebelum memulai evakuasi. Pada simulasi evakuasi berbasis agen, heterogenitas perilaku individu dimodelkan dengan membedakan karakteristik perilaku yang dimiliki setiap agen.

Individu dengan perilaku rasional cenderung menunggu kondisi yang aman sebelum bergerak dan mengikuti jalur evakuasi secara terkontrol. Sebaliknya, individu dengan perilaku panik merespons ancaman secara spontan, langsung bergerak menuju pintu keluar dengan kecepatan lebih tinggi, dan rentan terhadap gangguan arah.

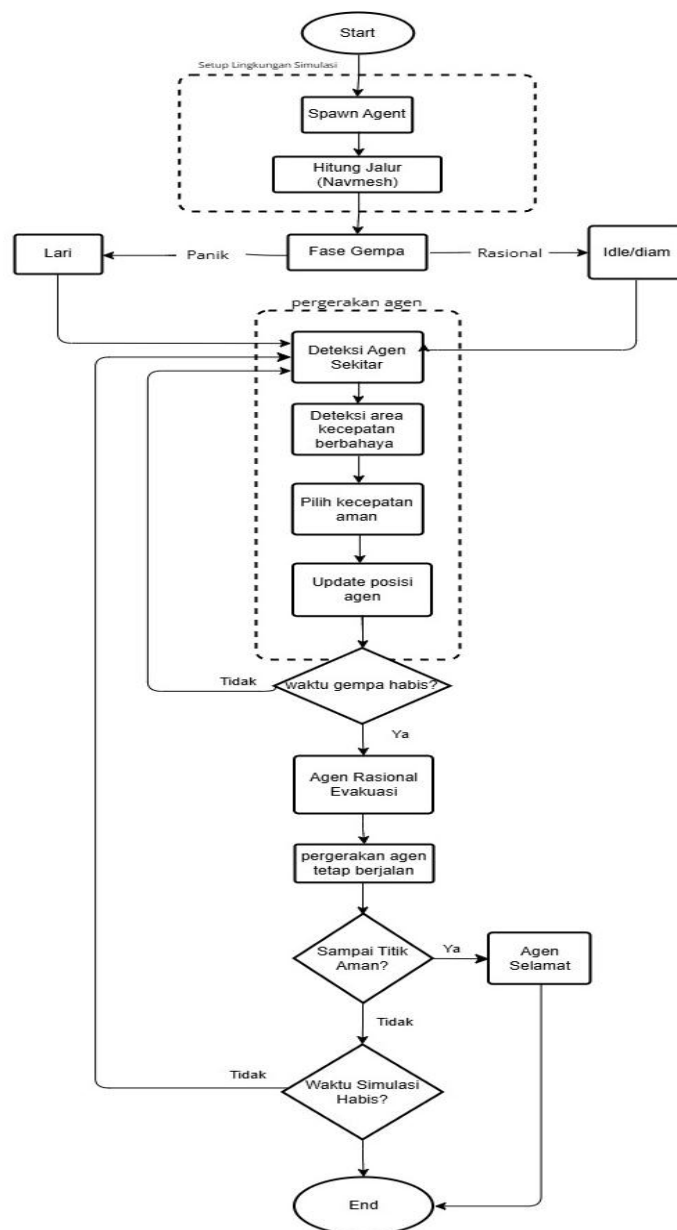
Helbing et al. (2000) menjelaskan bahwa dalam kondisi panik, individu cenderung meningkatkan kecepatan gerak di atas normal karena dorongan psikologis untuk segera menjauh dari sumber bahaya, yang pada saat bersamaan meningkatkan risiko kemacetan pada titik-titik sempit seperti koridor dan tangga darurat.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Desain Simulasi

Simulasi evakuasi gempa pada penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan berbasis agen dalam lingkungan 3D gedung bertingkat.. Alur simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Flowchart Alur Simulasi

Simulasi diawali dengan tahap *setup* lingkungan yang terdiri dari dua proses utama. Pertama, seluruh agen di *spawn* pada titik yang telah ditentukan di setiap lantai gedung sesuai distribusi skenario. Selanjutnya, sistem menentukan jalur evakuasi setiap agen menggunakan NavMesh untuk mencari rute menuju titik aman terdekat berdasarkan panjang lintasan navigasi aktual, sehingga pemilihan titik aman mempertimbangkan geometri gedung secara nyata.

Setelah tahap *setup* selesai, simulasi memasuki fase gempa. Pada fase ini bangunan mengalami guncangan dan kedua tipe agen merespons secara berbeda. Agen panik langsung beralih ke state *run* dan memulai evakuasi sejak fase gempa dimulai, dengan arah pergerakan yang terganggu dari getaran bangunan sehingga pergerakannya tidak sepenuhnya lurus menuju titik aman. Agen rasional sebaliknya beralih ke state *idle* dan tetap berada di posisi *spawn* selama fase gempa berlangsung, namun tetap diproses oleh algoritma RVO agar keberadaannya diperhitungkan dalam *collision avoidance* agen lain yang bergerak di sekitarnya.

Selama fase gempa berlangsung, pergerakan agen yang aktif yaitu agen panik diproses melalui *loop* pergerakan agen yang berjalan setiap *frame*. *Loop* ini terdiri dari empat tahap berurutan, yaitu deteksi agen sekitar, deteksi area kecepatan berbahaya menggunakan konsep *velocity obstacle*, pemilihan kecepatan aman melalui perhitungan ORCA, dan pembaruan posisi agen berdasarkan kecepatan aman tersebut. Proses ini berjalan terus-menerus selama simulasi aktif.

Sistem kemudian memeriksa apakah waktu fase gempa telah habis. Apabila belum habis, *loop* pergerakan agen terus berjalan. Apabila waktu gempa telah habis, agen rasional mulai melakukan evakuasi dan beralih ke state lari. Pada titik ini

seluruh agen dari kedua tipe aktif bergerak secara bersamaan dan pergerakan agen tetap berjalan melalui *loop* pergerakan agen yang sama.

Sistem secara bersamaan memeriksa dua kondisi apakah agen telah sampai di titik aman, dan apakah waktu simulasi telah habis. Agen yang berhasil mencapai titik aman dinyatakan selamat, warnanya berubah menjadi hijau, dan seluruh aktivitas pergerakannya dihentikan. Apabila waktu simulasi telah habis dan agen belum mencapai titik aman, simulasi berakhir dan agen dinyatakan gagal evakuasi. Apabila waktu simulasi belum habis dan agen belum sampai, agen terus bergerak melalui loop pergerakan agen hingga salah satu dari dua kondisi tersebut terpenuhi. Simulasi berakhir di state *end* ketika seluruh kondisi telah terpenuhi.

3.1.1 Lingkungan Simulasi

Lingkungan simulasi pada penelitian ini adalah model 3D Gedung Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Gedung ini terdiri atas tiga lantai dengan berbagai fungsi ruang seperti laboratorium, ruang dosen, ruang kelas, dan area taman tengah sebagai pusat gedung.

a. Lantai 1

Sebanyak 10 titik *spawn* agen ditempatkan pada beberapa area di lantai 1 yang ditandai menggunakan marker berwarna oranye, meliputi area lobby, ruang diskusi, ruang administrasi fakultas, area taman dan kantin, lab. Mikrobiologi, lab. fisiologi hewan, lab. optik dan area koridor. Jalur evakuasi di lantai 1 diarahkan ke dua titik keluar utama, yaitu sisi barat menuju area keamanan (security post) dan sisi timur menuju area luar bangunan.



Gambar 3.2 Lingkungan Lantai 1

b. Lantai 2

10 titik *spawn* ditempatkan pada beberapa area di lantai 2 yaitu, ruang dosen kimia, lab. geofisika, lab. fisika, lab. anorganik, ruang dosen fisika, ruang diskusi kimia, dan area koridor. Jalur evakuasi dari lantai 2 diarahkan melalui tangga barat dan timur yang terhubung ke lantai 1, serta tangga selatan dan utara yang langsung menuju luar bangunan.



Gambar 3.3 Lingkungan Lantai 2

c. Lantai 3

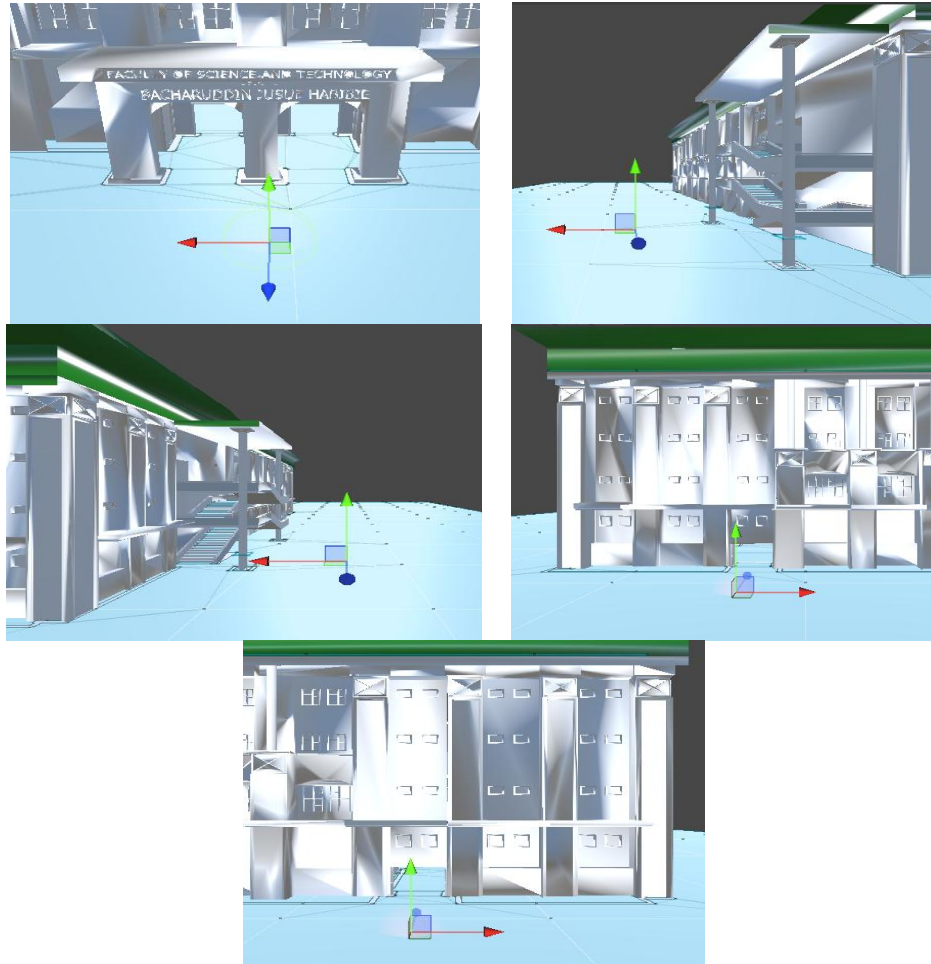
10 titik *spawn* ditempatkan pada beberapa area di lantai 3 yaitu ruang dosen matematika, ruang dosen TI, ruang diskusi, ruang multimedia, ruang artificial intelligence, kantin lantai 3, dan area koridor. Jalur evakuasi dari lantai 3 diarahkan melalui tangga barat dan timur menuju lantai 1, serta tangga selatan dan utara menuju luar bangunan. Agen yang berasal dari lantai 3 memiliki jalur evakuasi paling panjang dibandingkan lantai lainnya, sehingga lebih berisiko tidak mencapai titik aman sebelum batas waktu simulasi berakhir apabila terjadi penumpukan di area tangga.



Gambar 3.4 Lingkungan Lantai 3

a. Titik aman

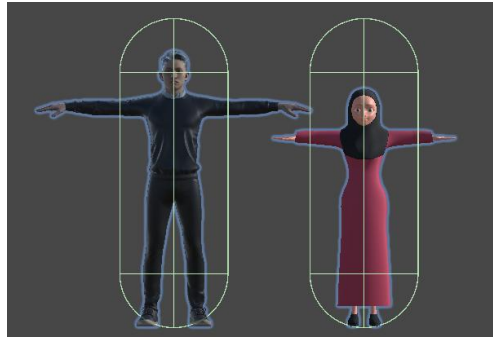
Lima titik aman ditempatkan di area terbuka di luar gedung sebagai titik kumpul evakuasi. Penempatan di beberapa titik yang berbeda bertujuan untuk mendistribusikan aliran agen dari berbagai sisi gedung sehingga tidak seluruh agen menuju satu titik yang sama, mengurangi potensi penumpukan di area luar gedung. Posisi kelima titik aman ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Safe Point

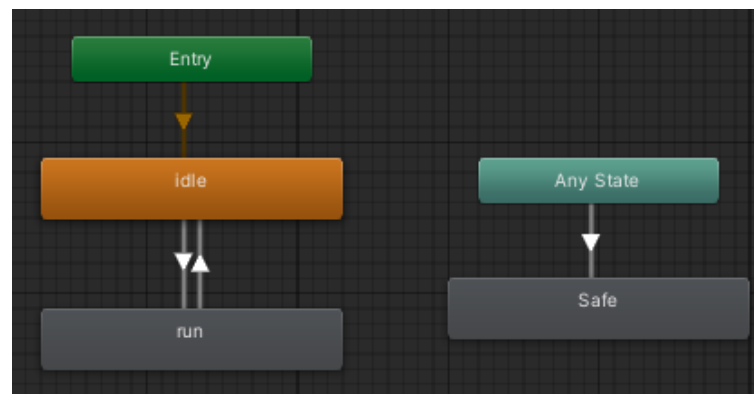
3.1.2 Desain Agen

Simulasi menggunakan dua jenis agen dengan perilaku berbeda, yaitu agen rasional dan agen panik. Kedua agen dibedakan menggunakan model 3D yang berbeda untuk memudahkan identifikasi tipe agen selama simulasi berlangsung.



Gambar 3.6 Desain Agen

Setiap agen dilengkapi dengan Finite State Machine (FSM) yang mengatur perubahan perilaku berdasarkan kondisi simulasi yang sedang berlangsung. FSM terdiri dari tiga state utama yang terhubung melalui transisi yang dipicu oleh peristiwa tertentu, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.7 FSM Agen

State Idle adalah kondisi awal seluruh agen sebelum memulai evakuasi. Pada *state* ini agen berdiri diam di posisi *spawn*nya tanpa melakukan pergerakan. Agen rasional berada di *state Idle* selama fase gempa berlangsung, sedangkan agen panik langsung beralih ke *Run* ketika gempa terjadi.

State Run adalah kondisi agen aktif bergerak menuju titik aman. Transisi dari *Idle* ke *Run* terjadi pada waktu yang berbeda untuk setiap tipe. agen panik beralih

ke Run saat fase gempa dimulai, sedangkan agen rasional beralih setelah fase gempa selesai. Pada state ini algoritma RVO aktif menghitung kecepatan aman setiap frame untuk menghindari tabrakan dengan agen lain yang bergerak di sekitarnya.

State Safe adalah kondisi akhir yang dicapai ketika agen berhasil memasuki area titik aman. Transisi dari Run ke Safe terjadi secara otomatis ketika agen menyentuh area trigger di titik aman. Pada state ini warna agen berubah menjadi hijau sebagai penanda bahwa agen telah berhasil evakuasi, dan seluruh aktivitas pergerakan agen dihentikan.

3.2 Implementasi Sistem

3.2.1 Integrasi *NavMesh* dan RVO

Dalam penelitian ini, sistem navigasi agen dibangun dengan pendekatan gabungan antara *global pathfinding* dan *local collision avoidance*. Kedua komponen ini bekerja secara komplementer dan menangani aspek navigasi yang berbeda. NavMesh bertanggung jawab atas perencanaan rute menuju titik aman secara global, sementara RVO menangani penghindaran tabrakan antar agen secara lokal dan dinamis pada setiap *frame* simulasi.

Navigation Mesh (NavMesh) adalah struktur data geometris dari area yang dapat dilalui agen dalam lingkungan simulasi, berbentuk kumpulan polygon yang saling terhubung dan mencakup seluruh permukaan lantai, tangga, dan jalur koridor. Dengan NavMesh, setiap agen dapat merencanakan rute dari posisi awalnya menuju titik aman tanpa menembus dinding, pintu tertutup, atau obstacle

statis lainnya. NavMesh menghasilkan serangkaian waypoint yang menjadi rute global agen menuju tujuan.

Namun, NavMesh tidak dirancang untuk menangani interaksi antar agen yang bergerak secara bersamaan. Tanpa mekanisme tambahan, agen-agen yang mengikuti jalur NavMesh yang sama akan saling tumpang tindih ketika bertemu di koridor sempit atau berkumpul di area tangga. Untuk mengatasi hal tersebut, algoritma RVO diterapkan sebagai lapisan *local collision avoidance* yang bekerja di atas NavMesh. Pada setiap frame, agen menghitung *preferred velocity* menuju *waypoint* berikutnya berdasarkan jalur NavMesh. *Preferred velocity* ini kemudian dikoreksi oleh RVO menjadi *safe velocity* yang memenuhi seluruh *half-plane constraint* ORCA, sehingga agen bergerak menuju tujuan sekaligus menghindari tabrakan dengan agen lain di sekitarnya secara *real-time*.

3.2.2 Penerapan RVO

Penelitian ini menggunakan Library RVO2 yang dikembangkan oleh University of North Carolina at Chapel Hill dan mengimplementasikan pendekatan *Optimal Reciprocal Collision Avoidance* (ORCA). ORCA merupakan pengembangan dari algoritma RVO yang menggunakan *half-plane constraint* dalam ruang kecepatan untuk menentukan kecepatan aman setiap agen secara efisien melalui *linear programming* berdimensi rendah (Van Den Berg et al., 2011). Penerapan RVO dalam penelitian ini mencakup empat tahap yang berjalan secara berurutan pada setiap frame simulasi.

- a. Penentuan Kecepatan Awal Agen (Preferred Velocity)

Setiap agen menghitung kecepatan awal yang diinginkan berdasarkan arah menuju *waypoint* berikutnya dari jalur *NavMesh*. *Waypoint* diambil dari corner pertama jalur *NavMesh* yang belum tercapai ketika agen cukup dekat dengan suatu corner, agen berpindah menuju corner berikutnya secara bertahap hingga mencapai titik aman. *Preferred velocity* ini diformulasikan sebagai:

$$V_{\text{pref}} = \frac{w - p_A}{|w - p_A|} \times s \quad (3.1)$$

Keterangan:

- w = posisi *waypoint* berikutnya
- p_A = posisi agen saat ini
- s = kecepatan agen sesuai tipenya (rasional atau panik)

Untuk agen panik selama fase gempa, arah *preferred velocity* dirotasi menggunakan *noise* getaran bangunan sehingga pergerakannya tidak sepenuhnya lurus, mencerminkan gangguan fisik akibat gempa. Bagi agen rasional yang belum mulai evakuasi, kecepatan awal diatur nol sehingga agen diam namun tetap masuk dalam perhitungan RVO agen lain di sekitarnya.

b. Pembentukan ORCA Constraint

Preferred velocity yang telah dihitung belum menjamin keamanan dari tabrakan karena tidak mempertimbangkan posisi dan kecepatan agen lain di sekitarnya. Kecepatan awal ini dikirim ke simulator RVO untuk dikoreksi. RVO mengidentifikasi kecepatan berbahaya menggunakan konsep Velocity Obstacle (VO) yaitu, himpunan seluruh kecepatan agen A yang akan menyebabkan tabrakan dengan agen B apabila agen B mempertahankan kecepatannya saat ini (Ming Lin & Dinesh Manocha, 2008)

$$VO_B^A(v_B) = \{v_A \mid \lambda(p_A, v_A - v_B) \cap B \oplus -A \neq \emptyset\} \quad (3.2)$$

Keterangan:

- p_A, p_B = posisi agen A dan B
- v_A, v_B = kecepatan agen A dan B
- $\lambda(p, v) = \{p + tv \mid t \geq 0\}$ = lintasan dari posisi p dengan kecepatan v
- $B \oplus -A$ = Minkowski sum dari bentuk agen B dan refleksi agen A

Secara geometris, VO berbentuk kerucut dalam ruang kecepatan. Kecepatan agen A yang berada di dalam kerucut ini akan mengarah pada tabrakan, sedangkan kecepatan di luar kerucut dianggap aman. Berdasarkan VO ini, ORCA membangun i untuk setiap pasang agen yang berdekatan. Setiap *half-plane* memisahkan ruang kecepatan menjadi wilayah aman dan wilayah berisiko tabrakan dalam rentang *time horizon* yang telah ditentukan. Semakin pendek *time horizon*, semakin dekat jarak yang harus ditempuh agen sebelum mulai menghindar. Semakin panjang *time horizon*, semakin awal agen mulai menyesuaikan lintasan untuk menghindari tabrakan yang masih jauh.

c. Pemilihan *Safe velocity*

Setelah seluruh *half-plane constraint* dari agen-agen tetangga terbentuk, Library RVO2 menentukan *safe velocity* melalui proses *linear programming* berdimensi rendah. *Safe velocity* adalah kecepatan yang paling mendekati *preferred velocity* namun tetap memenuhi seluruh *half-plane constraint* yang telah dibentuk secara bersamaan (Van Den Berg et al., 2011). Dengan kata lain, *safe velocity* merupakan solusi optimal yang mempertahankan arah gerak agen sedekat mungkin dengan tujuannya sambil menjamin tidak terjadi tabrakan dalam *time horizon* yang ditentukan.

d. Pembaruan Posisi Agen

Safe velocity yang dihasilkan kemudian digunakan untuk memperbarui posisi agen pada lingkungan simulasi.

$$p_A(t + \Delta t) = p_A(t) + v_{safe} \cdot \Delta t \quad (3.3)$$

Posisi baru kemudian disesuaikan ke permukaan *NavMesh* untuk memastikan agen tetap berada di area yang dapat dilalui dan tidak menembus dinding atau geometri bangunan. Posisi yang telah disesuaikan ini disamakan kembali ke simulator RVO agar perhitungan pada *frame* berikutnya menggunakan posisi yang akurat.

3.2.3 Parameter simulasi

Parameter simulasi dalam penelitian ini terdiri dari parameter yang divariasikan antar skenario dan parameter yang dijaga konstan di seluruh skenario. Parameter yang divariasikan mencakup jumlah agen dan komposisi antara agen rasional dan panik, karena keduanya langsung berkaitan dengan dua aspek yang dievaluasi yaitu pengaruh kepadatan kerumunan dan pengaruh komposisi perilaku terhadap performa RVO.

Parameter yang dijaga konstan di seluruh skenario meliputi beberapa hal berikut:

- a. Kecepatan agen, ditetapkan berbeda antara kedua tipe sesuai karakteristik perilakunya.
- b. Durasi fase gempa, menentukan berapa lama fase gempa berlangsung sebelum agen rasional mulai melakukan evakuasi. Parameter ini secara langsung menentukan seberapa besar *head start* yang dimiliki agen panik sebelum agen rasional ikut bergerak, sehingga berpengaruh terhadap

distribusi temporal pergerakan yang menjadi salah satu faktor kunci dalam analisis.

- c. Durasi fase evakuasi, waktu maksimum yang diberikan kepada seluruh agen untuk mencapai titik aman sejak simulasi dimulai. Agen yang tidak berhasil mencapai titik aman sebelum batas waktu ini berakhir dinyatakan gagal evakuasi.

3.2.4 Deteksi Tabrakan

Deteksi tabrakan digunakan untuk mencatat jumlah kejadian tabrakan yang terjadi antar agen selama simulasi berlangsung sebagai salah satu metrik evaluasi performa RVO. Tabrakan dinyatakan terjadi apabila jarak antara dua agen lebih kecil dari jumlah radius keduanya:

$$d_{ij} < r_i + r_j \quad (3.4)$$

Keterangan:

- d_{ij} = jarak antara agen i dan agen j
- r_i, r_j = radius agen i dan agen j

Deteksi tabrakan hanya dilakukan pada agen yang sedang aktif bergerak, yaitu agen dalam *state Run*. Agen rasional yang masih berada dalam *state Idle* selama fase gempa tidak diikutsertakan dalam penghitungan tabrakan.

3.3 Pengujian simulasi

3.3.1 Desain skenario

Penelitian ini menggunakan lima skenario yang dirancang untuk mengevaluasi dua aspek utama, pengaruh komposisi perilaku agen dan pengaruh kepadatan agen.

Pengaruh komposisi perilaku dievaluasi melalui perbandingan skenario 1, 2, dan 3, yang menggunakan jumlah agen yang sama (200 agen) namun dengan proporsi agen rasional dan panik yang berbeda. Skenario 1 menggunakan seluruh agen rasional sebagai kondisi dasar evakuasi prosedural penuh, skenario 3 menggunakan seluruh agen panik sebagai kondisi kepanikan massal, dan skenario 2 menggunakan komposisi campuran 50:50 sebagai kondisi yang menggambarkan kondisi nyata di mana respons penghuni gedung bervariasi.

Pengaruh tingkat kepadatan dievaluasi melalui perbandingan skenario 4, 2, dan 5, yang menggunakan komposisi perilaku yang sama (50:50) namun dengan jumlah agen yang berbeda. Skenario 4 menggunakan 100 agen sebagai kondisi kepadatan rendah, skenario 2 menggunakan 200 agen sebagai kepadatan menengah, dan skenario 5 menggunakan 300 agen sebagai kondisi kepadatan tinggi.

Tabel 3. 1 Desain Skenario

Skenario	Jumlah Agen	Komposisi Agen (Rasional : Panik)	Fokus Analisis
1	200	100% : 0%	Baseline kondisi prosedural penuh
2	200	50% : 50%	Interaksi campuran pada kepadatan menengah
3	200	0% : 100%	Kondisi kepanikan massal
4	100	50% : 50%	kepadatan rendah
5	300	50% : 50%	Kepadatan tinggi

Setiap skenario dijalankan sebanyak 10 replikasi dengan posisi *spawn* yang diacak pada setiap replikasi untuk mengurangi bias hasil yang mungkin timbul dari konfigurasi awal tertentu.

3.3.2 Metrik evaluasi

Pengukuran dilakukan menggunakan tiga metrik utama yang mengukur aspek berbeda dari proses evakuasi.

- a. *Safety rate* digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan evakuasi dengan membandingkan jumlah agen yang berhasil mencapai titik aman terhadap jumlah seluruh agen dalam simulasi. Nilai *Safety rate* dihitung menggunakan Persamaan 3.5

$$SR = \frac{N_{selamat}}{N_{total}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Keterangan:

- (SR) = *Safety rate* (%)
- $N_{selamat}$ = jumlah agen yang berhasil mencapai titik aman
- N_{total} = jumlah seluruh agen dalam simulasi

- b. Total *Collision* digunakan untuk mengukur jumlah kejadian tabrakan yang terjadi selama simulasi sebagai parameter langsung performa RVO dalam mencegah tumpang tindih antar agen.
- c. Rata-rata waktu evakuasi digunakan untuk mengukur efisiensi pergerakan agen menuju titik aman. Waktu evakuasi setiap agen dihitung berdasarkan selisih antara waktu agen mulai melakukan evakuasi dan waktu agen mencapai titik aman. Nilai yang dilaporkan merupakan rata-rata dari waktu evakuasi seluruh agen yang berhasil selamat pada replikasi tersebut, sehingga metrik ini menggambarkan kecepatan tempuh individu rata-rata, bukan durasi total sejak evakuasi dimulai hingga seluruh agen selesai dievakuasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian

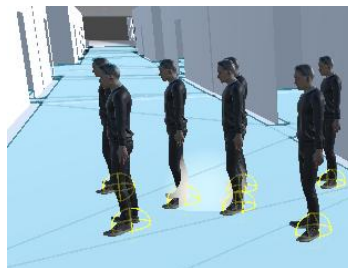
4.1.1 Kondisi Pengujian

Pengujian dilaksanakan pada lima skenario yang masing-masing dijalankan sebanyak 10 replikasi dengan posisi *spawn* diacak setiap replikasi untuk mengurangi bias hasil simulasi. Parameter simulasi yang digunakan selama pengujian meliputi:

- a. Kecepatan agen rasional sebesar 1,5 m/s
- b. Kecepatan agen panik sebesar 2 m/s
- c. Durasi fase gempa selama 30 detik
- d. Batas waktu evakuasi selama 120 detik

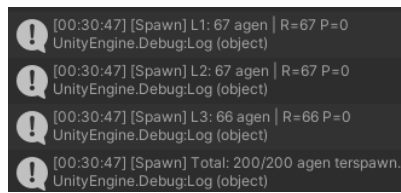
4.1.2 Skenario 1 (Semua Agen Rasional)

Skenario 1 menguji kondisi evakuasi dengan 200 agen yang seluruhnya bertipe rasional. Seluruh agen berada dalam *state Idle* selama 30 detik fase gempa, kemudian bergerak serentak menuju titik aman pada $t = 30$ detik atau fase evakuasi.



Gambar 4.1 Kondisi *Spawn* Pada Skenario 1

Gambar 4.1. Kondisi awal Skenario 1 setelah proses *spawn* selesai, yaitu 200 agen rasional terdistribusi di tiga lantai sebelum simulasi berjalan.



Gambar 4.2 Pembagian Perlantai pada skenario 1

Gambar 4.2 menunjukkan pembagian perlantai dari total 200 agen terspawn sebagai tipe rasional (R) tanpa agen panik ($P=0$) di ketiga lantai.

Tabel 4.1 Hasil Skenario 1 (200 Agen)

Replikasi	Agen Selamat	Agen Gagal	Total Collision	Waktu Evakuasi Rasional (s)	Safety rate (%)
1	190	10	1034	79,96	95
2	190	10	1331	79,52	95
3	190	10	1196	79,06	95
4	189	11	1181	80,10	94,5
5	189	11	1233	79,97	94,5
6	188	12	1220	79,85	94
7	192	8	1053	79,24	96
8	188	12	1060	78,98	94
9	190	10	941	79,75	95
10	189	11	989	79,17	94,5
Rata-rata	190	11	1124	79,56	94,8

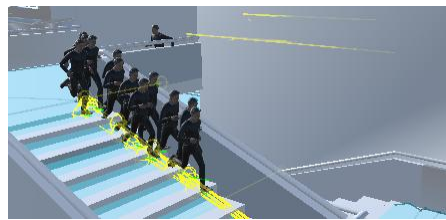
Skenario 1 menghasilkan *safety rate* rata-rata sebesar 94,8%. Artinya, dari 200 agen yang disimulasikan, rata-rata 190 agen berhasil mencapai titik aman setiap replikasinya, sedangkan rata-rata 11 agen gagal. Jumlah agen gagal per replikasi berkisar antara 8 hingga 12 agen di mana sebanyak 8 dari 10 replikasi menghasilkan jumlah agen gagal antara 10-12 yang menunjukkan bahwa hasil antar replikasi cenderung konsisten tidak berbeda jauh.

Berdasarkan tabel 4.1, rata-rata waktu evakuasi agen yang berhasil mencapai titik aman adalah 79,56 detik sejak fase evakuasi dimulai. Nilai tercepat tercatat pada replikasi ke-8 sebesar 78,98 detik, sedangkan nilai terlama terjadi pada

replikasi ke-4 sebesar 80,10 detik. Selisih waktu yang hanya mencapai 1,12 detik menunjukkan bahwa pola pergerakan agen yang berhasil dievakuasi relatif stabil dan konsisten pada seluruh replikasi.

Rata-rata waktu evakuasi agen yang berhasil mencapai titik aman masih memiliki sisa waktu sekitar 40 detik sebelum batas akhir simulasi. Jika kegagalan 11 agen pada setiap replikasi disebabkan oleh ketidakmampuan algoritma RVO yang tidak dapat menghitung kecepatan dengan baik, maka waktu evakuasi agen yang berhasil seharusnya juga mendekati batas. Namun hasil yang diperoleh malah sebaliknya, agen mampu mencapai titik aman jauh sebelum batas waktu simulasi sehingga RVO tetap bekerja dengan baik pada kondisi kepadatan agen yang tinggi.

Persoalan utama terletak pada pola simulasi Skenario 1 itu sendiri. Seluruh 200 agen tetap berada dalam kondisi diam selama 30 detik pertama, kemudian mulai melakukan evakuasi hampir pada waktu yang bersamaan setelah fase gempa berakhir. Kondisi ini menyebabkan terbentuknya arus agen dalam jumlah besar secara serentak menuju jalur dan titik keluar yang sama.



Gambar 4.3 Kepadatan pada area tangga

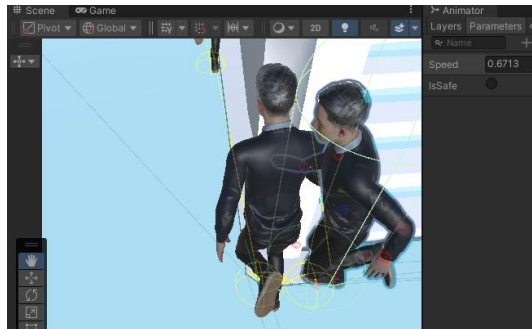
Kemacetan yang terjadi seperti yang terlihat pada gambar 4.3 pada skenario 1 memiliki dua faktor. Faktor pertama berasal dari keterbatasan desain Navmesh. Navmesh mendefinisikan area yang dapat agen beserta lebar jalur yang *walkable*. Navmesh menghasilkan jalur yang mengarahkan setiap agen melalui titik-titik

tertentu menuju titik aman. Dikarenakan banyak agen memiliki posisi awal dan tujuan yang berdekatan, jalur yang dihasilkan untuk masing-masing agen menjadi hampir sama, sehingga *preffered velocity* mereka mengarah ke titik yang sama. Pada kondisi ini, RVO yang berupaya menghitung kecepatan aman yang paling mendekati kecepatan aman yang paling mendekati *preffered velocity* lebih sering menghasilkan kecepatan yang lambat sehingga membentuk antrean di dekat tembok tangga ataupun dinding bangunan daripada penyebaran agen ke arah sampingnya seperti yang terlihat pada gambar 4.3.

Faktor kedua adalah keterbatasan mekanisme RVO pada kondisi kepadatan tinggi. Dalam ORCA, setiap agen tetangga yang berada dalam radius deteksi menyumbang satu *half-plane constraint* pada ruang kecepatan agen yang sedang dihitung. Ruang kecepatan yang valid adalah irisan dari seluruh *half-plane* tersebut, dan ORCA memilih kecepatan dalam irisan itu yang paling mendekati *preferred velocity* (Van Den Berg et al., 2011)

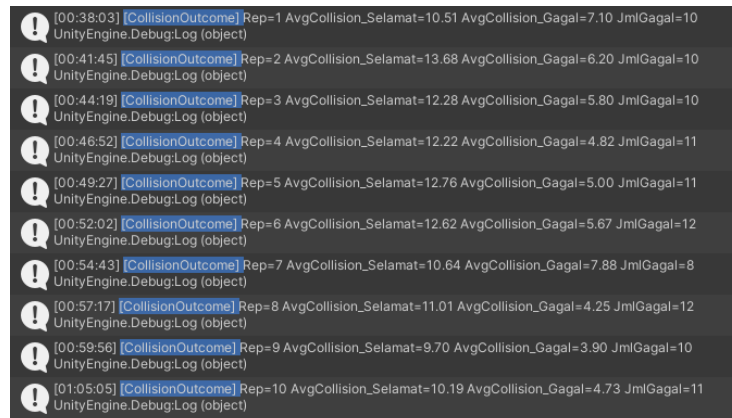
Ketika agen berada dalam kerumunan padat di area tangga dengan agen-agen lain memenuhi arah depan yang melambat karena *bottleneck*, dan dinding atau agen lain mengapit dari sisi kiri-kanan. Setiap tetangga menyumbang satu *half-plane* yang memotong bagian dari ruang kecepatan. Semakin banyak tetangga aktif di sekitar agen, semakin sempit irisan kecepatan yang tersisa. Pada titik tertentu, irisan tersebut menyusut hingga hanya tersisa ruang yang sangat kecil dan jauh dari arah *preferred velocity*, sehingga *safe velocity* yang dihitung ORCA mendekati nol sebagaimana terlihat pada Gambar 4.4. Agen melambat, bukan karena algoritma

gagal, melainkan karena secara geometris tidak ada kecepatan yang aman selain diam. Kondisi ini berlanjut hingga batas waktu simulasi berakhir.



Gambar 4. 4 Kecepatan Agen yang terjebak

Variasi pada nilai total *collision* cukup terlihat antar replikasi, yaitu antara 941 pada replikasi 9 dan 1.331 pada replikasi 2. Variasi ini dipengaruhi oleh distribusi posisi *spawn* point pada awal simulasi yang menentukan seberapa sering agen saling berdekatan dan membentuk kerumunan selama proses evakuasi berlangsung.



Gambar 4. 5 Log *Collision Out Come* Skenario 1

Untuk memeriksa apakah tingginya *collision* merupakan faktor penentu kegagalan evakuasi, dilakukan analisis data pada Gambar 4.5. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai rata-rata *collision* pada agen yang gagal justru lebih

rendah dibandingkan agen yang berhasil selamat, dan pola ini konsisten pada seluruh replikasi. Ini berarti agen yang berhasil keluar justru mengalami lebih banyak *collision*, karena mereka menempuh jalur penuh melewati titik sempit seperti tangga, sedangkan agen yang gagal cenderung tertahan di belakang antrian dan tidak banyak bergerak. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa tingginya *collision* bukan faktor utama penyebab kegagalan evakuasi pada Skenario 1.

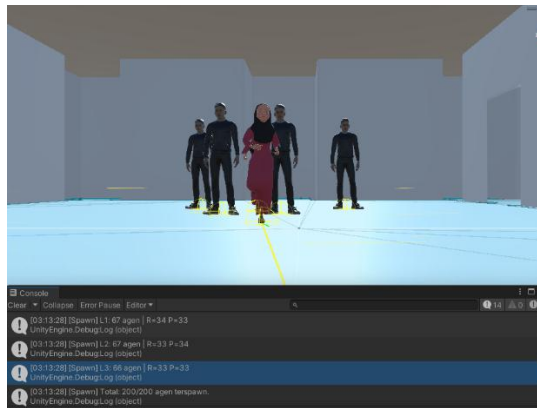
00:57:17	ID=120	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=2	SpawnPoint=2SP_4	SpawnPos=(-79.18, -6.65, 195.54)	SafeZone=Safe4	Collision=2
00:57:17	ID=142	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-15.67, 1.63, 272.73)	SafeZone=Safe1	Collision=7
00:57:17	ID=152	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-14.70, 1.63, 271.71)	SafeZone=Safe1	Collision=4
00:57:17	ID=162	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-14.96, 1.63, 274.01)	SafeZone=Safe1	Collision=3
00:57:17	ID=164	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_5	SpawnPos=(49.17, 1.63, 254.38)	SafeZone=Safe2	Collision=6
00:57:17	ID=169	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_6	SpawnPos=(-77.29, 1.63, 240.46)	SafeZone=Safe3	Collision=2
00:57:17	ID=172	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-15.86, 1.63, 270.62)	SafeZone=Safe1	Collision=9
00:57:17	ID=182	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-13.30, 1.63, 272.95)	SafeZone=Safe1	Collision=2
00:57:17	ID=185	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_9	SpawnPos=(78.76, 1.63, 184.48)	SafeZone=Safe5	Collision=2
00:57:17	ID=187	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_10	SpawnPos=(81.98, 1.63, 274.60)	SafeZone=Safe2	Collision=3
00:57:17	ID=189	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_6	SpawnPos=(-78.47, 1.63, 239.56)	SafeZone=Safe3	Collision=2
00:57:17	ID=192	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-13.31, 1.63, 271.42)	SafeZone=Safe1	Collision=9
Rep=8 AvgCollision_Selamat=11.01 AvgCollision_Gagal=4.25 JmlGagal=12									

Gambar 4.6 Data Agen Gagal Skenario 1 Pada Replikasi ke-8

Gambar 4.6 menampilkan distribusi rantai asal agen yang gagal. Pola distribusi tersebut menunjukkan bahwa lokasi awal agen memengaruhi peluang keberhasilan evakuasi, di mana agen yang harus menempuh jalur lebih panjang cenderung lebih berisiko gagal mencapai titik aman sebelum batas waktu simulasi berakhir.

4.1.3 Skenario 2 (Kepadatan Menengah)

Skenario 2 merupakan skenario dengan komposisi campuran, yaitu 100 agen rasional dan 100 agen panik dari total 200 agen yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.7 Pembagian dan kondisi *Spawn* Pada Skenario 2

Skenario ini dirancang untuk mengamati bagaimana dua jenis perilaku yang berbeda saling berinteraksi dalam satu lingkungan evakuasi yang sama. Pada awal simulasi, seluruh agen ditempatkan secara acak di dalam gedung tanpa pengelompokan berdasarkan jenis agen, sehingga kedua kelompok tersebar merata di seluruh area.

Perbedaan perilaku kedua kelompok menciptakan pola pergerakan yang tidak serentak sejak fase gempa dimulai. Agen panik langsung bergerak menuju pintu keluar pada $t = 0$, sementara agen rasional menunggu di titik kumpul hingga fase gempa selesai pada $t = 30$ detik. Akibatnya, simulasi menunjukkan dua gelombang pergerakan yang terpisah, gelombang pertama dari agen panik yang berangkat lebih awal dengan kecepatan 2 m/s, dan gelombang kedua dari agen rasional yang menyusul setelah jeda 30 detik dengan kecepatan 1,5 m/s. Pada fase peralihan ini, yaitu saat agen rasional mulai bergerak dan sebagian agen panik masih berada di jalur evakuasi, area tangga dan koridor sempit menjadi titik penumpukan yang terlihat jelas dalam gambar 4.8.

Gambar 4.8 *Bottleneck* Skenario 2

Tabel 4. 2 Hasil Simulasi Skenario 2 (200 Agen)

Replikasi	Agen Selamat	Agen Gagal	Total Collision	Waktu Evakuasi Rasional (s)	Waktu Evakuasi Panik (s)	Safety rate (%)
1	190	10	581	78.99	73.23	95
2	192	8	481	79.41	71.28	96
3	191	9	483	78.66	72.50	95,5
4	191	9	454	78.23	72.37	95,5
5	191	9	505	78.42	71.90	95,5
6	191	9	589	77.30	72.66	95,5
7	191	9	489	78.22	72.72	95,5
8	191	9	539	79.78	71.28	95,5
9	190	10	570	78.86	72.33	95
10	191	9	499	78.43	72.61	95,5
Rata-rata	191	9	519	78, 92	72,72	95,5

Dari 10 replikasi yang dijalankan, Skenario 2 menghasilkan rata-rata 191 agen selamat dari total 200 agen, setara dengan *safety rate* sebesar 95,5%. Angka ini sedikit lebih tinggi dibandingkan Skenario 1 yang mencatat *safety rate* 94,8%, dengan selisih sekitar 0,7 poin persentase. Rata-rata agen yang gagal mencapai titik aman juga turun dari 11 agen pada Skenario 1 menjadi 9 agen pada Skenario 2.

Peningkatan ini terlihat pada seluruh replikasi meskipun dengan besaran yang relatif kecil. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan pola evakuasi dua fase gelombang

yang menjadi karakteristik skenario 2. Ketika agen rasional mulai melakukan evakuasi pada $t = 30$ detik, sebagian agen panik telah lebih dahulu melewati atau meninggalkan area sempit, seperti tangga dan koridor. Akibatnya, tingkat kepadatan pada jalur evakuasi menjadi lebih rendah dibandingkan Skenario 1. Kondisi ini tercermin dari penurunan rata-rata total *collision* per replikasi yang cukup signifikan, yaitu dari 1.124 pada Skenario 1 menjadi 519 pada Skenario 2. Meskipun demikian, penumpukan agen masih terjadi ketika kedua gelombang evakuasi bertemu di area tangga, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.8, namun dengan tingkat kepadatan yang lebih rendah dibandingkan Skenario 1.

Waktu evakuasi kedua tipe agen diukur dari titik awal yang berbeda sehingga tidak dapat dibandingkan langsung dari angka tabel. Agen panik mulai bergerak pada $t=0$ dan rata-rata mencapai titik aman pada detik ke-72,72 sejak simulasi dimulai. Agen rasional mulai bergerak pada $t=30$ detik dan membutuhkan rata-rata 78,92 detik untuk menyelesaikan perjalanannya, sehingga rata-rata tiba di titik aman pada detik ke-108,92 sejak simulasi dimulai.

Selisih waktu kedatangan antara kedua kelompok adalah sekitar 36,2 detik. Dibandingkan dengan Skenario 1 yang mencatat waktu evakuasi rasional rata-rata 79,56 detik, selisihnya hanya 0,64 detik yang menunjukkan bahwa kehadiran agen panik di jalur yang sama tidak secara signifikan memperlancar maupun memperlambat perjalanan agen rasional secara rata-rata.

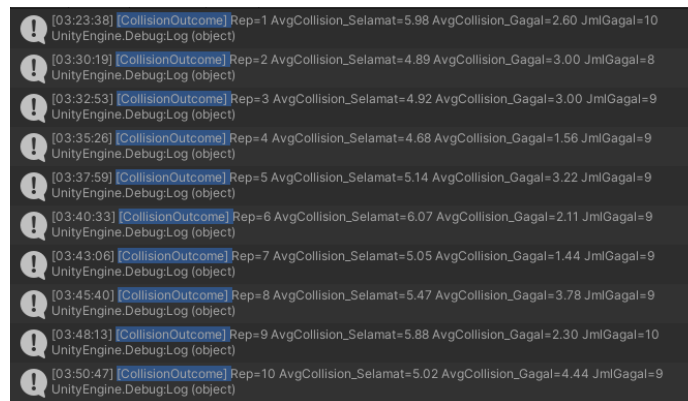
Untuk mengidentifikasi tipe agen serta asal rantai agen yang gagal mencapai zona aman, data per-agen pada Replikasi ke-1 disajikan pada Gambar 4.9.

[03:23:38]	ID=117	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=2	SpawnPoint=2SP_4	SpawnPos=(-79.35, -6.65, 195.76)	SafeZone=Safe4	Collision=0
[03:23:38]	ID=138	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-15.04, 1.63, 272.88)	SafeZone=Safe1	Collision=4
[03:23:38]	ID=144	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_6	SpawnPos=(-76.10, 1.63, 238.98)	SafeZone=Safe3	Collision=4
[03:23:38]	ID=146	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_5	SpawnPos=(49.13, 1.63, 252.72)	SafeZone=Safe2	Collision=2
[03:23:38]	ID=154	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_6	SpawnPos=(-75.91, 1.63, 240.49)	SafeZone=Safe3	Collision=2
[03:23:38]	ID=178	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-13.72, 1.63, 273.49)	SafeZone=Safe1	Collision=1
[03:23:38]	ID=181	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_10	SpawnPos=(80.94, 1.63, 275.36)	SafeZone=Safe2	Collision=1
[03:23:38]	ID=187	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_9	SpawnPos=(80.15, 1.63, 184.15)	SafeZone=Safe5	Collision=1
[03:23:38]	ID=188	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-17.83, 1.63, 271.16)	SafeZone=Safe1	Collision=4
[03:23:38]	ID=198	Nama=male(Clone)	Tipe=Rational	Status=GAGAL	Lantai=3	SpawnPoint=3SP_7	SpawnPos=(-13.43, 1.63, 269.41)	SafeZone=Safe1	Collision=7
[03:23:38]	[CollisionOutcome] Rep=1 AvgCollision_Selamat=5.98 AvgCollision_Gagal=2.60 JmlGagal=10								

Gambar 4.9 Data Agen Gagal Skenario 2 Pada Replikasi ke-1

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa seluruh agen yang gagal pada replikasi tersebut berjumlah 10 agen dan semuanya bertipe rasional, tanpa adanya agen panik yang mengalami kegagalan. Dari jumlah tersebut, sembilan agen berasal dari Lantai 3, sedangkan satu agen lainnya berasal dari Lantai 2 dengan titik awal pada *SpawnPoint* 2SP_4. Dominasi agen gagal dari Lantai 3 sejalan dengan karakteristik jalur evakuasi lantai tersebut yang memiliki jarak tempuh lebih panjang dibandingkan lantai lainnya.

Jumlah *collision* yang dialami agen-agen gagal tergolong rendah, yaitu berada pada rentang 0 hingga 7 *collision* dengan rata-rata sebesar 2,60. Bahkan, salah satu agen (ID=117) gagal mencapai titik aman tanpa mengalami *collision* sama sekali selama simulasi berlangsung. Sebagai perbandingan, rata-rata *collision* yang dialami agen yang berhasil selamat pada replikasi yang sama mencapai 5,98.



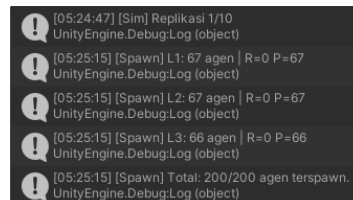
Gambar 4. 10 Log *Collision Out come* Skenario 2

Hasil yang sama juga terlihat pada seluruh replikasi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.10. Kondisi ini sejalan dengan hasil pada Skenario 1, yaitu agen yang gagal cenderung mengalami jumlah *collision* yang lebih sedikit dibandingkan agen yang berhasil dievakuasi. Kondisi tersebut terjadi karena agen gagal tidak mampu bergerak cukup jauh dari posisi awalnya sehingga tidak banyak berinteraksi dengan area yang memiliki kepadatan tinggi pada jalur evakuasi. Oleh karena itu, *collision* tidak dapat dianggap sebagai faktor utama yang menyebabkan kegagalan evakuasi pada Skenario 2.

Sebanyak 4 dari 10 agen yang gagal pada Replikasi ke-1 berasal dari *SpawnPoint* 3SP_7, yang menunjukkan bahwa posisi *spawn* tertentu di Lantai 3 memiliki kecenderungan lebih tinggi untuk mengalami kegagalan evakuasi. Kondisi ini semakin memperkuat bahwa kegagalan pada Skenario 2 lebih dipengaruhi oleh jarak awal agen menuju pintu keluar serta keterbatasan waktu evakuasi 120 detik yang dimiliki agen rasional, dibandingkan oleh gangguan yang ditimbulkan oleh agen panik.

4.1.4 Skenario 3 (Semua Agen Panik)

Skenario 3 melibatkan seluruh 200 agen bertipe panik yang bergerak serentak sejak fase gempa dimulai. Distribusi *spawn* agen di tiga lantai ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.11 Pembagian Perlantai pada skenario 3

Tabel 4. 3 Hasil Simulasi Skenario 3 (200 Agen)

Replikasi	Agen Selamat	Agen Gagal	Total <i>Collision</i>	Waktu Evakuasi Panik(s)	<i>Safety rate</i> (%)
1	200	0	813	72,28	100
2	200	0	714	71,64	100
3	200	0	723	72,3	100
4	200	0	753	71,56	100
5	200	0	799	71,46	100
6	200	0	706	71,86	100
7	200	0	742	72,81	100
8	200	0	763	72,03	100
9	200	0	708	71,96	100
10	200	0	709	72,36	100
Rata-rata	200	0	743	72,03	100

Pada skenario 3, seluruh replikasi menghasilkan *safety rate* 100%, sehingga tidak terdapat agen yang gagal mencapai titik aman selama simulasi berlangsung. Hasil ini merupakan capaian terbaik yang diperoleh dalam seluruh rangkaian simulasi.

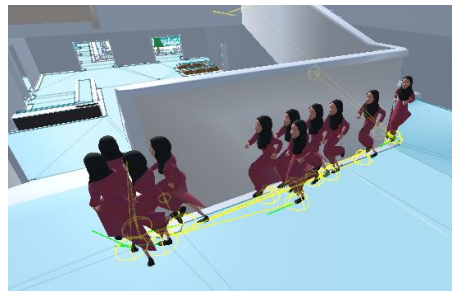
Rata-rata waktu evakuasi agen panik tercatat sebesar 72,03 detik sejak $t = 0$, dengan waktu tercepat sebesar 71,46 detik pada replikasi ke-5 dan waktu terlama sebesar 72,81 detik pada replikasi ke-7. Selisih waktu yang hanya mencapai 1,35

detik menunjukkan bahwa waktu evakuasi antar replikasi relatif stabil. Meskipun demikian, variasi jumlah total *collision* antar replikasi masih terlihat cukup besar, yaitu berkisar antara 706 *collision* pada replikasi ke-6 hingga 813 *collision* pada replikasi ke-1.

Waktu evakuasi Skenario 3 dan Skenario 1 tidak dapat dibandingkan langsung karena titik awal pengukurannya berbeda. Agen panik mulai bergerak pada $t=0$ dan rata-rata mencapai titik aman pada detik ke-72,03 dalam waktu simulasi. Agen rasional pada Skenario 1 baru mulai bergerak pada $t=30$ detik dengan rata-rata waktu tempuh 79,56 detik, sehingga rata-rata tiba di titik aman pada detik ke-109,56.

Selisih waktu kedatangan antara kedua kelompok mencapai sekitar 37 detik. Sebanyak 30 detik berasal dari perbedaan waktu keberangkatan, sedangkan sekitar 7,5 detik sisanya merupakan perbedaan waktu tempuh yang dipengaruhi oleh kombinasi *preferred velocity* yang lebih tinggi pada agen panik (2 m/s dibandingkan 1,5 m/s) serta perbedaan tingkat kepadatan dan kemacetan pada masing-masing skenario. Oleh karena itu, selisih waktu tempuh tersebut tidak dapat dikaitkan dengan satu faktor saja.

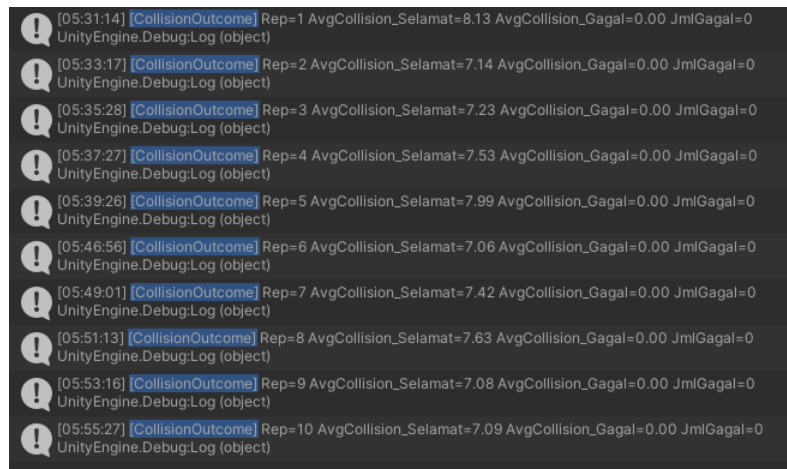
Rata-rata total *collision* pada Skenario 3 sebesar 743, lebih rendah dibandingkan Skenario 1 (1.124) tetapi lebih tinggi dibandingkan Skenario 2 (519). Gambar 4.13 menunjukkan bahwa kepadatan di area tangga pada Skenario 3 secara gambaran tetap menyerupai Skenario 1, dengan antrean padat yang terbentuk pada mulut dan badan tangga.



Gambar 4. 12 *bottleneck* skenario 3

Perbedaannya terletak pada durasi kemacetan, bukan pada tingkat kepadatan puncaknya. Agen panik yang bergerak dengan kecepatan 2 m/s dapat melewati area sempit lebih cepat dibandingkan agen rasional yang bergerak 1,5 m/s pada Skenario 1. Akibatnya, meskipun *bottleneck* dengan kepadatan serupa tetap terjadi, waktu yang dihabiskan agen di area padat menjadi lebih singkat sehingga total *collision* yang terakumulasi selama simulasi lebih rendah.

Jumlah *collision* (743) yang lebih tinggi dibandingkan skenario 2 (519) dapat dipahami melalui perbedaan pola keberangkatan agen pada kedua skenario. Pada Skenario 2, agen panik dan agen rasional memulai evakuasi pada waktu yang berbeda sehingga arus perpindahan agen tersebar dalam rentang waktu yang lebih panjang. Kondisi ini mengurangi kepadatan puncak yang terjadi pada titik-titik sempit. Sebaliknya, pada Skenario 3 seluruh 200 agen panik mulai bergerak secara bersamaan sejak $t = 0$, sehingga tekanan terhadap jalur evakuasi menjadi lebih besar meskipun setiap agen dapat melewati jalur tersebut dalam waktu yang lebih singkat.

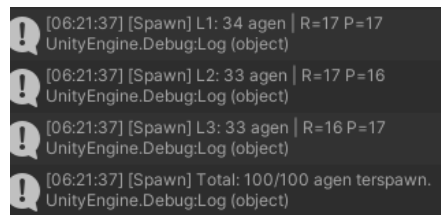


Gambar 4. 13 Log *Collision Out Come* Skenario 3

Gambar 4.13 menunjukkan bahwa rata-rata agen gagal bernilai 0,00 pada seluruh replikasi karena tidak terdapat agen yang gagal dievakuasi. Di sisi lain, rata-rata agen selamat berada pada rentang 7,06- 8,13 dengan rata-rata sekitar 7,43 *collision* per agen. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh agen tetap mengalami interaksi dan hambatan selama proses evakuasi. Oleh karena itu, *safety rate* 100% tidak berarti evakuasi berlangsung tanpa *collision*, melainkan menunjukkan bahwa seluruh agen berhasil mencapai titik aman dalam batas waktu simulasi yang tersedia.

4.1.5 Skenario 4 (Kepadatan Rendah)

Skenario 4 menggunakan 100 agen dengan rasio komposisi yang sama dengan Skenario 2, yaitu 50 agen rasional dan 50 agen panik seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13.

Gambar 4. 14 Pembagian *Spawn* Skenario 4

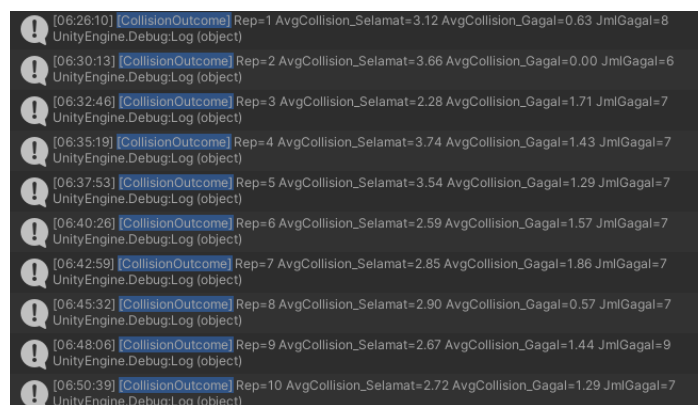
Tabel 4. 4 Hasil simulasi Skenario 4 (100 Agen)

Replikasi	Agen Selamat	Agen Gagal	Total Collision	Waktu Evakuasi Rasional (s)	Waktu Evakuasi Panik (s)	<i>Safety rate</i> (%)
1	92	8	146	78,8	74,25	92
2	94	6	172	77,34	74,4	94
3	93	7	112	73,96	75,22	93
4	93	7	179	76,08	74,26	93
5	93	7	169	77,99	74,5	93
6	93	7	126	79,87	71,59	93
7	93	7	139	81,04	72,97	93
8	93	7	137	75,32	75,69	93
9	91	9	128	78,03	73,04	91
10	93	7	131	75,5	74,69	93
Rata-rata	93	7	144	77,39	74,06	92,8

Skenario 4 menghasilkan rata-rata 93 agen yang berhasil mencapai titik aman dari total 100 agen, dengan *safety rate* sebesar 92,8%. Hasil ini berbeda dari ekspektasi awal, apabila kepadatan kerumunan merupakan faktor utama yang menentukan keberhasilan evakuasi, maka *safety rate* pada Skenario 4 seharusnya lebih tinggi daripada Skenario 2 (95,45%) karena setiap agen memiliki ruang gerak yang lebih luas

. Namun, hasil simulasi menunjukkan kondisi yang sebaliknya. *Safety rate* Skenario 4 tercatat 2,65 poin persentase lebih rendah dibandingkan Skenario 2 dan bahkan 2,0 poin persentase lebih rendah dibandingkan Skenario 1 (94,75%) yang melibatkan 200 agen rasional.

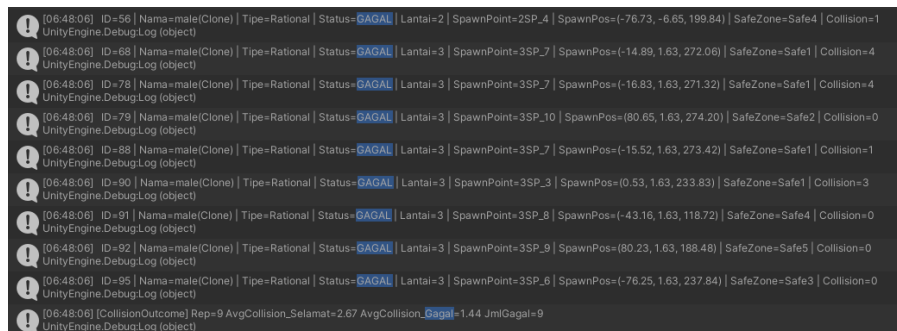
Perbedaan tersebut menjadi lebih mudah dipahami apabila ditinjau berdasarkan persentase kegagalan dibandingkan jumlah agen yang gagal. Rata-rata jumlah agen gagal pada Skenario 4 memang lebih rendah, yaitu 7,2 agen, dibandingkan 9,1 agen pada Skenario 2 dan 10,5 agen pada Skenario 1. Akan tetapi, karena jumlah agen pada Skenario 4 hanya separuh dari kedua skenario tersebut, tingkat kegagalannya mencapai 7,2%, lebih tinggi dibandingkan Skenario 2 (4,55%) maupun Skenario 1 (5,25%).



Gambar 4.15 Log *Collision Out Come* Skenario 4

Data *collision outcome* pada Gambar 4.15 memperlihatkan bahwa intensitas tabrakan tidak berkaitan langsung dengan tingginya jumlah agen yang gagal dievakuasi. Pada seluruh replikasi, rata-rata *collision* yang dialami agen gagal selalu lebih rendah dibandingkan agen yang berhasil mencapai titik aman (1,18 berbanding 3,01), bahkan pada Replikasi ke-2 terdapat agen gagal yang tidak mengalami *collision* sama sekali.

Kondisi serupa juga terlihat pada Replikasi ke-9, di mana jumlah agen gagal mencapai nilai tertinggi (9 agen) meskipun total *collision* yang tercatat merupakan yang terendah (128 *collision*), dengan rata-rata *collision* agen gagal sebesar 1,44 dan rata-rata agen selamat sebesar 2,67.



Gambar 4.16 Data Agen Gagal Skenario 4 Pada Replikasi ke-9

Analisis data per-agen pada gambar 4.16 pada replikasi tersebut menunjukkan bahwa seluruh agen yang gagal bertipe rasional, sedangkan 8 dari 9 agen gagal berasal dari Lantai 3. Hasil ini sejalan dengan pembahasan pada Skenario 1 dan Skenario 2 yang memperlihatkan bahwa agen dari lantai atas dengan jalur evakuasi lebih panjang memiliki risiko kegagalan yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil tersebut, kegagalan evakuasi pada Skenario 4 tampak lebih berkaitan dengan jarak tempuh dari posisi *spawn* menuju titik aman dibandingkan tingkat kepadatan kerumunan maupun intensitas interaksi antaragen. Beberapa posisi *spawn* memerlukan waktu tempuh yang mendekati atau melampaui batas evakuasi 120 detik sehingga tetap menghasilkan agen gagal meskipun jumlah agen di dalam gedung lebih sedikit. Kondisi ini dapat menjelaskan mengapa jumlah agen gagal pada Skenario 4 masih berada pada kisaran yang tidak jauh berbeda dengan skenario berkepadatan lebih tinggi, sehingga tingkat kegagalannya menjadi lebih besar.

4.1.6 Skenario 5 (Kepadatan Tinggi)

Skenario 5 menggunakan 300 agen dengan komposisi 150 agen rasional dan 150 agen panik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.17. Bersama Skenario 4 (100 agen)

dan Skenario 2 (200 agen), Skenario 5 melengkapi tiga titik data kepadatan pada komposisi 50:50 yang memungkinkan analisis pengaruh jumlah agen secara langsung.



Gambar 4. 17 Pembagian dan kondisi *Spawn* Pada Skenario 5

Tabel 4. 5 Hasil simulasi Skenario 5 (300 Agen)

Replikasi	Agen Selamat	Agen Gagal	Total Collision	Waktu Evakuasi Rasional(s)	Waktu Evakuasi Panik(s)	Safety rate (%)
1	292	8	1071	80,22	73,29	97,33
2	291	9	887	77,98	73,13	97
3	290	10	993	78,76	73,73	96,67
4	291	9	1030	78,7	74,89	97
5	290	10	941	78,36	74,09	96,67
6	292	8	983	81,39	72,41	97,33
7	291	9	1017	80,59	71,96	97
8	290	10	927	79,36	72,87	96,67
9	290	10	886	79,6	73,41	96,67
10	290	10	1020	78,8	73,87	96,67
Rata-rata	291	9	976	79,38	73,37	96,9

Skenario 5 menghasilkan rata-rata 291 agen yang berhasil mencapai titik aman dari total 300 agen, dengan *safety rate* sebesar 96,9%, tertinggi di antara seluruh skenario dengan komposisi agen 50:50. Hasil ini melanjutkan peningkatan *safety rate* yang terlihat dari Skenario 4 (92,8%), Skenario 2 (95,5%), hingga

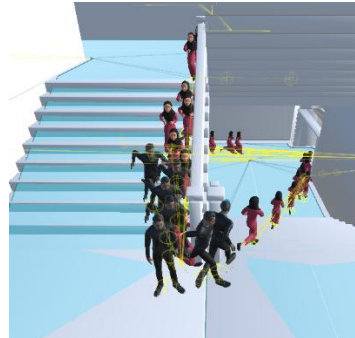
Skenario 5 (96,9%), di mana bertambahnya jumlah agen justru diikuti oleh meningkatnya persentase keberhasilan evakuasi. Kondisi ini berbeda dari ekspektasi awal bahwa peningkatan jumlah agen akan menyebabkan kepadatan yang lebih tinggi dan menyulitkan proses evakuasi.

Hal yang menarik adalah jumlah agen yang gagal pada ketiga skenario tersebut relatif tidak banyak berubah, yaitu 7 agen pada Skenario 4, 9 agen pada Skenario 2, dan 9 agen pada Skenario 5, meskipun total populasi agen meningkat dari 100 menjadi 300. Ketika jumlah agen yang gagal tetap berada pada kisaran yang sama sementara total agen terus bertambah, persentase kegagalan menurun dari 7,0% menjadi 4,5% dan kemudian 3,0%.

Rata-rata waktu evakuasi agen rasional pada Skenario 5 adalah 79,38 detik sejak fase evakuasi dimulai, sedikit lebih tinggi dibandingkan Skenario 2 (78,92 detik) dan Skenario 4 (77,39 detik). Meski jumlah agen meningkat 50% dibandingkan Skenario 2, selisih waktu tempuh yang hanya 0,46 detik menunjukkan bahwa sistem evakuasi secara keseluruhan masih mampu menangani peningkatan jumlah agen namun tidak diikuti oleh peningkatan waktu evakuasi yang signifikan pada sistem secara keseluruhan.

Dari sisi waktu kedatangan, agen panik rata-rata mencapai titik aman pada detik ke-73,37 sejak simulasi dimulai, sedangkan agen rasional yang mulai bergerak pada $t = 30$ detik mencapai titik aman pada detik ke-109,38. Selisih sekitar 36 detik ini hampir sama dengan yang diperoleh pada Skenario 2 (36,2 detik), sehingga peningkatan kepadatan tidak mengubah karakteristik perbedaan waktu evakuasi antara kedua tipe agen.

Rata-rata total *collision* pada Skenario 5 mencapai 975,5 per replikasi hampir dua kali lipat Skenario 2 (519). Peningkatan ini wajar seiring bertambahnya jumlah interaksi antar agen, dan kondisi kemacetan yang terbentuk di area tangga terlihat pada Gambar 4.18.



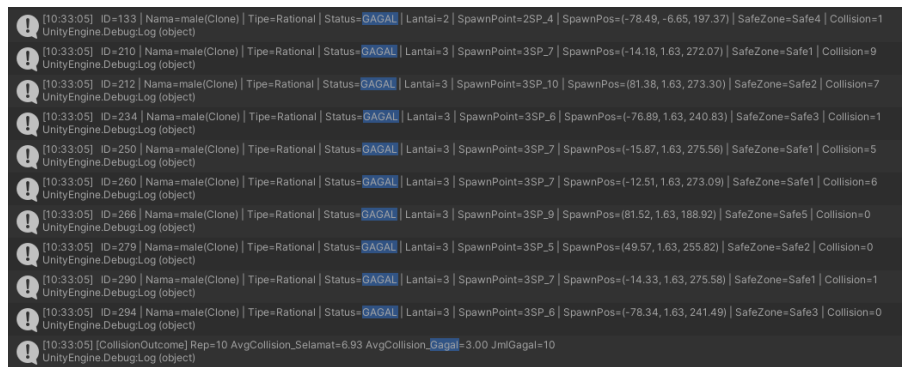
Gambar 4. 18 *Bottleneck* Skenario 5

Namun sebagaimana pada skenario-skenario sebelumnya, tingginya angka *collision* tidak berkaitan langsung dengan kegagalan evakuasi. Data pada Gambar 4.19 memperlihatkan bahwa nilai rata-rata agen selamat selalu lebih tinggi dibandingkan rata-rata agen gagal pada seluruh replikasi, dengan rata-rata masing-masing sebesar 6,59 dan 3,80 *collision* per agen.

!	[10:09:08]	[CollisionOutcome]	Rep=1 AvgCollision_Selamat=7.24 AvgCollision_Gagal=3.50 JmlGagal=8
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:11:42]	[CollisionOutcome]	Rep=2 AvgCollision_Selamat=5.97 AvgCollision_Gagal=4.11 JmlGagal=9
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:14:16]	[CollisionOutcome]	Rep=3 AvgCollision_Selamat=6.73 AvgCollision_Gagal=3.40 JmlGagal=10
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:17:41]	[CollisionOutcome]	Rep=4 AvgCollision_Selamat=6.96 AvgCollision_Gagal=3.78 JmlGagal=9
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:20:15]	[CollisionOutcome]	Rep=5 AvgCollision_Selamat=6.33 AvgCollision_Gagal=4.50 JmlGagal=10
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:22:49]	[CollisionOutcome]	Rep=6 AvgCollision_Selamat=6.62 AvgCollision_Gagal=4.25 JmlGagal=8
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:25:23]	[CollisionOutcome]	Rep=7 AvgCollision_Selamat=6.89 AvgCollision_Gagal=3.22 JmlGagal=9
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:27:57]	[CollisionOutcome]	Rep=8 AvgCollision_Selamat=6.23 AvgCollision_Gagal=4.80 JmlGagal=10
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:30:31]	[CollisionOutcome]	Rep=9 AvgCollision_Selamat=5.99 AvgCollision_Gagal=3.40 JmlGagal=10
			UnityEngine.Debug.Log (object)
!	[10:33:05]	[CollisionOutcome]	Rep=10 AvgCollision_Selamat=6.93 AvgCollision_Gagal=3.00 JmlGagal=10
			UnityEngine.Debug.Log (object)

Gambar 4.19 Log *Collision Out Come* pada scenario 5

Analisis data per-agen pada Replikasi ke-10 pada gambar 4.20 memperlihatkan bahwa seluruh agen yang gagal bertipe rasional, sedangkan tidak terdapat agen panik yang gagal mencapai titik aman.



ID	Nama	Tipe	Status	Lantai	SpawnPoint	SpawnPos	SafeZone	Collision
133	male(Clone)	Rational	GAGAL	2	2SP_4	(-78.49, -6.65, 197.37)	Safe4	1
210	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_7	(-14.18, 1.63, 272.07)	Safe1	9
212	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_10	(81.38, 1.63, 273.30)	Safe2	7
234	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_6	(-76.89, 1.63, 240.83)	Safe3	1
250	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_7	(-15.87, 1.63, 275.56)	Safe1	5
260	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_7	(-12.51, 1.63, 273.09)	Safe1	6
266	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_9	(81.52, 1.63, 188.92)	Safe5	0
279	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_5	(49.57, 1.63, 255.82)	Safe2	0
290	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_7	(-14.33, 1.63, 275.58)	Safe1	1
294	male(Clone)	Rational	GAGAL	3	3SP_6	(-78.34, 1.63, 241.49)	Safe3	0
Summary: Rep=10 AvgCollision_Selamat=6.93 AvgCollision_Gagal=3.00 JmlGagal=10								

Gambar 4. 20 Data Agen Gagal Skenario 5 Replikasi ke-10

Dari 10 agen gagal tersebut, 9 berasal dari Lantai 3 dan 1 berasal dari Lantai 2 dengan *SpawnPoint* = 2SP_4. Selain itu, *SpawnPoint* 3SP_7 muncul pada 4 dari 10 agen gagal. Tiga agen bahkan gagal mencapai titik aman tanpa mengalami *collision* sama sekali. Menariknya adalah *SpawnPoint* 2SP_4 dan 3SP_7 juga muncul sebagai lokasi asal agen gagal pada Skenario 2 dan Skenario 4. Kemunculan *spawn point* yang sama pada skenario dengan jumlah agen berbeda, yaitu 100, 200, dan 300 agen, menunjukkan bahwa kegagalan evakuasi memiliki keterkaitan dengan karakteristik posisi *spawn* tersebut, bukan semata-mata dengan tingkat kepadatan yang terbentuk selama simulasi.

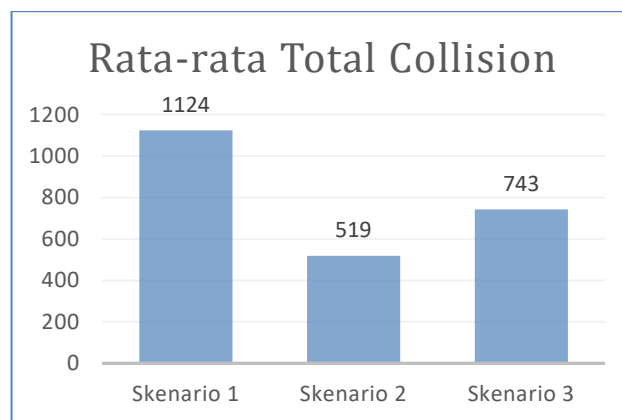
Pola lain yang terlihat pada Skenario 5 terdapat pada Replikasi ke-6. Replikasi ini menghasilkan jumlah agen selamat tertinggi bersama Replikasi ke-1, yaitu sebanyak 292 agen, tetapi mencatat rata-rata waktu evakuasi agen rasional paling tinggi dibandingkan replikasi lainnya, yaitu 81,39 detik. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan evakuasi tidak hanya berkaitan dengan

kecepatan rata-rata pergerakan agen, tetapi juga dengan distribusi posisi *spawn* yang memengaruhi jumlah agen yang berada pada lokasi dengan risiko kegagalan lebih tinggi sejak awal simulasi.

4.2 Analisis dan Pembahasan

4.2.1 Pengaruh Komposisi Perilaku

Pengaruh komposisi perilaku dianalisis dengan membandingkan skenario 1, 2, dan 3 yang seluruhnya menggunakan 200 agen namun dengan komposisi tipe agen yang berbeda. Perbandingan ini dilakukan pada jumlah agen yang sama, sehingga perbedaan hasil yang muncul dapat lebih mudah dikaitkan dengan perbedaan perilaku agen.

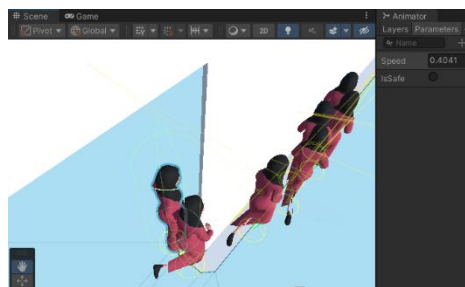


Gambar 4.21 Perbandingan *Collision* Skenario 1,2, dan 3

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa skenario 2 dengan komposisi campuran menghasilkan *collision* terendah sebesar 519, jauh lebih rendah dibanding skenario 1 yang keseluruhan agennya rasional sebesar 1124 *collision* maupun skenario 3 yang keseluruhan agennya panik sebesar 743 *collision*.

Tingginya *collision* pada Skenario 1 bukan disebabkan oleh kemampuan avoidance per agen yang buruk, melainkan oleh waktu keberangkatan yang serentak. Seluruh 200 agen rasional memulai pergerakan hampir bersamaan pada $t=30$ detik, menciptakan lonjakan permintaan terhadap kapasitas jalur evakuasi yang sempit dalam selang waktu yang sangat pendek.

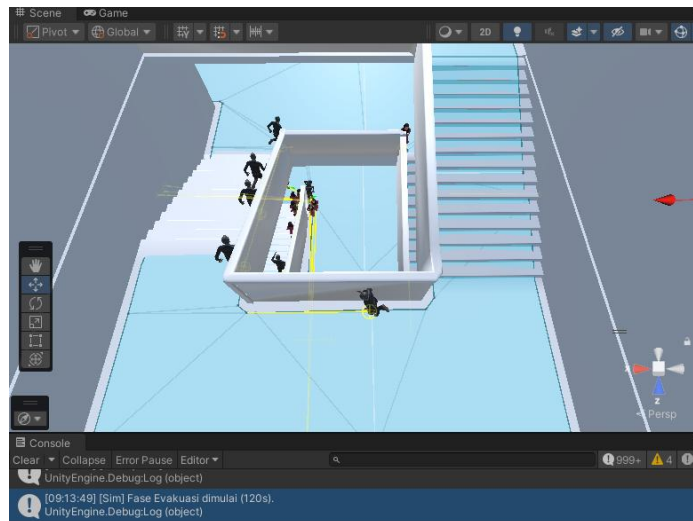
RVO beroperasi pada tingkat lokal antar agen, di mana setiap agen hanya mempertimbangkan tetangga yang berada dalam radius tertentu untuk menghitung *safe velocity*. Ketika ratusan agen berkumpul di satu titik sempit secara bersamaan, setiap tetangga menyumbang satu *half-plane constraint* pada ruang kecepatan agen yang sedang dihitung. Semakin banyak tetangga aktif, semakin sempit wilayah kecepatan yang valid, hingga *safe velocity* yang dihitung mendekati nol sebagaimana terlihat pada Gambar 4.22. RVO tidak memiliki mekanisme untuk mendistribusikan ulang agen ke jalur alternatif ketika *bottleneck* sudah terbentuk di level makro.



Gambar 4. 22 Agen Terjebak di pintu keluar ruangan

Skenario 2 menghasilkan *collision* terendah karena dua kelompok agen tidak berangkat bersamaan. 100 agen panik mulai bergerak sejak detik ke- 0, memanfaatkan jalur evakuasi sebelum 100 agen rasional bergabung di detik ke- 30. Gambar 4.23 menunjukkan kondisi jalur pada Skenario 2 tepat saat fase evakuasi

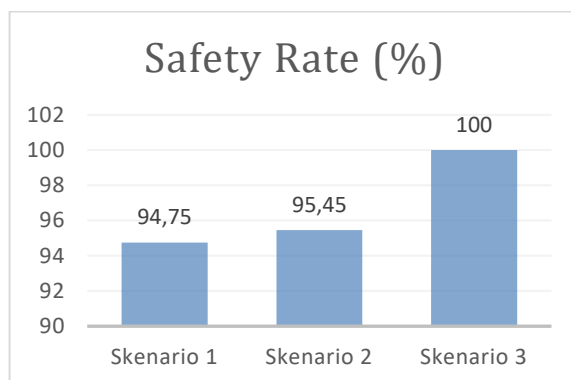
dimulai dimana agen panik yang berangkat lebih awal sebagian sudah bergerak maju, sehingga kepadatan di area tangga saat agen rasional mulai bergerak tidak setinggi kondisi Skenario 1.



Gambar 4. 23 Kondisi Skenario 2 pada $t=30$ detik

Collision Skenario 3 (743) lebih rendah dari Skenario 1 (1.124) meskipun seluruh 200 agen panik mulai bergerak serentak sejak detik ke-0. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh kecepatan gerak agen. Agen panik bergerak dengan kecepatan 2,0 m/s, lebih tinggi dari agen rasional (1,5 m/s), sehingga melewati area sempit seperti tangga dan koridor dalam waktu yang lebih singkat.

Durasi kepadatan di *bottleneck* menjadi lebih pendek, dan total *collision* yang terakumulasi selama simulasi pun berkurang. Namun *collision* Skenario 3 tetap lebih tinggi dari Skenario 2 karena seluruh agen bergerak dalam satu fase, berbeda dengan Skenario 2 yang arusnya tersebar dalam dua fase.



Gambar 4.24 Perbandingan *Safety rate* Skenario 1,2, dan 3

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa *safety rate* tertinggi justru dicapai Skenario 3 (100%), disusul Skenario 2 (95,5%), dan kemudian Skenario 1 (94,75%).

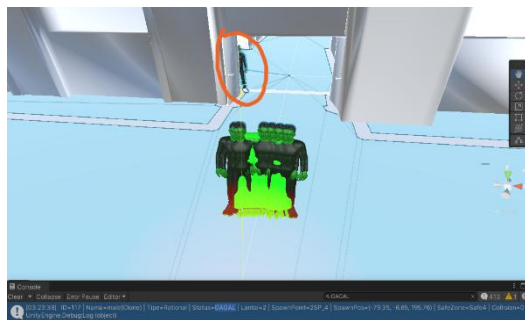
Skenario 3 mencapai *safety rate* sempurna karena seluruh agen panik mulai bergerak sejak $t = 0$, sehingga memiliki total waktu tempuh yang lebih panjang dibandingkan agen rasional yang baru mulai bergerak di $t = 30$ detik. Rata-rata waktu evakuasi sebesar 72,03 detik membuat seluruh agen tiba di titik aman jauh sebelum batas waktu simulasi. Hal ini menunjukkan bahwa waktu keberangkatan yang lebih awal memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap keberhasilan evakuasi dibandingkan jumlah *collision* yang dialami.

Namun, hasil tersebut tidak serta-merta menunjukkan bahwa Skenario 3 lebih baik dalam kondisi dunia nyata. Simulasi ini tidak mempertimbangkan risiko fisik yang dapat terjadi ketika agen bergerak saat gempa masih berlangsung. Oleh karena itu, perbandingan *safety rate* antara Skenario 1 dan Skenario 3 perlu dipahami sesuai dengan batasan model simulasi yang digunakan

Skenario 2 menghasilkan *safety rate* yang sedikit lebih tinggi dari Skenario 1 meski hanya selisih 0,75 poin persentase. Rata-rata agen gagal turun dari 11 pada

Skenario 1 menjadi 9 pada Skenario 2. Pola dua fase pada Skenario 2 tidak hanya mengurangi *collision*, tetapi juga sedikit meningkatkan keberhasilan evakuasi karena kondisi jalur yang lebih lengang ketika agen rasional mulai bergerak.

Data dari ketiga skenario memperlihatkan bahwa perubahan *collision* tidak selalu berbanding lurus dengan perubahan safety rate. Skenario 1 memiliki *collision* tertinggi sekaligus *safety rate* terendah, namun Skenario 3 memiliki *collision* yang lebih tinggi dari Skenario 2 dengan *safety rate* yang justru jauh lebih baik. Gambar 4.25 merupakan salah satu contoh agen yang gagal dan tidak mengalami satu *collision* pun sepanjang simulasi.



Gambar 4. 25 Agen Gagal di Skenario 2

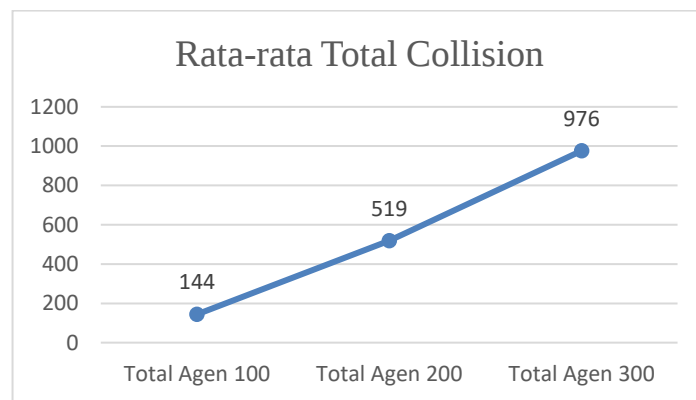
Kegagalan tersebut dikarenakan oleh jarak tempuh dari posisi *spawn* serta hambatan pergerakan di area geometri tertentu. Dengan demikian, jumlah *collision* tidak dapat dijadikan satu-satunya indikator keselamatan evakuasi.

Secara keseluruhan menunjukkan bahwa komposisi agen serta perbedaan waktu keberangkatan memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap hasil evakuasi dibandingkan jumlah *collision* yang terjadi. Dari sisi kinerja RVO, skenario 2 memberikan kondisi yang paling mendukung karena perbedaan waktu keberangkatan antar kelompok secara alami mampu menurunkan kepadatan pada

area *bottleneck*, sehingga menciptakan kondisi yang lebih optimal bagi mekanisme *local avoidance* ORCA untuk bekerja lebih optimal.

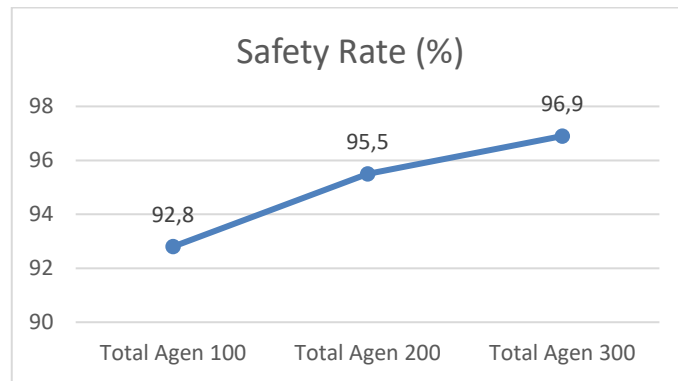
4.2.2 Pengaruh Kepadatan

Pengaruh kepadatan dianalisis melalui perbandingan skenario 4 (100 agen), skenario 2 (200 agen), dan skenario 5 (300 agen) yang seluruhnya menggunakan komposisi 50% rasional dan 50% panik. Komposisi yang identik memastikan perbedaan hasil dapat dikaitkan dengan jumlah agen, bukan perbedaan perilaku.



Gambar 4. 26 Perbandingan *Collision* pada berbagai Tingkat Kepadatan

Gambar 4.26 menunjukkan bahwa total *collision* meningkat seiring bertambahnya jumlah agen. Skenario 4 mencatat rata-rata 143,9 *collision*, Skenario 2 sebesar 519, dan Skenario 5 mencapai 975,5. Jika dihitung per agen, peningkatannya bahkan lebih tajam dari yang terlihat pada angka total, yaitu naik dari 1,44 pada Skenario 4, menjadi 2,60 pada Skenario 2, dan 3,25 pada Skenario 5. Semakin banyak agen, semakin sering setiap agen berinteraksi dengan agen lainnya.



Gambar 4. 27 Perbandingan *Safety rate* pada berbagai Tingkat Kepadatan

Gambar 4.27 memperlihatkan pola yang berlawanan dengan *collision*. Skenario 4 dengan 100 agen mencatat *safety rate* terendah sebesar 92,8%, lebih rendah dibandingkan Skenario 2 (95,5%) dan Skenario 5 (96,9%). Hasil ini tidak sesuai dengan dugaan awal bahwa jumlah agen yang lebih sedikit akan mempermudah proses evakuasi.

Fenomena dua pola itu dapat ditelusuri melalui karakteristik geometris bangunan. Pemeriksaan data agen gagal pada skenario 4 dan 5 menunjukkan bahwa kegagalan lebih banyak pada agen-agen yang posisi awalnya atau *spawn point*nya berada di lantai 3, lantai dengan jarak tempuh terjauh menuju titik aman.

Dikarenakan posisi-posisi yang secara geometri kurang menguntungkan ini bersifat tetap dan tidak bertambah mengikuti jumlah total agen, jumlah total agen gagal relatif tetap di kisaran 7 hingga 9 agen rata-rata pada ketiga skenario.

Ketika populasi total meningkat dari 100 menjadi 300, jumlah agen yang berhasil dievakuasi bertambah jauh lebih besar dibandingkan jumlah agen yang gagal, sehingga persentase kegagalan menurun meskipun jumlah totalnya hampir tidak berubah.

```

[06:48:06] ID=56 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=2 | SpawnPoint=2SP_4 | SpawnPos=(-76.73, -6.65, 199.84) | SafeZone=Safe4 | Collision=1
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=68 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-14.89, 1.63, 272.06) | SafeZone=Safe1 | Collision=4
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=78 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-16.83, 1.63, 271.32) | SafeZone=Safe1 | Collision=4
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=79 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_10 | SpawnPos=(80.65, 1.63, 274.20) | SafeZone=Safe2 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=88 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-15.52, 1.63, 273.42) | SafeZone=Safe1 | Collision=1
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=90 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_3 | SpawnPos=(0.53, 1.63, 273.83) | SafeZone=Safe1 | Collision=3
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=91 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_8 | SpawnPos=(-43.16, 1.63, 118.72) | SafeZone=Safe4 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=92 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_9 | SpawnPos=(80.23, 1.63, 188.48) | SafeZone=Safe5 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] ID=95 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_6 | SpawnPos=(-76.25, 1.63, 237.84) | SafeZone=Safe3 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[06:48:06] [CollisionOutcome] Rep=9 AvgCollision_Selamat=2.67 AvgCollision_Gagal=1.44 JmlGagal=9
UnityEngine.DebugLog (object)

```

Gambar 4. 28 Data Agen Gagal Skenario 4 Replikasi ke-9

Pola itu terlihat jelas pada data per agen gagal. Pada gambar 4.28, jumlah agen yang gagal mencapai angka tertinggi, yaitu 9 agen, meskipun total *collision* pada replikasi tersebut hanya 128, yang merupakan nilai terendah di antara seluruh replikasi Skenario 4.

```

[10:33:05] ID=133 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=2 | SpawnPoint=2SP_4 | SpawnPos=(-78.49, -6.65, 197.37) | SafeZone=Safe4 | Collision=1
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=210 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-14.18, 1.63, 272.07) | SafeZone=Safe1 | Collision=9
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=212 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_10 | SpawnPos=(81.38, 1.63, 273.30) | SafeZone=Safe2 | Collision=7
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=234 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_6 | SpawnPos=(-76.89, 1.63, 240.83) | SafeZone=Safe3 | Collision=1
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=250 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-15.87, 1.63, 275.56) | SafeZone=Safe1 | Collision=5
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=260 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-12.51, 1.63, 273.09) | SafeZone=Safe1 | Collision=6
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=266 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_9 | SpawnPos=(81.52, 1.63, 188.92) | SafeZone=Safe5 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=279 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_5 | SpawnPos=(49.57, 1.63, 255.82) | SafeZone=Safe2 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=290 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_7 | SpawnPos=(-14.33, 1.63, 275.58) | SafeZone=Safe1 | Collision=1
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] ID=294 | Nama=male(Clone) | Tipe=Rational | Status=GAGAL | Lantai=3 | SpawnPoint=3SP_6 | SpawnPos=(-78.34, 1.63, 241.49) | SafeZone=Safe3 | Collision=0
UnityEngine.DebugLog (object)
[10:33:05] [CollisionOutcome] Rep=10 AvgCollision_Selamat=6.93 AvgCollision_Gagal=3.00 JmlGagal=10
UnityEngine.DebugLog (object)

```

Gambar 4. 29 Data Agen Gagal Skenario 5 Replikasi ke-10

Pola yang sama ditemukan seperti pada gambar 4.29, dari 10 agen yang gagal, seluruhnya bertipe rasional dan semuanya berasal dari Lantai 3. Kemunculan pola asal lantai yang sama pada skenario dengan jumlah agen yang berbeda ini memperkuat bahwa geometri posisi *spawn*, terutama jarak tempuh dari lantai paling atas menuju zona aman, memiliki pengaruh yang lebih besar terhadap kegagalan evakuasi dibandingkan tingkat kepadatan.

Data *collision outcome* dari ketiga skenario juga mendukung pola tersebut. Pada seluruh replikasi tanpa pengecualian, nilai rata-rata *collision* agen gagal selalu lebih rendah dibandingkan rata-rata *collision* agen selamat, yaitu 1,18 berbanding 3,01 pada Skenario 4, 2,75 berbanding 5,31 pada Skenario 2, serta 3,80 berbanding

6,59 pada Skenario 5. Agen yang gagal justru mengalami lebih sedikit *collision* karena tidak berhasil bergerak jauh dari posisi awal sehingga tidak banyak melewati area padat di sepanjang jalur evakuasi.

Faktor lain yang dapat diamati adalah variasi hasil yang berbeda pada setiap replikasi. Pada Skenario 4, waktu evakuasi agen rasional berada pada rentang 73,96 hingga 81,04 detik dengan selisih 7,08 detik. Rentang ini jauh lebih besar dibandingkan Skenario 2 yang memiliki selisih 2,48 detik maupun Skenario 5 dengan selisih 3,41 detik. Pada jumlah agen yang lebih sedikit, hasil simulasi menjadi lebih peka terhadap variasi acak posisi *spawn* di setiap replikasi. Dalam kondisi kepadatan rendah, keberadaan satu atau dua posisi *spawn* yang kurang menguntungkan dapat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap persentase hasil secara keseluruhan.

Berdasarkan keseluruhan hasil dari ketiga skenario, pada rentang 100 hingga 300 agen dengan komposisi rasional dan panik sebesar 50:50, peningkatan jumlah agen tidak menyebabkan penurunan *safety rate* evakuasi. Tingkat kegagalan lebih banyak dipengaruhi oleh posisi *spawn* tertentu yang memiliki karakteristik geometris kurang menguntungkan, sedangkan peningkatan *collision* pada skenario dengan kepadatan tinggi tidak berhubungan langsung dengan peningkatan jumlah agen yang gagal dievakuasi.

4.2.3 Evaluasi Performa Algoritma RVO Secara Keseluruhan

Evaluasi performa algoritma RVO pada subbab ini berdasarkan hasil pengujian pada lima skenario yang telah dibahas sebelumnya. Evaluasi dilakukan menggunakan metrik *collision*, waktu evakuasi dan *safety rate* untuk melihat bagaimana algoritma RVO

mengelola interaksi antar agen serta mempertahankan kelancaran proses evakuasi pada variasi komposisi perilaku dan tingkat kepadatan yang diuji. Evaluasi ini tidak membandingkan RVO dengan algoritma lain maupun simulasi tanpa RVO, sehingga pembahasan difokuskan pada karakteristik performa RVO dalam simulasi yang dikembangkan pada penelitian ini.

Tabel 4. 6 Ringkasan Hasil Seluruh Skenario

Skenario	Jumlah Agen	Rata-rata Total Collision	Rata-rata Waktu Evakuasi Rasional (s)	Rata-rata Waktu Evakuasi Panik (s)	Safety rate (%)
S1	200	1124	79,56	-	94,8
S2	200	519	78,92	72,72	95,5
S3	200	743	-	72,03	100
S4	100	144	77,39	74,06	92,8
S5	300	976	79,38	73,37	96,9

Berdasarkan table 4.6, seluruh skenario menghasilkan *safety rate* di atas 92%, dengan nilai tertinggi sebesar 100% pada Skenario 3 dan terendah sebesar 92,8% pada Skenario 4. Hasil ini menunjukkan bahwa sebagian besar agen berhasil mencapai titik aman pada seluruh kondisi pengujian yang dilakukan.

Perbandingan antar skenario menunjukkan dua pola utama. Pertama, pada skenario dengan jumlah agen yang sama (S1, S2, dan S3 masing-masing 200 agen), komposisi serta pola waktu keberangkatan memberikan dampak yang berbeda. Skenario 1 mencatat *collision* tertinggi (1.124) karena seluruh agen rasional memulai pergerakan secara bersamaan, sedangkan Skenario 2 menghasilkan *collision* terendah (519) akibat adanya dua fase yang mampu mengurangi kepadatan pada puncaknya. Sementara itu, Skenario 3 mencapai *safety rate* 100% meskipun nilai *collision* (743) lebih tinggi dibandingkan Skenario 2, karena seluruh agen

panik melakukan evakuasi sejak $t=0$ sehingga memiliki waktu evakuasi yang lebih panjang.

Kedua, pada skenario dengan komposisi yang sama (S4, S2, dan S5 dengan rasio 50:50), jumlah *collision* meningkat seiring bertambahnya jumlah agen, dari 144 pada S4 hingga 976 pada S5. Akan tetapi, *safety rate* justru mengalami peningkatan, bukan penurunan.

Kedua pola ini menandakan bahwa jumlah *collision* tidak dapat dijadikan satu-satunya indikator keberhasilan evakuasi. Untuk memastikan hal tersebut, dilakukan perbandingan antara rata-rata agen Selamat dan Rata-rata agen Gagal pada seluruh replikasi di setiap skenario.

Timestamp	Rep	AvgCollision_Selamat	AvgCollision_Gagal	JmlGagal
[00:38:03]	Rep=1	10.51	7.10	10
[00:41:45]	Rep=2	13.68	6.20	10
[00:44:19]	Rep=3	12.28	5.80	10
[00:46:52]	Rep=4	12.22	4.82	11
[00:49:27]	Rep=5	12.76	5.00	11
[00:52:02]	Rep=6	12.62	5.67	12
[00:54:43]	Rep=7	10.64	7.88	8
[00:57:17]	Rep=8	11.01	4.25	12
[00:59:56]	Rep=9	9.70	3.90	10
[01:05:05]	Rep=10	10.19	4.73	11

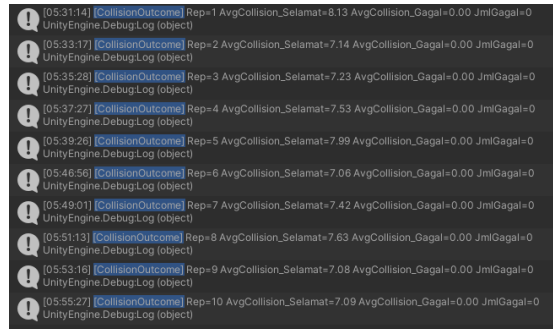
Gambar 4. 30 Data Log *Collision Out Come* Skenario 1

Gambar 4.31 menunjukkan hasil Skenario 1 pada seluruh 10 replikasi, rata-rata *collision* agen selamat selalu lebih tinggi dibandingkan rata-rata *collision* gagal tanpa pengecualian.

Timestamp	Rep	AvgCollision_Selamat	AvgCollision_Gagal	JmlGagal
[03:23:38]	Rep=1	5.98	2.60	10
[03:30:19]	Rep=2	4.89	3.00	8
[03:32:53]	Rep=3	4.92	3.00	9
[03:35:26]	Rep=4	4.68	1.56	9
[03:37:59]	Rep=5	5.14	3.22	9
[03:40:33]	Rep=6	6.07	2.11	9
[03:43:06]	Rep=7	5.05	1.44	9
[03:45:40]	Rep=8	5.47	3.78	9
[03:48:13]	Rep=9	5.88	2.30	10
[03:50:47]	Rep=10	5.02	4.44	9

Gambar 4. 31 Data Log *Collision Out Come* Skenario 2

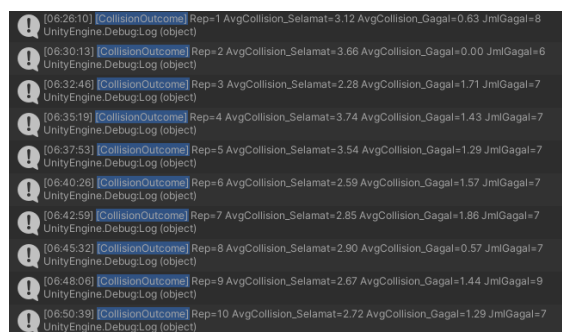
Pola yang sama ditemukan pada Skenario 2, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.32, dengan rata-rata *collision* agen selamat sebesar 5,31 dan rata-rata *collision* gagal sebesar 2,75 lintas seluruh replikasi.



Timestamp	Message	Rep	AvgCollision_Selamat	AvgCollision_Gagal	JmlGagal
[05:31:14]	[CollisionOutcome]	Rep=1	5.13	0.00	0
[05:33:17]	[CollisionOutcome]	Rep=2	7.14	0.00	0
[05:35:28]	[CollisionOutcome]	Rep=3	7.23	0.00	0
[05:37:27]	[CollisionOutcome]	Rep=4	7.53	0.00	0
[05:39:26]	[CollisionOutcome]	Rep=5	7.99	0.00	0
[05:46:56]	[CollisionOutcome]	Rep=6	7.06	0.00	0
[05:49:01]	[CollisionOutcome]	Rep=7	7.42	0.00	0
[05:51:13]	[CollisionOutcome]	Rep=8	7.63	0.00	0
[05:53:16]	[CollisionOutcome]	Rep=9	7.08	0.00	0
[05:55:27]	[CollisionOutcome]	Rep=10	7.09	0.00	0

Gambar 4. 32 Data Log *Collision* Out Come Skenario 3

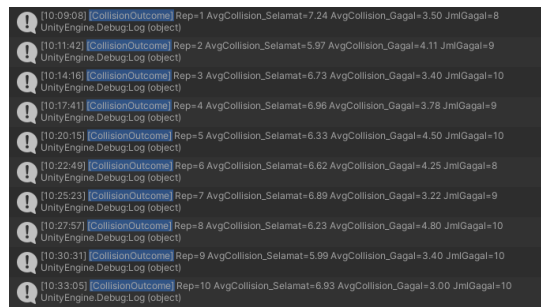
Skenario 3 merupakan kasus yang unik karena seluruh agen berhasil dievakuasi, rata-rata *collision* gagal bernilai nol pada semua replikasi sebagaimana terlihat pada Gambar 4.33 yang justru memperkuat bahwa dengan ketersediaan waktu yang memadai, keberadaan *collision* tidak menjadi penghambat utama keberhasilan evakuasi.



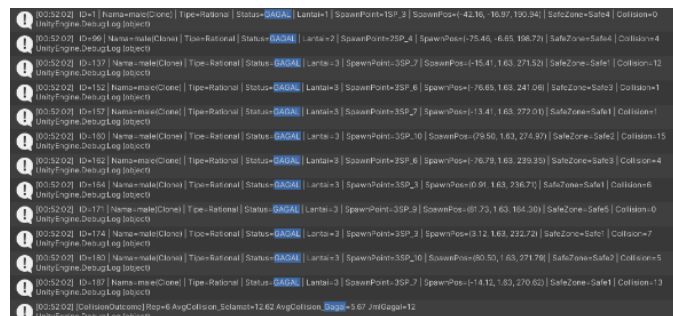
Timestamp	Message	Rep	AvgCollision_Selamat	AvgCollision_Gagal	JmlGagal
[06:26:10]	[CollisionOutcome]	Rep=1	3.12	0.63	8
[06:30:13]	[CollisionOutcome]	Rep=2	3.66	0.00	6
[06:32:46]	[CollisionOutcome]	Rep=3	2.28	1.71	7
[06:35:19]	[CollisionOutcome]	Rep=4	3.74	1.43	7
[06:37:53]	[CollisionOutcome]	Rep=5	3.54	1.29	7
[06:40:26]	[CollisionOutcome]	Rep=6	2.59	1.57	7
[06:42:59]	[CollisionOutcome]	Rep=7	2.85	1.86	7
[06:45:32]	[CollisionOutcome]	Rep=8	2.90	0.57	7
[06:48:06]	[CollisionOutcome]	Rep=9	2.67	1.44	9
[06:50:39]	[CollisionOutcome]	Rep=10	2.72	1.29	7

Gambar 4. 33 Data Log *Collision* Out Come Skenario 4

Pada Skenario 4 di gambar 4.34 dan Skenario 5 di gambar 4.35, pola yang sama kembali terlihat. Rata-rata *collision* agen selamat dibandingkan rata-rata *collision* agen gagal adalah 3,01 berbanding 1,18 pada Skenario 4, dan 6,59 berbanding 3,80 pada Skenario 5, dan pola ini sama pada seluruh replikasi.

Gambar 4. 34 Data Log *Collision Out Come* Skenario 5

Pola ini dapat dipahami dari cara agen bergerak selama simulasi, di mana agen yang berhasil dievakuasi menempuh jalur penuh melewati titik sempit seperti tangga sehingga lebih sering bertabrakan dengan agen lain, sementara agen yang gagal cenderung tertahan jauh dari area padat dan tidak banyak bergerak sehingga jarang mengalami tabrakan.



Gambar 4. 35 Data Agen Gagal Skenario 1 Pada Replikasi ke-6

Hal yang penting untuk diperhatikan adalah pola rata-rata tersebut tidak selalu berlaku pada setiap individu agen. Pada Gambar 4.36 yang menampilkan data agen gagal pada Skenario 1 Replikasi ke-6, terlihat adanya variasi, di mana terdapat agen gagal dengan jumlah *collision* cukup tinggi seperti ID=160 (15 *collision*) dan ID=187 (13 *collision*), serta agen gagal dengan *collision* sangat rendah seperti ID=1 dan ID=171 (*collision*=0). Perbedaan ini menunjukkan bahwa kegagalan dapat terjadi melalui berbagai cara, baik karena terperangkap dalam kerumunan maupun

akibat hambatan pada area dengan kondisi geometri tertentu. Konsistensi pola hanya pada rata-rata, bukan pada tiap individu agen.

Hasil pengujian juga memperlihatkan adanya keterbatasan RVO pada kondisi kepadatan tinggi. Ketika seluruh agen bergerak menuju tujuan yang sama secara bersamaan seperti pada Skenario 1, kemacetan terbentuk di area sempit karena RVO hanya bekerja pada level lokal antar pasangan agen dan tidak memiliki mekanisme untuk mengalihkan agen ke jalur alternatif saat *bottleneck* sudah terjadi pada tingkat global.

Berdasarkan keseluruhan hasil, algoritma RVO dapat berfungsi dengan baik sebagai mekanisme penghindaran tabrakan lokal dalam simulasi evakuasi yang dikembangkan pada penelitian ini. Seluruh skenario menghasilkan *safety rate* di atas 92%, yang menunjukkan bahwa mayoritas agen berhasil mencapai titik aman. Namun demikian, keberhasilan evakuasi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan RVO dalam menghindari *collision*, melainkan juga sangat dipengaruhi oleh waktu keberangkatan serta posisi *spawn* agen dalam simulasi.

4.3 Integrasi Islam

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, setiap skenario simulasi menghasilkan nilai *collision*, waktu evakuasi, dan *safety rate* yang berbeda. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh variasi jumlah agen, komposisi perilaku, tingkat kepadatan, serta pola pergerakan agen selama proses evakuasi berlangsung. Pada kondisi tertentu, kepadatan yang tinggi menyebabkan penumpukan pada area tangga dan pintu keluar sehingga meningkatkan *collision* antar agen. Sebaliknya,

distribusi pergerakan yang lebih teratur mampu menjaga kelancaran aliran evakuasi dan meningkatkan tingkat keselamatan agen.

Perbedaan hasil pada setiap skenario menunjukkan bahwa keteraturan, kesiapsiagaan, dan perilaku individu memiliki pengaruh besar terhadap keselamatan bersama dalam situasi bencana. Hal tersebut juga berkaitan dengan nilai-nilai Islam yang mengajarkan pentingnya ikhtiar dalam menghadapi bahaya serta kepedulian terhadap keselamatan sesama manusia.

Dalam penelitian ini terdapat dua konsep *muamalah*, yaitu *Muamalah ma'a Allah* dan *muamalah ma'a an-nas*. *Muamalah ma'a Allah* merupakan hubungan manusia dengan Allah SWT sebagai bentuk ketaatan dan ikhtiar dalam menghadapi bencana alam. Sementara itu, *Muamalah ma'a an-nas* merupakan hubungan manusia dengan sesama manusia, termasuk dalam menjaga keteraturan dan keselamatan bersama ketika menghadapi situasi darurat.

4.3.1 *Muamalah Ma'a Allah*

Gempa bumi sebagai salah satu bencana alam merupakan bagian dari ujian Allah SWT kepada manusia. Dalam Islam, ujian tidak dimaksudkan untuk melemahkan manusia, melainkan untuk mengukur kesungguhan iman, kesabaran, dan ikhtiar setiap hamba dalam menghadapi suatu keadaan. Allah SWT berfirman dalam Surah Al-Ankabut ayat 2-3:

أَحْسِبِ النَّاسُ أَنْ يُتْرَكُوا أَنْ يَقُولُوا آمَنَّا وَهُمْ لَا يُفْتَنُونَ (2) وَلَقَدْ فَتَنَّا الَّذِينَ مِنْ قَبْلِهِمْ

فَلْيَعْلَمَنَّ اللَّهُ الَّذِينَ صَدَقُوا وَلْيَعْلَمَنَّ الْكَاذِبِينَ (3)

“Apakah manusia mengira bahwa mereka akan dibiarkan hanya dengan mengatakan, ‘Kami telah beriman,’ sedangkan mereka tidak diuji? Dan sungguh,

Kami telah menguji orang-orang sebelum mereka, maka Allah pasti mengetahui orang-orang yang benar dan pasti mengetahui orang-orang yang dusta.” (QS. Al-Ankabut: 2 - 3)

Berdasarkan Tafsir Ringkas Kementerian Agama RI, pada ayat 2 dijelaskan bahwa keimanan tidak cukup hanya dengan pengakuan, tetapi harus dibuktikan melalui berbagai ujian dan melaksanakan kewajiban agama. Kemudian pada ayat 3 dijelaskan bahwa sebagaimana umat terdahulu, manusia akan diuji dengan berbagai nikmat dan cobaan untuk membedakan orang yang benar dalam keimanannya dari orang yang berdusta.. (Kementerian Agama RI, n.d.)

Penelitian ini memandang simulasi evakuasi gempa sebagai bentuk ikhtiar dalam menghadapi potensi bencana. Pengembangan simulasi evakuasi menggunakan algoritma RVO merupakan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk meningkatkan kesiapsiagaan dalam situasi darurat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perilaku agen dan tingkat kepadatan memengaruhi keberhasilan evakuasi, sehingga kesiapan, perencanaan, dan pengambilan keputusan yang tepat menjadi faktor penting dalam mengurangi risiko bencana. Dengan demikian, penelitian ini sejalan dengan ajaran Islam yang mendorong manusia untuk berikhtiar dan mempersiapkan diri dalam menghadapi berbagai ujian dari Allah SWT.

4.3.2 Muamalah ma'a an-nas

Penelitian ini juga berkaitan dengan hubungan manusia terhadap sesama dalam situasi darurat. Proses evakuasi yang tertib dan teratur dapat membantu mengurangi tabrakan, penumpukan, serta risiko keterlambatan evakuasi yang dapat membahayakan orang lain.

Allah SWT berfirman dalam surat Al-Maidah ayat 2:

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ آمَنُوا لَا تَحْلُوا شَعَابِرَ اللَّهِ وَلَا الشَّهْرَ الْحَرَامَ وَلَا الْهَدْيَ وَلَا الْقَلَائِدَ وَلَا آمِينَ
الْبَيْتِ الْحَرَامِ يَنْتَعُونَ فَضْلًا مِّن رَّبِّهِمْ وَرِضْوَانًا وَإِذَا حُلَلْتُمْ فَاصْطَادُوا وَلَا يَجْرِمَنَّكُمْ شَنَاٰنُ قَوْمٍ
أَن صَدُّوكُم مِّنَ الْمَسْجِدِ الْحَرَامِ أَلَّا تَعْتَدُوا وَتَعَاوَنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ وَلَا تَعَاوَنُوا عَلَى الْإِثْمِ
وَالْعُدْوَانِ وَاتَّقُوا اللَّهَ إِنَّ اللَّهَ شَدِيدُ الْعِقَابِ (2)

“Wahai orang-orang yang beriman, janganlah kamu melanggar syiar-syiar (kesucian) Allah, jangan (melanggar kehormatan) bulan-bulan haram, jangan (mengganggu) hadyu (hewan-hewan kurban) dan qalā'id (hewan-hewan kurban yang diberi tanda), dan jangan (pula mengganggu) para pengunjung Baitulharam sedangkan mereka mencari karunia dan rida Tuhannya! Apabila kamu telah bertahalul (menyelesaikan ihram), berburulah (jika mau). Janganlah sekali-kali kebencian(-mu) kepada suatu kaum, karena mereka menghalang-halangi dari Masjidilharam, mendorongmu berbuat melampaui batas (kepada mereka). Tolong-menolonglah kamu dalam (mengerjakan) kebajikan dan takwa, dan jangan tolong-menolong dalam berbuat dosa dan permusuhan. Bertakwalah kepada Allah, sesungguhnya Allah sangat berat siksaan-Nya.” (QS. Al-Maidah: 2)

Menurut Tafsir Wajiz, bagian akhir ayat ini yang berbunyi:

وَتَعَاوَنُوا عَلَى الْبِرِّ وَالتَّقْوَىٰ وَلَا تَعَاوَنُوا عَلَى الْإِثْمِ وَالْعُدْوَانِ وَاتَّقُوا اللَّهَ إِنَّ اللَّهَ شَدِيدُ الْعِقَابِ (2)

Ayat ini emerintahkan untuk tolong-menolong dalam mengerjakan kebajikan dan ketakwaan, yakni dalam melakukan apa yang diperintahkan Allah dan menjauhi larangan-Nya, serta melarang tolong-menolong dalam perbuatan dosa, kemaksiatan, dan permusuhan karena hal tersebut melanggar hukum-hukum Allah. (Kementerian Agama Republik Indonesia, n.d.) Prinsip tersebut menjadi salah satu dasar dalam membangun perilaku sosial yang baik, termasuk ketika menghadapi situasi darurat dan bencana.

Dalam simulasi evakuasi yang dikembangkan pada penelitian ini, agen bergerak menuju titik aman dengan tetap memperhatikan keberadaan agen lain di

sekitarnya. Algoritma RVO memungkinkan agen melakukan penyesuaian arah dan kecepatan untuk mengurangi konflik pergerakan dan menghindari tabrakan. Hal ini menggambarkan pentingnya menjaga keselamatan bersama melalui perilaku yang tertib dan tidak saling menghalangi selama proses evakuasi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa distribusi pergerakan yang lebih teratur mampu meningkatkan tingkat keselamatan dan mengurangi jumlah *collision* dibandingkan kondisi dengan kepadatan yang tidak terkelola dengan baik. Hasil ini menunjukkan bahwa keselamatan dalam situasi bencana tidak hanya dipengaruhi oleh teknologi yang digunakan, tetapi juga oleh perilaku kolektif yang mengutamakan kepentingan bersama.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian terhadap lima skenario simulasi evakuasi gempa pada Gedung Fakultas Sains dan Teknologi UIN Maulana Malik Ibrahim Malang, algoritma Reciprocal Velocity Obstacles (RVO) mampu menjalankan sebagai mekanisme penghindaran tabrakan lokal yang baik dalam simulasi evakuasi multi-agen pada lingkungan gedung bertingkat. Hal ini ditunjukkan oleh nilai *safety rate* yang konsisten di atas 92%, dengan nilai terendah 92,8% pada Skenario 4 dan tertinggi 100% pada Skenario 3.

Perbedaan komposisi perilaku agen memengaruhi hasil evakuasi terutama pada perbedaan waktu keberangkatan. Pada tiga skenario yang masing-masing terdiri atas 200 agen, Skenario 1 mencatat jumlah *collision* tertinggi, yaitu 1.124, serta *safety rate* terendah sebesar 94,8% karena seluruh agen rasional mulai bergerak secara bersamaan pada detik ke-30. Sebaliknya, Skenario 2 mencatat *collision* paling rendah, yaitu 519, karena keberangkatan agen yang terbagi dalam dua fase mampu mengurangi kepadatan pada area bottleneck. Sementara itu, Skenario 3 mencapai *safety rate* 100% karena seluruh agen panik memulai evakuasi sejak awal simulasi, sehingga memiliki waktu yang lebih panjang untuk mencapai titik aman meskipun jumlah *collision* lebih tinggi dibandingkan Skenario 2.

Hasil analisis kepadatan menunjukkan bahwa peningkatan jumlah agen dari 100 menjadi 300 menyebabkan *collision* meningkat dari 144 menjadi 976. Namun demikian, *safety rate* juga mengalami peningkatan dari 92,8% menjadi 96,9%.

Fenomena ini terjadi karena jumlah posisi spawn yang kurang menguntungkan bersifat tetap, sehingga proporsi agen yang gagal dievakuasi menjadi semakin kecil ketika total populasi agen bertambah.

Pada seluruh replikasi, rata-rata *collision* yang dialami agen gagal selalu lebih rendah dibandingkan agen yang berhasil dievakuasi. Hal ini menunjukkan bahwa keberhasilan evakuasi lebih dipengaruhi oleh posisi awal (spawn point) dan waktu mulai bergerak dibandingkan oleh banyaknya *collision* yang terjadi. Selain itu, RVO memiliki keterbatasan dalam menangani kemacetan pada kondisi kepadatan tinggi karena algoritma ini hanya melakukan pengambilan keputusan pada tingkat lokal dan tidak mampu mengarahkan agen ke jalur alternatif ketika kemacetan telah terbentuk.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil dan keterbatasan yang ditemukan dalam penelitian ini, beberapa saran diajukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan penambahan titik tujuan bayangan pada area belokan, *bottleneck*, dan pintu keluar. Langkah ini dapat membantu mendistribusikan agen secara lebih merata serta mengurangi penumpukan yang terjadi akibat waypoint NavMesh yang berada terlalu dekat dengan dinding.
2. Simulasi ini belum mempertimbangkan risiko fisik yang mungkin terjadi ketika agen bergerak saat gempa masih berlangsung, seperti pada Skenario 3. Oleh karena itu, faktor tersebut dapat dimasukkan pada penelitian berikutnya agar simulasi lebih menggambarkan kondisi darurat yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, R. N., Simorangkir, R. T., & Harliana, P. (2025). *Pemodelan arus kendaraan menggunakan agent-based*. 9(1), 55–61.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21009/pinter.9.1.8>
- Aguirre, B. E., Wenger, D., & Vigo, G. (1998). A test of the emergent norm theory of collective behavior. *Sociological Forum*, 13(2), 301–320.
<https://doi.org/10.1023/A:1022145900928>
- Arif, Y. M., Janitra, G. A., Imamudin, M., Safitri A Basid, P. M. N., & Setiawan, D. K. (2024). CSS for CVR: A Reciprocal Velocity Obstacle-Based Crowd Simulation System for Non-Playable Character Movement of Campus Virtual Reality. *JOIV : International Journal on Informatics Visualization*, 8(2), 906.
<https://doi.org/10.62527/joiv.8.2.1997>
- Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(SUPPL. 3), 7280–7287.
<https://doi.org/10.1073/pnas.082080899>
- Fachri, M. (2024). Crowd navigation for dynamic hazard avoidance in evacuation using emotional reciprocal velocity obstacles. *IAES International Journal of Artificial Intelligence*, 13(2), 1371–1379.
<https://doi.org/10.11591/ijai.v13.i2.pp1371-1379>
- Kementerian Agama Republik Indonesia. (n.d.). *Tafsir Surah Al-Ma'idah Ayat 2*. Quran Kementerian Agama Republik Indonesia. Retrieved <https://quran.kemenag.go.id/quran/per-ayat/surah/5?from=1&to=120>
- Kementerian Agama RI. (n.d.). *Tafsir Al-Qur'an Surah Al-'Ankabut Ayat 2–3*. Kementerian Agama Republik Indonesia. Quran Kementerian Agama Republik Indonesia. Retrieved <https://quran.kemenag.go.id/quran/per-ayat/surah/29?from=1&to=69>
- Kuligowski, E. D. (2005). NIST Technical Note 1471: A Review of Building Evacuation Models. *National Institute of Standards and Technology*, (January 2005), 118. <https://doi.org/https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1471>
- MacAl, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4(3), 151–162.
<https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Meiliza Laveda. (2020). Surat Al-Zalzalah Ayat 1–3 dalam Tafsir Prof Quraish Shihab. *Republika Online*.
<https://islamdigest.republika.co.id/berita/qiiw30430/surat-al-zalzalah-ayat-1-3-dalam-tafsir-prof-quraish-shihab?>

- Ming Lin & Dinesh Manocha. (2008). Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 23(4), 834–834. <https://doi.org/10.1109/tro.2007.905255>
- Mufarida, B. (2024). *BMKG: 7.358 Gempa Bumi Guncang Indonesia Sepanjang 2024*. IDX Channel. <https://www.idxchannel.com/news/bmkg-7358-gempa-bumi-guncang-indonesia-sepanjang-2024>
- Muhammad Fadil et al. (2018). Crowds Evacuation Simulation on Heterogeneous Agent Using Agent-Based Reciprocal Velocity Obstacle. *Proceeding - 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application, ISITIA 2018*, 275–280. <https://doi.org/10.1109/ISITIA.2018.8711117>
- Tingting Liu, Liu, Z., Ma, M., Chen, T., Liu, C., & Chai, Y. (2019). 3D visual simulation of individual and crowd behavior in earthquake evacuation. *Simulation*, 95(1), 65–81. <https://doi.org/10.1177/0037549717753294>
- Van Den Berg, J., Guy, S. J., Lin, M., & Manocha, D. (2011). Reciprocal n-Body Collision Avoidance. In C. Pradalier, R. Siegwart, & G. Hirzinger (Eds.), *Robotics Research* (Vol. 70, pp. 3–19). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19457-3_1
- Van Den Berg, J., Ming Lin, & Manocha, D. (2008). Reciprocal Velocity Obstacles for real-time multi-agent navigation. *2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1928–1935. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543489>
- Wei Li, Chen, Z., Xu, J., Wang, W., & Zhang, P. (2022). Research on evacuation simulation of underground commercial street based on reciprocal velocity obstacle model. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 21(1), 22–33. <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1838289>
- Yanbin Han, Liu, H., & Moore, P. (2017). Extended route choice model based on available evacuation route set and its application in crowd evacuation simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 75, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2017.03.010>
- Zhongrui Ni, Liu, Z., Liu, T., Chai, Y., & Liu, C. (2021). Simulation model of crowd evacuation navigation in a multi-obstacle environment. *Transportation Research Record*, 2675(4), 90–104. <https://doi.org/10.1177/0361198120971264>