

**PENGEMBANGAN NPC OTOMATIS BERBASIS *IMITATION LEARNING*
PADA *GAME* EDUKASI PENGELOLAAN SAMPAH**

SKRIPSI

**Oleh:
GUMILANG ATMAJA
NIM. 220605110108**



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

**PENGEMBANGAN NPC OTOMATIS BERBASIS *IMITATION LEARNING*
PADA *GAME* EDUKASI PENGELOLAAN SAMPAH**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

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

Oleh:

GUMILANG ATMAJA
NIM. 220605110108

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

PENGEMBANGAN NPC OTOMATIS BERBASIS *IMITATION LEARNING* PADA *GAME* EDUKASI PENGELOLAAN SAMPAH

Oleh :
GUMILANG ATMAJA
NIM. 220605110108

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

HALAMAN PENGESAHAN

PENGEMBANGAN NPC OTOMATIS BERBASIS *IMITATION LEARNING* PADA *GAME* EDUKASI PENGELOLAAN SAMPAH

SKRIPSI

Oleh:

GUMILANG ATMAJA

NIM. 220605110108

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi
dan Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal: 21 Mei 2026

Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji : Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T
NIP. 19740510 200501 1 007

Anggota Penguji I : Nurizal Dwi Priandani, M.Kom
NIP. 19920830 202203 1 001

Anggota Penguji II : Ahmad Fahmi Karami, M.Kom
NIP. 19870909 202012 1 001

Anggota Penguji III : Shoffin Nahwa Utama, M.T
NIP. 19860703 202012 1 003

()

()

()

()

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




Shoffin Nahwa Utama, M.Kom
NIP. 19860703 202012 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gumilang Atmaja
NIM : 220605110108
Fakultas / Program Studi : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika
Judul Skripsi : Pengembangan NPC Otomatis Berbasis Imitation Learning pada Game Edukasi Pengelolaan Sampah.

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, 21 Mei 2026

Yang membuat pernyataan,



Gumilang Atmaja
NIM 220605110108

MOTTO

وَأَنْ كُنْيسَ لِلْإِنْسَانِ إِلَّا مَا سَعَى

“bahwa manusia hanya memperoleh apa yang telah diusahakannya,”

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat, nikmat, pertolongan, dan kemudahan yang telah diberikan, skripsi ini saya persembahkan kepada ayah dan ibu tercinta yang selalu memberikan doa, kasih sayang, dukungan, nasihat, serta pengorbanan yang tidak ternilai dalam setiap langkah hidup saya. Terima kasih atas kesabaran, keikhlasan, dan kepercayaan yang telah diberikan hingga saya mampu menyelesaikan skripsi ini. Tidak lupa, saya persembahkan karya ini kepada kakak serta keluarga tercinta yang senantiasa memberikan semangat, motivasi, dan dukungan selama proses perkuliahan hingga penyusunan tugas akhir ini.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan ilmu, arahan, masukan, serta bimbingan dengan penuh kesabaran selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh dosen dan staf akademik Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi yang telah memberikan ilmu, bantuan, dan pelayanan selama masa perkuliahan. Tidak lupa, rasa terima kasih penulis tujukan untuk teman-teman dan sahabat seperjuangan yang telah memberikan dukungan, bantuan, semangat, serta kebersamaan yang berarti selama proses perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini.

Untuk orang terkasih yang selalu hadir memberi semangat, doa, dan perhatian, penulis mengucapkan terima kasih atas kesabaran serta dukungan selama proses ini. Terakhir, karya ini penulis persembahkan untuk diri sendiri yang telah berusaha, bertahan, dan tidak menyerah. Semoga skripsi ini bermanfaat serta menjadi langkah awal untuk terus belajar dan berkembang.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT. atas segala rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengembangan NPC Otomatis Berbasis *Imitation Learning* pada *Game* Edukasi Pengelolaan Sampah” dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer pada Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

Penulis menyadari penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, arahan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Setiap proses yang dilalui, mulai dari tahap perencanaan, pengembangan sistem, pengujian, hingga penyusunan laporan, dapat terselesaikan berkat bimbingan dan dukungan yang diberikan. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, atas dukungan dan fasilitas akademik yang diberikan.
2. Dr. H. Agus Mulyono, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Supriyono, M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika, yang telah memberikan arahan serta dorongan kepada mahasiswa dalam menyelesaikan studi.
4. Ahmad Fahmi Karami, M.Kom., selaku dosen Pembimbing Skripsi I, dan Shoffin Nahwa Utama, M.T., selaku dosen Pembimbing Skripsi II, yang telah

meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, saran, evaluasi, serta dukungan selama proses penelitian dan penyusunan skripsi.

5. Prof. Dr. Muhammad Faisal, M.T., selaku ketua penguji, dan Nurizal Dwi Priandani, M.Kom., selaku penguji I, yang telah memberikan arahan, kritik, saran, serta masukan yang membangun dalam proses penyempurnaan skripsi.
6. Nia Faricha, S.Si., selaku admin Program Studi Teknik Informatika, yang telah membantu penulis dalam memberikan informasi, serta kelancaran pengurusan berkas selama masa perkuliahan hingga proses penyelesaian skripsi.
7. Seluruh dosen dan staf Program Studi Teknik Informatika, yang telah memberikan ilmu, bantuan, informasi, serta dukungan selama masa perkuliahan hingga proses penyusunan skripsi ini.
8. Ayah Sarman dan Ibu Kastinah tercinta, yang dengan segala doa, kasih sayang, dan pengorbanannya telah menjadi alasan penulis untuk terus bertahan dan berjuang hingga sampai pada tahap ini. Terima kasih atas setiap lelah yang tidak pernah diceritakan, setiap doa yang diam-diam dipanjatkan, serta setiap dukungan yang selalu menguatkan penulis dalam menghadapi proses panjang perkuliahan dan penyusunan skripsi ini. Semoga skripsi ini menjadi bentuk kecil dari rasa terima kasih penulis atas cinta dan perjuangan Ayah dan Ibu yang tidak akan pernah mampu penulis balas sepenuhnya.
9. Abang Indarto dan Mbak Rina tersayang, yang selalu memberikan dukungan, perhatian, semangat, serta doa kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah menjadi bagian dari keluarga yang selalu menguatkan, memberikan nasihat, dan membantu

penulis dalam melewati berbagai proses hingga akhirnya dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Johana Eka Putri, partner penulis, yang kehadirannya menjadi sumber semangat dan ketenangan. Terima kasih telah menemani di saat sulit, mendengarkan keluh kesah, memberikan doa, perhatian, serta dukungan selama perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Kehadiranmu menjadi kekuatan berarti bagi penulis untuk terus bertahan maju.
11. Sahabat kontrakan “Penghuni Surga”, Adino, Farros, Fahry, Rheza, Rama, Fajar, Afif, Alpin, Syamsul, Ridiey, Muzakky, Abyan, Akbar, dan Maul, yang telah menjadi keluarga kedua bagi penulis selama masa perkuliahan. Terima kasih atas kebersamaan, bantuan, canda tawa, obrolan panjang, serta semangat yang selalu hadir dalam setiap proses. Di tengah lelahnya perkuliahan dan penyusunan skripsi, kehadiran kalian menjadi ruang pulang yang sederhana namun berarti bagi penulis.
12. Seluruh warga Teknik Informatika, khususnya Angkatan 2022 “Infinity”, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama masa perkuliahan.
13. Diri sendiri, yang telah berusaha, bertahan, dan tidak menyerah dalam menghadapi setiap proses selama perkuliahan hingga penyusunan skripsi ini. Terima kasih telah tetap melangkah meskipun tidak selalu mudah, serta mampu menyelesaikan tanggung jawab ini dengan sebaik mungkin

Malang, 24 Mei 2026
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	v
MOTTO.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
الملخص	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Batasan Masalah.....	6
1.4 Tujuan Penelitian	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II STUDI PUSTAKA	7
2.1 Penelitian Terkait	7
2.2 <i>Game</i> Edukasi	10
2.3 <i>Non Player Character (NPC)</i>	11
2.4 <i>Imitation Learning</i>	12
2.5 <i>System Usability Scale (SUS)</i>	14
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI	16
3.1 Desain Penelitian.....	16
3.2 Pengembangan Game.....	17
3.2.1 Rancangan <i>Game</i>	17
3.2.2 Rancangan NPC	20
3.2.3 <i>Finite State Machine</i>	22
3.3 Konsep <i>Imitation Learning</i>	24
3.3.1 Behavioral Cloning	24
3.3.2 Implementasi Behavioral Cloning pada ML-Agents	25
3.3.3 Evaluasi Model	26
3.4 Desain Pengujian <i>System Usability Scale</i>	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Implementasi <i>Game</i> dan Sistem.....	30
4.1.1 Main Menu	30
4.1.2 Panel Tutorial	31
4.1.3 Pengaturan.....	32
4.1.4 Gameplay	33
4.1.5 Mekanisme Dalam Game.....	37
4.2 Implementasi NPC dengan Metode <i>Imitation Learning</i>	41

4.2.1 Konfigurasi Agen	43
4.2.2 Implementasi Behavior Agent dalam Game	44
4.2.3 Mekanisme Interaksi dan Pemrosesan Agen	45
4.3 Evaluasi Agen	47
4.3.1 Kinerja Agen	48
4.3.2 Efisiensi Episode	49
4.3.3 Stabilitas Mode	50
4.3.4 Eksplorasi dan Eksploitasi Agen	52
4.3.5 Parameter Pembelajaran	53
4.4 Skenario Pengujian Sistem	54
4.4.1 Single Object – Single Type – Single Target	54
4.4.2 Multiple Object – Single Type – Single Target	56
4.4.3 Multiple Object – Multiple Type – Multiple Target	57
4.4.4 Random Environment Scenario	58
4.5 Pengujian <i>System Usability Scale</i>	59
4.6 Integrasi Sains dan Islam dalam Perspektif Muamalah	65
4.6.1 Muamalah Ma'a Allah Swt. (Hubungan Manusia dengan Allah)	65
4.6.2 Muamalah Ma'a An-Nas (Hubungan Manusia dengan Sesama Manusia)	67
4.6.3 Muamalah Ma'a Al-Alam (Hubungan Manusia dengan Alam)	68
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Desain Penelitian.....	16
Gambar 3.2 Core Gameplay Loop	19
Gambar 3.3 Ilustrasi lingkungan game Trash Tycoon	20
Gambar 3.4 Trash Bot NPC Pembantu	21
Gambar 3.5 Alur Implementasi NPC dengan Imitation Learning pada Game Trash Tycoon	21
Gambar 3.6 Finite State Machine Global.....	22
Gambar 3.7 Alur Kerja NPC.....	23
Gambar 3.8 Tempat Training untuk Demo	25
Gambar 3.9 Hirarki Unity	26
Gambar 4.1 Tampilan Panel Main Menu pada Game Trash Tycoon	31
Gambar 4.2 Tampilan Panel Tutorial.....	32
Gambar 4.3 Tampilan Panel Pengaturan.....	32
Gambar 4.4 Panel Sambutan Awal Permainan	33
Gambar 4.5 Panel Instruksi Menuju Pemberhentian Truk.....	34
Gambar 4.6 Area Interaksi Pemanggilan Truk Sampah.....	34
Gambar 4.7 Panel Instruksi Mengeluarkan Sampah dari Truk	35
Gambar 4.8 Tampilan Lokasi Munculnya Objek Sampah.....	36
Gambar 4.9 Panel Informasi Jenis Sampah dalam Permainan.....	36
Gambar 4.10 Panel Instruksi Pengolahan Sampah pada Mesin	37
Gambar 4.11 Panel Informasi Waktu dan Target Pengelolaan Sampah	38
Gambar 4.12 Panel Instruksi Perbaikan dan Peningkatan Mesin	38
Gambar 4.13 Panel Pengenalan NPC Trash Bot.....	39
Gambar 4.14 Panel Panel Akhir Panduan Permainan	39
Gambar 4.15 Panel Notifikasi	40
Gambar 4.16 Tampilan Kondisi Awal Permainan	40
Gambar 4.17 Tampilan Menu Toko untuk Upgrade dan Perbaikan Mesin	41
Gambar 4.18 File Demo Training	42
Gambar 4.19 Konfigurasi Behavior Parameters pada NPC	45
Gambar 4.20 Proses Observasi Sampah oleh Agen	46
Gambar 4.21 Agen mengolah sampah	47
Gambar 4.22 Grafik Performa Agen.....	48
Gambar 4.23 <i>Reward Cumulative</i> Agen	48
Gambar 4.24 Grafik Episode Training Agen	49
Gambar 4.25 Grafik Policy Loss, Value Loss, Pretraining Loss	50
Gambar 4.26 Grafik Policy Beta, Policy Entropy dan Policy Epsilon.....	52
Gambar 4.27 Grafik extrinsic reward, extrinsic value estimate dan learning rate	53
Gambar 4.28 Agen idle menunggu instruksi pemain.....	55
Gambar 4.29 Agen mengolah sampah	55
Gambar 4.30 Proses Percobaan Uji Skenario 2	57
Gambar 4.31 Proses Percobaan Uji Skenario 3	58
Gambar 4.32 Proses Uji Skenario 4	59
Gambar 4.33 Grafik Hasil Skor SUS	64

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait	7
Tabel 3.1 Perancangan Karakter dan Mekanisme Pengendalian Game.....	18
Tabel 3.2 Rancangan Mekanik Game	18
Tabel 3.3 State Non-Player Character.....	24
Tabel 3.4 Pertanyaan SUS	28
Tabel 3.5 Nilai SUS	28
Tabel 3.6 SUS Score	28
Tabel 4.1 Parameter pelatihan Agen	44
Tabel 4.2 Daftar pernyataan kuesioner System Usability Scale (SUS)	60
Tabel 4. 3 Skala penilaian System Usability Scale (SUS)	60
Tabel 4.4 Skor SUS Asli Responden	61
Tabel 4.5 Skor Perhitungan SUS Responden.....	62
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan SUS	63

ABSTRAK

Gumilang Atmaja. 2026. **Pengembangan NPC Otomatis Berbasis *Imitation Learning* pada *Game* Edukasi Pengelolaan Sampah.** Skripsi. Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Ahmad Fahmi Karami, M.Kom. (II) Shoffin Nahwa Utama, M.T.

Kata kunci: *Game* Edukasi, *Non-Player Character* (NPC), *Imitation Learning*, *Behavioral Cloning*, Pengelolaan Sampah.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan *Non-Player Character* (NPC) otomatis berbasis *Imitation Learning* pada *game* edukasi pengelolaan sampah berjudul *Trash Tycoon*. *Game* ini dirancang sebagai media pembelajaran mengenai pengelolaan sampah organik, anorganik, dan B3 melalui mekanisme permainan simulasi. Metode *Imitation Learning* diterapkan menggunakan pendekatan *Behavioral Cloning*, di mana NPC mempelajari perilaku pemain berdasarkan data demonstrasi berupa pasangan *state-action* yang direkam selama permainan berlangsung. Implementasi sistem dilakukan menggunakan *Unity Engine* dan *Unity ML-Agents* dengan konfigurasi pelatihan berbasis *Proximal Policy Optimization (PPO)*. Hasil pelatihan menunjukkan NPC dapat meniru pola perilaku pemain secara konsisten dalam proses pengelolaan sampah di dalam permainan. Evaluasi agen memperlihatkan kondisi *cumulative reward* yang stabil, penurunan *episode length* selama pelatihan, serta perilaku agen yang tetap sesuai dengan data demonstrasi yang diberikan. Pengujian *System Usability Scale* (SUS) terhadap 20 responden memperoleh skor rata-rata sebesar 88,25 yang termasuk dalam kategori “Good”. Hasil tersebut menunjukkan bahwa keberadaan NPC membantu pemain memahami proses pengelolaan sampah dan memberikan pengalaman bermain yang lebih terarah dalam penyampaian materi edukasi mengenai lingkungan.

ABSTRACT

Gumilang Atmaja. 2026. **Development of an Automatic NPC Based on Imitation Learning in an Educational Waste Management Game.** Thesis. Department of Computer Engineering, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Advisors: (I) Ahmad Fahmi Karami, M.Kom. (II) Shoffin Nahwa Utama, M.T.

This study aims to develop an automated Non-Player Character (NPC) based on Imitation Learning for an educational waste management game titled Trash Tycoon. This game is designed as a learning tool for managing organic, inorganic, and hazardous waste through a simulation-based gameplay mechanism. The Imitation Learning method is implemented using the Behavioral Cloning approach, where the NPC learns the player's behavior based on demonstration data in the form of state-action pairs recorded during gameplay. The system is implemented using the Unity Engine and Unity ML-Agents with a training configuration based on Proximal Policy Optimization (PPO). Training results show that the NPC can consistently mimic the player's behavioral patterns in the waste management process within the game. Agent evaluation revealed stable cumulative reward, a reduction in episode length during training, and agent behavior that remained consistent with the provided demonstration data. Testing using the System Usability Scale (SUS) on 20 respondents yielded an average score of 88.25, which falls into the "Good" category. These results indicate that the presence of NPCs helps players understand the waste management process and provides a more engaging gaming experience.

Keywords: Educational Games, Non-Player Character (NPC), Imitation Learning, Behavioral Cloning, Waste Management.

الملخص

.غوميلانغ أمتاجا. 2026. تطوير شخصية غير لاعبة آلية قائمة على التعلم بالتقليد في لعبة تعليمية لإدارة النفايات. البحث الجامعي
:قسم الهندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول
.أحمد فهمي كرامي، الماجستير؛ المشرف الثاني: شوفين نحوي أوتاما، الماجستير

.الكلمات الرئيسية: لعبة تعليمية، شخصية غير لاعبة، التعلم بالتقليد، الاستنساخ السلوكي، إدارة النفايات

آلية قائمة على التعلم بالتقليد في لعبة تعليمية لإدارة النفايات (NPC) يهدف هذا البحث إلى تطوير شخصية غير لاعبة
صُممت هذه اللعبة كوسيلة تعليمية حول إدارة النفايات العضوية وغير العضوية والنفايات الخطرة والسامة. Trash Tycoon بعنوان
من خلال آلية لعبة المحاكاة. تم تطبيق طريقة التعلم بالتقليد باستخدام نهج الاستنساخ السلوكي، حيث تتعلم الشخصية غير (B3)
اللاعبة سلوك اللاعب اعتمادًا على بيانات العرض التوضيحي في صورة أزواج الحالة والفعل التي يتم تسجيلها أثناء سير اللعبة. تم
مع إعداد تدريب قائم على خوارزمية تحسين السياسة القريبة Unity ML-Agents و Unity تنفيذ النظام باستخدام محرك
أظهرت نتائج التدريب أن الشخصية غير اللاعبة قادرة على تقليد أنماط (Proximal Policy Optimization/PPO).
، سلوك اللاعب بصورة متسقة في عملية إدارة النفايات داخل اللعبة. كما أظهرت عملية تقييم الوكيل استقرار قيمة المكافأة التراكمية
وانخفاض طول الحلقة أثناء التدريب، وبقاء سلوك الوكيل متوافقًا مع بيانات العرض التوضيحي المقدمة. وقد حصل اختبار مقياس
الذي شمل 20 مستجيبًا على متوسط درجة قدره 88.25، وهو (System Usability Scale/SUS) قابلية استخدام النظام
، ما يندرج ضمن فئة "جيد". وتشير هذه النتائج إلى أن وجود الشخصية غير اللاعبة يساعد اللاعبين على فهم عملية إدارة النفايات
. كما يوفر تجربة لعب أكثر توجيهًا في إيصال المواد التعليمية المتعلقة بالبيئة

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permasalahan sampah telah menjadi isu global yang semakin mendesak di berbagai belahan dunia (Deslanda Putra Mukti et al., 2023). Merujuk pada laporan *World Bank Group* (2022), volume sampah dunia diperkirakan meningkat signifikan pada dekade mendatang, seiring dengan pertumbuhan populasi dan urbanisasi. Pada tahun 2020, produksi sampah global diperkirakan mencapai 2,24 miliar ton, dengan rata-rata sekitar 0,79 kilogram per kapita per hari. Apabila tidak dikelola secara memadai, akumulasi sampah tersebut berpotensi mempercepat kerusakan ekosistem sekaligus meningkatkan risiko terhadap kesehatan masyarakat (Prabhu, 2022). Menurut laporan *Beyond an Age of Waste: Turning Rubbish into a Resource* (Lenkiewicz, 2024), volume sampah global diproyeksikan meningkat sebesar 73% pada tahun 2050, dengan total produksi mencapai 3,88 miliar ton per tahun.

Indonesia, sebagai salah satu negara dengan jumlah penduduk terbesar di dunia, menghadapi permasalahan sampah yang cukup kompleks (Julia Lingga et al., 2024). Berdasarkan laporan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) tahun 2025, timbunan sampah nasional mencapai sekitar 56,63 juta ton per tahun, di mana lebih dari 39,14% masih terbuang ke lingkungan tanpa pengelolaan yang memadai. Rendahnya efektivitas sistem pemilahan, keterbatasan infrastruktur, serta minimnya kesadaran masyarakat menjadi faktor utama yang

memperburuk kondisi tersebut. Dampak yang ditimbulkan berupa 1 pencemaran tanah, air, dan udara, tetapi juga masalah kesehatan masyarakat, seperti meningkatnya risiko penyakit (Gervasius Ada et al., 2025). Kondisi ini menegaskan pengelolaan sampah di Indonesia bukan hanya persoalan teknis, melainkan juga membutuhkan peningkatan kesadaran publik melalui upaya edukasi yang inovatif dan berkelanjutan.

Upaya edukasi mengenai pengelolaan sampah sejak dini menjadi langkah strategis untuk membangun kesadaran masyarakat (Asadiyah et al., 2023). Edukasi yang diberikan sejak usia muda dapat menumbuhkan kebiasaan baik dalam memilah dan membuang sampah sesuai kategori (Purnami, 2021). Namun, metode konvensional seperti penyuluhan atau poster kurang efektif, terutama bagi generasi digital. Media pembelajaran alternatif yang interaktif dan menyenangkan, seperti *game* edukasi, dapat menjadi sarana yang potensial (Atmodjo et al., 2024).

Game edukasi saat ini berkembang sebagai media pembelajaran digital yang mampu menggabungkan unsur hiburan dengan proses belajar yang interaktif (Li et al., 2024). *Game* edukasi menjadi sarana efektif untuk menanamkan perilaku positif seperti memilah dan membuang sampah dengan benar secara menyenangkan dan mudah dipahami (Chen et al., 2024). Pembelajaran berbasis *game* terbukti dapat meningkatkan perhatian, keterlibatan, dan kemampuan berpikir kritis karena memberikan pengalaman langsung dalam lingkungan yang menyerupai dunia nyata (Alotaibi, 2024). Pemain mendapatkan pengalaman belajar yang imersif, di mana mereka dapat memahami konsep melalui representasi lingkungan yang menyerupai kondisi sesungguhnya.

Sebagai salah satu implementasinya, *game* edukasi bertema pengelolaan sampah memiliki kemampuan menghadirkan simulasi kondisi nyata yang mendorong pemain belajar sambil bermain (Maharani & Kurniawan, 2025). Melalui pendekatan ini, pemain dapat memahami pentingnya memilah sampah organik, anorganik, dan B3, sekaligus melatih diri untuk menerapkan kebiasaan tersebut dalam kehidupan sehari-hari (Evananda et al., 2022). Keberhasilan *game* edukasi sangat dipengaruhi oleh sejauh mana interaksi antara pemain dan lingkungan permainan dapat dikelola secara dinamis dan responsif (Gui et al., 2023).

Terbatasnya interaktivitas antara *game* dan pemain terutama dalam hal *Non-Player Character* (NPC) menjadi kendala utama. NPC yang seharusnya berperan sebagai lawan, teman, atau pemandu, umumnya hanya bersifat statis dan menjalankan instruksi sederhana yang telah diprogram sejak awal (Lapeyrade, 2022; Kumbharkar, 2025). Hal ini membuat interaksi menjadi monoton dan kurang mendukung proses pembelajaran. Keterbatasan ini menunjukkan perlukannya pendekatan baru yang mampu menghadirkan NPC dengan perilaku lebih cerdas dan adaptif.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, pengembangan NPC adaptif berbasis kecerdasan buatan menjadi semakin diperlukan, khususnya dalam *game* edukasi. NPC adaptif dapat menyesuaikan respons terhadap strategi dan tingkat kemampuan pemain, tetapi juga mampu berperan sebagai pembimbing atau *virtual coach* yang memberikan contoh perilaku benar serta koreksi atas tindakan yang keliru. Menurut penelitian Agrati (2023), menunjukkan NPC adaptif dapat meningkatkan

keterlibatan, motivasi, dan efektivitas proses belajar melalui interaksi yang lebih dinamis. Hal ini serupa dengan penelitian Bontchev et al. (2024) yang menyebutkan penerapan NPC adaptif mampu memperkuat fungsi *game* edukasi sebagai sarana pembelajaran yang interaktif, menyenangkan, sekaligus efektif.

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mewujudkan perilaku adaptif tersebut adalah *Imitation Learning*. *Imitation Learning* memungkinkan belajar dengan meniru perilaku pemain manusia berdasarkan data aksi yang terekam (Cohen et al., 2022). Cara ini menjadikan NPC dapat bertindak lebih adaptif, meniru tetapi juga mengidentifikasi strategi yang efektif dari pemain berpengalaman. NPC berperan sebagai pembimbing adaptif yang mampu memberikan contoh perilaku benar, sekaligus mengoreksi tindakan yang salah. Penerapan metode ini dalam *game* edukasi pengelolaan sampah diharapkan dapat menciptakan interaksi yang lebih dinamis dan meningkatkan efektivitas penyampaian pesan edukatif (Kanervisto et al., 2020).

Islam juga memberikan perhatian besar terhadap kebersihan dan kelestarian lingkungan. Allah berfirman dalam QS. Al-A'raf ayat 56 berbunyi:

وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا وَادْعُوهُ حَوْفًا وَطَمَعًا إِنَّ رَحْمَتَ اللَّهِ قَرِيبٌ مِّنَ الْمُحْسِنِينَ

“Dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi setelah (Allah) memperbaikinya dan berdoalah kepada-Nya dengan rasa takut (tidak akan diterima) dan harapan (akan dikabulkan). Sesungguhnya rahmat Allah selalu dekat kepada orang-orang yang berbuat baik.”. (QS. Al-A'raf: 56).

Berdasarkan penjelasan *Tafsir Al-Muyassar* terbitan Kementerian Agama Saudi Arabia, manusia dilarang melakukan kerusakan di muka bumi setelah Allah memperbaikinya melalui pengutusan para rasul serta pengajaran amal ketaatan

untuk memakmurkan bumi. Dalam ayat ini, Allah memerintahkan hamba-Nya untuk berdoa dengan penuh keikhlasan, disertai rasa takut akan azab dan harapan terhadap pahala-Nya. Rahmat Allah dijelaskan sangat dekat dengan orang-orang yang senantiasa berbuat kebaikan (Al-Qarni, 2016). Rasulullah bersabda, “*Kebersihan adalah sebagian dari iman*” (HR. Muslim), yang menegaskan menjaga kebersihan memiliki dimensi spiritual sekaligus sosial. Pengelolaan sampah dan upaya menjaga lingkungan dapat dipandang sebagai kebutuhan praktis masyarakat modern, tetapi juga sebagai bagian penting dari pengamalan ajaran Islam dalam kehidupan sehari-hari.

Permasalahan sampah merupakan isu global yang semakin mendesak, termasuk di Indonesia yang masih menghadapi keterbatasan sistem pengelolaan dan rendahnya kesadaran masyarakat. Upaya edukasi melalui media interaktif seperti *game* edukasi dinilai lebih efektif dibandingkan metode konvensional karena mampu menghadirkan simulasi nyata yang menarik dan mendidik. Namun, keterbatasan interaktivitas pada NPC dalam *game* edukasi menunjukkan perlunya pendekatan baru yang lebih adaptif. Oleh karena itu, penerapan *Imitation Learning* dipandang potensial untuk menghadirkan NPC cerdas yang dapat meningkatkan efektivitas pembelajaran sekaligus memperkuat pesan edukatif dalam pengelolaan sampah.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana penerapan metode *Imitation Learning* dalam pengembangan *Non-Player Character* (NPC) pada *game* edukasi pengelolaan sampah ?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang penulis kemukakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Game* yang dikembangkan berupa *game* edukasi pengelolaan sampah, dengan fokus pada kegiatan memilah dan membuang sampah organik, anorganik, dan B3.
2. NPC yang dikembangkan berperan dalam meniru perilaku pemain melalui metode *Imitation Learning*, tidak mencakup penerapan algoritma kecerdasan buatan lainnya.
3. Lingkup penelitian dibatasi pada fungsi NPC dalam simulasi pengelolaan sampah, tidak menekankan pada aspek grafis, *gameplay* kompleks.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mengimplementasikan metode *Imitation Learning* untuk *Non-Player Character* (NPC) otomatis pada *game* simulasi edukasi pengelolaan sampah.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menjadi sarana edukasi interaktif bagi masyarakat dalam meningkatkan kesadaran pengelolaan sampah melalui *game* edukasi berbasis simulasi.
2. Sebagai alternatif *platform* pembelajaran yang inovatif terkait pentingnya pemilahan dan pengelolaan sampah.
3. Memberikan kontribusi akademis dalam pengembangan kecerdasan buatan, khususnya penerapan *Imitation Learning* pada NPC adaptif dalam *game* edukasi.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

No	Judul	Metode/Algoritma	Subjek	Hasil Penelitian
1.	<i>Fully General Online Imitation Learning</i> (Cohen et al., 2022)	<i>Imitation Learning (Online)</i>	Adaptasi agen dari interaksi dengan <i>player</i> secara <i>real-time</i>	Metode IL <i>online</i> memungkinkan agen beradaptasi dinamis dan meningkatkan performa strategi <i>game</i> .
2.	<i>Towards Interactive Training of Non-Player Characters in Video Games</i> (Borovikov et al., 2020)	<i>Imitation Learning (Human Demonstration)</i>	NPC pada <i>video game</i>	NPC dapat meniru gaya bermain <i>player</i> manusia lebih realistis dan adaptif dibanding NPC tradisional.
3.	<i>Replicating Video Game Players' Behavior through Deep Reinforcement and Imitation Learning</i> (Gharbi et al., 2024)	<i>Deep Reinforcement Learning + Imitation Learning</i>	Replikasi perilaku <i>player</i>	Menghasilkan NPC yang mampu meniru strategi kompleks sekaligus mengoptimalkan tindakannya sesuai konteks <i>game</i> .
4.	<i>Development of Educational Games for Learning Waste Management</i> (Satria et al., 2021)	<i>Game-Based Learning</i> (Android, Unity, MDLC)	<i>Game</i> edukasi pengelolaan sampah	<i>Game</i> edukasi ini meningkatkan pemahaman siswa tentang klasifikasi sampah dan menumbuhkan kesadaran menjaga lingkungan.
5.	<i>The Waste Sorting Education Media: An Innovation with Android-based Game</i> (Purnaningtyas et al., 2023)	<i>Game</i> Edukasi Android (Construct 3)	<i>Game</i> edukasi memilah sampah	Validasi ahli menunjukkan kelayakan tinggi dan uji SUS memperoleh skor 91 (best imaginable). Sangat efektif untuk meningkatkan pemahaman siswa.

No	Judul	Metode/Algoritma	Subjek	Hasil Penelitian
6.	<i>Outracing Champion Gran Turismo Drivers with Deep Reinforcement Learning</i> (Wurman et al., 2022)	<i>Deep Reinforcement Learning</i> (dikombinasikan dengan <i>Imitation Learning</i> melalui data telemetri pembalap manusia)	Adaptasi agen dari interaksi dengan pemain secara <i>real-time</i>	Agen mampu belajar dari pola pemain dan melampaui performa pembalap manusia.

Imitation Learning merupakan salah satu pendekatan dalam kecerdasan buatan yang memungkinkan agen belajar dengan meniru perilaku manusia berdasarkan data demonstrasi. Penelitian yang dilakukan oleh Cohen, Hutter, dan Nanda mengembangkan konsep *Fully General Online Imitation Learning* yang mampu membuat agen beradaptasi secara *real-time* dari interaksi dari interaksi dengan lingkungan. Hasil penelitian ini menunjukkan metode tersebut dapat meningkatkan performa agen dalam menyesuaikan strategi *game* lebih adaptif terhadap dinamika lingkungan (Cohen et al., 2022).

Penelitian yang dilakukan oleh (Borovikov et al., 2020) juga mengimplementasikan metode *Imitation Learning* dalam pengembangan *Non-Playable Character* (NPC) pada video *game*. Mereka memanfaatkan demonstrasi perilaku *player* manusia sebagai data pelatihan agar NPC mampu menirukan gaya bermain *player* secara interaktif. Hasilnya, NPC yang dihasilkan dapat menampilkan perilaku yang lebih realistis dan adaptif dibandingkan NPC tradisional yang bersifat statis, sehingga meningkatkan kualitas pengalaman bermain.

Selain itu, (Gharbi et al., 2024) meneliti penerapan *deep reinforcement learning* yang dipadukan dengan *Imitation Learning* untuk mereplikasi perilaku *player* dalam video *game*. Tujuan penelitian ini adalah agar agen mampu

mempelajari strategi kompleks dari *player* berpengalaman sekaligus beradaptasi terhadap pola *game* baru. Hasil eksperimen menunjukkan pendekatan ini efektif dalam menghasilkan NPC yang meniru tetapi juga dapat mengoptimalkan tindakannya sesuai konteks *game*.

Penelitian yang dilakukan oleh (Satria et al., 2021) mengembangkan *game* edukasi berbasis pembelajaran untuk meningkatkan pemahaman siswa terkait pengelolaan sampah. *Game* ini dirancang dengan pendekatan *game-based learning* untuk menyampaikan konsep pengelolaan limbah secara interaktif. Hasil uji coba menunjukkan *game* edukasi ini mampu meningkatkan pengetahuan siswa mengenai jenis dan pengolahan sampah sekaligus menumbuhkan kesadaran akan pentingnya menjaga lingkungan. Dengan demikian, penggunaan media *game* dalam edukasi terbukti efektif sebagai sarana pembelajaran yang menyenangkan sekaligus mendidik.

Penelitian oleh (Purnaningtyas et al., 2023) mengembangkan *Sorting Trash*, sebuah *game* edukasi berbasis Android yang fokus pada keterampilan memilah sampah di lingkungan sekolah dasar. *Game* ini dibuat menggunakan *Construct 3* dengan desain interaktif yang dilengkapi level *game* serta sistem penilaian. Hasil validasi dari ahli media dan materi menunjukkan *game* ini sangat layak digunakan sebagai media edukasi, sedangkan uji coba *System Usability Scale* (SUS) memperoleh skor rata-rata 91 yang termasuk kategori *best imaginable*. Temuan ini membuktikan media *game* berbasis Android mudah diakses, tetapi juga efektif dalam meningkatkan pemahaman siswa mengenai pemilahan sampah sejak dini.

2.2 *Game* Edukasi

Game edukasi merupakan salah satu inovasi pembelajaran yang menggabungkan unsur hiburan dengan tujuan pendidikan, sehingga mampu menciptakan pengalaman belajar yang lebih menarik dan interaktif. Menurut Cole (2023), *game* edukasi didefinisikan sebagai *game* digital yang secara khusus dirancang dengan tujuan pedagogis untuk mendukung proses pembelajaran formal maupun non-formal. Definisi ini menekankan tidak semua *game* dapat dikategorikan sebagai *game* edukasi, melainkan hanya *game* yang secara eksplisit memuat konten edukatif dan mendukung pencapaian kompetensi tertentu (Cole et al., 2024).

Muenz et al. (2023) menambahkan *game* edukasi efektif dalam membangun kesadaran dan pemahaman konsep abstrak, seperti isu keberlanjutan, dengan menghadirkan simulasi interaktif yang memungkinkan peserta didik bereksperimen dalam lingkungan virtual yang menyerupai dunia nyata. Hal ini menunjukkan *game* edukasi meningkatkan pemahaman kognitif, tetapi juga dapat membentuk sikap dan perilaku yang sesuai dengan tujuan pembelajaran (Muenz et al., 2023).

Lebih lanjut, penelitian oleh Li, Chen, dan Deng (2024) menemukan *game* edukasi digital berpengaruh positif terhadap motivasi belajar siswa, dengan keterlibatan belajar (*learning engagement*) sebagai mediator utama dan lingkungan digital sebagai faktor moderator. Hasil penelitian tersebut menegaskan kehadiran elemen *game* seperti tantangan, umpan balik instan, serta *reward* dapat meningkatkan motivasi intrinsik siswa untuk terus belajar. Dengan demikian, *game* edukasi dapat dipandang sebagai media pembelajaran inovatif yang mampu

mengintegrasikan aspek kognitif, afektif, dan psikomotorik secara simultan melalui pendekatan yang menyenangkan namun tetap terarah secara pedagogis (Li et al., 2024).

2.3 *Non Player Character (NPC)*

Non-Player Character (NPC) adalah agen dalam *game* yang beroperasi tanpa kendali langsung *player* dan berfungsi untuk mengisi dunia *game* serta mengarahkan interaksi *player* dengan lingkungan maupun narasi. Secara fungsional, NPC biasanya dirancang sebagai lawan (*adversary*), pemandu atau pemberi misi (*informant/quest-giver*), atau pendamping yang mendukung aksi *player* (*companion*). Peran-peran tersebut tidak semata bersifat naratif; NPC juga mempengaruhi mekanik *game* seperti alur, keseimbangan tingkat kesulitan, dan efektivitas umpan balik pembelajaran (Yin, 2024)

Klasifikasi NPC dapat dilihat dari dua aspek utama, mekanisme pengendalian perilaku dan peran fungsional. Dari sisi mekanisme, NPC statis (*rule-based* atau *scripted*) umumnya diimplementasikan menggunakan *finite state machines* atau *behavior trees* yang menghasilkan perilaku deterministik dan mudah diverifikasi, namun kurang tanggap terhadap kondisi baru. Sebaliknya, NPC dinamis/adaptif memanfaatkan metode *machine learning large language models* (LLMs), *reinforcement learning*, atau *imitation learning* sehingga mampu menyesuaikan respons terhadap strategi *player* dan konteks lingkungan secara *real-time* (Gallotta et al., 2024; Paduraru et al., 2024). LLMs, memungkinkan NPC menghasilkan respons berbasis teks yang lebih alami dan kontekstual. RL adalah metode pembelajaran melalui mekanisme *trial-and-error* dengan sistem *reward*

dan *punishment*, yang membuat NPC dapat belajar dari pengalaman. Sementara itu, IL memungkinkan NPC meniru perilaku pemain manusia dari data demonstrasi, sehingga perilakunya lebih menyerupai interaksi nyata.

Hasil penelitian menunjukkan NPC adaptif dapat meningkatkan motivasi dan keterlibatan *player* apabila dirancang untuk memenuhi kebutuhan psikologis seperti *relatedness* dan fungsi *coaching*, namun integrasi AI juga dapat mengubah dinamika sosial *game* dan persepsi “*spirit of the game*” bila tidak dikelola dengan baik (Sidji et al., 2024; Silacci et al., 2025). Dalam implementasi desain, fitur asisten berbasis data navigasi dan *hint generation* terbukti membantu *player* menyelesaikan tugas kompleks dan mengurangi frustrasi, sehingga sangat relevan untuk *game* edukasi berbasis simulasi (Gstöttenbauer et al., 2024). Dengan demikian, pengembangan NPC adaptif termasuk melalui pendekatan *imitation learning* memiliki potensi untuk memperkuat peran NPC sebagai pemandu dan pendamping efektif dalam *game* edukasi.

2.4 *Imitation Learning*

Imitation Learning (IL) merupakan salah satu pendekatan dalam *machine learning* yang memungkinkan agen mempelajari perilaku dengan cara meniru perilaku dari manusia atau ahli. Tidak seperti metode pembelajaran lain yang membutuhkan rancangan fungsi *reward* eksplisit, IL beroperasi dengan menggunakan data aksi yang telah diperlihatkan pada kondisi tertentu sehingga agen dapat membangun kebijakan (*policy*) berdasarkan contoh yang tersedia. IL mampu mereplikasi perilaku kompleks tanpa harus mendefinisikan aturan secara manual, yang menjadikannya sangat relevan dalam pengembangan *Non-Player*

Character (NPC) untuk menghasilkan perilaku yang lebih realistis dan menyerupai manusia (Cohen et al., 2022).

IL dapat mempercepat proses pembelajaran karena agen belajar dari data demonstrasi yang telah disediakan, tanpa perlu melakukan eksplorasi *trial-and-error* yang intensif. IL kerap dipandang sebagai metode pendukung yang efektif untuk mengatasi keterbatasan RL sekaligus meningkatkan efisiensi pembelajaran agen dalam aplikasi nyata, termasuk pada *game* edukasi pengelolaan sampah (Gharbi et al., 2024). Bentuk lain *Imitation Learning* adalah *Behavioral Cloning* (BC), yaitu pendekatan *supervised learning* di mana agen dilatih untuk memprediksi aksi (a) dari *state* (s) pada *dataset* demonstrasi (Choi et al., 2023).

Rumus BC dapat ditulis sebagai:

$$\min_{\theta} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ell(\pi_{\theta}(s_i), a_i) \quad (2.1)$$

Keterangan:

θ : Parameter model/kebijakan agen

N : Jumlah total data demonstrasi

s_i : State ke- i dalam dataset

a_i : Aksi ke- i yang dilakukan oleh demonstrator/ahli pada state s_i

$\pi_{\theta}(s_i)$: Aksi yang diprediksi agen berdasarkan state s_i

$\ell(\pi_{\theta}(s_i), a_i)$: Fungsi loss yang mengukur perbedaan antara aksi agen dengan aksi demonstrator

Behavioral Cloning berperan penting dalam mengajarkan agen meniru perilaku demonstrator secara langsung. Dengan pendekatan *supervised learning*, BC memungkinkan proses pelatihan yang sederhana namun efektif, karena agen cukup memetakan *state* ke aksi sesuai contoh yang ada. Sifatnya yang intuitif membuat BC banyak digunakan pada berbagai aplikasi, mulai dari robotika hingga pengembangan *Non-Player Character* (NPC) dalam game. Dalam penelitian ini,

BC menjadi fondasi untuk membangun NPC adaptif yang mampu meniru perilaku pemain manusia secara konsisten, sehingga mendukung terciptanya pengalaman belajar yang lebih interaktif dan realistis dalam *game* edukasi pengelolaan sampah (Choi et al., 2023).

2.5 *System Usability Scale (SUS)*

System Usability Scale (SUS) adalah instrumen evaluasi yang dikembangkan oleh John Brooke pada tahun 1986 di Digital Equipment Co. Ltd. sebagai metode cepat “*quick and dirty*” untuk mengukur tingkat *usability* suatu sistem melalui pendekatan kuesioner sederhana (Brooke, 1996). SUS terdiri atas 10 butir pertanyaan yang disusun dalam skala Likert lima poin, di mana responden menyatakan tingkat persetujuan mereka terhadap pernyataan yang diberikan. Instrumen ini dirancang untuk memberikan gambaran global tentang persepsi pengguna terhadap kemudahan penggunaan suatu sistem dengan cara yang efisien dan konsisten.

Setiap butir dalam SUS bergantian antara pernyataan positif dan negatif, sehingga dapat mengurangi bias jawaban otomatis dari responden. Skor akhir dihitung dengan menjumlahkan kontribusi dari setiap butir (nilai 0–4), kemudian dikalikan 2,5 untuk menghasilkan nilai dalam rentang 0 hingga 100. Nilai SUS tidak diartikan sebagai persentase, melainkan sebagai indeks *usability* relatif. Secara umum, skor di atas 70 menunjukkan tingkat kegunaan yang baik, sedangkan skor di atas 80 digolongkan sebagai “*excellent*” atau *best imaginable usability* (Brooke, 1996).

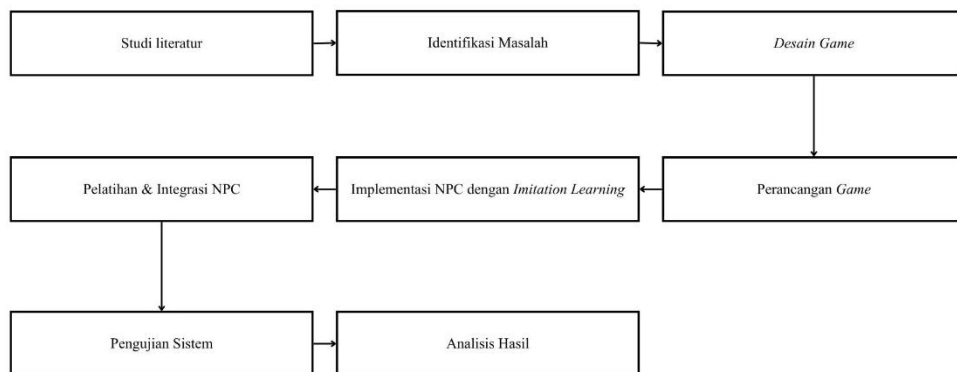
Keunggulan SUS adalah sifatnya yang ringkas, murah, dan fleksibel, sehingga dapat digunakan untuk berbagai sistem, mulai dari perangkat lunak, situs *web*, aplikasi *mobile*, hingga produk interaktif lainnya. SUS juga terbukti memiliki validitas dan reliabilitas tinggi, dengan korelasi yang baik. Dalam penelitian ini, SUS dipilih sebagai instrumen evaluasi untuk mengukur tingkat kegunaan NPC adaptif yang dikembangkan melalui pendekatan *Imitation Learning*. Dengan menerapkan SUS, dapat diperoleh data empiris mengenai sejauh mana NPC tersebut memudahkan pemain, mendukung pengalaman bermain yang positif, serta meningkatkan efektivitas penyampaian pesan edukatif dalam *game* pengelolaan sampah. Dengan demikian, SUS memberikan ukuran numerik tentang tingkat kegunaan, tetapi juga memastikan pengalaman pengguna berlangsung secara intuitif, efisien, dan menyenangkan.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1 Desain Penelitian

Penelitian dirancang untuk mengimplementasikan NPC adaptif berbasis *Imitation Learning* pada *game* edukasi pengelolaan sampah. Proses penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperkuat dasar teori, kemudian dilanjutkan dengan identifikasi masalah terkait keterbatasan NPC konvensional yang masih bersifat statis.



Gambar 3.1 Desain Penelitian

Alur tahapan penelitian secara keseluruhan pada Gambar 3.1 berdasarkan hasil analisis tersebut dilakukan desain *game* yang mencakup alur permainan, peran NPC, serta mekanisme interaksi pemain. Selanjutnya, *game* dirancang menggunakan *Unity Engine* dengan implementasi metode *Imitation Learning* melalui pendekatan *Behavioral Cloning*. Tahap berikutnya adalah pelatihan model menggunakan data demonstrasi pemain dan integrasinya ke dalam sistem NPC. Pada tahap akhir nantinya, dilakukan pengujian sistem dan analisis hasil untuk

mengevaluasi NPC dalam mendukung tujuan edukasi pengelolaan sampah yang sistematis serta mendukung ketercapaian tujuan penelitian.

3.2 Pengembangan Game

Game yang dikembangkan dalam penelitian ini diberi nama *Trash Tycoon*. Dalam merancang *game Trash Tycoon*, penelitian ini menggunakan dua tahapan utama yaitu penyusunan *Game Design Document* (GDD) dan perancangan *Finite State Machine* (FSM). GDD berfungsi sebagai dokumen perencanaan yang berisi penjelasan mendetail mengenai rancangan permainan, meliputi deskripsi umum (*game overview*), mekanisme inti (*core gameplay*), konsep teknis, rancangan visual, serta referensi arah pengembangan. Dokumen ini berperan sebagai panduan agar setiap aspek desain tetap konsisten dan terintegrasi.

3.2.1 Rancangan Game

Game Trash Tycoon ini adalah permainan *single-player* dikembangkan sebagai media edukasi berbasis *platform desktop* dengan genre *simulation* dan *management* yang berfokus pada interaksi antara satu pemain utama dan satu *Non-Player Character* (NPC) bernama *Trash Bot*, ditujukan bagi pemain berusia 15 tahun ke atas. Tujuan utama dari *Trash Tycoon* adalah memberikan pemahaman mengenai pentingnya pengelolaan sampah melalui pendekatan interaktif, sekaligus menumbuhkan kesadaran lingkungan dengan cara yang menyenangkan. Perancangan karakter dan mekanisme pengendalian dalam *game Trash Tycoon* disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perancangan Karakter dan Mekanisme Pengendalian Game

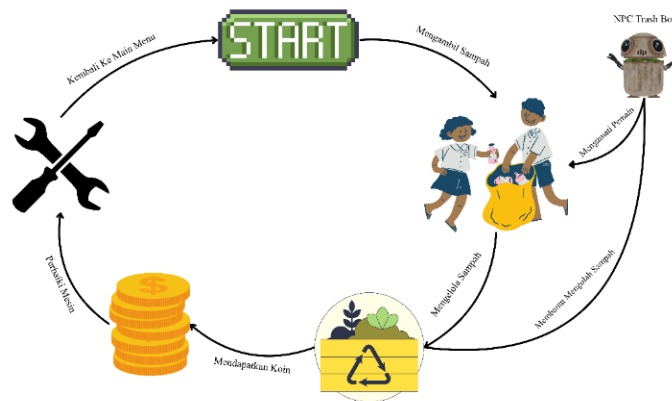
<i>Character and Objective</i>	<i>How Move the Character</i>
Wahyudin sebagai karakter utama, pemilik ide daur ulang yang peduli lingkungan. Trashy Bot sebagai NPC pemandu yang memberikan arahan dan rekomendasi <i>upgrade</i> . Tujuan pemain adalah menjaga bisnis daur ulang tetap berjalan dengan mengelola sampah secara efisien.	- Karakter bergerak menggunakan tombol W, A, S, D (WASD) untuk mengatur arah pergerakan. - Keyboard E untuk mengambil sampah dari truk dan menaruh ke mesin. - Kamera mengikuti karakter

Tabel 3.2 Rancangan Mekanik Game

No	Aktivitas (Mekanik)	Tujuan Edukasi
1.	Mengambil sampah yang tersebar di area permainan	Melatih kesadaran sampah harus segera ditangani dan tidak dibiarkan menumpuk di lingkungan.
2.	Memilah sampah ke kategori organik, anorganik, dan B3	Memberikan pemahaman tentang jenis-jenis sampah dan pentingnya pemilahan sampah sejak awal.
3.	Memasukkan sampah ke mesin pengolahan sesuai jenisnya	Mengajarkan setiap jenis sampah memerlukan metode penanganan dan pengolahan yang berbeda.
4.	Menunggu proses daur ulang pada mesin	Memberikan pemahaman proses pengolahan sampah membutuhkan waktu, tahapan, dan teknologi pendukung.
5.	Mendapatkan koin dari hasil pengolahan sampah	Menunjukkan sampah memiliki nilai ekonomi apabila dikelola dengan baik.
6.	Memperbaiki mesin yang rusak atau menurun daya tahannya	Menanamkan pentingnya perawatan alat dan tanggung jawab terhadap fasilitas pengelolaan lingkungan.
7.	Menyelesaikan target jumlah sampah dalam batas waktu tertentu	Melatih kedisiplinan, manajemen waktu, dan kemampuan bekerja efektif.
8.	NPC Trash Bot saat mengelola sampah	Memberikan contoh kerja sama dan pemanfaatan teknologi dalam pengelolaan lingkungan.

Tabel 3.2 menunjukkan setiap mekanik permainan pada Trash Tycoon dirancang sebagai unsur hiburan sekaligus sarana edukasi mengenai pengelolaan sampah, kepedulian terhadap lingkungan, efisiensi kerja, serta kemampuan dalam mengambil keputusan. Melalui berbagai aktivitas selama permainan berlangsung,

pemain dapat memperoleh pengalaman belajar secara langsung dengan cara yang interaktif dan menyenangkan.



Gambar 3.2 Core *Gameplay Loop*

Gambar 3.2 menunjukkan *core gameplay loop* dari game *Trash Tycoon*. Permainan dimulai ketika pemain mengumpulkan sampah yang tersebar di lingkungan permainan, kemudian memilahnya ke dalam tiga kategori utama, organik, anorganik, dan B3. NPC *Trash Bot* berperan membantu pemain dalam proses pengelolaan sampah dengan meniru tindakan pemain melalui penerapan metode *Imitation Learning* dengan pendekatan *Behavioral Cloning*. NPC belajar dari perilaku pemain saat mengklasifikasikan dan mengolah sampah sehingga mampu memberikan dukungan yang adaptif. Setiap sampah yang berhasil diolah menghasilkan sejumlah koin yang dapat digunakan untuk melakukan perbaikan mesin daur ulang.



Gambar 3.3 Ilustrasi lingkungan *game* Trash Tycoon

Selanjutnya, masing-masing kategori sampah diarahkan ke tempat pengolahan yang sesuai, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.3. Pada proses ini, daur ulang dilakukan dengan waktu tunggu tertentu. Hasil dari proses daur ulang menghasilkan sejumlah mata uang permainan yang dapat dimanfaatkan untuk peningkatan aspek *gameplay*, seperti peningkatan kapasitas mesin dan perbaikan peralatan ketika ketahanan mesin menurun akibat pemakaian. Aktivitas peningkatan ini berdampak pada optimalisasi pengelolaan limbah, perpanjangan usia mesin, serta efisiensi dalam siklus permainan. Mekanisme perbaikan mesin ini dirancang agar pemain fokus pada pengumpulan sumber daya, tetapi juga melakukan manajemen terhadap umur mesin yang terbatas.

3.2.2 Rancangan NPC

Gambar 3.4 menampilkan ilustrasi karakter NPC bernama *Trash Bot* yang berperan sebagai pembantu pemain dalam proses pengelolaan sampah di dalam permainan *Trash Tycoon*. NPC dirancang dengan pendekatan *Behavioral Cloning*,

salah satu metode *Imitation Learning* yang mengandalkan data demonstrasi pemain. Setiap aksi pemain dalam proses pengelolaan sampah direkam sebagai pasangan kondisi aksi (*state-action pair*), kemudian dijadikan data pelatihan untuk membangun model perilaku NPC.



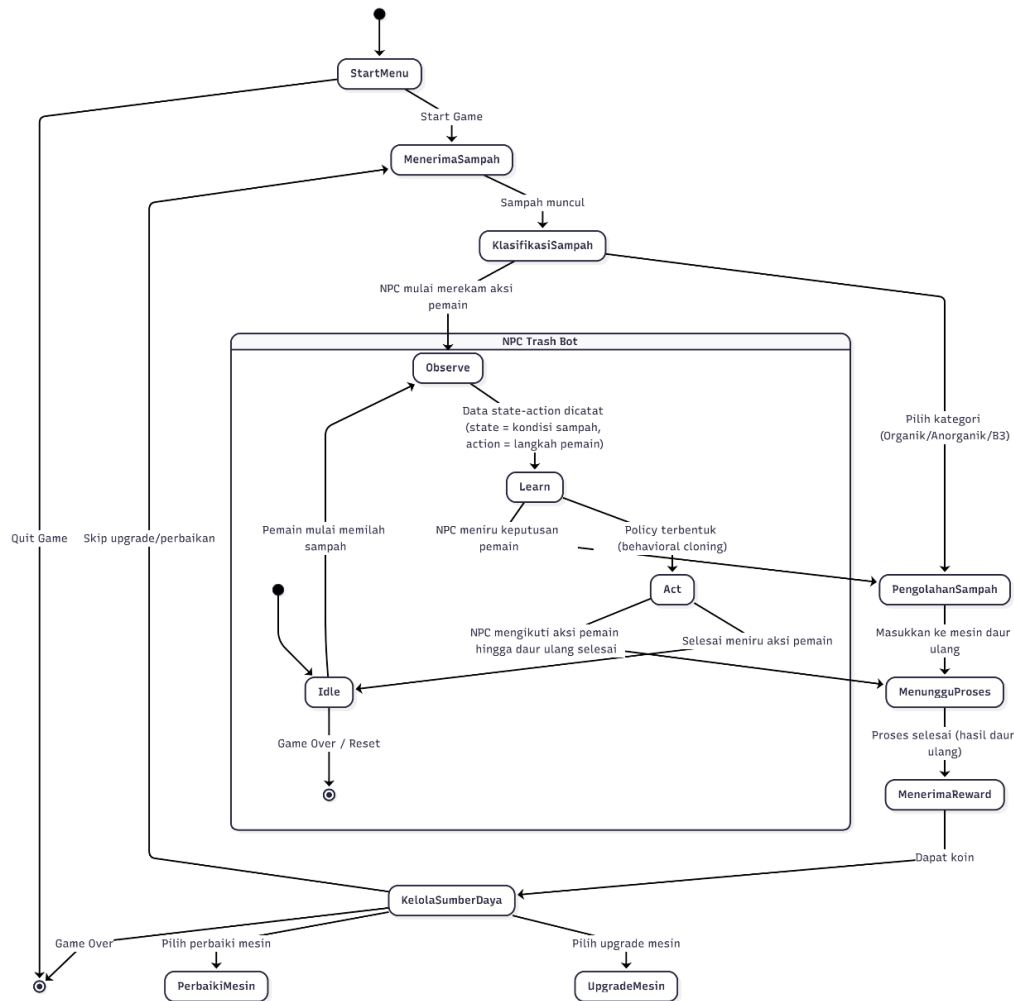
Gambar 3.4 Trash Bot NPC Pembantu

Model ini memungkinkan NPC meniru pola keputusan pemain pada situasi serupa, sehingga perilaku NPC menyerupai strategi yang telah dicontohkan. Alur implementasi NPC berbasis *Imitation Learning* terdiri dari beberapa tahapan yang diilustrasikan pada Gambar 3.5, dimulai dari pengumpulan data aksi pemain sebagai demonstrasi, kemudian dilanjutkan dengan pembangunan model perilaku menggunakan pendekatan *behavioral cloning*. Model yang dihasilkan diterapkan pada NPC untuk menghasilkan aksi sesuai dengan situasi yang dihadapi dalam permainan.



Gambar 3.5 Alur Implementasi NPC dengan *Imitation Learning* pada *Game Trash Tycoon*

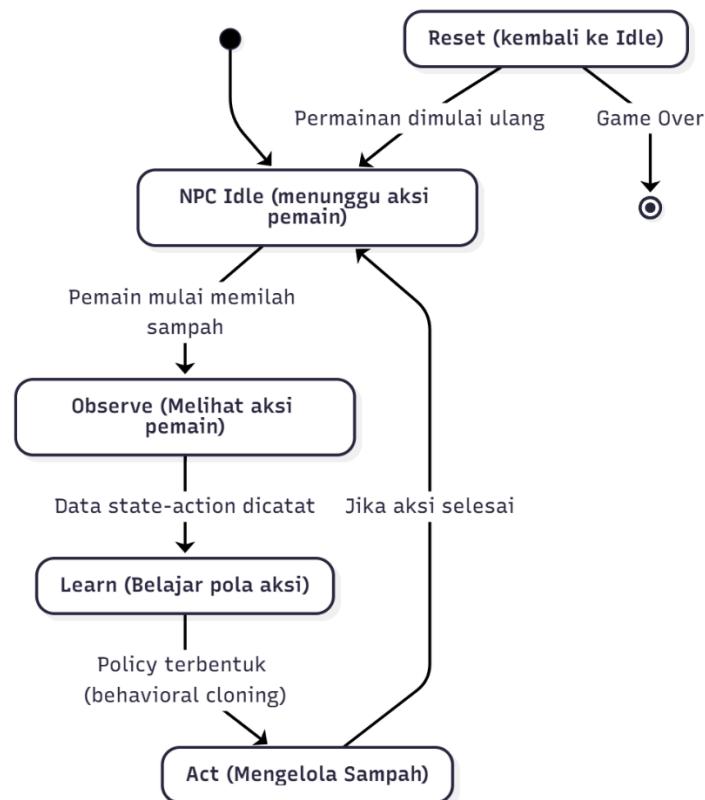
3.2.3 Finite State Machine



Gambar 3.6 Finite State Machine Global

Pada Gambar 3.6 permainan dimulai dari *Start Menu*, kemudian pemain menerima sampah dan melakukan proses klasifikasi berdasarkan jenisnya organik, anorganik, atau B3. Pada tahap ini, *NPC Trash Bot* mulai merekam perilaku pemain sebagai data demonstrasi berupa pasangan *state-action* untuk proses pembelajaran. Data tersebut diolah melalui tahapan *Observe*, *Learn*, dan *Act* sebagaimana dijelaskan pada model perilaku NPC. Setelah NPC meniru aksi pemain dan proses daur ulang selesai, pemain memperoleh koin sebagai hasil dari pengolahan sampah. Koin ini dapat digunakan untuk memperbaiki atau meningkatkan mesin daur ulang

melalui tahapan Kelola Sumber Daya, Perbaiki Mesin, atau *Upgrade* Mesin. Siklus permainan akan berulang hingga pemain memilih keluar atau permainan berakhir (*Game Over*).



Gambar 3.7 Alur Kerja NPC

Gambar 3.7 menampilkan alur kerja *Non-Player Character* (NPC) yang dimodelkan menggunakan pendekatan *Finite State Machine* (FSM) yang menggambarkan perilaku NPC dalam game *Trash Tycoon*. NPC memulai dari *state Idle*, kemudian bertransisi ke *state Observe* ketika pemain melakukan aksi memilah sampah. Data disajikan pada Tabel 3.3 *state-action* yang diperoleh disimpan pada *state Learn* untuk membentuk *policy* dengan pendekatan *behavioral cloning*. Selanjutnya, NPC meniru aksi pemain pada *state Act*. Setelah aksi selesai, NPC kembali ke *state Idle* atau Reset apabila permainan berakhir.

Tabel 3.3 *State Non-Player Character*

<i>State</i>	<i>Event/Trigger</i>	<i>Action yang Dilakukan NPC</i>	<i>Next State</i>
Idle	Pemain memulai permainan / aksi mengolah sampah	NPC menunggu aksi pertama dari pemain	Observe
Observe	Pemain melakukan aksi (<i>state-action</i> dicatat)	NPC merekam data demonstrasi pemain (misalnya: organik → mesin organik)	Learn
Learn	Data demonstrasi terkumpul	NPC menyimpan pola aksi, membentuk <i>policy</i> melalui <i>behavioral cloning</i>	Act
Act	<i>Policy</i> terbentuk	NPC meniru aksi pemain dalam mengolah sampah	Idle
Idle	Aksi selesai / permainan berakhir	NPC menunggu aksi baru atau kembali ke kondisi awal	Idle/Reset
Reset	<i>Game Over / Reset</i> permainan	NPC mengembalikan seluruh state ke kondisi awal	Idle

3.3 Konsep *Imitation Learning*

Pada penelitian ini, perancangan NPC dalam game *Trash Tycoon* menggunakan pendekatan *Imitation Learning* dengan metode *Behavioral Cloning*, di mana NPC belajar dari data demonstrasi pemain berupa pasangan kondisi–aksi (*state–action pair*). Setiap tindakan pemain digunakan untuk membentuk fungsi kebijakan (*policy function*) yang memetakan kondisi permainan ke aksi yang sesuai. Dengan demikian, NPC dapat meniru perilaku pemain secara adaptif dalam proses pengelolaan sampah. Evaluasi dengan *confusion matrix* serta metrik *precision*, *recall*, dan *F1-score* diperlukan untuk memastikan model yang dibentuk mampu meniru aksis pemain, tetapi juga konsisten dan akurat dalam melakukan pengambilan keputusan pada setiap kategori sampah.

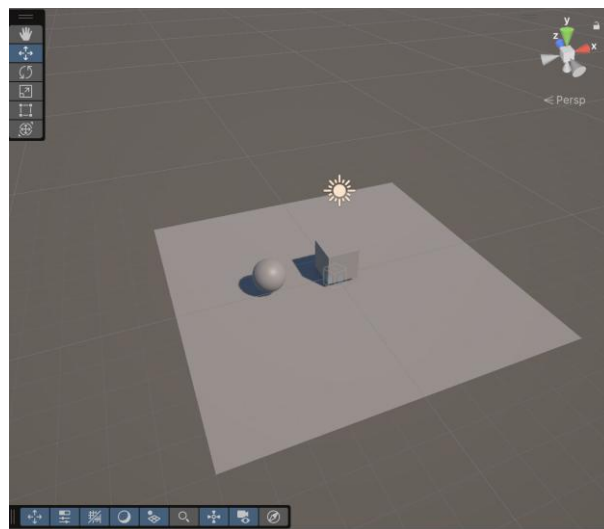
3.3.1 *Behavioral Cloning*

Behavioral Cloning merupakan salah satu metode dalam *Imitation Learning* yang menggunakan pendekatan *supervised learning*. Pada metode ini, model dilatih

untuk memetakan kondisi (*state*) ke aksi (*action*) berdasarkan data demonstrasi yang tersedia. Model akan mempelajari fungsi kebijakan (*policy function*) yang merepresentasikan hubungan antara kondisi lingkungan dan aksi yang dilakukan. Dengan demikian, ketika NPC menghadapi kondisi yang serupa, NPC dapat menghasilkan aksi yang sesuai berdasarkan pola yang telah dipelajari.

3.3.2 Implementasi *Behavioral Cloning* pada ML-Agents

Implementasi *Behavioral Cloning* dalam penelitian ini dilakukan menggunakan *Unity ML-Agents Framework* ini menyediakan dukungan untuk pelatihan agen berbasis data demonstrasi melalui *file* berformat demo. Proses implementasi dimulai dengan perekaman aksi pemain selama permainan berlangsung. Data tersebut kemudian disimpan sebagai *dataset* demonstrasi yang berisi informasi kondisi lingkungan dan aksi yang dilakukan pemain.



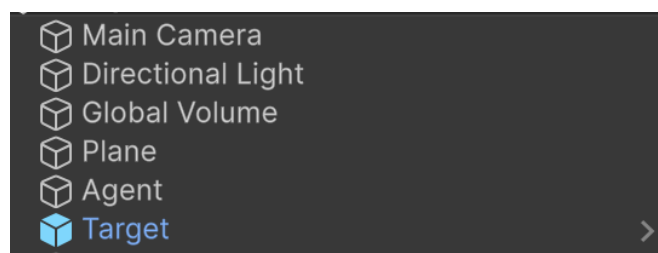
Gambar 3.8 Tempat Training untuk Demo

Proses perekaman dan pelatihan data demonstrasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.8, yang memperlihatkan lingkungan (*environment*) yang digunakan

dalam pengumpulan data untuk kebutuhan pelatihan model. Model yang dihasilkan kemudian diintegrasikan ke dalam NPC dalam mode *inference*, sehingga NPC dapat langsung menggunakan hasil pembelajaran tanpa melakukan pelatihan ulang selama permainan berlangsung. Dalam implementasi sistem, *state* direpresentasikan sebagai informasi kondisi lingkungan yang diamati oleh NPC, seperti posisi NPC dan posisi target sampah. Sementara itu, *action* direpresentasikan sebagai pergerakan atau interaksi yang dilakukan NPC terhadap objek dalam permainan. Representasi ini memungkinkan model untuk mempelajari hubungan antara kondisi lingkungan dan aksi yang sesuai secara efektif.

3.3.3 Evaluasi Model

Evaluasi model dalam penelitian ini dilakukan untuk menilai sejauh mana NPC mampu meniru perilaku pemain secara konsisten dalam konteks permainan. Fokus evaluasi pada ketepatan hasil, tetapi juga pada kesesuaian perilaku NPC terhadap kondisi yang dihadapi dalam lingkungan game.



Gambar 3.9 Hirarki Unity

Struktur hierarki objek dalam lingkungan Unity yang digunakan pada proses pengujian model ditampilkan pada Gambar 3.9. Objek *Agent* merepresentasikan NPC yang telah dilatih, sedangkan *Target* berfungsi sebagai tujuan atau referensi perilaku yang harus diikuti oleh NPC. Komponen lain seperti *Plane* digunakan

sebagai area pergerakan, serta *Main Camera* dan *Directional Light* untuk mendukung visualisasi lingkungan.

Pengaturan hierarki ini berperan penting dalam proses evaluasi, karena interaksi antara *Agent* dan *Target* menjadi dasar dalam mengukur keberhasilan model dalam meniru perilaku pemain. Evaluasi dilakukan dengan mengamati kemampuan NPC dalam merespons posisi target, mengambil keputusan, serta mempertahankan konsistensi perilaku selama simulasi berlangsung.

3.4 Desain Pengujian *System Usability Scale*

Desain pengujian *System Usability Scale (SUS)* digunakan dalam penelitian ini untuk secara khusus mengevaluasi NPC dalam *game* edukasi *Trash Tycoon*.

Pelaksanaan evaluasi *System Usability Scale (SUS)* dilakukan setelah tahap implementasi NPC selesai. Setiap responden diminta untuk memainkan *game* *Trash Tycoon* selama satu sesi permainan hingga mereka memahami fungsi dasar NPC. Dalam penelitian ini, SUS dilakukan dengan melibatkan 20 responden yang belum pernah memainkan *Trash Tycoon* sebelumnya. Responden diberi waktu untuk mencoba permainan, kemudian diminta mengisi kuesioner SUS dengan skala Likert 1–5, di mana nilai 1 berarti *Sangat Tidak Setuju* dan nilai 5 berarti *Sangat Setuju*.

Tabel 3.4 menampilkan evaluasi melalui SUS diharapkan dapat memberikan gambaran objektif mengenai tingkat kegunaan NPC yang telah dikembangkan, sehingga dapat dipastikan keberadaan NPC benar-benar mendukung pengalaman bermain yang intuitif, adil, dan menyenangkan.

Tabel 3.4 Pertanyaan SUS

No	Pernyataan
1	Saya merasa NPC dalam <i>game Trash Tycoon</i> mudah dipahami dan digunakan.
2	Saya merasa interaksi dengan NPC terasa rumit atau membingungkan.
3	Saya merasa NPC membantu saya dalam memilah sampah sesuai kategori.
4	Saya merasa NPC sering memberikan informasi yang tidak relevan.
5	Saya merasa puas dengan peran NPC dalam mendukung <i>gameplay</i> .
6	Saya merasa NPC kadang membuat permainan lebih sulit daripada seharusnya.
7	Saya merasa NPC memberikan panduan yang adil dan sesuai konteks permainan.
8	Saya merasa NPC tidak konsisten dalam tindakannya selama permainan.
9	Saya merasa NPC meningkatkan pengalaman bermain saya.
10	Saya merasa penggunaan NPC dalam game ini membutuhkan usaha terlalu besar untuk dipahami.

Skala penilaian yang digunakan dalam kuesioner SUS ditampilkan pada Tabel 3.5, yang menjelaskan rentang nilai jawaban dari responden berdasarkan tingkat persetujuan.

Tabel 3.5 Nilai SUS

No	Jawaban	Nilai
1.	Sangat Tidak Setuju	1
2.	Tidak Setuju	2
3.	Netral	3
4.	Setuju	4
5.	Sangat Setuju	5

Setelah pengumpulan data, skor SUS dihitung menggunakan aturan perhitungan standar (Brooke, 1996):

- Untuk pertanyaan ganjil (positif): skor akhir = skor – 1.
- Untuk pertanyaan genap (negatif): skor akhir = 5 – skor.
- Total seluruh skor dikalikan 2.5 untuk mendapatkan nilai antara 0–100.

Tabel 3.6 *SUS Score*

<i>SUS Score</i>	<i>Letter Grade</i>	<i>Adjective Rating</i>
100	A	<i>Best Imaginable</i>
85–99	B – A	<i>Excellent</i>
73–84	C – B	<i>Good</i>
52–72	F – D	<i>Ok</i>
< 51	F	<i>Poor</i>

Tabel 3.6 menunjukkan pembobotan SUS dalam bentuk *letter grade* dan *adjective rating*. Nilai maksimal (100) memperoleh kategori A dengan predikat *Best Imaginable*, yang menunjukkan pengalaman pengguna sangat baik. Rentang 85–99 masuk kategori *Excellent*, sedangkan 73–84 dianggap *Good*. Skor 52–72 dipandang *Ok* atau cukup baik, sementara nilai di bawah 51 dikategorikan *Poor*, yang berarti sistem perlu perbaikan signifikan pada aspek kegunaan.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi *Game* dan Sistem

Implementasi *game* merupakan tahap realisasi dari rancangan sistem yang telah dijelaskan pada Bab III. Pada tahap ini, berbagai komponen yang telah dirancang sebelumnya, seperti antarmuka pengguna (*User Interface*), mekanisme permainan, serta elemen visual lainnya, diintegrasikan menjadi sebuah sistem permainan yang dapat dijalankan oleh pengguna. Proses implementasi dilakukan dengan memanfaatkan *game engine* Unity untuk mengembangkan *game* edukasi pengelolaan sampah berjudul *Trash Tycoon*, di mana seluruh rancangan *gameplay*, karakter, dan lingkungan permainan yang telah disusun sebelumnya diterapkan ke dalam bentuk visual dan interaksi yang dapat dimainkan, sehingga menghasilkan pengalaman bermain yang sesuai dengan konsep dan tujuan edukatif yang telah dirancang.

4.1.1 *Main Menu*

Tampilan menu utama (*main menu*) pada *game Trash Tycoon* yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 berfungsi sebagai halaman awal yang menampilkan elemen navigasi sebelum pemain memasuki permainan.



Gambar 4.1 Tampilan Panel *Main Menu* pada *Game Trash Tycoon*

Antarmuka ini menyediakan beberapa tombol utama, yaitu Mulai, Tentang, Keluar, serta Pengaturan yang digunakan untuk mengakses fungsi dasar dalam permainan. Selain itu, terdapat ikon tanda tanya yang berfungsi sebagai akses menuju *menu tutorial* yang berisi petunjuk mengenai mekanisme dasar permainan.

4.1.2 *Panel Tutorial*

Gambar 4.2 *Panel tutorial* pada *game Trash Tycoon* berfungsi sebagai panduan awal bagi pemain untuk memahami mekanisme dasar permainan. Pada panel ini ditampilkan informasi mengenai kontrol permainan, seperti penggunaan tombol W, A, S, D untuk menggerakkan karakter, tombol E untuk mengambil sampah, serta tombol M untuk mengaktifkan *NPC Trash Bot* yang membantu proses pengumpulan sampah.

Gambar 4.2 Tampilan Panel *Tutorial*

Keberadaan panel tutorial ini bertujuan untuk mempermudah pemain dalam memahami alur interaksi permainan sehingga proses *gameplay* dapat berlangsung lebih efektif dan intuitif.

4.1.3 Pengaturan

Panel pengaturan (*settings*) pada Gambar 4.3 di *game Trash Tycoon* berfungsi untuk memberikan kontrol kepada pemain dalam menyesuaikan preferensi permainan.



Gambar 4.3 Tampilan Panel Pengaturan

Pada panel ini tersedia pengaturan volume yang memungkinkan pemain mengatur tingkat suara permainan, serta pilihan bahasa yang terdiri dari bahasa Indonesia dan bahasa Inggris. Fitur ini dirancang untuk meningkatkan kenyamanan pemain dalam menggunakan sistem permainan sesuai dengan preferensi yang diinginkan.

4.1.4 *Gameplay*

Pada tahap awal *gameplay*, pemain akan menerima pesan sambutan yang ditunjukkan pada Gambar 4.4, yang berfungsi sebagai pengantar permainan. Pada panel tersebut, pemain diperkenalkan dengan tiga tahapan utama permainan, yaitu menunggu kedatangan truk, mengambil sampah yang tersedia, dan mengelola sampah sesuai jenisnya.



Gambar 4.4 Panel Sambutan Awal Permainan

Selanjutnya, Gambar 4.5 menampilkan panel instruksi pertama yang mengarahkan pemain untuk menuju lokasi pemberhentian truk dan memanggil truk sampah sebagai langkah awal dalam memulai proses pengelolaan sampah di dalam permainan.



Gambar 4.5 Panel Instruksi Menuju Pemberhentian Truk

Area interaksi pemanggilan truk pada Gambar 4.6 menunjukkan posisi pemain ketika berada di lokasi pemberhentian truk. Pada area tersebut, pemain diarahkan untuk menekan tombol “Q” guna memanggil truk sampah. Mekanisme ini dirancang untuk memperkenalkan alur awal *gameplay* serta membantu pemain memahami proses awal pengelolaan sampah yang akan dilakukan dalam permainan.



Gambar 4.6 Area Interaksi Pemanggilan Truk Sampah

Setelah pemain berada pada lokasi yang telah ditentukan, sistem permainan akan menampilkan notifikasi panel pada Gambar 4.7 yang memberikan instruksi kepada pemain untuk mengeluarkan sampah dengan menekan tombol “W”. Instruksi ini bertujuan untuk memperkenalkan mekanisme interaksi pemain dengan sistem permainan dalam menghasilkan objek sampah yang akan dikelola dalam *gameplay*.



Gambar 4.7 Panel Instruksi Mengeluarkan Sampah dari Truk

Panel instruksi pada Gambar 4.8 menunjukkan lokasi munculnya objek sampah (*spawn point*) setelah pemain memanggil truk sampah. Area tersebut menjadi titik tempat sampah dihasilkan, sehingga pemain dapat mengambil sampah dengan menekan tombol “E” dan melanjutkan proses pengelolaan sampah di dalam permainan.



Gambar 4.8 Tampilan Lokasi Munculnya Objek Sampah

Panel informasi pada Gambar 4.9 memperkenalkan beberapa jenis sampah yang terdapat di dalam permainan. Terdapat tiga jenis sampah yang dapat dikumpulkan oleh pemain, yaitu sampah organik, anorganik, dan B3, yang kemudian dapat diolah menggunakan mesin pengolahan sampah yang tersedia di lingkungan permainan.



Gambar 4.9 Panel Informasi Jenis Sampah dalam Permainan

Keberadaan berbagai jenis sampah ini bertujuan untuk mensimulasikan proses pengelolaan sampah yang menjadi fokus utama dalam *gameplay* *Trash Tycoon*. Setelah sampah berhasil dikumpulkan, pemain dapat melakukan proses

pengolahan dengan berinteraksi pada mesin pengolahan yang tersedia. Sistem permainan akan menampilkan instruksi kepada pemain untuk menekan tombol “E” sebagai bentuk interaksi untuk memulai proses pengolahan sampah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10 sehingga sampah yang telah dikumpulkan dapat diubah menjadi hasil pengolahan yang memberikan nilai atau keuntungan dalam permainan.



Gambar 4.10 Panel Instruksi Pengolahan Sampah pada Mesin

4.1.5 Mekanisme Dalam *Game*

Pada bagian mekanisme permainan, sistem menampilkan panel instruksi yang berisi informasi mengenai batas waktu dan target pengelolaan sampah yang harus diselesaikan oleh pemain. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11, pemain diberikan waktu selama 2 menit untuk mengelola sebanyak 10 sampah yang terdapat di dalam truk sebelum waktu habis. Informasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman kepada pemain mengenai tujuan permainan, batas waktu, serta jumlah sampah yang harus dikelola selama sesi permainan berlangsung



Gambar 4.11 Panel Informasi Waktu dan Target Pengelolaan Sampah

Panel instruksi pada Gambar 4.12 menjelaskan mekanisme perbaikan dan peningkatan mesin pengolahan sampah. Setiap mesin memiliki indikator daya tahan yang akan berkurang seiring dengan penggunaan dalam proses pengolahan sampah, sehingga pemain perlu melakukan perbaikan atau peningkatan mesin agar mesin tetap dapat digunakan.



Gambar 4.12 Panel Instruksi Perbaikan dan Peningkatan Mesin

Sistem permainan menampilkan panel informasi seperti pada Gambar 4.13, yang memperkenalkan NPC bernama Trash Bot sebagai karakter pembantu pemain.

NPC ini berperan membantu proses pengelolaan dan pengumpulan sampah selama permainan berlangsung, serta dapat diaktifkan oleh pemain melalui tombol “M”.



Gambar 4.13 Panel Pengenalan NPC Trash Bot

Informasi lanjutan pada Gambar 4.14 menandai dimulainya permainan setelah seluruh instruksi awal diberikan kepada pemain. Tampilan ini juga memberikan pengingat fitur panduan dapat diakses melalui tombol Guide, serta menjelaskan kondisi permainan berakhir apabila jumlah uang pemain habis atau bernilai 0.



Gambar 4.14 Panel Panel Akhir Panduan Permainan

Sebagai pendukung interaksi permainan, sistem menyediakan panel informasi jenis sampah sebagai bentuk umpan balik visual (*visual feedback*) kepada pemain. Ketika pemain mengambil sampah tertentu, sistem akan menampilkan notifikasi panel yang menunjukkan kategori sampah yang sedang dibawa, seperti organik, anorganik, atau B3 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Panel Notifikasi

Pada kondisi awal permainan, sistem menampilkan informasi mengenai sumber daya yang dimiliki pemain melalui antarmuka permainan, yang meliputi jumlah koin awal sebesar 100 koin serta indikator daya tahan dari tiga mesin pengolahan sampah yang tersedia. Informasi pada Gambar 4.16 ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal kepada pemain mengenai kondisi sumber daya sebelum memulai aktivitas pengelolaan sampah.



Gambar 4.16 Tampilan Kondisi Awal Permainan

Permainan menyediakan fitur toko yang diperlihatkan pada Gambar 4.17 memungkinkan pemain melakukan peningkatan (*upgrade*) maupun perbaikan

mesin pengolahan sampah dengan memanfaatkan koin yang dimiliki. Melalui menu toko tersebut, pemain dapat meningkatkan level mesin atau memperbaiki daya tahan mesin yang berkurang akibat penggunaan sehingga mekanisme ini mendukung strategi pengelolaan sumber daya dalam permainan agar proses pengolahan sampah dapat berlangsung secara lebih optimal.



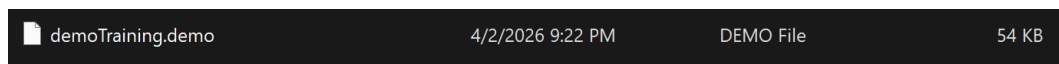
Gambar 4.17 Tampilan Menu Toko untuk Upgrade dan Perbaikan Mesin

4.2 Implementasi NPC dengan Metode *Imitation Learning*

Implementasi perilaku *Non-Player Character (NPC)* pada *game Trash Tycoon* dilakukan dengan menerapkan metode *Imitation Learning* menggunakan pendekatan *Behavioral Cloning*. Pada tahap ini, NPC dikembangkan untuk dapat meniru tindakan pemain berdasarkan data demonstrasi yang diperoleh selama permainan berlangsung. Implementasi sistem dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *C#* yang terintegrasi dengan *Unity Engine* sebagai *platform* utama dalam pengembangan game.

Proses pembentukan data demonstrasi dilakukan menggunakan *Demonstration Recorder* yang tersedia pada *Unity ML-Agents*. Hasil perekaman tersebut kemudian disimpan dalam *file* berekstensi *.demo* dengan nama

demoTraining.demo. Gambar 4.18 menunjukkan *file* *demoTraining.demo* yang dihasilkan dari proses perekaman demonstrasi pemain yang digunakan sebagai *dataset* pelatihan pada metode *Behavioral Cloning*. Semakin baik dan konsisten tindakan pemain saat proses perekaman, maka semakin baik pula pola perilaku yang dapat dipelajari oleh NPC.



Gambar 4.18 *File Demo Training*

Data tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam membentuk *policy* yang memungkinkan NPC meniru pola keputusan pemain pada situasi yang serupa. Pada implementasinya, proses pencatatan data demonstrasi dan pengolahan perilaku NPC diintegrasikan dalam beberapa komponen sistem yang terdapat pada Unity. Komponen tersebut bertugas untuk merekam tindakan pemain selama permainan berlangsung, menyimpan data *state-action*, serta menjalankan mekanisme pengambilan keputusan NPC berdasarkan pola yang telah dipelajari. Dengan pendekatan ini, NPC *Trash Bot* dapat menampilkan perilaku yang lebih adaptif dalam membantu pemain melakukan aktivitas pengelolaan sampah di dalam permainan.

4.2.1 Konfigurasi Agen

```
behaviors:
  MyAgent:
    trainer_type: ppo

    hyperparameters:
      batch_size: 64
      buffer_size: 2048
      learning_rate: 3.0e-4

    network_settings:
      num_layers: 2
      hidden_units: 128

    behavioral_cloning:
      demo_path: D:/Kuliah/Skripsi/Training
Unity/demoTraining.demo
      strength: 1.0

    reward_signals:
      extrinsic:
        strength: 0.0

    max_steps: 50000
    time_horizon: 64
    summary_freq: 1000
```

Parameter pelatihan diatur dalam *file* konfigurasi yang mencakup jenis pelatihan (*trainer_type*) menggunakan algoritma *Proximal Policy Optimization (PPO)*, dengan nilai *batch size* sebesar 64, *buffer size* sebesar 2048, serta *learning*

rate sebesar 3.0×10^{-4} . Struktur jaringan saraf yang digunakan terdiri dari 2 lapisan tersembunyi (*hidden layers*) dengan masing-masing 128 unit neuron.

Selain itu, proses pembelajaran NPC memanfaatkan data demonstrasi yang disimpan dalam *file demo* untuk mendukung mekanisme *behavioral cloning* dengan nilai *strength* sebesar 1.0, yang menunjukkan pembelajaran sepenuhnya bergantung pada data demonstrasi pemain. Pada konfigurasi ini, *reward signal* eksternal tidak digunakan (*strength* = 0.0), sehingga proses pelatihan difokuskan pada peniruan perilaku tanpa mempertimbangkan sistem *reward*. Proses pelatihan dilakukan hingga mencapai 50.000 langkah (*max_steps*) dengan *time horizon* sebesar 64, serta pencatatan hasil pelatihan dilakukan setiap 1000 langkah untuk keperluan evaluasi. Tabel 4.1 menunjukkan ringkasan parameter utama yang digunakan pada proses pelatihan agen dalam penelitian ini. Parameter tersebut dipilih untuk mendukung kestabilan proses pembelajaran serta menghasilkan perilaku NPC yang sesuai dengan data demonstrasi pemain.

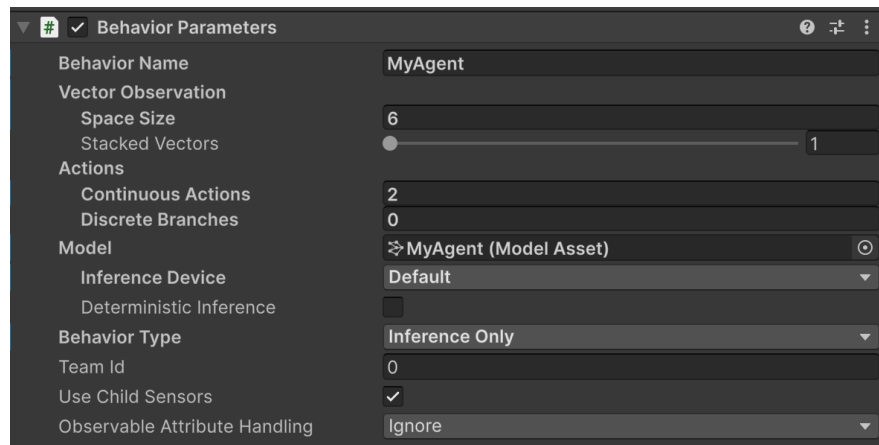
Tabel 4.1 Parameter pelatihan Agen

Parameter	Nilai
<i>Batch Size</i>	64
<i>Buffer Size</i>	2048
<i>Learning Rate</i>	3e-4
<i>Hidden Units</i>	128
<i>Max Steps</i>	50000

4.2.2 Implementasi *Behavior Agent* dalam *Game*

Gambar 4.19 menunjukkan tampilan komponen *Behavior Parameters* pada objek NPC di *Unity Inspector* yang digunakan untuk mengatur perilaku agen berbasis *ML-Agents*. Pada konfigurasi tersebut terlihat nama *behavior* yang digunakan adalah *MyAgent*, yang berfungsi sebagai identitas agen saat proses

pelatihan maupun inferensi model. Selain itu, nilai *Vector Observation* ditetapkan sebesar 6 sebagai representasi data masukan yang diamati agen dari lingkungan permainan.



Gambar 4.19 Konfigurasi *Behavior Parameters* pada NPC

Pada bagian aksi, sistem menggunakan *Continuous Actions* sebanyak 2, yang merepresentasikan pergerakan agen pada sumbu horizontal dan vertikal sehingga NPC dapat bergerak secara fleksibel menuju target sampah. Model hasil pelatihan kemudian dipasang pada bagian *Model* dan dijalankan menggunakan mode *Inference Only*, kemudian NPC menggunakan hasil pembelajaran tanpa melakukan pelatihan ulang selama permainan berlangsung.

4.2.3 Mekanisme Interaksi dan Pemrosesan Agen

Implementasi perilaku NPC dilakukan dengan memanfaatkan komponen *ML-Agents* yang memungkinkan agen menerima observasi dan menghasilkan aksi. Observasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi posisi NPC dan posisi target sampah, sebagaimana ditunjukkan pada Kode 4.1.

Pseudocode 4. 1

```

public override void CollectObservat
    .localPosition);

    sensor.AddObservation(currentTarget ?
currentTarget.localPosition : Vector3.zero(sensor
sensor)

{
    sensor.AddObservation(transformro);

```



Gambar 4.20 Proses Observasi Sampah oleh Agen

Selanjutnya, aksi yang dihasilkan oleh model digunakan untuk menggerakkan NPC menuju target, sebagaimana ditunjukkan pada Kode 4.2.

Pseudocode 4. 2

```

float moveX = actions.ContinuousActions[0];
float moveZ = actions.ContinuousActions[1];

```

Selain itu, mekanisme pengolahan sampah dilakukan ketika NPC bersentuhan dengan objek sampah melalui *collision detection*. Proses ini akan langsung memicu pengolahan sampah secara otomatis



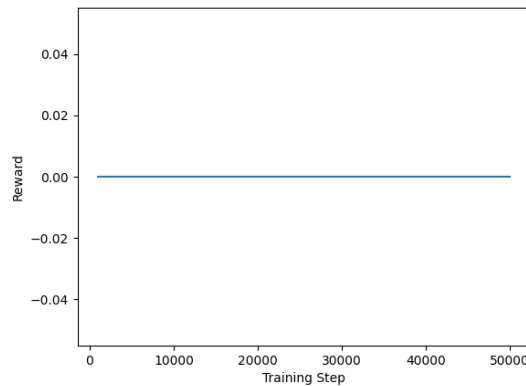
Gambar 4.21 Agen mengolah sampah

```
private void OnTriggerEnter(Collider other)
{
    if (!targets.Contains(other.transform)) return;
    StartCoroutine(ProcessTrash(other.transform));
}
```

4.3 Evaluasi Agen

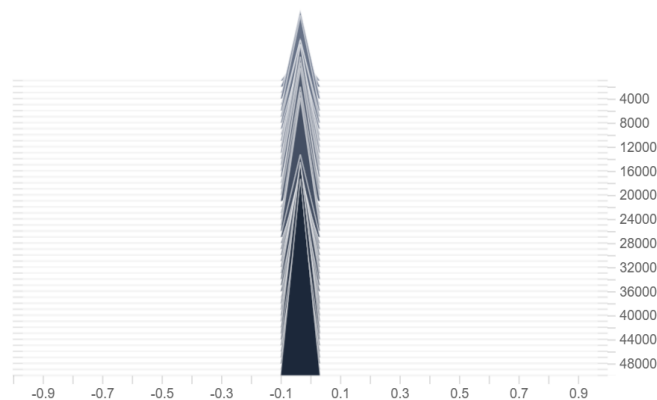
Bagian ini membahas hasil evaluasi kinerja agen setelah proses pelatihan selesai dilakukan. Evaluasi bertujuan untuk menilai efektivitas kebijakan (*policy*) yang dihasilkan dalam menyelesaikan tugas pengelolaan sampah pada lingkungan permainan *Trash Tycoon*.

4.3.1 Kinerja Agen



Gambar 4.22 Grafik Performa Agen

Gambar 4.22 menampilkan kinerja agen selama proses pelatihan yang direpresentasikan melalui perubahan nilai *cumulative reward* terhadap jumlah langkah pelatihan (*training step*). Berdasarkan grafik tersebut, terlihat nilai *reward* cenderung stabil pada rentang tertentu sepanjang proses pelatihan. Stabilitasnya nilai *cumulative reward* menunjukkan agen tidak mengalami perubahan performa yang ekstrem selama proses pembelajaran, perilaku yang dihasilkan relatif konsisten dalam menjalankan tugas yang diberikan. Performa agen telah mampu menunjukkan konsistensi performa dalam menjalankan dan mempertahankan tugas yang diberikan.

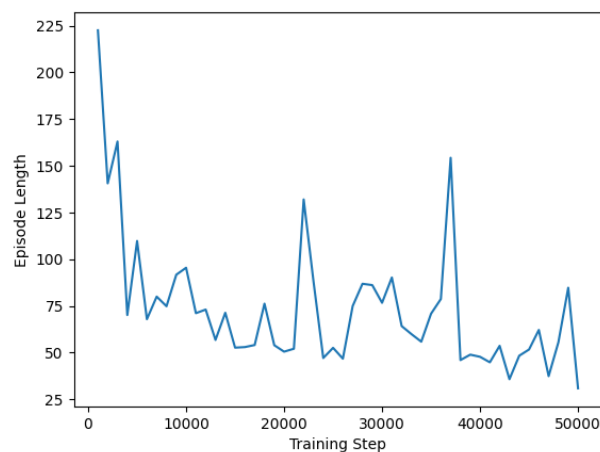


Gambar 4.23 *Reward Cumulative* Agen

Selanjutnya, Gambar 4.23 memperlihatkan distribusi nilai *cumulative reward* yang terkonsentrasi pada rentang nilai tertentu. Pola distribusi yang relatif terpusat ini mengindikasikan agen menghasilkan perilaku yang konsisten selama proses pelatihan. Distribusi *reward* yang tidak menyebar terlalu jauh menunjukkan hasil tindakan agen cenderung stabil dan tidak mengalami fluktuasi besar antar *episode* pelatihan. Konsistensi tersebut mencerminkan model merepresentasikan pola tindakan berdasarkan data demonstrasi yang digunakan dalam proses pembelajaran.

Secara keseluruhan, Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 menunjukkan agen telah mencapai tingkat stabilitas perilaku selama proses pelatihan. Stabilitas *cumulative reward* menjadi salah satu indikator bahwa kebijakan yang dipelajari agen telah menghasilkan pola tindakan yang konsisten. Hasil ini sejalan dengan pendekatan *Behavioral Cloning* yang berfokus pada peniruan pola aksi dari data demonstrasi, sehingga menghasilkan perilaku yang cenderung konsisten dan terarah sesuai dengan contoh yang diberikan.

4.3.2 Efisiensi Episode

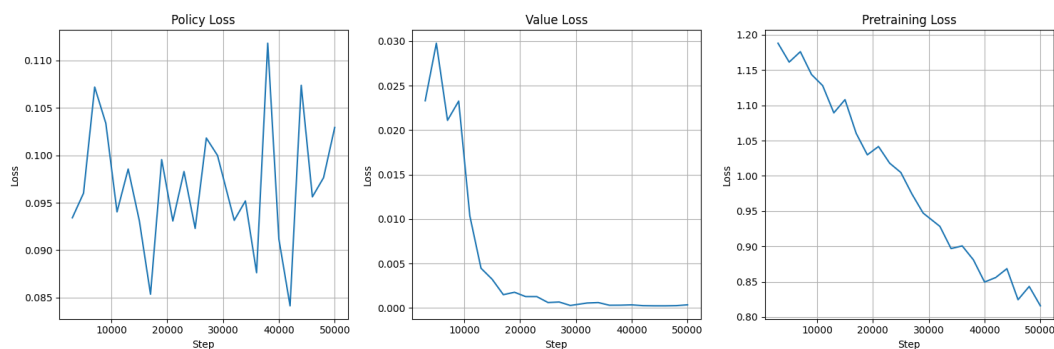


Gambar 4.24 Grafik *Episode Training* Agen

Gambar 4.24 menunjukkan perubahan panjang *episode* (*episode length*) selama proses pelatihan agen. Pada tahap awal pelatihan, terlihat nilai *episode length* relatif tinggi dan masih berfluktuasi. Kondisi ini mencerminkan agen masih berada pada fase awal pembelajaran, di mana proses eksplorasi terhadap lingkungan masih berlangsung.

Seiring bertambahnya jumlah langkah pelatihan, nilai *episode length* cenderung mengalami penurunan dan menjadi lebih stabil. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efisiensi agen dalam menyelesaikan tugas, di mana agen mampu mencapai tujuan dalam jumlah langkah yang lebih sedikit dibandingkan pada tahap awal. Terdapat beberapa lonjakan nilai *episode length* pada titik-titik tertentu. Fluktuasi ini merupakan bagian yang wajar dalam proses pembelajaran, yang menunjukkan agen masih melakukan penyesuaian terhadap kondisi lingkungan atau variasi situasi yang dihadapi. Hasil ini menunjukkan proses pembelajaran berjalan dengan baik dan agen mampu mengoptimalkan performanya seiring dengan bertambahnya pengalaman selama pelatihan.

4.3.3 Stabilitas Mode

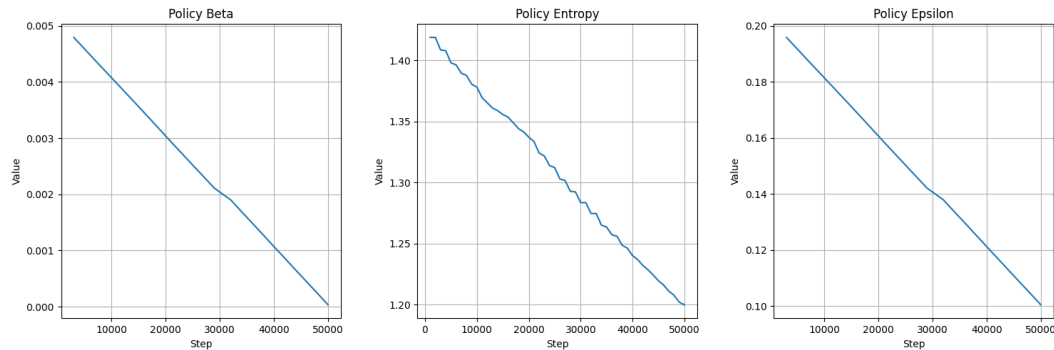


Gambar 4.25 Grafik Policy Loss, Value Loss, Pretraining Loss

Pada Gambar 4.25 diatas ditampilkan grafik stabilitas model yang terdiri dari *policy loss*, *value loss*, dan *pretraining loss* selama proses pelatihan menggunakan pendekatan *imitation learning*. Berdasarkan grafik *policy loss*, terlihat nilai *loss* mengalami fluktuasi pada setiap langkah pelatihan, namun tetap berada dalam rentang yang relatif stabil. Fluktuasi ini menunjukkan proses penyesuaian model dalam meniru perilaku data demonstrasi yang diberikan. Sementara itu, grafik *value loss* menunjukkan penurunan yang cukup signifikan pada tahap awal pelatihan, kemudian cenderung stabil dan mendekati nol pada langkah berikutnya. Hal ini mengindikasikan model telah mampu mempelajari estimasi nilai dengan baik dan mencapai kondisi konvergen.

Selain itu, grafik *pretraining loss* memperlihatkan tren penurunan secara bertahap dari awal hingga akhir pelatihan, yang menunjukkan proses pretraining berjalan dengan efektif dalam membantu model memahami pola awal dari data sebelum pelatihan utama dilakukan. Secara keseluruhan, ketiga grafik tersebut menunjukkan model memiliki tingkat stabilitas yang baik selama proses pelatihan, ditandai dengan penurunan *loss* yang konsisten serta fluktuasi yang masih dalam batas wajar dalam konteks *imitation learning*.

4.3.4 Eksplorasi dan Eksploitasi Agen



Gambar 4.26 Grafik *Policy Beta*, *Policy Entropy* dan *Policy Epsilon*

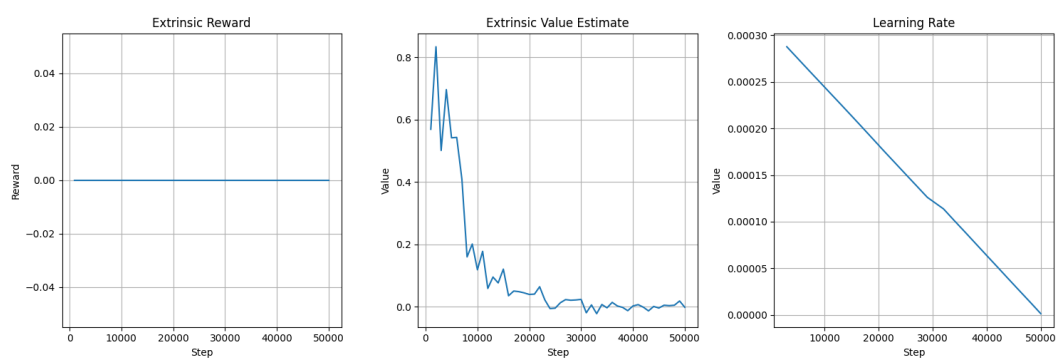
Gambar 4.26 memperlihatkan dinamika tiga parameter utama yang mengatur keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi agen, yaitu *policy beta*, *entropy*, dan *epsilon*, selama proses pelatihan berlangsung. Ketiga parameter ini mengalami perubahan yang cukup selaras seiring bertambahnya *training step*.

Pada grafik pertama, nilai *policy beta* menurun secara bertahap hingga mendekati nol. Penurunan ini menunjukkan kontribusi faktor eksplorasi secara perlahan dikurangi, sehingga agen mulai lebih mengandalkan pola perilaku yang telah dipelajari dari data demonstrasi. Pada grafik *entropy*, yang menunjukkan tren penurunan yang relatif stabil. Berkurangnya nilai *entropy* mengindikasikan variasi aksi agen semakin menyempit, sehingga keputusan yang diambil menjadi lebih terarah dan tidak lagi bersifat acak seperti pada tahap awal pelatihan.

Nilai *epsilon* juga mengalami penurunan linear. Kondisi ini mencerminkan semakin kecilnya ruang perubahan kebijakan pada setiap iterasi, yang berperan dalam menjaga kestabilan model agar tidak mengalami fluktuasi yang berlebihan selama proses pembelajaran. Ketiga parameter tersebut menunjukkan pola yang konsisten, di mana agen secara bertahap beralih dari fase eksploratif menuju fase

yang lebih stabil dan terfokus. Perubahan ini menandakan proses pembelajaran berjalan secara progresif, dengan agen yang semakin mampu memanfaatkan pengetahuan yang telah diperoleh untuk menghasilkan keputusan yang lebih konsisten dalam lingkungan permainan.

4.3.5 Parameter Pembelajaran



Gambar 4.27 Grafik *extrinsic reward*, *extrinsic value estimate* dan *learning rate*

Pada Gambar 4.27 ditampilkan grafik *extrinsic reward*, *extrinsic value estimate*, dan *learning rate* selama proses pelatihan model. Grafik *extrinsic reward* menunjukkan nilai *reward* cenderung konstan pada angka nol sepanjang pelatihan. Kondisi ini menunjukkan dalam pendekatan *imitation learning*, model tidak bergantung pada umpan balik *reward* dari lingkungan, melainkan belajar dengan meniru data demonstrasi yang tersedia.

Grafik *extrinsic value estimate* memperlihatkan penurunan yang cukup tajam pada tahap awal pelatihan, kemudian berangsur stabil mendekati nol. Pola ini menunjukkan model semakin mampu memperkirakan nilai keadaan dengan lebih akurat seiring bertambahnya proses pelatihan. Penurunan yang konsisten juga mencerminkan kesalahan prediksi semakin berkurang.

Grafik *learning rate* menunjukkan adanya penurunan bertahap dari nilai awal hingga mendekati nol pada akhir pelatihan. Penyesuaian ini bertujuan untuk mengontrol proses pembelajaran, di mana model belajar lebih agresif di awal, kemudian menjadi lebih halus agar parameter yang dihasilkan semakin stabil.

Berdasarkan ketiga grafik tersebut, proses pelatihan model dapat dikatakan berjalan dengan baik. Hal ini terlihat dari pola yang stabil, tanpa adanya lonjakan ekstrem, serta kecenderungan menuju kondisi konvergen.

4.4 Skenario Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan agen (NPC) dalam menjalankan tugas pengelolaan sampah berdasarkan model yang telah dilatih menggunakan metode *Behavioral Cloning*. Pengujian ini dirancang dalam beberapa skenario dengan tingkat kompleksitas yang berbeda, mulai dari kondisi sederhana hingga kondisi yang lebih kompleks.

4.4.1 *Single Object – Single Type – Single Target*

Pada skenario ini, pengujian dilakukan pada kondisi lingkungan sederhana, yaitu hanya terdapat satu objek sampah dengan satu jenis serta satu target proses pengolahan. Contoh objek yang digunakan pada pengujian ini adalah sampah anorganik.



Gambar 4.28 Agen *idle* menunggu instruksi pemain

Gambar 4.28 menunjukkan kondisi awal agen berada pada *state idle*, yaitu menunggu instruksi dari pemain untuk mulai menjalankan tugas pengelolaan sampah. Instruksi diberikan ketika pemain mengaktifkan bantuan NPC sesuai mekanisme yang telah disediakan dalam permainan. Setelah instruksi diterima, agen mulai melakukan observasi terhadap lingkungan untuk mendeteksi keberadaan objek sampah yang tersedia. Selanjutnya agen bergerak menuju target dan melakukan proses pengolahan saat terjadi interaksi dengan objek tersebut.



Gambar 4.29 Agen mengolah sampah

Gambar 4.29 menunjukkan agen telah bergerak menuju objek sampah dan melakukan proses pengolahan sampah anorganik. Berdasarkan hasil pengujian

tersebut, agen berhasil menjalankan fungsi dasar pengelolaan sampah dengan baik, khususnya dalam menangani satu objek sampah pada kondisi lingkungan sederhana secara tepat dan konsisten.

4.4.2 *Multiple Object – Single Type – Single Target*

Pada skenario ini, pengujian dilakukan dengan kondisi terdapat beberapa objek sampah dengan jenis yang sama serta satu target proses pengolahan. Contoh yang digunakan adalah beberapa sampah anorganik yang tersebar di lingkungan permainan. Gambar 4.29 menunjukkan proses percobaan pada skenario kedua, yaitu ketika agen mendeteksi beberapa objek sampah anorganik yang tersedia di lingkungan permainan. Agen bergerak menuju setiap objek sampah yang terdeteksi dan langsung melakukan proses pengolahan saat berinteraksi atau menyentuh objek tersebut. Proses ini dilakukan secara berulang hingga seluruh sampah berhasil ditangani.

Setelah seluruh objek sampah habis, agen tidak lagi melakukan pergerakan dan kembali ke posisi awal dalam kondisi *idle* sebagai *state* menunggu. Pada kondisi ini agen tetap siaga untuk mendeteksi kemunculan objek baru. Ketika pemain memunculkan sampah baru melalui sistem permainan, agen secara otomatis mendeteksi objek tersebut dan kembali menjalankan proses pengolahan tanpa perlu diaktifkan ulang oleh pemain.



Gambar 4.30 Proses Percobaan Uji Skenario 2

4.4.3 *Multiple Object – Multiple Type – Multiple Target*

Skenario ini menggunakan kondisi yang lebih bervariasi dibandingkan pengujian sebelumnya, dengan melibatkan tiga objek sampah yang terdiri dari satu sampah anorganik dan dua sampah B3. Masing-masing jenis sampah memiliki proses pengolahan yang berbeda sesuai karakteristiknya.

Gambar 4.31 menunjukkan proses pengujian skenario ketiga ketika agen dihadapkan pada beberapa objek sampah dengan jenis yang berbeda dalam satu lingkungan permainan. Pada kondisi tersebut, agen mampu merespons setiap objek secara tepat sesuai jenis sampah yang terdeteksi. Setiap sampah yang ditemui langsung diproses melalui interaksi tanpa perlu dipindahkan ke lokasi lain.

Perbedaan jenis sampah tidak menimbulkan kesalahan dalam proses pengolahan. Agen tetap mampu menentukan tindakan yang sesuai terhadap masing-masing target sehingga seluruh objek sampah yang tersedia berhasil ditangani hingga selesai. Selain itu, alur pergerakan agen juga berjalan lancar tanpa hambatan selama proses pengujian berlangsung.



Gambar 4.31 Proses Percobaan Uji Skenario 3

4.4.4 *Random Environment Scenario*

Pada skenario ini, lingkungan dibuat lebih dinamis dengan menambahkan objek acak berupa *cube* sebagai gangguan di area permainan. Selain itu, terdapat empat sampah organik yang tersebar di beberapa titik. Gambar 4.32 menunjukkan proses pengujian skenario keempat ketika agen dihadapkan pada lingkungan yang lebih bervariasi dengan keberadaan objek tambahan sebagai penghalang.

Selama pengujian, agen (NPC) tetap dapat bergerak menuju objek sampah yang berada di antara objek-objek tersebut. Interaksi dengan objek *cube* tidak mengganggu proses utama dalam menangani sampah. Keempat sampah organik yang tersedia berhasil diproses seluruhnya melalui interaksi langsung. Pergerakan agen tetap terarah dan tidak mengalami hambatan yang berarti meskipun kondisi lingkungan dibuat lebih dinamis. Hasil ini memperlihatkan agen tetap mampu menjalankan tugasnya dengan baik pada kondisi yang tidak sepenuhnya terstruktur.



Gambar 4.32 Proses Uji Skenario 4

4.5 Pengujian *System Usability Scale*

Pengujian *usability* pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS). Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi tingkat kenyamanan dan kepuasan pengguna dalam berinteraksi dengan *game Trash Tycoon*, khususnya pada fitur *Non-Player Character* (NPC) yang berperan dalam membantu proses pengelolaan sampah.

Selain itu, pengujian ini juga bertujuan untuk menilai pengalaman pengguna dari berbagai aspek, seperti kemudahan penggunaan, kejelasan interaksi dengan NPC, serta efektivitas peran NPC dalam mendukung jalannya permainan. Melalui pengumpulan data dari responden, pengujian ini diharapkan dapat mengidentifikasi bagian sistem yang telah berjalan dengan baik, serta aspek yang masih perlu ditingkatkan untuk meningkatkan kualitas pengalaman pengguna.

Daftar pernyataan kuesioner yang digunakan dalam pengujian SUS disajikan pada Tabel 4.2, yang terdiri dari 10 butir pertanyaan dengan kombinasi pernyataan positif dan negatif.

Tabel 4.2 Daftar pernyataan kuesioner *System Usability Scale* (SUS)

No	Pernyataan
1	Saya merasa NPC dalam <i>game Trash Tycoon</i> mudah dipahami dan digunakan.
2	Saya merasa interaksi dengan NPC terasa rumit atau membingungkan.
3	Saya merasa NPC membantu saya dalam memilah sampah sesuai kategori.
4	Saya merasa NPC sering memberikan informasi yang tidak relevan.
5	Saya merasa puas dengan peran NPC dalam mendukung <i>gameplay</i> .
6	Saya merasa NPC kadang membuat permainan lebih sulit daripada seharusnya.
7	Saya merasa NPC memberikan panduan yang adil dan sesuai konteks permainan.
8	Saya merasa NPC tidak konsisten dalam tindakannya selama permainan.
9	Saya merasa NPC meningkatkan pengalaman bermain saya.
10	Saya merasa penggunaan NPC dalam game ini membutuhkan usaha terlalu besar untuk dipahami.

Selanjutnya, skala penilaian yang digunakan dalam kuesioner SUS ditampilkan pada Tabel 4.3, yang menggunakan skala Likert dengan rentang nilai 1 hingga 5, mulai dari *Sangat Tidak Setuju* hingga *Sangat Setuju*.

Tabel 4. 3 Skala penilaian *System Usability Scale* (SUS)

No.	Jawaban	Nilai
1	Sangat Tidak Setuju	1
2	Tidak Setuju	2
3	Netral	3
4	Setuju	4
5	Sangat Setuju	5

Untuk menilai tingkat kemudahan penggunaan dan kenyamanan pengguna dalam memainkan *game Trash Tycoon*, dilakukan pengujian menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS). Pengujian ini melibatkan sebanyak 20 responden yang diminta untuk mencoba permainan terlebih dahulu sebelum mengisi kuesioner. Fokus utama dalam pengujian ini adalah menilai aspek *usability*, khususnya pada interaksi pemain dengan fitur *Non-Player Character* (NPC) yang berfungsi membantu pemain dalam proses pengelolaan sampah di dalam game.

Setelah seluruh skor dari masing-masing pernyataan diperoleh, nilai tersebut dijumlahkan untuk setiap responden. Hasil penjumlahan kemudian dikalikan dengan 2,5 sehingga menghasilkan skor akhir SUS dengan rentang nilai

0 hingga 100. Nilai akhir yang diperoleh selanjutnya digunakan untuk menentukan tingkat penerimaan dan kualitas *usability* dari *game Trash Tycoon*. Hasil pengolahan data tersebut akan disajikan dalam bentuk tabel untuk menunjukkan skor masing-masing responden terhadap seluruh item pertanyaan yang diberikan.

Hasil pengisian kuesioner oleh responden berupa skor mentah untuk setiap butir pertanyaan dapat dilihat pada Tabel 4.4. Data tersebut menunjukkan variasi jawaban responden terhadap masing-masing pernyataan yang diberikan

Tabel 4.4 Skor SUS Asli Responden

Responden	Skor Asli Responden									
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
R1	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R2	5	1	5	2	5	1	5	2	5	1
R3	4	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R4	4	3	5	2	4	2	5	2	5	2
R5	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1
R6	5	2	5	1	5	2	5	2	5	1
R7	5	2	4	2	5	2	5	2	5	2
R8	4	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R9	5	1	5	2	5	1	5	2	5	1
R10	4	3	4	2	5	2	4	2	5	2
R11	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R12	5	1	5	2	5	1	5	2	5	1
R13	4	2	4	2	5	2	5	2	5	2
R14	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R15	5	1	5	2	5	1	5	2	5	1
R16	4	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R17	5	1	5	1	5	1	5	2	5	1
R18	4	3	4	2	4	2	5	2	5	2
R19	5	2	5	2	5	2	5	2	5	2
R20	5	1	5	2	5	1	5	2	5	1

Proses pengolahan data dilakukan dengan melakukan konversi skor terlebih dahulu. Untuk pernyataan bernomor ganjil (Q1, Q3, Q5, Q7, dan Q9), skor dihitung dengan mengurangi nilai jawaban responden dengan 1 ($\text{Skor} = \text{Jawaban} - 1$). Sementara itu, untuk pernyataan bernomor genap (Q2, Q4, Q6, Q8, dan Q10), skor dihitung dengan mengurangkan nilai jawaban dari 5 ($\text{Skor} = 5 - \text{Jawaban}$). Proses konversi ini bertujuan untuk menyelaraskan arah penilaian, sehingga seluruh skor berada dalam satu orientasi yang sama, yaitu semakin tinggi skor menunjukkan tingkat *usability* yang semakin baik.

Tabel 4.5 Skor Perhitungan SUS Responden

Responden	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10
R1	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R2	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4
R3	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R4	3	2	4	3	3	3	4	3	4	3
R5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
R6	4	3	4	4	4	3	4	3	4	4
R7	4	3	3	3	4	3	4	3	4	3
R8	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R9	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4
R10	3	2	3	3	4	3	3	3	4	3
R11	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R12	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4
R13	3	3	3	3	4	3	4	3	4	3
R14	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R15	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4
R16	3	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R17	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4
R18	3	2	3	3	3	3	4	3	4	3
R19	4	3	4	3	4	3	4	3	4	3
R20	4	4	4	3	4	4	4	3	4	4

Hasil konversi skor SUS dari masing-masing responden disajikan pada Tabel 4.5, yang menunjukkan nilai yang telah diseragamkan dalam satu orientasi

penilaian, di mana semakin tinggi skor menunjukkan tingkat *usability* yang semakin baik.

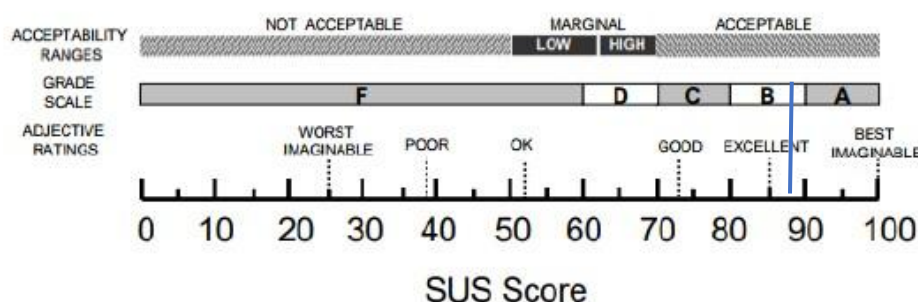
Berdasarkan hasil konversi skor kuesioner SUS, dilakukan proses penjumlahan skor untuk masing-masing responden. Nilai tersebut kemudian dikalikan dengan faktor 2,5 guna memperoleh skor akhir SUS dengan rentang 0 hingga 100. Hasil perhitungan skor akhir SUS untuk setiap responden ditampilkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan SUS

No	Responden	Jumlah	Nilai (Jumlah x 2,5)
1	R1	35	87.5
2	R2	38	95
3	R3	34	85
4	R4	32	80
5	R5	40	100
6	R6	37	92.5
7	R7	34	85
8	R8	34	85
9	R9	38	95
10	R10	31	77.5
11	R11	35	87.5
12	R12	38	95
13	R13	33	82.5
14	R14	35	87.5
15	R15	38	95
16	R16	34	85
17	R17	39	97.5
18	R18	30	77.5
19	R19	35	87.5
20	R20	38	95
Total Skor			1765
Skor Rata – rata (Hasil Akhir)			88.25

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 4.6, diperoleh total skor sebesar 1765 dengan nilai rata-rata *System Usability Scale* (SUS) sebesar 88,25. Mengacu

pada standar interpretasi SUS, nilai sebesar 88,25 termasuk dalam kategori *Excellent* dengan *grade B*, yang menunjukkan sistem memiliki tingkat *usability* yang sangat baik. Selain itu, nilai tersebut juga berada pada kategori *acceptable*, yang berarti sistem dapat diterima dengan sangat baik oleh pengguna tanpa memerlukan perbaikan signifikan.



Gambar 4.33 Grafik Hasil Skor SUS

Visualisasi hasil perhitungan skor SUS ditunjukkan pada Gambar 4.33, yang memperlihatkan distribusi nilai dari masing-masing responden secara grafis. Hasil ini menunjukkan *game Trash Tycoon* yang dikembangkan telah mampu memberikan pengalaman pengguna yang baik, khususnya dalam aspek interaksi dengan fitur *Non-Player Character* (NPC). NPC yang dirancang sebagai pendukung dalam proses pengelolaan sampah dinilai telah membantu pengguna dalam memahami alur permainan serta meningkatkan kemudahan dalam menyelesaikan tugas yang diberikan.

Tingginya nilai SUS juga mengindikasikan pengguna tidak mengalami kesulitan yang berarti dalam menggunakan sistem, baik dari segi navigasi, kejelasan fitur, maupun respons sistem. Hal ini menunjukkan implementasi

mekanisme dalam game telah berjalan dengan baik sesuai dengan kebutuhan pengguna.

4.6 Integrasi Sains dan Islam dalam Perspektif Muamalah

Integrasi antara sains dan nilai-nilai Islam merupakan pendekatan yang menekankan aspek rasional, tetapi juga dimensi spiritual dalam memahami realitas. Dalam Islam, ilmu pengetahuan dipandang sebagai sarana untuk membaca tanda-tanda kekuasaan Allah Swt. (ayat kauniyah) yang tersebar di alam semesta. Oleh karena itu, pengembangan teknologi dan inovasi tidak dapat dilepaskan dari nilai-nilai ketauhidan serta tanggung jawab manusia sebagai khalifah di bumi.

Dalam penelitian ini, integrasi tersebut diimplementasikan melalui pengembangan *game* edukasi *Trash Tycoon* yang mengangkat tema pengelolaan sampah. Nilai-nilai Islam diinternalisasikan melalui tiga aspek muamalah, yaitu muamalah ma'a Allah Swt., muamalah ma'a an-nas, dan muamalah ma'a al-alam. Ketiga aspek ini menjadi landasan dalam membentuk kesadaran pemain aktivitas menjaga lingkungan bersifat teknis, tetapi juga memiliki dimensi ibadah, sosial, dan ekologis.

4.6.1 Muamalah Ma'a Allah Swt. (Hubungan Manusia dengan Allah)

Muamalah ma'a Allah Swt. merupakan hubungan vertikal antara manusia dengan Sang Pencipta yang tercermin dalam ibadah ritual, tetapi juga dalam ketaatan terhadap seluruh ketentuan-Nya, termasuk dalam menjaga kelestarian lingkungan.

Allah Swt. berfirman dalam Al-Qur'an:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ ﴿٤١﴾

“Telah nampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan karena perbuatan tangan manusia, supaya Allah merasakan kepada mereka sebagian dari akibat perbuatan mereka, agar mereka kembali (ke jalan yang benar).” (Q.S Ar-Rum: 41).

Menurut tafsir Wahbah Az-Zuhaili dalam *Tafsir Al-Wajiz*, ayat ini menjelaskan kerusakan yang terjadi di bumi, seperti pencemaran, bencana alam, dan ketidakseimbangan ekosistem, merupakan akibat dari perbuatan manusia yang menyimpang dari ketentuan Allah. Kerusakan tersebut menjadi bentuk peringatan agar manusia kembali kepada jalan yang benar dan memperbaiki perilakunya.

Selain itu, dalam Tafsir Jalalain dijelaskan larangan membuat kerusakan di bumi merupakan bentuk perintah untuk menjaga keseimbangan ciptaan Allah. Hal ini menunjukkan menjaga lingkungan merupakan bagian dari ketaatan kepada Allah Swt.

Rasulullah Saw. juga bersabda:

الطَّهْرُ شَطْرُ الْإِيمَانِ

“Kebersihan adalah sebagian dari iman.” (HR. Muslim)

Hadis ini menegaskan menjaga kebersihan, termasuk kebersihan lingkungan, merupakan manifestasi dari keimanan. Dengan demikian, aktivitas menjaga lingkungan bernilai sosial, tetapi juga bernilai ibadah. Pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi harus diarahkan sebagai bentuk pengabdian kepada Allah Swt. Setiap upaya menjaga lingkungan, mengurangi kerusakan, dan memanfaatkan sumber daya secara bijak merupakan wujud nyata dari muamalah ma’a Allah Swt.

Pada *game* edukatif *Trash Tycoon*, nilai ini diimplementasikan melalui mekanisme permainan yang menuntut pemain untuk mengelola sampah secara bertanggung jawab. Setiap tindakan pemain dalam memilah, mendaur ulang, dan mengelola limbah diposisikan sebagai strategi permainan, tetapi juga sebagai representasi dari sikap taat terhadap perintah Allah untuk tidak membuat kerusakan di bumi. *Game* ini membangun kesadaran menjaga lingkungan bukan sekadar aktivitas teknis, melainkan bagian dari penghambaan kepada Allah Swt.

4.6.2 Muamalah Ma'a An-Nas (Hubungan Manusia dengan Sesama Manusia)

Muamalah ma'a an-nas merupakan hubungan horizontal antar manusia yang menekankan pada nilai keadilan, tanggung jawab sosial, dan kemaslahatan bersama. Dalam Islam, setiap tindakan individu berdampak pada diri sendiri, tetapi juga pada masyarakat luas.

Allah Swt. berfirman:

وَالْإِلَىٰ مَدْيَنَ أَخَاهُمْ شُعَيْبًا قَالَ يٰقَوْمِ اعْبُدُوا اللَّهَ مَا لَكُمْ مِن إِلَهٍ غَيْرُهُ ۚ قَدْ جَاءَتْكُم بَيِّنَةٌ مِّن رَّبِّكُمْ فَأَوْفُوا الْكَيْلَ
وَالْمِيزَانَ وَلَا تَبْخَسُوا النَّاسَ أَشْيَاءَهُمْ وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا ذَلِكُمْ خَيْرٌ لَّكُمْ إِن كُنتُمْ
مُؤْمِنِينَ ﴿٨٥﴾

“...dan janganlah kamu membuat kerusakan di muka bumi setelah (Allah) memperbaikinya...” (Q.S Al-A'raf: 85)

Menurut Tafsir Jalalain, ayat ini mengandung larangan keras terhadap segala bentuk tindakan yang merugikan orang lain, termasuk perbuatan yang menyebabkan kerusakan lingkungan. Kerusakan tersebut berdampak pada alam, tetapi juga pada kesejahteraan sosial masyarakat.

Rasulullah Saw. bersabda:

أَنَّ رَسُولَ اللَّهِ ﷺ قَضَى أَنْ لَا ضَرَرَ وَلَا ضِرَارَ

“Tidak boleh membahayakan diri sendiri dan tidak boleh membahayakan orang lain.” (HR. Ibnu Majah)

Hadis ini menjadi prinsip dasar dalam interaksi sosial, setiap individu wajib menghindari tindakan yang dapat merugikan orang lain. Perilaku seperti pencemaran, pembuangan limbah sembarangan, dan eksploitasi berlebihan merupakan bentuk pelanggaran terhadap prinsip tersebut.

Menurut Abdurrahman As-Sa'di dalam tafsirnya, manusia diperintahkan untuk menjaga keseimbangan dan tidak berlaku zalim, baik terhadap diri sendiri maupun orang lain. Hal ini mencerminkan pentingnya tanggung jawab sosial dalam menjaga lingkungan.

Dengan demikian, dalam penelitian ini, setiap penerapan ilmu pengetahuan harus mempertimbangkan dampak sosialnya. Upaya menjaga lingkungan merupakan bentuk keadilan sosial dan kontribusi terhadap kesejahteraan masyarakat.

4.6.3 Muamalah Ma'a Al-Alam (Hubungan Manusia dengan Alam)

Muamalah ma'a al-alam merupakan hubungan manusia dengan alam sebagai ciptaan Allah Swt. Alam semesta diciptakan dengan tujuan dan hikmah tertentu, sehingga manusia memiliki tanggung jawab untuk menjaganya.

Allah Swt. berfirman:

وَمَا خَلَقْنَا السَّمَاءَ وَالْأَرْضَ وَمَا بَيْنَهُمَا بَاطِلًا ذَلِكَ ظَنُّ الَّذِينَ كَفَرُوا فَوَيْلٌ لِلَّذِينَ كَفَرُوا مِنَ النَّارِ ﴿٢٧﴾

“Dan Kami tidak menciptakan langit dan bumi dan apa yang ada antara keduanya dengan sia-sia...” (Q.S Shad: 27)

Menurut Tafsir Jalalain, ayat ini menegaskan seluruh ciptaan Allah memiliki tujuan dan manfaat. Menganggap alam sebagai sesuatu yang tidak bernilai atau merusaknya merupakan bentuk kesalahan dalam memahami hakikat penciptaan.

Selain itu, Allah Swt. juga berfirman:

أَلَمْ تَرَ أَنَّ اللَّهَ سَخَّرَ لَكُم مَّا فِي السَّمُوتِ وَمَا فِي الْأَرْضِ وَأَسْبَغَ عَلَيْكُمْ نِعَمَهُ ظَاهِرَةً وَبَاطِنَةً وَمِنَ النَّاسِ مَن يُجَادِلُ فِي اللَّهِ بِغَيْرِ عِلْمٍ وَلَا هُدًى وَلَا كِتَابٍ مُّنِيرٍ ﴿٢٠﴾

“Tidakkah kamu memperhatikan sesungguhnya Allah telah menundukkan apa yang ada di langit dan apa yang ada di bumi untukmu...” (Q.S Luqman: 20)

Dalam tafsir Abdurrahman As-Sa'di dijelaskan segala sumber daya alam yang ada merupakan nikmat dari Allah yang harus dimanfaatkan secara bijak, bukan dieksploitasi secara berlebihan.

Rasulullah Saw. juga bersabda:

إِن قَامَتِ السَّاعَةُ وَيَدُّ أَحَدِكُمْ فَسِيلَةً، فَإِنْ اسْتَطَاعَ أَنْ لَا يَقُومَ حَتَّى يَغْرِسَهَا فَلْيَفْعَلْ.

“Jika kiamat akan terjadi sementara di tangan salah seorang di antara kalian ada benih tanaman, maka jika ia mampu menanamnya sebelum kiamat terjadi, maka tanamlah.” (HR. Ahmad)

Hadis ini menunjukkan pentingnya menjaga dan melestarikan alam bahkan dalam kondisi yang paling genting sekalipun. Hubungan manusia dengan alam harus didasarkan pada prinsip keberlanjutan (*sustainability*). Pemanfaatan teknologi dan ilmu pengetahuan harus diarahkan untuk menjaga keseimbangan

ekosistem, mengurangi kerusakan lingkungan, serta memastikan keberlangsungan kehidupan bagi generasi mendatang.

Pada *game Trash Tycoon*, ayat-ayat tersebut menjadi landasan dalam membangun pemahaman pengelolaan lingkungan merupakan bagian dari tanggung jawab manusia sebagai khalifah. Pemain dihadapkan pada berbagai situasi yang mengharuskan mereka mengambil keputusan terkait pengelolaan sampah, daur ulang, dan pemanfaatan sumber daya.

Melalui pengalaman bermain tersebut, ditanamkan kesadaran alam bukan sekadar objek eksploitasi, melainkan amanah yang harus dijaga keberlanjutannya. Dengan demikian, *game* ini berfungsi sebagai sarana edukasi yang menginternalisasikan nilai-nilai Islam dalam menjaga keseimbangan ekosistem.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai implementasi *Non-Player Character* (NPC) adaptif berbasis *Imitation Learning* dengan pendekatan *Behavioral Cloning* pada game *Trash Tycoon*, dapat disimpulkan metode yang digunakan berhasil diterapkan dengan baik dalam sistem permainan. Implementasi dilakukan dengan memanfaatkan data demonstrasi pemain berupa pasangan kondisi–aksi (*state–action pair*) yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam proses pelatihan model. Model yang dihasilkan mampu diintegrasikan ke dalam NPC dan dijalankan dalam mode *inference*, sehingga NPC dapat meniru perilaku pemain sesuai dengan kondisi yang dihadapi dalam permainan.

Hasil pengujian kinerja agen menunjukkan NPC mampu menampilkan perilaku yang konsisten selama proses pelatihan hingga 50.000 langkah pelatihan. Nilai *cumulative reward* berada pada kondisi stabil, yaitu cenderung berada di sekitar nilai 0, karena proses pembelajaran difokuskan pada peniruan data demonstrasi melalui pendekatan *Behavioral Cloning* tanpa menggunakan *reward signal* eksternal. Selain itu, efisiensi agen juga mengalami peningkatan yang ditunjukkan melalui penurunan nilai *episode length*, dari nilai awal sekitar 225 langkah menjadi berada pada kisaran sekitar 35–60 langkah pada akhir pelatihan. Hasil tersebut menunjukkan NPC mampu menyelesaikan tugas pengelolaan sampah dengan langkah yang lebih sedikit dan perilaku yang lebih terarah seiring bertambahnya proses pelatihan.

Dari sisi evaluasi pengguna, hasil pengujian menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) menunjukkan nilai rata-rata sebesar 88,25 yang termasuk dalam kategori *Excellent* dan berada pada tingkat *acceptable*. Hasil ini menunjukkan sistem memiliki tingkat *usability* yang sangat baik serta dapat diterima oleh pengguna tanpa memerlukan perbaikan yang signifikan. Keberadaan NPC dalam *game Trash Tycoon* juga terbukti mampu meningkatkan pengalaman pengguna, khususnya dalam membantu pemain memahami mekanisme pengelolaan sampah serta mendukung jalannya permainan secara lebih interaktif dan terarah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan selanjutnya. Penggunaan metode *Behavioral Cloning* dalam penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya bergantung pada data demonstrasi pemain, sehingga pada penelitian berikutnya dapat dikembangkan dengan mengombinasikan metode lain seperti *Reinforcement Learning* agar NPC dapat belajar secara lebih adaptif terhadap kondisi baru. Selain itu, jumlah dan variasi data demonstrasi juga dapat ditingkatkan untuk menghasilkan model yang memiliki kemampuan generalisasi yang lebih baik.

Pengembangan lebih lanjut juga dapat dilakukan pada fitur NPC, seperti penambahan kemampuan interaksi yang lebih kompleks atau sistem rekomendasi yang lebih adaptif untuk meningkatkan pengalaman pengguna. Dari sisi evaluasi, penelitian selanjutnya disarankan melibatkan jumlah responden yang lebih banyak

dengan latar belakang yang lebih beragam agar hasil pengujian *usability* menjadi lebih representatif. Selain itu, pengembangan game dapat ditingkatkan dari aspek visual, mekanisme permainan, serta kompleksitas tantangan agar mampu memberikan pengalaman bermain yang lebih menarik sekaligus tetap mempertahankan nilai edukatif yang menjadi tujuan utama dari penelitian ini. Pengembangan selanjutnya juga disarankan menambahkan komponen *Ray Perception Sensor* pada NPC agar agen dapat mengenali objek sampah dan lingkungan sekitar dengan lebih cepat, akurat, serta responsif selama permainan berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Agrati, L. S. (2023). Tutoring in the metaverse. Study on student-teachers' and tutors' perceptions about NPC tutor. *Frontiers in Education*, 8. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1202442>
- Alotaibi, M. S. (2024). Game-based learning in early childhood education: a systematic review and meta-analysis. In *Frontiers in Psychology* (Vol. 15). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1307881>
- Al-Qarni, A. (2016). *At-Tafsir Al-Muyassar*. Darul Haq.
- Asadiyah, E., Aisyi, N. M., & Mawardi, I. M. (2023). Edukasi Dini Pengelolaan Sampah Pada Siswa Sekolah Dasar Sebagai Upaya Penanggulangan Sampah di Dusun Ubalan. *Jurnal Fajar : Media Komunikasi Dan Informasi Pengabdian Kepada Masyarakat*, 23(5), 39–52.
- Atmodjo, D. W., Herdiansah, A., Nanda, I., Jl Perbanas, J., Kuningan, K., Setiabudi, K., Jakarta Selatan, K., Jakarta, D., Studi Pendidikan Agama Islam, P., YPI Payakumbuh Jl Jend Sudirman, S., Gadang, B., Payakumbuh Utara, K., Payakumbuh, K., & Barat, S. (2024). Reputasi: Jurnal Rekayasa Perangkat Lunak Pengembangan Game Edukasi Interaktif Pengenalan dan Pengelolaan Sampah Menggunakan Pendekatan Multimedia Development Life Cycle. *Reputasi: Jurnal Rekayasa Perangkat Lunak*, Volume 5(2), 111–120. <http://jurnal.bsi.ac.id/index.php/reputasi>
- Bontchev, B., Naydenov, I., & Adamov, I. (2024). Intelligent Adaptation of Difficulty and NPC Behavior in Serious Video Games for Learning. *IFAC-PapersOnLine*, 58(3), 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.148>
- Borovikov, I., Harder, J., Sadovsky, M., & Beirami, A. (2020). *Towards Interactive Training of Non-Player Characters in Video Games*. <http://arxiv.org/abs/1906.00535>
- Brooke, J. (1996). *SUS-a quick and dirty usability scale*. <https://www.researchgate.net/publication/319394819>
- Chen, J., He, M., Chen, J., & Zhang, C. (2024). Exploring the role and mechanisms of environmental serious games in promoting pro-environmental decision-making: a focused literature review and future research agenda. In *Frontiers in Psychology* (Vol. 15). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1455005>
- Choi, T., Cho, K., & Sung, Y. (2023). Approaches That Use Domain-Specific Expertise: Behavioral-Cloning-Based Advantage Actor-Critic in Basketball Games. *Mathematics*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/math11051110>
- Cohen, M. K., Hutter, M., & Nanda, N. (2022a). Fully General Online Imitation Learning. *Journal of Machine Learning Research*, 23, 1–30. <http://arxiv.org/abs/2102.08686>

- Cohen, M. K., Hutter, M., & Nanda, N. (2022b). Fully General Online Imitation Learning. In *Journal of Machine Learning Research* (Vol. 23). <http://jmlr.org/papers/v23/21-0618.html>.
- Cole, C., Parada, R. H., & Mackenzie, E. (2024). Why and How to Define Educational Video Games? *Games and Culture*, 19(8), 981–999. <https://doi.org/10.1177/15554120231183495>
- Deslanda Putra Mukti, D., Kaisar, M., Dian Lestari, N., Salma, S., & Analia Dwina Putri, S. (2023). Sosialisasi Pengolahan Sampah Organik dan Anorganik Menjadi Produk Kreatif. *Sosialisasi Pengolahan Sampah*, 1(11). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10382942>
- Evananda, A., Purwanto, G., & Windriyani, P. (2022). Pembuatan Gim Edukasi “PilahPilih” untuk Pemilahan Sampah Organik, Anorganik, dan B3 Berbasis Android. *KALBISIANA : Jurnal Mahasiswa Institut Teknologi Dan Bisnis Kalbis*, 8(2), 1966–1977.
- Gallotta, R., Todd, G., Zammit, M., Earle, S., Liapis, A., Togelius, J., & Yannakakis, G. N. (2024). *Large Language Models and Games: A Survey and Roadmap*. <https://doi.org/10.1109/TG.2024.3461510>
- Gharbi, H., Lotfi Elaachak, M. R., & Abdelhadi Fennan, M. R. (2024). Replicating Video Game Players’ Behavior Through Deep Reinforcement Learning Algorithms. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 15(15). www.jatit.org
- Gstöttenbauer, O., Dormann, C., & Wallner, G. (2024, May 21). HKViz: Map-Based Analytics for Hollow Knight. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/3649921.3656973>
- Gui, Y., Cai, Z., Yang, Y., Kong, L., Fan, X., & Tai, R. H. (2023). Effectiveness of digital educational game and game design in STEM learning: a meta-analytic review. *International Journal of STEM Education*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00424-9>
- Kanervisto, A., Pussinen, J., & Hautamäki, V. (2020). *Benchmarking End-to-End Behavioural Cloning on Video Games*. <http://arxiv.org/abs/2004.00981>
- Kumbharkar, H. (2025). *Emergent Minds: The Evolution and Future of AI in Video Game NPCs Figure 1: Timeline of Key AI Innovations in Video Game NPCs*. <https://doi.org/https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i03.42387>
- Lapeyrade, S. (2022). *Reasoning with Ontologies for Non-player Character’s Decision-Making in Games*. <https://github.com/SWI-Prolog/packages-cpp>
- Li, Y., Chen, D., & Deng, X. (2024). The impact of digital educational games on student’s motivation for learning: The mediating effect of learning engagement and the moderating effect of the digital environment. *PLoS ONE*, 19(1 January). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0294350>

- Maharani, F., & Kurniawan, R. (2025). Kajian Literatur Edukasi Pengelolaan Sampah Menggunakan Video Game dengan Genre RPG. *Journal Of Social Science Research*, 5(4), 5530–5541.
- Muenz, T. S., Schaal, S., Groß, J., & Paul, J. (2023). How a Digital Educational Game can Promote Learning about Sustainability. *Science Education International*, 34(4), 293–302. <https://doi.org/10.33828/SEI.V34.I4.5>
- Paduraru, C., Cernat, M., & Stefanescu, A. (2024). *Enhancing User Experience in Games with Large Language Models*. 293–304. <https://doi.org/10.5220/0012854600003753>
- Prabhu, Dr. S. M. (2022). Environmental pollution analysis in developing countries. *International Journal of Statistics and Applied Mathematics*, 7(6), 134–138. <https://doi.org/10.22271/math.2022.v7.i6b.908>
- Purnami, W. (2021). Pengelolaan Sampah di Lingkungan Sekolah untuk Meningkatkan Kesadaran Ekologi Siswa. *INKUIRI: Jurnal Pendidikan IPA*, 9(2), 119. <https://doi.org/10.20961/inkuiri.v9i2.50083>
- Purnaningtyas, A., Harsono, Fuadi, D., & Muhibbin, A. (2023). The Waste Sorting Education Media: An Innovation with Android-based Game. *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Pendidikan*, 7(3), 381–389. <https://doi.org/10.23887/jppp.v7i3.67226>
- Satria, E., Fitriani, L., Muhsin, Y. S., & Tresnawati, D. (2021). Development of educational games for learning waste management. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(3), 032064. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/3/032064>
- Sidji, M., Smith, W., & Rogerson, M. J. (2024). Human-AI Collaboration in Cooperative Games: A Study of Playing Codenames with an LLM Assistant. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 8(CHI PLAY). <https://doi.org/10.1145/3677081>
- Silacci, A., Cherubini, M., & Caon, M. (2025). Navigating the design of simulated exercising peers: insights from a participatory design study. *Frontiers in Digital Health*, 7. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2025.1551966>
- Wurman, P. R., Barrett, S., Kawamoto, K., MacGlashan, J., Subramanian, K., Walsh, T. J., Capobianco, R., Devlic, A., Eckert, F., Fuchs, F., Gilpin, L., Khandelwal, P., Kompella, V., Lin, H. C., MacAlpine, P., Oller, D., Seno, T., Sherstan, C., Thomure, M. D., ... Kitano, H. (2022). Outracing champion Gran Turismo drivers with deep reinforcement learning. *Nature*, 602(7896), 223–228. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04357-7>
- Yin, C. (2024). NPCs in video games: a reflective resource for sports coaches and participant engagement. *Frontiers in Sports and Active Living*, 6. <https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1403829>