SIMULASI PERTUMBUHAN TANAMAN MELON BERBASIS *VIRTUAL REALITY*

SKRIPSI

OLEH :
MUHAMMAD ABYAN MAKARIM
NIM. 22060510094

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

MOTTO

... Action Speak Louder Than Words ...

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillahi rabbil 'alamin, segala puji bagi Allah ﷻ. atas limpahan rahmat, nikmat, kesehatan, serta karunia-Nya yang tiada henti. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad saw., beserta keluarga, sahabat, dan seluruh umatnya. Atas izin, pertolongan, serta ridha Allah ﷻ, penulis diberikan kekuatan, kesabaran, dan kemudahan sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Dengan penuh rasa syukur, karya sederhana ini penulis persembahkan teruntuk Ayah dan Ibu tercinta sebagai wujud bakti, cinta, kasih sayang, dan rasa terima kasih yang mendalam atas segala doa yang tak pernah putus, pengorbanan, dukungan, serta motivasi yang luar biasa. Setiap ketulusan dan perjuangan yang telah diberikan menjadi sumber kekuatan utama bagi penulis untuk terus melangkah hingga mencapai tahap ini.

Persembahan ini juga penulis tujukan dengan penuh kasih sayang kepada keempat saudara penulis; kakak pertama laki-laki, kakak kedua perempuan, kakak ketiga perempuan, dan adik laki-laki tercinta. Terima kasih atas segala kehangatan, doa, perhatian, dan semangat yang selalu diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan. Rasa terima kasih yang sama juga penulis haturkan kepada seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi berharga bagi penulis.

Kepada para sahabat dan teman-teman seperjuangan, khususnya keluarga besar "kontrakan penghuni surga", terima kasih atas segala kebersamaan, tawa, bantuan, dan semangat yang telah dibagikan selama ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh responden pengisi kuesioner yang telah bersedia meluangkan waktunya, serta seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Segala bentuk kontribusi, doa, dan dukungan yang diberikan menjadi bagian penting dalam perjalanan penulis hingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillāhirabbil ‘ālamīn, segala puji bagi Allah *Subḥānahu wa Ta‘ālā*. yang telah melimpahkan rahmat, taufik, hidayah, serta karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *“Visualisasi & Simulasi Pertumbuhan Tanaman Melon Berbasis Virtual Reality”* dengan baik. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurah kepada junjungan kita Nabi Muhammad *Shollallohu ‘Alaihi Wasallam*, beserta keluarga, sahabat, dan seluruh pengikutnya hingga akhir zaman. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer pada Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nurdiana, M.Si., CAHRM., CRMP., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Dr. Agus Mulyono, M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Bapak Dr. Ir. Supriyono, S.Kom., M.Kom., selaku Ketua Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

4. Bapak Ahmad Fahmi Karami, M.Kom., selaku dosen pembimbing I, Ibu Hani Nurhayati, M.T., selaku pengganti dosen pembimbing I dan Bapak Dr. M. Imamudin Lc, MA., selaku dosen pembimbing II, yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, serta motivasi kepada penulis selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas waktu, kesabaran, dan perhatian yang telah diberikan sehingga penelitian dan penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.
5. Bapak Dr. Ir. Yunifa Miftachul Arif, S.ST., M.T., SMIEEE., selaku dosen penguji I dan Bapak Shoffin Nahwa Utama, M.T., selaku dosen penguji II, yang telah memberikan evaluasi, saran, serta berbagai masukan yang berharga sehingga penelitian dan penulisan skripsi ini dapat tersusun dengan lebih baik. Terima kasih atas arahan dan perhatian yang diberikan dalam proses penyusunan skripsi.
6. Seluruh dosen, laboran, dan staf Program Studi Teknik Informatika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, penulis menyampaikan ucapan terima kasih atas ilmu yang telah di berikan selama masa perkuliahan. Semoga segala ilmu dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah serta memberikan manfaat yang berkelanjutan bagi penulis di masa yang akan datang.
7. Ibu Nia Faricha, S.Si., selaku admin Program Studi Teknik Informatika, atas bantuan, informasi, dan dukungan administratif yang sangat membantu selama masa studi hingga proses penyusunan skripsi.

8. Ibu tercinta Rochmatoel Laili, yang senantiasa memberikan kasih sayang, dukungan, motivasi, serta pengorbanan yang tiada henti kepada penulis. Keindahan dan ketulusan doamu yang tidak pernah putus menjadi penyerta dalam setiap perjuangan penulis, sehingga berbagai proses dan tantangan dapat dilalui hingga skripsi ini terselesaikan dengan baik.
9. Bapak tercinta Mua'rif Setiawan, yang senantiasa menjadi teladan dalam kerja keras, keteguhan, dan tanggung jawab. Terima kasih atas doa, dukungan, serta pengorbanan yang telah diberikan selama ini. Setiap nasehat dan perjuangan beliau selalu menjadi sumber motivasi bagi penulis untuk terus berusaha hingga mampu menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan tepat waktu.
10. Kakak Bingar Akarsono, Kakak Wida Sekar Ening, Kakak Hasna Rosyida, dan Adik Muhammad Farras Al Haidar yang selalu hadir memberikan semangat, doa, dan dukungan kepada penulis dalam setiap proses perjalanan pendidikan.
11. Seluruh keluarga besar penulis yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terima kasih atas doa, dukungan, perhatian, dan semangat yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh pendidikan

12. Sahabat grup *"Kontrakan Penghuni Surga"* yang senantiasa membersamai penulis selama masa perkuliahan. Terima kasih atas dukungan, kebersamaan, serta berbagai pengalaman yang telah dibagikan sehingga perjalanan akademik ini terasa lebih ringan dan dapat diselesaikan tepat waktu.
13. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada keluarga besar Teknik Informatika angkatan 2022 Infinity, yang telah memberikan kebersamaan, dukungan, dan pengalaman berharga selama masa perkuliahan.
14. Teruntuk diri sendiri, terima kasih telah berjuang sejauh ini, tetap melangkah meski menghadapi rasa lelah dan keraguan. Terima kasih telah bertahan dan tidak menyerah.

Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna dan masih terdapat berbagai keterbatasan yang memerlukan penyempurnaan di masa mendatang. Namun demikian, penulis meyakini bahwa proses belajar tidak memiliki batas akhir, sehingga setiap kritik dan saran yang membangun akan menjadi bekal berharga untuk terus berkembang.Oleh karena itu, penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun bagi pihak-pihak yang membutuhkan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

.

Malang, 3 Agustus 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL **i**
HALAMAN PENGAJUAN **ii**
HALAMAN PERSETUJUAN **iii**
HALAMAN PENGESAHAN **iv**
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN **v**
MOTTO **vi**
HALAMAN PERSEMBAHAN **vii**
KATA PENGANTAR **ix**
DAFTAR ISI **xiii**
DAFTAR GAMBAR **xv**
DAFTAR TABEL **xvi**
ABSTRAK **xvii**
ABSTRACT **xviii**
الملخص **xix**
BAB I PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Rumusan Masalah 6
1.3. Batasan Masalah 6
1.4. Tujuan Penelitian 7
1.5. Manfaat Penelitian 7
BAB II STUDI PUSTAKA **8**
2.1. Penelitian Terkait 8
2.2. Simulasi Virtual Reality 10
2.3. Teknologi Mobile VR dan Oculus VR 11
2.4. Gamifikasi dalam Pembelajaran 13
2.5. Algoritma Rule-Based System dan Finite State Machine 14
2.6. IPQ (Igroup Presence Questionnaire) 15
2.7. SSQ (Simulator Sickness Questionnaire) 16
BAB III DESAIN DAN IMPLEMENTASI **18**
3.1. Desain Penelitian 18
3.2. Pengembangan Simulasi 20
3.2.2. Logika Gamifikasi (Rule-Based System) 26
3.2.3. Finite State Machine (FSM) 32
3.3. Metode Evaluasi Sistem 37
3.3.1. Kriteria Pemilihan Responden 37

3.3.3. Struktur Kuesioner dan Daftar Pertanyaan 40
3.3.4. Analisis Data dan Skala Kualitatif 43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 48
4.1. Implementasi Sistem 48
4.1.1. Implementasi Lingkungan dan Antarmuka 48
4.1.2. Implementasi Rule Based System 55
4.1.3. Implementasi Finite State Machine 61
4.2. Hasil Kuesioner IPQ dan SSQ 66
4.2.1. IPQ Mobile VR 67
4.2.2. IPQ Oculus VR 70
4.2.3. SSQ Mobile VR 73
4.2.4. SSQ Oculus VR 77
4.2.5. Analisis Perbandingan Skor Mobile & Oculus 81
4.2.6. Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi 83
4.3. Integrasi Islam 87
4.3.1. Muamalah Ma'a Allah 88
4.3.2. Muamalah Ma'a Al-Alam 89
4.3.3. Muamalah Ma'a An-Naas 90
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 92
5.1. Kesimpulan 92
5.2. Saran 93
DAFTAR PUSTAKA 94
LAMPIRAN 97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Desain Penelitian 18
Gambar 3.2 Perangkat Mobile VR dan Oculus VR 21
Gambar 3.3 Sketsa 3D Environment 21
Gambar 3.4 Gambar User Interface Menu Utama 22
Gambar 3.5 Gambar Kontrol Panel 23
Gambar 3.6 Rancangan Antarmuka Tutorial 23
Gambar 3.7 Core Gameplay 25
Gambar 3.8 Gambaran Nutrisi Tiap Level 31
Gambar 3.9 Gambaran Fase Tanaman 34
Gambar 3.10 Finite State Machine Win 35
Gambar 3.11 Finite State Machine Game Over 36
Gambar 4.1 3D Environment Greenhouse 49
Gambar 4.2 Tampilan Main Menu 50
Gambar 4.3 Tampilan Gameplay Simulation Mode 50
Gambar 4.4 Tampilan Gameplay Free Mode 51
Gambar 4.5 Panel Pause 52
Gambar 4.6 Tampilan Panel Tutorial 52
Gambar 4.7 Panel Kontrol Free Mode 53
Gambar 4.8 Panel Kontrol Simulation Mode 54
Gambar 4.9 UI Down Bar 54
Gambar 4.10 Performa FPS Mobile VR 54
Gambar 4.11 Performa FPS Oculus 55
Gambar 4.12 Keadaan Game ketika Suhu Sejuk 57
Gambar 4.13 Keadaan Game ketika Suhu Ideal 58
Gambar 4.14 Panel Game Over 59
Gambar 4.15 Panel Game Winning 60
Gambar 4.16 Tanaman Dari Fase ke Fase (Urutan Kiri ke Kanan) 63
Gambar 4.17 Tanaman Dari Fase ke Fase (Urutan Kiri ke Kanan) 65
Gambar 4.18 Perbandingan Skor Mobile VR dan Oculus 82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait 9
Tabel 3.1 Efek Kecepatan Kipas terhadap Penurunan Suhu 27
Tabel 3.2 Aturan Suhu terhadap Plant Point 28
Tabel 3.3 Aturan Nutrisi terhadap Plant Point 29
Tabel 3.4 Aturan Transisi Fase Tanaman & Degradasi Poin 32
Tabel 3.5 Daftar Pertanyaan Igroup Presence Questionnaire (IPQ) 40
Tabel 3.6 Daftar Gejala Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) 42
Tabel 3.7 Daftar Pernyataan Evaluasi Nilai Edukasi 43
Tabel 3.8 Skala Penilaian Kualitatif IPQ Tiap Dimensi (Skala Likert 7 Titik) 44
Tabel 3.9 Skala Penilaian Kualitatif Akumulasi IPQ (Skala Likert 7 Titik) 45
Tabel 3.10 Skala Kualitatif Keparahan Simulator Sickness (SSQ) 46
Tabel 3.11 Skala Kualitatif Kelayakan Nilai Edukasi 47
Tabel 4.1 Rata-Rata Skor Item IPQ Mobile VR Berdasarkan Demografi 67
Tabel 4.2 Rekapitulasi Rata-Rata Dimensi IPQ Mobile VR 68
Tabel 4.3 Rata-Rata Skor Item IPQ Oculus VR Berdasarkan Demografi 70
Tabel 4.4 Rekapitulasi Rata-Rata Dimensi IPQ Oculus VR 71
Tabel 4.5 Rerata Gejala Klinis SSQ Mobile VR Berdasarkan Demografi 74
Tabel 4.6 Dimensi Nausea Mobile VR beserta skornya 74
Tabel 4.7 Dimensi Oculomotor Mobile VR beserta skornya 75
Tabel 4.8 Dimensi Disorientasi Mobile VR beserta skornya 76
Tabel 4.9 Total Severity Mobile VR 76
Tabel 4.10 Rata-Rata Selisih (Delta) Gejala Klinis SSQ Oculus VR 78
Tabel 4.11 Dimensi Nausea Oculus VR beserta skornya 78
Tabel 4.12 Dimensi Oculomotor Oculus VR beserta skornya 79
Tabel 4.13 Dimensi Disorientation Oculus VR beserta skornya 80
Tabel 4.14 Total Severity Oculus VR 80
Tabel 4.15 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Pemula / 10 Responden) 83
Tabel 4.16 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Kasual / 20 Responden) 84
Tabel 4.17 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Dewasa / 10 Responden) 85
Tabel 4.18 Rekapitulasi Rata-Rata Nilai Edukasi Keseluruhan (40 Responden) 86

ABSTRAK

Makarim, Muhammad Abyan. 2026. **Simulasi Pertumbuhan Tanaman Melon Berbasis *Virtual Reality*.** Skripsi. Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Hani Nurhayati, M.T (II) Dr. M. Imamudin Lc, MA.

Kata kunci: Simulasi, Tanaman, *Greenhouse*, *Mobile Virtual Reality*, Oculus

Penurunan produksi melon nasional akibat fluktuasi iklim menuntut penerapan teknologi *greenhouse*. Namun, risiko kegagalan panen dan kerugian finansial yang tinggi menjadi hambatan utama dalam pelatihan budidaya *greenhouse* secara konvensional. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun aplikasi simulasi interaktif berbasis *Virtual Reality* (VR) bernama *Plant Simulate* sebagai media pelatihan manajemen iklim *greenhouse* yang aman, bebas risiko, dan terarah melalui mekanisme gamifikasi. Simulasi ini dikembangkan menggunakan *game engine* Unity 3D dengan mengintegrasikan algoritma *Rule-Based System* (RBS) untuk mengevaluasi variabel suhu udara dan ketersediaan nutrisi menjadi fluktuasi *Plant Point* secara *real-time*, serta algoritma *Finite State Machine* (FSM) untuk mengendalikan transisi wujud 3D tanaman secara dinamis mulai dari fase bibit, vegetatif, berbuah, panen, hingga kondisi layu dan *Game Over*. Evaluasi sistem dilakukan terhadap 40 responden menggunakan instrumen *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ), *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ), dan Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi pada dua platform perangkat keras, yaitu *Mobile VR* dan *Oculus VR*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi ini sangat efektif sebagai media pembelajaran dengan Total Indeks Edukasi mencapai 87,7% (Sangat Baik). Dari aspek imersi spasial, *Mobile VR* memperoleh rata-rata skor IPQ sebesar 5,24 (Predikat A / Sangat Baik Sekali), sedangkan *Oculus VR* mencatat skor 5,66 (Predikat A / Sangat Baik Sekali). Dari aspek keselamatan fisik, *Mobile VR* menghasilkan skor *Total Severity* SSQ sebesar 16,90 (Ringan/Aman), sementara *Oculus VR* mampu menekan *cybersickness* hingga angka 13,65 (Ringan/Aman). Penelitian ini menyimpulkan bahwa *Mobile VR* merupakan platform yang sangat layak, aman, dan efisien untuk diimplementasikan secara massal sebagai media edukasi interaktif tanpa mengharuskan pengadaan perangkat mahal. Selain itu, simulasi ini berhasil mengintegrasikan nilai-nilai keislaman sebagai sarana bertafakur mengamati tanda kebesaran Allah, serta memfasilitasi ilmu yang bermanfaat bagi masyarakat.

ABSTRACT

Makarim, Muhammad Abyan. 2026. **Simulation of Melon Plant Growth Based on Virtual Reality .** Thesis. Department of Informatics Engineering, Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University Malang. Advisor: (I) Hani Nurhayati, M.T (II) Dr. M. Imamudin Lc, MA.

The decline in national melon production due to climate fluctuations necessitates the adoption of greenhouse technology. However, high financial risks and potential crop failures present significant obstacles in conventional greenhouse cultivation training. This study aims to design and develop an interactive Virtual Reality (VR) simulation application titled *Plant Simulate* as a safe, risk-free, and goal-oriented greenhouse climate management training tool using gamification mechanisms. Developed using the Unity 3D game engine, the simulation integrates a Rule-Based System (RBS) algorithm to evaluate air temperature and nutrient availability variables into real-time Plant Point fluctuations, alongside a Finite State Machine (FSM) algorithm to dynamically control 3D plant growth stage transitions—from seed, vegetative, fruiting, and harvest to wilting and Game Over conditions. The system was evaluated by 40 respondents using the Igroup Presence Questionnaire (IPQ), Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), and Educational Value Evaluation Questionnaire across two hardware platforms: Mobile VR and Oculus VR. The results indicate that the application is highly effective as an educational medium, achieving a Total Educational Index of 87.7% (Very Good). Regarding spatial immersion, Mobile VR achieved an average IPQ score of 5.24 (Grade A / Excellent), while Oculus VR recorded 5.66 (Grade A / Excellent). In terms of physical safety, Mobile VR produced an SSQ Total Severity score of 16.90 (Mild/Safe), whereas Oculus VR suppressed cybersickness to 13.65 (Mild/Safe). The study concludes that Mobile VR serves as a highly feasible, safe, and cost-effective platform for mass implementation in interactive education without requiring expensive hardware. Furthermore, the simulation successfully incorporates Islamic values as a means of *tafakur* to reflect on the signs of Allah's greatness and facilitate beneficial knowledge for society.

Key words: Simulation, Plant, Greenhouse, Mobile Virtual Reality, Oculus

الملخص

مكارم، محمد أبيان. 2026. المحاكاة لنمو نبات الشمام على أساس الواقع الافتراضي. البحث الجامعي. قسم الهندسة المعلوماتية، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: هاني نورحياتي، الماجستيرة. المشرف الثاني: د. محمد إمام الدين، الماجستير.

الكلمات الرئيسية: محاكاة ، نبات، بيت زجاجي، الواقع الافتراضي المحمول ، *Oculus VR*

انخفاض إنتاج الشمام الوطني نتيجة لتقلبات المناخ يتطلب تطبيق تكنولوجيا البيت الزجاجي. ومع ذلك، فإن مخاطر فشل المحصول والخسائر المالية العالية تشكل عقبة رئيسية في تدريب زراعة البيت الزجاجي بالطرق التقليدية. هدف هذا البحث إلى تصميم وبناء تطبيق محاكاة تفاعلية على أساس الواقع الافتراضي (VR) باسم النظم الإنتاجية *Plant Simulate* كوسيلة تدريبية لإدارة مناخ البيت الزجاجي بشكل آمن وخالٍ من المخاطر وموجه من خلال آلية اللعب. تم تطوير هذه المحاكاة باستخدام محرك الألعاب *Unity 3D* مع دمج خوارزمية النظام القائم على القواعد (RBS) لتقييم متغيرات درجة حرارة الهواء وتوافر العناصر الغذائية إلى تذبذب نقاط النبات (*Plant Point*) في الوقت الحقيقي، بالإضافة إلى خوارزمية آلة الحالة المحدودة (FSM) للتحكم في انتقالات الشكل ثلاثي الأبعاد للنبات بشكل ديناميكي بدءًا من مرحلة البذور، والنمو الخضري، والإثمار، والحصاد، وصولاً إلى مرحلة الذبول وانتهاء اللعبة (*Game Over*). تم تقييم النظام على 20 مستجيبًا باستخدام أدوات استبانة حضور المجموعة (*IPQ*)، واستبانة دوار المحاكاة (*SSQ*)، واستبانة تقييم قيمة التعليم على منصتين للأجهزة، وهما الواقع الافتراضي المحمول و *Oculus VR*. أظهرت نتائج الاختبار أن هذا التطبيق فعال جدًا كوسيلة تعليمية حيث بلغ إجمالي مؤشر التعليم 88.0% (جيد جدًا). من ناحية الانغماس المكاني، حصل الواقع الافتراضي المحمول على متوسط درجة *IPQ* قدرها 5.21 (التقدير أ / ممتاز جدًا)، بينما سجل واقع افتراضي أوكولوس درجة 5.64 (التقدير أ / ممتاز جدًا). من ناحية السلامة الجسدية، حقق الواقع الافتراضي المحمول درجة إجمالية لشدة *SSQ* بلغت 16.83 (خفيف/آمن)، بينما تمكن واقع افتراضي أوكولوس من الحد من دوار الإنترنت إلى 14.03 (خفيف/آمن). توصل هذا البحث إلى أن الواقع الافتراضي المحمول هو منصة جديرة بالثقة، آمنة وفعالة للتنفيذ على نطاق واسع كوسيلة تعليمية تفاعلية دون الحاجة إلى أجهزة مكلفة. علاوة على ذلك، نجحت هذه المحاكاة في دمج القيم الإسلامية كوسيلة للتأمل في ملاحظة علامات عظمة الله سبحانه وتعالى، كما ساهمت في توفير المعرفة المفيدة للمجتمع.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sektor pertanian modern saat ini terus berinovasi untuk memenuhi kebutuhan pasar, terutama pada komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi seperti tanaman Melon (*Cucumis melo L.*). Kendati demikian, produksi melon di Indonesia saat ini menghadapi tantangan besar. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi melon nasional mengalami tren penurunan signifikan dalam tiga tahun terakhir; dari 129.147 ton pada tahun 2021, turun menjadi 118.696 ton pada 2022, dan kembali merosot ke angka 117.794 ton pada tahun 2023 (Ramadhania et al., 2025). Penurunan ini mencerminkan adanya ketidakstabilan produksi yang dipicu oleh perubahan iklim ekstrim serta rendahnya efisiensi metode budidaya konvensional di lahan terbuka. Oleh karena itu, melalui penggunaan teknologi *greenhouse* menjadi solusi strategis yang diperlukan untuk memitigasi dampak cuaca dan mengontrol parameter lingkungan secara optimal.

Kendati penggunaan *greenhouse* mampu meminimalisir dampak cuaca eksternal, metode ini memunculkan tantangan baru berupa manajemen iklim. Penelitian eksperimental membuktikan bahwa ruang tertutup seperti *greenhouse* sangat rentan mengalami kenaikan suhu ekstrem akibat efek rumah kaca, di mana radiasi panas terperangkap dan melonjak drastis dalam waktu singkat jika sirkulasi udara tidak dikelola dengan presisi (Gahansa et al., 2025). Tanaman seperti melon, kegagalan dalam manajemen suhu ini sangat fatal. Salah studi

kasus menunjukkan bahwa kesalahan manajemen (*mismanagement*) tidak hanya menghambat pertumbuhan, tetapi berpotensi menyebabkan kematian seluruh tanaman atau gagal panen total (*loss of entire crops*) (Carruth et al., 2020). Tingginya risiko finansial dan biologis ini menyebabkan metode pelatihan konvensional menjadi sulit diterapkan; peserta didik atau petani pemula jarang diizinkan berinteraksi langsung dengan sistem operasional karena kesalahan kecil dapat berujung pada kerugian material yang besar (Carruth et al., 2020).

Sebagai jalan keluar dari keterbatasan dan tingginya risiko pelatihan konvensional, pendekatan pembelajaran berbasis simulasi menjadi solusi yang sangat relevan. Simulasi memungkinkan penciptaan lingkungan buatan yang meniru karakteristik serta dinamika sistem di dunia nyata, memberikan ruang aman bagi peserta didik untuk berlatih mengelola *greenhouse* tanpa harus menghadapi konsekuensi nyata dari kegagalan operasional (Carruth et al., 2020). Salah satu bentuk simulasi yang paling menjanjikan saat ini adalah teknologi *Virtual Reality* (VR).

Teknologi Virtual Reality (VR) hadir sebagai solusi media pembelajaran alternatif yang efektif. VR memungkinkan penciptaan lingkungan simulasi yang imersif, dimana pengguna dapat berinteraksi dengan objek virtual yang mereplikasi kondisi dunia nyata secara presisi. Visualisasi berbasis VR memberikan keunggulan signifikan dibandingkan antarmuka pemantauan tradisional; pengguna tidak hanya disuguhkan data sensor dalam bentuk angka atau grafik 2D yang abstrak, tetapi dapat melihat dan merasakan representasi spasial dari kondisi lingkungan greenhouse secara langsung (Kim et al., 2021).

Dengan demikian, teknologi ini menciptakan lingkungan pelatihan 'bebas risiko' (risk-free), yang memungkinkan peserta didik untuk melakukan eksperimen seperti memanipulasi suhu atau ventilasi guna memahami konsekuensi tanpa perlu khawatir merusak tanaman asli atau menimbulkan kerugian materi. Pemanfaatan teknologi VR sebagai media edukasi (*serious game*) ini juga telah terbukti secara akademis mampu memfasilitasi interaksi dan pemahaman visual pengguna secara lebih mendalam (Nurhayati & Arif, 2023).

Meskipun teknologi VR telah mulai diadopsi dalam sektor pertanian cerdas, implementasi yang ada saat ini masih memiliki keterbatasan signifikan. Mayoritas pengembangan VR *greenhouse* terdahulu, seperti penelitian yang dilakukan oleh (R. Maulana et al., n.d.), cenderung hanya berfokus pada aspek visualisasi informasi pasif, di mana pengguna hanya bertindak sebagai pengamat data sensor (*monitoring*) tanpa memiliki kendali untuk memanipulasi variabel lingkungan. Ketiadaan interaksi dua arah ini mengurangi efektivitas pelatihan karena pengguna tidak merasakan konsekuensi dari pengambilan keputusan. Selain itu, pendekatan simulasi tanpa struktur yang jelas juga berdampak negatif pada pengalaman pengguna; studi menemukan bahwa pengguna sering merasa bingung atau 'tersesat' dalam lingkungan VR jika tidak diberikan instruksi tugas yang spesifik atau elemen permainan yang memandu aktivitas mereka (Slob et al., 2023).

Untuk menjawab keterbatasan interaksi pada penelitian terdahulu, penelitian ini mengusulkan pengembangan simulasi VR dengan pendekatan Gamifikasi yang diintegrasikan dengan Aturan Logika Game. Berbeda dengan

visualisasi pasif, sistem ini menerapkan mekanisme 'Poin Tanaman' (Plant Point) sebagai indikator keberhasilan manajemen lingkungan secara real-time. Dalam mekanisme ini, kondisi suhu ideal 26 C - 30 C akan memberikan akumulasi poin positif, sedangkan kondisi ekstrem 35 C keatas akan memicu pengurangan poin sebagai simulasi stres tanaman. Akumulasi poin tersebut selanjutnya berfungsi sebagai pemicu dalam FSM untuk mengubah fase visual tanaman melon, mulai dari fase bibit, vegetatif, hingga panen. Arsitektur logika kontrol berbasis *Finite State Machine* (FSM) ini sebelumnya telah banyak diadaptasi karena keunggulannya dalam mendesain perilaku dinamis yang terstruktur pada lingkungan simulasi (Arif et al., 2012). Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan tujuan yang jelas bagi pengguna, sehingga proses pembelajaran manajemen greenhouse menjadi terarah, interaktif, dan memiliki konsekuensi logis layaknya kondisi di dunia nyata. Penerapan elemen *serious game* dengan skenario yang interaktif seperti ini terbukti sangat krusial dalam meningkatkan keterlibatan dan minat pengguna dalam belajar (Arif et al 2023).

Dalam perancangan mekanisme simulasi interaktif tersebut, penelitian ini difokuskan pada manipulasi dua parameter lingkungan utama, yaitu Suhu Udara dan Intensitas Penyiraman. Pemilihan kedua variabel dasar ini didasarkan pada urgensi fisika *greenhouse*; di mana perubahan suhu akibat efek rumah kaca dan ketersediaan nutrisi adalah faktor abiotik yang memberikan dampak paling cepat dan instan terhadap respons stres atau kelangsungan hidup tanaman melon (Gahansa et al., 2025). Sementara itu, faktor biotik dan abiotik lainnya seperti kelembapan udara, manajemen takaran nutrisi, serta penanganan hama dan

penyakit—tidak diintegrasikan ke dalam sistem. Pembatasan parameter ini dirancang secara sengaja agar model simulasi biologis tidak menjadi terlalu kompleks. Dengan menyederhanakan variabel diharapkan mencegah kebingungan akibat terlalu banyak elemen yang harus dikendalikan (Slob et al., 2023).

Selain urgensi teknis dan ekonomis, penelitian ini juga dibangun di atas landasan integrasi nilai-nilai keislaman. Dalam perspektif Islam, keindahan alam semesta beserta beraneka ragam tumbuhan di dalamnya merupakan tanda kebesaran dan kasih sayang Allah kepada makhluk-Nya. Melalui aplikasi simulasi VR yang memvisualisasikan pertumbuhan tanaman melon ini, pengguna diajak untuk mengamati keindahan proses penciptaan tersebut secara interaktif. Hal ini sejalan dengan firman Allah dalam Q.S. Qaf ayat 7:

...وَٱلْأَرْضَ مَدَدْنَٰهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوَٰسِىَ وَأَنۢبَتْنَا فِيهَا مِن كُلِّ زَوْجٍۭ بَهِيجٍ ٧

Artinya: "Dan Kami hamparkan bumi itu dan Kami letakkan padanya gunung-gunung yang kokoh dan Kami tumbuhkan padanya segala macam tanaman yang indah dipandang mata," (Q.S. Qaf: 7).

Dalam *Hidayatul Insan bi Tafsiril Qur'an* dijelaskan bahwa Allah menumbuhkan beraneka ragam tanaman dan buah-buahan yang menyenangkan dan menyejukkan pandangan mata siapa saja yang melihatnya. Lebih lanjut ditafsirkan bahwa apa yang tampak di alam semesta berupa penciptaan yang rapi dan indah ini, merupakan dalil yang menunjukkan kesempurnaan kekuasaan Allah, kebijaksanaan-Nya, rahmat bagi hamba-hamba-Nya yang mau kembali dan menundukkan diri (Marwan, 2018).Oleh karena itu, visualisasi pertumbuhan melon dalam simulasi VR ini diharapkan menjadi sarana tafakur ringan bagi penggunanya.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana membangun simulasi yang mampu memvisualisasikan parameter lingkungan (seperti suhu dan ketersediaan nutrisi) untuk mengatasi tingginya risiko pada pelatihan budidaya melon konvensional?
2. Bagaimana merancang sistem simulasi *greenhouse* yang interaktif dan memiliki objektif penyelesaian masalah untuk mengatasi kelemahan simulator yang bersifat pasif?

1.3. Batasan Masalah

1. Simulasi pertumbuhan tanaman Melon pada sistem ini tidak memodelkan proses biologis secara empiris-kompleks (seperti laju fotosintesis, reaksi kimiawi sel). Logika pertumbuhan menggunakan pendekatan *Rule-Based System* yang disederhanakan untuk tujuan edukasi, bukan sebagai simulasi eksperimental laboratorium.
2. Variabel lingkungan *greenhouse* yang disimulasikan dan dapat dimanipulasi oleh pengguna dibatasi hanya pada dua parameter utama, yaitu Suhu Udara dan Intensitas Penyiraman . Faktor biotik dan abiotik lain seperti serangan hama, penyakit, gulma, takaran nutrisi, serta kelembapan udara tidak dimasukkan dalam lingkup simulasi ini

1.4. Tujuan Penelitian

1. Membangun simulasi berbasis *Virtual Reality* yang mampu memvisualisasikan lingkungan *greenhouse* tanaman melon secara imersif sebagai media pelatihan yang aman tanpa resiko kerugian materi.
2. Mengimplementasikan mekanisme gamifikasi berbasis "Poin Tanaman" (*Plant Point*) untuk memberikan simulasi yang terarah serta umpan balik mengenai dampak tindakan pengguna terhadap fase pertumbuhan tanaman

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan solusi alternatif bagi mahasiswa untuk mempelajari manajemen iklim *greenhouse* tanpa resiko kerugian finansial akibat kegagalan panen. Dengan adanya visualisasi parameter lingkungan (suhu dan udara) yang semula abstrak menjadi terlihat dalam lingkungan VR yang aman , pengguna dapat bebas melakukan eksperimen *trial-and-error* untuk menemukan pengaturan suhu optimal bagi tanaman melon.

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Penggunaan teknologi *Virtual Reality* (VR) dalam sektor pertanian dan manajemen *greenhouse* telah dieksplorasi oleh beberapa penelitian terdahulu. Penelitian yang dilakukan oleh (Carruth et al., 2020) merancang antarmuka pengguna (UI) pada lingkungan VR imersif untuk pelatihan pertanian presisi. Penelitian tersebut membuktikan bahwa VR dapat memberikan akses simulasi sistem pertanian yang aman tanpa resiko merusak tanaman asli. Sejalan dengan hal tersebut, (Maulana et al., 2021) juga mengembangkan sistem informasi *greenhouse* hidroponik berbasis VR menggunakan pendekatan siklus pengembangan multimedia. Kedua penelitian ini berhasil membangun visualisasi 3D yang baik, namun interaksi yang ditawarkan masih bersifat observasional atau sekadar tur virtual, di mana pengguna belum dihadapkan keadaan langsung terhadap perubahan biologis tanaman.

Dari sudut pandang simulasi iklim mikro yang lebih kompleks, (Kim et al., 2021) mengembangkan simulator VR edukasional yang mengintegrasikan data *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memvisualisasikan lingkungan di dalam *greenhouse*. Namun, pemodelan yang terlalu kompleks ini seringkali memicu kendala baru bagi pengguna tingkat dasar. Hal ini sejalan dengan temuan (Slob et al., 2023), yang mengevaluasi interaksi manusia dengan *digital twins greenhouse* berbasis VR. Penelitian tersebut menemukan bahwa lingkungan VR

yang menyajikan informasi terlalu padat tanpa adanya instruksi atau struktur tugas yang spesifik berpotensi memicu beban kognitif serta memicu kebingungan pada pengguna. Pengguna sering kali merasa kebingungan untuk menentukan tindakan apa yang harus dilakukan pertama kali di dalam lingkungan virtual tersebut. Detail Penelitian Terkait dapat dilihat di Tabel 2.1

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

Peneliti & Tahun	**Fokus Penelitian / Domain**	**Metode / Fitur Utama**	**Kelemahan / Gap Penelitian**	**Posisi Penelitian Diusulkan (Plant Simulate)**
Carruth et al. (2020)	Antarmuka pengguna (UI) VR untuk pelatihan pertanian presisi greenhouse.	*Immersive VR, Desain UI interaktif.*	Interaksi difokuskan pada pengenalan alat, belum ada sistem umpan balik logis (konsekuensi) pada objek tanaman.	Menggunakan Rule-Based System agar tindakan pengguna (mengatur alat) memberikan dampak pada tanaman.
Kim et al. (2021)	Visualisasi aerodinamika lingkungan greenhouse.	Integrasi CFD (Dinamika Fluida) dan VR.	Menggunakan pemodelan iklim yang sangat kompleks sehingga berat dikomputasi dan kurang cocok untuk orientasi pemula.	Menyederhanakan kompleksitas variabel menjadi 2 parameter (Suhu & Nutrisi) agar fokus pada pemahaman dasar.
Slob et al. (2023)	Interaksi manusia pada digital twins greenhouse berbasis VR.	Evaluasi usability, simulation sickness, interaksi VR.	Mengidentifikasi bahwa lingkungan VR tanpa objektif memicu kebingungan, namun belum mengusulkan fitur solusi di dalam sistem.	Menyediakan fitur Free Mode dan Panel Tutorial terintegrasi untuk memberikan pemahaman.
Suhendi et al. (2023)	Sistem informasi greenhouse hidroponik berbasis VR.	*Multimedia Development Life Cycle (MDLC), Mobile VR.*	Simulasi bersifat statis (tur virtual observasional) tanpa adanya sistem evaluasi atau target pencapaian (gamification).	Mengimplementasikan algoritma FSM dan sistem poin (gamifikasi) untuk mengubah simulasi pasif menjadi berbasis tujuan.

2.2. Simulasi Virtual Reality

Simulasi merupakan suatu metode perancangan model digital yang meniru proses, perilaku, atau karakteristik operasional dari sebuah sistem di dunia nyata. Dalam konteks edukasi dan pelatihan, simulasi berfungsi sebagai wadah tiruan untuk memfasilitasi proses pembelajaran di dalam lingkungan yang terkendali. Melalui metode ini, pengguna dapat bereksperimen dan mengamati perubahan tanpa harus memicu konsekuensi fisik di dunia nyata. Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi komputasi, pendekatan simulasi kini telah berevolusi menjadi lingkungan tiga dimensi (3D) yang sangat interaktif melalui teknologi *Virtual Reality* (VR).

Keunggulan utama dari simulasi berbasis VR adalah kemampuannya dalam menciptakan ruang yang sepenuhnya bebas risiko. Dalam bidang pertanian, penerapan VR pada manajemen *greenhouse* memungkinkan pelajar untuk melakukan eksperimen pengaturan iklim secara langsung, tanpa harus menanggung risiko kerugian finansial atau kerusakan biologis pada tanaman nyata akibat kesalahan prosedur pelatihan (Carruth et al., 2020). Hal ini didukung oleh fakta bahwa simulasi berbasis VR terbukti sangat efisien sebagai media pelatihan karena mampu menekan biaya kerugian materiil akibat kesalahan praktik kerja (Editya, 2022). Selain faktor efisiensi biaya, lingkungan VR mampu menghindari risiko cedera atau kecelakaan yang mungkin terjadi apabila simulasi keadaan lapangan dilakukan secara nyata, sekaligus menawarkan fleksibilitas waktu pelaksanaan bagi penggunanya (Siregar & Theresia, 2023).

Secara arsitektur perangkat keras, teknologi VR terbagi ke dalam beberapa kategori, mulai dari *Tethered VR* (seperti PC VR yang membutuhkan perangkat komputasi eksternal tingkat tinggi) hingga *Mobile VR* (platform yang memanfaatkan perangkat portabel). Pemilihan arsitektur sangat mempengaruhi tingkat aksesibilitas dan skala biaya pengembangan. Untuk target simulasi edukasi yang masif, platform *Mobile VR* seringkali menjadi prioritas karena lebih murah dan dapat didistribusikan serta dijalankan secara mandiri. Lebih lanjut, kendala interaksi pada platform *Mobile VR* dapat diselesaikan melalui penggabungan VR Box dengan alat tambahan seperti *Bluetooth Controller*, yang terbukti mampu menghadirkan kendali simulasi yang leluasa dan interaktif bagi pengguna (Editya, 2022).

2.3. Teknologi *Mobile VR* dan Oculus VR

Gawai berbasis *Mobile VR* menempati posisi strategis dalam ekosistem ini karena memadukan fleksibilitas dengan simulasi ruang virtual. Pemanfaatan perangkat *smartphone* memberikan kebebasan akses bagi pengguna, sejalan dengan tingginya tren penggunaan perangkat seluler pada era modern (Alwafi et al., 2022). Salah satu inovasi utama dalam kategori ini adalah Google Cardboard, yang dikembangkan untuk menghasilkan pengalaman dunia virtual yang terjangkau secara finansial (Stephen et al., 2016). Perangkat ini berfungsi sebagai wadah optik pasif yang memanfaatkan sensor dan layar *smartphone* sebagai penampil visual utama dikonfigurasi menggunakan Google Cardboard Software Development Kit (SDK) pada *engine* Unity(Alkhaq & Asmiatun, 2026).

Berseberangan dengan platform seluler, Oculus VR merupakan representasi dari perangkat VR kelas atas yang menawarkan fidelitas visual dan performa komputasi yang jauh lebih tinggi. Perangkat ini memiliki keunggulan pada latensi yang sangat rendah , resolusi layar yang tajam, serta sistem pelacakan posisi (*positional tracking*) yang sangat presisi . Berbeda dengan *Mobile VR* yang bersifat pasif, Oculus dilengkapi dengan *controller* khusus dan sensor yang memungkinkan interaksi ruang yang lebih kompleks dan imersif. Namun, keunggulan teknis ini berbanding lurus dengan biaya pengadaan perangkat yang sangat tinggi, yang seringkali menjadi hambatan aksesibilitas bagi pengguna dengan sumber daya terbatas .

Pencantuman kedua teknologi ini bertujuan untuk melakukan analisis komparatif mengenai kualitas pengalaman pengguna . Meskipun Oculus secara teoritis menawarkan grafis dan performa yang lebih unggul, penelitian ini bertujuan untuk menguji apakah penggunaan platform *low-cost* seperti *Mobile VR* dapat memberikan tingkat kepuasan, sensasi kehadiran, dan hasil belajar edukasional yang setara dengan perangkat mahal (Oculus). Hal ini krusial untuk membuktikan bahwa solusi teknologi yang terjangkau tetap efektif diimplementasikan bagi target pengguna seperti petani pemula tanpa harus mengorbankan kualitas edukasi simulasi.

2.4. Gamifikasi dalam Pembelajaran

Gamifikasi merupakan sebuah pendekatan inovatif yang mengintegrasikan elemen-elemen dan prinsip desain permainan ke dalam konteks non-permainan, khususnya dalam lingkungan pembelajaran maupun pelatihan. Tujuan utama dari gamifikasi bukanlah untuk menciptakan sebuah hiburan permainan secara utuh, melainkan mengadaptasi mekanika permainan guna meningkatkan daya tarik, motivasi, dan efektivitas suatu proses (Sari & Alfiyan, 2023). Dalam ranah edukasi, metode ini hadir sebagai solusi untuk mengatasi kelemahan model pembelajaran konvensional yang seringkali bersifat pasif, monoton, dan kurang menstimulasi keterlibatan interaktif penggunanya (Winatha & Ariningsih, 2020).

Penerapan gamifikasi ditopang oleh berbagai komponen mekanis, di antaranya meliputi sistem poin , tantangan , serta pemberian penghargaan (Sari & Alfiyan, 2023). Integrasi elemen-elemen tersebut dirancang untuk menstimulasi aspek psikologis pengguna secara positif. Sebagai contoh, mekanisme akumulasi poin atau pencapaian target tertentu dapat menumbuhkan motivasi sehingga pengguna merasa tertantang untuk terus berinteraksi, mengeksplorasi, dan menyelesaikan instruksi yang diberikan di dalam sistem. Selain itu, keberadaan konsekuensi atas setiap tindakan memberikan umpan balik dalam membentuk pemahaman sebab-akibat.

Penerapan gamifikasi terbukti mampu mengubah persepsi pembelajar terhadap materi atau prosedur yang kompleks menjadi sesuatu yang lebih mudah dicerna dan interaktif, sekaligus meningkatkan partisipasi aktif mereka di dalam

ekosistem simulasi (Winatha & Ariningsih, 2020). Melalui simulasi berbasis tantangan dan sistem penghargaan, pengguna tidak hanya dituntut untuk menyerap informasi, tetapi juga dipacu untuk mengambil keputusan dan memecahkan masalah, yang pada akhirnya akan memperkuat pemahaman mendalam terhadap objek yang sedang dipelajari (Sari & Alfiyan, 2023).

2.5. Algoritma *Rule-Based System* dan *Finite State Machine*

Pengembangan simulasi dan permainan edukasi, membutuhkan arsitektur logika yang mampu merespons perlakuan pengguna secara sekaligus terstruktur. Dua pendekatan algoritmik yang sering diintegrasikan untuk mengelola pengambilan keputusan dan perubahan perilaku objek di dalam sebuah sistem virtual adalah *Rule-Based System* (RBS) dan *Finite State Machine* (FSM).

Rule-Based System (RBS) merupakan metode komputasi yang memanfaatkan seperangkat aturan logika untuk mengambil sebuah keputusan secara otomatis. Algoritma ini beroperasi menggunakan struktur logika *If-Then* atau Jika-Maka, di mana sistem akan mengevaluasi berbagai variabel input terhadap kriteria atau batas toleransi yang telah ditetapkan sebelumnya (Faisal & Arisandi, 2025). Penggunaan mesin berbasis aturan ini memungkinkan sebuah aplikasi untuk menyaring perlakuan yang masuk dan mengeksekusi keluaran sesuai dengan kondisi yang terpenuhi. Hal ini membuat alur sebab-akibat di dalam sistem menjadi lebih terukur dan tidak terjadi secara acak.

Sebagai pendamping dari mesin tersebut, algoritma *Finite State Machine* (FSM) berperan sebagai model perancangan sistem yang membagi perilaku atau kondisi suatu objek ke dalam sejumlah fase terbatas. Konsep dasar dari FSM adalah bahwa sebuah sistem hanya dapat berada pada satu *state* tertentu pada satu waktu, dan akan terus menetap pada *state* tersebut hingga sistem menerima sebuah pemicu untuk berpindah (Asrianda & Zulfadli, 2022). Setiap *state* saling terhubung oleh jalur transisi yang mengarah ke *state* lainnya, di mana proses perpindahan ini sangat bergantung pada terpenuhinya suatu syarat.

2.6. IPQ (Igroup Presence Questionnaire)

Dalam evaluasi lingkungan VR , parameter pengujian y bukanlah sekadar fungsionalitas antarmuka, melainkan tingkat *presence* atau kehadiran pengguna. *Presence* secara umum didefinisikan sebagai perasaan subjektif pengguna yang merasa "berada di sana" di dalam sebuah lingkungan virtual, meskipun secara fisik mereka berada di tempat lain (Elin Maulida Rahmawati et al., 2023). Untuk hal tersebut, salah satu evaluasi subjektif yang paling luas diakui dan digunakan adalah Igroup Presence Questionnaire (IPQ). Instrumen IPQ, yang dikembangkan oleh Schubert pada tahun 2001, secara spesifik dirancang untuk mengukur rasa kehadiran pengguna di dalam lingkungan virtual (Melo et al., 2023).

Kuesioner IPQ terdiri dari 14 butir pertanyaan yang dievaluasi untuk menilai kualitas pengalaman virtual pengguna. Menurut (Melo et al., 2023), keempat belas pertanyaan tersebut diklasifikasikan ke dalam empat faktor atau subskala utama, yaitu:

1. Sensasi Kehadiran (*Presence*): Menilai secara umum seberapa kuat pengguna merasa bahwa mereka benar-benar berada di dalam lingkungan virtual.
2. Kehadiran Spasial (*Spatial Presence*): Mengukur seberapa kuat pengguna merasa tubuh fisiknya dikelilingi oleh ruang tiga dimensi (3D), sehingga mereka merasa benar-benar berpindah ke dalam ruangan tersebut dan bukan sekadar melihat dari luar layar.
3. Keterlibatan (*Involvement*): Menilai seberapa kuat pengguna terhanyut ke dalam dunia virtual, sehingga mengabaikan dunia nyata.
4. Realisme yang Dialami (*Experienced Realism*): Mengukur seberapa realistis dunia virtual tersebut, dan sejauh mana visual serta interaksinya menyerupai pengalaman hukum yang ada di dunia nyata.

Melalui pengukuran keempat dimensi tersebut, pengembang dapat mengetahui seberapa baik teknologi VR meyakinkan pengguna bahwa dunia virtual yang mereka lihat adalah nyata. Hasil penilaian ini sangat penting untuk memastikan bahwa aplikasi tidak hanya sekedar berjalan lancar secara sistem, tetapi juga sukses membuat pengguna merasa benar-benar hadir dan masuk ke dalam simulasi tersebut.

2.7. SSQ (Simulator Sickness Questionnaire)

Dalam Penggunaan teknologi VR seringkali memunculkan efek samping negatif yang dikenal sebagai cybersickness atau simulator sickness. Gejala ini memiliki kemiripan dengan mabuk gerak. *Cybersickness* di dalam VR dapat terjadi tanpa adanya pergerakan fisik yang nyata dari penggunanya.

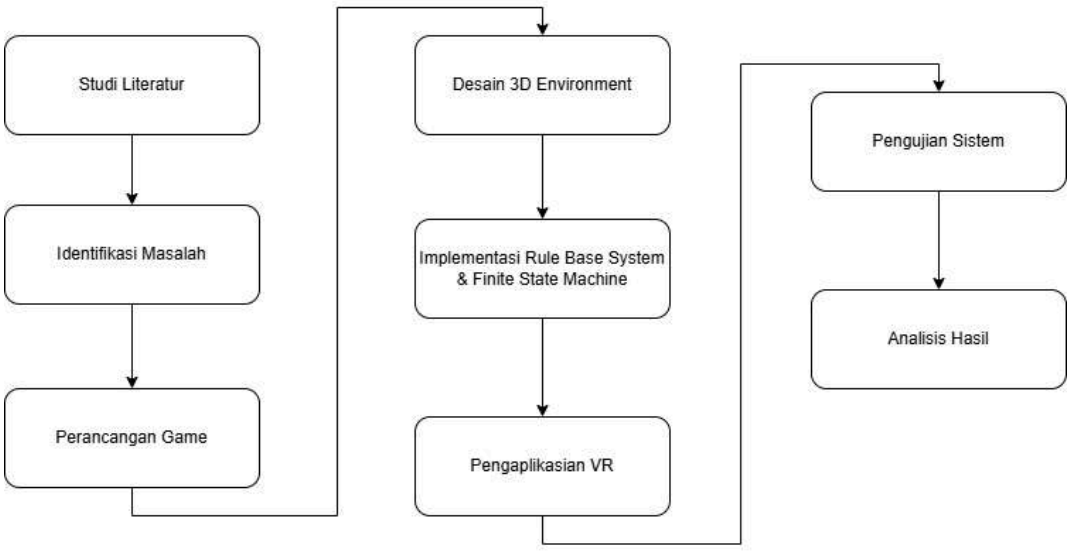
Untuk mengukur dan mengidentifikasi tingkat keparahan gejala tersebut, (Kennedy et al., 1993) mengadaptasi Motion Sickness Questionnaire (MSQ) untuk mengembangkan sebuah instrumen evaluasi standar yang disebut Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Saat ini, SSQ merupakan metode penilaian mandiri yang paling mendominasi dan diakui secara luas untuk mengevaluasi cybersickness pada pengguna VR. Instrumen SSQ beroperasi dengan menghitung skor dari tiga kelompok gejala (klaster) utama, yaitu *Oculomotor* (gangguan visual), *Disorientation* (gangguan keseimbangan/arah), dan *Nausea* (gangguan pencernaan/mual). Dalam konteks simulasi greenhouse menggunakan *Virtual Reality*, kenyamanan pengguna merupakan faktor penentu keberhasilan sistem. Evaluasi terhadap simulation sickness sangat diperlukan guna mengakomodasi kenyamanan pengguna, terutama jika aplikasi dirancang untuk penggunaan yang rutin dan berkepanjangan.

BAB III

DESAIN DAN IMPLEMENTASI

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang untuk mengembangkan sebuah sistem simulasi interaktif berbasis *Virtual Reality* (VR) sebagai media pelatihan manajemen iklim pada *greenhouse* tanaman melon. Proses penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperkuat dasar teori mengenai budidaya melon, efek fisika di dalam *greenhouse*, serta penerapan algoritma *Rule-Based System* dan *Finite State Machine* (FSM). Selanjutnya, dilakukan tahap identifikasi masalah guna menganalisis keterbatasan pada pelatihan pertanian konvensional yang berisiko tinggi, serta mengevaluasi kelemahan visualisasi VR terdahulu yang masih bersifat pasif dan hanya berfungsi sebagai tur observasional.



Gambar 3.1 Desain Penelitian

Berdasarkan Gambar 3.1, tahap berikutnya adalah perancangan sistem dan perancangan lingkungan virtual. Tahap ini mencakup perancangan antarmuka pengguna (UI), pemodelan objek 3D (seperti bangunan *greenhouse*, panel kontrol suhu dan nutrisi, serta wujud tanaman melon dalam berbagai fase biologis), hingga perancangan mekanik gamifikasi berupa sistem *Plant Point* dan kondisi *Game Over*. Setelah seluruh konsep desain disetujui, penelitian akan dilanjutkan ke tahap implementasi sistem menggunakan perangkat lunak *game engine* Unity 3D.

Pada tahap implementasi, algoritma RBS akan diprogram sebagai mesin inferensi logika untuk mengatur penambahan atau pengurangan *Plant Point* berdasarkan ketepatan intervensi suhu dan nutrisi dari pengguna. Sementara itu, algoritma FSM diimplementasikan untuk memproses transisi visual fase pertumbuhan tanaman secara *real-time* berdasarkan pemicu kondisi yang dievaluasi oleh RBS. Lingkungan simulasi ini kemudian diintegrasikan dengan Google Cardboard SDK agar dapat dieksekusi sebagai platform *Mobile VR* yang interaktif. Sebagai tahapan akhir, penelitian ini akan melakukan evaluasi sistem menggunakan instrumen IPQ untuk mengukur tingkat kehadiran dan realisme yang dirasakan oleh pengguna di dalam simulasi *greenhouse* tersebut.

3.2. Pengembangan Simulasi

Pengembangan aplikasi *Plant Simulate* menggunakan pendekatan *Game Design Document* (GDD) yang diadaptasi secara khusus untuk memenuhi kebutuhan simulasi *Virtual Reality* (VR) berbasis *Mobile VR*. Fokus utama pengembangan di dalam sub-bab ini akan membedah tiga aspek teknis yang krusial, yaitu: perancangan skenario interaksi pengguna dengan lingkungan virtual, penerapan logika penilaian gamifikasi menggunakan algoritma RBS, serta mekanisme transisi wujud objek 3D tanaman secara dinamis menggunakan algoritma FSM.

3.2.1. Skenario dan Interaksi Lingkungan VR

Untuk mendukung tingkat aksesibilitas perangkat, implementasi utama lingkungan VR pada penelitian ini dirancang untuk dijalankan melalui perangkat *smartphone* Android yang dipasangkan ke dalam *headset* VR portabel. Interaksi visual pada platform *Mobile VR* memanfaatkan sensor *gyroscope* bawaan *smartphone* untuk melacak pergerakan rotasi kepala pengguna (*head-tracking*) secara 360 derajat (3-DOF). Untuk navigasi spasial, pengguna menggunakan perangkat tambahan berupa *Bluetooth VR Controller* yang memungkinkan pergerakan di dalam area *greenhouse* virtual, seperti mendekati rak tanaman maupun memantau kondisi ruangan menggunakan *analog controller*.

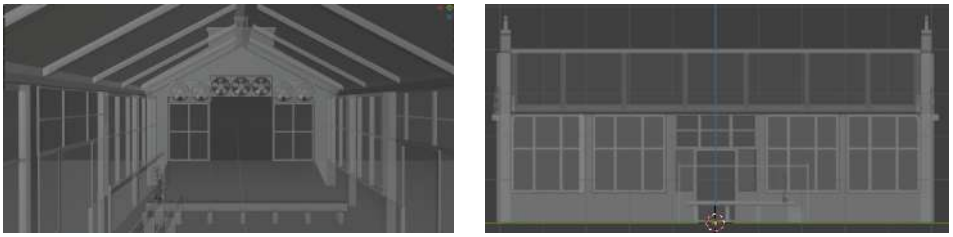
Selain penggunaan gawai berbasis *smartphone*, penelitian ini juga mengimplementasikan lingkungan simulasi ke dalam perangkat Oculus VR. Penggunaan Oculus VR dalam skenario ini berfungsi sebagai instrumen komparasi tingkat tinggi untuk mengevaluasi perbedaan kualitas output grafis dan

imersi. Berbeda dengan platform seluler, Oculus VR memungkinkan pelacakan pergerakan spasial secara penuh (*Six Degrees of Freedom* / 6-DOF) serta interaksi yang lebih intuitif melalui *hand-controller* bawaan perangkat.



Gambar 3.2 Perangkat *Mobile VR* dan *Oculus VR*

Skenario pengujian pada dua perangkat ini dirancang agar responden dapat merasakan perbedaan performa antara solusi VR berbiaya rendah dan solusi VR profesional dalam lingkungan simulasi yang identik. Gambaran perbandingan perangkat keras pendukung *Mobile VR* (Kiri) dan Oculus VR (Kanan) dapat dilihat pada Gambar 3.2

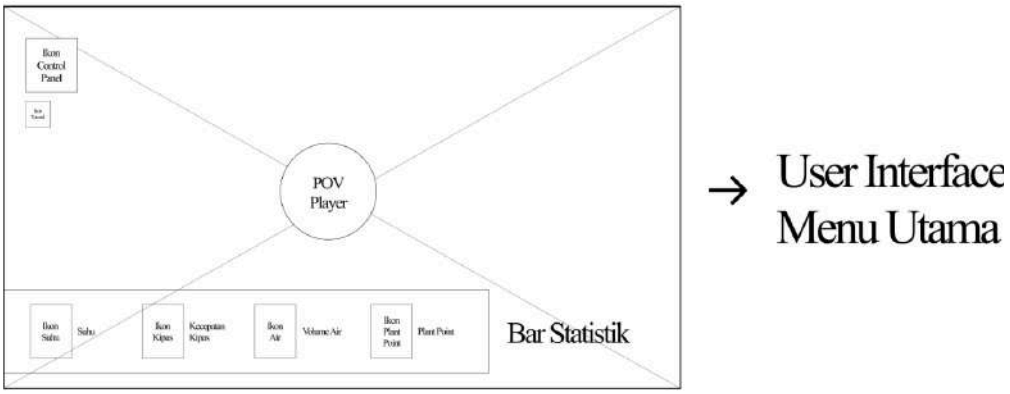


Gambar 3.3 Sketsa 3D Environment

Gambar sketsa terkait bagaimana bentuk dari lingkungan *Greenhouse* dapat dinilai dari Gambar 3.3. Dapat dilihat pada gambar, bentuk awal dari *Greenhouse* beserta beberapa alat seperti kipas dan Pipa dari Hidroponik

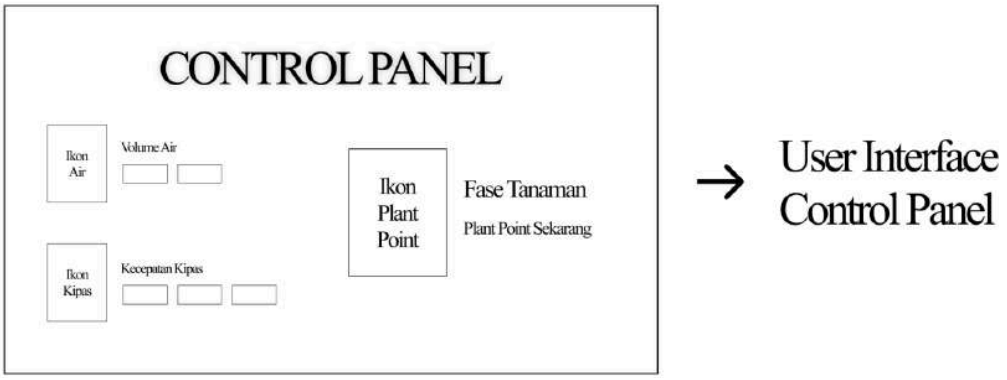
Interaksi utama pengguna terhadap simulasi difasilitasi melalui antarmuka pengguna (UI) virtual yang membagi tampilan operasional menjadi tiga panel utama:

1. **UI Menu Utama:** Menampilkan sudut pandang pemain (*POV Player*) yang dilengkapi dengan bar statistik di bagian bawah layar yang berfungsi untuk memantau indikator suhu, status kipas, volume nutrisi, dan perolehan *Plant Point* secara *real-time*, serta memuat ikon navigasi untuk membuka panel kontrol dan panduan tutorial. Gambarn visual terkait UI Menu Utama dapat dilihat di gambar 3.4



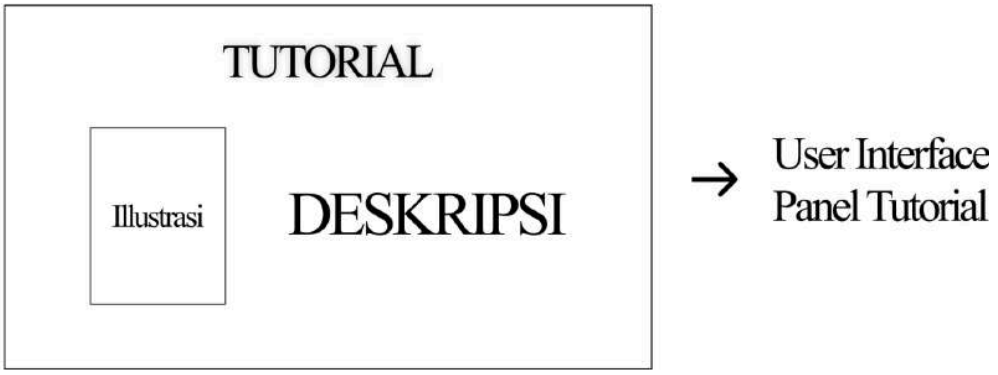
Gambar 3.4 Gambar User Interface Menu Utama

2. **UI Control Panel:** Berfungsi sebagai pusat kendali operasional yang memungkinkan pengguna untuk melakukan intervensi lingkungan dan memantau status fase biologis tanaman secara spesifik. Sesuai pada gambar 3.5 komponen yang dapat diubah adalah Nutrisi dan Kipas, Fase pada kontrol panel hanya bersifat menampilkan *Plant Point*.



Gambar 3.5 Gambar Kontrol Panel

3. **UI Panel Tutorial:** Berisi ilustrasi visual dan teks deskripsi sebagai panduan objektif simulasi. Panel ini diprogram untuk muncul secara otomatis pada awal permainan Hasil Visual dapat dilihat di Gambar 3.6 yang kurang lebih berisi Ilustrasi dan Deskripsi langkah Tutorial



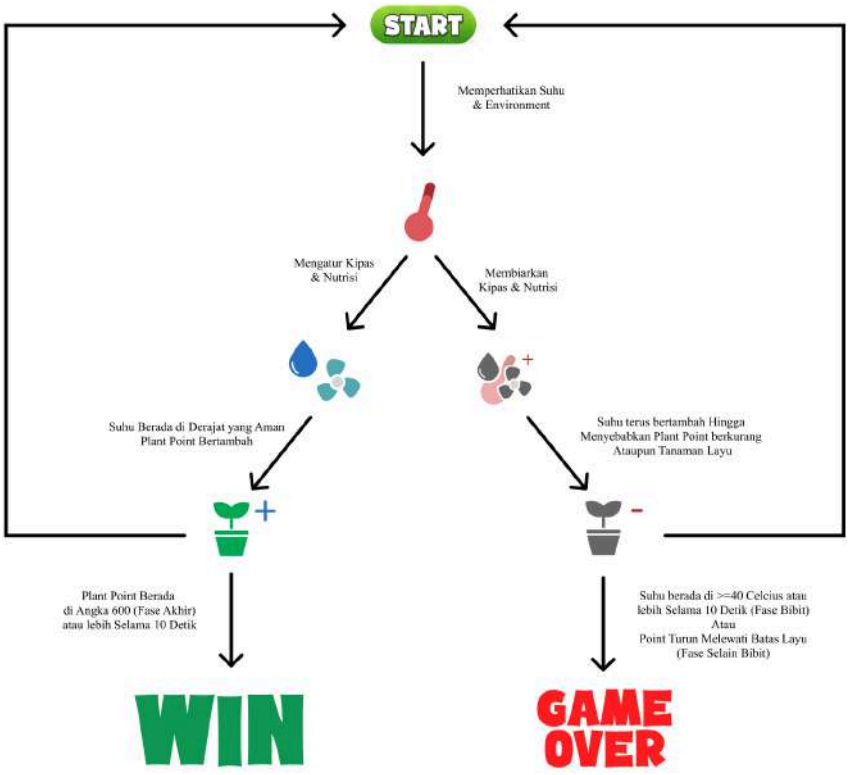
Gambar 3.6 Rancangan Antarmuka Tutorial

Selanjutnya Sistem menyediakan dua mode skenario utama yaitu Mode Bebas dan Mode Simulasi. Penjelasan kedua mode tersebut sebagai berikut

1. Mode Bebas : Mode eksperimen bebas risiko tanpa batasan waktu dan sistem poin. Pengguna memiliki kendali manual penuh terhadap variabel lingkungan untuk mengamati perubahan kondisi tanpa adanya *game over*. Mode ini juga berfungsi ganda sebagai sarana adaptasi bagi pengguna pemula untuk mengenali mekanisme kontrol VR sebelum masuk ke simulasi inti.
2. Mode Simulasi : Merupakan *core gameplay* dari sistem ini. Sebelum simulasi berjalan (*timer* dan logika aktif), sistem akan menampilkan panel *Tutorial* sebagai panduan awal agar pengguna memiliki tujuan yang jelas. Setelah tutorial diselesaikan, sistem otomasi mulai berjalan secara *real-time*. Pada mode ini, suhu ruangan tidak statis, melainkan diprogram untuk mengalami kenaikan alami sebesar 0°C hingga 3°C setiap 3 detik. Pengguna dituntut secara aktif menyeimbangkan suhu dan volume Nutrisi

Secara lebih detail, alur permainan pada Mode Simulasi beroperasi berdasarkan siklus keputusan yang diilustrasikan pada Gambar 3.6 Siklus diawali dengan kewajiban pengguna untuk secara visual memantau keadaan suhu dan kondisi lingkungan *greenhouse*. Dari titik observasi ini, alur simulasi terbagi menjadi dua skenario utama. Jika pengguna mengambil tindakan yang tepat untuk mengatur kipas dan Nutrisi melalui *Control Panel*, suhu akan bertahan di derajat yang aman sehingga *Plant Point* akan terus bertambah dan wujud tanaman akan berprogres ke fase berikutnya. Namun sebaliknya, jika membiarkan kipas dan Nutrisi tidak terkelola, suhu alami akan terus merambat naik hingga menyebabkan

Plant Point berkurang secara drastis. Penurunan poin ini akan memicu siklus degradasi, di mana wujud tanaman akan berubah menjadi layu sebagai bentuk peringatan visual.



Gambar 3.7 Core Gameplay

Berkelanjutan sesuai gambar 3.7 Simulasi ini akan berakhir dengan keberhasilan (WIN) apabila pengguna mampu mempertahankan *Plant Point* di angka 600 (fase akhir pertumbuhan) selama 10 detik berturut-turut. Sebaliknya, simulasi akan *GAME OVER* melalui dua kondisi: pertama, pada fase bibit awal jika suhu dibiarkan menembus angka lebih dari sama dengan 40°C selama 10 detik atau pada fase lanjutan jika pengguna membiarkan tanaman yang sudah layu terus mengalami penurunan poin hingga menyentuh batas kematian.

3.2.2. Logika Gamifikasi (*Rule-Based System*)

Sistem penilaian dalam simulasi ini diatur oleh algoritma *Rule-Based System* (RBS). Algoritma ini bertugas membaca kondisi suhu dan volume Nutrisi di dalam *greenhouse* secara langsung. Dari hasil pembacaan tersebut, sistem akan memutuskan apakah pengguna berhak mendapatkan tambahan poin atau justru mendapat hukuman pengurangan *Plant Point*. Proses perhitungan naik-turunnya poin ini dievaluasi terus-menerus setiap 1 detik selama simulasi dimainkan.

Sebagai tantangan utama dalam simulasi, suhu di dalam *greenhouse* diprogram untuk terus memanas secara otomatis layaknya efek rumah kaca sungguhan. Suhu awal greenhouse ketika simulasi dijalankan adalah 20 yang dimana itu adalah suhu minimal dalam simulasi namun setiap interval 3 detik, suhu ruangan akan bertambah panas secara acak antara kisaran 0°C hingga 3°C. Dengan adanya sistem panas alami ini, pengguna dipaksa untuk terus aktif memantau kondisi ruangan. Respons pengguna dalam mengatasi panas alami inilah yang kemudian akan dievaluasi oleh sistem untuk menentukan jumlah poin yang didapatkan.

3.2.2.1. Mekanik Suhu

Sebagaimana yang dijelaskan sebelumnya, tantangan utama dalam game ini adalah naiknya suhu secara random tiap 3 detik antara 0-3°C dimana hal ini bersifat auto increment yaitu terus terjadi setiap 3 detik. Untuk menanggulangi hal tersebut dibuatlah kipas sebagai melawan kenaikan suhu yang sebagai menurunkan suhu. Penggunaan aktuator kipas ini dilandasi oleh efektivitasnya dalam mereduksi penumpukan panas secara empiris, sehingga mampu

mengkondisikan iklim mikro yang ideal bagi tanaman (M. A. Maulana et al., 2026). Kipas dapat diatur oleh pengguna sesuai kecepatannya yang tiap kecepatan memberi efek yang berbeda dijelaskan pada Tabel 3.1

Tabel 3.1 Efek Kecepatan Kipas terhadap Penurunan Suhu

Tabel Efek Kipas		
Level Kipas	**Status Kipas**	**Waktu Pendinginan**
0	Mati	-
1	Lambat	-1°C / 1,5 detik
2	Cepat	-1°C / 1 detik

Tabel 3.1 merepresentasikan "senjata" pengguna untuk melawan kenaikan suhu ruangan, pengguna dapat mengaktifkan kipas jika membuka control panel dan memilih kecepatannya. Ketika kipas dinyalakan maka suhu akan berkurang yang hal ini bersifat auto decrement dimana ini terjadi tiap detik sesuai kecepatan kipas. Kipas juga dapat dimatikan atau diubah kecepatannya jika pengguna ingin bereksperimen namun tentunya juga menghasilkan auto decrement yang berbeda.

3.2.2.2. Mekanik *Plant Point*

Setelah dapat mengatur perubahan suhu antara naik dan turunnya suhu pada suatu greenhouse, pengguna akan mendapatkan reward berupa *Plant Point* yang banyak jumlahnya sesuai angka suhu tiap detiknya. Untuk detail *Plant Point* yang dihasilkan sesuai tiap detiknya dapat dilihat di tabel 3.2 pada halaman selanjutnya

Tabel 3.2 Aturan Suhu terhadap *Plant Point*

Tabel Aturan Suhu		
Kondisi / Range	**Efek Poin**	**Keterangan**
20°C - 25°C	5 Poin / detik	Suhu dingin/sejuk.
26°C - 30°C	10 Poin / detik	Kondisi Ideal (Pertumbuhan tercepat).
31°C - 35°C	5 Poin / detik	Mulai kepanasan, pertumbuhan melambat.
> 35°C	-10 Poin / detik	Sangat Panas! Poin berkurang drastis (Tanaman rusak).

Tabel 3.2 merepresentasikan kebutuhan biologis tanaman melon yang membutuhkan suhu hangat untuk tumbuh optimal. Rentang 26°C hingga 30°C diklasifikasikan sebagai suhu "Ideal", di mana sistem memberikan imbalan tertinggi berupa penambahan 10 poin setiap detiknya. Hal ini sejalan dengan penelitian yang menyatakan bahwa suhu udara sangat berpengaruh terhadap proses asimilasi dan respirasi pada tanaman, di mana apabila suhu meningkat maka proses fotosintesis akan ikut meningkat hanya sampai pada batas optimumnya (Wilujeng et al., 2024).

Sebagai contoh skenario: Apabila pengguna bersikap pasif dan membiarkan suhu merambat naik secara alami hingga menembus angka 36°C, sistem akan membaca kondisi "Panas Ekstrem" dan langsung memberikan penalti dengan memotong 10 poin setiap detiknya. Penurunan poin drastis ini diterapkan karena rentang suhu optimal melon maksimal berada di angka 35°C, sehingga suhu yang melebihi batas tersebut merupakan kondisi cekaman panas yang berisiko merusak jaringan fisiologis tanaman .

Untuk membantu Bertambahnya *Plant Point* ada "senjata" tambahan dimana pengguna dapat mengatur Nutrisi, berbeda dengan kipas pengaturan

Nutrisi disini tidak berpengaruh suhu namun langsung berpengaruh ke *Plant Point*, Penambahan Plant poin disini bersifat *Auto Increment* yang terjadi tiap detiknya. Untuk besar point yang dihasilkan tergantung dengan pilihan nutrisi yang dipilih untuk detail aturan Nutrisi dapat dilihat di tabel 3.3.

Tabel 3.3 Aturan Nutrisi terhadap *Plant Point*

Tabel Aturan Nutrisi		
Range	**Efek Poin**	**Keterangan**
Cukup	5 Poin / detik	Pemberian Nutrisi cukup banyak.
Sedikit	2 Poin / detik	Pemberian Nutrisi setengah atau sedikit.
Kosong	0 Poin	Tidak ada Nutrisi, tidak ada bonus poin.

Sesuai dengan Efek Point pada Tabel 3.3, penambahan *Plant Point* dalam simulasi *greenhouse* ini akan terjadi tiap detiknya bergantung pada takaran nutrisi yang diatur oleh pengguna melalui *Control Panel*. Pemberian poin laju pertumbuhan ini didasarkan pada tingkat ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Takaran pada kondisi 'Cukup' merepresentasikan konsentrasi nutrisi AB Mix yang optimum, yakni sebesar 1800 ppm (Wahyudi et al., 2025). Pada konsentrasi 1800 ppm ini, pemenuhan unsur hara makro dan mikro berada pada kisaran yang mendukung pertumbuhan fisik tanaman melon secara maksimal. Kondisi 'Cukup' ini terbukti lebih baik dibandingkan jika nutrisi diberikan terlalu penuh atau berlebih (misalnya 2100 ppm), karena konsentrasi yang terlampau tinggi justru mengakibatkan tanaman mengalami stres osmotik dan ketidakseimbangan hara yang menghambat penyerapan air dan nutrisi oleh akar.

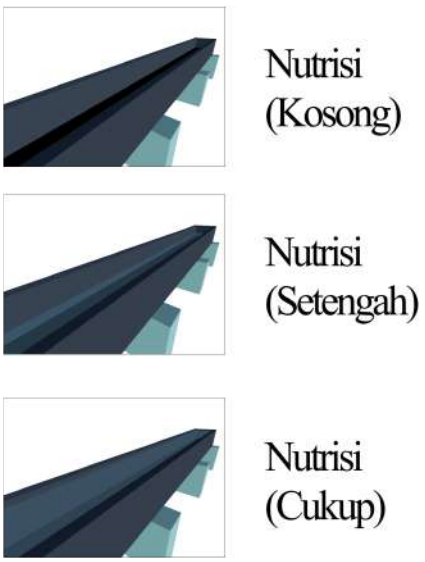
Sementara itu, opsi 'Sedikit' merepresentasikan konsentrasi nutrisi yang lebih rendah atau setengahnya, yaitu pada kisaran 1200 ppm hingga 1500 ppm. Pada konsentrasi ini, tanaman tetap mendapatkan poin pertumbuhan meskipun

lajunya lebih lambat karena asupan hara tidak seoptimal pada takaran 1800 ppm. Sebaliknya, jika nutrisi berada pada kondisi 'Kosong' (0 ppm), tanaman sama sekali tidak akan menghasilkan poin pertumbuhan karena ketiadaan suplai unsur hara yang dapat diserap untuk menunjang perkembangannya.

Sebagai hasil dari pemenuhan nutrisi yang optimal tersebut, perkembangan visual tanaman melon di dalam simulasi direpresentasikan melalui kolom Perkiraan Tinggi yang acuannya disesuaikan dengan kurva pertumbuhan empiris tanaman melon (*Cucumis melo L.*) pada sistem irigasi tetes (Esperanza et al., 2023). Pada Fase Awal yang merupakan masa pindah tanam, tanaman diasumsikan masih berupa bibit awal dengan tinggi 3–10 cm. Memasuki Fase Tengah (28 HST), penyerapan hara yang baik memicu lonjakan pertumbuhan vegetatif secara pesat sehingga tinggi tanaman melon diproyeksikan mencapai rentang 175–185 cm. Kemudian pada Fase Dewasa (49 HST), tanaman mulai memfokuskan nutrisinya pada fase generatif dan pembentukan buah dengan perkiraan tinggi mencapai rentang 300–330 cm. Hingga akhirnya di Fase Akhir (56 HST), laju pemanjangan batang semakin melambat karena tanaman berfokus pada proses pematangan buah menjelang panen, dengan puncak tinggi maksimal berada pada rentang 320–340 cm.

Poin akhir yang didapatkan pengguna pada setiap detiknya adalah hasil gabungan dari evaluasi variabel suhu dan variabel Nutrisi pada detik tersebut. Sebagai contoh skenario perhitungan: Jika pada satu detik tertentu pengguna berhasil menjaga suhu di angka 28°C (Ideal = +10 Poin) dan Nutrisi berada di status Cukup(+5 Poin), maka pengguna mendapatkan total penambahan +15 Poin

di detik tersebut. Sebaliknya, jika suhu dibiarkan 38°C (Panas Ekstrem = -10 Poin) dan Nutrisi dibiarkan kosong (Kosong = 0 Poin), maka total poin pengguna akan dipotong sebanyak 10 poin di detik tersebut.Akumulasi *Plant Point* yang terus bergerak inilah yang nantinya digunakan sebagai pemicu utama untuk mengubah wujud visual tanaman. Mekanisme transisi perubahan wujud 3D tanaman ini tidak lagi dieksekusi oleh RBS, melainkan diatur secara spesifik menggunakan algoritma FSM yang dibahas pada sub-bab selanjutnya.



Gambar 3.8 Gambaran Nutrisi Tiap Level

Gambar 3.8 memperlihatkan visualisasi Tiap Pilihan Nutrisi, dimana tiap pilihan memvisualisasikan bentuk yang berbeda, Kosong secara visual terlihat seperti tidak ada apa-apa dalam sebuah wadah, Setengah memvisualisasikan air yang sedikit dan terakhir Nutrisi Cukup memvisualisasikan Air yang memenuhi wadah disamakan dengan cukup.

3.2.3. *Finite State Machine* (FSM)

Algoritma *Finite State Machine* (FSM) diimplementasikan sebagai pengendali logika untuk mengubah wujud visual objek 3D tanaman melon di dalam lingkungan virtual. Konsep dasar dari FSM memastikan bahwa sebuah tanaman hanya dapat berada pada satu wujud tertentu pada satu waktu, dan baru akan berubah secara ke wujud lainnya apabila syarat pemicunya terpenuhi.

Pemicu utama yang digunakan untuk melakukan transisi fase adalah total akumulasi *Plant Point* yang dikalkulasi oleh algoritma *Rule-Based System* (RBS). Sistem membagi siklus pertumbuhan tanaman melon menjadi empat *state* utama (fase progresif), dan dilengkapi dengan *state* penyimpangan berupa Kondisi Layu serta kondisi terminal kegagalan (*Game Over*).

Implementasi *State* Layu dan *Game Over* dirancang sebagai konsekuensi biologis yang realistis akibat kesalahan manajemen lingkungan. Wujud 3D tanaman tidak akan mengalami kemunduran ke fase sebelumnya , melainkan akan bertransisi secara berurutan: dari sehat menjadi layu, dan jika dibiarkan akan berujung pada kematian tanaman . Aturan ambang batas poin untuk transisi pertumbuhan normal, kondisi layu, hingga batas kegagalan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

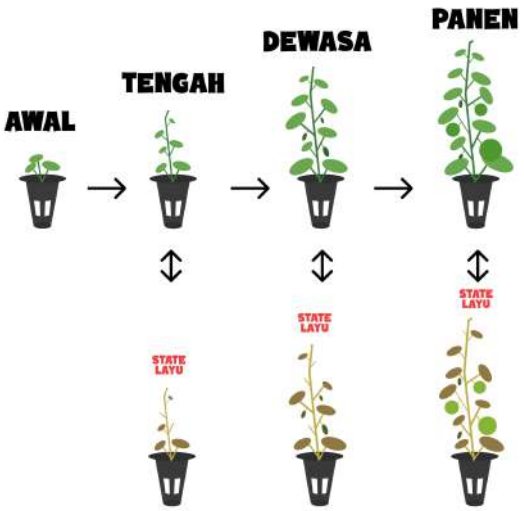
Tabel 3.4 Aturan Transisi Fase Tanaman & Degradasi Poin

Tabel Fase Tanaman (Plant Stages)					
Nama Fase	**Plant Point**	**Batas Pemicu State Layu**	**Batas Pemicu Game Over**	**Syarat Pemulihan**	**Perkiraan Tinggi**
Awal	0 – 199 Poin	Tidak berlaku	Suhu Mencapai >= 40	Tidak berlaku	3 – 10 cm
Tengah	200 – 449 Poin	Menyentuh 180 Poin	Menurun hingga 120 Poin	Poin kembali >= 200	175 – 185 cm

Dewasa	450 – 599 Poin	Menyentuh 430 Poin	Menurun hingga 370 Poin	Poin kembali >= 450	300 – 330 cm
Akhir	>= 600 Poin	Menyentuh 580 Poin	Menurun hingga 520 Poin	Poin kembali >= 600	320 – 340 cm

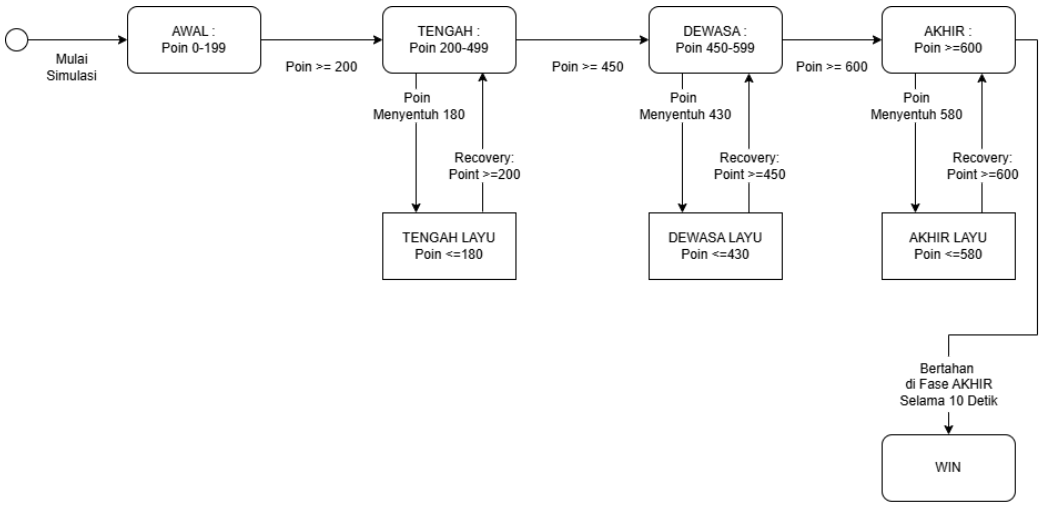
Berdasarkan Tabel 3.4, alur transisi penyimpangan diformulasikan dengan dua mekanisme yang berbeda berdasarkan usia tanaman. Pada fase Awal Apabila parameter suhu menembus angka lebih dari sama dengan 40°C selama 10 detik, FSM akan langsung memicu *state* Game Over. Sementara itu, pada fase pertumbuhan selanjutnya (Tengah, Dewasa, Akhir), sistem menggunakan mekanisme degradasi bertahap. Transisi *State* Layu terjadi ketika poin turun menyentuh Batas Minimal Fase - 20. Jika pengguna gagal memperbaiki parameter lingkungan (suhu dan nutrisi) sehingga poin terus merosot dan menyentuh Poin Layu - 60 (atau Batas Minimal Fase - 80), barulah FSM akan mengunci sistem ke dalam *state* Game Over, namun jika pengguna dapat menaikkan lagi *Plant Point* yang awalnya berada di fase layu kemudian bertambah lagi +20 atau kembali menyentuh ke angka minimal suatu fase (Tengah, Dewasa, Akhir) maka game akan terus berlanjut.

Contoh Studi kasus adalah tanaman yang berada di fase Tengah akan menjadi masuk ke *state* layu ketika *Plant Point* turun menjadi 180, jika *Plant Point* kembali menurun lagi menyentuh ke angka 120 maka akan memicu *state* Game over. namun jika *Plant Point* berhasil bertambah lagi hingga ke 200 maka tanaman akan kembali ke fase Tengah.



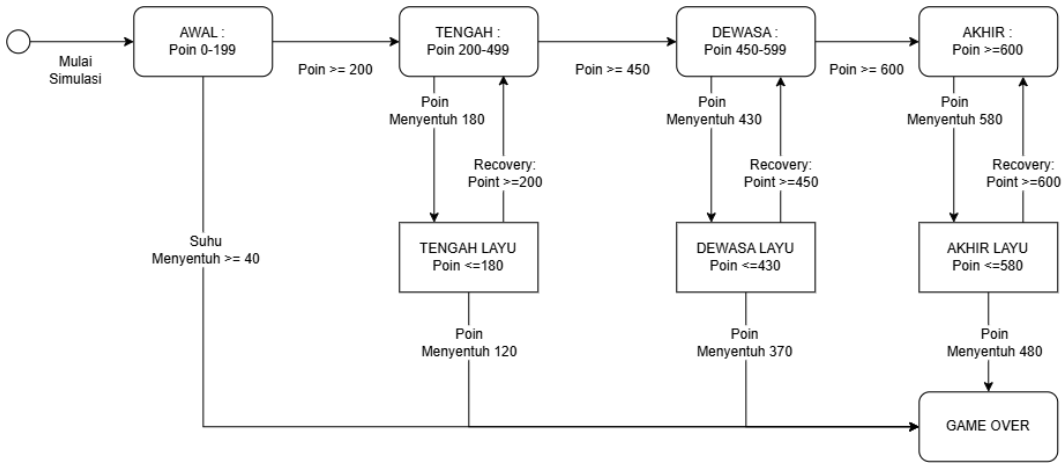
Gambar 3.9 Gambaran Fase Tanaman

Contoh visual dari tiap fase dapat dilihat di gambar 3.9, Jika tanaman saat ini berada di fase Dewasa (batas minimal 450 poin), namun suhu memanas sehingga poin berkurang menjadi 430 poin, FSM akan memicu transisi menjadi Dewasa Layu. Jika pengguna tetap membiarkan kondisi tersebut dan poin terus turun hingga menyentuh angka 370 poin, simulasi langsung dihentikan dan dinyatakan gagal (*Game Over*). Sebaliknya, untuk mengembalikan tanaman ke wujud sehatnya semula, pengguna harus mengelola *greenhouse* dengan baik hingga *Plant Point* naik kembali menyentuh angka 450 poin (*Recovery*). Selain *state* kegagalan, FSM juga mengatur *state* terminal untuk keberhasilan terdapat State Simulasi Berhasil (WIN) dimana Dipicu jika pengguna berhasil merawat dan mempertahankan tanaman pada fase sehat di state Dewasa selama 10 detik berturut-turut. Secara visual, seluruh logika perpindahan fase progresif, degradasi bertahap (layu hingga mati), serta kondisi terminal keberhasilan direpresentasikan melalui diagram *Finite State Machine* (FSM).



Gambar 3.10 *Finite State Machine Win*

Gambar 3.10 memaparkan alur logika *Finite State Machine* (FSM) yang mengatur transisi pencapaian kondisi keberhasilan atau *Win*. Alur pertumbuhan tanaman dikondisikan berjalan secara progresif dari fase AWAL (0–199 poin), bergerak menuju fase TENGAH (200–449 poin) dan fase DEWASA (450–599 poin), hingga akhirnya menembus fase AKHIR (≥ 600 poin) seiring dengan peningkatan *Plant Point* yang optimal. Meskipun mekanisme degradasi menjadi layu (saat poin turun ke 180, 430, atau 580 poin) serta peluang pemulihannya (*recovery*) tetap terintegrasi sebagai dinamika tantangan, fokus utama dari FSM ini adalah penyelesaian simulasi. Untuk dapat memicu kondisi *Win* dan memanen tanaman, sistem menetapkan syarat bahwa pengguna dituntut untuk mencapai akumulasi 600 poin serta menjaga stabilitas nutrisi dan lingkungan agar tanaman dapat bertahan dengan sehat di fase AKHIR selama 10 detik.



Gambar 3.11 *Finite State Machine Game Over*

Gambar 3.11 mengilustrasikan alur logika *Finite State Machine* (FSM) yang berfokus pada kondisi kegagalan simulasi atau *Game Over*. Sama seperti alur pertumbuhan utamanya, simulasi diawali pada fase AWAL (0–199 poin) dan dapat terus berkembang ke fase selanjutnya. Namun, sistem mengatur beberapa parameter fatal yang akan menghentikan simulasi jika pengguna melakukan kesalahan manajemen. Kegagalan pertama dapat dipicu secara instan apabila suhu ruangan menyentuh ≥ 40°C saat tanaman masih berada di fase AWAL. Selain itu, sistem mengakomodasi penalti melalui degradasi wujud tanaman menjadi layu (TENGAH LAYU, DEWASA LAYU, dan AKHIR LAYU) saat poin merosot menyentuh batas kritis (180, 430, dan 580 poin). Apabila pengguna gagal melakukan pemulihan (*recovery*) dan membiarkan *Plant Point* terus menurun hingga menyentuh batas fatal di masing-masing fase—yakni 120 poin pada fase tengah, 370 poin pada fase dewasa, dan 480 poin pada fase akhir—maka sistem akan secara otomatis memicu kondisi *Game Over* karena tanaman dianggap telah mati.

3.3. Metode Evaluasi Sistem

Tahap pengujian berfokus pada evaluasi kualitas pengalaman VR secara komprehensif dari tiga aspek utama, yaitu: tingkat imersi spasial, tingkat kenyamanan fisik pengguna, dan efektivitas nilai edukasi. Pengujian ini menggunakan kombinasi tiga instrumen kuesioner, yaitu Igroup Presence Questionnaire (IPQ), Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), dan Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi.

3.3.1. Kriteria Pemilihan Responden

Pemilihan responden dalam penelitian ini menggunakan metode *Purposive Sampling* dengan melibatkan total 40 responden. Responden dipilih dan dibagi ke dalam tiga segmentasi demografi berdasarkan tingkat literasi teknologi dan pemahaman dasar mengenai perawatan tanaman, dengan rincian sebagai berikut:

1. Kelompok Pemula (10 Responden)

   Kelompok ini terdiri dari pelajar tingkat SMP hingga SMA yang merepresentasikan target utama dari aspek edukasi simulasi. Responden pada kategori ini diklasifikasikan sebagai *novice user* yang memiliki ketertarikan untuk mempelajari cara merawat tanaman di dalam *greenhouse*, namun belum memiliki pengetahuan teknis maupun pengalaman mendalam terkait agronomi. Pengujian pada kelompok ini bertujuan untuk mengukur tingkat keberhasilan aplikasi dalam menyampaikan informasi dan edukasi dasar.

2. Kelompok Pengguna Kasual (20 Responden)

   Kelompok ini terdiri dari kalangan mahasiswa yang memiliki rekam jejak berinteraksi dengan aplikasi permainan (*game*) secara kasual. Mereka diklasifikasikan sebagai pengguna yang melek teknologi (*tech-savvy*) dan memahami bagaimana logika dasar atau mekanik sebuah simulasi beroperasi. Pengujian pada segmentasi dengan porsi responden terbesar ini difokuskan untuk memvalidasi kenyamanan interaksi pengguna (UX), antarmuka (UI), serta kelancaran fungsionalitas sistem di dalam lingkungan *Virtual Reality*.

3. Kelompok Dewasa (10 Responden)

   Kelompok ini mewakili kalangan masyarakat dewasa (berusia 30 tahun ke atas) yang diasumsikan kurang familier dengan teknologi simulasi modern, namun memiliki pengalaman praktis atau insting yang lebih matang terkait perawatan tanaman di dunia nyata dibandingkan dua kelompok lainnya. Pengujian pada kelompok ini bertujuan untuk menilai tingkat aksesibilitas sistem bagi pengguna awam teknologi, sekaligus memvalidasi apakah logika respons dan pertumbuhan tanaman di dalam simulasi sudah cukup logis menyerupai kondisi aslinya.

3.3.2. Prosedur Pengujian

Proses pengujian sistem akan melibatkan sebanyak 20 orang. Kriteria pemilihan responden pada pengujian ini adalah pengguna yang setidaknya pernah memiliki pengalaman bermain simulasi sebelumnya untuk memastikan insting navigasi dasar. Setiap responden akan menguji dan mengevaluasi simulasi menggunakan dua perangkat keras yang berbeda. Untuk menjaga objektivitas data dan mencegah akumulasi *cybersickness*, prosedur pengujian dilakukan dengan tahapan sebagai berikut

1. Tahap Persiapan : Responden diberikan penjelasan mengenai tujuan penelitian, alur simulasi, serta cara pengoperasian *controller* dasar sebelum pengujian dimula. Responden juga diminta untuk mengisi SSQ.
2. Tahap Pengujian Sesi 1 (*Mobile VR*): Responden diinstruksikan untuk menyelesaikan skenario Mode Simulasi menggunakan perangkat *Mobile VR* dan *smartphone*. Tahap ini menjadi standar acuan untuk pengalaman VR berbiaya rendah.
3. Tahap Jeda Istirahat & Pengumpulan Data 1 : Setelah Sesi 1 selesai, responden beristirahat selama 10 hingga 15 menit tanpa melihat layar juga mengisi instrumen kuesioner meliputi IPQ dan SSQ. Jeda ini bertujuan untuk menetralisir sistem vestibular (keseimbangan) responden dan mencegah bias kelelahan mata sebelum pengujian sesi kedua. .
4. Tahap Pengujian Sesi 2 (Oculus VR): Responden diinstruksikan untuk kembali menjalankan skenario simulasi yang persis sama, namun kali ini menggunakan perangkat Oculus.

5. Tahap Pengumpulan Data 2: Setelah kedua sesi diselesaikan, responden diminta untuk mengisi instrumen kuesioner kembali, meliputi IPQ dan SSQ.

3.3.3. Struktur Kuesioner dan Daftar Pertanyaan

Pengumpulan data menggunakan tiga set instrumen dengan fokus pengukuran yang berbeda yaitu IPQ sebagai penilaian seberapa imersif VR, SSQ sebagai penilaian seberapa aman VR, dan Kuesioner edukasi sebagai penilaian seberapa bertambahnya edukasi pengguna.

1. Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

   Kuesioner ini dirancang secara spesifik untuk menilai seberapa jauh teknologi VR meyakinkan otak pengguna bahwa lingkungan virtual yang mereka lihat adalah nyata (Melo et al., 2023). Kuesioner terdiri dari 14 butir pertanyaan dengan Skala Likert 7 titik (1 = Sangat Tidak Setuju, 7 = Sangat Setuju), mencakup dimensi *Presence* (PRES), *Spatial Presence* (SP), *Involvement* (INV), dan *Experienced Realism* (ER).

Tabel 3.5 Daftar Pertanyaan *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ)

Kode	**Dimensi**	**Pernyataan / Pertanyaan Kuesioner**	**Sifat Penilaian**
PRES	*Overall Presence*	Di dalam dunia virtual, saya memiliki sensasi "benar-benar berada di sana".	Normal
SP1	*Spatial Presence*	Saya merasa bahwa dunia virtual tersebut mengelilingi saya.	Normal
SP2	*Spatial Presence*	Saya merasa seperti hanya sekadar sedang melihat gambar-gambar saja.	*Reverse*
SP3	*Spatial Presence*	Saya merasa berada di dalam ruang virtual.	Normal
SP4	*Spatial Presence*	Saya merasa sedang beraktivitas di dalam ruang virtual	Normal
SP5	*Spatial Presence*	Saya merasa benar-benar hadir di dalam di dalam lingkungan Greenhouse	Normal

INV1	*Involvement*	Seberapa sadar Anda terhadap lingkungan nyata di sekitar Anda saat di dunia virtual?	*Reverse*
INV2	*Involvement*	Saya sama sekali tidak menyadari lingkungan dunia nyata di sekitar saya.	Normal
INV3	*Involvement*	Saya masih memperhatikan lingkungan dunia nyata di sekitar saya.	*Reverse*
INV4	*Involvement*	Saya sepenuhnya terpikat dan terhanyut oleh dunia virtual.	Normal
ER1	*Experienced Realism*	Seberapa nyata dunia virtual tersebut terasa bagi Anda?	Normal
ER2	*Experienced Realism*	Sejauh mana pengalaman virtual terasa mirip dengan pengalaman di dunia nyata?	Normal
ER3	*Experienced Realism*	Seberapa realistis Greenhouse virtual bagi Anda?	Normal
ER4	*Experienced Realism*	Dunia virtual tersebut terasa lebih realistis daripada dunia nyata.	Normal

Tabel 3.5 menunjukkan Daftar lengkap 14 pertanyaan IPQ, untuk memudahkan analisis data beberapa pertanyaan dirancang dalam bentuk pernyataan negatif yang nilainya harus dibalik saat perhitungan.Pertanyaan dari setiap Dimensi pada Tabel akan diakumulasikan dan dibandingkan dengan Skala IPQ untuk menilai apakah VR layak atau tidak.

2. Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Instrumen yang diadaptasi dari (Kennedy et al., 1993) digunakan untuk mengukur tingkat ketidaknyamanan atau *cybersickness* akibat penggunaan VR. Pengukuran menggunakan 16 butir gejala fisik yang dinilai dengan skala 4 titik: 0 (Tidak Ada), 1 (Ringan), 2 (Sedang), 3 (Berat).

Tabel 3.6 Daftar Gejala *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ)

No	Gejala yang Dirasakan
1	Ketidaknyamanan umum (*General discomfort*)
2	Kelelahan (*Fatigue*)
3	Sakit kepala *(Headache*)
4	Mata tegang (*Eye strain*)
5	Kesulitan fokus (*Difficulty focusing*)
6	Peningkatan air liur (*Increased salivation*)
7	Berkeringat (*Sweating*)
8	Mual (*Nausea*)
9	Kesulitan berkonsentrasi (*Difficulty concentrating*)
10	Kepala terasa penuh/berat *(Fullness of head*)
11	Penglihatan kabur (*Blurred vision*)
12	Pusing dengan mata terbuka (*Dizzy eyes open*)
13	Pusing dengan mata tertutup (*Dizzy eyes closed*)
14	Vertigo
15	Perut terasa tidak enak (*Stomach awareness*)
16	Bersendawa (*Burping*)

Tabel 3.6 menunjukkan 16 Atribut yang akan diklasifikasi sesuai dengan 4 dimensi Kennedy yaitu *Nausea*, *Oculomotor*, dan *Disorientation*, dan *Total Severity*. Kemudian tiap kelasnya akan dikalikan bobot tiap dimensi, yang hasil akhirnya akan ditentukan apakah VR aman secara kesehatan atau tidak.

3. Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi

Kuesioner ini dirancang untuk mengukur efektivitas pemahaman yang diterima pengguna setelah menjalankan simulasi. Pengukuran menggunakan Skala Likert 5 titik (1 = Sangat Tidak Setuju hingga 5 = Sangat Setuju) dengan 5 butir pernyataan utama.

Tabel 3.7 Daftar Pernyataan Evaluasi Nilai Edukasi

No	Pernyataan
1	Simulasi membantu saya memvisualisasikan hubungan sebab-akibat antara suhu ruangan dan kondisi tanaman sebagai implementasi simulasi yang bersifat interaktif.
2	Setelah mencoba simulasi Plant Simulate, saya menjadi lebih paham mengenai risiko kegagalan panen akibat kesalahan kontrol suhu dan nutrisi.
3	Fitur *Plant Point* (gamifikasi) memotivasi saya untuk lebih memperhatikan parameter lingkungan greenhouse.
4	Bermain Plant Simulate memberikan gambaran manajemen greenhouse yang lebih jelas dibandingkan hanya membaca buku teori.
5	Saya merasa simulasi Plant Simulate adalah tempat berlatih yang aman sebelum mengelola tanaman melon di greenhouse yang sesungguhnya.

Tabel 3.7 menunjukkan 5 pertanyaan edukasi, dimana hasil 5 pertanyaan tersebut akan memberikan jawaban apakah secara edukasi VR ini memberi penambahan pengetahuan bagi pengguna atau tidak

3.3.4. Analisis Data dan Skala Kualitatif

Data kuantitatif yang diperoleh dari ketiga instrumen kuesioner akan diolah dan dianalisis menggunakan metode perhitungan dan skala kualitatif yang berbeda sesuai dengan karakteristik masing-masing pengujian.

1. Analisis Data Igroup Presence Questionnaire (IPQ)

   Data yang diperoleh dari pengisian kuesioner IPQ akan diolah untuk mendapatkan nilai rata-rata dari setiap dimensi. Proses perhitungan dilakukan dengan aturan sebagai berikut:

   1. Pernyataan Normal: Nilai skor yang dimasukkan adalah nilai asli yang dipilih responden (1 hingga 7).

2. Pernyataan *Reverse*: Nilai skor harus dibalik. Rumus perhitungannya adalah: Skor Akhir = 8 - Nilai yang dipilih. (Contoh: Jika responden menjawab 7, maka skor yang dihitung adalah 1).
3. Nilai akhir setiap dimensi diperoleh dengan menghitung nilai rata-rata (*mean*) dari kumpulan pertanyaan di dimensi tersebut.

Untuk menginterpretasikan nilai rata-rata tersebut menjadi sebuah kesimpulan yang bermakna, penelitian ini mengadopsi standar skala kualitatif IPQ yang diusulkan oleh (Melo et al., 2023). Nilai rata-rata dari setiap responden diakumulasi tiap dimensi kemudian dikonversi menjadi predikat huruf dan kategori kelayakan sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Skala Penilaian Kualitatif IPQ Tiap Dimensi (Skala Likert 7 Titik)

Presence	***Spatial Presence***	***Involvement***	***Experienced Realism***	**Predikat Huruf**	**Rating Kualitatif**	**Kategori Kelayakan**
≥ 4.41	≥ 5.25	≥ 4.87	≥ 4.50	A	Sangat Baik	Layak
≥ 4.07	≥ 4.76	≥ 4.50	≥ 3.75	B	Baik	Layak
≥ 3.86	≥ 4.50	≥ 4.00	≥ 3.38	C	Memuaskan	Layak
≥ 3.65	≥ 4.25	≥ 3.75	≥ 3.00	D	Batas Bawah	Cukup Layak
≥ 3.47	≥ 4.01	≥ 3.38	≥ 2.63	E	Kurang Memuaskan	Cukup Layak
< 3.47	< 4.01	< 3.38	< 2.63	F	Tidak Diterima	Tidak Layak

Setelah Tiap Dimensi diseleksi Seluruh Skor Tiap Dimensi akan diambil rata-ratanya yang kemudian akan dikonversi lagi ke Skala Penilaian Kualitatif Akumulasi IPQ sebagai skor akhir total dari VR, hasil akhir ini menentukan apakah VR sudah layak secara keseluruhan

Tabel 3.9 Skala Penilaian Kualitatif Akumulasi IPQ (Skala Likert 7 Titik)

Rerata Skor IPQ	Predikat Huruf	Rating Kualitatif	Kategori Kelayakan
≥ 4.757	**A**	Sangat Baik	Layak
≥ 4.27	**B**	Baik	Layak
≥ 3.935	**C**	Memuaskan	Layak
≥ 3.6625	**D**	Batas Bawah	Cukup Layak
≥ 3.3725	**E**	Kurang Memuaskan	Cukup Layak
≤ 3.3725	**F**	Buruk / Tidak Diterima	Tidak Layak

Tabel 3.9 memperlihatkan rincian skor akhir untuk sebuah VR, sistem simulasi *Plant Simulate* dinyatakan berhasil dan layak digunakan sebagai media pelatihan VR apabila rata-rata skor IPQ secara keseluruhan menyentuh batas minimum atau mendapatkan predikat minimal D (Batas Bawah). Hasil dari Predikat akan menentukan skor VR secara keseluruhan.

2. Analisis Data Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)

Analisis data SSQ berfokus pada perbandingan kondisi fisik pengguna sebelum dan sesudah menggunakan *Virtual Reality*. Hal ini didasarkan pada standar modern yang membuktikan bahwa asumsi pengguna selalu dalam kondisi fisik sempurna sebelum simulasi adalah keliru, sehingga pengambilan skor *Pre-exposure* diwajibkan untuk mendapatkan selisih bersih (*Delta*) gejala akibat penggunaan VR (Brown et al., 2022).

Nilai mentah dari 15 gejala yang relevan (0 = Tidak ada, 1 = Ringan, 2 = Sedang, 3 = Berat) dikelompokkan ke dalam tiga klaster utama yaitu *Nausea*, *Oculomotor*, dan *Disorientation*, lalu dikalikan dengan bobot standar SSQ Kennedy (1993) untuk mendapatkan Skor Total SSQ.

Untuk mengevaluasi kelayakan sistem dari sisi kenyamanan, analisis dilakukan dengan menghitung nilai selisih (*Delta*) antara skor *Post-exposure* dan *Pre-exposure*. Berdasarkan pembaruan standar evaluasi SSQ dari literatur VR terkini, ambang batas skor keparahan "buruk" (> 20) yang ditetapkan pada era awal simulator dinilai sudah usang dan tidak lagi merepresentasikan toleransi *cybersickness* pengguna VR modern (Brown et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi standar ambang batas terbaru di mana skor tingkat penolakan dipatok pada angka 40 (Caserman et al., 2021).

Tabel 3.10 Skala Kualitatif Keparahan Simulator Sickness (SSQ)

Rentang Skor	**Kategori Keparahan Gejala**	**Interpretasi Kelayakan**
0 – 10.0	Diabaikan (Negligible)	Sangat Aman / Nyaman
10.1 – 20.0	Ringan (Minimal)	Aman
20.1 – 40.0	Signifikan (Significant)	Kurang Nyaman
> 40.0	Mengkhawatirkan (*Concerning*)	Tidak Layak

Sesuai pada Tabel 3.10 Total SSQ akhir diinterpretasikan menggunakan klasifikasi tingkat keparahan yang telah disesuaikan, Jika Skor aman bagi VR secara SSQ adalah dibawah 20.00 agar VR secara dampak kesehatan masih sangat aman dipakai dan tidak memberikan dampak buruk secara signifikan terhadap kesehatan.

3. Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi

Data kuesioner evaluasi nilai edukasi yang menggunakan Skala Likert 5 titik (1 = Sangat Tidak Setuju hingga 5 = Sangat Setuju) akan dianalisis menggunakan metode analisis persentase (Indeks %). Rumus yang digunakan adalah Indeks (%) = (Total Skor / Skor Maksimal Ideal) × 100% dimana Skor

Maksimal Ideal = Jumlah Responden × Skor Tertinggi (5). Persentase yang diperoleh dari perhitungan tersebut kemudian dicocokkan dengan tabel kriteria interpretasi skor Likert untuk menentukan tingkat keberhasilan pemahaman pengguna.

Tabel 3.11 Skala Kualitatif Kelayakan Nilai Edukasi

Persentase Indeks (%)	**Kategori Penilaian**	**Keterangan**
0% – 20%	Sangat Buruk	Pengguna tidak memahami materi simulasi.
21% – 40%	Buruk	Simulasi kurang membantu pemahaman.
41% – 60%	Cukup	Pemahaman pengguna bersifat netral.
61% – 80%	Baik	Simulasi terbukti membantu pemahaman pengguna.
81% – 100%	Sangat Baik	Simulasi sangat efektif sebagai media edukasi.

Klasifikasi rincian dapat dilihat pada Tabel 3.11, sesuai dengan tabel minimal capaian dari Kuesioner ini adalah 61%, jika hasil akhir melebihi 61% maka simulasi terbukti membantu pemahaman pengguna. Skor Akhir dari IPQ, SSQ, dan Kuesioner edukasi akan memberi Jawaban seberapa layak VR secara imersifitas, kesehatan, dan edukasi.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi Sistem

Pada sub-bab ini dipaparkan hasil akhir dari pengembangan aplikasi *Plant Simulate* yang telah dibangun menggunakan *game engine* Unity 3D. Simulasi lingkungan *greenhouse* serta interaksi di dalamnya merupakan manifestasi dari rancangan gamifikasi yang memadukan algoritma *Rule-Based System* (RBS) sebagai penilai kondisi lingkungan dan *Finite State Machine* (FSM) sebagai pengendali transisi fase biologis tanaman. Seluruh mekanisme kontrol dan antarmuka telah disesuaikan agar dapat beroperasi secara optimal pada perangkat *Mobile VR* menggunakan bantuan *Bluetooth Controller*.

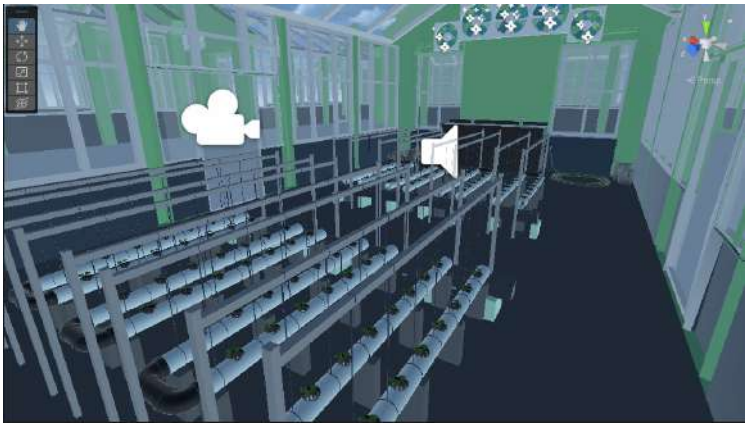
4.1.1. Implementasi Lingkungan dan Antarmuka

Antarmuka pengguna (UI) pada aplikasi ini dirancang menggunakan metode *World Space* agar panel-panel interaktif menyatu dengan lingkungan 3D *greenhouse*. Hal ini bertujuan untuk menjaga tingkat imersi spasial pengguna saat menggunakan *headset* VR. Berikut adalah penjabaran dari masing-masing komponen antarmuka yang telah diimplementasikan:

1. Lingkungan 3D *Greenhouse*

   Lingkungan virtual utama dalam simulasi ini direpresentasikan dalam wujud *greenhouse* tertutup yang dirancang untuk budidaya tanaman melon. Pemodelan objek 3D di dalamnya mencakup struktur bangunan, media tanam, serta aset interaktif seperti kipas angin untuk sirkulasi udara dan sistem nutrisi

Selain itu, terdapat aset 3D tanaman melon yang disiapkan khusus untuk merepresentasikan berbagai fase biologis, mulai dari Awal (*Seed*), fase Tengah (Vegetatif), fase Dewasa (Berbuah), fase panen (Panen), hingga wujud layu akibat kondisi ekstrem. Tata cahaya dan *skybox* diatur sedemikian rupa untuk menciptakan ilusi kedalaman spasial yang realistis saat pengguna melakukan observasi 360 derajat di dalam VR. Tampilan Visual 3D Greenhouse dapat dilihat di Gambar 4.1 dibawah



Gambar 4.1 3D Environment Greenhouse

2. UI Main Menu

Menu Utama merupakan titik awal sebelum pengguna masuk ke dalam simulasi. Pada antarmuka ini, pandangan kamera dikunci menghadap langsung ke arah *Canvas* menu untuk mencegah disorientasi sebelum permainan dimulai. Antarmuka ini menampilkan judul "Plant Simulate" beserta dua opsi mode utama, yaitu Mode Bebas dan Mode Simulasi. Tampilan UI Main. Visualisasi dari Main Menu dapat dilihat di Gambar 4.2 di halaman selanjutnya



Gambar 4.2 Tampilan Main Menu

3. Tampilan Pertama Simulation Mode

Saat pengguna memilih *Simulation Mode*, sistem akan langsung memuat lingkungan *greenhouse*. Sebelum *core gameplay* berjalan, sistem menjeda waktu simulasi dan menghentikan kalkulasi *Rule-Based System* (RBS) untuk sementara waktu. Pengguna akan dihadapkan pada Panel Tutorial agar memahami instruksi awal dan tujuan akhir dari simulasi. Penampakan dari Simulation Mode dapat dilihat di Gambar 4.3 dibawah



Gambar 4.3 Tampilan Gameplay Simulation Mode

4. Tampilan Pertama Free Mode

Terlihat pada Gambar 4.4 Serupa dengan *Simulation Mode*, mode ini juga diawali dengan pemunculan Panel Tutorial secara otomatis. Perbedaannya terletak pada deskripsi materi yang disampaikan pada antarmuka ini sistem menjelaskan bahwa pengguna sedang berada di dalam mode eksperimen bebas risiko tanpa batasan waktu dan sistem poin yang difungsikan sebagai sarana adaptasi.



Gambar 4.4 Tampilan Gameplay Free Mode

5. Panel Pause

Panel ini berfungsi sebagai menu interupsi yang dapat diakses kapan saja oleh pengguna melalui tombol Batal / *Pause* (Tombol B) pada *Bluetooth Controller*. Antarmuka ini menangguhkan seluruh logika simulasi dan menyajikan tiga opsi navigasi vertikal: Lanjut (kembali ke simulasi), Ulang (memulai ulang skenario dari awal), dan Keluar (kembali ke UI Main Menu). visualisasi dari panel pause dapat dilihat di Gambar 4.5 pada halaman selanjutnya



Gambar 4.5 Panel Pause

6. Tampilan Panel Tutorial

Sesuai pada Gambar 4.6, Antarmuka panduan ini berisi ilustrasi visual dan teks instruksi yang memandu pengguna memahami skema kendali VR dasar. Tampilan ini juga menjelaskan bagaimana cara memainkan dan fitur dalam Simulasi ini sendiri. Panel ini dapat dimunculkan kembali kapan saja saat simulasi berjalan.



Gambar 4.6 Tampilan Panel Tutorial

7. Panel Kontrol Free Mode

Sebagaimana pada Gambar 4.7, Panel Control merupakan pusat kendali operasional bagi pengguna untuk melakukan intervensi lingkungan. Pada *Free Mode*, karena ketiadaan perhitungan *Plant Point* secara otomatis, antarmuka ini memberikan kebebasan mutlak bagi pengguna untuk mengatur Suhu , memanipulasi kecepatan kipas, mengisi volume nutrisi, dan bahkan menekan tombol untuk mengubah fase tanaman (Awal, Tengah, Dewasa, Akhir) secara manual guna mengamati perubahan visual objek 3D.



Gambar 4.7 Panel Kontrol Free Mode

8. Panel Kontrol Simulation Mode

Antarmuka kontrol pada *Simulation Mode* memiliki tata letak yang identik dengan *Free Mode*. Pada panel ini, pengguna tidak dapat lagi menekan tombol fase tanaman secara instan. Sebagai gantinya, antarmuka akan menampilkan indikator perolehan *Plant Point* secara *real-time*, di mana transisi fase tanaman sepenuhnya dikendalikan oleh sistem FSM. Terkhusus pada Panel Kontrol Simulator juga terdapat keterangan kira-kira tinggi tiap fase, visualisasi ini dapat dilihat di Gambar 4.8 pada halaman selanjutnya



Gambar 4.8 Panel Kontrol Simulation Mode

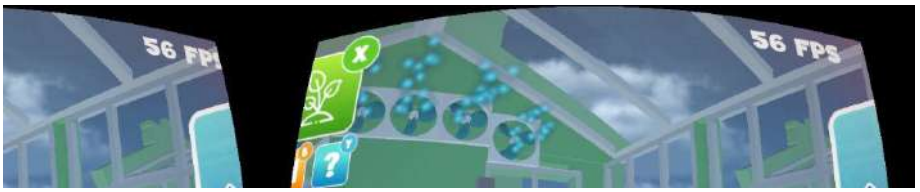
9. UI Down Bar (Informasi HUD)

Sesuai Gambar 4.9. Antarmuka ini berbentuk *bar* statistik horizontal yang persisten berada di bagian bawah sudut pandang pemain. Fungsi utamanya memberikan umpan balik visual yang konstan,Informasi yang disajikan mencakup Temperatur aktual, Kecepatan Kipas (Mati/Lambat/Cepat), Volume nutrisi, serta Fase Tanaman dan Poin.



Gambar 4.9 UI Down Bar

10. Informasi Performa FPS Mobile VR



Gambar 4.10 Performa FPS Mobile VR

Sesuai Gambar 4.10 menunjukkan FPS yang diperoleh pada simulasi, Terekam pada Mobile VR, FPS menghasilkan peforma stabil 54-56 FPS dan tidak terdapat *frame drop* atau turunya *frame* secara dratis, dapat disimpulkan bahwa performa simulasi di Mobile tercatat stabil.

11. Informasi Performa FPS Oculus VR



Gambar 4.11 Performa FPS Oculus

Sesuai Gambar 4.11 menunjukkan FPS yang diperoleh pada simulasi, Terekam pada Oculus, FPS menghasilkan peforma stabil 69-70 FPS namun terkadang menghasilkan *frame drop* ketika akan bergerak menjadi 50 fps. Walaupun terjadi penuruan *frame* simulasi masih sangat bisa dimainkan karena frame terendah adalah 50 FPS, ini bisa dicerminkan dari hasil skor IPQ dan SSQ pada bab selanjutnya.

4.1.2. Implementasi Rule Based System

Algoritma *Rule-Based System* (RBS) pada simulasi ini diimplementasikan sebagai mesin logika yang bertugas mengevaluasi perlakuan pengguna terhadap variabel lingkungan *greenhouse*. Sistem ini beroperasi secara berkesinambungan setiap detik (*real-time*) dengan membaca parameter Suhu Aktual dan Volume nutrisi yang sedang aktif di layar.

Logika pengambilan keputusan di dalam RBS dieksekusi melalui serangkaian struktur kondisi IF-ELSE yang ditanamkan pada fungsi CalculatePlantPoints(). Fungsi ini merujuk secara ketat pada ambang batas aturan yang telah ditetapkan pada tahap desain (Tabel 3.2 dan Tabel 3.3) untuk

menentukan besaran penambahan atau pengurangan *Plant Point*. Detail dari kodingan tertera di bawah

```
    void CalculatePlantPoints(float temp)
    {
        float pointsToAdd = 0f;
        string debugLog = "";

        if (temp >= 20 && temp <= 25) { pointsToAdd += 5; debugLog += $"[SUHU:
{temp:F1}°C] Sejuk: +5. "; }
        else if (temp > 25 && temp <= 30) { pointsToAdd += 10; debugLog += $"[SUHU:
{temp:F1}°C] Ideal: +10. "; }
        else if (temp > 30 && temp <= 35) { pointsToAdd += 5; debugLog += $"[SUHU:
{temp:F1}°C] Hangat: +5. "; }
        else if (temp > 35) { pointsToAdd -= 10; debugLog += $"[SUHU: {temp:F1}°C] Panas
Ekstrem: -10. "; }

        if (currentWaterScaleY > 0.05f) { pointsToAdd += 5; debugLog += "[NUTRISI] CUKUP:
+5."; }
        else if (currentWaterScaleY > 0.01f) { pointsToAdd += 2f; debugLog += "[NUTRISI]
SETENGAH: +2"; }
        else { debugLog += "[NUTRISI] KOSONG: +0."; }

        float previousPoints = currentPlantPoints;
        currentPlantPoints += pointsToAdd;
        if (currentPlantPoints < 0) currentPlantPoints = 0;
        if (currentPlantPoints > pointReqEnd) currentPlantPoints = pointReqEnd;

        float actualPointChange = currentPlantPoints - previousPoints;
        Debug.Log($"[SIMULASI] Transaksi: {(actualPointChange >= 0 ? "+" :
"")}{actualPointChange} Poin. Rincian: {debugLog} | Poin Saat Ini:
{currentPlantPoints}");

        if (textPointsDownBar != null) textPointsDownBar.text =
currentPlantPoints.ToString("F0");
        if (textPointsPanel != null) textPointsPanel.text =
currentPlantPoints.ToString("F0");

        CheckPlantPhaseAuto();
    }
```

Berdasarkan potongan kode di atas, sistem tidak hanya mengeksekusi penambahan nilai matematika semata, melainkan juga memproduksi pencatatan transaksi (*Debug Log*) yang akuntabel guna memastikan algoritma bekerja sesuai dengan desain skenario. Keberhasilan implementasi kalkulasi ini dapat dibuktikan melalui dua pengujian kondisi yang berbeda:

1. Validasi Kondisi Lingkungan Ideal

   Kondisi ideal tercapai apabila pengguna berhasil menjaga keseimbangan iklim di dalam *greenhouse*. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, sistem RBS merespons intervensi pengguna secara akurat.



Gambar 4.12 Keadaan Game ketika Suhu Sejuk

Pada Gambar 4.12, pengguna menahan laju panas alami menggunakan kipas berkecepatan lambat sehingga suhu aktual berada di angka 26°C. Menurut aturan RBS, rentang suhu 26°C - 30°C terklasifikasi sebagai kondisi ideal dan memicu imbalan penambahan 10 poin. Bersamaan dengan itu, takaran nutrisi dipertahankan pada volume cukup yang memberikan tambahan 5 poin. Mesin kemudian menggabungkan kedua input tersebut dan secara otomatis menghasilkan total transaksi sebesar +15 Poin ke dalam variabel *Plant Point*, sebagaimana yang terekam secara pada panel Log Konsol di bagian bawah gambar.

2. Validasi Kondisi Lingkungan Ekstrem

Sistem ini juga dirancang untuk merespons kesalahan manajemen (*mismanagement*) lingkungan melalui implementasi hukuman, hal ini sudah berjalan sebagaimana Gambar 4.11 di bawah



Gambar 4.13 Keadaan Game ketika Suhu Ideal

Pada Gambar 4.13, diperlihatkan skenario kegagalan di mana pengguna membiarkan suhu merambat naik menembus ambang batas ekstrim, yaitu 44.0°C. Secara matematis, meskipun pengguna telah memberikan nutrisi Cukup (+5 Poin), kondisi suhu yang terlampau panas (> 35°C = -10 Poin) mendominasi evaluasi. Hasilnya, RBS mengeksekusi potongan transaksi aktual sebesar -5 Poin per detik, yang menyebabkan degradasi angka poin pemain secara berangsur-angsur.

3. Evaluasi Kondisi Terminal (Game Over dan Win)

Selain mengatur fluktuasi poin, algoritma pada sistem ini secara simultan bertindak sebagai pemutus kondisi terminal absolut di dalam gamifikasi, yakni kegagalan mutlak atau keberhasilan budidaya.



Gambar 4.14 Panel Game Over

Gambar 4.14 di atas membuktikan bahwa sistem penghentian fatal telah berfungsi. Apabila kelalaian pengguna menyebabkan parameter suhu menyentuh angka ≥ 40°C selama 10 detik penuh pada fase awal maka Game over akan terjadi. Terlihat pada Gambar 4.12 sebelah kanan, Meskipun terlihat tanaman berada di fase awal, namun karena kegagalan mengatur sehingga suhu menyentuh angka 45, inilah yang menyebabkan *game over* terjadi.

Begitu juga jika pemain membiarkan *Plant Point* merosot jauh di bawah batas minimal kelangsungan hidup fase akibat kondisi layu. Terlihat pada Gambar 4.12 bagian kiri tanaman mati karena layu pada fase tengah, terlihat juga di UI Down Bar bahwa pemain sudah mengatur nutrisi pada mode cukup, namun walaupun begitu karena kipas masih mati, kenaikan suhu terus terjadi hingga mencapai angka yang dapat mengurangi *Plant Point*.

Selanjutnya RBS juga akan menghentikan simulasi jika pemain berhasil mengatur greenhouse dengan baik, hal ini terjadi ketika pemain berhasil merawat tanaman melon hingga berbuah besar dan mempertahankannya, bisa terlihat sebagaimana pada gambar 4.13



Gambar 4.15 Panel Game Winning

Terlihat pada Gambar 4.15 *Plant Point* sudah berhasil menyentuh 600 Poin, pemain sudah berhasil menahan poin tersebut selama 10 detik yang dibuktikan dengan munculnya panel game winning. Secara hierarki komputasi, variabel currentPlantPoints yang terus diperbarui oleh algoritma RBS tidak berdiri sendiri, melainkan dialirkan secara langsung sebagai variabel pemicu bagi algoritma FSM. hal ini bisa dilihat di kode CheckPlantPhaseAuto di bawah

```
    void CheckPlantPhaseAuto()
    {
        if (currentPlantPoints >= pointReqEnd) highestPhaseReached = 3;
        else if (currentPlantPoints >= pointReqPreb &&
highestPhaseReached < 2) highestPhaseReached = 2;
        else if (currentPlantPoints >= pointReqMid && highestPhaseReached
< 1) highestPhaseReached = 1;

        if (highestPhaseReached == 1)
        {
            if (currentPlantPoints <= 120) { TriggerGameOver("Tanaman
Mati di Fase Tumbuh (Poin <= 120)"); return; }
            else if (currentPlantPoints <= 180) { isCurrentlyLayu = true;
```

```
TriggerLayuTutorialOnce(); }
            else if (currentPlantPoints >= 200) { isCurrentlyLayu =
false; }
        }
        else if (highestPhaseReached == 2)
        {
            if (currentPlantPoints <= 370) { TriggerGameOver("Tanaman
Mati di Fase Dewasa (Poin <= 370)"); return; }
            else if (currentPlantPoints <= 430) { isCurrentlyLayu = true;
TriggerLayuTutorialOnce(); }
            else if (currentPlantPoints >= 450) { isCurrentlyLayu =
false; }
        }
        else if (highestPhaseReached == 3)
        {
            if (currentPlantPoints <= 480) { TriggerGameOver("Tanaman
Mati di Fase Panen (Poin <= 480)"); return; }
            else if (currentPlantPoints <= 580) { isCurrentlyLayu = true;
TriggerLayuTutorialOnce(); }
            else if (currentPlantPoints >= 600) { isCurrentlyLayu =
false; }
        }

        if (isCurrentlyLayu) SetPlantLayuVisual(highestPhaseReached);
        else SetPlantStageVisual(highestPhaseReached);
    }
```

Melalui pemanggilan fungsi CheckPlantPhaseAuto() di akhir kalkulasi poin, nilai dievaluasi untuk menentukan perintah transisi wujud 3D tanaman melon. Mekanisme pergantian *state* visual dari satu fase ke fase lainnya akan dijabarkan secara rinci pada sub-bab implementasi *Finite State Machine*.

4.1.3. Implementasi Finite State Machine

Algoritma *Finite State Machine* (FSM) dalam sistem ini diimplementasikan sebagai pengendali logika visual yang bertugas mengubah wujud objek 3D tanaman melon. Konsep dasar FSM memastikan bahwa tanaman hanya dapat berada pada satu fase (*state*) tertentu pada satu waktu, dan proses transisinya dipicu secara langsung oleh akumulasi nilai currentPlantPoints yang didistribusikan oleh *Rule-Based System* (RBS).

Implementasi logika pergantian antar *state* ini ditanamkan pada fungsi CheckPlantPhaseAuto(), di mana sistem mengevaluasi total poin untuk

menentukan klasifikasi fase progresif tertinggi (*highestPhaseReached*) maupun mendeteksi terjadinya fase penyimpangan (*isCurrentlyLayu*). secara detail hal ini bisa dilihat pada rincian kode di bawah

```
 void SetPlantStageVisual(int index)
   {
       if (plantStagesLayu != null)
       {
           foreach (GameObject layu in plantStagesLayu)
           {
               if (layu != null) layu.SetActive(false);
           }
       }
       if (plantStages != null)
       {
           for (int i = 0; i < plantStages.Length; i++)
           {
               if (plantStages[i] != null) plantStages[i].SetActive(i ==
index);
           }
       }
       string phaseName = "SEED / EARLY";
       if (index == 1) phaseName = "VEGETATIVE / MID";
       if (index == 2) phaseName = "LATE / FRUITLETS";
       if (index == 3) phaseName = "END / HARVEST";

       if (textPhaseDownBar != null) textPhaseDownBar.text = "PHASE : " +
phaseName;
       if (textPhasePanel != null) textPhasePanel.text = "PHASE : " +
phaseName;
   }
   void SetPlantLayuVisual(int highestPhase)
   {
       if (plantStages != null)
       {
           foreach (GameObject stage in plantStages)
           {
               if (stage != null) stage.SetActive(false);
           }
       }
       if (plantStagesLayu != null)
       {
           foreach (GameObject layu in plantStagesLayu)
           {
               if (layu != null) layu.SetActive(false);
           }
       }
       int layuIndex = highestPhase - 1;
       if (plantStagesLayu != null && layuIndex >= 0 && layuIndex <
plantStagesLayu.Length)
       {
           if (plantStagesLayu[layuIndex] != null)
               plantStagesLayu[layuIndex].SetActive(true);
       }
       if (textPhaseDownBar != null) textPhaseDownBar.text = "PHASE :
LAYU!";
       if (textPhasePanel != null) textPhasePanel.text = "PHASE : LAYU!";
   }
```

Berdasarkan struktur FSM tersebut, validasi implementasi visual pada lingkungan VR dibagi menjadi dua skenario pengujian utama, yaitu transisi pertumbuhan normal dan transisi degradasi akibat kondisi kritis:

1. Transisi Fase Progresif (Pertumbuhan Normal)

   Pada skenario manajemen lingkungan yang baik, *Plant Point* akan terus bertambah sehingga memicu serangkaian transisi *state* yang merepresentasikan siklus biologis tanaman yang sehat.



Gambar 4.16 Tanaman Dari Fase ke Fase (Urutan Kiri ke Kanan)

Gambar 4.16 membuktikan bahwa FSM berhasil menerjemahkan angka abstrak dari RBS menjadi perubahan visual yang presisi. Sesuai dengan rancangan sistem, perubahan terjadi pada titik-titik pemicu berikut:

- Fase Awal (*Seed*): Pada Gambar 4.14 bagian kiri atas terekam pada poin 160, di mana FSM menampilkan wujud 3D bibit awal di dalam pot.

- Fase Tengah (Vegetatif): Pada Gambar 4.14 bagian kanan atas terekam pada poin 280 (melewati ambang batas 200 poin). FSM menonaktifkan objek bibit dan memunculkan wujud 3D tanaman dengan daun yang lebih lebat dan menjalar ke atas.
- Fase Dewasa (Berbuah): Pada Gambar 4.14 bagian kiri bawah terekam pada poin 495 (melewati ambang batas 450 poin). FSM melakukan transisi visual memunculkan objek bakal buah melon pada dahan tanaman.
- Fase End (Panen): Pada Gambar 4.14 bagian kanan bawah terekam pada poin 600 (batas maksimum). FSM mengubah wujud tanaman menampilkan objek buah melon yang sudah matang sempurna dan siap panen.

2. Transisi State Kondisi Kritis (Fase Layu)

Sebagai representasi konsekuensi biologis yang realistis, FSM tidak hanya mengakomodasi pertumbuhan ke depan, melainkan juga menata degradasi apabila pengguna melakukan kesalahan pengelolaan iklim *greenhouse*. Untuk Visualisasi bagaimana penampakan tamana ketika layu Ini bisa dilihat pada Gambar 4.15 pada halaman selanjutnya



Gambar 4.17 Tanaman Dari Fase ke Fase (Urutan Kiri ke Kanan)

Pada Gambar 4.17, pengguna melakukan simulasi kesalahan pada fase vegetatif (rentang dasar 200 poin) dengan membiarkan suhu memanas ekstrem (38°C). Akibatnya, nilai poin melampaui ambang batas kritis bawah, yaitu 180 poin dimana terlihat pada gambar yaitu 145. Algoritma FSM mendeteksi kondisi tersebut dan menerapkan boolean isCurrentlyLayu = true dan memanggil fungsi visual layu.

Wujud 3D tanaman melon yang awalnya sehat kehijauan digantikan oleh model 3D tanaman berwarna coklat kekeringan, dan teks indikator di bagian UI *Down Bar* juga berubah secara dinamis menjadi "FASE : LAYU". Apabila pengguna berhasil mengembalikan suhu ruangan menjadi stabil dan poin kembali naik menyentuh angka 200, FSM akan memulihkan status tanaman menjadi sehat kembali.

4.2. Hasil Kuesioner IPQ dan SSQ

Pada sub-bab ini dipaparkan hasil pengujian dan evaluasi subjektif terhadap sistem simulasi *Plant Simulate* yang telah dilaksanakan secara langsung dengan melibatkan total 40 responden. Responden tersebut terbagi ke dalam tiga segmentasi demografi, yakni Kelompok Pemula, Pengguna Kasual, dan Dewasa Berpengalaman. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur secara kualitas pengalaman *Virtual Reality* (VR) yang dirasakan oleh pengguna, sekaligus melakukan komparatisi antara penggunaan platform *low-cost* (*Mobile VR*) dengan perangkat *high-end* (*Oculus VR*). Penilaian dievaluasi melalui tiga instrumen utama yang saling berkesinambungan pasca responden menyelesaikan skenario simulasi. Pertama, pengukuran tingkat imersi pengguna di dalam *greenhouse* virtual menggunakan instrumen IPQ. Kedua, evaluasi tingkat kenyamanan fisik dan pemantauan risiko *cybersickness* menggunakan instrumen SSQ yang diukur melalui metode selisih (*Delta*) sebelum dan sesudah penggunaan. Ketiga, pengukuran tingkat keberhasilan penyampaian materi agronomi menggunakan Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi.

Pemaparan data kuantitatif beserta hasil analisis dari ketiga instrumen untuk masing-masing platform akan dijabarkan secara rinci pada sub-bab di bawah ini. Adapun untuk memenuhi aspek validitas dan transparansi penelitian, bukti dokumentasi foto pelaksanaan pengujian bersama responden, beserta data mentah (*raw data*) yang berisi rincian jawaban dari tiap individu untuk seluruh kuesioner, telah dilampirkan secara utuh pada bagian Lampiran di akhir naskah skripsi ini.

4.2.1. IPQ Mobile VR

Pengujian tingkat kehadiran (*presence*) pada skenario Mobile VR dilakukan terhadap 40 responden yang mewakili tiga segmentasi demografi (10 Pemula, 20 Kasual, dan 10 Dewasa) menggunakan instrumen *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ). Pengukuran ini bertujuan untuk mengevaluasi seberapa kuat simulasi Mobile VR meyakinkan pengguna bahwa mereka benar-benar berada dan beraktivitas di dalam *greenhouse* virtual. Data mentah yang dikumpulkan dari 14 butir pertanyaan telah diolah, di mana pertanyaan berskala terbalik (*reverse*) dihitung menggunakan rumus nilai 8 dikurangi angka yang dipilih responden. Rincian rata-rata perolehan skor untuk setiap butir pertanyaan dari masing-masing kelompok demografi dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Rata-Rata Skor Item IPQ Mobile VR Berdasarkan Demografi

Kode	Pertanyaan	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
PRES	Di dalam dunia virtual saya memiliki sensasi "benar-benar berada di sana"	5,6	5,55	5,5	5,55
SP1	Saya merasa bahwa dunia virtual tersebut mengelilingi saya	5,6	5,4	5,4	5,45
SP2	Saya merasa seperti hanya sekadar sedang melihat gambar-gambar saja	5,3	5,25	5,1	5,22
SP3	Saya merasa berada di dalam ruang virtual	5,7	5,65	5,3	5,58
SP4	Saya merasa sedang beraktivitas di dalam ruang virtual	5,6	5,55	5,6	5,58
SP5	Saya merasa benar-benar hadir di dalam lingkungan Greenhouse	5,9	5,9	5,7	5,85
INV1	Seberapa sadar Anda terhadap lingkungan nyata di sekitar Anda saat di dunia virtual?	4,8	4,4	4,7	4,58
INV2	Saya sama sekali tidak menyadari lingkungan dunia nyata di sekitar saya	4,6	4,6	4,7	4,62
INV3	Saya masih memperhatikan lingkungan dunia nyata di sekitar saya	4,6	4,45	4,4	4,47
INV4	Saya sepenuhnya terhanyut oleh dunia virtual	5,2	5,3	5,3	5,28

ER1	Seberapa nyata dunia virtual tersebut terasa bagi Anda?	5,6	5,45	5,3	5,45
ER2	Sejauh mana pengalaman virtual terasa mirip dengan pengalaman di dunia nyata?	5,6	5,4	5,3	5,42
ER3	Seberapa realistis Greenhouse virtual bagi Anda?	5,4	5,35	5,4	5,38
ER4	Dunia virtual tersebut terasa lebih realistis daripada dunia nyata	4,4	4,1	4,1	4,18

Skor dari keempat belas pertanyaan pada Tabel 4.1 tersebut selanjutnya diakumulasikan dan dihitung nilai rata-ratanya berdasarkan empat kategori dimensi utama IPQ. Hasil rekapitulasi dimensi ini kemudian diklasifikasikan menggunakan standar Skala Penilaian Kuantitatif (merujuk pada Bab 3) guna menentukan tingkat kelayakan dan kualitas imersi *Virtual Reality* yang dihasilkan. Hasil akhir rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Rekapitulasi Rata-Rata Dimensi IPQ Mobile VR

Dimensi Pengukuran	**Pemula**	**Kasual**	**Dewasa**	**Rerata**
Overall Presence (PRES)	5,6	5,55	5,5	5,55
Spatial Presence (SP)	5,62	5,55	5,42	5,54
Involvement (INV)	4,8	4,69	4,78	4,74
Experienced Realism (ER)	5,25	5,08	5,03	5,11
Total Rerata Keseluruhan	5,32	5,22	5,18	5,24

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 4.1 dan penjabaran lintas-demografi pada Tabel 4.2, diperoleh sejumlah temuan melalui analisis pengujian sebagai berikut:

1. Sensasi Kehadiran (Overall Presence / PRES)

   Dimensi kehadiran umum memperoleh skor rata-rata keseluruhan yang solid, yaitu 5,55 (Predikat A / Sangat Baik). Jika dibedah, Kelompok Pemula merasakan sensasi kehadiran tertinggi (5,60), disusul Kasual

(5,55), dan Dewasa (5,50). Hal ini wajar mengingat pengguna berusia remaja (Pemula) cenderung lebih reseptif terhadap kebaruan ruang virtual dibandingkan pengguna dewasa.

2. Kehadiran Spasial (Spatial Presence / SP)

   Ketiga kelompok sepakat bahwa mereka benar-benar merasa dikelilingi oleh ruang 3D, terbukti dari rata-rata *item* SP5 yang mendekati angka 6 (Tabel 4.1). Secara akumulatif, dimensi ini menempati Predikat A (Sangat Baik) dengan skor 5,54.

3. Keterlibatan (Involvement / INV)

   Dimensi keterlibatan mencatatkan rata-rata terendah dibandingkan dimensi lainnya, yakni 4,74. Kelompok Kasual memberikan skor paling kritis (4,69), yang mengindikasikan bahwa mahasiswa yang sudah familier dengan *game* masih memiliki kesadaran terhadap ruang fisik di sekitarnya saat menggunakan Mobile VR. Meski demikian, secara keseluruhan dimensi ini tetap berhasil meraih Predikat B (Baik).

4. Realisme yang Dialami (Experienced Realism / ER)

   Kelompok Pemula memberikan apresiasi realisme tertinggi (5,25) dibandingkan Kasual (5,08) dan Dewasa (5,03). Hal ini membuktikan bahwa visualisasi fase tanaman yang disajikan sudah sangat meyakinkan bagi target edukasi utamanya. Secara keseluruhan, dimensi ini mengamankan Predikat A (Sangat Baik) di angka 5,11.

Dari kalkulasi nilai keempat dimensi tersebut, didapatkan Total Rata-Rata Keseluruhan IPQ sebesar 5,24. Merujuk pada Skala Penilaian Kualitatif IPQ, skor ini diklasifikasikan ke dalam Predikat Huruf A (Sangat Baik Sekali). Hal ini menegaskan bahwa perangkat Mobile VR berbiaya rendah sangat Layak (*Acceptable*) sebagai media pelatihan karena sukses memukau dan menghadirkan efek imersi yang kuat, khususnya bagi target pelajar pemula.

4.2.2. IPQ Oculus VR

Pengujian tingkat kehadiran pada skenario Oculus VR dilakukan sebagai instrumen komparasi *high-end* terhadap 40 responden yang sama. Evaluasi menggunakan instrumen IPQ ini bertujuan untuk mengukur eskalasi tingkat realisme dan imersi yang ditawarkan oleh perangkat VR kelas atas dengan kemampuan pelacakan posisi penuh (*Six Degrees of Freedom / 6-DOF*) dan kualitas fidelitas grafis yang lebih superior. Rincian rata-rata perolehan skor untuk setiap butir pertanyaan pada pengujian Oculus VR dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Rata-Rata Skor Item IPQ Oculus VR Berdasarkan Demografi

Kode	Pertanyaan	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
PRES	Di dalam dunia virtual saya memiliki sensasi "benar-benar berada di sana"	6,5	6,2	6,2	6,28
SP1	Saya merasa bahwa dunia virtual tersebut mengelilingi saya	6,3	6,2	6,1	6,2
SP2	Saya merasa seperti hanya sekadar sedang melihat gambar-gambar saja	5,9	5,65	5,6	5,7
SP3	Saya merasa berada di dalam ruang virtual	6,2	6,2	6,3	6,22
SP4	Saya merasa sedang beraktivitas di dalam ruang virtual	6,3	6,05	6,4	6,2
SP5	Saya merasa benar-benar hadir di dalam lingkungan Greenhouse	6,1	6,1	6,1	6,1
INV1	Seberapa sadar Anda terhadap lingkungan nyata di	4,8	4,4	4,3	4,47

	sekitar Anda saat di dunia virtual?				
INV2	Saya sama sekali tidak menyadari lingkungan dunia nyata di sekitar saya	4,7	4,6	4,8	4,68
INV3	Saya masih memperhatikan lingkungan dunia nyata di sekitar saya	4,8	4,75	4,5	4,7
INV4	Saya sepenuhnya terhanyut oleh dunia virtual	5,7	5,75	5,5	5,68
ER1	Seberapa nyata dunia virtual tersebut terasa bagi Anda?	5,7	5,7	5,4	5,62
ER2	Sejauh mana pengalaman virtual terasa mirip dengan pengalaman di dunia nyata?	5,6	5,5	5,4	5,5
ER3	Seberapa realistis Greenhouse virtual bagi Anda?	5,6	5,7	5,5	5,62
ER4	Dunia virtual tersebut terasa lebih realistis daripada dunia nyata	5,2	4,9	4,7	4,92

Skor dari keempat belas pertanyaan pada Tabel 4.3 tersebut selanjutnya diakumulasikan dan dihitung nilai rata-ratanya berdasarkan empat kategori dimensi utama IPQ. Hasil rekapitulasi dimensi ini kemudian diklasifikasikan menggunakan standar Skala Penilaian Kuantitatif (merujuk pada Bab 3) guna menentukan tingkat kelayakan dan kualitas imersi *Virtual Reality* yang dihasilkan. Hasil akhir rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Rekapitulasi Rata-Rata Dimensi IPQ Oculus VR

Dimensi Pengukuran	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
Overall Presence (PRES)	6,5	6,2	6,2	6,28
Spatial Presence (SP)	6,16	6,04	6,1	6,08
Involvement (INV)	5	4,88	4,78	4,88
Experienced Realism (ER)	5,52	5,45	5,25	5,42
Total Rerata Keseluruhan	5,8	5,64	5,58	5,66

Berdasarkan data pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, terlihat adanya lonjakan kepuasan pengguna yang sangat signifikan pada simulasi menggunakan Oculus VR analisis tiap dimensi sebagai berikut:

1. Sensasi Kehadiran (Overall Presence / PRES)

   Layar beresolusi tinggi pada Oculus mendorong skor kehadiran Kelompok Pemula melesat nyaris sempurna ke angka 6,50 (dari skala 7). Kelompok Kasual dan Dewasa pun memberikan skor identik yang sangat tinggi (6,20), menghasilkan rata-rata keseluruhan 6,28 (A / Sangat Baik).

2. Kehadiran Spasial (Spatial Presence / SP)

   Dimensi spasial mencatatkan rata-rata luar biasa sebesar 6,08. Kemampuan *positional tracking* (*6-DOF*) yang dimiliki Oculus membuat responden Pemula (6,16) dan Dewasa (6,10) merasa sepenuhnya berada di dalam *greenhouse* virtual, menjadikan masuk ke dalam Predikat A.

3. Keterlibatan (Involvement / INV)

   Controller interaktif dan kebebasan meninjau *greenhouse* pada Oculus berhasil mendongkrak fokus pengguna. Kenaikan rata-rata keseluruhan ke angka 4,88 membuat dimensi Keterlibatan naik kelas mencapai Predikat A (Sangat Baik).

4. Realisme yang Dialami (Experienced Realism / ER)

   Kualitas komputasi *standalone* pada Oculus berhasil menyajikan *render* tanaman dan *greenhouse* yang jauh lebih memanjakan mata, mendorong skor realisme pada Kelompok Pemula (5,52) dan Kasual (5,45) berada sangat tinggi. Rata-rata 5,42 menempatkan dimensi ini jauh di atas batas aman Predikat A.

Secara akumulatif, pengujian Oculus VR menghasilkan Total Rata-Rata Keseluruhan IPQ sebesar **5,66**. Pola yang sama kembali terjadi di mana Kelompok Pemula memberikan apresiasi imersi mutlak tertinggi (5,80), membuktikan tingginya tingkat efektivitas media ini sebagai alat peraga edukasi. Merujuk pada standar penilaian, skor 5,66 menempati klasifikasi teratas pada Predikat Huruf A (Sangat Baik Sekali), memvalidasi hipotesis bahwa keunggulan spesifikasi *hardware* kelas atas berbanding lurus dengan peningkatan superioritas imersi bagi seluruh kelas pengguna.

4.2.3. SSQ Mobile VR

Evaluasi tingkat kenyamanan fisik pengguna terhadap skenario simulasi Mobile VR diukur menggunakan instrumen *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ). Mengikuti standar metodologi *Virtual Reality* modern, pengambilan data dilakukan sebanyak dua kali: sebelum (*Pre-exposure*) dan sesudah (*Post-exposure*) penggunaan VR. Tujuannya adalah untuk mengeliminasi bias *zero baseline*, sehingga hasil analisis difokuskan murni pada nilai selisih (*Delta*) yang diakibatkan oleh paparan lingkungan virtual.

Tabel 4.5 pada halaman selanjutnya menampilkan rekapitulasi rata-rata selisih (*Delta*) sebelum dan sesudah memakai simulasi dengan 15 gejala klinis (di mana rentang skala 0 = Tidak ada, hingga 3 = Berat) yang dihimpun dari 40 responden dan dibagi berdasarkan ketiga segmentasi demografi.

Tabel 4.5 Rata-Rata Selisih (Delta) Gejala Klinis SSQ Mobile VR Berdasarkan Demografi

No	Gejala Klinis	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,4	0,3	0,4	0,35
2	Kelelahan (Fatigue)	0,2	0,1	0,2	0,15
3	Sakit kepala (Headache)	0,2	0,2	0,2	0,2
4	Mata tegang (Eye strain)	0,4	0,45	0,4	0,42
5	Peningkatan air liur (Increased salivation)	0,1	0,15	0,2	0,15
6	Berkeringat (Sweating)	0	0,2	0	0,1
7	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,1	0,08
8	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,25	0,2	0,22
9	Kepala terasa penuh/berat (Fullness of head)	0,4	0,3	0,4	0,35
10	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,5	0,65	0,7	0,62
11	Pusing - mata terbuka (Dizzy eyes open)	0,3	0,3	0,3	0,3
12	Pusing - mata tertutup (Dizzy eyes closed)	0,2	0,2	0,2	0,2
13	Vertigo	0,1	0,1	0,1	0,1
14	Perut terasa tidak enak (Stomach awareness)	0	0	0	0
15	Bersendawa (Burping)	0	0	0	0

Nilai *Delta* pada Tabel 4.5 kemudian dikalkulasikan secara beririsan ke dalam beban bobot standar rumusan SSQ Kennedy yang terbagi ke dalam tiga sub-skala: *Nausea* , *Oculomotor* , *Disorientation*, dan *Total Severity* (TS). Rincian akumulasi skor setiap dimensi dipaparkan pada tabel-tabel di halaman selanjutnya

Tabel 4.6 Dimensi *Nausea* Mobile VR beserta skornya

No	Dimensi Nausea (N)	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,4	0,3	0,4	0,35
2	Peningkatan air liur (Increased salivation)	0,1	0,15	0,2	0,15
3	Berkeringat (Sweating)	0	0,2	0	0,1
4	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,1	0,08
5	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,25	0,2	0,22
6	Perut terasa tidak enak (Stomach awareness)	0	0	0	0
7	Bersendawa (Burping)	0	0	0	0
	Total Akumulasi	0,8	0,95	0,9	0,9
	Skor Kennedy (Total * 9,54)	7,63	9,06	8,59	8,59

Sesuai pada Tabel 4.6, skor Kennedy dimensi *Nausea* (mual/sistem pencernaan) tercatat pada angka rata-rata keseluruhan 8,59. Mengacu pada Skala Kualitatif Keparahan SSQ pada Bab 3, ketiga kelompok berada di tingkat keparahan yang Bisa Diabaikan (skor < 10,0). Hal ini mengindikasikan bahwa penggunaan perangkat Mobile VR Sangat Aman untuk sistem pencernaan dan tidak memicu keluhan mual yang berarti bagi seluruh kalangan usia.

Tabel 4.7 Dimensi Oculomotor Mobile VR beserta skornya

No	Dimensi Oculomotor (O)	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,3	0,3	0,4	0,35
2	Kelelahan (Fatigue)	0,2	0,1	0,2	0,15
3	Sakit kepala (Headache)	0,2	0,2	0,2	0,2
4	Mata tegang (Eye strain)	0,4	0,45	0,4	0,43
5	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,25	0,2	0,22
6	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,5	0,65	0,7	0,62
	Total Akumulasi	1,9	1,95	2,1	1,97
	Skor Kennedy (Total * 7,58)	14,4	14,78	15,92	14,93

Tabel 4.7 memaparkan skor Kennedy dimensi *Oculomotor*. Dimensi yang mengukur tekanan pada penglihatan dan saraf mata ini berada di tingkat keparahan Ringan / Aman dengan rata-rata keseluruhan 14,93. Keluhan tertinggi didominasi oleh penglihatan kabur, di mana Kelompok Dewasa mencatat tegangan mata paling tinggi (15,92) dibandingkan Kasual (14,78) dan Pemula (14,40). Hal ini selaras dengan faktor usia yang mempengaruhi adaptasi lensa optik VR. Meski demikian, secara keseluruhan ketajaman layar *smartphone* pada Mobile VR masih dapat ditoleransi.

Tabel 4.8 Dimensi Disorientasi Mobile VR beserta skornya

No	Dimensi Disorientasi (D)	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,1	0,08
2	Kepala terasa penuh/berat (Fullness of head)	0,4	0,3	0,4	0,35
3	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,5	0,65	0,7	0,62
4	Pusing - mata terbuka (Dizzy eyes open)	0,3	0,3	0,3	0,3
5	Pusing - mata tertutup (Dizzy eyes closed)	0,2	0,2	0,2	0,2
6	Vertigo	0,1	0,1	0,1	0,1
	Total Akumulasi	1,6	1,6	1,8	1,65
	Skor Kennedy (Total * 13,92)	22,27	22,27	25,06	22,97

Tabel 4.8 menampilkan evaluasi dimensi *Disorientation* (keseimbangan arah). Ketiga kelompok menempatkan sub-skala ini ke dalam klasifikasi Signifikan / Kurang Nyaman dengan skor rata-rata keseluruhan 22,97. Keterbatasan ruang lacak pada Mobile VR yang bersifat statis (*3-DOF*) ditengarai memicu benturan persepsi sensorik antara pergerakan *controller* di ruang maya dengan posisi diam di dunia nyata. Kelompok Dewasa menjadi demografi yang paling rentan merasakan keluhan disorientasi ini (25,06).

Tabel 4.9 Total Severity Mobile VR

No	Pengukuran	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Akumulasi Nausea	0,8	0,95	0,9	0,9
2	Akumulasi Oculomotor	1,9	1,95	2,1	1,97
3	Akumulasi Disorientation	1,6	1,6	1,8	1,65
	Total Ketiga Dimensi	4,3	4,5	4,8	4,52
	Total Severity (Skor * 3,74)	16,08	16,83	17,95	16,9

Tabel 4.9 merangkum *Total Severity* (akumulasi akhir keparahan) dari simulasi *greenhouse* pada Mobile VR. Meskipun terdapat keluhan signifikan pada sub-skala disorientasi, akumulasi akhir tingkat keparahan dari seluruh beban *cybersickness* berhasil ditekan stabil di angka bersih **16,90**.

Analisis lintas-demografi membuktikan bahwa efek samping dirasakan paling rendah oleh pelajar/Pemula (16,08), dan sedikit membebani pengguna tertua/Dewasa (17,95). Secara keseluruhan, merujuk pada standar klasifikasi kelayakan SSQ modern, perolehan nilai dari ketiga segmentasi ini tertambat kuat di dalam batas Ringan / Minimal (rentang 10,1 - 20,0). Simpulan ini menegaskan bahwa perangkat Mobile VR berstatus Aman (Gejala Dapat Ditoleransi), membuktikan bahwa pendekatan simulasi berbiaya rendah ini sepenuhnya memenuhi syarat kesehatan dan keselamatan fisik bagi penggunanya.

4.2.4. SSQ Oculus VR

Pengujian tingkat kenyamanan fisik (*cybersickness*) tahap kedua dilakukan menggunakan perangkat Oculus VR kepada 40 responden yang sama. Pengujian ini difungsikan sebagai instrumen komparasi *high-end* untuk mengevaluasi apakah Oculus mampu menekan gejala kelelahan fisik secara lebih efektif dibandingkan dengan ekosistem Mobile VR. Konsisten dengan pedoman metodologi sebelumnya, Tabel 4.10 di halaman selanjutnya menampilkan rata-rata selisih keadaan pengguna sebelum dan sesudah simulasi dengan 15 gejala klinis (rentang skala 0 = Tidak ada, hingga 3 = Berat) yang dihimpun pasca skenario simulasi Oculus VR dan diklasifikasikan berdasarkan demografi pengguna.

Tabel 4.10 Rata-Rata Selisih (*Delta*) Gejala Klinis SSQ Oculus VR

No	Gejala Klinis	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,2	0,3	0,2	0,16
2	Kelelahan (Fatigue)	0,1	0,05	0,1	0,08
3	Sakit kepala (Headache)	0,4	0,3	0,3	0,32
4	Mata tegang (Eye strain)	0,1	0,3	0,2	0,22
5	Peningkatan air liur (Increased salivation)	0,1	0,05	0,1	0,08
6	Berkeringat (Sweating)	0	0,15	0,1	0,1
7	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,2	0,1
8	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,2	0,3	0,22
9	Kepala terasa penuh/berat (Fullness of head)	0,3	0,3	0,2	0,28
10	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,3	0,5	0,5	0,45
11	Pusing - mata terbuka (Dizzy eyes open)	0,3	0,3	0,4	0,32
12	Pusing - mata tertutup (Dizzy eyes closed)	0,1	0,1	0,2	0,12
13	Vertigo	0,1	0,05	0	0,05
14	Perut terasa tidak enak (Stomach awareness)	0,1	0,05	0	0,05
15	Bersendawa (Burping)	0	0	0	0

Nilai *Delta* pada Tabel 4.10 kemudian dikalkulasikan secara beririsan ke dalam beban bobot standar rumusan SSQ Kennedy yang terbagi ke dalam tiga sub-skala: *Nausea*, *Oculomotor*, dan *Disorientation*, diakhiri dengan skor *Total Severity* (TS). Skor Tiap Dimensi diklasifikasikan sesuai Skala Kualitatif Keparahan SSQ pada Bab 3, Rincian dari tiap dimensi terdapat di beberapa tabel dibawah

Tabel 4.11 Dimensi *Nausea* Oculus VR beserta skornya

No	Dimensi Nausea (N)	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,2	0,3	0,2	0,16
2	Peningkatan air liur (Increased salivation)	0,1	0,05	0,1	0,08
3	Berkeringat (Sweating)	0	0,15	0,1	0,1
4	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,2	0,1
5	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,2	0,3	0,22

6	Perut terasa tidak enak (Stomach awareness)	0,1	0,05	0	0,05
7	Bersendawa (Burping)	0	0	0	0
	Total Akumulasi	0,7	0,8	0,9	0,8
	Skor Kennedy (Total * 9,54)	6,68	7,63	8,59	7,39

Sesuai pada Tabel 4.11, skor Kennedy dimensi *Nausea* tercatat pada angka rata-rata keseluruhan 7,39. Sesuai Skala Kualitatif Keparahan SSQ, dimensi ini berada sangat aman di wilayah gejala yang Bisa Diabaikan. Keluhan pada pencernaan secara konsisten terbukti sangat minim di ketiga segmentasi usia, membuktikan kenyamanan adaptasi lambung terhadap simulasi ini.

Tabel 4.12 Dimensi *Oculomotor* Oculus VR beserta skornya

No	**Dimensi Oculomotor (O)**	**Pemula**	**Kasual**	**Dewasa**	**Rerata**
1	Ketidaknyamanan umum (General discomfort)	0,2	0,3	0,2	0,16
2	Kelelahan (Fatigue)	0,1	0,05	0,1	0,08
3	Sakit kepala (Headache)	0,4	0,3	0,3	0,32
4	Mata tegang (Eye strain)	0,1	0,3	0,2	0,22
5	Kesulitan konsentrasi (Difficulty concentrating)	0,2	0,2	0,3	0,22
6	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,3	0,5	0,5	0,45
	Total Akumulasi	1,3	1,65	1,6	1,52
	Skor Kennedy (Total * 7,58)	9,85	12,51	12,12	11,49

Tabel 4.12 menunjukkan penurunan tegangan mata (*Oculomotor*) yang cukup masif pada Oculus VR. Dimensi ini berada di keparahan gejala Ringan (Aman) dengan skor rata-rata keseluruhan yang menyusut ke angka 11,49 (dibandingkan 14,93 pada Mobile VR). Menariknya, mata Kelompok Pemula mampu beradaptasi sangat baik hingga menyentuh zona Bisa Diabaikan (9,85). Kualitas lensa dan *framerate* Oculus yang tinggi terbukti mereduksi penglihatan kabur secara efektif.

Tabel 4.13 Dimensi *Disorientation* Oculus VR beserta skornya

No	Dimensi Oculomotor (O)	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Mual (Nausea)	0,1	0,05	0,2	0,1
2	Kepala terasa penuh/berat (Fullness of head)	0,3	0,3	0,2	0,28
3	Penglihatan kabur (Blurred vision)	0,3	0,5	0,5	0,45
4	Pusing - mata terbuka (Dizzy eyes open)	0,3	0,3	0,4	0,32
5	Pusing - mata tertutup (Dizzy eyes closed)	0,1	0,1	0,2	0,12
6	Vertigo	0,1	0,05	0	0,05
	Total Akumulasi	1,2	1,3	1,5	1,32
	Skor Kennedy (Total * 13,92)	16,7	18,1	20,88	18,44

Tabel 4.13 menyoroti dimensi *Disorientation*. Berkat kapabilitas *6-DOF* yang memungkinkan pengguna bergerak maju, mundur, dan berjongkok secara nyata, tingkat keparahan disorientasi pada Oculus VR berhasil diredam secara signifikan hingga turun ke angka rata-rata 18,44 (zona Ringan/Aman). Kondisi ini sangat berbeda dengan Mobile VR di mana keluhan ini sebelumnya masuk dalam kategori Kurang Nyaman. Meskipun Kelompok Dewasa masih menyentuh batas bawah Kurang Nyaman (20,88), adaptasi spasial ini jauh lebih dapat ditoleransi.

Tabel 4.14 Total Severity Oculus VR

No	Pengukuran	Pemula	Kasual	Dewasa	Rerata
1	Akumulasi Nausea	0,7	0,8	0,9	0,8
2	Akumulasi Oculomotor	1,3	1,65	1,6	1,52
3	Akumulasi Disorientation	1,2	1,3	1,5	1,32
	Total Ketiga Dimensi	3,2	3,75	4,0	3,62
	Total Severity (Skor * 3,74)	11,97	14,02	14,96	13,65

Tabel 4.14 merangkum *Total Severity* untuk perangkat *Oculus*. Gejala "Penglihatan Kabur" dan "Mata Tegang" pada Oculus VR berhasil ditekan turun secara substansial. Hasilnya, skor keparahan keseluruhan pada perangkat Oculus

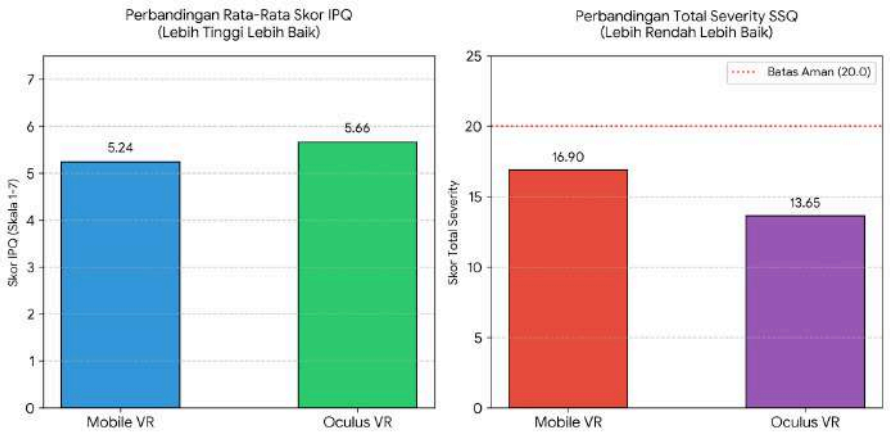
VR sukses mencetak angka 13,65 (berada sangat jauh di bawah skor 16,90 milik Mobile VR). Analisis lintas-demografi membuktikan bahwa Oculus sangat bersahabat bagi fisik pelajar/Pemula (11,97), dan memberikan kenyamanan fisik yang nyaris seimbang bagi kalangan mahasiswa/Kasual (14,02) maupun golongan Dewasa (14,96). Berdasarkan klasifikasi kelayakan SSQ modern, nilai keseluruhan ini tertambat sangat solid di dalam zona Ringan / Minimal (10,1 - 20,0).

Dapat disimpulkan secara mutlak bahwa penggunaan arsitektur VR kelas atas (*standalone*) jauh lebih unggul dalam menjamin tingkat kenyamanan fisiologis secara merata di semua golongan usia. Fakta ini membuktikan bahwa platform Oculus VR adalah perangkat yang Sangat Aman dan bebas dari hambatan kelelahan (*fatigue-free*) untuk keperluan pelatihan agrikultur berdurasi panjang.

4.2.5. Analisis Perbandingan Skor Mobile & Oculus

Berdasarkan hasil pengujian *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) dan *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) yang telah dijabarkan sebelumnya, secara garis besar kedua perangkat *Virtual Reality* yang diuji yakni *Mobile VR* dan *Oculus VR* telah terbukti sukses dan dinyatakan layak digunakan sebagai media simulasi *greenhouse*. Pada aspek tingkat sensasi kehadiran (IPQ), *Oculus VR* mencatatkan skor yang lebih superior (5,66) dibandingkan *Mobile VR* (5,24). Begitu pula pada aspek kenyamanan fisik (SSQ), *Oculus VR* menekan angka *cybersickness* lebih baik di skor keparahan 13,56 berbanding 16,90 pada *Mobile*

VR. Perbandingan nilai dari kedua parameter tersebut divisualisasikan secara komprehensif pada bagan di bawah ini.



Gambar 4.18 Perbandingan Skor Mobile VR dan Oculus

Gambar 4.18 menunjukkan skor IPQ dan SSQ dari kedua VR, skor Oculus bernilai lebih baik daripada Mobile VR di IPQ dan SSQ, namun temuan paling fundamental dari komparasi ini justru terletak pada pencapaian gemilang perangkat *Mobile VR*. Meskipun berstatus sebagai perangkat *low-cost* (berbiaya rendah) yang hanya mengandalkan sensor *smartphone* dengan pelacakan rotasi terbatas (*3-DOF*), *Mobile VR* terbukti mampu memenuhi seluruh standar kriteria kelayakan sistem. Skor IPQ *Mobile VR* yang menyentuh angka 5,24 telah secara mutlak melampaui ambang batas kriteria kualitatif "Sangat Baik Sekali (*Excellent*)". Lebih lanjut, dari sisi keselamatan fisik, skor SSQ *Mobile VR* (16,90) tertahan kokoh di zona Ringan (Minimal) dan sangat jauh dari batas penolakan kelayakan (skor > 40,0).

Sebagai kesimpulan, walaupun *Oculus VR* mampu menawarkan pengalaman premium yang lebih imersif dan minim kelelahan, pemanfaatan

Mobile VR terbukti sudah sangat mencukupi kriteria kelayakan sebagai instrumen simulasi *Plant Simulate*. Hal ini menjadikannya alternatif yang sangat presisi, aman, dan memadai untuk diimplementasikan secara massal pada lingkungan edukasi tanpa mengharuskan pengadaan perangkat keras kelas atas yang mahal

4.2.6. Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi

Selain mengukur kenyamanan dan imersi ruang virtual, penelitian ini juga mengukur efektivitas simulasi *Plant Simulate* sebagai instrumen pembelajaran agrikultur. Pengukuran dilakukan dengan menyebarkan Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi kepada 40 responden yang telah menyelesaikan seluruh skenario permainan, yang secara merata dibagi ke dalam tiga segmentasi demografi (Pemula, Kasual, dan Dewasa).

Instrumen ini menggunakan Skala *Likert* 5 titik (1 = Sangat Tidak Setuju hingga 5 = Sangat Setuju) pada 5 butir pernyataan utama yang mencakup aspek visualisasi teori, pemahaman risiko, dan efektivitas gamifikasi. Data skor mentah dari setiap kelompok dijumlahkan dan dikonversi menggunakan rumus Indeks Persentase (%) untuk menentukan tingkat keberhasilan pemahaman pengguna.

Tabel 4.15 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Pemula / 10 Responden)

No	Pernyataan Evaluasi	Skor	Indeks
1	Simulasi membantu saya memvisualisasikan hubungan sebab-akibat antara suhu ruangan dan kondisi tanaman sebagai implementasi simulasi yang bersifat interaktif.	45	90,00%
2	Setelah mencoba simulasi Plant Simulate , saya menjadi lebih paham mengenai risiko kegagalan panen akibat kesalahan kontrol suhu dan nutrisi.	45	90,00%
3	Fitur *Plant Point* (gamifikasi) memotivasi saya untuk lebih memperhatikan parameter lingkungan greenhouse.	45	90,00%
4	Bermain Plant Simulate memberikan gambaran manajemen	44	88,00%

	greenhouse yang lebih jelas dibandingkan hanya membaca buku teori.		
5	Saya merasa Simulasi Plant Simulate adalah tempat berlatih yang aman dan hemat biaya sebelum mengelola tanaman melon sesungguhnya.	44	88,00%
-	Rata Rata		**89,20%**
(Catatan: Total Skor Maksimal per pernyataan adalah 50 (10 responden x 5 skor).			

Tabel 4.15 menunjukkan hasil kuesioner evaluasi nilai edukasi untuk Kelompok Pemula yang terdiri dari 10 responden remaja (pelajar). Kelompok ini mencatatkan rata-rata indeks edukasi yang sangat tinggi, yakni 89,2%. Perolehan skor 90,0% pada tiga indikator pertama membuktikan bahwa demografi pelajar sangat terbantu oleh visualisasi 3D dan fitur gamifikasisehingga pembelajaran terasa lebih interaktif dibandingkan hanya sekadar membaca teks.

Tabel 4.16 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Kasual / 20 Responden)

No	Pernyataan Evaluasi	Skor	Indeks
1	Simulasi membantu saya memvisualisasikan hubungan sebab-akibat antara suhu ruangan dan kondisi tanaman sebagai implementasi simulasi yang bersifat interaktif.	91	91,00%
2	Setelah mencoba simulasi Plant Simulate , saya menjadi lebih paham mengenai risiko kegagalan panen akibat kesalahan kontrol suhu dan nutrisi.	89	89,00%
3	Fitur *Plant Point* (gamifikasi) memotivasi saya untuk lebih memperhatikan parameter lingkungan greenhouse.	87	87,00%
4	Bermain Plant Simulate memberikan gambaran manajemen greenhouse yang lebih jelas dibandingkan hanya membaca buku teori.	83	83,00%
5	Saya merasa Simulasi Plant Simulate adalah tempat berlatih yang aman & hemat biaya sebelum mengelola tanaman melon asli	88	88,00%
-	Rata Rata		**87,60%**
(Catatan: Total Skor Maksimal per pernyataan adalah 100 (20 responden x 5 skor).			

Tabel 4.16 pada halaman sebelumnya menunjukkan perolehan nilai edukasi dari Kelompok Kasual yang berisi 20 responden mahasiswa. Dengan total

rata-rata indeks sebesar 87,6%, segmentasi terbesar dalam penelitian ini memberikan apresiasi tertinggi pada aspek visualisasi hubungan sebab-akibat suhu dan kondisi tanaman (91,0%). Hal ini mengindikasikan bahwa responden yang telah familier dengan *game* ini dapat dengan mudah mengenali serta memahami materi edukasi berkat penerapan mekanika *Rule-Based System* yang berjalan di latar belakang simulasi.

Tabel 4.17 Hasil Kuesioner Nilai Edukasi (Kelompok Dewasa / 10 Responden)

No	Pernyataan Evaluasi	Skor	Indeks
1	Simulasi membantu saya memvisualisasikan hubungan sebab-akibat antara suhu ruangan dan kondisi tanaman sebagai implementasi simulasi yang bersifat interaktif.	45	90,00%
2	Setelah mencoba simulasi Plant Simulate , saya menjadi lebih paham mengenai risiko kegagalan panen akibat kesalahan kontrol suhu dan nutrisi.	44	88,00%
3	Fitur *Plant Point* (gamifikasi) memotivasi saya untuk lebih memperhatikan parameter lingkungan greenhouse.	44	88,00%
4	Bermain Plant Simulate memberikan gambaran manajemen greenhouse yang lebih jelas dibandingkan hanya membaca buku teori.	40	80,00%
5	Saya merasa Simulasi Plant Simulate adalah tempat berlatih yang aman & hemat biaya sebelum mengelola tanaman melon asli	43	86,00%
-	Rata Rata		**86,40%**
(Catatan: Total Skor Maksimal per pernyataan adalah 100 (10 responden x 5 skor).			

Tabel 4.17 memaparkan indeks evaluasi dari Kelompok Dewasa. Kelompok ini secara meyakinkan meraih rata-rata indeks 86,4%. Mengingat wawasan berpikir mereka yang sudah lebih matang, responden dewasa memberikan penilaian yang sedikit lebih kritis terkait perbandingan efektivitas simulasi *game* terhadap buku teori konvensional (80,0%). Meski demikian, para responden tetap sepakat dan memberikan skor yang sangat kuat (90,0%) bahwa

simulasi ini berhasil memvisualisasikan wujud nyata teori sebab-akibat iklim terhadap tanaman. Berdasarkan perincian dari ketiga segmentasi demografi di atas, seluruh skor mentah dari 40 responden kemudian diakumulasikan untuk mengukur persentase efektivitas dan kesuksesan akhir dari aplikasi edukasi ini. Hasil rekapitulasi nilai edukasi secara makro disajikan Tabel 4.18 di bawah ini.

Tabel 4.18 Rekapitulasi Rata-Rata Nilai Edukasi Keseluruhan (40 Responden)

No	Pernyataan Evaluasi	Skor	Indeks
1	Simulasi membantu saya memvisualisasikan hubungan sebab-akibat antara suhu ruangan dan kondisi tanaman sebagai implementasi simulasi yang bersifat interaktif.	181	90,50%
2	Setelah mencoba simulasi Plant Simulate , saya menjadi lebih paham mengenai risiko kegagalan panen akibat kesalahan kontrol suhu dan nutrisi.	178	89,00%
3	Fitur *Plant Point* (gamifikasi) memotivasi saya untuk lebih memperhatikan parameter lingkungan greenhouse.	176	88,00%
4	Bermain Plant Simulate memberikan gambaran manajemen greenhouse yang lebih jelas dibandingkan hanya membaca buku teori.	167	83,50%
5	Saya merasa Simulasi Plant Simulate adalah tempat berlatih yang aman & hemat biaya sebelum mengelola tanaman melon asli	175	87,50%
-	Rata Rata		87,70%
(Catatan: Total Skor Maksimal per pernyataan adalah 100 (40 responden x 5 skor).			

Tabel 4.18 menunjukkan rekapitulasi nilai edukasi keseluruhan yang membuktikan bahwa simulasi *VR Plant Simulate* mampu menyampaikan esensi edukasinya dengan sangat presisi di semua golongan usia. Pernyataan pertama mengenai visualisasi sebab-akibat memperoleh indeks tertinggi dengan rata-rata 90,5%. Hal ini membuktikan bahwa algoritma *Finite State Machine* (FSM) sukses bekerja menerjemahkan deret angka abstrak parameter lingkungan menjadi wujud visual fase tanaman yang mudah dimengerti. Selain itu, secara praktikal pengguna

sangat menyetujui (87,5%) bahwa aplikasi ini menyajikan ruang latihan (*sandbox*) memadai yang membebaskan mereka dari kekhawatiran akan kerugian finansial saat berlatih manajemen *greenhouse*.

Kalkulasi akumulatif dari kelima butir evaluasi pada 40 responden tersebut menghasilkan Total Rata-Rata Indeks Edukasi Keseluruhan sebesar **87,7%**. Merujuk pada Skala Kualitatif Kelayakan Nilai Edukasi yang telah ditetapkan pada Bab 3, angka keseluruhan tersebut berada kokoh di rentang puncak (81% - 100%) yang diklasifikasikan ke dalam kategori **Sangat Baik**. Hal ini menyimpulkan bahwa pengembangan simulasi interaktif *Virtual Reality* ini sangat sukses direkomendasikan sebagai media alternatif edukasi agrikultur, karena terbukti jauh lebih interaktif, proaktif, dan mudah dicerna dibandingkan metode pembelajaran teoretis konvensional.

4.3. Integrasi Islam

Pada bagian ini dilakukan integrasi antara hasil penelitian dengan nilai-nilai ajaran Islam sebagai landasan dalam memahami dan memaknai pemanfaatan teknologi. Integrasi ini bertujuan untuk menunjukkan bahwa pengembangan sistem berbasis teknologi, termasuk dalam penelitian ini, tidak terlepas dari nilai-nilai keislaman yang mengatur hubungan manusia dengan Allah (*Muamalah Ma'a Allah*), hubungan dengan alam (*Muamalah Ma'a Al-Alam*), serta hubungan manusia dengan sesama (*Muamalah Ma'a An-Naas*).

4.3.1. *Muamalah Ma'a Allah*

Muamalah Ma'a Allah merupakan konsep yang mengatur hubungan antara manusia dengan Allah, yang mencakup aspek keimanan, ketaatan, serta kesadaran bahwa setiap aktivitas yang dilakukan oleh manusia berada dalam pengawasan-Nya. Dalam konteks penciptaan alam dan isinya, Allah memerintahkan hamba-Nya untuk mengamati proses biologis sebagai bentuk tafakur atas kebesaran-Nya. Hal ini sejalan dengan firman Allah dalam Al-Qur'an Surah Al-An'am ayat 99:

اُنْظُرُوْٓا اِلٰى ثَمَرِهٖٓ اِذَآ اَثْمَرَ وَيَنْعِهٖۗ اِنَّ فِيْ ذٰلِكُمْ لَاٰيٰتٍ لِّقَوْمٍ يُّؤْمِنُوْنَ ٩٩...

Artinya: '...Perhatikanlah buahnya pada waktu berbuah dan menjadi masak. Sesungguhnya pada yang demikian itu benar-benar terdapat tanda-tanda (kekuasaan Allah) bagi kaum yang beriman.'

Dalam *Tafsir as-Sa'di* karya Syaikh Abdurrahman bin Nashir as-Sa'di, dijelaskan bahwa Allah memerintahkan manusia agar mengambil pelajaran dari proses tersebut. Perintah "perhatikanlah buahnya di waktu pohonnya berbuah dan perhatikan pula kematangannya" bermaksud agar manusia merenungkan fase kemunculan hingga matangnya buah tersebut (As-Sa'di, 2018). Proses ini mengandung tanda-tanda kebesaran Allah sebagai bukti rahmat dan keluasan karunia Melalui simulasi ini, pengguna diajak untuk secara interaktif memperhatikan dan merawat fase pertumbuhan tanaman dari benih, vegetatif, hingga panen. Semua langkah-langkah adalah bentuk amalan dari merenungkan bahwasanya Tumbuhnya adalah bentuk dari tanda-tanda kebesaran Allah.

4.3.2. *Muamalah Ma'a Al-Alam*

Muamalah Ma'a Al-Alam adalah konsep yang mengatur bagaimana manusia berinteraksi, menjaga, dan melestarikan alam semesta, termasuk flora dan fauna di dalamnya. Islam sangat menganjurkan umatnya untuk bercocok tanam dan merawat bumi karena hal tersebut mendatangkan manfaat ekologis dan keberkahan yang berkelanjutan. Hal ini bersandar pada Hadis Nabi Muhammad :

مَا مِنْ مُسْلِمٍ يَغْرِسُ غَرْسًا، أَوْ يَزْرَعُ زَرْعًا، فَيَأْكُلُ مِنْهُ طَيْرٌ أَوْ إِنْسَانٌ أَوْ بَهِيمَةٌ، إِلَّا كَانَ لَهُ بِهِ صَدَقَةٌ

Artinya: "Tidaklah seorang muslim menanam pohon atau menanam tanaman, lalu burung, manusia, atau hewan ternak memakannya, melainkan hal tersebut menjadi sedekah baginya." (HR. Muslim no. 1552).

Dalam *Syarh Shahih Muslim* karya Imam An-Nawawi, dijelaskan bahwa hadits ini merupakan dalil yang tegas mengenai keutamaan bercocok tanam dan bertani. Pahala sedekah dari hasil tanaman tersebut akan terus mengalir kepada orang yang menanamnya selama tanaman tersebut masih hidup dan memberikan manfaat bagi makhluk lain (manusia, hewan, maupun keseimbangan alam), meskipun orang yang menanamnya sudah meninggal dunia (Nawawi, n.d.).

Sistem greenhouse adalah wujud nyata dari upaya manusia dalam memuliakan dan menjaga alam agar terhindar dari kerusakan iklim yang ekstrim. Simulasi Virtual Reality ini melatih penggunanya untuk mengatur variabel alam, seperti sirkulasi udara (kipas), suhu ruangan, dan ketersediaan nutrisi yang presisi agar tanaman melon dapat bertahan hidup dan berbuah maksimal.

4.3.3. *Muamalah Ma'a An-Naas*

Muamalah Ma'a An-Naas merupakan konsep yang mengatur hubungan antara manusia dengan sesama manusia dalam kehidupan sosial. Konsep ini menitikberatkan pentingnya memberikan kemudahan dan kemaslahatan bagi orang lain dalam setiap aktivitas. Salah satu bentuk kemaslahatan tertinggi antar sesama manusia adalah saling memberikan dan mengajarkan ilmu yang bermanfaat. Hal ini ditegaskan dalam sabda Rasulullah ﷺ:

مَنْ دَلَّ عَلَى خَيْرٍ فَلَهُ مِثْلُ أَجْرِ فَاعِلِهِ

Artinya: "Barangsiapa yang menunjuki kepada kebaikan maka dia akan mendapatkan pahala seperti pahala orang yang mengerjakannya." (HR. Muslim no. 1893).

Muamalah Ma'a An-Naas merupakan konsep yang mengatur hubungan antara manusia dengan sesama manusia dalam kehidupan sosial. Konsep ini menitikberatkan pentingnya memberikan kemudahan dan kemaslahatan bagi orang lain dalam setiap aktivitas. Salah satu bentuk kemaslahatan tertinggi antar sesama manusia adalah saling memberikan.Keutamaan dalam menuntut dan mengajarkan ilmu ini juga dijabarkan secara indah dalam kitab *Mughnil Muhtaj*, karya Muhammad bin Al-Khathib Asy-Syarbini (Tuasikal, 2011). Beliau mengutip atsar dari sahabat Mu'adz bin Jabal *radhiyallahu 'anhu* yang berkata:

تَعَلَّمْ الْعِلْمَ فَإِنَّ تَعَلُّمَهُ لَكَ حَسَنَةٌ ، وَطَلَبَهُ عِبَادَةٌ ، وَمُذَاكَرَتَهُ تَسْبِيحٌ ، وَالْبَحْثَ عَنْهُ جِهَادٌ ، وَتَعْلِيمَهُ مَنْ لَا يَعْلَمُهُ صَدَقَةٌ ، وَبَذْلَهُ لِأَهْلِهِ قُرْبَةٌ .

Artinya: "Tuntutlah ilmu (belajarlah Islam) karena mempelajarinya adalah suatu kebaikan untukmu. Mencari ilmu adalah suatu ibadah. Saling mengingatkan akan ilmu adalah tasbih. Membahas suatu ilmu adalah jihad. Mengajarkan ilmu pada orang yang tidak mengetahuinya adalah sedekah. Mencurahkan tenaga untuk belajar dari ahlinya adalah suatu qurbah (mendekatkan diri pada Allah)."

Dalam *Syarah Bulughul Maram* karya Syaikh Sa'ad bin Nashir Asy-Syastry, dijelaskan bahwa dalil-dalil tersebut mengandung hikmah mendalam mengenai keutamaan berdakwah dan menunjuki jalan kebaikan kepada orang lain. Seseorang yang memfasilitasi atau menunjukkan kebaikan akan memperoleh pahala atas upayanya sekaligus turut mendapatkan limpahan pahala dari orang-orang yang mengikuti kebaikan itu (Sa'ad, 2015). Menunjuki kebaikan dalam hal ini memiliki cakupan yang luas, tidak sekadar melalui ucapan lisan, melainkan juga lewat perbuatan nyata serta pemanfaatan berbagai sarana atau media, seperti tulisan, buku, hingga pengembangan teknologi.

Dalam pengembangan teknologi, penerapan nilai-nilai Muamalah Ma'a An-Naas diwujudkan melalui perancangan sistem yang tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga memberikan manfaat sedekah ilmu yang nyata bagi masyarakat. Aplikasi simulasi ini dirancang secara khusus sebagai sarana edukasi untuk memudahkan masyarakat maupun pelajar dalam memahami ilmu *greenhouse* secara lebih interaktif, aman, dan aplikatif.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan keseluruhan tahapan perancangan, implementasi, hingga evaluasi yang telah dilakukan, pembangunan aplikasi *Plant Simulate* berbasis *Virtual Reality* (VR) telah berhasil dieksekusi sebagai media untuk memvisualisasikan parameter lingkungan *greenhouse*, seperti suhu dan ketersediaan nutrisi, guna mengatasi tingginya risiko kerugian material pada pelatihan budidaya melon konvensional. Keberhasilan ini dibuktikan oleh Kuesioner Evaluasi Nilai Edukasi dengan persentase kelayakan 87,7% (Sangat Baik), yang mengonfirmasi bahwa pengguna mampu memahami agronomi dengan aman dan bebas risiko. Dari segi imersi dan kenyamanan, penggunaan platform *low-cost* berupa *Mobile VR* terbukti sangat memadai dengan skor *Igroup Presence Questionnaire* (IPQ) 5,24 (Sangat Baik Sekali) dan *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) 16,90 (Ringan/Aman). Meskipun *Oculus VR* mencatatkan skor sedikit lebih unggul (IPQ 5,66 dan SSQ 13,65), *Mobile VR* tetap memberikan keseimbangan optimal antara efisiensi biaya dan kualitas simulasi. Secara spiritual, visualisasi lingkungan ini sukses memfasilitasi pengguna untuk bertafakur mengamati kebesaran ciptaan Allah Swt. dalam proses biologis tanaman.

Selain itu, sistem simulasi *greenhouse* juga berhasil dirancang menjadi media yang interaktif dan memiliki objektif penyelesaian masalah yang jelas melalui penerapan mekanisme gamifikasi berbasis *Plant Point*, sehingga sukses mengatasi kelemahan simulator konvensional yang cenderung pasif. Interaktivitas

ini diwujudkan melalui kombinasi algoritma *Rule-Based System* (RBS) yang beroperasi secara akurat dalam mengevaluasi intervensi pengguna (terhadap parameter suhu dan nutrisi) menjadi fluktuasi poin secara *real-time*. Fluktuasi poin tersebut kemudian bertindak sebagai pemicu dinamis bagi algoritma *Finite State Machine* (FSM) untuk memproses transisi logis pada wujud 3D tanaman—bermula dari fase bibit, kondisi layu, target penyelesaian panen, hingga kematian tanaman . Rangkaian mekanisme menuntut pengguna untuk mengambil keputusan yang pada akhirnya menjadi wujud *Muamalah Ma'a An-Naas* dalam mendistribusikan ilmu pengetahuan manajemen agrikultur yang bermanfaat bagi kemaslahatan masyarakat

5.2. Saran

Berdasarkan keseluruhan hasil evaluasi dan kesimpulan dari pengembangan sistem simulasi *Plant Simulate*, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan lebih banyak parameter lingkungan yang mempengaruhi fase biologis tanaman. Mengingat penelitian ini sengaja membatasi interaksi hanya pada variabel suhu dan ketersediaan nutrisi guna mengakomodasi pengguna pemula, pengembangan di masa depan dapat mulai memasukkan faktor biotik dan abiotik lainnya. Penambahan variabel kompleks seperti persentase kelembapan udara, pupuk hidroponik, intensitas cahaya matahari, hingga simulasi datangnya hama akan membuat algoritma menjadi jauh lebih menantang. Dengan adanya perluasan parameter tersebut, mekanisme sebab-akibat di dalam sistem akan menjadi lebih empiris, sehingga mampu menawarkan pengalaman simulasi pertumbuhan tanaman melon yang jauh lebih realistis, berbobot, dan imersif bagi pengguna di tingkat lanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Alkhaq, M. U., & Asmiatun, S. (2026). Game Virtual Tour Pengenalan Sistem Tata Surya Berbasis VR Google Cardboard dan Voice Command. *Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, *8*(1), 151–159. https://doi.org/10.35746/jtim.v8i1.854

Alwafi, G. A., Almalki, S., Alrougi, M., Meccawy, M., & Meccawy, Z. (2022). A Social Virtual Reality Mobile Application for Learning and Practicing English. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, *16*(09), 55–75. https://doi.org/10.3991/ijim.v16i09.28289

Arif, Y. M.,An Artificial Neural Network-Based Finite State Machine for Adaptive Scenario Selection in Serious Game. (2023). *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, *16*(5), 488–500. https://doi.org/10.22266/ijies2023.1031.42

Arif, Y. M., Hariadi, M., & S. N, S. M. (2012). Integrasi Hierarchy Finite State Machine Dan Logika Fuzzy Untuk Desain Strategi Npc Game. Matics. https://doi.org/10.18860/mat.v0i0.1572

Asrianda, A., & Zulfadli, Z. (2022). Konsep Finite State Machine dan implementasinya pada Game. *Sisfo: Jurnal Ilmiah Sistem Informasi*, *6*(1), 141. https://doi.org/10.29103/sisfo.v6i1.8352

Carruth, D. W., Hudson, C., Fox, A. A. A., & Deb, S. (2020). User Interface for an Immersive Virtual Reality Greenhouse for Training Precision Agriculture. In J. Y. C. Chen & G. Fragomeni (Eds.), *Virtual, Augmented and Mixed Reality. Industrial and Everyday Life Applications* (Vol. 12191, pp. 35–46). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49698-2_3

Editya, A. S. (2022). *Pengembangan Simulasi Mitigasi Bencana Banjir Menggunakan Teknologi Virtual Reality*. *7*.

Elin Maulida Rahmawati, Rina Nurhudi Ramdhani, Agus Taufiq, & S. A. Lily Nurillah. (2023). A Systematic Literature Review: Virtual Reality Untuk Mengatasi Public Speaking Anxiety pada Mahasiswa. *G-Couns: Jurnal Bimbingan dan Konseling*, *7*(03), 382–394. https://doi.org/10.31316/gcouns.v7i03.4614

Ezperanza, P., Suryadi, E., & Amaru, K. (2023). Penggunaan Komposisi Media Tanam Arang Sekam, Cocopeat Dan Zeolit Pada Sistem Irigasi Tetes Terhadap Pertumbuhan Dan Hasil Tanaman Melon . *Journal of Integrated Agricultural Socio-Economics and Entrepreneurial Research (JIASEE)*, *1*(2), 19. https://doi.org/10.26714/jiasee.1.2.2023.19-24

Faisal, R. M., & Arisandi, F. (2025). *(Studi Kasus : Politeknik Sukabumi)*.

Gahansa, T. Y., Rende, J. C., Mardiana, P., & Londa, T. K. (2025). *Simulasi Efek Rumah Kaca dalam Skala Laboratorium: Analisis Kenaikan Suhu Menggunakan MATLAB*.

ID, A. (n.d.). Keutamaan Menanam Pohon. *Atsar ID | Arsip Fawaid Salafy*. Retrieved July 7, 2026, from https://www.atsar.id/2021/01/keutamaan-menanam-pohon.html

Kennedy, R. S., Lane, N. E., Berbaum, K. S., & Lilienthal, M. G. (1993). Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, *3*(3), 203–220. https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3

Kim, R., Kim, J., Lee, I., Yeo, U., Lee, S., & Decano-Valentin, C. (2021). Development of three-dimensional visualisation technology of the aerodynamic environment in a greenhouse using CFD and VR technology, part 1: Development of VR a database using CFD. *Biosystems Engineering*, *207*, 33–58. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.02.017

Maulana, M. A., Wahid, T. P., & Mutiah, F. (2026). *Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Kontrol Suhu Greenhouse Tanaman Anggur Berbasis IoT*. *12*.

Maulana, R., Kautsar, F. R., & Ridhwan, F. A. (n.d.). *Design of Green House Information System using Virtual Reality*.

Melo, M., Gonçalves, G., Vasconcelos-Raposo, J., & Bessa, M. (2023). How Much Presence is Enough? Qualitative Scales for Interpreting the Igroup Presence Questionnaire Score. *IEEE Access*, *11*, 24675–24685. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3254892

MSc, M. A. T. (2011, May 24). Keutamaan Belajar Islam. *Rumaysho.Com*. https://rumaysho.com/1762-keutamaan-belajar-islam.html

Nurhayati, H., & Arif, Y. M. (2023). Math-VR: Mathematics Serious Game for Madrasah Students using Combination of Virtual Reality and Ambient Intelligence. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, *14*(5). https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140524

Ramadhania, D. A., Susilowati, D., & Rianti, T. S. M. (2025). Analisis Pembiayaan Dan Pendapatan Usahatani . *13*(03).

Sari, D. N., & Alfiyan, A. R. (2023). Peran Adaptasi Game (Gamifikasi) dalam Pembelajaran untuk Menguatkan Literasi Digital: Systematic Literature Review. *UPGRADE : Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*, *1*(1), 43–52. https://doi.org/10.30812/upgrade.v1i1.3157

Siregar, A. A. I., & Theresia, C. (2023). Perancangan Simulasi Prosedur Evakuasi Darurat Gempa Bumi di Gedung X Berbasis Virtual Reality. *Journal of Integrated System*, *6*(2), 144–163. https://doi.org/10.28932/jis.v6i2.7696

Slob, N., Hurst, W., Van De Zedde, R., & Tekinerdogan, B. (2023). Virtual reality-based digital twins for greenhouses: A focus on human interaction. *Computers and Electronics in Agriculture*, *208*, 107815. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107815

Stephen, F., Gunawan, D., Hansun, S., & Program Studi Teknik Informatika, Universitas Multimedia Nusantara. (2016). Rancang Bangun Aplikasi Permainan Edukasi Berbasis Virtual Reality Menggunakan Google Cardboard . *Sisfo*, *05*(05), 496–503. https://doi.org/10.24089/j.sisfo.2016.03.001

Surat Al-An'am Ayat 99 Arab, Latin, Terjemah dan Tafsir | Baca di TafsirWeb. (2018, September 15). https://tafsirweb.com/2223-surat-al-anam-ayat-99.html

Surat Qaf Ayat 7 Arab, Latin, Terjemah dan Tafsir | Baca di TafsirWeb. (2018, September 15). https://tafsirweb.com/9813-surat-qaf-ayat-7.html

Wilujeng, E. D. I., Pertami, R. R. D., Salim, A., & Majidah, M. (2024). Pengaruh Iklim Mikro dan Penggunaan Media Tanam yang Berbeda pada Pertumbuan Tanaman Melon Varietas Sweet Net: The Effect of Micro Climat and Differences Planting Media on The Growth of Melon Sweet Net Varieties. *Gontor Agrotech Science Journal*, *10*(1), 49–56. https://doi.org/10.21111/agrotech.v10i1.12126

Winatha, K. R., & Ariningsih, K. A. (2020). Persepsi Mahasiswa Terhadap Penerapan Gamifikasi Dalam Pembelajaran . *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, *17*(2).