

Pengembangan Edugame Berbasis *Virtual Reality* Untuk Menumbuhkan Kesadaran Lingkungan Pada Siswa Sekolah Dasar

Development of A Virtual Reality-Based Edugame to Foster Environmental Awareness Among Elementary School Students

Sulaiman Amrozi Jailani*¹, Yuni Yamasari²,
^{1,2}Teknik Informatika, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia
Email: *¹sulaiman.22123@mhs.unesa.ac.id

Article Info:	Received 28 Mei 2026	Revised 28 Mei 2026	Accepted 13 Juni 2026	Published: 14 Juni 2026
--------------------------	-------------------------	------------------------	--------------------------	----------------------------

Abstrak

Pendidikan pengelolaan sampah di sekolah dasar memerlukan media yang tidak hanya menyampaikan konsep, tetapi juga melatih tindakan pemilahan sampah secara langsung. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi *ECO-SCHOOL VR*, edugame berbasis virtual reality untuk mendukung pengetahuan, kebiasaan, dan perilaku pengelolaan sampah siswa sekolah dasar. Penelitian menggunakan metode *Research and Development* dengan model *ADDIE*. Aplikasi dikembangkan menggunakan *Unreal Engine 5* dan diimplementasikan pada *Oculus Meta Quest 2*. Evaluasi melibatkan 75 siswa kelas IV–VI SDN Mulyoagung, Bojonegoro, melalui pengujian *black-box*, validasi ahli media, *pre-test*, *post-test*, kuesioner kebiasaan, observasi lingkungan sekolah, wawancara, uji reliabilitas, analisis *N-Gain*, *Wilcoxon Signed-Rank Test*, *effect size*, dan *Technology Acceptance Model*. Hasil *black-box* menunjukkan seluruh fitur inti berjalan sesuai spesifikasi. Validasi ahli media memperoleh rata-rata 89,5 dengan kategori sangat layak. Seluruh instrumen reliabel dengan *Cronbach's Alpha* 0,82–0,91. Pengetahuan sampah meningkat dari 44% menjadi 84%, kebiasaan pengelolaan sampah dari 69,3% menjadi 87%, dan kebiasaan membuang sampah dari 9,3% menjadi 95%, dengan *N-Gain* 0,71; 0,58; dan 0,94. Uji *Wilcoxon* menunjukkan *p-value* 0,000 dengan *effect size* 0,48–0,61. *PEOU* sebesar 91% dan *PU* sebesar 95% menunjukkan penerimaan pengguna sangat baik. Namun, karena desain penelitian menggunakan *one-group pretest-posttest* tanpa kelompok kontrol, hasil ini ditafsirkan sebagai bukti awal peningkatan, bukan bukti kausal mutlak.

Kata Kunci: *ADDIE; ECO-SCHOOL VR; Manajemen Sampah; Virtual reality; Teknik Informatika.*

Abstract

Elementary waste-management education requires learning media that not only deliver concepts but also train students to perform waste-sorting actions directly. This study aimed to develop and evaluate ECO-SCHOOL VR, a virtual reality-based edugame Designed to support elementary students' knowledge, habits, and waste-management behavior. The study employed a Research and Development method using the ADDIE model. The application was developed with Unreal Engine 5 and implemented on the Oculus Meta Quest 2. The Evaluation involved 75 fourth- to sixth-grade students at SDN Mulyoagung, Bojonegoro, using black-box testing, media-expert validation, pre-tests, post-tests, habit questionnaires, school-environment observation, interviews, reliability testing, N-Gain Analysis, the Wilcoxon Signed-Rank Test, effect size, and the Technology Acceptance Model. Black-box testing showed that all core features operated according to specification. Media-expert validation produced an average score of 89.5, indicating a highly feasible category. All instruments were reliable, with Cronbach's Alpha values ranging from 0.82 to 0.91. Waste knowledge increased from 44% to 84%, waste-management habits from 69.3% to 87%, and waste-disposal habits from 9.3% to 95%, with N-Gain values of 0.71, 0.58, and 0.94. The Wilcoxon test showed p-values of 0.000 with effect sizes ranging from 0.48 to 0.61. PEOU reached 91% and PU reached 95%, indicating very good user acceptance. However, because this study used a one-group pretest-posttest Design without a control group, the findings should be interpreted as preliminary evidence of improvement rather than absolute causal evidence.

Keywords: ADDIE, ECO-SCHOOL VR, Informatics Engineering, Virtual reality, Waste Management

This is an open access article under the CC BY-SA license.



1. PENDAHULUAN

Virtual Reality (VR) memungkinkan siswa berinteraksi dengan objek dan lingkungan yang menyerupai kondisi nyata, sementara dari perspektif Teknik Informatika VR merupakan sistem yang mengintegrasikan lingkungan virtual, logika interaksi, antarmuka, umpan balik, dan validasi tindakan [1], [2]. Dalam pendidikan lingkungan di sekolah dasar, pembelajaran pengelolaan sampah masih didominasi metode konvensional yang kurang mendukung latihan tindakan nyata secara berulang [3]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pembelajaran berbasis VR yang mampu memvalidasi keputusan siswa secara langsung dalam aktivitas pemilahan sampah.

VR imersif perlu dirancang sebagai sistem pembelajaran interaktif yang menghubungkan pengalaman spasial, keterlibatan, dan pengambilan keputusan pengguna [4]. Model CAMIL menjelaskan bahwa *presence*, *agency*, emosi, dan keterlibatan memengaruhi hasil belajar dalam VR [5], sedangkan umpan balik langsung dan gamifikasi dapat mengarahkan tindakan pengguna menjadi pengalaman belajar yang terstruktur [6], [7]. Dalam konteks pendidikan lingkungan, integrasi VR dan gamifikasi berpotensi mendukung pembentukan perilaku pro-lingkungan melalui interaksi langsung dan penguatan tindakan secara berulang.

Penelitian sebelumnya pada pendidikan lingkungan umumnya berfokus pada jenjang pendidikan yang lebih tinggi atau menggunakan media AR dan permainan nonimersif [8]–[10]. Selain itu, pengembangan VR untuk K-12 masih banyak menekankan penyajian materi dan observasi lingkungan dibandingkan simulasi perilaku yang didukung modul interaksi, validasi, skor, *timer*, dan umpan balik [11]. Oleh karena itu, masih terdapat kebutuhan akan *edugame* VR pemilahan sampah untuk siswa

sekolah dasar yang mengintegrasikan latihan perilaku, pengujian fungsional, evaluasi pembelajaran, dan penerimaan pengguna.

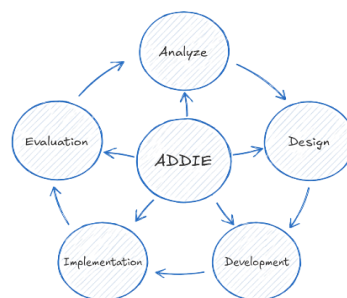
Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi ECO-SCHOOL VR sebagai *edugame* berbasis VR untuk pembelajaran pengelolaan sampah di sekolah dasar. Evaluasi dilakukan terhadap kelayakan sistem melalui validasi ahli dan *black-box testing*, peningkatan pengetahuan dan kebiasaan siswa, serta penerimaan pengguna berdasarkan *Perceived Ease of Use* (PEOU) dan *Perceived Usefulness* (PU). Dengan demikian, VR diposisikan sebagai media pembelajaran sekaligus sistem interaktif yang dapat dievaluasi dari aspek teknis, pedagogis, dan penerimaan pengguna.

Penelitian menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE [12] dan melibatkan 75 siswa SDN Mulyoagung, Bojonegoro. ECO-SCHOOL VR dikembangkan menggunakan *Oculus Meta Quest 2* dengan dukungan *inside-out tracking* dan *handheld controller* [13], sedangkan data dikumpulkan melalui pengujian fungsional, validasi ahli, tes, kuesioner, observasi, dan wawancara. Analisis dilakukan menggunakan persentase kelayakan, *N-Gain*, uji statistik, dan data kualitatif dengan interpretasi yang dibatasi sebagai bukti awal karena tidak menggunakan kelompok kontrol.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan ECO-SCHOOL VR sebagai *edugame* pemilahan sampah yang menerjemahkan perilaku lingkungan ke dalam sistem VR modular yang dapat diuji dan dievaluasi [14]. Sistem mengintegrasikan validasi berbasis aturan, pencatatan interaksi, pengujian fungsional, evaluasi hasil belajar, observasi lingkungan, wawancara, dan penerimaan pengguna berbasis TAM. Kontribusi ini memberikan model pengembangan VR yang menghubungkan rekayasa perangkat lunak pendidikan dengan pembelajaran perilaku pro-lingkungan di sekolah dasar.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model *Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation* (ADDIE) sebagai kerangka pengembangan gim edukasi berbasis *Virtual Reality* (VR) tentang pengelolaan sampah bagi siswa sekolah dasar. Model ADDIE dipilih karena menyediakan proses pengembangan yang sistematis mulai dari analisis kebutuhan, perancangan, pengembangan, implementasi, hingga evaluasi, sehingga produk yang dihasilkan tidak hanya memenuhi tujuan pembelajaran tetapi juga memiliki fungsionalitas perangkat lunak yang baik. Evaluasi dilakukan menggunakan desain *one-group pretest-posttest* untuk mengukur perubahan pengetahuan dan kebiasaan siswa sebelum dan sesudah penggunaan ECO-SCHOOL VR pada kelompok yang sama. Meskipun desain ini tidak melibatkan kelompok kontrol sehingga hubungan kausal tidak dapat ditetapkan secara penuh, potensi bias diminimalkan melalui triangulasi data yang mencakup pengujian fungsional, validasi ahli media, *pre-test* dan *post-test*, kuesioner kebiasaan, observasi lingkungan sekolah, wawancara, serta evaluasi penerimaan pengguna berbasis *Technology Acceptance Model* (TAM)



Gambar 1. Alur kerja berbasis *ADDIE*

2.1 Lokasi dan Partisipan Penelitian

Penelitian dilaksanakan di SDN Mulyoagung, Bojonegoro, dengan pengembangan perangkat lunak dan validasi internal dilakukan di Program Studi Teknik Informatika, sedangkan uji coba lapangan dilakukan di sekolah. Partisipan penelitian terdiri atas 75 siswa kelas IV–VI, tiga guru, kepala sekolah, dan dua ahli media sebagai validator. Pemilihan siswa kelas tinggi sekolah dasar didasarkan pada kesiapan kognitif dan kemampuan mereka dalam mengikuti instruksi, mengoperasikan perangkat

Virtual Reality (VR) dengan pendampingan, memahami konsep dasar pengelolaan sampah, serta memberikan respons terhadap instrumen penelitian. Pemilihan partisipan juga mempertimbangkan akses sekolah, kesiapan perangkat, dan izin pelaksanaan pembelajaran berbasis VR. Sebelum implementasi, seluruh siswa memperoleh pengarahan teknis untuk memastikan penggunaan perangkat VR dapat dilakukan secara optimal selama kegiatan penelitian.

2.2 Peralatan



Gambar 2. Perangkat *Oculus Quest 2*

Penelitian menggunakan *Oculus Meta Quest 2* dengan fitur *inside-out tracking* dan *handheld controller*. Setiap siswa menggunakan perangkat selama 8–12 menit dengan mekanisme *teleportation* dan *snap-turn* untuk mengurangi *cybersickness* [16]. Penggunaan VR dilakukan dengan pendampingan guna memastikan keamanan dan kenyamanan siswa, sedangkan pelaksanaan uji coba diatur secara bergiliran agar tahapan *pre-test*, penggunaan aplikasi, *post-test*, dan pengisian kuesioner berlangsung konsisten.

2.3 Prosedur Penelitian

Tahap *Analysis* dilakukan untuk identifikasi kebutuhan, karakteristik siswa, kondisi sekolah. Data dikumpulkan melalui observasi awal, wawancara dengan guru dan kepala sekolah, serta pengukuran awal terhadap pengetahuan siswa tentang sampah dan kebiasaan pengelolaan sampah. Hasil tahap ini digunakan untuk menentukan kebutuhan fungsional aplikasi. Analisis kebutuhan juga digunakan untuk memastikan bahwa visual, objek sampah, dan aktivitas pemilahan yang dimasukkan dalam aplikasi sesuai dengan pengalaman sehari-hari siswa di lingkungan sekolah

Tabel 1. Kebutuhan Fungsional *ECO-SCHOOL VR*

No.	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi Implementasi
1	Menampilkan lingkungan virtual	Sistem menampilkan area virtual menyerupai sekolah yang memuat objek sampah dan tempat sampah berkategori.
2	Mengelola interaksi objek	Pengguna dapat memilih, mengambil, dan memindahkan objek sampah di lingkungan <i>VR</i> .
3	Memvalidasi kategori sampah	Sistem membandingkan objek sampah yang dipilih dengan kategori tempat sampah yang dipilih.
4	Menghitung skor	Sistem memberikan skor berdasarkan ketepatan tindakan pengguna.
5	Mengendalikan durasi sesi	Sistem menjalankan sesi permainan dengan batas waktu dan mengakhiri sesi ketika waktu habis.
6	Menampilkan umpan balik	Sistem memberikan umpan balik visual atau informasi secara langsung setelah tindakan pengguna.
7	Merekam indikator interaksi	Sistem menyiapkan struktur data untuk mencatat tindakan benar/salah, waktu penyelesaian, dan respons pengguna sebagai dasar evaluasi pembelajaran dan pengembangan analitik lanjutan.

ECO-SCHOOL VR dirancang dengan mekanisme interaksi, antarmuka sederhana, sistem penilaian, *timer*, dan umpan balik yang memungkinkan setiap tindakan pengguna divalidasi berdasarkan kategori sampah yang dipilih [17]. Aplikasi dikembangkan sebagai *edugame VR 3D* berbasis arsitektur modular untuk memastikan fungsionalitas sistem berjalan sesuai desain dan mendukung pengembangan

lanjutan. Implementasi dilakukan melalui *Pre-test*, penggunaan aplikasi, *Post-test*, serta pengisian kuesioner kebiasaan dan penerimaan pengguna berbasis *Technology Acceptance Model* (TAM), sedangkan evaluasi mencakup validasi ahli, pengujian fungsional, observasi, wawancara, dan analisis hasil belajar untuk menilai kelayakan media, kinerja sistem, perubahan perilaku, dan penerimaan pengguna.

2.4 Data, Instrumen, dan Metode Pengumpulan Data

Data penelitian mencakup hasil belajar, kebiasaan pengelolaan sampah, penerimaan pengguna, pengujian teknis aplikasi, observasi, dan wawancara. Pengumpulan data dilakukan melalui *black-box testing*, validasi ahli, tes pengetahuan, kuesioner kebiasaan, observasi, kuesioner TAM (PEOU dan PU), serta wawancara dengan siswa, guru, dan kepala sekolah. Seluruh instrumen telah divalidasi dan dinyatakan reliabel dengan nilai Cronbach's Alpha di atas 0,70.

2.5 Teknik Analisis Data

Data kuantitatif dari validasi ahli, pengujian fungsional, tes pengetahuan, kuesioner siswa, dan observasi dianalisis secara deskriptif dengan menghitung skor, rata-rata, dan persentase capaian. Analisis persentase digunakan untuk menentukan kelayakan media, keberhasilan fungsi sistem, capaian pengetahuan siswa, kebiasaan pengelolaan sampah, dan kondisi lingkungan sekolah. Rumus persentase yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{F}{N} \times 100\% \quad (1)$$

Keterangan: P adalah skor persentase, F adalah total skor yang diperoleh, dan N adalah skor maksimum yang mungkin diperoleh. Hasil kelayakan media diinterpretasikan menggunakan kriteria yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kriteria Kelayakan Media

Persentase	Kategori
85%–100%	Sangat Layak
70%–84%	Layak
55%–69%	Cukup Layak
40%–54%	Kurang Layak
<40%	Tidak Layak

Pengetahuan siswa, kebiasaan pengelolaan sampah, dan kebiasaan membuang sampah diinterpretasikan menggunakan kriteria capaian yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria Capaian Siswa

Persentase	Kategori
>75%	Sangat Baik
51%–75%	Baik
26%–50%	Kurang
<25%	Sangat Kurang

Untuk menentukan peningkatan kesadaran pengelolaan sampah siswa sebelum dan sesudah menggunakan *edugame VR*, skor *normalized gain* dihitung menggunakan rumus berikut:

$$N - Gain = \frac{Posttest\ Score - Pretest\ Score}{Maximun\ Score - Pretest\ Score} \quad (2)$$

Skor *N-Gain* diinterpretasikan berdasarkan kriteria yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kriteria Interpretasi *N-Gain*

Skor <i>N-Gain</i>	Interpretasi
$g \geq 0,70$	Tinggi
$0,30 \leq g < 0,70$	Sedang
$g < 0,30$	Rendah

Data penelitian meliputi hasil belajar, kebiasaan pengelolaan sampah, penerimaan pengguna, pengujian teknis aplikasi, observasi, dan wawancara yang dikumpulkan melalui *black-box testing*, validasi ahli, tes pengetahuan, kuesioner kebiasaan, observasi, kuesioner TAM (PEOU dan PU), serta

wawancara dengan siswa, guru, dan kepala sekolah. Seluruh instrumen telah melalui validasi dan uji reliabilitas dengan nilai Cronbach's Alpha di atas 0,70 sehingga layak digunakan dalam evaluasi penelitian.

2.6 Implementasi Sistem *ECO-SCHOOL VR*

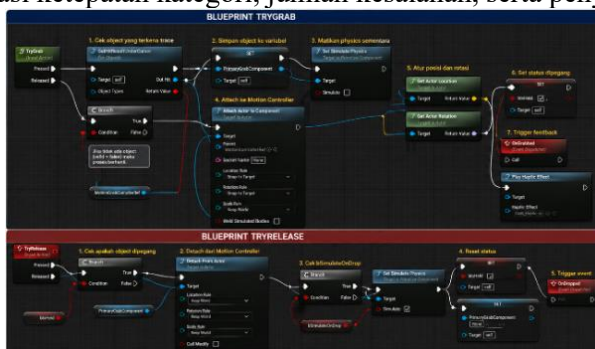
ECO-SCHOOL VR dikembangkan menggunakan *Unreal Engine 5* dengan pendekatan modular. Pengembangan aplikasi *VR* berbasis permainan membutuhkan integrasi desain pembelajaran, skenario interaktif, mekanika permainan, dan evaluasi pengguna agar produk tidak berhenti sebagai visualisasi, tetapi menjadi sistem pembelajaran yang dapat diuji [18]. Arsitektur sistem terdiri atas tujuh modul utama

Tabel 5. Komponen Utama *ECO-SCHOOL VR*

No.	Komponen	Fungsi
1	Lingkungan sekolah virtual	Menyediakan spasial yang familier bagi pengguna sekolah dasar.
2	Objek sampah 3D	Menyediakan objek interaktif yang harus diklasifikasikan.
3	Tempat sampah organik dan anorganik	Berfungsi sebagai target klasifikasi dari tindakan pengguna.
4	Sistem penilaian	Mengevaluasi ketepatan tindakan pemilahan sampah.
5	<i>Game timer</i>	Mengendalikan durasi sesi dan mencegah paparan <i>VR</i> yang berlebihan.
6	Mekanisme umpan balik	Memberikan respons langsung setelah setiap tindakan pengguna.
7	Modul pencatatan interaksi	Menyiapkan pencatatan tindakan, skor, durasi, dan kesalahan sebagai dasar analitik pembelajaran pada versi lanjutan.

2.6.1 Interaksi Objek

Fitur utama aplikasi adalah modul interaksi objek melalui logika *TryGrab* dan *TryRelease*. *TryGrab* mendeteksi objek dalam jangkauan dan memasangkannya ke pengendali *VR*, sedangkan *TryRelease* melepaskan objek dan memicu validasi kategori sampah. Sistem memberikan skor dan umpan balik positif untuk klasifikasi yang benar serta respons kesalahan untuk klasifikasi yang salah. Mekanisme ini memungkinkan setiap tindakan siswa direkam sebagai jejak interaksi yang objektif dan digunakan untuk mengevaluasi ketepatan kategori, jumlah kesalahan, serta penyelesaian tugas.



Gambar 3. *Blueprint TryGrab dan TryRelease*

2.6.2 Implementasi *Blueprint*

Seluruh logika interaksi dan lokomosi *VR* (*snap-turn* dan *teleportation*) dikembangkan menggunakan *Blueprint* pada *Unreal Engine* untuk mengatur pengambilan dan pelepasan objek, animasi tangan virtual, serta alur permainan. Pendekatan ini memastikan setiap tindakan pengguna diproses secara *realtime* dengan umpan balik dan penilaian yang terintegrasi, sekaligus memudahkan *prototyping*, pengujian, pemeliharaan sistem modular, dan evaluasi logika interaksi secara visual tanpa harus menelaah seluruh kode sumber berbasis teks.



Gambar 4. Implementasi *Blueprint locomotion VR*

2.6.3 Lingkungan Virtual dan Antarmuka

Lingkungan virtual dirancang menyerupai area sekolah (kelas, koridor, dan halaman) dengan objek sampah serta tempat sampah berlabel [19]. Aplikasi menyediakan instruksi singkat, memungkinkan siswa mengambil dan memilah sampah ke kategori yang sesuai, serta menampilkan skor, umpan balik visual, dan ringkasan hasil akhir. Antarmuka dibuat sederhana untuk mengurangi beban kognitif operasional sehingga siswa dapat lebih fokus pada tugas utama pembelajaran, yaitu mengenali, memilih, dan memilah sampah.



Gambar 5. Lingkungan sekolah virtual dan *final result screen*

3. HASIL

3.1 Pengujian Fungsional

Pengujian fungsional dilakukan menggunakan pendekatan *Black-box testing* untuk memastikan bahwa fitur inti *ECO-SCHOOL VR* berjalan sesuai dengan kebutuhan yang telah ditetapkan. Pengujian ini berfokus pada kesesuaian antara masukan pengguna dan keluaran *system*.

Tabel 6. Hasil pengujian Fungsional

No.	Fungsi yang Diuji	Hasil Pengujian	Status
1	Lingkungan virtual	Adekan sekolah virtual ditampilkan dengan benar.	Lulus
2	Interaksi objek	Objek sampah dapat diambil, dipindahkan, dan dilepaskan.	Lulus
3	Validasi kategori	Penempatan pada tempat sampah yang benar dan salah dapat diidentifikasi.	Lulus
4	Mekanika permainan	Skor, <i>timer</i> , dan status misi berjalan sesuai aturan.	Lulus
5	<i>UI</i> dan umpan balik	<i>HUD</i> , umpan balik, dan hasil akhir ditampilkan dengan benar.	Lulus
6	Alur Sesi Pengguna	Instruksi awal, transisi permainan, batas waktu, dan tampilan akhir berjalan sesuai urutan yang dirancang.	Lulus

Berdasarkan Tabel 6, seluruh fungsi utama *ECO-SCHOOL VR* memperoleh status “Lulus”, menunjukkan bahwa aplikasi telah memenuhi kebutuhan fungsional yang ditetapkan. Lingkungan virtual, interaksi objek, validasi kategori sampah, sistem skor, *timer*, umpan balik, dan hasil akhir berfungsi sesuai rancangan. Hasil *black-box testing* ini menjadi prasyarat penting sebelum menafsirkan hasil pembelajaran, karena stabilitas mekanisme interaksi sangat menentukan keakuratan data evaluasi dan mencegah distorsi pada pengukuran peningkatan hasil belajar.

3.2 Validasi Media

Validasi media dilakukan sebelum implementasi lapangan untuk menilai kelayakan *ECO-SCHOOL VR* dari aspek desain visual, navigasi, interaktivitas, kinerja teknis, dan relevansi konten. Validasi dilakukan oleh dua ahli media.

Tabel 7. Hasil Validasi Media

No.	Validator	Skor	Nilai Konversi	Kategori
1	Ahli media 1	72/80	90	Sangat layak
2	Ahli media 2	71/80	89	Sangat layak
	Rata-rata	71,5/80	89,5	Sangat layak

Berdasarkan Tabel 7, ahli media pertama memberikan nilai konversi sebesar 90, sedangkan ahli media kedua memberikan nilai konversi sebesar 89. Nilai rata-rata validasi media adalah 89,5 dan termasuk dalam kategori sangat layak. Hasil ini menunjukkan bahwa *ECO-SCHOOL VR* telah memenuhi kriteria kelayakan media. Oleh karena itu, aplikasi layak digunakan pada tahap implementasi lapangan. Kelayakan tersebut menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi prasyarat teknis dan pedagogis minimum sebelum digunakan oleh siswa, terutama pada aspek visual, interaktivitas, navigasi, performa teknis, dan kesesuaian konten dengan tujuan pembelajaran.

3.2 Uji Reliabilitas

Tabel 8. Hasil Uji Reliabilitas Instrumen

No	Instrument	Jumlah Butir	Cronbach's Alpha	Kriteria	Interpretasi
1	Tes pengetahuan sampah	10	0.82	$\alpha \geq 0,70$	Reliabel
2	Kuesioner kebiasaan pengelolaan sampah	12	0.86	$\alpha \geq 0,70$	Reliabel
3	Kuesioner TAM konstruk PEOU	5	0.88	$\alpha \geq 0,70$	Reliabel
4	Kuesioner TAM konstruk PU	5	0.91	$\alpha \geq 0,70$	Reliabel

Berdasarkan Tabel 8, seluruh instrumen dinyatakan reliabel karena memiliki nilai Cronbach's Alpha di atas batas minimum 0,70, yaitu tes pengetahuan sampah (0,82), kuesioner kebiasaan pengelolaan sampah (0,86), kuesioner TAM konstruk PEOU (0,88), dan PU (0,91). Hasil ini menunjukkan bahwa seluruh instrumen memiliki konsistensi internal yang memadai sehingga layak digunakan untuk menganalisis pengetahuan, kebiasaan pengelolaan sampah, dan penerimaan pengguna terhadap *ECO-SCHOOL VR*.

3.3 Evaluasi Pengguna

Evaluasi pengguna dilakukan melalui *pre-test*, *post-test*, kuesioner kebiasaan, dan kuesioner penerimaan pengguna berbasis TAM untuk mengukur perubahan pengetahuan, kebiasaan, dan perilaku siswa setelah menggunakan *ECO-SCHOOL VR*. Seluruh instrumen diuji reliabilitasnya menggunakan Cronbach's Alpha sebelum analisis dilakukan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh instrumen reliabel sehingga layak digunakan dalam evaluasi penelitian.

Tabel 9. Perbandingan Evaluasi Pengguna

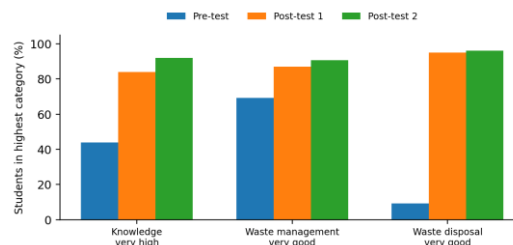
Aspek	Kategori Utama	Pre-test	Post-test	N-Gain	Interpretasi
Pengetahuan sampah	Sangat tinggi	33 (44%)	63 (84%)	0,71	Tinggi
Kebiasaan pengelolaan sampah	Sangat baik	52 (69,3%)	65 (87%)	0,58	Sedang
Kebiasaan membuang sampah	Sangat baik	7 (9,3%)	71 (95%)	0,94	Tinggi

Tabel 9 menunjukkan peningkatan pada seluruh aspek yang diukur setelah penggunaan *ECO-SCHOOL VR*. Pengetahuan siswa meningkat dari 44% menjadi 84% ($N-Gain = 0,71$), kebiasaan pengelolaan sampah dari 69,3% menjadi 87% ($N-Gain = 0,58$), dan perilaku membuang sampah dengan benar dari 9,3% menjadi 95% ($N-Gain = 0,94$). Hasil ini menunjukkan potensi *ECO-SCHOOL VR* dalam meningkatkan pengetahuan dan kebiasaan pengelolaan sampah siswa, dengan analisis inferensial menggunakan *Wilcoxon Signed-Rank Test* karena data tidak berdistribusi normal.

Tabel 10. Hasil Uji Statistik Inferensia

Aspek	Uji Normalitas	Keputusan Uji	Statistik Uji	<i>p-value</i>	<i>Effect size</i>	Interpretasi
Pengetahuan sampah	0.000	<i>Wilcoxon Signed-Rank Test</i>	-7.031	0.000	0.57	Signifikan Efek Besar
Kebiasaan pengelolaan sampah	0.000	<i>Wilcoxon Signed-Rank Test</i>	-5.857	0.000	0.48	Signifikan Efek sedang
Kebiasaan membuang sampah	0.000	<i>Wilcoxon Signed-Rank Test</i>	-7.429	0.000	0.61	Signifikan Efek Besar

Berdasarkan Tabel 10, seluruh *p-value* bernilai 0,000 atau dapat ditafsirkan sebagai $p < 0,05$, sehingga terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara skor sebelum dan sesudah penggunaan *ECO-SCHOOL VR* pada ketiga aspek. *Effect size* sebesar 0,57 pada pengetahuan sampah, 0,48 pada kebiasaan pengelolaan sampah, dan 0,61 pada kebiasaan membuang sampah menunjukkan efek yang kuat sampai sedang sesuai kriteria interpretasi yang digunakan.



Gambar 6. Grafik perbandingan evaluasi pengguna

Selain evaluasi hasil belajar dan kebiasaan, penerimaan pengguna dipetakan melalui konstruk *TAM*. Tabel 10 berikut disiapkan untuk menampilkan persentase *PEOU* dan *PU*

Tabel 11. Hasil Evaluasi Penerimaan Pengguna Berbasis *TAM*

Konstruk <i>TAM</i>	Indikator Utama	Persentase Capaian	Kategori	Interpretasi
<i>PEOU</i>	Kemudahan memahami instruksi, kemudahan menggunakan <i>controller</i> , kemudahan berpindah dan mengambil objek	91%	Sangat Baik	Siswa menilai <i>ECO-SCHOOL VR</i> mudah digunakan dan tidak memberikan beban operasional yang mengganggu proses belajar
<i>PU</i>	Manfaat aplikasi untuk memahami jenis sampah, meningkatkan perhatian, dan membantu latihan pemilahan	95%	Sangat Baik	Siswa menilai <i>ECO-SCHOOL VR</i> bermanfaat untuk memahami dan melatih perilaku pengelolaan sampa

Nilai *Perceived Ease of Use* (*PEOU*) sebesar 91% dan *Perceived Usefulness* (*PU*) sebesar 95% menunjukkan bahwa *ECO-SCHOOL VR* dinilai mudah digunakan dan bermanfaat untuk memahami serta melatih pemilahan sampah. Hasil ini mendukung kelayakan implementasi aplikasi dari aspek penerimaan pengguna, meskipun *TAM* hanya digunakan sebagai indikator penerimaan dan bukan bukti langsung efektivitas pembelajaran.

3.4 Hasil Observasi Lingkungan Sekolah

Observasi lingkungan sekolah dilakukan sebelum dan sesudah implementasi *ECO-SCHOOL VR* [21]. Observasi ini digunakan sebagai data pendukung untuk melihat perubahan kondisi lingkungan sekolah dan kebiasaan pengelolaan sampah setelah kegiatan pembelajaran berlangsung.

Tabel 12. Skor Observasi Sekolah Sebelum dan Sesudah Implementasi

Aspek	Rata-Rata <i>Pre-test</i> (%)	Rata-Rata <i>Post-test</i> (%)
Kebijakan Sekolah	62,50	84,38
Sarana dan Prasarana	54,17	79,17
Kegiatan Siswa dan Guru	43,75	65,63
Pemanfaatan Sampah	28,13	62,50
Partisipasi dan Edukasi	31,25	34,48
Total Rata-rata	45,45	65,91

Berdasarkan Tabel 12, rata-rata hasil observasi meningkat dari 45,45% pada *pretest* menjadi 65,91% pada *posttest*, menunjukkan perbaikan kondisi lingkungan sekolah sebesar 20,46% setelah implementasi ECO-SCHOOL VR. Peningkatan tertinggi terjadi pada aspek Pemanfaatan Sampah, dari 28,13% menjadi 62,50%, diikuti peningkatan pada Sarana dan Prasarana, Kebijakan Sekolah, serta Kegiatan Siswa dan Guru. Aspek Partisipasi dan Edukasi juga meningkat, meskipun relatif lebih kecil dibandingkan aspek lainnya. Hasil ini menunjukkan bahwa perbaikan lingkungan sekolah tidak hanya dipengaruhi oleh penggunaan VR, tetapi juga memerlukan dukungan berkelanjutan dari sekolah, orang tua, dan program edukasi lingkungan..

3.5 Temuan Wawancara

Hasil wawancara menunjukkan bahwa ECO-SCHOOL VR meningkatkan keterlibatan, konsentrasi, dan pemahaman siswa dibandingkan metode pembelajaran konvensional [22]. Guru, kepala sekolah, dan siswa menilai interaksi langsung serta umpan balik segera menjadi keunggulan utama aplikasi dalam mendukung pembelajaran dan program kebersihan sekolah. Namun, penggunaan headset secara bergantian menjadi kendala praktis sehingga diperlukan pengaturan teknis dan pendampingan yang baik selama implementasi.

4. PEMBAHASAN

4.1 Interpretasi Hasil Evaluasi Pengguna

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan pengetahuan pengelolaan sampah siswa dari 44,0% menjadi 84,0% ($N-Gain = 0,71$; kategori tinggi), perilaku membuang sampah yang benar dari 9,3% menjadi 95,0% ($N-Gain = 0,94$; kategori tinggi), serta kebiasaan pengelolaan sampah dari 69,3% menjadi 87,0% ($N-Gain = 0,58$; kategori sedang). Hasil *Wilcoxon Signed-Rank Test* menunjukkan p -value 0,000 pada seluruh aspek, yang mengindikasikan adanya perbedaan signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah penggunaan ECO-SCHOOL VR. Peningkatan ini didukung oleh karakteristik pembelajaran imersif yang memungkinkan siswa berinteraksi langsung dengan lingkungan virtual, mengambil keputusan, serta memperoleh umpan balik segera, sehingga proses belajar tidak hanya berlangsung pada tingkat pemahaman konsep tetapi juga pada tindakan nyata pemilahan sampah.

Dari aspek penerimaan pengguna, nilai *Perceived Ease of Use* (PEOU) sebesar 91% dan *Perceived Usefulness* (PU) sebesar 95% menunjukkan bahwa ECO-SCHOOL VR dinilai mudah digunakan dan bermanfaat untuk mendukung pembelajaran pengelolaan sampah. Keandalan hasil penelitian juga didukung oleh seluruh instrumen yang memiliki nilai Cronbach's Alpha di atas 0,70, sehingga dinyatakan reliabel. Meskipun demikian, karena penelitian menggunakan desain *one-group pretest-posttest*, temuan ini perlu dipandang sebagai bukti awal yang menunjukkan potensi peningkatan hasil belajar dan perilaku siswa, bukan sebagai bukti kausal yang mutlak.

4.2 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan ECO-SCHOOL VR berpotensi meningkatkan pengetahuan pengelolaan sampah siswa dari 44,0% menjadi 84,0% ($N-Gain = 0,71$), perilaku membuang sampah yang benar dari 9,3% menjadi 95,0% ($N-Gain = 0,94$), serta kebiasaan pengelolaan sampah dari 69,3% menjadi 87,0% ($N-Gain = 0,58$). Hasil *Wilcoxon Signed-Rank Test* (p -value = 0,000) menunjukkan perbedaan signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah penggunaan aplikasi. Dari aspek penerimaan pengguna, nilai *Perceived Ease of Use* (PEOU) sebesar 91% dan *Perceived Usefulness* (PU) sebesar 95% menunjukkan bahwa aplikasi dinilai mudah digunakan dan bermanfaat, sementara seluruh instrumen penelitian dinyatakan reliabel dengan nilai Cronbach's Alpha

di atas 0,70. Meskipun demikian, karena menggunakan desain *one-group pretest-posttest*, temuan ini perlu dipandang sebagai bukti awal potensi peningkatan hasil belajar dan perilaku siswa, bukan bukti kausal yang mutlak.

4.3 Kontribusi dari Perspektif Teknik Informatika

Dari perspektif Teknik Informatika, ECO-SCHOOL VR merupakan platform simulasi digital yang mengubah aktivitas pengelolaan sampah menjadi proses yang dapat diproses, divalidasi, dan dievaluasi secara sistematis. Aplikasi ini telah lulus pengujian fungsional dan memperoleh skor validasi ahli 89,5, menunjukkan kelayakan teknis untuk digunakan dalam pembelajaran. Kontribusi utamanya terletak pada mekanisme interaksi *TryGrab* dan *TryRelease* yang memungkinkan setiap tindakan pengguna direkam, divalidasi, dan dinilai melalui sistem skor serta umpan balik langsung. Dengan arsitektur modular dan implementasi *Blueprint* pada *Unreal Engine 5*, sistem mendukung pengembangan lanjutan, sementara pola *input-process-output* yang diterapkan menunjukkan bahwa aplikasi VR tidak hanya berfungsi sebagai media pembelajaran, tetapi juga sebagai sistem evaluasi tindakan yang menghasilkan data perilaku yang terukur.

4.4 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada penggunaan desain *one-group pretest-posttest* tanpa kelompok kontrol, pelaksanaan di satu sekolah dengan 75 siswa, serta pengukuran jangka pendek sehingga generalisasi dan inferensi kausal perlu dilakukan secara hati-hati. Keterbatasan lain meliputi penggunaan headset VR yang terbatas sehingga siswa harus bergiliran serta belum adanya pengukuran *cybersickness* menggunakan instrumen baku. Meskipun seluruh instrumen dinyatakan reliabel berdasarkan nilai Cronbach's Alpha, penelitian lanjutan perlu melibatkan kelompok kontrol, jumlah partisipan yang lebih besar, dan evaluasi jangka panjang untuk menguji efektivitas ECO-SCHOOL VR secara lebih kuat.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan ECO-SCHOOL VR sebagai *edugame* berbasis *Virtual Reality* untuk pembelajaran pengelolaan sampah pada siswa sekolah dasar menggunakan model ADDIE, *Unreal Engine 5*, dan perangkat *Oculus Meta Quest 2*. Aplikasi mengintegrasikan lingkungan virtual, objek sampah 3D, mekanisme interaksi, validasi kategori, sistem skor, *timer*, dan umpan balik dalam arsitektur modular yang dapat digunakan untuk mendukung proses pembelajaran dan evaluasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ECO-SCHOOL VR berpotensi meningkatkan pengetahuan, kebiasaan, dan perilaku pemilahan sampah siswa melalui pengalaman belajar yang imersif, interaktif, dan didukung umpan balik langsung. Integrasi unsur imersi, kontrol tindakan pengguna, gamifikasi, dan mekanisme komputasional memungkinkan siswa belajar melalui praktik pemilahan sampah yang menyerupai kondisi nyata.

Meskipun demikian, hasil penelitian perlu ditafsirkan secara hati-hati karena menggunakan desain *one-group pretest-posttest* tanpa kelompok kontrol. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan bukti awal mengenai potensi ECO-SCHOOL VR, sementara penelitian selanjutnya disarankan menggunakan kelompok kontrol, melibatkan partisipan yang lebih luas, serta mengevaluasi aspek *usability*, *cybersickness*, dan dampak jangka panjang penggunaan aplikasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada kepala sekolah, guru, dan siswa SDN Mulyoagung, Bojonegoro, yang telah berpartisipasi dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada kedua ahli media yang telah membantu validasi instrumen dan aplikasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Cho and K. S. Park, "Designing Immersive *Virtual reality* Simulation for Environmental Science Education," *Electronics*, vol. 12, no. 2, p. 315, Jan. 2023, doi: 10.3390/electronics12020315.

- [2] A. D. Samala *et al.*, “Extended reality for education: Mapping current trends, challenges, and applications,” *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, vol. 7, no. 3, pp. 140–169, Aug. 2024, doi: 10.24036/jptk.v7i3.37623.
- [3] W. Zhang and Z. Wang, “Theory and Practice of *VR/AR* in K-12 Science Education—A Systematic Review,” *Sustainability*, vol. 13, no. 22, p. 12646, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132212646.
- [4] G. W. Scurati, M. Bertoni, S. Graziosi, and F. Ferrise, “Exploring the Use of *Virtual reality* to Support Environmentally Sustainable Behavior: A Framework to *Design Experiences*,” *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 943, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13020943.
- [5] G. Makransky and G. B. Petersen, “The *Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL)*: a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive *Virtual reality*,” *Educational Psychology Review*, vol. 33, no. 3, pp. 937–958, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10648-020-09586-2.
- [6] G. B. Petersen, G. Petkakis, and G. Makransky, “A study of how immersion and interactivity drive *VR* learning,” *Computers & Education*, vol. 179, p. 104429, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.compedu.2021.104429.
- [7] A. Christopoulos and S. Mystakidis, “Gamification in Education,” *Encyclopedia*, vol. 3, no. 4, pp. 1223–1243, Oct. 2023, doi: 10.3390/encyclopedia3040089.
- [8] T. Wai Ying, N. Alias, and D. DeWitt, “Sustainable environmental education using *virtual reality*: A module for improving environmental citizenship competences in secondary schools,” *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 20, no. 10, p. em2511, Oct. 2024, doi: 10.29333/ejmste/15177.
- [9] D. A. P. Putri, N. D. Septiyanti, E. Sudarmilah, and D. Priyawati, “*Augmented reality Development* for Garbage Sortation Education for Children,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 15, no. 7, 2024, doi: 10.14569/IJACSA.2024.0150718.
- [10] A. Purnaningtyas, Harsono, D. Fuadi, and A. Muhibbin, “The Waste Sorting Education Media: An Innovation with Android-based Game,” *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pendidikan*, vol. 7, no. 3, pp. 381–389, Dec. 2023, doi: 10.23887/jppp.v7i3.67226.
- [11] C.-H. Wang, “Education in the *metaverse*: Developing *virtual reality* teaching materials for K–12 natural science,” *Education and Information Technologies*, vol. 30, no. 7, pp. 8637–8658, May 2025, doi: 10.1007/s10639-024-13156-2.
- [12] A. G. Spatioti, I. Kazanidis, and J. Pange, “A Comparative Study of the *ADDIE* Instructional *Design Model* in Distance Education,” *Information*, vol. 13, no. 9, p. 402, Aug. 2022, doi: 10.3390/info13090402.
- [13] A. C. M. Queiroz, G. Fauville, A. T. Abeles, A. Levett, and J. N. Bailenson, “The Efficacy of *Virtual reality* in Climate Change Education Increases with Amount of Body Movement and Message Specificity,” *Sustainability*, vol. 15, no. 7, p. 5814, Mar. 2023, doi: 10.3390/su15075814.
- [14] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, and S. Dhall, “Role of *Virtual reality* in advancing education with sustainability and identification of Additive Manufacturing as its cost-effective enabler,” *Sustainable Futures*, vol. 8, p. 100324, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.sftr.2024.100324.
- [15] C. A. Lara-Alvarez, E. F. Parra-González, M. A. Ortiz-Esparza, and H. Cardona-Reyes, “Effectiveness of *virtual reality* in elementary school: A meta-*Analysis* of controlled studies,” *Contemporary Educational Technology*, vol. 15, no. 4, p. ep459, Oct. 2023, doi: 10.30935/cedtech/13569.
- [16] P. Kourtesis, J. Linnell, R. Amir, F. Argelaguet, and S. E. MacPherson, “*Cybersickness* in *Virtual reality* Questionnaire (CSQ-*VR*): A Validation and Comparison against SSQ and *VRSQ*,” *Virtual Worlds*, vol. 2, no. 1, pp. 16–35, Jan. 2023, doi: 10.3390/virtualworlds2010002.
- [17] C.-Y. Huang, B.-Y. Cheng, S.-J. Lou, and C.-C. Chung, “*Design* and Effectiveness *Evaluation* of a Smart Greenhouse *Virtual reality* Curriculum Based on STEAM Education,” *Sustainability*, vol. 15, no. 10, p. 7928, May 2023, doi: 10.3390/su15107928.

- [18] F. J. Agbo, S. S. Oyelere, J. Suhonen, and M. Tukiainen, “*Design, Development, and Evaluation of a virtual reality game-based application to support computational thinking,*” *Educational technology Research and Development*, vol. 71, no. 2, pp. 505–537, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11423-022-10161-5.
- [19] K.-L. Ou, Y.-H. Liu, and W. Tarnq, “*Development of a Virtual Ecological Environment for Learning the Taipei Tree Frog,*” *Sustainability*, vol. 13, no. 11, p. 5911, May 2021, doi: 10.3390/su13115911.
- [20] E. S. Sahabuddin and A. Makkasau, “*Utilization of virtual reality as a learning tool to increase students’ pro-environmental behavior at universities: A maximum likelihood estimation approach,*” *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, vol. 20, no. 12, p. em2540, Dec. 2024, doi: 10.29333/ejmste/15654.
- [21] A. R. Balcha, H.-L. Chen, and R. Ramadhana A.B, “*The impact of augmented reality-assisted structured learning on environmental education for preschool children,*” *Education and Information Technologies*, vol. 30, no. 17, pp. 25467–25503, Nov. 2025, doi: 10.1007/s10639-025-13737-9.
- [22] R. Liu, L. Wang, T. A. Koszalka, and K. Wan, “*Effects of immersive virtual reality classrooms on students’ academic achievement, motivation and cognitive load in science lessons,*” *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 38, no. 5, pp. 1422–1433, Oct. 2022, doi: 10.1111/jcal.12688.
- [23] V. Aksel Stenberdt and G. Makransky, “*Mastery experiences in immersive virtual reality promote pro-environmental waste-sorting behavior,*” *Computers & Education*, vol. 198, p. 104760, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.compedu.2023.104760.
- [24] P. Spangenberger, S. M. Geiger, and S.-C. Freytag, “*Becoming nature: effects of embodying a tree in immersive virtual reality on nature relatedness,*” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, p. 1311, Jan. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-05184-0.
- [25] E. E. Şimşek, “*The Use of Augmented reality-Supported Activities in Environmental Education for Early Childhood: A Quasi-Experimental Study,*” *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10374, Nov. 2024, doi: 10.3390/su162310374.