

Pengembangan Aplikasi *Augmented Reality* untuk Visualisasi Interaktif Pembelajaran Fisika

Cheetara Novatriyanti Surya Adi¹, Devi Afriyantari Puspa Putri^{*2}

^{1,2}Informatika, Fakultas Komunikasi dan Informatika, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

Email: ¹cheetara1711@gmail.com, ²dap129@ums.ac.id

Abstrak

Kemajuan teknologi digital menyebabkan peningkatan penggunaan gawai di kalangan pelajar, yang berdampak pada penurunan fokus, retensi informasi, dan prestasi akademik. Dalam konteks pembelajaran sains, skor kompetensi sains Indonesia yang terus menurun menunjukkan perlunya inovasi dalam metode pengajaran. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah penggunaan *Augmented Reality* (AR), yang terbukti meningkatkan keterlibatan siswa dan pemahaman konsep materi pembelajaran. Mengusung tajuk *Understanding Physics through AR Application* (UPARUPA), sebuah aplikasi *marker-based* AR yang dirancang untuk membantu siswa Sekolah Menengah Pertama (SMP) dalam memahami konsep fisika kelistrikan. Aplikasi ini dikembangkan dengan metode *Successive Approximation Model* (SAM) serta menerapkan prinsip *Child-Computer Interaction* (CCI) untuk penyesuaian *User Experience* (UX) dengan kemampuan kognitif siswa. Dibandingkan metode pembelajaran konvensional, UPARUPA menghadirkan pengalaman belajar yang lebih interaktif, visual, dan adaptif, sehingga dapat mengatasi keterbatasan pembelajaran konvensional. Dengan demikian, aplikasi ini berpotensi menjadi solusi inovatif dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran sains berbasis teknologi. Aplikasi ini diuji dengan metode *Black Box Testing* dengan hasil 100% dan *System Usability Scale* dengan skor 70,06 yang dikategorikan sebagai *Acceptable* dengan *grade rating OK*. Uji Melalui hasil dari pengujian deteksi *marker* diketahui bahwa semakin tinggi *feature marker* maka semakin mudah dan cepat sebuah *marker* terdeteksi. Sedangkan uji rekayasa *marker* memberikan hasil hampir serupa pada indikator pengujian di setiap tingkatan *feature marker*, kecuali pada uji pemotongan *marker*.

Kata kunci: *Augmented Reality, Child-Computer Interaction, Fisika, Kelistrikan, Pembelajaran Digital.*

Development Augmented Reality Based Application for Interactive Physics Learning

Abstract

Digital technology advancement has led to an increase in gadget usage among students, impacting their focus, information retention, and academic performance. In the context of science education, Indonesia's declining science competency scores highlight the need for innovation in teaching methods. One approach that can be implemented is the use of *Augmented Reality* (AR), which has been proven to enhance student engagement and comprehension of learning materials. *Understanding Physics through AR Application* (UPARUPA), is a *marker-based* AR application designed to assist junior high school students in understanding electrical physics concepts. This application was developed using the *Successive Approximation Model* (SAM) and applies *Child-Computer Interaction* (CCI) principles to optimize *User Experience* (UX) according to students' cognitive abilities. Compared to conventional learning methods, UPARUPA provides a more interactive, visual, and adaptive learning experience, addressing the limitations of traditional learning and enhancing students' understanding of electrical physics concepts. Application was tested using *Black Box Testing*, yielding a 100% success rate, and evaluated through the *System Usability Scale* (SUS), achieving a score of 70.06, categorized as *Acceptable* with a *grade rating of OK*. The *marker detection* test results indicate that the higher the *marker feature*, the faster and more accurately the *marker* is detected. Meanwhile, the *marker engineering* test produced similar results across different *feature marker* levels, except for the *cropping* test, where detection significantly decreased.

Keywords: *Augmented Reality, Child-Computer Interaction, Digital Learning, Electricity, Physics.*

1. PENDAHULUAN

Era digitalisasi seperti saat ini menjadikan gawai seakan sebuah kebutuhan pokok. Tercatat pada tahun 2024 terdapat 353,3 juta gawai aktif di Indonesia[1]. Popularitas gawai yang terus meningkat dari tahun ke tahun menimbulkan beberapa masalah, diantaranya peningkatan waktu penggunaan gawai dan permasalahan psikologi seperti kecanduan [2]. Kecanduan gawai marak menimpa anak sekolah yang menyebabkan gangguan fokus, pengaburan konsep realitas, serta penurunan otomasi dan retensi informasi[3]. Selain itu, terjadi pula penurunan kemampuan manajemen waktu yang tidak sedikit berdampak para penurunan prestasi siswa [4]. Dilansir dari data OECD[5] bahwa skor kompetensi sains di Indonesia pada survey terakhir tahun 2022 berada di angka 383 turun sebesar 13 poin dibanding survei sebelumnya pada tahun 2018. Selain itu, fakta bahwa skor kompetensi Indonesia berada jauh di bawah rata-rata negara mitra OECD patut menjadi perhatian. Terdapat beberapa cara untuk meningkatkan kualitas dan mutu pendidikan, salah satunya dengan melakukan migrasi dari media pembelajaran konvensional menuju pemanfaatan media pembelajaran digital.

Terdapat banyak jenis media pembelajaran digital, salah satunya *Augmented Reality* (AR). Tren AR tiga tahun terakhir banyak digunakan sebagai teknologi interaktif diberbagai bidang pembelajaran dan pendidikan [6]. Lanskap AR di bidang edukasi bukanlah sesuatu yang baru. Berdasarkan data[7], hingga tahun 2020 tercatat 2.698 penelitian terkait AR di bidang edukasi sudah dipublikasikan. Hal tersebut tidak lain karena melalui teknologi AR pengalaman belajar dan pemahaman detail pada materi pembelajaran dapat lebih dikembangkan dibanding media teknologi pembelajaran lain[8].

Sejumlah penelitian terhadap teknologi *Augmented Reality* (AR) dalam dunia edukasi telah dilakukan, salah satunya pada pembelajaran Ilmu Pengetahuan Alam (IPA) [9]. Dalam penelitian [9] diungkapkan bahwa implementasi media AR memunculkan keterlibatan aktif siswa Sekolah Dasar (SD) pada proses pembelajaran. Pernyataan serupa juga ditemukan pada penelitian lain [10], [11]. Penelitian [10] menyatakan bahwa tujuan utama peningkatan motivasi dan prestasi belajar siswa sekolah dasar dapat dicapai melalui penggunaan AR. Hal tersebut karena melalui AR, materi pembelajaran menjadi lebih menarik dan menyenangkan [11]. Sedikit berbeda dengan kebutuhan pembelajaran SD yang berfokus pada pembelajaran yang menyenangkan, tuntutan belajar pada Sekolah Menengah Pertama (SMP) berfokus pada pemahaman konsep materi ilmiah dasar hingga lanjutan awal. Pada penelitian [12] dipaparkan mengenai pengembangan aplikasi pengenalan tata surya dalam rangka pengenalan konsep astronomi dasar. Penelitian lain untuk mengenalkan konsep ilmiah juga dilakukan oleh [13] dengan menerapkan AR untuk menjelaskan komposisi zat pada materi kimia. Selain pada tingkat sekolah dasar sampai menengah, AR juga diterapkan pada pendidikan tinggi[14], [15]. Penelitian [14] memaparkan pengembangan aplikasi AR miliknya bertujuan untuk mengurangi biaya model perangkat fisik yang relatif mahal dan mudah rusak saat digunakan dalam proses pembelajaran. Sedangkan [15] menggunakan AR untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis. Tidak sedikit pula AR digunakan sebagai simulasi kegiatan lapangan[16], [17], [18] pada kegiatan praktikum. Dalam kasus ini AR digunakan sebagai alternatif untuk kegiatan yang memiliki keterbatasan perangkat[16] serta membutuhkan pengamatan lapangan, misal terkait pengamatan konstruksi[17] dan alat berat[18].

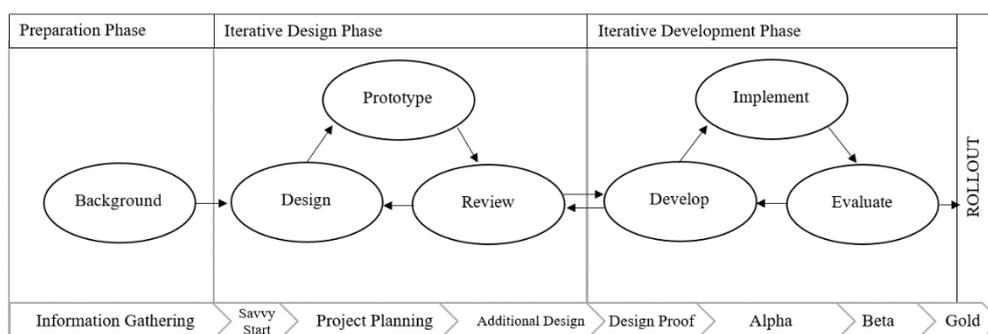
Meskipun banyak penelitian telah membahas efektivitas AR dalam pembelajaran, terdapat beberapa **tantangan** yang perlu diperhatikan. Salah satu permasalahan utama dalam penerapan AR adalah fenomena *cognitive load*, di mana siswa mengalami kesulitan dalam memahami materi akibat beban kognitif yang berlebihan saat menggunakan AR[19]. Penelitian [20] menunjukkan bahwa siswa seringkali kewalahan dengan kuantitas materi dan interaksi dalam simulasi AR, sehingga diperlukan strategi untuk mengurangi beban kognitif tersebut. Salah satu solusinya adalah mengurangi interaksi objek virtual yang tidak perlu dalam desain aplikasi AR[21]. Selain itu, mayoritas penelitian AR dalam bidang edukasi masih berfokus pada aspek daya tarik visual dan keterlibatan pengguna tanpa mempertimbangkan perbedaan karakteristik kognitif anak-anak dibandingkan orang dewasa. Hal ini menjadi krusial mengingat siswa SMP masih dikategorikan sebagai anak-anak dalam hukum legal dan perkembangan biologis[22]. Oleh karena itu, pendekatan *Child-Computer Interaction* (CCI) diperlukan untuk menyesuaikan desain antarmuka dan interaksi digital dengan karakteristik kognitif dan fisik anak-anak[23].

Melihat tingginya minat dan potensi penerapan teknologi AR dalam pembelajaran, maka dirancanglah penelitian dengan tujuan mengembangkan aplikasi AR bertajuk *Understanding Physics through AR Application* (UPARUPA). UPARUPA menggabungkan bahan ajar konvensional dengan teknologi AR untuk memunculkan objek guna memahami konsep fisika kelistrikan pada tingkat SMP. Melalui penelitian ini akan diketahui kesiapan aplikasi dan penerimaan masyarakat, terutama pihak yang terlibat langsung dengan pembelajaran fisika kelistrikan terhadap aplikasi UPARUPA.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Pengembangan Aplikasi

Model yang digunakan dalam perancangan dan pengembangan aplikasi UPARUPA adalah *Successive Approximation Model* (SAM). Model SAM mengedepankan kolaborasi aktif, *prototyping* yang cepat, dan pemberian umpan balik yang teratur sehingga aplikasi yang dihasilkan dapat memenuhi kebutuhan pembelajaran [24]. Tahapan model SAM diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. SAM Model Development

Berdasarkan diagram pada Gambar 1, pengembangan aplikasi model SAM mencakup 3 fase sebagai berikut.

2.1.1. Preparation Phase

Diawali dengan tahap persiapan dengan mengumpulkan informasi mengenai tren dan kecenderungan penggunaan aplikasi melalui tinjauan literatur penelitian terdahulu. Melalui tinjauan literatur yang dilakukan, diketahui bahwa kegiatan pembelajaran yang terlalu berpusat pada penjelasan materi oleh guru menimbulkan respon pasif siswa sehingga perlu adanya modifikasi inovatif dalam pembelajaran yang dapat merangsang siswa untuk berperan aktif dalam kegiatan pembelajaran [25]. Dari sekian banyak alternatif, inovasi pembelajaran AR berbasis android banyak dikembangkan dan terbukti bisa menjadi salah satu media pembelajaran yang dapat meningkatkan pengetahuan, pemahaman, dan antusiasme siswa dalam kegiatan belajar [26].

2.1.2. Iteration Design Phase

Tahapan ini dibagi menjadi tiga, yakni *design*, *prototype*, dan *review*. Langkah pertama yakni mengidentifikasi kebutuhan dan tujuan aplikasi, termasuk fitur utama yang menjadi fokus aplikasi. Selanjutnya, merancang desain konseptual aplikasi menggunakan aplikasi Figma. Setelah mendesain untuk tiap – tiap scene aplikasi AR, pengerjaan menggunakan aplikasi Unity 3D dilakukan untuk membuat *prototype* awal aplikasi. Kemudian dilakukan *review* aplikasi, meliputi fitur utama AR, aspek edukasi (materi tertulis dan audio), serta fitur sekunder lain. Masukan yang diberikan pada tahap *review* kemudian diimplementasikan pada aplikasi. Tahapan – tahapan tersebut diiterasi terus menerus hingga terbentuk rancangan aplikasi yang sesuai dengan tujuan awal penelitian serta mencakup aspek – aspek yang dibutuhkan dalam aplikasi edukasi.

2.1.3. Iteration Development Phase

Tahapan ini terbagi menjadi 3 tahap, yakni *develop*, *implement*, dan *evaluate*. Pada fase ini akan dilakukan pengerjaan kode, pengimplementasian aplikasi, dan evaluasi aplikasi melalui testing. Upaya yang dilakukan antara lain menggabungkan sumber daya *marker* yang di-*store* pada *cloud* Vuforia, environment AR pada aplikasi Unity, serta hal lain yang diperlukan untuk membangun aplikasi UPARUPA menjadi kesatuan aplikasi yang bisa dijalankan. Aplikasi kemudian diberi label Alpha dan diujicobakan dengan metode *System Usability Scale* (SUS) dan *Black Box Testing*.

Berdasarkan uraian di atas, pengimplementasian model SAM pada pengembangan aplikasi UPARUPA disajikan secara detail per tahap pada Tabel 1.

Tabel 1. Implementasi Metode SAM pada pengembangan UPARUPA

No.	Fase Pengembangan	Tahapan Pengembangan	Implementasi pada Aplikasi
1.	<i>Preparation Phase</i>	<i>Background</i>	Mengumpulkan informasi dan melakukan tinjauan literatur terkait pembelajaran berbasis AR.
2.	<i>Iteration Design Phase</i>	<i>Design</i>	Membuat rancangan antarmuka dengan aplikasi Figma.
		<i>Prototype</i>	Membuat scene yang diperlukan pada aplikasi AR dengan aplikasi Unity 3D.
		<i>Review</i>	Evaluasi rancangan <i>prototype</i> .
3.	<i>Iteration Development Phase</i>	<i>Develop</i>	Implementasi fitur dan pengintegrasian <i>marker</i> pada <i>cloud</i> Vuforia.
		<i>Implement</i>	Uji coba aplikasi dalam skala kecil untuk mengidentifikasi <i>bug</i> .
		<i>Evaluate</i>	Pengujian usability menggunakan SUS serta pengujian fungsional dengan <i>Black Box Testing</i> .

2.2. Pengumpulan Data

2.2.1. Metode Eksperimen

Metode eksperimen dilakukan terhadap kondisi *marker* yang direkayasa dalam 3 aspek, yakni kecerahan (*brightness*), saturasi (*saturation*), dan pemotongan sebagian *marker* (*cropping*). Kuantitas rekayasa *marker* tersebut beragam tetapi tetap menggunakan skala yang hampir sama, antara lain rekayasa kecerahan dan pemotongan menggunakan skala pengurangan sebesar 25%, 50%, dan 75%, sedangkan saturasi menggunakan skala pengurangan 25%, 50%, 75%, 100% (*grayscale*). Adapun eksperimen ini dilakukan menggunakan aplikasi UPARUPA yang dipasang pada perangkat ponsel dengan spesifikasi software Android 11 (Red Velvet Cake) RAM 3GB, ROM 32GB, dan kamera 13MP.

2.2.2. Teknik Sampling

Teknik sampling diterapkan pada evaluasi usability dengan *System Usability Scale* (SUS). *Sampel* penelitian berjumlah 41 orang terdiri dari siswa dan guru yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling*[27] berdasarkan keterlibatan *sample* dalam pembelajaran fisika.

2.3. Pengolahan Data

2.3.1. Metode Analisis

Data yang diperoleh dengan teknik pengujian *black box testing* dianalisis dengan melihat hasil kesesuaian luaran yang diharapkan dengan luaran actual pada saat pengujian dengan nilai valid atau tidak valid. Analisis *black box testing* dengan parameter tersebut termasuk dalam metode *functional testing*[28]. Sedangkan skor hasil

kuesioner SUS akan dianalisis *acceptability ranges*, *grade scale*, dan *adjective ratings*. Hasil skor SUS yang sudah didapatkan akan dikategorikan berdasarkan jenis kelamin responden dan akan diolah lebih lanjut menggunakan perangkat Google Colab menggunakan Bahasa Python untuk menguji normalitas data per kategori dan *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) untuk menguji validitas, reliabilitas, dan t-test.

2.3.2. Teknik Validitas dan Reliabilitas

Uji validitas data dilakukan dengan *Pearson Correlation*, sedangkan uji reliabilitas dengan *Cronbach’s Alpha*. Kedua pengujian tersebut akan dilakukan menggunakan *tool* SPSS. Namun, sebelum melakukan uji validitas menggunakan *Pearson Correlation* perlu dilakukan uji normalitas data untuk mengetahui distribusi data SUS apakah berdistribusi normal atau tidak.

2.4. Analisis Data dengan SUS dan *Black Box*

Pengujian black box dilakukan sebelum pelaksanaan eksperimen terhadap subjek SUS guna mengetahui respon aplikasi terhadap *input* dan *interaksi* pengguna. Pengujian *black box* dilakukan dengan meneliti fungsi fitur aplikasi tanpa mengetahui struktur atau kerja sistem internal sebuah aplikasi[29]. Hasil dari pengujian berdasarkan test case yang diberikan akan dicatat berdasarkan validitas luaran aktual terhadap luaran yang diharapkan dari fitur aplikasi tersebut.

Adapun pengujian dengan SUS dilakukan dengan observasi subjek, pengujian aplikasi oleh subjek, dan pengisian kuesioner. Observasi subjek dilakukan pada tanggal 22 Januari 2025 sampai dengan 23 Januari 2025 dengan pengelompokan total subjek menjadi dua rombongan belajar. Dalam rentang dua hari tersebut subjek penelitian melakukan uji coba aplikasi UPARUPA dengan didampingi peneliti untuk proses instalasi pada perangkat android masing – masing. Kemudian peneliti menginstruksikan dan menjelaskan teknis pengisian kuesioner kepada subjek yang hasilnya kemudian akan diolah dan diinterpretasikan lebih lanjut.

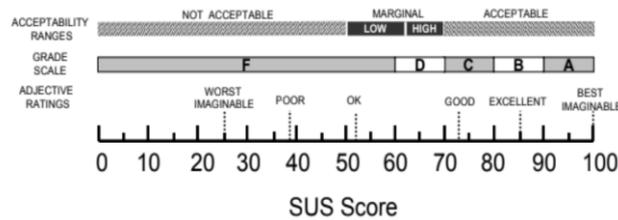
Hasil dari perhitungan dengan metode SUS akan dikonversi kedalam sebuah nilai yang dapat dijadikan pertimbangan untuk menentukan layak tidaknya sebuah aplikasi layak untuk diterapkan [30]. Nilai yang didapat dari *testing* SUS didasarkan pada sepuluh pernyataan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pernyataan Kuesioner SUS

No.	Indikator Pernyataan
1.	Saya berpikir akan menggunakan aplikasi ini lagi
2.	Saya merasa aplikasi ini rumit untuk digunakan
3.	Saya merasa aplikasi ini mudah digunakan
4.	Saya membutuhkan bantuan orang lain terkait teknis pemakaian aplikasi ini
5.	Saya merasa fitur aplikasi ini berjalan dengan semestinya
6.	Saya merasa aplikasi ini memiliki banyak ketidakkonsistenan
7.	Saya merasa orang lain akan memahami cara menggunakan aplikasi ini dengan cepat
8.	Saya merasa sistem ini membingungkan
9.	Saya merasa tidak ada hambatan dalam menggunakan aplikasi ini
10.	Saya perlu membiasakan diri terlebih dahulu sebelum menggunakan aplikasi ini

Masing – masing pernyataan pada Tabel 2 akan diberi nilai oleh responden dalam kisaran 1 sampai 5, di mana nilai 1 berarti Sangat Tidak Setuju dan 5 berarti Sangat Setuju. Nilai dari responden yang dikumpulkan melalui kuesioner kemudian diolah dengan aturan penghitungan sebagai berikut.

- 1) Nilai pernyataan nomor ganjil dihitung dengan nilai respon dikurangi dengan nilai 1.
- 2) Nilai pernyataan nomor genap dihitung dengan 5 dikurangi nilai respon.
- 3) Keseluruhan nilai pernyataan dijumlah dan dikalikan dengan nilai 2,5.
- 4) Hasil akhir skor SUS dikategorikan menggunakan skala pada Gambar 2.



Gambar 2. Skala pengkategorian skor SUS

Sesuai Gambar 2, nilai yang didapatkan dari kuesioner SUS akan dianalisis meliputi tiga komponen, yakni *acceptability ranges*, *grade scale*, dan *adjective ratings*. Ketiga komponen penilaian tersebut memiliki keterkaitan satu sama lain dengan skala penilaian masing – masing.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Black Box Testing

Test cases yang diuji didasarkan pada kebutuhan atau rancangan fitur aplikasi yang diujikan. Keuntungan menggunakan *black box testing* yakni pengujian dilakukan berdasarkan sudut pandang *user* sehingga dapat membantu menemukan ketidakkonsistenan pada fitur aplikasi [31]. Adapun rincian pengujian dengan *black box testing* pada aplikasi UPARUPA dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Menggunakan *Black Box Testing*

No.	Fitur	Test Case	Hasil yang Diharapkan	Hasil
1.	Home	Klik tombol MULAI	Muncul pilihan MATERI dan EVALUASI	Valid
		Klik tombol MATERI	Aplikasi mengarahkan ke halaman MENU MATERI	Valid
		Klik tombol EVALUASI	Aplikasi mengarahkan ke halaman KUIS	Valid
2.	Menu Materi	Memilih subbab materi PROTON VS ELEKTRON	Aplikasi mengarahkan ke halaman AR PROTON VS ELEKTRON	Valid
		Memilih subbab materi RANGKAIAN LISTRIK	Aplikasi mengarahkan ke halaman AR RANGKAIAN LISTRIK	Valid
		Memilih subbab materi HAMBATAN	Aplikasi mengarahkan ke halaman AR HAMBATAN	Valid
		Memilih subbab materi GAYA LORENTZ	Aplikasi mengarahkan ke halaman AR GAYA LORENTZ	Valid
		Memilih subbab materi DAYA LISTRIK	Aplikasi mengarahkan ke halaman MATERI DAYA LISTRIK	Valid
		Memilih menu UNDUH MARKER	Aplikasi mengarahkan ke halaman UNDUH MARKER	Valid
		Klik tombol INFO	Aplikasi mengarahkan ke halaman informasi aplikasi yang berisi latar belakang pembuatan aplikasi	Valid
		Klik tombol HOW TO	Aplikasi mengarahkan ke halaman petunjuk penggunaan aplikasi meliputi petunjuk penggunaan keseluruhan aplikasi dan petunjuk penggunaan fitur – fitur di dalamnya (AR, Kalkulator Daya, dan Kuis)	Valid
3.	AR Proton vs Elektron	Memindai marker 1	Menampilkan objek 3D atom proton	Valid
		Memindai marker 2	Menampilkan objek 3D atom elektron	Valid

		Memindai marker 3	Menampilkan objek 3D atom proton dan elektron	Valid
		Memindai marker 4	Menampilkan objek 3D berupa dua atom proton	Valid
		Memindai marker 5	Menampilkan objek 3D berupa dua atom elektron	Valid
		Klik tombol note	Menampilkan keterangan singkat dari objek 3D yang ditampilkan	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio off	Memutar audio materi	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio on	Audio materi berhenti	Valid
		Memilih menu CATATAN	Menampilkan ringkasan materi tentang listrik statis	Valid
		Scroll materi di menu CATATAN	Memuat materi di bawah atau di atasnya	Valid
4.	AR Rangkaian Listrik	Memindai marker 6	Menampilkan empat tombol kondisi lampu	Valid
		Klik tombol kondisi 1	Menampilkan objek 3D rangkaian listrik dengan kondisi dua lampu mati dan dua saklar terbuka	Valid
		Klik tombol kondisi 2	Menampilkan objek 3D rangkaian listrik dengan kondisi lampu satu hidup, lampu dua mati, saklar satu tertutup dan saklar dua terbuka	Valid
		Klik tombol kondisi 3	Menampilkan objek 3D rangkaian listrik dengan kondisi lampu satu mati, lampu dua hidup, saklar satu terbuka, dan saklar dua tertutup	Valid
		Klik tombol kondisi 4	Menampilkan objek 3D rangkaian listrik dengan kondisi dua lampu hidup dan dua saklar tertutup	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio off	Memutar audio materi	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio on	Audio materi berhenti	Valid
		Memilih menu CATATAN	Menampilkan ringkasan materi tentang rangkaian listrik	Valid
5.	AR Hambatan	Memindai marker 7	Menampilkan objek 3D rangkaian listrik dengan hambatan	Valid
		Klik tombol note	Menampilkan keterangan singkat dari objek 3D yang ditampilkan	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio off	Memutar audio materi	Valid
		Klik tombol audio materi saat posisi audio on	Audio materi berhenti	Valid
		Memilih menu CATATAN	Menampilkan ringkasan materi tentang hambatan	Valid
		Scroll materi di menu CATATAN	Memuat materi di bawah atau di atasnya	Valid
6.	AR Gaya Lorentz	Memindai marker 8	Menampilkan objek 3D grafik arah gaya Lorentz 1	Valid
		Memindai marker 9	Menampilkan objek 3D grafik arah gaya Lorentz 2	Valid
		Menggeser slider horizontal	Objek 3D berotasi ke kanan atau ke kiri	Valid

		Menggeser slider vertikal	Objek 3D berotasi ke atas atau ke bawah	Valid
		Memilih menu CATATAN	Menampilkan ringkasan materi tentang gaya Lorentz	Valid
		Scroll materi di menu CATATAN	Memuat materi di bawah atau di atasnya	Valid
7.	Materi Daya Listrik	Scroll materi di menu CATATAN	Memuat materi di bawah atau di atasnya	Valid
		Memilih menu KALKULATOR DAYA	Menampilkan kalkulator daya untuk menghitung biaya listrik dengan mengisikan daya, lama pemakaian, dan biaya per kWh	Valid
		Menghitung biaya listrik dengan ketiga field terisi	Hasil perhitungan muncul	Valid
		Menghitung biaya listrik dengan ketiga field tidak terisi sempurna	Muncul keterangan "Pastikan semua field terisi dengan benar."	Valid
8.	Menu Evaluasi (Kuis)	Memilih jawaban benar (sesuai dengan kunci jawaban)	Memunculkan panel bertuliskan "BENAR"	Valid
		Memilih jawaban salah (tidak sesuai dengan kunci jawaban)	Memunculkan panel bertuliskan "SALAH"	Valid
		Menyelesaikan semua pertanyaan	Menampilkan panel SELESAI disertai jumlah benar, salah, serta skor	Valid
		Memilih menu HOME	Aplikasi mengarahkan ke halaman HOME	Valid

Berdasarkan Tabel 3, hasil pengujian metode *black box testing* mendapatkan hasil fitur dapat berjalan sebagaimana mestinya dengan presentase validitas keberhasilan pengujian fitur 100% dari keseluruhan *test case* yang diberikan.

3.2. System Usability Scale (SUS)

SUS diperkenalkan [32] untuk memahami kesulitan yang mungkin dihadapi oleh *user* saat menggunakan aplikasi [33]. Metode SUS dipilih karena merupakan salah satu metode *testing* yang memerlukan waktu singkat dalam pengambilan datanya serta data yang diperoleh sudah dapat mengukur persepsi *user* terhadap aplikasi dengan baik [34].

Tabel 4. Hasil Pengujian Menggunakan SUS

Responden	Jenis Kelamin (L/P)	Skor SUS	Responden	Jenis Kelamin (L/P)	Skor SUS	Responden	Jenis Kelamin (L/P)	Skor SUS
1	L	72,5	15	L	35	29	P	52,5
2	L	65	16	L	57,5	30	P	67,5
3	L	65	17	L	50	31	L	62,5
4	L	52,5	18	L	72,5	32	P	67,5
5	L	77,5	19	L	82,5	33	L	50
6	L	60	20	P	67,5	34	P	80
7	L	57,5	21	P	67,5	35	L	85
8	L	52,5	22	L	65	36	L	92,5
9	L	82,5	23	L	67,5	37	P	92,5
10	L	77,5	24	P	95	38	P	90
11	L	45	25	L	82,5	39	P	92,5
12	L	57,5	26	L	62,5	40	P	90
13	L	60	27	P	85	41	L	92,5
14	L	85	28	P	57,5			

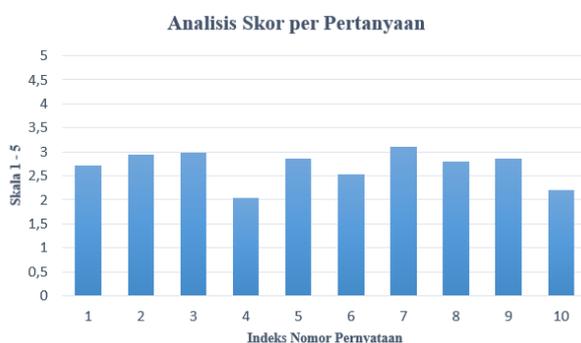
Pengambilan data responden yang dilakukan pada 22 – 23 Januari 2025 dengan Total responden 41 orang terdiri dari 40 siswa/i dan 1 orang guru pengampu mata pelajaran IPA sekaligus Kepala Sekolah instansi bersangkutan. Hasil pengujian SUS dapat dilihat pada Tabel 4.

Berdasarkan data di Tabel 4, didapatkan rata – rata skor SUS sebesar 70,06097561 atau bisa dibulatkan menjadi 70,06. Nilai tersebut dikategorikan sebagai *Acceptable* berdasarkan *Acceptable Range* dengan *Grade Scale* menunjukkan nilai *C*. Sedangkan *Adjective Rating* dari aplikasi ini bernilai *OK*, dengan presentase sebesar 5,62% mendekati *GOOD* berdasarkan penghitungan (1).

$$\begin{aligned}
 presentase &= \frac{(\text{Limit bawah kelas di atasnya} - \text{Skor yang diperoleh})}{\text{Skor yang diperoleh}} \times 100\% & (1) \\
 &= \frac{(74 - 70,06)}{70,06} \times 100\% \\
 &= 5,62\%
 \end{aligned}$$

Dalam konteks aplikasi pendidikan, skor SUS sebesar 70,06 menunjukkan bahwa aplikasi ini memiliki tingkat *usability* yang cukup baik, meskipun masih terdapat ruang untuk peningkatan. Nilai ini menunjukkan bahwa pengguna merasa aplikasi ini mudah digunakan dan cukup intuitif, namun belum mencapai tingkat keunggulan yang signifikan. Pada aplikasi pendidikan, skor di atas 68 umumnya dianggap memenuhi standar minimum, namun untuk memastikan pengalaman belajar yang lebih efektif dan menyenangkan, peningkatan fitur interaktif dan perbaikan antarmuka pengguna bisa menjadi langkah selanjutnya. Dengan kata lain, aplikasi ini telah memenuhi kebutuhan dasar pengguna dalam konteks pembelajaran, tetapi masih ada kesempatan untuk meningkatkan aspek interaktivitas dan *engagement* agar dapat mencapai kategori “Good” atau lebih tinggi dalam skala SUS.

Analisis skor per pertanyaan yang didapatkan melalui respon kuesioner sebanyak 41 responden disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Analisis skor per pertanyaan SUS

Dilihat dari data Gambar 3, dapat diketahui bahwa aplikasi UPARUPA mendapat respon cukup tinggi pada pernyataan ke tujuh “Saya merasa orang lain akan memahami cara menggunakan aplikasi ini dengan cepat”. sedangkan nilai respon terendah didapatkan di pernyataan ke empat “Saya membutuhkan bantuan orang lain terkait teknis pemakaian aplikasi ini”. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh siswa/i yang kurang familiar dengan teknologi AR berdasarkan hasil observasi pada hari pengujian terhadap responden pada hari pengujian.

Diketahui nilai minimum dari data respon Tabel 4 adalah 35 dengan *record* sebanyak 1 *entry*, sedangkan nilai maksimum menyentuh angka 95 dengan *entry* sebanyak 1. Melalui data tersebut, dapat dilakukan uji normalitas data sebagai berikut.

Tabel 5. Tabel Uji Normalitas

x (skor SUS)	(x _i - x) ²	a _i	a _i x _i
35	1144,031	0,4968	17,388
45	567,5606	0,3273	14,7285
50	354,3253	0,254	12,7
52,5	266,4576	0,1988	10,437
57,5	128,2223	0,1524	8,763
60	77,85467	0,1109	6,654
62,5	39,98702	0,0725	4,53125

65	14,61938	0,0359	2,3335
67,5	1,75173	0	0
72,5	13,51644	-0,0359	-2,60275
77,5	75,28114	-0,0725	-5,61875
80	124,9135	-0,1109	-8,872
82,5	187,0458	-0,1524	-12,573
85	261,6782	-0,1988	-16,898
90	448,4429	-0,254	-22,86
92,5	560,5753	-0,3273	-30,2753
95	685,2076	-0,4968	-47,196

Tabel 5 menunjukkan distribusi nilai (skor SUS) beserta perhitungan statistik terkait, seperti deviasi kuadrat dari rata-rata $(x_i - \bar{x})^2$, bobot a_i , dan hasil perkalian antara bobot dan nilai $a_i x_i$. Dari data ini, dapat dilihat bahwa nilai tertinggi adalah 95 dan nilai terendah adalah 35. Bobot a_i bernilai positif untuk skor di bawah median dan negatif untuk skor di atas median mengikuti aturan pada tabel Shapiro-Wilk. Nilai $a_i x_i$ mencerminkan nilai masing-masing skor terhadap rata-rata dikalikan dengan koefisien a_i yang selanjutnya akan dihitung pada uji normalitas Shapiro-Wilk.

Uji normalitas dibutuhkan untuk mengetahui apakah data yang didapatkan berdistribusi normal untuk keperluan analisis selanjutnya[35]. Sebagaimana tertera pada Tabel 5, maka uji normalitas metode Shapiro-Wilk dapat dilakukan dengan membandingkan interpolasi nilai dari W menggunakan persamaan (2).

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{2}$$

$$= \frac{4810,879}{4951,471}$$

$$= 0,971606$$

Pada perhitungan berdasarkan persamaan (2), didapatkan nilai $W = 0,971606086$, kemudian dibandingkan dengan nilai W pada Tabel Shapiro-Wilk. Diketahui bahwa nilai $W = 0,971606086$ berada di antara p -values 0,5 dan p -values 0,9 yang masing – masing bernilai 0,954 dan 0,977. Selanjutnya perlu mencari nilai interpolasi linear $0,971606086 (x)$ diantara $0,954 (y_1)$ dan $0,977 (y_2)$ dengan menggunakan persamaan (3).

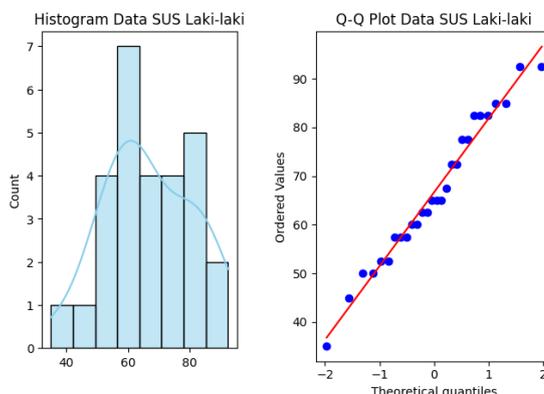
$$y = y_1 + (y_2 - y_1) \cdot \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)} \tag{3}$$

$$y = 0,954 + (0,977 - 0,954) \cdot \frac{(0,971606 - 0)}{(1 - 0)}$$

$$y \approx 0,9764$$

Pada perhitungan berdasarkan persamaan (3), didapatkan nilai interpolasi $y \approx 0,9764$ yang kemudian kita bandingkan dengan nilai $\alpha = 0.05$. Perbandingan $0,05 > 0,9764$ yang berarti nilai y lebih besar dari nilai alpha sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa uji normalitas skor SUS aplikasi UPARUPA terdistribusi normal.

Sebaran data skor SUS kategori laki – laki dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Sebaran skor SUS kategori responden laki – laki

Analisis normalitas dengan tiga metode Shapiro-Wilk, Kolomogorov-Smirnov, dan D’Agostino-Pearson berdasarkan kategori jenis kelamin laki – laki dilakukan menggunakan *tool* Google Colab dengan bahasa pemrograman Python seperti pada Gambar 5.

```
[ ] stat_cowo, p_value_cowo = shapiro(cowo)
print("Shapiro-Wilk Test (Cowok):")
print(f"Statistic: {stat_cowo:.3f}, P-value: {p_value_cowo:.3f}")
if p_value_cowo > 0.05:
    print("Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data laki-laki tidak berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

↳ Shapiro-Wilk Test (Cowok):
Statistic: 0.971, P-value: 0.613
Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)

[ ] stat_ks_cowo, p_value_ks_cowo = kstest(cowo, 'norm', args=(np.mean(cowo), np.std(cowo)))
print("\nKolmogorov-Smirnov Test (Cowok):")
print(f"Statistic: {stat_ks_cowo:.3f}, P-value: {p_value_ks_cowo:.3f}")
if p_value_ks_cowo > 0.05:
    print("Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data laki-laki tidak berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

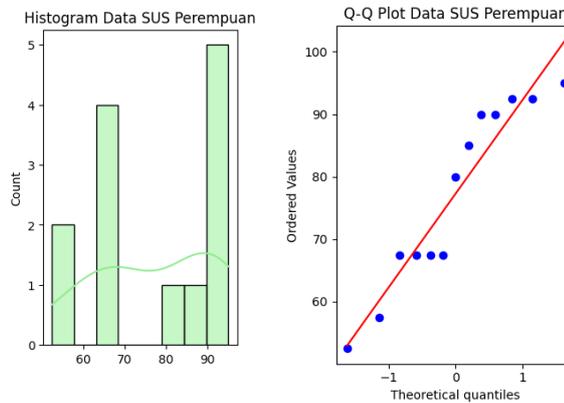
↳ Kolmogorov-Smirnov Test (Cowok):
Statistic: 0.118, P-value: 0.788
Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)

[ ] stat_dap_cowo, p_value_dap_cowo = normaltest(cowo)
print("\nD'Agostino and Pearson Test (Cowok):")
print(f"Statistic: {stat_dap_cowo:.3f}, P-value: {p_value_dap_cowo:.3f}")
if p_value_dap_cowo > 0.05:
    print("Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data cowok laki-laki berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

↳ D'Agostino and Pearson Test (Cowok):
Statistic: 0.505, P-value: 0.777
Data laki-laki berdistribusi normal (p > 0.05)
```

Gambar 5. Uji normalitas skor SUS kategori laki – laki dengan metode Shapiro-Wilk, Kolomogorov-Smirnov, dan D’Agostino-Pearson

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 5, hasil uji normalitas dengan ketiga metode mendapatkan hasil berturut – turut 0.613, 0.788, dan 0.777 yang lebih besar dari pada 0.05 sehingga dapat dikatakan data SUS kategori laki – laki berdistribusi normal. Adapun sebaran data skor SUS kategori perempuan dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Sebaran skor SUS kategori responden perempuan

Analisis normalitas dengan tiga metode Shapiro-Wilk, Kolomogorov-Smirnov, dan D’Agostino-Pearson berdasarkan kategori jenis kelamin perempuan dilakukan menggunakan *tool* Google Colab dengan bahasa pemrograman Python seperti pada Gambar 7.

```
[ ] stat_ckeve, p_value_ckeve = shapiro(ckeve)
print("\nShapiro-Wilk Test (Cewe):")
print(f"Statistic: {stat_ckeve:.3f}, P-value: {p_value_ckeve:.3f}")
if p_value_ckeve > 0.05:
    print("Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data perempuan tidak berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

Shapiro-Wilk Test (Cewe):
Statistic: 0.890, P-value: 0.099
Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)

[ ] stat_ks_ckeve, p_value_ks_ckeve = kstest(ckeve, 'norm', args=(np.mean(ckeve), np.std(ckeve)))
print("\nKolmogorov-Smirnov Test (Cewe):")
print(f"Statistic: {stat_ks_ckeve:.3f}, P-value: {p_value_ks_ckeve:.3f}")
if p_value_ks_ckeve > 0.05:
    print("Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data perempuan tidak berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

Kolmogorov-Smirnov Test (Cewe):
Statistic: 0.219, P-value: 0.491
Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)

[ ] stat_dap_ckeve, p_value_dap_ckeve = normaltest(ckeve)
print("\nD'Agostino and Pearson Test (Cewe):")
print(f"Statistic: {stat_dap_ckeve:.3f}, P-value: {p_value_dap_ckeve:.3f}")
if p_value_dap_ckeve > 0.05:
    print("Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)")
else:
    print("Data perempuan tidak berdistribusi normal (p ≤ 0.05)")

D'Agostino and Pearson Test (Cewe):
Statistic: 2.747, P-value: 0.253
Data perempuan berdistribusi normal (p > 0.05)
```

Gambar 7. Uji normalitas skor SUS kategori perempuan dengan metode Shapiro-Wilk, Kolomogorov-Smirnov, dan D'Agostino-Pearson

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 7, hasil uji normalitas dengan ketiga metode mendapatkan hasil berturut – turut 0.099, 0.491, dan 0.253 yang lebih besar dari pada 0.05 sehingga dapat dikatakan data SUS kategori perempuan berdistribusi normal.

Berdasarkan hasil uji normalitas data, diketahui data skor SUS secara keseluruhan maupun per kategori gender mendapatkan hasil normal. Setelah mengetahui hal tersebut, maka uji validitas menggunakan *Pearson Correlation* dapat dilakukan. Uji validitas *Pearson Correlation* dilakukan dengan menggunakan *tool SPSS* sehingga menghasilkan data seperti pada Gambar 8.

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	Total
P1	Pearson Correlation	1	.681**	.627**	.532**	.227	.060	.514**	.279	.456**	.263	.719**
	Sig. (2-tailed)		<.001	<.001	<.001	.153	.711	<.001	.078	.003	.097	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P2	Pearson Correlation	.681**	1	.831**	.532**	.297	.088	.523**	.500**	.235	.536**	.826**
	Sig. (2-tailed)	<.001		<.001	<.001	.059	.583	<.001	<.001	.140	<.001	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P3	Pearson Correlation	.627**	.831**	1	.459**	.358*	-.023	.452**	.413**	.154	.357**	.720**
	Sig. (2-tailed)	<.001	<.001		.003	.021	.887	.003	.007	.337	.022	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P4	Pearson Correlation	.532**	.532**	.459**	1	-.061	.182	.550**	.503**	.033	.610**	.740**
	Sig. (2-tailed)	<.001	<.001	.003		.705	.255	<.001	<.001	.836	<.001	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P5	Pearson Correlation	.227	.297	.358*	-.061	1	.145	.248	.275	.338*	.112	.398*
	Sig. (2-tailed)	.153	.059	.021	.705		.366	.117	.082	.031	.485	.010
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P6	Pearson Correlation	.060	.088	-.023	.182	.145	1	.126	.484**	.295	.139	.392*
	Sig. (2-tailed)	.711	.583	.887	.255	.366		.431	.001	.061	.385	.011
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P7	Pearson Correlation	.514**	.523**	.452**	.550**	.248	.126	1	.338*	.159	.458**	.660**
	Sig. (2-tailed)	<.001	<.001	.003	<.001	.117	.431		.031	.320	.003	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P8	Pearson Correlation	.279	.500**	.413**	.503**	.275	.484**	.338*	1	.081	.687**	.758**
	Sig. (2-tailed)	.078	<.001	.007	<.001	.082	.001	.031		.617	<.001	<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P9	Pearson Correlation	.456**	.235	.154	.033	.338*	.295	.159	.081	1	-.180	.367*
	Sig. (2-tailed)	.003	.140	.337	.836	.031	.061	.320	.617		.260	.018
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
P10	Pearson Correlation	.263	.536**	.357**	.610**	.112	.139	.458**	.687**	-.180	1	.685**
	Sig. (2-tailed)	.097	<.001	.022	<.001	.485	.385	.003	<.001	.260		<.001
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41
Total	Pearson Correlation	.719**	.826**	.720**	.740**	.398**	.392*	.660**	.758**	.367*	.685**	1
	Sig. (2-tailed)	<.001	<.001	<.001	<.001	.010	.011	<.001	<.001	.018	<.001	
	N	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41

** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).
* Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

Gambar 8. Hasil uji validitas menggunakan *Pearson Correlation*

Gambar 8 menunjukkan hasil pengolahan data masing – masing poin pertanyaan hasil kuesioner SUS guna uji validitas. *Pearson Correlation* mengkategorikan sebuah item valid apabila memenuhi *Pearson Correlation* (r) > 0.3 yang berarti korelasi cukup kuat dengan variabel *total_skor* dan *Sig. (2-tailed)* < 0.05 yang berarti korelasi signifikan secara statistik. Hasil uji validitas pada Gambar 8 menunjukkan bahwa skor tiap poin pertanyaan menunjukkan korelasi yang cukup dengan total skor dengan nilai $r \geq 0,3$, dapat dilihat pada kolom paling kiri. Sedangkan nilai *Sig. (2-tailed)* menunjukkan statistic yang signifikan dengan nilai $< 0,05$. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa skor SUS aplikasi UPARUPA teruji validitasnya.

Selanjutnya dilakukan analisis pengujian reliabilitas data skor SUS menggunakan *Cronbach's Alpha*. Pengolahan dan analisis juga dilakukan menggunakan *tool* SPSS yang menunjukkan hasil ditunjukkan pada Gambar 9.

Cronbach's Alpha	Cronbach's Alpha Based on Standardized Items	N of Items
.823	.832	10

Gambar 9. Hasil uji reliabilitas menggunakan *Cronbach's Alpha*

Berdasarkan data pada Gambar 9, diketahui nilai hasil uji reliabilitas dengan *Cronbach's Alpha* menunjukkan angka 0,823. Hasil tersebut dapat dikategorikan *Good* (Baik) karena berada dalam rentang 0,8 sampai 0,89. Sehingga dapat disimpulkan instrumen ini cukup konsisten dan reliabel.

Setelah mengetahui validitas dan reliabilitas data SUS, dapat dilakukan analisis *t-test* untuk membandingkan usability antara kelompok pengguna. Adapun kelompok pengguna pada penelitian ini dikategorikan berdasarkan jenis kelamin (*gender*) laki – laki (L) dan perempuan (P). Hasil analisis *t-test* dapat dilihat pada Gambar 10.

Gender	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	
Total	L	28	66.786	15.2123	2.8749
	P	13	77.115	13.9137	3.8590

Levene's Test for Equality of Variances				t-test for Equality of Means							
		F	Sig.	t	df	Significance		Mean Difference	Std. Error Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
						One-Sided p	Two-Sided p			Lower	Upper
Total	Equal variances assumed	.030	.864	-2.076	39	.022	.045	-10.3297	4.9754	-20.3935	-.2659
	Equal variances not assumed			-2.147	25.522	.021	.042	-10.3297	4.8121	-20.2301	-.4292

Gambar 10. Hasil analisis *t-test* berdasarkan pengelompokan *gender*

Berdasarkan hasil uji *Independent Samples t-test*, diperoleh nilai *Levene's Test* dengan $p = 0.864$, yang berarti asumsi kesetaraan varians terpenuhi sehingga analisis menggunakan baris *Equal variances assumed* (baris atas). Hasil uji *t* menunjukkan $t = -2.076$, $p = 0.045$, yang lebih kecil dari tingkat signifikansi 0.05 artinya terdapat perbedaan yang signifikan antara kedua kelompok yang dibandingkan. Nilai *mean difference* sebesar -10.33 menunjukkan bahwa satu kelompok memiliki rata-rata skor yang lebih rendah dibandingkan kelompok lainnya, dalam penelitian ini nilai kelompok *gender* perempuan lebih tinggi dari laki – laki. Selain itu, *confidence interval* 95% untuk perbedaan rata-rata pada rentang [-20.39, -0.27] tidak mencakup nol, sehingga semakin menguatkan bukti adanya perbedaan yang signifikan antar kelompok yang dibandingkan. Dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara kedua kelompok *gender* yang berperan sebagai asesor aplikasi UPARUPA dalam pengujian SUS, yakni kelompok perempuan dan kelompok laki – laki. Terlihat rata – rata skor SUS kelompok perempuan lebih tinggi -10.33 poin daripada kelompok laki – laki, yang berarti aplikasi UPARUPA lebih dapat diterima oleh subjek penelitian kategori *gender* perempuan.

3.3. Pengujian Deteksi Marker

Pengujian dilakukan menggunakan ponsel Samsung Galaxy A20s dengan spesifikasi *software* Android 11, *Internal Storage* 32 GB, *Memory* 3GB, dan resolusi kamera 13MP. Proses pengujian dilakukan terhadap marker meliputi jarak minimum, jarak maksimum, dan waktu kemunculan objek 3D pada *marker* yang memiliki *feature*

dengan rentang 1 sampai dengan 4. *Feature* sendiri merupakan informasi yang melekat pada gambar yang akan dijadikan *marker*. Semakin tinggi tingkat *feature* dalam sebuah *marker* maka semakin tinggi pula tingkat pendeteksian sebuah *marker*, baik dari sisi pengenalan *marker* dan juga kecepatan pendeteksian *marker*. *Marker* yang digunakan pada aplikasi UPARUPA yang sudah disimpan pada *cloud database* Vuforia Engine. Vuforia Engine merupakan perangkat lunak yang memiliki kemampuan teknologi rekognisi *Computer Vision* [36] untuk ekstraksi *feature* sehingga tingkatan *feature marker* dapat diketahui oleh *developer* saat mendaftarkan *marker* pada *cloud database*.

Adapun hasil pengujian deteksi *marker* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Tabel Uji Deteksi *Marker*

Indikator Pengujian	Feature Marker			
	1	2	3	4
Jarak minimum	3 cm	3 cm	3 cm	3 cm
Jarak maksimum (pemindaian dari atas <i>marker</i> /vertikal)	125 cm	130 cm	137 cm	160 cm
Jarak maksimum (Pemindaian dari sudut 45 derajat)	70 cm	104 cm	120 cm	130 cm
Waktu pendeteksian	2.31 sekon	1.94 sekon	1.00 sekon	0.61 sekon

Berdasarkan hasil pengujian Tabel 5, dapat diketahui bahwa jarak minimum *marker* dapat dideteksi adalah 3 cm untuk setiap *feature marker*. Namun, jarak maksimum *marker* dapat dideteksi akan meningkat seiring dengan meningkatnya *feature marker*. Hal tersebut juga berlaku untuk waktu yang dibutuhkan untuk *marker* terdeteksi dan memunculkan objek 3D di aplikasi.

Selain indikator seperti pada Tabel 5, dilakukan pengujian lain dengan rekayasa kondisi *marker*, antara lain kondisi saturasi, kecerahan, serta pemotongan (*cropping*). Hasil dari pengujian dengan indikator rekayasa *marker* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Tabel Uji Rekayasa *Marker*

Indikator Pengujian	Presentase Pengujian	Feature Marker			
		1	2	3	4
Kecerahan	75%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	50%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	25%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
Saturasi	75%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	50%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	25%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	0%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
Pemotongan	75%	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	50%	Tidak Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi	Terdeteksi
	25%	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi	Tidak Terdeteksi

Tabel 6 menunjukkan bahwa tingkat saturasi (*saturation*) *marker* tidak mempengaruhi pendeteksian *marker* ditunjukkan dengan *marker* berhasil terdeteksi dengan tingkat saturasi 75% hingga saturasi 0% (*grayscale*). Di sisi lain, pendeteksian *marker* pada pengurangan kecerahan 75% hingga 25% memberikan hasil “terdeteksi” pada *marker* dengan berbagai *feature*. Hal tersebut tidak berlaku pada tingkat pengurangan kecerahan 0% karena *marker* tidak dapat dibedakan lagi dengan mata manusia. Pada uji rekayasa pemotongan (*cropping*), didapatkan hasil yang sama pada *marker* dengan *feature* 2 sampai 4 yakni *marker* masih bisa terdeteksi pada pemotongan dengan menyisakan 75% dan 50% bagian *marker*. Namun, *marker* dengan *feature* 1 hanya bisa terdeteksi pada pemotongan menyisakan 75% bagian dari keseluruhan *marker*.

3.4. Diskusi

Sejumlah penelitian terkait implementasi AR di bidang pendidikan dan pengajaran menunjukkan bahwa

penerimaan teknologi dipengaruhi oleh faktor gender. hal tersebut sejalan dengan hasil yang didapat pada penelitian ini. Pengolahan dan analisis data skor SUS dengan *independent sample t-test* menunjukkan signifikansi kecenderungan penerimaan aplikasi pembelajaran berbasis AR lebih tinggi pada kelompok kategori perempuan dibandingkan laki – laki. Hal tersebut sejalan dengan pernyataan pada penelitian [37] yang mengungkapkan bahwa pelajar perempuan lebih menunjukkan ketertarikan pada penerapan teknologi baru. Namun, ada studi lain yang menyatakan AR lebih menarik bagi siswa laki – laki dibandingkan perempuan [38]. Hal ini didukung oleh studi yang menyatakan integrasi teknologi dalam pembelajaran lebih menantang bagi perempuan [39]. Hal ini mungkin terjadi karena faktor lingkungan, budaya, dan juga kemampuan individu dalam menangkap integrasi dan inovasi pembelajaran menggunakan teknologi AR.

Terkait *marker*, ditemukan fakta dalam penelitian ini bahwa kecerahan marker dan lingkungan memberikan pengaruh terhadap pendeteksian marker dibandingkan tingkat saturasinya. Hal ini berbeda dengan pernyataan dalam penelitian [40] yang menyatakan bahwa perubahan kecerahan memiliki dampak yang tidak terlalu signifikan dibandingkan dengan perubahan tingkat saturasi dan kontras. Namun, penelitian [41] mengungkapkan bahwa kecerahan yang semakin menurun, menyebabkan error detection pada marker lebih tinggi yang terlihat pada kondisi tingkat kecerahan 25%.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah menghasilkan aplikasi UPARUPA, sebuah media pembelajaran berbasis Augmented Reality (AR) yang ditujukan untuk membantu siswa Sekolah Menengah Pertama (SMP) dalam memahami konsep kelistrikan pada mata pelajaran Fisika. Aplikasi ini mencakup lima subbab utama, meliputi listrik statis, listrik dinamis, serta energi dan medan listrik, yang disajikan secara interaktif untuk meningkatkan pemahaman siswa.

Hasil *Black Box Testing* menunjukkan bahwa seluruh fitur dalam aplikasi UPARUPA berjalan dengan akurasi validitas 100%, membuktikan bahwa aplikasi ini telah memenuhi spesifikasi fungsional sesuai rancangan awal. Sementara itu, evaluasi usability dengan metode *System Usability Scale* (SUS) terhadap 41 responden memberikan skor 70,06, yang masuk dalam kategori *Acceptable* dengan *Grade Scale C* dan *Adjective Rating OK*. Analisis lebih lanjut menggunakan *independent sample test-t* menunjukkan bahwa responden perempuan memiliki rata – rata skor usability 10,33 poin lebih tinggi dibandingkan laki-laki. Hal tersebut mengindikasikan penerimaan aplikasi lebih baik oleh kelompok responden perempuan.

Pada analisis pernyataan kuesioner SUS, ditemukan bahwa pengguna memiliki kepercayaan tinggi terhadap kemudahan penggunaan aplikasi (pernyataan ke-7), tetapi masih terdapat kendala pada aspek teknis (pernyataan ke-4), yang kemungkinan besar disebabkan oleh kurangnya familiaritas siswa/i terhadap teknologi AR.

Pengujian deteksi *marker* AR menunjukkan bahwa semakin tinggi *feature marker*, semakin mudah dan cepat marker dapat terdeteksi. *Marker* dengan berbagai *feature* dapat dikenali dalam rentang kecerahan 25%–75% dan saturasi 25%–75%. Namun, ditemui keterbatasan dalam rekayasa *cropping*, terutama pada feature 1, yang hanya dapat dikenali pada 25% pemotongan. Perlu diingat bahwa hasil pada penelitian ini didapat dengan batasan perangkat berspesifikasi *software* Android 11 (Red Velvet Cake) RAM 3 GB, ROM 32 GB, dan kamera utama 13MP.

Sebagai kontribusi terhadap pengajaran Fisika dan teknologi pendidikan, aplikasi UPARUPA menawarkan metode pembelajaran inovatif berbasis AR yang dapat meningkatkan interaktivitas dan pemahaman siswa dalam konsep kelistrikan. Pendekatan pembelajaran dengan aplikasi ini diharapkan siswa lebih aktif dalam eksplorasi materi dibandingkan dengan metode pembelajaran konvensional. Namun, perlu digarisbawahi bahwa cakupan penelitian ini hanya sebatas siswa Sekolah Menengah Pertama pada lingkup instansi SMP Muhammadiyah 10 Surakarta. Hasil yang berbeda mungkin didapatkan dari subjek dan perangkat yang berbeda.

Berdasarkan hasil penelitian di atas, beberapa rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut pada penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Penggunaan AR berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk memberikan pengalaman belajar yang lebih adaptif dan responsif terhadap kebutuhan individu siswa, misal pada fitur kuis dengan penyesuaian tingkat kesulitan soal berdasarkan hasil kuis sebelumnya.
2. Cakupan materi pembelajaran tidak hanya terbatas pada kelistrikan tetapi juga konsep-konsep fisika lainnya.
3. Perbaikan pada antarmuka pengguna (UI) untuk meningkatkan pengalaman pengguna (UX) dan mengurangi hambatan teknis dalam penggunaan aplikasi.
4. Optimasi deteksi *marker* dengan algoritma *computer vision* lain agar lebih toleran terhadap perubahan kondisi lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] DataReportal, “Digital 2024: Indonesia — DataReportal – Global Digital Insights”, 2024. <https://datareportal.com/reports/digital-2024-indonesia?rq=Indonesia> (accessed Sep. 22, 2024).
- [2] F. L. Pacheco Salles, M. Feitanin Basso, and A. Leonel, “Smartphone use: implications for musculoskeletal symptoms and socio-demographic characteristics in students”, *Interdisciplinary Rehabilitation / Rehabilitacion Interdisciplinaria*, vol. 4, p. 72, 2023, doi: 10.56294/ri202472.
- [3] J. L. Bullard, “Smartphone Addiction, Enhanced Learning Difficulties, And The Future of Education: A Phenomenological Study of Secondary Christian School Students”, Regent University, 2023.
- [4] K. Agustini, I. K. Gading, I. G. Sudirta, N. Sugihartini, N. M. S. Laraswati, and I. W. Widiana, “The relationship of time management and smartphone using for learning source on students achievement.”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 23, pp. 7409–7415, 2022, doi: doi=jeasci.2017.7409.7415.
- [5] OECD, “PISA 2022 Results (Volume I and II) - Country Notes: Indonesia”, 2023. https://www.oecd.org/en/publications/2023/11/pisa-2022-results-volume-i-and-ii-country-notes_2fca04b9/indonesia_0e09c072.html (accessed Sep. 22, 2024).
- [6] I. Irwanto, R. Dianawati, and I. R. Lukman, “Trends of Augmented Reality Applications in Science Education: A Systematic Review from 2007 to 2022”, *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)*, vol. 17, no. 13, pp. 157–175, 2022, doi: 10.3991/ijet.v17i13.30587.
- [7] J. Garzón, “An Overview of Twenty-Five Years of Augmented Reality in Education”, *Multimodal Technologies and Interaction*, vol. 5, no. 7, p. 37, 2021, doi: 10.3390/mti5070037.
- [8] M. Kljun, V. Geroimenko, and K. Čopič Pucihar, “Augmented Reality in Education: Current Status and Advancement of the Field”, in *Augmented Reality in Education*, V. Geroimenko, Ed., in Springer Series on Cultural Computing., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 3–21. doi: 10.1007/978-3-030-42156-4_1.
- [9] W. A. Uno, “Pengembangan Media Pembelajaran Interaktif Berbasis Augmented Reality untuk Meningkatkan Pemahaman Konsep IPA”, *JPdP*, vol. 4, no. 1, pp. 28–33, 2024.
- [10] T. H. C. Chiang, S. J. H. Yang, and G.-J. Hwang, “An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students’ Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities”, *Educational Technology & Society*, 2014.
- [11] S.-J. Lu and Y.-C. Liu, “Integrating augmented reality technology to enhance children’s learning in marine education”, *Environmental Education Research*, vol. 21, no. 4, pp. 525–541, 2015, doi: 10.1080/13504622.2014.911247.
- [12] Z. Makhasin and W. S. Utami, “Pemanfaatan Teknologi Augmented Reality dalam Pembelajaran Tata Surya Berbasis Android”, *JUKI: Jurnal Komputer dan Informatika*, vol. 5, no. 2, pp. 301–313, 2023.
- [13] S. Cai, X. Wang, and F.-K. Chiang, “A case study of Augmented Reality simulation system application in a chemistry course”, *Computers in Human Behavior*, vol. 37, pp. 31–40, 2014, doi: 10.1016/j.chb.2014.04.018.
- [14] O. V. Kanivets, I. M. Kanivets, and T. M. Gorda, “Development of an augmented reality mobile physics application to study electric circuits”, *Educational Technology Quarterly*, vol. 2022, no. 4, pp. 347–365, 2022, doi: 10.55056/etq.429.
- [15] A. Syawaludin, G. Gunarhadi, and P. Rintayati, “Development of Augmented Reality-Based Interactive Multimedia to Improve Critical Thinking Skills in Science Learning”, *International Journal of Instruction*, vol. 12, no. 4, pp. 331–344, 2019, doi: 10.29333/iji.2019.12421a.
- [16] A. D. Samala and M. Amanda, “Immersive Learning Experience Design (ILXD): Augmented Reality Mobile Application for Placing and Interacting with 3D Learning Objects in Engineering Education.”, *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 17, no. 5, p. 22, 2023, doi: 10.3991/ijim.v17i05.37067.
- [17] N. Hasanah, M. B. Triyono, G. N. I. P. Pratama, Fadliandi, and I. G. N. D. Paramartha, “Markerless Augmented Reality in Construction Engineering Utilizing Extreme Programming”, *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1737, no. 1, p. 012021, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1737/1/012021.
- [18] A. Fortuna, Waskito, Purwantono, A. Kurniawan, W. Andriani, and M. Alimin, “Designing Learning Media Using Augmented Reality for Engineering Mechanics Course”, *jerel*, vol. 2, no. 1, pp. 18–27, 2023, doi: 10.58712/jerel.v2i1.20.
- [19] P.-H. Wu, G.-J. Hwang, M.-L. Yang, and C.-H. Chen, “Impacts of integrating the repertory grid into an augmented reality-based learning design on students’ learning achievements, cognitive load and degree of satisfaction”, *Interactive Learning Environments*, vol. 26, no. 2, pp. 221–234, 2018, doi: 10.1080/10494820.2017.1294608.

- [20] M. Dunleavy, C. Dede, and R. Mitchell, "Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning", *Journal of Science Education and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 7–22, 2009, doi: 10.1007/s10956-008-9119-1.
- [21] P. M. O'Shea, C. Dede, and M. Cherian, "Research Note: The Results of Formatively Evaluating an Augmented Reality Curriculum Based on Modified Design Principles", *International Journal of Gaming and Computer-Mediated Simulations*, vol. 3, no. 2, pp. 57–66, 2011, doi: 10.4018/jgcms.2011040104.
- [22] J. I. Goodlad, "School and Children: The Middle Childhood Years. In School and Children: The Middle Childhood Years", 1973.
- [23] F. K. Lehnert, J. Niess, C. Lallemand, P. Markopoulos, A. Fischbach, and V. Koenig, "Child-Computer Interaction: From a systematic review towards an integrated understanding of interaction design methods for children", *International Journal of Child-Computer Interaction*, 2022.
- [24] H. Jung, Y. Kim, H. Lee, and Y. Shin, "Advanced Instructional Design for Successive E-Learning: Based on the Successive Approximation Model (SAM) ", In G. Marks (Ed.), *Proceedings of International Journal on E-Learning 2019*, vol. 18, no. 2, pp. 191–204, 2019.
- [25] L. Listiany and B. Murtiyasa, "Development of Algebra Monopoly Game Media Based on Rolling Questions for Junior High School", *Journal of Medives : Journal of Mathematics Education IKIP Veteran Semarang*, vol. 8, no. 3, pp. 430–448, 2024, doi: <https://doi.org/10.31331/medivesveteran.v8i3.3266>.
- [26] E. Sudarmilah and A. Maelani, "Augmented Reality Based-Learning Media of Computers", *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, vol. 8, no. 4, pp. 819–835, 2021.
- [27] S. Campbell *et al.*, "Purposive sampling: complex or simple? Research case examples", *Journal of Research in Nursing*, vol. 25, no. 8, pp. 652–661, 2020, doi: 10.1177/1744987120927206.
- [28] B. Satrio, A. Suryanto, A. Mulwinda, and K. Fathoni, "Implementasi Virtual Business Card Berbasis Android Menggunakan Augmented Reality", *JTIK*, vol. 8, no. 4, p. 693, 2021, doi: 10.25126/jtiik.2021842690.
- [29] E. Sudarmilah and M. G. Negara, "Augmented Reality Edugame Senjata Tradisional Indonesia", *Khazanah Informatika: Jurnal Ilmu Komputer dan Informatika*, vol. 1, no. 1, pp. 12–15, 2015, doi: <https://doi.org/10.23917/khif.v1i1.1176>.
- [30] B. Pudjoatmojo and R. Wijaya, "Tes Kegunaan (Usability Testing) Pada Aplikasi Kepegawaian Dengan Menggunakan System Usability Scale (Studi Kasus: Dinas Pertanian Kabupaten Bandung)", in *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Multimedia 2016*, STMIK AMIKOM Yogyakarta, Feb. 2016.
- [31] S. Nidhra, "Black Box and White Box Testing Techniques - A Literature Review", *International Journal of Embedded Systems and Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 29–50, 2012, doi: 10.5121/ijesa.2012.2204.
- [32] J. Brooke, "SUS - A quick and dirty usability scale", *Usability evaluation in industry*, pp. 189–194, 1996.
- [33] A. Kaya, R. Ozturk, and C. A. Gumussoy, "Usability Measurement of Mobile Applications with System Usability Scale (SUS)", in *Calisir, F., Cevikkan, E., Camgoz Akdag, H. (eds) Industrial Engineering in the Big Data Era. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering*. Springer, Cham., pp. 389–400, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-03317-0_32.
- [34] D. A. P. Putri, D. Priyawati, N. K. Arrizka, F. S. Khasanah, and I. Litaswari, "Android Mobile-Based English Learning Game Education for Children in Indonesia", *Jurnal Teknik Informatika (Jutif)*, vol. 4, no. 3, pp. 555–564, 2023, doi: 10.52436/1.jutif.2023.4.3.915.
- [35] Y. Jin and X. Qi, "The SPSS-based Analysis of Reading Comprehension—Take Grade Eight English Mid-term Test for Example", *Journal of Language Teaching and Research*, vol. 9, no. 5, p. 939, 2018, doi: 10.17507/jltr.0905.06.
- [36] A. S. Ibañez and J. P. Figueras, "Vuforia v1.5 SDK. Analysis and evaluation of capabilities", *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2013.
- [37] A. Dirin, A. Alamäki, and J. Suomala, "Gender Differences in Perceptions of Conventional Video, Virtual Reality and Augmented Reality", *Int. J. Interact. Mob. Technol.*, vol. 13, no. 06, p. 93, 2019, doi: 10.3991/ijim.v13i06.10487.
- [38] A. Balog, C. Pribeanu, and D. Iordache, "Augmented Reality in Schools: Preliminary Evaluation Results from a Summer School", *Int. J. Soc. Sci.*, vol. 2, no. 3, pp. 163–166, 2007, doi: doi.org/10.5281/zenodo.1331525.
- [39] M. Mailizar and R. Johar, "Examining Students' Intention to Use Augmented Reality in a Project-Based Geometry Learning Environment", *INT J INSTRUCTION*, vol. 14, no. 2, pp. 773–790, 2021, doi: 10.29333/iji.2021.14243a.
- [40] C. Park and W.-B. Lee, "A Method to Enhance the Recognition Rate of Marker Images in Augmented Reality", *Journal of Convergence for Information Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–6, 2022, doi: 10.22156/CS4SMB.2022.12.01.001.

- [41] J. Cartucho, C. Wang, B. Huang, D. S. Elson, A. Darzi, and S. Giannarou, “An enhanced marker pattern that achieves improved accuracy in surgical tool tracking”, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, vol. 10, no. 4, pp. 400–408, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/21681163.2021.1997647>.