



# Pengembangan Media Pembelajaran Neuroanatomi Berbasis WebXR (Website Extended Reality) dengan Pendekatan Aksesibilitas dan Optimalisasi

Gede Bramanda\*, I Gede Partha Sindu, Putu Hendra Suputra

Fakultas Teknik dan Kejuruan, Program Studi Teknologi Rekayasa Perangkat Lunak, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

Email: <sup>1,\*</sup>bramanda@student.undiksha.ac.id, <sup>2</sup>partha.sindu@undiksha.ac.id, <sup>3</sup>hendra.suputra@undiksha.ac.id

Email Penulis Korespondensi: bramanda@student.undiksha.ac.id

**Abstrak**—Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan mengevaluasi media pembelajaran berbasis WebXR (*Website Extended Reality*) yang dirancang khusus bagi mahasiswa kedokteran di Universitas Pendidikan Ganesha. Pembelajaran Neuroanatomi merupakan komponen penting namun menantang dalam pendidikan kedokteran, yang seringkali sulit dipelajari akibat keterbatasan media pembelajaran, ketersediaan kadaver, serta sifat abstrak dari atlas anatomi SOBOTA. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada integrasi platform imersif berbasis web yang murah, mudah diakses, sekaligus menyelesaikan kendala teknis motion sickness dan stuttering pada perangkat standalone. Di balik pondasi yang terstruktur dan dirancang, media ini akan berjalan di atas pondasi server serta bergerak atas arsitektur dari teknologi HTML5 guna menghadirkan aksesibilitas data real-time yang fleksibel langsung melalui *browser*. Optimalisasi teknis dilakukan berupa stabilisasi FPS (*FPS Locking*) dan penskalaan resolusi dinamis untuk memaksimalkan kapasitas komputasi Snapdragon XR2 pada Meta Quest 2. Aplikasi ini dibangun menggunakan kerangka kerja *Multimedia Development Life Cycle* (MDLC). Hasil penilaian menunjukkan bahwa aplikasi memiliki validitas sangat tinggi dari ahli materi dan ahli media dengan hasil keseluruhan 1,00 berdasarkan matriks Gregory. Selain itu, pengujian menggunakan *User Experience Questionnaire* (UEQ) terhadap mahasiswa kedokteran menghasilkan predikat "Excellent" pada seluruh dimensi, dengan dimensi Stimulasi meraih skor tertinggi (2,46) yang menempatkan aplikasi ini dalam jajaran 10% produk terbaik secara global. Hasil penelitian menunjukkan bahwa media WebXR yang dikembangkan secara efektif mampu menawarkan daya tarik secara immersive serta mampu dijadikan alternatif praktikum neuroanatomi yang interaktif, cross-platform, dan berkualitas tinggi.

**Kata Kunci:** Web XR; Neuroanatomi; Multimedia Development Life Cycle; Meta Quest 2; User Experience Questionnaire; SOBOTA

**Abstract**—This study aims to develop and evaluate a WebXR (*Website Extended Reality*)-based learning media specifically designed for medical students at Universitas Pendidikan Ganesha. Neuroanatomy learning is a crucial yet challenging component of medical education, often difficult to comprehend due to limited learning media, the scarcity of cadavers, and the abstract nature of the SOBOTA anatomical atlas. The primary contribution of this research lies in the integration of an affordable and easily accessible web-based immersive platform, which simultaneously resolves technical constraints such as motion sickness and stuttering on standalone devices. Behind a well-structured and designed foundation, this media operates on a server-based infrastructure and runs on HTML5 technology architecture to deliver flexible, real-time data accessibility directly through the browser. Technical optimization was implemented in the form of FPS stabilization (*FPS Locking*) and dynamic resolution scaling to maximize the computing capacity of the Snapdragon XR2 chipset on Meta Quest 2. This application was built using the *Multimedia Development Life Cycle* (MDLC) framework. The assessment results show that the application has very high validity from both material and media experts, achieving an overall score of 1.00 based on the Gregory matrix. Furthermore, user experience testing using the *User Experience Questionnaire* (UEQ) with medical students yielded an "Excellent" rating across all dimensions, with the Stimulation dimension receiving the highest score (2.46), placing this application within the top 10% of products globally. The findings indicate that the developed WebXR media effectively offers immersive appeal and can serve as a high-quality, interactive, and cross-platform alternative practical tool for neuroanatomy introduction.

**Keywords:** Web XR; Neuroanatomi; Multimedia Development Life Cycle; Meta Quest 2; User Experience Questionnaire; SOBOTA

## 1. PENDAHULUAN

Kemajuan peradaban manusia saat ini tengah berada pada fase transformasi digital yang sangat masif, ditandai dengan akselerasi teknologi *immersive* seperti AR dan VR yang berkembang secara eksponensial (Sindu et al., 2023). Di tengah dinamika Revolusi Industri 4.0, teknologi imersif bukan lagi sekadar tren teknologi, melainkan telah berevolusi menjadi instrumen integral dalam berbagai sektor strategis, khususnya pada jenjang pendidikan tinggi. Integrasi teknologi ini bertujuan untuk mendobrak batasan metode pengajaran tradisional guna menciptakan ekosistem pembelajaran yang jauh lebih efektif, inovatif, dan berpusat pada pengalaman mahasiswa (Mistry et al., 2023). Dalam konteks pendidikan kesehatan, teknologi VR terbukti menjadi solusi potensial untuk menjembatani kesenjangan antara penguasaan teori dan keterampilan praktik mandiri (*hands-on training*) melalui simulasi yang aman dan terkendali (Prमितasiwi et al., 2025).

Sektor pendidikan kedokteran muncul sebagai salah satu disiplin ilmu yang mendapatkan manfaat paling signifikan, terutama dalam membedah materi-materi fundamental dengan tingkat kompleksitas kognitif tinggi, seperti neuroanatomi (Aridan et al., 2024). Penguasaan materi neuroanatomi merupakan kompetensi absolut bagi calon klinisi, mengingat sistem saraf pusat bertindak sebagai pusat kendali utama yang meregulasi seluruh fungsi vital, sensorik, dan kognitif tubuh manusia secara simultan (Bear et al., 2020; Guyton & Hall, 2021). Kesalahan dalam pemahaman spasial terhadap struktur otak dapat berimplikasi pada rendahnya akurasi diagnosis medis di masa depan.

Namun, metode pembelajaran konvensional masih terjebak dalam tantangan sistemik. Penggunaan atlas cetak seperti SOBOTA memiliki keterbatasan ontologis dalam menyajikan struktur organ multidimensi ke dalam format



visual dua dimensi (2D), sehingga memaksa mahasiswa melakukan rekonstruksi mental mandiri yang rentan terhadap miskonsepsi hubungan spasial. Di sisi lain, penggunaan kadaver terkendala isu etis, keterbatasan pengadaan, serta biaya operasional laboratorium yang tinggi (Standing, 2020). Sebagai solusi, teknologi VR hadir menyajikan simulasi tiga dimensi yang *immersive* dan fotorealistik, memungkinkan eksplorasi struktur anatomis dari berbagai sudut pandang (Zhao et al., 2020).

Penelitian ini melangkah lebih maju dengan memanfaatkan teknologi WebXR. Berbeda dengan aplikasi VR biasa yang harus diinstal terlebih dahulu, WebXR memungkinkan media pembelajaran ini diakses secara instan langsung melalui website. Pendekatan ini memberikan kemudahan akses bagi mahasiswa tanpa mengurangi kualitas interaksinya (Pramudita et al., 2025). Melalui teknologi WebXR, mahasiswa dapat merasakan pengalaman langsung di dalam laboratorium digital untuk memahami materi neuroanatomi yang rumit dan abstrak (Mahayani et al., 2023).

Penelitian ini memberikan kontribusi penting pada dua aspek utama, dari Sisi Pembelajaran (Teoretis-Instruksional): Aplikasi ini berhasil mengubah gambar 2D dari atlas cetak SOBOTA menjadi model 3D yang presisi. Hal ini membantu mahasiswa kedokteran awam untuk belajar secara nyata dan interaktif. Dari Sisi Teknis (Praktis-Teknis): Keunggulan aplikasi ini terletak pada sistem yang dirancang khusus untuk perangkat kacamata VR Meta Quest 2. Pengondisian ini dibuat untuk mengatasi keterbatasan mesin (chipset Snapdragon XR2) pada kacamata VR tersebut. Caranya adalah dengan mengunci kecepatan gambar (FPS Locking) dan menyesuaikan ketajaman layar secara otomatis (Resolution Scaling) langsung dari dalam browser.

Dengan optimalisasi tersebut, aplikasi ini mampu menjadi media belajar inovatif yang nyaman digunakan. Mahasiswa dapat belajar dengan lancar tanpa perlu khawatir mengalami pusing (motion sickness), stuttering, atau keterlambatan respon visual (latensi) (Akenine-Möller et al., 2018). Selain itu, penggunaan teknologi HTML5 di dalamnya membuat setiap interaksi saat belajar terasa jauh lebih nyata dan hidup dengan mampunya pengguna melakukan interaksi di dalam media WebXR ini.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Pengembangan media pengenalan neuroanatomi berbasis Virtual Reality (VR) ini dirancang secara khusus sebagai instrumen kognitif untuk memfasilitasi mahasiswa kedokteran dalam mengonstruksi pemahaman spasial terhadap struktur saraf yang kompleks. Mengingat tingginya tingkat abstraksi pada materi neuroanatomi, pengembangan media ini memerlukan pondasi metodologis yang kokoh dan sistematis, mencakup aspek pedagogis serta teknis rendering yang presisi (Akenine-Möller et al., 2018). Oleh karena itu, penelitian ini mengadopsi metode Multimedia Development Life Cycle (MDLC) sebagai kerangka kerja pengembangan sistem, yang dipadukan dengan instrumen User Experience Questionnaire (UEQ) untuk evaluasi kualitas pengalaman pengguna pada tahap akhir (Schrepp et al., 2023).

Pemilihan metode MDLC didasarkan pada karakteristik pengembangan media imersif yang memerlukan integrasi berlapis antara aset 3D, logika interaksi, dan optimasi performa hardware. Penggunaan standar WebXR menjadi bagian integral dalam fase ini, di mana teknologi tersebut memungkinkan aplikasi memiliki jangkauan distribusi yang luas melalui peramban website tanpa mengorbankan kualitas *immersive* yang menjadi syarat utama simulasi medis. Setiap tahapan dalam MDLC, mulai dari sinkronisasi konsep medis hingga distribusi aplikasi, berfungsi sebagai kontrol kualitas untuk memastikan bahwa konten yang disajikan tetap akurat secara klinis dan stabil secara teknis.

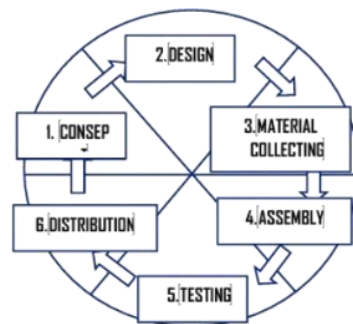
Sementara itu, penggunaan UEQ sebagai metode pengujian dilakukan untuk mengukur efektivitas media berdasarkan standar persepsi pengguna. Hal ini krusial untuk menjamin bahwa inovasi teknologi yang dikembangkan tidak hanya unggul secara fungsional, tetapi juga mampu memberikan kenyamanan visual (user comfort) dan stimulasi belajar yang optimal bagi mahasiswa (Mahayani et al., 2023). Integrasi sistem ini juga mempertimbangkan aspek penyimpanan data berbasis cloud storage untuk ketersediaan konten yang lebih fleksibel (Seputra et al., 2020). Sinergi antara MDLC dan UEQ ini bertujuan untuk menciptakan sebuah produk edukasi yang valid (Setemen, 2018), reliabel, dan mampu menjawab tantangan instruksional dalam pendidikan kedokteran modern melalui visualisasi produk digital yang presisi (Putra & Putra, 2025).

Formulasi dan arah pengembangan metodologi ini diperkuat melalui eksplorasi penelitian sebelumnya, dimana terdapat beberapa studi yang relevan dengan pengembangan aplikasi *Immersive* sebagai media pembelajaran, khususnya dalam meningkatkan pemahaman konsep melalui visualisasi interaktif. Beberapa penelitian yang relevan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian pertama oleh Zhao, J., dkk. (2020) dalam “The Use of Virtual Reality in Neuroanatomy Education: A Systematic Review” melakukan ulasan sistematis tentang penggunaan VR dalam pembelajaran Neuroanatomi. Penelitian ini menunjukkan bahwa VR memberikan pemahaman spasial yang lebih baik terhadap struktur otak dibandingkan dengan metode konvensional seperti gambar 2D atau buku teks. Selain itu, VR juga meningkatkan motivasi belajar dan retensi informasi dalam jangka panjang bagi mahasiswa kedokteran.
2. Selanjutnya penelitian kedua oleh Melissa A, dkk. (2020) dalam “VR untuk Pembelajaran Jalur Visual dan Auditori Otak” mengembangkan pelajaran VR tentang jalur visual dan auditori, lalu menguji efektivitasnya pada mahasiswa. Studi ini membandingkan pembelajaran menggunakan VR dan monitor 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peserta mengalami peningkatan skor post-test pada kedua platform, namun VR dinilai jauh lebih menyenangkan dan

- mudah digunakan. Implementasi pelajaran VR di kelas juga menghasilkan kemajuan signifikan pada capaian pembelajaran yang berkaitan dengan materi VR.
3. Penelitian ketiga oleh Radianti, J., dkk. (2020) dalam artikel “Virtual Reality in Education: A Systematic Review of the Literature” membahas penerapan VR di berbagai bidang pendidikan, termasuk kedokteran. Penelitian ini menunjukkan bahwa VR dapat meningkatkan motivasi belajar dan memberikan pengalaman yang lebih mendalam, yang dapat meningkatkan kualitas pembelajaran di bidang kedokteran, khususnya dalam pembelajaran anatomi yang kompleks.
  4. Lalu penelitian keempat oleh Makransky, G., & Mayer, R. E. (2022) dalam “Virtual Reality as a Tool for Learning in Medical Education: An Empirical Study” menguji penerapan VR dalam pendidikan medis dan menunjukkan bahwa VR membantu mahasiswa tidak hanya dalam penguasaan keterampilan klinis, tetapi juga dalam pemahaman yang lebih mendalam tentang prosedur medis yang kompleks. VR meningkatkan keterlibatan mahasiswa, membantu mereka belajar dengan lebih baik dan lebih efisien dalam pembelajaran anatomi.
  5. Penelitian terakhir oleh Rama Sanjaya (2024) dalam “Pengembangan Virtual Reality untuk Simulasi Pengenalan Anatomi Respirasi” mengembangkan media pembelajaran berbasis VR untuk mengenalkan anatomi respirasi kepada mahasiswa kedokteran. Penelitian ini menggunakan model ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation) untuk memastikan bahwa aplikasi VR yang dikembangkan dapat memenuhi tujuan pembelajaran secara efektif. Hasil penelitian menunjukkan.

Adapun terkait metode MDLC yang digunakan memiliki beberapa tahapan yang dilakukan dengan urutan yang dapat dilihat pada Gambar 1 terkait tahapan pengembangan konsep MDLC yang dijelaskan sebagai berikut:



**Gambar 1.** Konsep Tahapan MDLC

- a. Tahap pengonsepan dilakukan melalui analisis kebutuhan yang melibatkan pemangku kepentingan di Fakultas Kedokteran Universitas Pendidikan Ganesha. Proses ini dilakukan melalui wawancara terstruktur untuk menetapkan target pengguna, batasan materi (fokus pada delapan bagian utama otak dan sumsum tulang belakang), serta tujuan instruksional yang ingin dicapai. Dalam tahap ini, diputuskan penggunaan standar WebXR guna memastikan media pembelajaran bersifat lintas *platform* dan mudah diakses melalui *browser* tanpa mengurangi kualitas *immersive* yang dibutuhkan dalam pendidikan kedokteran (Utami et al., 2021). Hasil dari tahap ini adalah dokumen spesifikasi sistem yang mencakup kebutuhan minimal perangkat keras dan perangkat lunak
- b. *Design*  
Pada tahap ini, disusun cetak biru aplikasi yang mencakup:
  1. Arsitektur Informasi: Merancang struktur menu dan hierarki informasi agar navigasi di dalam ruang virtual terasa intuitif.
  2. *Flowchart & Storyboard*: Menyusun alur kerja logika aplikasi dan narasi visual di setiap scene untuk memandu proses pengembangan interaksi (Pramudita et al., 2025).
  3. *UI/UX Design*: Perancangan antarmuka yang memperhatikan aspek ergonomi VR, seperti penempatan panel informasi yang tidak menyebabkan kelelahan mata dan penggunaan skema warna yang konsisten dengan standar medis.
- c. *Material Collecting*  
Tahap ini difokuskan pada akuisisi dan pembuatan aset digital berkualitas tinggi. Aset utama berupa model 3D organ otak dikembangkan melalui perangkat lunak Blender dengan teknik *modeling* berdasarkan referensi klinis dari atlas Gray's Anatomy (Standing, 2020). Untuk memastikan performa yang optimal pada lingkungan WebXR, dilakukan proses *re-topology* untuk menghasilkan model *low-poly* tanpa kehilangan detail anatomis yang signifikan. Selain itu, dikumpulkan pula aset audio narasi instruksional dan tekstur organik yang telah melalui proses *baking* untuk mengurangi beban komputasi di dalam Unity (Unity Technologies, 2023).
- d. *Assembly*  
Tahap pembuatan merupakan fase integrasi seluruh elemen di dalam *engine* Unity. Pada fase ini, dilakukan pemrograman interaksi menggunakan bahasa C#, yang meliputi fungsi *grab*, *rotate*, dan *scaling* yang mendukung standar interaksi XR universal. Fokus teknis utama dalam tahap ini adalah "Optimasi Hardware Snapdragon XR2" (Qualcomm, 2020). Penelitian ini mengimplementasikan teknik FPS Locking dan Resolution Scaling dinamis. Hal ini dilakukan untuk menjaga stabilitas performa perangkat Meta Quest 2 dan memastikan nilai latency tetap rendah



guna meminimalisir gejala motion sickness yang sering terjadi pada aplikasi VR *standalone* demi mencapai pengalaman *real-time rendering* yang stabil (Akenine-Möller et al., 2018; Riyadi et al., 2024). Pengelolaan data kuis dan repositori juga diintegrasikan dengan layanan *cloud* untuk memastikan efisiensi akses data (Seputra et al., 2020).

e. *Testing*

Pengujian dilakukan secara komprehensif dimulai dari pengujian langsung oleh pengembang dengan menggunakan metode Blackbox dan dilanjutkan ketahap kedua yakni pengujian dengan 2 jalur, yakni:

1. *Alpha Testing* (Uji Ahli): Melibatkan dua ahli materi untuk memvalidasi keakuratan struktur anatomi yang pihak yang mengujikan tersebut dari pihak pihak yang mendalami terkait materi tersebut dan telah melakukan studi S2 pada bidangnya dan dua ahli media untuk mengevaluasi aspek teknis, dan penilaian diambil dari 2 penguji yang berbeda dengan uji materi untuk meningkatkan Tingkat akurasi dengan kategori yang ditentukan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Matrik Gregory

Koefisien Validitas	Kualifikasi
0,91 – 1,00	Sangat Tinggi
0,71 – 0,90	Tinggi
0,41 – 0,70	Cukup
0,21 – 0,40	Rendah
0,00 – 0,20	Sangat Rendah

Proses penilaian dianalisis menggunakan rumus Gregory dengan indeks *matrix* yang dapat dilihat pada Tabel 1 untuk menentukan koefisien validitas (Seputra et al., 2020).

2. *Beta Testing* (Uji Pengguna): Dilakukan terhadap mahasiswa kedokteran sebagai pengguna akhir. Pengujian ini menggunakan instrumen UEQ untuk mendapatkan data kuantitatif pada enam dimensi: daya tarik, kejelasan, efisiensi, ketepatan, stimulasi, dan kebaruan (Schrepp et al., 2023). Pengujian ini krusial untuk memastikan bahwa sensasi *immersive* yang dihasilkan tidak menimbulkan kelelahan kognitif dan benar-benar mendukung proses *authentic learning* (Utami et al., 2021).

f. *Distribution*

Setelah aplikasi dinyatakan valid dan stabil, produk dikemas dalam format yang mendukung ekosistem *standalone* dan berbasis *website*. Mengingat penggunaan teknologi WebXR, distribusi utama dilakukan melalui URL yang dapat diakses secara instan oleh mahasiswa melalui peramban pada Meta Quest 2. Selain itu, untuk kebutuhan instalasi permanen, produk dikemas dalam format Android Package Kit (.apk).

Distribusi dilakukan melalui *platform* Meta Horizon Store (atau App Lab) sebagai prioritas utama guna memfasilitasi aksesibilitas bagi mahasiswa kedokteran secara global (Mistry et al., 2023). Jika memenuhi syarat teknis tambahan, aplikasi juga akan diproyeksikan ke *platform* Steam. Guna menjamin keberlanjutan penggunaan media pembelajaran ini secara mandiri di laboratorium anatomi, disediakan pula manual panduan penggunaan serta video tutorial navigasi yang komprehensif bagi dosen dan mahasiswa. Hal ini selaras dengan upaya peningkatan kualitas pembelajaran melalui integrasi laboratorium imersif berbasis VR di pendidikan kesehatan (Pramitiaswi et al., 2025).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan media pembelajaran neuroanatomi berbasis WebXR berhasil mentransformasi materi yang abstrak menjadi pengalaman belajar yang sangat *immersive* dan interaktif. Penggunaan VR terbukti sangat efektif dalam mendukung ekosistem *authentic learning* yang relevan dengan kebutuhan pendidikan abad ke-21 (Utami et al., 2021). Selain itu, efektivitas teknologi VR dalam menyajikan materi dengan tingkat kerumitan tinggi mampu meningkatkan kualitas instruksional serta memperkuat pemahaman konsep pada domain materi yang bersifat abstrak (Mahayani et al., 2023).

Dari aspek teknis, stabilitas visual dan optimasi performa merupakan faktor krusial dalam menjamin kenyamanan pengguna selama proses pembelajaran. Hal ini selaras dengan prinsip perancangan aplikasi realitas imersif yang menegaskan bahwa visualisasi presisi dan stabilitas performa sangat menentukan keberhasilan interaksi pengguna di dalam lingkungan virtual (Putra & Putra, 2025). Melalui implementasi optimasi *hardware* Snapdragon XR2, penelitian ini berhasil mereduksi risiko *motion sickness*, sehingga mahasiswa dapat berkonsentrasi sepenuhnya pada substansi materi neuroanatomi tanpa hambatan teknis operasional (Qualcomm, 2020).

Aplikasi ini berhasil mengintegrasikan elemen multimedia dan interaktivitas tingkat tinggi pada setiap dimensinya. Dengan memanfaatkan teknologi WebXR, hambatan aksesibilitas yang sering ditemukan pada aplikasi VR konvensional dapat teratasi, karena mahasiswa dapat mengakses konten imersif ini secara langsung melalui peramban *website* tanpa proses instalasi yang rumit. Penggunaan Unity sebagai pondasi utama memungkinkan visualisasi aset 3D struktur otak yang kompleks dari Blender tampil secara responsif dan memberikan pengalaman *immersive* yang konsisten (Pramudita et al., 2025). Berikut adalah implementasi dari enam dimensi metode MDLC yang telah dilaksanakan:

### 3.1 Concept

Konsep pada penelitian ini menitikberatkan pada pengembangan perencanaan yang selaras dengan kebutuhan mitra Fakultas Kedokteran. Fokus utamanya adalah menyajikan materi neuroanatomi yang sebelumnya sulit divisualisasikan menjadi modul digital yang dapat diuji validitasnya oleh ahli materi dan ahli media (Setemen, 2018).

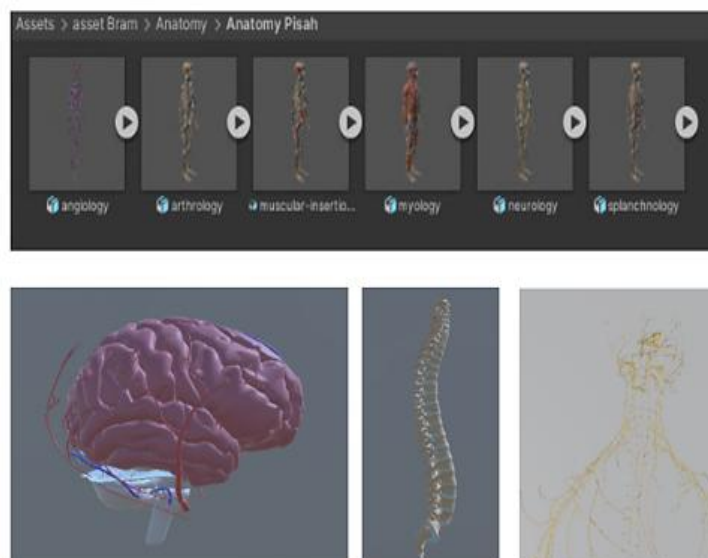
### 3.2 Design

Desain merupakan fase paling krusial mengingat kompleksitas materi neuroanatomi yang memerlukan akurasi spasial tinggi. Proses desain ini mencakup tiga pilar utama:

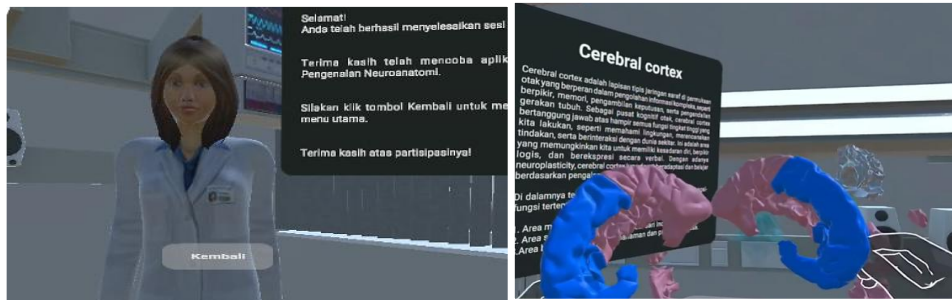
1. **Desain Interaksi (UX Design):** Dirancang untuk mendukung standar WebXR, memastikan navigasi dalam ruang virtual tetap nyaman (*user comfort*) dan intuitif bagi mahasiswa. Sehingga pada penelitian ini UX Desain di rancangan dengan skematik rancangan seperti, merancang warna tombol hingga pembuatan desain UI yang menyesuaikan dengan Coller Palet sehingga pengguna tetap nyaman menggunakan perangkat XR dalam waktu yang lama.
2. **Storyboard & Visual Mapping:** Melibatkan penerjemahan referensi atlas anatomi 2D ke dalam rencana ruang 3D. Peneliti merancang *flowchart* dan *storyboard* guna menentukan bagaimana setiap bagian otak ditampilkan, dianotasi, dan diinteraksikan. Proses ini sangat penting untuk memastikan bahwa setiap elemen visual di dalam media memiliki nilai edukatif yang selaras dengan kurikulum kedokteran, sehingga tidak terjadi misinterpretasi terhadap struktur sistem saraf yang bersifat abstrak.
3. **User Interface (UI) & Environment Design:** Fokus pada aspek ergonomi dan efektivitas kognitif. Mengingat media ini digunakan untuk pembelajaran medis yang memerlukan konsentrasi tinggi, desain lingkungan (*environment*) dibuat dengan pencahayaan yang optimal dan palet warna netral. Hal ini selaras dengan upaya untuk mempertahankan stabilitas performa grafis pada perangkat *standalone* agar pengalaman imersif tetap terjaga secara konsisten.

### 3.3 Material Collecting

Pada tahap perakitan, seluruh aset 3D yang berjumlah 2.965 unit diintegrasikan ke dalam *engine* Unity menggunakan standar WebXR yang merupakan protokol terbaru untuk pengalaman realitas virtual berbasis *website*. Implementasi teknis dilakukan dengan cermat melalui penyusunan hierarki objek anatomi yang sangat kompleks agar tetap presisi secara spasial dan mempertahankan akurasi anatomis dari setiap struktur yang divisualisasikan dalam lingkungan virtual. Peneliti menerapkan sistem Interactivity WebXR yang canggih dan inovatif, memungkinkan mahasiswa melakukan manipulasi objek seperti *grab*, *rotate*, dan *scaling* secara langsung melalui *browser* VR tanpa memerlukan aplikasi khusus. Sistem ini dirancang untuk memberikan kontrol intuitif dan responsif kepada pengguna dalam berinteraksi dengan model anatomi tiga dimensi. Fokus utama pada tahap ini adalah menjaga pengalaman *immersive* yang optimal melalui optimasi hardware Snapdragon XR2 yang kuat. Peneliti berhasil menerapkan teknik FPS Locking dan Resolution Scaling dinamis, sehingga aplikasi mampu berjalan dengan stabil pada rentang 24-30 FPS bahkan pada perangkat dengan spesifikasi terbatas. Hasilnya, transisi visual di dalam peramban web menjadi sangat halus dan natural, yang secara langsung mengeliminasi risiko *motion sickness* bagi pengguna selama sesi pembelajaran berlangsung. Selain itu, sistem ini telah terintegrasi dengan sempurna dengan layanan cloud untuk pengelolaan data kuis dan progres pembelajaran, memastikan aksesibilitas data tetap cepat dan efisien saat dijalankan secara *real-time* oleh multiple users. Gambar 2 berikut adalah tampilan dan model 3D dari pengembangan media ini:



**Gambar 2.** Model 3D Neuroanatomy



**Gambar 3.** Pemandu dan Proses penggunaan

Proses pembuatan dan perancangan model 3D anatomi manusia dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan pemodelan digital yang komprehensif menggunakan perangkat lunak Blender, mencakup struktur otak bagian luar hingga bagian dalam secara mendetail yang dapat dilihat pada Gambar 2. Serta desain dari pada pemandu penggunaan aplikasi yang disajikan pada Gambar 3, yang dirancang untuk mendukung proses pembelajaran dan penggunaan media.



**Gambar 4.** Model 3D Anatomi Manusia

Objek yang dikembangkan dalam hasil jadi aplikasi ini meliputi komponen utama sistem saraf pusat yang sangat mendetail, mencakup *Cerebrum*, *Cerebellum*, *Brainstem*, hingga *Medulla Spinalis* yang terintegrasi secara utuh sampai ke bagian saraf tepi. Seluruh aset tersebut telah melalui tahap kurasi ketat, modifikasi geometri, dan optimasi topologi guna meningkatkan akurasi representasi visual yang selaras dengan referensi klinis atlas anatomi yang dimana keseluruhan objek tersebut disusun seperti Gambar 4, yang bertujuan untuk mengetahui kesesuaian terhadap bentuk dari berbagai objek 3D bagian bagian tubuh manusia yang telah dibuat agar sesuai dengan referensi dari SOBOTA dan Gray's Anatomy (Putz & Pabst, 2008; Stranding, 2020).

Implementasi teknologi WebXR pada objek-objek tersebut memungkinkan model anatomi yang kompleks tetap memiliki performa *render* yang ringan namun presisi saat diakses melalui peramban *website*. Optimasi topologi ini menjadi kunci utama dalam menyajikan pengalaman *immersive* yang stabil bagi pengguna; dimana mahasiswa dapat mengeksplorasi setiap lapisan saraf dengan detail visual yang tajam tanpa mengalami kendala teknis (Akenine-Möller et al., 2018; Putra & Putra, 2025). Dengan tercapainya presisi medis pada model 3D ini, aplikasi mampu menyajikan simulasi yang kredibel untuk membantu mahasiswa kedokteran memahami struktur sistem saraf yang bersifat abstrak secara lebih nyata dan mendalam, yang merupakan keuntungan bagi mahasiswa awam yang belum memahami struktur bentuk dari pada anatomi manusia dimana pendekatan yang paling mudah bagi mahasiswa untuk mempelajarinya adalah melalui pendekatan visual 3 dimensi.

### 3.4 Assembly

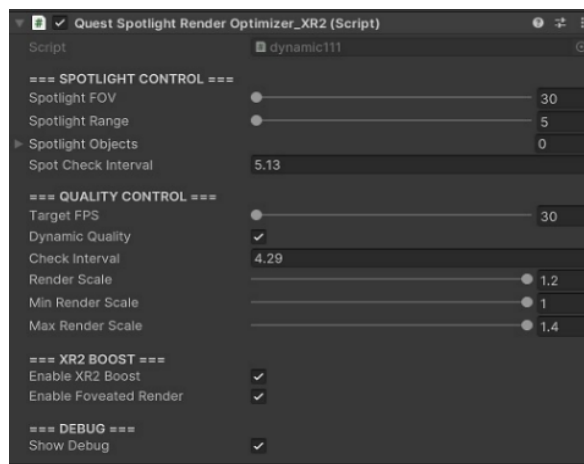
Dalam hasil akhir perakitan sistem, seluruh aset multimedia telah berhasil diintegrasikan ke dalam ekosistem Unity berbasis WebXR. Hierarki objek 3D disusun sedemikian rupa sehingga posisi anatomis antar bagian otak tetap presisi secara spasial, memberikan representasi medis yang akurat bagi mahasiswa. Implementasi logika interaksi menggunakan C# telah menghasilkan fitur *Grab Interaction* yang sangat responsif, memungkinkan pengguna melakukan manipulasi organ, seperti memegang, memutar, dan membedah struktur otak secara langsung dalam ruang 3D guna membangun pemahaman spasial yang mendalam.

Pengalaman *immersive* diperkuat dengan fitur *Teleportation* yang memungkinkan navigasi ruang laboratorium virtual secara lancar dan bebas hambatan. Untuk mendukung efisiensi data, sistem kuis digital telah terintegrasi langsung dengan infrastruktur *cloud storage*, sehingga data pertanyaan dan skor dapat diakses secara *real-time* dan sinkron di dalam aplikasi VR (Seputra et al., 2020).

Hasil jadi ini juga menunjukkan stabilitas performa tinggi berkat optimasi pada hardware Snapdragon XR2. Dengan penerapan FPS Locking dan Mobile Optimized Shaders seperti pada Gambar 5, perangkat Meta Quest 2 mampu menjalankan aplikasi melalui peramban web dengan lancar tanpa adanya lonjakan latensi (Qualcomm, 2020; Unity Technologies, 2023). Hal ini menjamin bahwa setiap interaksi fisik terhadap model anatomi berjalan secara seamless dan memberikan kenyamanan visual yang maksimal bagi mahasiswa kedokteran selama proses pembelajaran imersif berlangsung (Akenine-Möller et al., 2018).

Hasil optimasi teknis ini memastikan media dapat berjalan secara konstan, yang merupakan ambang batas krusial untuk menjaga kenyamanan visual pada perangkat *standalone* (Qualcomm, 2020; Akenine-Möller et al., 2018). Stabilitas *frame rate* yang dicapai melalui standar WebXR ini secara langsung memperkuat aspek *immersive* aplikasi; mahasiswa dapat mengeksplorasi struktur neuroanatomi yang sangat kompleks tanpa terganggu oleh degradasi visual atau *stuttering*.

Dengan performa yang terjaga secara konsisten melalui peramban *website*, setiap pergerakan tangan dan navigasi di dalam laboratorium virtual terasa sangat responsif. Hal ini membuktikan bahwa integrasi antara optimasi *hardware* Snapdragon XR2 dan *rendering* yang efisien telah berhasil menciptakan lingkungan belajar yang stabil, sehingga mahasiswa kedokteran dapat sepenuhnya terbenam dalam simulasi medis tanpa risiko hambatan teknis yang memicu disorientasi visual.



**Gambar 5.** Proses Optimalisasi

### 3.5 Testing

Hasil akhir dari pengujian ini dilanjutkan dengan proses pengujian menggunakan berbagai macam pendekatan, sehingga produk yang dikembangkan mampu berjalan sesuai dan optimal. Pengujian terdiri atas pengujian performa, validitas, dan pengujian respon pengguna, dengan hasil sebagai berikut:

#### 1. Uji Performa

Pengujian performa dilakukan dengan tujuan, untuk memberikan pengalaman terbaik bagi pengguna, hal tersebut dilakukan dengan maksud untuk mengetahui hasil dari proses optimalisasi yang dilakukan pada tahap pengembangan sehingga mampu menjawab permasalahan kurang optimalnya aplikasi pengembangan VR pada perangkat spesifikasi rendah.

#### 2. Uji Ahli

Validitas instrumen dalam penelitian ini ditentukan melalui prosedur Expert Judgment seperti pada Tabel 2, proses perhitungan dengan menggunakan Matriks Gregory untuk mengetahui tingkat relevansi pada media.

**Tabel 2.** Perhitungan Gregory

		Penilai 1	
		Kurang Relevan	Sangat Relevan
Penilai 2	Kurang Relevan	A	B
	Sangat Relevan	C	D

$$Validitas = \frac{D}{A+B+C+D} \tag{1}$$

A: Jika Ke 2 Penilai merasa Kurang Relevan

B: Jika Penilai 1 merasa Relevan dan Penilai 2 Kurang Relevan

C: Jika Penilai 2 merasa Relevan dan Penilai 1 Kurang Relevan

D: Jika Ke 2 Penilai merasa Relevan

Metode ini digunakan untuk menghitung koefisien validitas isi berdasarkan kesepakatan antara dua orang ahli pada masing-masing bidang. Ahli yang dilibatkan merupakan praktisi dan akademisi dengan kualifikasi minimal



jenjang Strata 2 (S2) yang memiliki kompetensi mendalam di bidangnya. Dengan rumus seperti berikut, adapun rincian hasil perhitungan validitas dari kedua bidang tersebut adalah:

1. Uji Ahli Isi

Berdasarkan hasil penilaian dari dua orang ahli isi, diperoleh distribusi data pada matriks kontingensi sebagai berikut: Sel A=0, B=0, C=0, dan D=7. Hasil perhitungan validitasnya dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Perhitungan Gregory Uji Ahli Isi

		Penilai 1	
		Kurang Relevan	Sangat Relevan
Penilai 2	Kurang Relevan	0	0
	Sangat Relevan	0	7

$$V = \frac{7}{0+0+0+7}$$

$$V = \frac{7}{7} = 1$$

Skor 1 menunjukkan bahwa instrumen materi memiliki Validitas Sangat Tinggi dengan tingkat kesepakatan sempurna di antara kedua ahli.

2. Uji Ahli Media

Berdasarkan hasil penilaian dari dua orang ahli media, diperoleh distribusi data pada matriks kontingensi sebagai berikut: Sel A=0, B=2, C=0, dan D=12. Hasil perhitungan validitasnya dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Perhitungan Gregory Uji Ahli Media

		Penilai 1	
		Kurang Relevan	Sangat Relevan
Penilai 2	Kurang Relevan	0	2
	Sangat Relevan	0	12

$$V = \frac{12}{0+2+0+12}$$

$$V = \frac{12}{14} = 0,857$$

Perolehan skor sebesar 0,857 ini termasuk dalam rentang kriteria 0,71-0,9 sehingga dikategorikan memiliki Validitas Tinggi berdasarkan indek yang sudah ditetapkan pada tabel matriks.

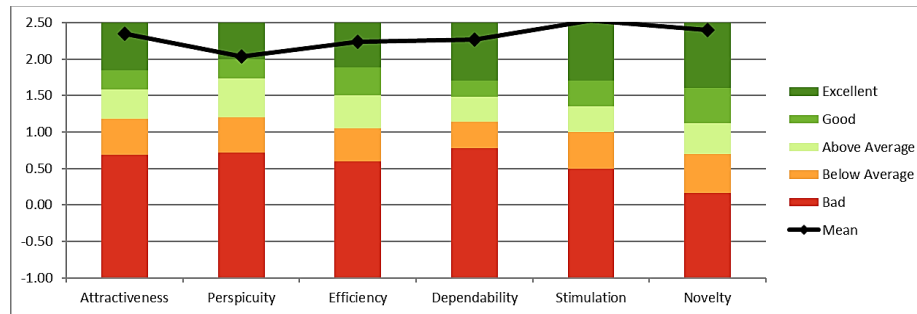
3. Uji Pengguna

Proses pengujian pengguna digunakan untuk mengevaluasi kepuasan pengguna dan kualitas pengalaman berinteraksi dengan aplikasi. Mahasiswa kedokteran sejumlah 25 orang digunakan sebagai responden utama penelitian. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa tanggapan yang diberikan terkait dengan tujuan membuat aplikasi yang dapat mengajar anatomi secara efektif dan komprehensif. UEQ versi standar, yang terdiri dari 26 pernyataan, digunakan untuk mengukur pengalaman pengguna secara menyeluruh. Metode ini dipilih karena mampu mengukur secara objektif daya guna atau utilitas pragmatis serta daya tarik atau nilai hedonis dari setiap fitur dan elemen aplikasi yang dikembangkan oleh tim peneliti. Aplikasi menunjukkan kinerja yang sangat baik pada keenam skala penilaian, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5, berdasarkan hasil analisis data yang menyeluruh. Aplikasi mencapai kategori "Excellent", yang merupakan penilaian terbaik dan tertinggi untuk tes UEQ ini. Dengan skor sekitar 2.53, dimensi stimulasi menerima skor tertinggi, menunjukkan bahwa media yang dikembangkan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap keterlibatan dan motivasi pengguna. Hasil ini menunjukkan bahwa pembelajaran anatomi dapat digunakan dengan sukses untuk membuat pengalaman pembelajaran interaktif yang menarik dan mendorong siswa untuk lebih terlibat dalam prosesnya. Sehingga hasil dari pada UEQ yang terdiri atas 26 Butir pertanyaan yang telah diberikan mampu digunakan dan hasil yang didapatkan juga cukup tinggi yang membuat pengembangan media seperti ini sangat cocok untuk dijalankan dan dikembangkan pada level yang lebih tinggi pada jenjang pendidikan yakni pada level mahasiswa.

**Tabel 5.** Hasil Analisis Kategori *Benchmark*

Scale	Mean	Comparisson to benchmark	Interpretation
Attractiveness	2.35	Excellent	In the range of the 10% best results
Perspicuity	2.04	Excellent	In the range of the 10% best results
Efficiency	2.24	Excellent	In the range of the 10% best results
Dependability	2.27	Excellent	In the range of the 10% best results
Stimulation	2.53	Excellent	In the range of the 10% best results
Novelty	2.39	Excellent	In the range of the 10% best results

Dengan bentuk grafik dari detail pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 7.



**Gambar 6.** Grafik Diagram

Berdasarkan data grafik pada Gambar 6 yang merujuk pada grafik diagram, hasil pengujian menunjukkan bahwa dimensi *Stimulation* (Stimulasi) meraih skor rata-rata tertinggi, yang menempatkan aplikasi ini pada predikat "Excellent" dalam kategori 10% produk terbaik secara global dibandingkan *dataset* referensi UEQ. Dominasi skor yang berada di area hijau gelap ini membuktikan bahwa implementasi teknologi WebXR secara efektif mampu memberikan daya tarik pembelajaran yang luar biasa dan meningkatkan motivasi intrinsik mahasiswa saat mengeksplorasi struktur sistem saraf pusat yang abstrak. Melalui pencapaian skor tertinggi pada aspek ini, dapat disimpulkan bahwa media instruksional tersebut sangat optimal dalam menciptakan pengalaman yang mengasyikkan, sehingga mampu merangsang minat belajar dan keterlibatan pengguna secara mendalam dibandingkan dengan dimensi penilaian lainnya.

Distribusi pengisian kusioner dijelaskan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Pendistribusian Hasil Respon Pengguna

Nr	Item	1	2	3	4	5	6	7	Scale
1	annoying/enjoyable	0	0	0	0	3	13	10	Attractiveness
2	not understandable/understandable	0	0	0	0	3	14	9	Perspicuity
3	dull/creative	0	0	0	0	0	11	15	Novelty
4	difficult to learn/easy to learn	0	0	0	1	12	6	7	Perspicuity
5	inferior/valuable	0	0	0	0	0	12	14	Stimulation
6	boring/exciting	0	0	0	0	3	7	16	Stimulation
7	not interesting/interesting	0	0	0	0	1	11	14	Stimulation
8	unpredictable/predictable	0	0	0	1	3	14	8	Dependability
9	slow/fast	0	0	0	0	5	15	6	Efficiency
10	conventional/inventive	0	0	1	0	1	7	17	Novelty
11	obstructive/supportive	0	0	0	0	5	9	12	Dependability
12	bad/good	0	0	0	0	1	7	18	Attractiveness
13	complicated/easy	0	0	1	2	8	11	4	Perspicuity
14	unlikable/pleasing	0	0	0	0	3	9	14	Attractiveness
15	usual/leading edge	0	0	1	4	3	9	9	Novelty
16	unpleasant/pleasant	0	0	0	3	6	9	8	Attractiveness
17	not secure/secure	0	0	0	1	3	9	13	Dependability
18	demotivating/motivating	0	0	0	0	3	5	18	Stimulation
19	does not meet expectations/meets expectations	0	0	0	0	1	14	11	Dependability
20	inefficient/efficient	0	0	0	1	2	13	10	Efficiency
21	confusing/clear	0	0	0	1	0	7	18	Perspicuity
22	impractical/practical	0	0	0	0	5	7	14	Efficiency
23	cluttered/organized	0	0	0	0	3	11	12	Efficiency
24	unattractive/attractive	0	0	0	0	1	11	14	Attractiveness
25	unfriendly/friendly	0	0	0	0	0	15	11	Attractiveness
26	conservative/innovative	0	0	0	0	2	4	20	Novelty

Dominasi skor tersebut juga diperkuat oleh data distribusi nilai pada file dimana item-item yang berkaitan dengan dimensi stimulasi, seperti item nomor 18 (*motivating*) dan item nomor 6 (*exciting*), mendapatkan frekuensi pilihan sangat tinggi pada skala positif. Secara khusus, item nomor 18 mencatat 18 responden yang memberikan nilai maksimal (skala 7), menunjukkan bahwa pengguna merasa sangat termotivasi selama menggunakan aplikasi. Selain itu, tidak ditemukannya satu pun responden yang memberikan nilai pada rentang negatif (skala 1, 2, dan 3) di seluruh item pengujian menegaskan bahwa pengalaman *immersive* yang ditawarkan berhasil mengeliminasi hambatan belajar dan mereduksi beban kognitif pengguna secara signifikan. Dengan integrasi akurasi konten medis dan stabilitas performa yang tercermin dari tingginya skor stimulasi dan kebaruan ini, aplikasi telah memenuhi standar sebagai media instruksional yang transformatif bagi mahasiswa kedokteran.



### 3.6 Distribution

Pendistribusian merupakan tahap akhir di mana aplikasi dikemas dan dipublikasikan dalam bentuk tautan *website* yang dapat diakses melalui *browser* yang mendukung Web XR. Mengingat target penggunaan adalah Pendidikan Kedokteran, distribusi dilakukan melalui *platform web hosting* atau *server* yang memungkinkan akses langsung oleh mahasiswa tanpa perlu instalasi aplikasi tambahan. Mahasiswa dan dosen cukup mengakses tautan yang diberikan melalui perangkat *headset* atau perangkat lain yang kompatibel dengan Web XR. Selain tautan *website*, penulis juga mendistribusikan buku manual penggunaan dan video tutorial navigasi untuk memudahkan dosen serta mahasiswa dalam mengoperasikan media Web XR secara mandiri di laboratorium anatomi. Hal ini memastikan bahwa luaran penelitian dapat diakses dengan mudah, cepat, dan digunakan sebagai alternatif sarana praktikum yang interaktif, *immersive*, dan berkelanjutan.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengembangan media pembelajaran neuroanatomi berbasis WebXR ini, penerapan metode MDLC terbukti sukses menghasilkan aplikasi VR yang rapi, terstruktur, dan selaras dengan kurikulum kedokteran Universitas Pendidikan Ganesha. Kontribusi nyata penelitian ini diawali dari aspek akurasi materi klinis yang divalidasi secara sempurna menggunakan Matriks Gregory dengan skor materi 1,00 dan media 0,86, sehingga menghasilkan media visualisasi 3D yang benar-benar presisi sesuai standar atlas SOBOTA, hal tersebut juga yang membuat pengujian ahli isi mendapatkan hasil yang cukup tinggi dikarenakan sumber yang digunakan adalah menggunakan sumber dari Sobota itu sendiri berdasarkan analisa dan izin dari pihak kedokteran itu sendiri. Selain itu, penelitian ini memberikan kontribusi teknis berupa solusi optimasi performa pada perangkat berkemampuan komputasi seluler terbatas seperti Meta Quest 2 dengan teknologi Snapdragon XR2. Melalui penerapan teknik FPS Locking dan Resolution Scaling yang berjalan langsung di atas pondasi server serta arsitektur HTML5 secara *real-time*, aplikasi berhasil mengeliminasi masalah stuttering sekaligus mencegah munculnya gejala *motion sickness* dari segi FPS yang dihasilkan pada media yang dijalankan pada perangkat VR Meta Quest 2 yang terbilang memiliki spesifikasi cukup rendah. Kontribusi pada aspek pengalaman pengguna juga terbukti sangat signifikan, di mana pengujian menggunakan kuesioner UEQ menghasilkan predikat "Excellent" pada seluruh dimensi dengan skor Stimulasi mencapai 2,46 yang menempatkan produk ini dalam jajaran 10% terbaik secara global karena mampu mendongkrak motivasi belajar mahasiswa secara mandiri. Melalui seluruh pencapaian tersebut, aplikasi berbasis web ini tidak sekadar berfungsi sebagai alat peraga digital biasa, melainkan memberikan kontribusi praktis yang besar sebagai solusi alternatif praktikum anatomi yang efisien, murah, lintas platform, dan nyaman digunakan untuk jangka panjang.

## REFERENCES

- Aridan, N., Bernstein-Eliav, M., Gamzo, D., Schmeidler, M., Tik, N., & Tavor, I. (2024). Neuroanatomy in virtual reality: Development and pedagogical evaluation of photogrammetry-based 3D brain models. *Anatomical Sciences Education*, 17(2), 239–248. <https://doi.org/10.1002/ase.2359>
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2020). *Neuroscience: Exploring the brain* (4th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Khonsary, S. (2017). Guyton and Hall: Textbook of Medical Physiology. *Surgical Neurology International*, 8(1), 275. [https://doi.org/10.4103/sni.sni\\_327\\_17](https://doi.org/10.4103/sni.sni_327_17)
- Mahayani, K. E., Agustini, K., Gde, I., & Sudatha, W. (2023). The effectiveness of virtual reality in mathematics for SPLDV material. *Journal of Education Technology*, 7(3), 390–399. <https://doi.org/10.23887/jet.v7i3.624>
- Mistry, D., Brock, C. A., & Lindsey, T. (2023). The present and future of virtual reality in medical education: A narrative review. *Cureus*, 15(12), e51124. <https://doi.org/10.7759/cureus.51124>
- Pramitiaswi, P. D. A., Sindu, I. G. P., & Wahyuni, D. S. (2025). Pengembangan immersive laboratory berbasis virtual reality pada standar pemeriksaan kehamilan dalam meningkatkan kualitas pembelajaran. *TIN: Terapan Informatika Nusantara*, 6(7), 1190–1200. <https://doi.org/10.47065/tin.v6i7.8944>
- Pramudita, P. D., Pascima, I. B. N., & Sindu, I. G. P. (2025). Pengembangan augmented reality portal untuk galeri virtual lukisan Wayang Kamasan. *Kumpulan Artikel Mahasiswa Pendidikan Teknik Informatika (KARMAPATI)*, 14(1), 1–10. <https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/KP/article/view/74211>
- Putra, I. M. G. M., & Putra, I. N. T. A. (2025). Perancangan aplikasi berbasis augmented reality untuk visualisasi produk dalam e-commerce. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 9(4), 5787–5793. <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/jati/article/view/9124>
- Putz, R., & Pabst, R. (2008). *Sobotta atlas of human anatomy* (14th ed.). Elsevier.
- Qualcomm Technologies, Inc. (2020). *Snapdragon XR2 5G platform: Unlocking the full potential of XR* [White paper]. Qualcomm Technologies. <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/snapdragon-xr2-5g-platform-product-brief.pdf>
- Riyadi, R., Hasanuddin, T., & Abdullah, S. M. (2024). Penerapan teknologi virtual reality (VR) untuk pengenalan workspace Fakultas Ilmu Komputer Universitas Muslim Indonesia. *Buletin Sistem Informasi dan Teknologi Islam*, 5(3), 212–221. <https://doi.org/10.33096/busiti.v5i3.2198>



- Saraswati, N. L. P. A. (2020). Pengembangan media pembelajaran sistem pernapasan berbasis virtual reality untuk siswa SMP. *Jurnal Pendidikan Sains*, 25(4), 87–95. <https://journal.um.ac.id/index.php/jps/article/view/14352>
- Schrepp, M., Hinderks, A., & Thomaschewski, J. (2023). User experience questionnaire handbook. *UEQ Online*. <https://www.ueq-online.org/>
- Seputra, K. A., Paramartha, A. A. G. Y., & Wijaya, I. N. S. W. (2020). Implementasi Google Drive cloud storage pada sistem repositori AL-daring. *SINTECH Journal (Science and Information Technology Journal)*, 3(1), 49–57. <https://doi.org/10.31598/sintechjournal.v3i1.533>
- Setemen, K. (2018). Pengembangan dan pengujian validitas butir instrumen kecerdasan logis-matematis. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 15(2), 179–187. <https://doi.org/10.23887/jptk-undiksha.v15i2.14020>
- Sindu, I. G. P., Hartati, R. S., Sudarma, M., & Gunantara, N. (2023). Systematic literature review of machine learning in virtual reality and augmented reality. *Jurnal Nasional Pendidikan Teknik Informatika (JANAPATI)*, 12(1), 108–118. <https://doi.org/10.23887/janapati.v12i1.60126>
- Standring, S. (Ed.). (2020). *Gray's anatomy: The anatomical basis of clinical practice* (42nd ed.). Elsevier.
- Sung, H., Kim, M., Park, J., Shin, N., & Han, Y. (2024). Effectiveness of virtual reality in healthcare education: Systematic review and meta-analysis. *Sustainability*, 16(19), 8520. <https://doi.org/10.3390/su16198520>
- Tene, T., Vique López, D. F., Valverde Aguirre, P. E., Orna Puente, L. M., & Vacacela Gomez, C. (2024). Virtual reality and augmented reality in medical education: An umbrella review. *Frontiers in Digital Health*, 6, e1365345. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2024.1365345>
- Unity Technologies. (2023). Optimizing graphics performance: Reduce rendering work on the CPU or GPU. *Unity Documentation*. <https://docs.unity3d.com/Manual/ReducingRenderingWork.html>
- Utami, L. P. R. A., Suwastini, N. K. A., Dantes, G. R., Suprihatin, C. T., & Adnyani, K. E. K. (2021). Virtual reality for supporting authentic learning in 21st-century language classroom. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 18(1), 132–143. <https://doi.org/10.23887/jptk-undiksha.v18i1.31127>
- Zhao, J., Xu, X., Jiang, H., & Ding, Y. (2020). The effectiveness of virtual reality-based technology on anatomy teaching: A meta-analysis of randomized controlled studies. *BMC Medical Education*, 20(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-1994-z>