MASALIQ
Jurnal Pendidikan dan Sains

e-ISSN: 2808-8115
p-ISSN: 2809-1051

Terindeks: Sinta 5, Copernicus, Dimensions, Scilit, Lens, Crossref, Garuda, Google Scholar, Base, etc

https://doi.org/10.58578/masaliq.v6i5.11587

RANCANG BANGUN *AUGMENTED REALITY BOOK* EDUKASI 'KLOROFIL SEBAGAI PENYEBAB WARNA PADA DAUN'

Design and Development of an Augmented Reality Educational Book 'Chlorophyll as the Cause of Color in Leaves'

Ivani Adellia Talitha & Chintiya Larashati
Universitas Negeri Padang
ivaniadellia8@gmail.com; chintiyalarashati1599@gmail.com

Article Info:

Submitted:	Revised:	Accepted:	Published:
Jun 17, 2026	Jul 15, 2026	Jul 27, 2026	Aug 1, 2026

Abstract

The limitations of static learning media still make it difficult for elementary school students to understand the concept of chlorophyll and the process of light interaction that causes leaves to appear green. This study aimed to design and develop an educational Augmented Reality Book entitled "Klorofil sebagai Penyebab Warna pada Daun," which integrates an illustrated book, three-dimensional animation, and a marker-based tracking system. The study employed a research and development approach using the Multimedia Development Life Cycle model, which includes the concept, design, material collecting, assembly, and testing stages. Initial data were obtained through a questionnaire administered to 30 respondents selected using a purposive sampling technique, as well as a literature review. The data were analyzed descriptively through frequencies, percentages, and the categorization of open-ended responses. The results of the study produced an illustrated book consisting of five spreads, low-poly-style three-dimensional models, and an Android-based application developed using Unity and Vuforia. The testing results showed that the augmented reality camera function, marker detection, the appearance of three-dimensional objects, animation, and the exit button operated according to the design. These

Masaliq Journal is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License

findings indicate that the integration of print media and augmented reality technology can support the visualization of scientific concepts in a more interactive manner. This study contributes to the development of science learning media that connect printed narratives with digital scientific visualization. Further testing with fifth-grade students is needed to assess the effect of the media on understanding, interest, and learning outcomes.

Keywords: 3D Animation; Augmented Reality Book; Chlorophyll; Marker-Based Tracking; Science Learning Media

Abstrak: Keterbatasan media pembelajaran statis masih menyulitkan siswa sekolah dasar dalam memahami konsep klorofil dan proses interaksi cahaya yang menyebabkan daun tampak berwarna hijau. Penelitian ini bertujuan merancang dan membangun *Augmented Reality Book* edukasi "Klorofil sebagai Penyebab Warna pada Daun" yang memadukan buku ilustrasi, animasi tiga dimensi, dan sistem *marker-based tracking*. Penelitian menggunakan pendekatan penelitian dan pengembangan dengan model *Multimedia Development Life Cycle* yang mencakup tahap *concept*, *design*, *material collecting*, *assembly*, dan *testing*. Data awal diperoleh melalui kuesioner kepada 30 responden yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* serta studi literatur. Data dianalisis secara deskriptif melalui frekuensi, persentase, dan pengelompokan jawaban terbuka. Hasil penelitian menghasilkan buku ilustrasi yang terdiri atas lima *spread*, model tiga dimensi bergaya *low-poly*, serta aplikasi berbasis Android yang dikembangkan menggunakan Unity dan Vuforia. Hasil pengujian menunjukkan bahwa fungsi kamera realitas tertambah, deteksi *marker*, pemunculan objek tiga dimensi, animasi, dan tombol keluar dapat berjalan sesuai rancangan. Temuan ini menunjukkan bahwa integrasi media cetak dan teknologi realitas tertambah dapat mendukung visualisasi konsep ilmiah secara lebih interaktif. Penelitian ini berkontribusi terhadap pengembangan media pembelajaran IPA yang menghubungkan narasi cetak dengan visualisasi ilmiah digital. Pengujian lanjutan terhadap siswa kelas V diperlukan untuk menilai pengaruh media terhadap pemahaman, minat, dan hasil belajar.

Kata Kunci: Animasi 3D; *Augmented Reality Book*; Klorofil; *Marker-Based Tracking*; Media Pembelajaran IPA

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital telah mendorong perubahan pada cara guru menyampaikan materi dan cara siswa memperoleh pengalaman belajar. Perubahan tersebut perlu diikuti dengan penyediaan media pembelajaran yang mampu menempatkan siswa sebagai peserta aktif, terutama pada pembelajaran Ilmu Pengetahuan Alam di sekolah dasar. Minat belajar memiliki hubungan dengan keterlibatan dan hasil belajar siswa sehingga rendahnya ketertarikan terhadap pembelajaran dapat menghambat proses pemahaman materi. Wiradarma et al. (2021) mengemukakan bahwa kesulitan guru dalam menumbuhkan minat belajar pada pembelajaran IPA berkaitan dengan rendahnya hasil belajar siswa. Penggunaan media yang masih didominasi penjelasan verbal dan gambar statis juga belum

sepenuhnya mampu memenuhi kebutuhan belajar siswa yang akrab dengan perangkat digital. Buku interaktif digital dapat memberikan pengalaman belajar yang lebih variatif karena materi tidak hanya disampaikan melalui teks, tetapi juga diperkuat dengan unsur visual dan interaktif yang menarik perhatian siswa (Novianti & Tirtoni, 2024). Temuan meta-analisis juga menunjukkan bahwa penggunaan *Augmented Reality* dalam pendidikan memberikan pengaruh positif terhadap performa, motivasi, dan sikap belajar siswa (Chang et al., 2022; Zhang et al., 2022).

Materi klorofil dan fotosintesis merupakan bagian dari pembelajaran IPA yang perlu dipahami oleh siswa sekolah dasar karena berkaitan dengan proses tumbuhan menghasilkan makanan dan mempertahankan kehidupannya. Klorofil merupakan pigmen fotosintetik yang berperan dalam menangkap energi cahaya dan mendukung berlangsungnya konversi energi pada proses fotosintesis. Kandungan klorofil juga berkaitan dengan tingkat kehijauan daun, meskipun warna daun secara keseluruhan dapat dipengaruhi oleh jenis dan perbandingan berbagai pigmen tumbuhan (Dharmadewi, 2020; Kume, 2017). Klorofil menyerap cahaya secara dominan pada wilayah merah dan biru, sedangkan sebagian cahaya hijau dipantulkan atau diteruskan sehingga daun tampak berwarna hijau bagi penglihatan manusia. Perubahan jumlah klorofil dapat menghasilkan variasi warna daun, mulai dari hijau, hijau pucat, kuning, hingga putih pada kondisi tertentu (Nguyen & Sung, 2025; Zhu et al., 2024), Penjelasan tersebut menunjukkan bahwa warna hijau pada daun bukan sekadar ciri visual tumbuhan, melainkan berkaitan dengan keberadaan pigmen dan proses biologis yang berlangsung di dalam kloroplas.

Karakter materi klorofil dan fotosintesis yang melibatkan struktur mikroskopis, penyerapan spektrum cahaya, serta perubahan energi menyebabkan konsep tersebut tidak selalu mudah dipahami melalui penjelasan lisan. Siswa dapat melihat warna daun secara langsung, tetapi tidak dapat mengamati cara cahaya mencapai permukaan daun, masuk ke jaringan, diserap oleh pigmen, dan digunakan dalam proses fotosintesis. Penyampaian yang hanya mengandalkan teks, ceramah, atau ilustrasi diam berisiko membuat siswa menghafal istilah tanpa membangun gambaran utuh mengenai hubungan antara cahaya, klorofil, warna daun, dan fotosintesis. Kajian mengenai mekanisme fotoproteksi tumbuhan juga memperlihatkan bahwa respons klorofil terhadap kondisi cahaya berlangsung secara dinamis dan dipengaruhi oleh lingkungan pencahayaan (Egesa et al., 2024). Kondisi tersebut memperkuat kebutuhan terhadap media visual yang mampu menyederhanakan proses ilmiah tanpa menghilangkan ketepatan konsep yang dipelajari.

Teknologi *Augmented Reality* dapat digunakan sebagai salah satu alternatif untuk menjembatani keterbatasan pengamatan terhadap konsep yang abstrak atau tidak terlihat secara langsung. Teknologi ini menempatkan objek digital pada lingkungan nyata yang diamati melalui kamera perangkat sehingga siswa tetap berinteraksi dengan buku fisik sekaligus memperoleh tambahan informasi berbentuk animasi, suara, teks, atau model tiga dimensi. Penggunaan teknologi virtual dan *augmented reality* dalam pembelajaran berkembang semakin luas setelah transformasi pembelajaran digital berlangsung pada masa pandemi COVID-19 (Ariatama et al., 2021). Tinjauan penelitian pendidikan menunjukkan bahwa *Augmented Reality* dapat membantu visualisasi objek, meningkatkan keterlibatan belajar, dan memberikan kesempatan kepada siswa untuk berinteraksi dengan materi secara lebih aktif (Akçayır & Akçayır, 2017; Garzón et al., 2019). Teknologi tersebut juga memiliki potensi besar pada pembelajaran sains karena dapat membuat objek yang tidak tampak menjadi lebih mudah diamati melalui representasi digital (Ripsam & Nerdel, 2024).

Augmented Reality Book menggabungkan karakter buku bergambar dengan kemampuan perangkat digital untuk menampilkan konten tambahan ketika halaman dipindai. Media ini tetap mempertahankan pengalaman membaca dan mengamati ilustrasi pada buku, tetapi memperluasnya melalui objek yang bergerak dan dapat dilihat dari berbagai sudut. Format tersebut sesuai dengan karakteristik siswa sekolah dasar yang membutuhkan materi konkret, visual, dan dekat dengan pengalaman sehari-hari. Penggunaan *Augmented Reality* pada tingkat sekolah dasar juga dinilai dapat menciptakan pengalaman belajar yang lebih kaya serta mendorong motivasi dan keterlibatan siswa ketika konten, bentuk interaksi, dan tingkat kerumitannya disesuaikan dengan usia pengguna (Volioti et al., 2022). Aditia (2024) menegaskan bahwa peningkatan pengalaman pengguna melalui *Augmented Reality* tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemudahan interaksi, ketepatan informasi, dan kesesuaian visual dengan kebutuhan pengguna. *Augmented Reality Book* yang dikembangkan dalam penelitian ini karena itu tidak hanya ditempatkan sebagai produk teknologi, tetapi juga sebagai media komunikasi edukatif bagi siswa usia 10–11 tahun.

Pemilihan sistem *marker-based tracking* didasarkan pada kebutuhan untuk membangun hubungan yang jelas antara halaman buku dan konten digital yang ditampilkan. Sistem ini menggunakan gambar atau ilustrasi tertentu sebagai penanda yang dikenali kamera untuk menentukan posisi munculnya animasi, teks, suara, atau model tiga dimensi. Arifitama et al. (2022), menjelaskan bahwa marker merupakan komponen penting dalam proses pemunculan objek *Augmented Reality* karena kualitas dan karakter penanda memengaruhi keberhasilan

proses deteksi. Penggunaan *marker-based tracking* pada media pembelajaran juga telah diterapkan untuk menampilkan objek edukatif berbasis Android, seperti pengenalan landmark negara-negara ASEAN (Nazilah & Ramdhan, 2021). Sistem berbasis marker dipilih pada penelitian ini karena memungkinkan setiap ilustrasi halaman berfungsi sebagai pemicu konten yang telah ditentukan, sehingga alur interaksi siswa tetap terarah dan sesuai dengan urutan materi pada buku.

Animasi tiga dimensi digunakan untuk memvisualisasikan struktur daun, kloroplas, klorofil, cahaya matahari, dan hubungan antarkomponen yang terlibat dalam proses fotosintesis. Representasi tiga dimensi memungkinkan siswa mengamati objek dari sudut pandang yang lebih beragam dibandingkan gambar dua dimensi. Penyajian tersebut relevan bagi materi sains yang membahas struktur dan proses yang sulit diamati secara langsung karena visualisasi dapat mengubah informasi abstrak menjadi representasi yang lebih konkret. Prinsip pembelajaran multimedia menjelaskan bahwa pemahaman dapat terbentuk secara lebih bermakna ketika kata-kata dan gambar dirancang secara terpadu, terarah, dan tidak membebani kapasitas pemrosesan informasi siswa (Mayer, 2020). Animasi yang digunakan karena itu perlu disusun secara sederhana, bertahap, dan sesuai dengan kemampuan kognitif siswa. Fokus animasi tidak hanya diarahkan pada daya tarik visual, tetapi juga pada kejelasan hubungan antara cahaya, pigmen klorofil, warna hijau daun, dan proses fotosintesis.

Penelitian terdahulu telah menunjukkan penggunaan *Augmented Reality* untuk berbagai kebutuhan pembelajaran. Nazilah & Ramdhan (2021) mengembangkan media pengenalan landmark ASEAN dengan metode *marker-based tracking*, sedangkan Arifitama et al. (2022) membandingkan efektivitas metode marker dan markerless dalam menampilkan objek AR. Penelitian lain mengembangkan aplikasi *Augmented Reality* melalui metode *Multimedia Development Life Cycle* untuk media pembelajaran yang dirakit menggunakan perangkat lunak Blender, Unity, dan Visual Studio (Solehatin et al., 2023). Kurniasari et al. (2023) juga menerapkan MDLC pada *Augmented Reality Book* bertema cerita rakyat bagi anak usia dini. Berbagai penelitian tersebut memperlihatkan potensi AR sebagai media pengenalan objek dan penyampaian informasi interaktif. Kajian yang secara khusus merancang buku edukasi berbasis *marker-based Augmented Reality* dengan animasi 3D untuk menjelaskan klorofil sebagai penyebab warna hijau pada daun kepada siswa kelas V sekolah dasar masih terbatas. Keterbatasan tersebut tampak pada belum banyaknya media yang menyatukan narasi buku bergambar, pemindaian halaman, model kloroplas, simulasi spektrum cahaya, dan urutan proses fotosintesis ke dalam satu pengalaman belajar yang terarah.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan *Augmented Reality Book* yang memadukan buku cerita bergambar, *marker-based tracking*, dan animasi 3D untuk menerangkan hubungan antara klorofil, cahaya, warna daun, dan fotosintesis sesuai dengan karakteristik siswa usia 10–11 tahun. Perancangan media berlandaskan prinsip pembelajaran multimedia yang menempatkan teks dan visual sebagai unsur yang saling melengkapi, bukan sebagai komponen yang berdiri sendiri. Proses pengembangannya menggunakan metode *Multimedia Development Life Cycle* melalui tahapan *concept*, *design*, *material collecting*, *assembly*, *testing*, dan *distribution*. Tahapan tersebut memungkinkan kebutuhan pengguna, isi pembelajaran, ilustrasi buku, model 3D, animasi, sistem pemindaian, serta fungsi aplikasi dikembangkan dan diuji secara sistematis (Solehatin et al., 2023). Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun *Augmented Reality Book* edukasi "Klorofil sebagai Penyebab Warna pada Daun" sebagai media pembelajaran IPA bagi siswa kelas V sekolah dasar, mengintegrasikan animasi 3D dengan sistem *marker-based tracking*, serta menguji fungsi media agar dapat digunakan untuk menyajikan konsep klorofil dan fotosintesis secara visual, interaktif, dan mudah dipahami.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan yang berorientasi pada perancangan produk multimedia edukatif berupa *Augmented Reality Book* "Klorofil sebagai Penyebab Warna pada Daun". Desain pengembangan mengadaptasi metode *Multimedia Development Life Cycle* (MDLC) karena sesuai untuk menghasilkan media yang memadukan buku cetak, ilustrasi dua dimensi, model tiga dimensi, animasi, dan teknologi *Augmented Reality*. Tahapan pengembangan meliputi *concept*, *design*, *material collecting*, *assembly*, dan *testing*. Tahap *concept* dilakukan dengan menetapkan tujuan media, sasaran pengguna, tema, pesan edukatif, dan bentuk interaksi. Tahap *design* mencakup penyusunan naskah cerita, alur, *storyboard*, desain karakter Avi dan Profesor Daun, tata letak halaman, serta palet warna. Tahap *material collecting* dilakukan dengan menyiapkan ilustrasi melalui Ibis Paint, model dan animasi 3D melalui Blender, aset suara, materi klorofil dan fotosintesis, serta perangkat pengembangan Unity dan Vuforia. Seluruh komponen kemudian diintegrasikan pada tahap *assembly* untuk menghasilkan aplikasi yang dapat menampilkan objek digital ketika kamera mendeteksi ilustrasi halaman sebagai marker.

Data awal dikumpulkan melalui kuesioner daring menggunakan Google Form dan studi literatur. Partisipan kuesioner berjumlah 30 orang yang dipilih menggunakan teknik

purposive sampling, dengan pertimbangan memiliki anak atau anggota keluarga berusia 10–11 tahun sebagai sasaran utama media. Responden memiliki latar belakang yang beragam, seperti mahasiswa, pegawai negeri, lulusan perguruan tinggi, petani, dan ibu rumah tangga. Keragaman tersebut digunakan untuk memperoleh pandangan yang lebih luas mengenai kebutuhan media pembelajaran sains berbasis teknologi. Instrumen kuesioner terdiri atas pernyataan berskala Likert dan pertanyaan terbuka yang membahas minat terhadap media pembelajaran interaktif, kebutuhan visualisasi materi klorofil, kemudahan penggunaan perangkat, serta tanggapan terhadap pengembangan *Augmented Reality Book*. Studi literatur dilakukan dengan menelaah sekitar 20 sumber berupa artikel jurnal, prosiding, laporan penelitian, dan sumber ilmiah lain yang membahas *Augmented Reality*, media pembelajaran sains, karakteristik kognitif anak, klorofil, fotosintesis, teori warna, tipografi, ilustrasi, serta animasi 3D.

Data kuesioner berskala Likert dianalisis secara deskriptif melalui penghitungan frekuensi dan persentase jawaban untuk memperoleh gambaran kebutuhan serta penerimaan calon pengguna terhadap media yang dikembangkan. Jawaban terbuka dianalisis dengan mengelompokkan tanggapan berdasarkan tema yang muncul, seperti daya tarik visual, kemudahan penggunaan, kejelasan materi, dan kebutuhan pendampingan orang tua. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam menentukan konsep cerita, desain karakter, pilihan warna, bentuk animasi, dan pola interaksi pengguna. Produk yang telah dirakit selanjutnya menjalani pengujian teknis dan uji pengguna terbatas. Pengujian teknis dilakukan untuk memastikan marker dapat dikenali kamera, objek 3D muncul pada posisi yang sesuai, animasi berjalan dengan baik, dan aplikasi tidak mengalami kesalahan fungsi. Uji pengguna dilakukan melalui *blind test*, yaitu calon pengguna diminta mengoperasikan buku dan aplikasi tanpa petunjuk langsung dari perancang. Pengamatan difokuskan pada kemampuan pengguna menjalankan aplikasi, mengikuti alur cerita, mengenali hubungan klorofil dengan warna hijau daun, serta memahami informasi yang disajikan melalui animasi 3D.

HASIL

1. Hasil Pengembangan Produk

Penelitian ini menghasilkan media edukasi berupa *Augmented Reality Book* berjudul "Dari Sinar Jadi Hijau: Rahasia Daun" yang membahas klorofil sebagai penyebab warna hijau pada daun. Produk terdiri atas buku ilustrasi dan aplikasi *Augmented Reality* berbasis Android.

Buku disusun dalam lima *spread* atau sepuluh halaman isi yang menampilkan alur cerita antara tokoh Avi dan Profesor Daun. Konten cerita dimulai dari rasa ingin tahu Avi terhadap warna hijau pada daun, dilanjutkan dengan penjelasan mengenai cahaya matahari, kloroplas, penyerapan cahaya merah dan biru, serta pemantulan cahaya hijau. Bagian akhir cerita menampilkan pemahaman Avi mengenai hubungan klorofil dengan warna daun.

Tahap produksi menghasilkan dua kelompok aset utama, yaitu aset cetak dan aset digital. Aset cetak meliputi ilustrasi karakter Avi, Profesor Daun, latar taman, elemen cahaya, tata letak halaman, dan teks narasi. Ilustrasi dibuat menggunakan Ibis Paint dengan teknik pewarnaan digital dan gaya visual kartun yang disesuaikan dengan karakteristik anak usia 10–11 tahun. Karakter Avi dan Profesor Daun hanya ditempatkan pada buku cetak sebagai pengantar dan penyampai narasi. Konten AR difokuskan pada visualisasi objek ilmiah, seperti daun, kloroplas, matahari, awan, pohon, serta pergerakan cahaya yang masuk dan dipantulkan oleh daun. Tampilan buku dan contoh halaman hasil produksi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil produksi sampul dan halaman Augmented Reality Book
Sumber: Data Penulis

Berdasarkan Gambar 1, produk cetak telah menampilkan kesatuan antara ilustrasi karakter, latar, teks narasi, dan tata letak halaman. Sampul dan halaman isi menggunakan gaya visual kartun yang sesuai dengan sasaran pengguna anak-anak serta mendukung penyampaian materi mengenai klorofil secara bertahap. Arah visual produk menggunakan warna hijau sebagai warna dominan yang mewakili daun dan klorofil. Warna kuning dan oranye digunakan pada objek matahari serta elemen pencahayaan, sedangkan warna merah dan biru digunakan untuk membedakan cahaya yang diserap oleh klorofil. Warna krem, cokelat, dan biru digunakan sebagai warna pendukung pada latar dan elemen visual lainnya. Jenis huruf Nunito dan Quicksand digunakan pada bagian narasi dan dialog. Ringkasan komponen produk yang dihasilkan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen hasil pengembangan Augmented Reality Book

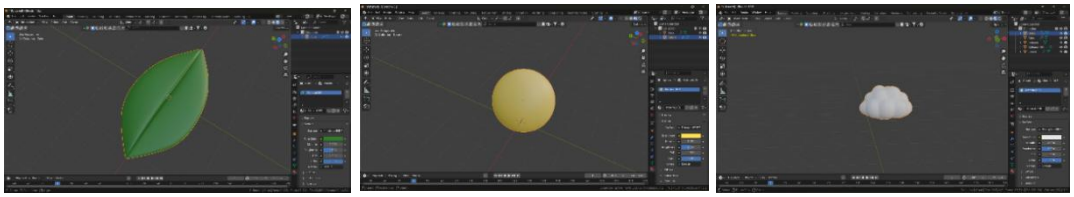
No.	Komponen	Hasil Produksi	Format/Perangkat	Fungsi
1	Buku ilustrasi	Lima spread atau sepuluh halaman isi	Media cetak	Menyampaikan alur cerita dan materi tentang klorofil

No.	Komponen	Hasil Produksi	Format/Perangkat	Fungsi
2	Karakter Avi	Ilustrasi anak berusia 10–11 tahun	PNG, Ibis Paint	Mewakili pembaca dalam alur cerita
3	Profesor Daun	Ilustrasi daun berkarakter	PNG, Ibis Paint	Menyampaikan penjelasan mengenai klorofil
4	Model daun	Objek daun, tulang daun, dan kloroplas	FBX, Blender	Menampilkan struktur daun dalam teknologi AR
5	Model matahari	Objek berbentuk bola dengan material berwarna	FBX, Blender	Menunjukkan sumber cahaya dalam proses fotosintesis
6	Model awan	Objek tiga dimensi berbentuk awan	FBX, Blender	Mendukung suasana dan lingkungan visual AR
7	Model pohon	Objek tiga dimensi bergaya low-poly	FBX, Blender	Mendukung lingkungan visual dalam tampilan AR
8	Animasi cahaya	Animasi cahaya merah, biru, dan hijau	Unity	Menampilkan proses penyerapan dan pemantulan cahaya oleh daun
9	Musik latar	Musik latar yang diperoleh dari Pixabay	MP3	Mengiringi penggunaan aplikasi agar lebih menarik
10	Sistem pelacakan	Image target yang berasal dari halaman buku	Vuforia Engine	Mengaktifkan konten AR ketika halaman buku dipindai
11	Aplikasi	Aplikasi augmented reality berbasis Android	Unity	Menjalankan proses pemindaian marker dan menampilkan animasi tiga dimensi

Berdasarkan Tabel 1, produk yang dikembangkan memadukan komponen cetak dan digital. Buku ilustrasi berfungsi menyampaikan cerita dan materi utama, sedangkan model tiga dimensi, animasi cahaya, sistem pelacakan, dan aplikasi Android digunakan untuk menampilkan visualisasi interaktif ketika halaman buku dipindai.

2. Hasil Pemodelan dan Animasi Tiga Dimensi

Pemodelan objek tiga dimensi dilakukan menggunakan Blender. Model daun dibuat dari objek dasar *plane* yang selanjutnya dibentuk melalui pengeditan *vertex*, *edge*, dan *face*. Permukaan daun dihaluskan menggunakan *subdivision modifier*, kemudian ditambahkan volume, tulang daun, dan material warna. Model matahari dikembangkan dari objek *sphere* yang diberi penghalusan permukaan dan material warna. Model awan dibuat dengan menggabungkan sejumlah objek *metaball* hingga membentuk massa menyerupai awan. Seluruh model menggunakan gaya *low-poly* dan diekspor ke dalam format FBX untuk diintegrasikan ke Unity. Hasil pemodelan aset tiga dimensi ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil produksi aset tiga dimensi pendukung

Sumber: Data Penulis

Berdasarkan Gambar 2, aset tiga dimensi yang dihasilkan meliputi model daun, kloroplas, matahari, awan, dan pohon. Penggunaan bentuk sederhana dan gaya *low-poly* membantu mempertahankan keterbacaan objek sekaligus mengurangi beban pemrosesan ketika aset ditampilkan melalui aplikasi AR. Animasi yang dihasilkan mencakup kemunculan kloroplas secara bertahap, pergerakan cahaya menuju daun, dan perubahan warna daun dari hijau pucat menjadi hijau yang lebih kuat. Kemunculan kloroplas diatur melalui metode MunculkanKloroplasBertahap() dengan penggunaan StartCoroutine() dan WaitForSeconds(). Pengaturan tersebut menghasilkan urutan kemunculan objek satu per satu. Transisi warna daun menggunakan fungsi Color.Lerp() sehingga perubahan warna berlangsung secara bertahap. Jalur pergerakan elemen cahaya menggunakan lintasan kurva agar objek bergerak mengikuti jalur yang telah ditentukan.

3. Hasil Integrasi Sistem Augmented Reality

Integrasi *Augmented Reality* dilakukan menggunakan Unity dan Vuforia Engine. Halaman buku digunakan sebagai *image target* dan dimasukkan ke dalam basis data Vuforia dengan nama database ARBookTest. Basis data tersebut memuat sekurang-kurangnya dua marker, yaitu TestTarget1 dan TestTarget2. Setiap marker dihubungkan dengan objek tiga dimensi dan animasi yang sesuai dengan materi pada halaman buku.

Konfigurasi sistem meliputi pemasangan *App License Key*, pengaktifan komponen Vuforia Behaviour pada ARCamera, penempatan Image Target pada struktur *hierarchy*, serta pemasangan Default Observer Event Handler. Perintah untuk memulai animasi dihubungkan dengan metode MulaiAR() pada skrip AR2Controller.cs. Ketika kamera perangkat mendeteksi halaman buku, sistem menampilkan objek daun tiga dimensi, kloroplas, matahari, awan, serta simulasi cahaya di atas marker. Hasil pemindaian menunjukkan bahwa objek digital dapat mengikuti posisi dan orientasi halaman buku selama marker masih berada dalam jangkauan kamera. Tampilan hasil integrasi sistem disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tampilan objek tiga dimensi saat halaman buku dipindai
Sumber: Data Penulis

Berdasarkan Gambar 3, sistem AR telah mampu menampilkan objek digital di atas halaman buku yang berfungsi sebagai *image target*. Objek tiga dimensi dapat mengikuti posisi dan orientasi halaman selama *marker* masih berada dalam jangkauan kamera. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pelacakan dan integrasi antara halaman cetak dengan konten digital telah berjalan sesuai dengan rancangan.

4. Hasil Pengujian Teknis

Pengujian teknis atau *alpha testing* dilakukan secara internal menggunakan perangkat Android dan Unity Editor. Pengujian difokuskan pada empat fungsi utama, yaitu pembukaan kamera AR, kemampuan sistem mendeteksi marker, kelancaran animasi tiga dimensi, dan fungsi tombol keluar. Keempat fungsi yang diuji memperoleh status berhasil sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian teknis aplikasi

No.	Fitur yang Diuji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Pengujian	Status
1	Kamera AR	Kamera terbuka dan dapat digunakan untuk memindai halaman buku	Kamera terbuka dan menampilkan tampilan pemindaian	Berhasil
2	Deteksi marker	Objek 3D muncul ketika kamera diarahkan ke halaman buku	Marker berhasil terdeteksi dan objek 3D ditampilkan	Berhasil
3	Animasi 3D	Animasi cahaya dan perubahan objek berjalan dengan lancar	Animasi dapat dijalankan sesuai urutan yang telah ditentukan	Berhasil
4	Tombol keluar	Aplikasi tertutup ketika tombol keluar ditekan	Aplikasi berhasil ditutup	Berhasil

Berdasarkan Tabel 2, seluruh fitur yang diuji memperoleh status berhasil. Kamera AR dapat diaktifkan, *marker* pada halaman buku dapat dikenali, objek tiga dimensi dapat ditampilkan, animasi dapat dijalankan sesuai urutan, dan tombol keluar dapat menutup aplikasi sesuai dengan perintah pengguna.

Hasil *alpha testing* menunjukkan bahwa kamera dapat diaktifkan, marker pada halaman buku dapat dikenali, dan objek tiga dimensi dapat ditampilkan di atas halaman yang dipindai.

Animasi cahaya menuju daun serta kemunculan kloroplas juga dapat dijalankan. Tombol keluar berfungsi untuk menutup aplikasi sesuai perintah pengguna. Selama pengujian internal, tidak ditemukan kegagalan fungsi pada empat fitur utama tersebut.

5. Hasil Uji Pengguna Terbatas

Pengujian beta dilakukan melalui *blind test* terbatas kepada beberapa rekan sejawat dan dosen pembimbing. Pengguna diminta menjalankan buku dan aplikasi untuk memeriksa respons sistem ketika halaman dipindai. Hasil uji coba menunjukkan bahwa aplikasi dapat dibuka, kamera dapat digunakan, marker dapat dikenali, dan objek tiga dimensi dapat ditampilkan tanpa terjadi *error*, sistem tidak merespons, atau kegagalan interaksi. Produk memperoleh persetujuan dari dosen pembimbing untuk dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Pengujian beta pada bagian hasil skripsi dilaporkan secara deskriptif. Jumlah pasti peserta, karakteristik peserta, durasi penggunaan, jenis perangkat, dan skor kuantitatif mengenai kemudahan penggunaan atau pemahaman materi belum dicantumkan. Oleh sebab itu, hasil pengujian beta pada artikel ini terbatas pada laporan keberhasilan fungsi dan respons sistem selama uji coba.

6. Kendala

Kendala ditemukan ketika aset tiga dimensi dipindahkan dari Blender ke Unity. Model yang pertama kali diimpor memiliki skala dan arah sumbu yang tidak sesuai sehingga posisi objek belum proporsional terhadap marker. Perbedaan tersebut menyebabkan beberapa objek tampil terlalu besar, terlalu kecil, atau berada pada orientasi yang tidak sesuai dengan permukaan halaman. Kendala dan tindakan penanganannya disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kendala teknis selama proses integrase

No.	Tahap	Kendala yang Ditemukan	Dampak pada Produk	Tindakan Penanganan	Hasil
1	Ekspor Blender ke Unity	Terjadi perbedaan skala objek	Ukuran objek tidak proporsional terhadap marker	Menjalankan fungsi Apply Transformation sebelum proses ekspor	Skala objek menjadi lebih konsisten
2	Ekspor Blender ke Unity	Terjadi perbedaan arah sumbu	Orientasi model tidak sesuai dengan permukaan halaman	Menyesuaikan rotasi dan sumbu objek	Posisi objek mengikuti orientasi marker
3	Penempatan objek pada Unity	Ukuran aset belum seragam	Komposisi objek menutupi sebagian ilustrasi buku	Mengatur nilai scale melalui Unity Inspector	Objek tampil dengan ukuran yang lebih proporsional

No.	Tahap	Kendala yang Ditemukan	Dampak pada Produk	Tindakan Penanganan	Hasil
4	Pemindaian halaman	Tampilan objek bergantung pada marker yang terdeteksi	Objek hanya muncul ketika halaman berada dalam jangkauan kamera	Menyesuaikan konfigurasi Image Target dan Observer Event Handler	Objek dapat muncul ketika marker berhasil dikenali

Berdasarkan Tabel 3, kendala utama selama proses integrasi berkaitan dengan skala objek, arah sumbu, keseragaman ukuran, dan kemampuan sistem mendeteksi *marker*. Perbedaan skala dan orientasi diperbaiki melalui penerapan *Apply Transformation* serta penyesuaian rotasi dan sumbu objek sebelum dan setelah proses ekspor.

Penanganan kendala dilakukan dengan menerapkan *Apply Transformation* pada Blender sebelum aset diekspor. Nilai skala, posisi, dan rotasi kemudian disesuaikan kembali melalui Unity Inspector. Setelah penyesuaian, aset digital dapat ditempatkan di atas halaman buku tanpa menutupi seluruh ilustrasi dasar. Produk akhir berupa buku ilustrasi dan aplikasi AR berbasis Android telah melalui tahap produksi, integrasi, pengujian internal, dan uji pengguna terbatas serta siap dilanjutkan ke tahap distribusi.

PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Multimedia Development Life Cycle* dapat diterapkan untuk menghasilkan *Augmented Reality Book* edukasi yang memadukan buku ilustrasi, model tiga dimensi, animasi, dan aplikasi berbasis Android. Produk yang dihasilkan telah memenuhi tujuan perancangan pada tingkat pengembangan media, yaitu menghadirkan materi klorofil dan penyebab warna hijau pada daun melalui bentuk visual yang dapat dipindai dan diamati secara interaktif. Keberhasilan kamera AR, deteksi marker, pemunculan objek tiga dimensi, animasi cahaya, serta tombol keluar menunjukkan bahwa komponen utama aplikasi telah terintegrasi sesuai rancangan. Temuan tersebut terutama membuktikan kelayakan fungsional produk, bukan keberhasilan media dalam meningkatkan pemahaman atau hasil belajar siswa karena pengujian yang dilakukan masih berfokus pada kinerja sistem.

Penggabungan buku fisik dan konten digital memperluas fungsi buku ilustrasi yang sebelumnya hanya menyajikan teks dan gambar diam. Narasi yang dibangun melalui tokoh Avi dan Profesor Daun memberikan konteks bagi munculnya pertanyaan mengenai alasan daun berwarna hijau, sedangkan fitur AR digunakan untuk menampilkan bagian materi yang sulit digambarkan secara statis. Pembagian fungsi tersebut membuat unsur cerita tetap berada

pada halaman buku, sementara visualisasi ilmiah berupa kloroplas, cahaya, dan perubahan warna daun ditempatkan pada konten digital. Pemisahan ini membantu menjaga fokus penyajian karena tidak seluruh unsur cerita dipindahkan ke dalam lingkungan AR. Hasil tersebut sejalan dengan kajian Zhang et al. (2022) yang menunjukkan bahwa penggunaan AR pada pendidikan dasar dan menengah lebih bermanfaat ketika objek digital disusun untuk memperjelas materi dan mendukung aktivitas belajar yang berpusat pada siswa, bukan sekadar menjadi tambahan visual.

Pemilihan metode *marker-based tracking* juga sesuai dengan karakter produk yang berbentuk buku. Setiap halaman dapat berfungsi sebagai penanda yang menghubungkan narasi cetak dengan objek digital tertentu, sehingga urutan konten AR dapat mengikuti alur materi yang telah dirancang. Hasil pemindaian memperlihatkan bahwa objek daun dan kloroplas dapat muncul ketika kamera mengenali *image target*. Temuan ini mendukung penjelasan Arifitama et al. (2022) bahwa marker memiliki peran penting sebagai titik acuan bagi kemunculan dan penempatan objek dalam sistem AR. Penerapan serupa juga dilakukan oleh Nazilah & Ramdhan (2021) pada media pengenalan landmark negara-negara ASEAN, yang menggunakan marker untuk menghubungkan gambar dengan objek digital. Perbedaan penelitian ini terletak pada fungsi marker yang tidak hanya menampilkan objek pengenalan, tetapi juga mengaktifkan rangkaian animasi yang menjelaskan proses penyerapan dan pemantulan cahaya pada daun.

Penggunaan model tiga dimensi bergaya *low-poly* merupakan keputusan teknis yang mendukung kestabilan aplikasi pada perangkat bergerak. Objek daun, matahari, awan, pohon, dan kloroplas tetap dapat dikenali tanpa menggunakan jumlah poligon dan tekstur yang terlalu besar. Pilihan tersebut membantu meringankan proses pemuatan serta perenderan objek saat kamera aktif. Proses pemodelan, pemberian material, animasi, ekspor FBX, dan integrasi ke Unity juga mengikuti tahapan produksi aset tiga dimensi yang menempatkan pemodelan, tekstur, animasi, dan ekspor sebagai rangkaian kerja yang saling berkaitan (Saragih, 2024). Kendala perbedaan skala dan arah sumbu ketika aset dipindahkan dari Blender ke Unity memperlihatkan bahwa kompatibilitas antaraplikasi perlu diperhatikan sejak tahap produksi. Penerapan *Apply Transformation* dan penyesuaian nilai transformasi pada Unity menjadi langkah teknis yang dapat digunakan untuk menjaga proporsi serta orientasi objek terhadap permukaan marker.

Penerapan prinsip *timing*, *slow in and slow out*, *arcs*, dan *appeal* membuat animasi tidak hanya berfungsi sebagai dekorasi, tetapi juga mengatur urutan informasi. Kemunculan kloroplas secara bertahap memberi waktu kepada pengguna untuk mengikuti perubahan visual, sedangkan fungsi Color.Lerp() menghasilkan transisi warna daun yang lebih halus. Jalur gerak berbasis kurva juga membuat pergerakan cahaya menuju daun terlihat lebih terarah. Meskipun demikian, animasi perlu dijaga agar tidak terlalu panjang atau menampilkan terlalu banyak elemen secara bersamaan. Visual yang berlebihan berpotensi mengalihkan perhatian siswa dari informasi utama. Hasil kajian mengenai AR dalam pendidikan menunjukkan bahwa manfaat teknologi tidak hanya ditentukan oleh daya tarik tampilan, tetapi juga oleh kesesuaian desain visual, tujuan pembelajaran, dan pola interaksi yang diberikan kepada pengguna (Paliokas & Theodorou, 2024)(Zhang et al., 2022).

Materi yang divisualisasikan telah menghubungkan cahaya matahari, kloroplas, klorofil, dan warna hijau daun ke dalam satu alur. Hubungan tersebut sesuai dengan penjelasan bahwa klorofil merupakan pigmen utama yang menangkap energi cahaya pada proses fotosintesis dan menyerap cahaya secara kuat pada rentang merah serta biru, sedangkan sebagian cahaya hijau lebih banyak dipantulkan atau diteruskan (Kume, 2017). Variasi kandungan klorofil juga dapat menghasilkan perbedaan warna pada daun, sebagaimana ditunjukkan oleh (Zhu et al., 2024). Ketepatan istilah tetap perlu dijaga pada penyempurnaan naskah. Kalimat yang menyatakan bahwa klorofil "menyerap warna lainnya" sebaiknya diperjelas menjadi "menyerap cahaya terutama pada spektrum merah dan biru, sedangkan cahaya hijau lebih banyak dipantulkan atau diteruskan". Perbaikan tersebut diperlukan agar penyederhanaan bahasa untuk siswa sekolah dasar tidak mengubah konsep ilmiah yang disampaikan.

Pengujian internal menghasilkan status berhasil pada seluruh fitur yang diperiksa. Kamera dapat terbuka, marker dapat dideteksi, animasi tiga dimensi dapat dijalankan, dan aplikasi dapat ditutup melalui tombol yang tersedia. Uji terbatas kepada rekan sejawat dan dosen pembimbing juga tidak menemukan *error*, kegagalan respons, atau masalah interaksi. Temuan ini menunjukkan bahwa produk telah mencapai tahap prototipe fungsional dan dapat digunakan untuk pengujian lanjutan kepada kelompok sasaran. Hasil tersebut belum dapat disamakan dengan penelitian Novianti dan Tirtoni (2024), yang melibatkan 24 siswa kelas V dan menemukan peningkatan rata-rata nilai dari 59,58 pada *pretest* menjadi 81,25 pada *posttest*. Perbedaan desain penelitian menyebabkan penelitian ini hanya dapat menyimpulkan

keberhasilan fungsi media, sedangkan pengaruh terhadap hasil belajar belum dapat ditetapkan.

Implikasi praktis penelitian ini terletak pada tersedianya rancangan media yang dapat membantu guru atau orang tua menjelaskan materi sains yang tidak mudah diamati secara langsung. Buku tetap dapat dibaca tanpa aplikasi, sedangkan fitur AR memberikan lapisan visual tambahan ketika siswa membutuhkan ilustrasi proses yang lebih dinamis. Pola tersebut memungkinkan teknologi digunakan sebagai pendamping pembelajaran, bukan sebagai pengganti interaksi antara anak, guru, dan orang tua. Media juga dapat dimanfaatkan dalam kegiatan mengamati, bertanya, memprediksi, dan mendiskusikan alasan daun tampak hijau. Kontribusi konseptual penelitian ini berada pada penyatuan narasi ramah anak, ilustrasi cetak, marker halaman, dan animasi ilmiah ke dalam satu alur pembelajaran. Model serupa dapat dikembangkan untuk materi IPA lain yang melibatkan struktur mikroskopis atau proses yang berlangsung secara bertahap.

Implikasi teknisnya menunjukkan bahwa penggunaan perangkat lunak yang berbeda dapat membentuk alur kerja produksi multimedia yang relatif terstruktur. Ibis Paint digunakan untuk menghasilkan ilustrasi dua dimensi, Blender untuk memproduksi model dan animasi tiga dimensi, Vuforia untuk mengelola *image target*, dan Unity untuk mengintegrasikan keseluruhan komponen menjadi aplikasi Android. Alur ini dapat direplikasi pada pengembangan AR Book lain selama pengembang menjaga konsistensi format aset, skala, arah sumbu, resolusi marker, dan struktur proyek. Penggunaan model *low-poly* juga dapat dipertimbangkan ketika produk ditujukan untuk perangkat dengan kemampuan pemrosesan yang beragam. Kualitas media tidak hanya ditentukan oleh tingkat kerumitan model, tetapi oleh kemampuan objek dalam menyampaikan informasi secara jelas dan tetap berjalan stabil pada perangkat pengguna.

Keterbatasan penelitian terletak pada ruang lingkup pengujian yang masih terbatas. Uji beta belum melibatkan siswa usia 10–11 tahun sebagai pengguna utama, sedangkan jumlah dan karakteristik rekan sejawat yang mengikuti *blind test* belum dilaporkan secara terperinci. Pengujian juga belum menggunakan instrumen kuantitatif untuk mengukur kemudahan penggunaan, keterbacaan, daya tarik, pemahaman konsep, minat belajar, atau peningkatan hasil belajar. Variasi perangkat Android, kondisi pencahayaan, jarak kamera, sudut pemindaian, kualitas cetak marker, dan durasi penggunaan belum diuji secara

sistematis. Kondisi tersebut menyebabkan hasil penelitian belum dapat digeneralisasikan sebagai bukti efektivitas AR Book pada pembelajaran IPA.

Penelitian selanjutnya perlu melibatkan siswa kelas V, guru sekolah dasar, ahli materi IPA, dan ahli media dalam proses validasi. Pengujian dapat dilakukan melalui desain *pretest–posttest*, observasi perilaku pengguna, kuesioner pengalaman pengguna, serta wawancara singkat setelah penggunaan media. Perbandingan antara pembelajaran menggunakan buku biasa dan *Augmented Reality Book* juga diperlukan untuk mengetahui kontribusi khusus fitur AR terhadap pemahaman materi. Pengujian pada berbagai perangkat dan kondisi lingkungan akan memperkuat data teknis, sedangkan perbaikan narasi serta visualisasi ilmiah akan menjaga keseimbangan antara bahasa yang mudah dipahami anak dan ketepatan konsep sains. Dengan pengujian tersebut, pengembangan produk dapat bergerak dari prototipe yang berhasil secara fungsional menuju media pembelajaran yang teruji secara pedagogis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, pengembangan *Augmented Reality Book* edukasi "Klorofil sebagai Penyebab Warna pada Daun" berhasil menghasilkan media pembelajaran yang memadukan buku ilustrasi, animasi tiga dimensi, dan sistem *marker-based tracking* pada perangkat Android. Penerapan metode *Multimedia Development Life Cycle* mendukung proses pengembangan secara terstruktur, mulai dari penentuan konsep, perancangan visual, pengumpulan aset, perakitan, hingga pengujian produk. Hasil pengujian fungsional menunjukkan bahwa kamera AR, deteksi marker, pemunculan objek tiga dimensi, animasi cahaya, dan tombol keluar dapat berjalan sesuai rancangan. Visualisasi yang dihasilkan mampu menyajikan hubungan antara klorofil, penyerapan cahaya merah dan biru, serta pemantulan cahaya hijau dalam bentuk yang lebih konkret. Meskipun demikian, hasil tersebut menunjukkan keberhasilan produk pada aspek teknis dan visual, sedangkan efektivitasnya terhadap peningkatan pemahaman, minat, dan hasil belajar siswa masih memerlukan pengujian lebih lanjut.

Penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa rancangan media pembelajaran IPA yang mengintegrasikan narasi buku bergambar dengan visualisasi ilmiah berbasis AR. Kontribusi metodologisnya terletak pada penerapan alur kerja yang menghubungkan ilustrasi dua dimensi, pemodelan aset *low-poly*, animasi, dan pengembangan aplikasi dalam satu produk edukatif. Rancangan tersebut dapat menjadi acuan bagi pengembangan media serupa untuk

materi sains lain yang bersifat abstrak dan sulit diamati secara langsung. Penelitian selanjutnya disarankan melibatkan siswa kelas V sekolah dasar, guru, ahli materi, dan ahli media dalam proses validasi, menggunakan instrumen pengukuran yang teruji, serta menerapkan desain *pretest–posttest* untuk menilai perubahan pemahaman dan hasil belajar. Pengujian pada berbagai jenis perangkat, kondisi pencahayaan, jarak pemindaian, dan kualitas marker juga perlu dilakukan agar kestabilan serta kemudahan penggunaan media dapat dinilai secara lebih menyeluruh.

DAFTAR PUSTAKA

Aditia, R. (2024). Peran dan Tantangan Teknologi Augmented Reality dalam Meningkatkan Pengalaman Pengguna Media. *Amerta Jurnal Ilmu Sosial dan Humaniora, 4*(1), 35–43. https://ejournal.amertamedia.co.id/index.php/amerta/article/view/197

Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review, 20*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002

Ariatama, S., Adha, M. M., Rohman, Hartino, A. T., & Ulpa, E. P. (2021). Penggunaan Teknologi Virtual Reality sebagai Upaya Eskalasi Minat dan Optimalisasi dalam Proses Pembelajaran Secara Online di Masa Pandemik. *Seminar Nasional Pendidikan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, 2*, 1–12. http://repository.lppm.unila.ac.id/id/eprint/32006

Arifitama, B., Syahputra, A., & Bintoro, K. B. Y. (2022). Analisis Perbandingan Efektifitas Metode Marker dan Markerless Tracking pada Objek Augmented Reality. *Jurnal Integrasi, 14*(1), 1–7. https://doi.org/10.30871/ji.v14i1.3985

Chang, H.-Y., Binali, T., Liang, J.-C., Chiou, G.-L., Cheng, K.-H., Lee, S. W.-Y., & Tsai, C.-C. (2022). Ten years of augmented reality in education: A meta-analysis of (quasi-)experimental studies to investigate the impact. *Computers & Education, 191*, Article 104641. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104641

Dharmadewi, A. A. I. M. (2020). Analisis Kandungan Klorofil pada Beberapa Jenis Sayuran Hijau sebagai Alternatif Bahan Dasar Food Suplement. *Emasains: Jurnal Edukasi Matematika dan Sains, 9*(2), 171–176. https://doi.org/10.5281/zenodo.4299383

Egesa, A. O., Puengchanchaikul, V., Vallejos, C. E., & Begcy, K. (2024). Contrasting dynamic photoprotective mechanisms under fluctuating light environments between an Andean and a Mesoamerican genotype of *Phaseolus vulgaris* L. *Agronomy, 14*(9), Article 1907. https://doi.org/10.3390/agronomy14091907

Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual Reality, 23*, 447–459. https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9

Kume, A. (2017). Importance of the green color, absorption gradient, and spectral absorption of chloroplasts for the radiative energy balance of leaves. *Journal of Plant Research, 130*(3), 501–514. https://doi.org/10.1007/s10265-017-0910-z

Kurniasari, A. A., Puspitasari, T. D., & Mutiara, A. D. S. (2023). Application of the multimedia development life cycle (MDLC) method on a magical augmented reality book based on Android. *Antivirus: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika, 17*(1), 19–31. https://doi.org/10.35457/antivirus.v17i1.2801

Mayer, R. E. (2020). *Multimedia learning* (3rd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316941355

Nazilah, S., & Ramdhan, F. S. (2021). Augmented Reality sebagai Media Pembelajaran untuk Pengenalan Landmark Negara-Negara ASEAN Berbasis Android dengan Menggunakan Metode Marker Based Tracking. *IKRA-ITH Informatika: Jurnal Komputer dan Informatika, 5*(2), 108–117. https://journals.upi-yai.ac.id/index.php/ikraith-informatika/article/view/1003

Nguyen, T. N. P., & Sung, J.-K. (2025). Light spectral-ranged specific metabolisms of plant pigments. *Metabolites, 15*(1), Article 1. https://doi.org/10.3390/metabo15010001

Novianti, E., & Tirtoni, F. (2024). Pengaruh Media Buku Interaktif Digital terhadap Hasil Belajar Materi Keberagaman Budaya Indonesia Siswa Kelas V. *Jurnal Papeda: Jurnal Publikasi Pendidikan Dasar, 6*(2), 211–220. https://e-journal.unimudasorong.ac.id/index.php/jurnalpendidikandasar/article/view/1840

Paliokas, I., & Theodorou, P. (2024). Virtual/augmented reality applications in education & life long learning. *Electronics, 13*(3), Article 618. https://doi.org/10.3390/electronics13030618

Ripsam, M., & Nerdel, C. (2024). Augmented reality for chemistry education to promote the use of chemical terminology in teacher training. *Frontiers in Psychology, 15*, Article 1392529. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1392529

Saragih, C. W. (2024). Pembuatan 3D Realistic Car Animation. *Skena Teknologi, 1*(1), 43–48. https://ejournal.ibbi.ac.id/index.php/ST/article/view/5

Solehatin, S., Aslamiyah, S., Pertiwi, D. A. A., & Santosa, K. (2023). Augmented reality development using multimedia development life cycle (MDLC) method in learning media. *Journal of Soft Computing Exploration, 4*(1), 30–38. https://doi.org/10.52465/joscex.v4i1.118

Volioti, C., Keramopoulos, E., Sapounidis, T., Melisidis, K., Zafeiropoulou, M., Sotiriou, C., & Spiridis, V. (2022). Using augmented reality in K–12 education: An indicative platform for teaching physics. *Information, 13*(7), Article 336. https://doi.org/10.3390/info13070336

Wiradarma, K. S., Suarni, N. K., & Renda, N. T. (2021). Analisis Hubungan Minat Belajar terhadap Hasil Belajar Daring IPA Siswa Kelas III Sekolah Dasar. *MIMBAR PGSD Undiksha, 9*(3), 408–415. https://doi.org/10.23887/jjpgsd.v9i3.39212

Zhang, J., Li, G., Huang, Q., Feng, Q., & Luo, H. (2022). Augmented reality in K–12 education: A systematic review and meta-analysis of the literature from 2000 to 2020. *Sustainability, 14*(15), Article 9725. https://doi.org/10.3390/su14159725

Zhu, P.-K., Zeng, M.-Y., Lin, Y.-H., Tang, Y., He, T.-Y., Zheng, Y.-S., & Chen, L.-Y. (2024). Variability in leaf color induced by chlorophyll deficiency: Transcriptional changes in bamboo leaves. *Current Issues in Molecular Biology, 46*(2), 1503–1515. https://doi.org/10.3390/cimb46020097