

EFEKTIVITAS PENGGUNAAN 3D PRINTING BERBASIS AUGMENTED REALITY DALAM PEMBELAJARAN BIOLOGI: KAJIAN LITERATUR SISTEMATIS**Effectiveness of Using Augmented Reality-Based 3d Printing in Biology Learning:
A Systematic Literature Review****Kinanthy Anggraini**

SMA SAINS Peradaban Al Amin

Email: kinanthy.anggraini17@gmail.com**Lasinta Ari Nendra Wibawa**

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Email: lasinta.ari.nendra.wibawa@brin.go.id**Abstrak**

Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis yang menelaah efektivitas penggunaan 3D printing berbasis *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran Biologi. Sebanyak 13 jurnal ilmiah yang diterbitkan antara 2017 hingga 2025 dianalisis untuk mengevaluasi tiga aspek utama: efektivitas pembelajaran, hasil produk 3D, dan peningkatan hasil belajar atau motivasi peserta didik. Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan media 3D printing berbasis AR secara konsisten meningkatkan pemahaman konsep, keterampilan teknis, dan motivasi belajar siswa, dengan efektivitas berkisar antara 49% hingga 90%. Produk pembelajaran yang dikembangkan meliputi model sel, molekul DNA/RNA, organ tubuh, model bunga, serta alat taktile untuk siswa berkebutuhan khusus, menggunakan perangkat lunak seperti Blender, Tinkercad, dan Ultimaker Cura, serta bahan filament PLA atau daur ulang. Peningkatan hasil belajar meliputi aspek kognitif, afektif, dan psikomotor, dengan skor peningkatan rata-rata antara 20% hingga 83% pada berbagai studi. Kajian ini menegaskan bahwa integrasi 3D printing dan AR dapat memperkaya pengalaman belajar, mendorong pembelajaran inklusif, dan meningkatkan literasi teknologi di bidang Biologi. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan desain eksperimental acak, standarisasi metrik efektivitas, serta evaluasi jangka panjang untuk menilai retensi pengetahuan dan dampak motivasional secara lebih komprehensif.

Kata Kunci: 3D printing, *augmented reality*, pembelajaran Biologi, media pembelajaran, efektivitas pembelajaran

Abstract

This study is a systematic literature review examining the effectiveness of 3D printing integrated with Augmented Reality (AR) in Biology education. Thirteen peer-reviewed articles published between 2017 and 2025 were analyzed to evaluate three main aspects: learning effectiveness, 3D product development, and improvement in student learning outcomes or motivation. The findings indicate that 3D printing combined with AR consistently enhances conceptual understanding, technical skills, and student motivation, with reported effectiveness ranging from 49% to 90%. The learning products developed include cell models, DNA/RNA molecules, anatomical organs, flower models, and tactile tools for students with special needs, using software such as Blender, Tinkercad, and Ultimaker Cura, as well as PLA or recycled filaments. Improvements in learning outcomes were observed across cognitive, affective, and psychomotor domains, with average gains ranging from 20% to 83% across studies. This review confirms that integrating 3D printing with AR enriches learning experiences, promotes inclusive education, and enhances technological literacy in Biology. Future research is recommended to employ randomized experimental designs, standardize effectiveness metrics, and conduct long-term evaluations to assess knowledge retention and motivational impact more comprehensively.

Keywords: 3D printing, augmented reality, Biology education, learning media, learning effectiveness

PENDAHULUAN

Pembelajaran Biologi kerap menghadapi tantangan dalam penyampaian konsep-konsep abstrak, seperti struktur sel, jaringan, organ, dan molekul biologis, yang secara alami sulit divisualisasikan melalui media pembelajaran konvensional. Representasi dua dimensi sering kali belum mampu menggambarkan kompleksitas bentuk maupun hubungan spasial antarkomponen biologis. Seiring perkembangan teknologi, 3D printing hadir sebagai inovasi media pembelajaran yang memungkinkan pembuatan model tiga dimensi dari objek biologis secara lebih akurat dan nyata. Integrasi teknologi Augmented Reality (AR) lebih lanjut memperkaya proses pembelajaran melalui penyajian interaksi simultan antara model fisik dan elemen digital, yang berpotensi meningkatkan pemahaman konseptual dan partisipasi siswa.

Sejumlah penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pemanfaatan 3D printing dalam pendidikan Biologi memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kualitas pembelajaran. Berbagai studi melaporkan bahwa media ini tidak hanya mendukung pemahaman konseptual dan kemampuan visualisasi, tetapi juga memperkuat keterlibatan serta respons positif peserta didik terhadap materi pembelajaran (Anshori et al., 2023; Anshori & Sohriati, 2024). Penggunaan model sel, organ, dan struktur mikroskopis berbasis 3D printing juga terbukti membantu siswa dan mahasiswa memahami representasi biologis yang kompleks (Syam et al., 2023; Andić et al., 2022; Monkovic et al., 2021).

Selain aspek kognitif, penerapan 3D printing berbasis AR dalam pembelajaran juga dikaitkan dengan peningkatan aspek afektif dan psikomotor. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan model biologis interaktif dapat memperkuat motivasi belajar, meningkatkan minat siswa terhadap materi, serta memfasilitasi keterlibatan dalam aktivitas pembelajaran berbasis eksplorasi. Pendekatan ini juga mendukung pembelajaran yang lebih inklusif dengan menyediakan media konkret bagi peserta didik yang membutuhkan representasi taktil dalam memahami struktur mikroskopis (Howell et al., 2019; Colorado et al., 2020; Gordy et al., 2020; Guenther et al., 2021; Leitão et al., 2023; Lampert et al., 2025).

Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa teknologi 3D printing, terutama ketika dikombinasikan dengan AR, memiliki potensi besar untuk mengoptimalkan pembelajaran Biologi melalui pengalaman belajar yang lebih interaktif, kontekstual, dan berbasis objek. Namun demikian, variasi dalam desain

penelitian, pendekatan evaluasi, serta indikator keberhasilan yang digunakan pada berbagai studi menegaskan perlunya kajian sistematis untuk mensintesis temuan yang ada secara komprehensif. Oleh karena itu, kajian literatur ini disusun untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai efektivitas media 3D printing berbasis AR dalam pembelajaran Biologi serta untuk mengidentifikasi kontribusi, tantangan, dan peluang pengembangan media tersebut dalam mendukung kompetensi abad ke-21.

METODE

Penelitian ini merupakan kajian literatur sistematis yang bertujuan menganalisis efektivitas penggunaan 3D printing berbasis *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran Biologi, termasuk tren penelitian, jenis media pembelajaran, serta dampaknya terhadap pemahaman konsep, keterampilan, dan motivasi belajar peserta didik. Data dikumpulkan dari artikel ilmiah yang diterbitkan antara 2017 hingga 2025 dengan kriteria inklusi: artikel yang membahas penerapan 3D printing dalam pembelajaran Biologi secara fisik maupun terintegrasi AR, menyajikan data kuantitatif terkait efektivitas atau pengembangan produk, diterbitkan di jurnal bereputasi dengan akses penuh, serta menggunakan desain eksperimen, kuasi-eksperimen, atau studi evaluatif. Artikel opini, review tanpa data empiris, laporan konferensi tanpa peer-review, serta penelitian yang tidak relevan dengan pembelajaran Biologi dikecualikan.

Pencarian literatur dilakukan melalui *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, dan *ScienceDirect* dengan kata kunci “3D printing,” “Augmented Reality,” “Biology education,” dan istilah terkait. Seleksi dilakukan melalui tiga tahap: screening judul dan abstrak, peninjauan teks lengkap, serta ekstraksi data dari artikel yang memenuhi kriteria, termasuk informasi penulis, tahun publikasi, efektivitas pembelajaran, jenis produk 3D, dan peningkatan hasil belajar.

Analisis dilakukan secara deskriptif kuantitatif dan naratif. Data kuantitatif seperti persentase efektivitas dan peningkatan hasil belajar disajikan dalam tabel untuk memudahkan perbandingan, sedangkan analisis naratif membahas inovasi produk, metode pembelajaran, serta dampak 3D printing berbasis AR terhadap aspek kognitif, afektif, dan psikomotor. Validitas dan keandalan dijamin melalui pemeriksaan peer-review, konsistensi laporan kuantitatif, serta ekstraksi data independen yang dibandingkan untuk mengurangi bias subjektif.

Alur penelitian meliputi identifikasi dan pencarian artikel, seleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, ekstraksi data kuantitatif dan deskriptif, analisis naratif

dan kuantitatif, hingga penyusunan hasil dan pembahasan. Metode ini memungkinkan sintesis temuan dari berbagai studi untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas 3D printing berbasis AR dalam pembelajaran Biologi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kajian sistematis terhadap 13 jurnal yang meneliti penerapan 3D printing berbasis *Augmented Reality* (AR) dalam pembelajaran Biologi menunjukkan bahwa penggunaan teknologi ini secara konsisten memberikan dampak positif terhadap efektivitas pembelajaran, pengembangan produk, dan peningkatan hasil belajar

peserta didik. Hasil temuan dari tiap studi disajikan dalam Tabel 1 sebagai data pendukung.

Tabel 1 yang merangkum efektivitas pembelajaran, jenis produk 3D yang dikembangkan, serta peningkatan yang dicapai dalam setiap studi. Secara umum, efektivitas penggunaan media 3D printing berada pada rentang 2% hingga 90%, dengan sebagian besar studi melaporkan efektivitas di atas 77%, yang menunjukkan kemampuan media ini untuk meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan peserta didik.

Hasil produk yang dihasilkan bervariasi, mulai dari model sel, molekul DNA/RNA, organ tubuh, model bunga, hingga alat pembelajaran taktil untuk siswa berkebutuhan khusus.

Tabel 1. Perbandingan Efektivitas Media 3D Printing Berbasis AR di Pembelajaran Biologi

No	Penulis & Tahun	Efektivitas	Hasil Produk	Peningkatan (Gain)
1	Anshori & Sohriati (2024)	89,7% (sangat efektif)	Media pembelajaran biologi berbasis 3D printing dari botol plastik bekas (model ADDIE)	28,14% (minat dan kepedulian lingkungan)
2	Syam Sukmawati et al. (2023)	84,33% (efektif & layak)	Media pembelajaran sel berbasis 3D printing (filamen PLA) dibanding validasi ahli materi dan media	20,47% (ketertarikan dan pemahaman visual)
3	Andić et al. (2022)	77,6% (efektif)	3D modelling dan 3D printing (3DMP) struktur sel; pembelajaran kolaboratif inklusif	38,5% (peningkatan relatif)
4	Anshori et al. (2023)	90% (sangat efektif guru)	Media berbasis 3D printing, software Blender, Cults3D, Ultimaker Cura	75% (peningkatan relatif keterampilan guru)
5	Monkovic et al. (2021)	90% (sangat efektif)	Model 3D untuk homeostasis dan imunitas digunakan di kegiatan eksperimen kelas	Skor rata-rata naik 3,5 → 6,0 (71,4%) pada kelompok eksperimen
6	Howell et al. (2019)	49% (lebih efektif vs kontrol 9%)	Modul 3D interaktif untuk struktur DNA/RNA, pengikatan TF, supercoiling	40% lebih tinggi dibanding kontrol
7	Colorado et al. (2020)	85% (peningkatan pemahaman & keterlibatan)	Model 3D hewan dan kartu informasi teknis	85,3% (tingkat penerimaan dan efektivitas persepnsional)
8	Guenther et al. (2021)	89% (sangat efektif, berdasarkan penilaian mahasiswa)	Proyek pembelajaran berbasis model 3D printing untuk konsep Biologi	87% (minat dan antusiasme mahasiswa)
9	Leitão et al. (2023)	Median gain score 40% lebih tinggi vs kontrol	Model molekul 3D untuk biologi sintetis	40% (median gain)
10	Yap et al. (2017)	Efektivitas untuk simulasi medis < 2%	Model anatomi retina, mata, tulang tibia yang realistik	Peningkatan akurasi < 2%
11	Bonorden & Papenbrock (2022)	Peningkatan pemahaman 1,83 → 2,71 (48%)	Keterampilan modelling 3D (Blender/Tinkercad) dan transfer antar objek visual	keterampilan teknis dan motivasi meningkat 38% kesulitan turun 1,8 → 0,43
12	Gordy et al. (2020)	TTT GIL berbasis 3D printing sangat efektif (skor meningkat signifikan)	Alat pembelajaran taktil 3D untuk genetika	Naik hingga 50% dari skor NCSU: 75% → 100% dan UNCP: 25% → 75%
13	Lampert et al. (2025)	83% (sangat efektif)	Model bunga 3D untuk struktur bunga & penyerbukan	83% siswa merasa pembelajaran lebih mudah dan menarik

Produk-produk ini dikembangkan menggunakan perangkat lunak (*software*) seperti *Blender*, *Tinkercad*, dan *Ultimaker Cura*, serta bahan filament PLA. Beberapa studi juga memanfaatkan bahan daur ulang seperti botol plastik, menekankan aspek keberlanjutan dan pembelajaran lingkungan.

Peningkatan hasil belajar yang dilaporkan mencakup dimensi kognitif, afektif, dan psikomotor. Aspek kognitif

menunjukkan peningkatan pemahaman konsep hingga memperdalam kemampuan peserta didik dalam menghubungkan teori dengan fenomena biologis yang nyata. Aspek afektif tampak dari meningkatnya motivasi, rasa ingin tahu, serta keterlibatan emosional siswa selama proses pembelajaran berlangsung. Sementara itu, aspek psikomotor tercermin dari kemampuan siswa dalam memanipulasi, merancang, dan mencetak model 3D

secara mandiri menggunakan perangkat lunak desain. Peningkatan pada ketiga dimensi ini menunjukkan bahwa penggunaan 3D printing berbasis AR tidak hanya meningkatkan pemahaman konseptual tetapi juga mendorong partisipasi aktif, kreativitas, dan kolaborasi antar siswa.

Analisis naratif menunjukkan bahwa media 3D printing berbasis AR memungkinkan visualisasi konsep abstrak secara nyata, interaktif, dan kontekstual. Pendekatan ini sesuai dengan prinsip pembelajaran konstruktivis yang menekankan pengalaman langsung, eksplorasi, dan pembelajaran berbasis proyek.

Dengan demikian, pembelajaran berbasis 3D printing dan AR dapat menjadi jembatan antara pembelajaran teoritis dan praktik nyata di laboratorium, sekaligus mengembangkan kemampuan berpikir tingkat tinggi (HOTS) yang esensial dalam pendidikan biologi modern.

Beberapa penelitian menekankan potensi inklusivitas, seperti penggunaan alat taktile bagi siswa tunanetra dalam penelitian Gordy et al. (2020) bahwa hasil media dari 3D printing ini ternyata dapat diakses oleh peserta didik dengan beragam kebutuhan. Meski demikian, ada beberapa keterbatasan yang tetap perlu diperhatikan.

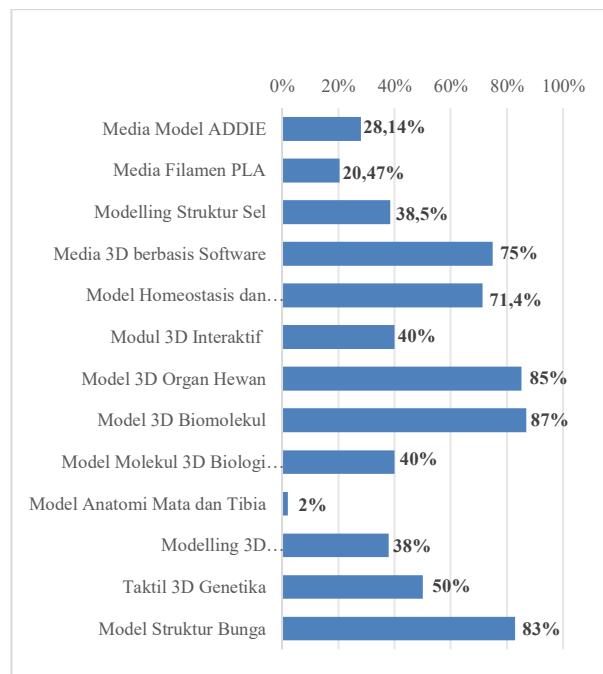
Pertama, heterogenitas metrik efektivitas dan laporan kuantitatif membuat perbandingan antar studi menjadi sulit. Kedua, beberapa studi tidak menggunakan desain eksperimen acak atau kelompok kontrol, sehingga validitas internal hasilnya terbatas. Ketiga, rincian teknis pembuatan model 3D seperti parameter printer, waktu pencetakan, dan biaya operasional sering tidak dilaporkan, yang dapat menghambat reproduksibilitas penelitian.

Secara keseluruhan, hasil kajian ini menegaskan bahwa 3D printing berbasis AR merupakan media pembelajaran yang efektif dan inovatif untuk pembelajaran Biologi. Media ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep dan keterampilan teknis, tetapi juga memotivasi siswa, mendukung inklusivitas, serta mendorong kesadaran lingkungan melalui penggunaan bahan daur ulang. Oleh karena itu, integrasi 3D printing berbasis AR dalam kurikulum Biologi di sekolah dan perguruan tinggi memiliki potensi signifikan untuk memperkaya pengalaman belajar dan memfasilitasi pembelajaran abad ke-21 yang lebih interaktif dan bermakna.

Selain itu, pendekatan ini membuka peluang bagi pendidik untuk menggabungkan kreativitas digital dan praktik laboratorium nyata dalam satu kesatuan proses belajar yang kontekstual. Penerapannya juga berpotensi

memperkuat literasi sains, kolaborasi, serta kemampuan berpikir spasial peserta didik, yang menjadi kompetensi penting dalam era transformasi teknologi pendidikan.

Berikut adalah gambar bagan hasil dari referensi 13 jurnal tahun 2017-2025 yang menyajikan peningkatan secara signifikan berdasarkan output dari 3D printing beserta hasil peningkatan efektivitasnya :



Gambar 1. Perbandingan (Gain) Efektifitas Hasil Penggunaan 3D Printing berdasarkan Jenis Produk

Bagan di atas memperlihatkan perbandingan nilai peningkatan (Gain) efektifitas hasil belajar yang diperoleh dari 13 jurnal referensi terkait penggunaan 3D printing pada pembelajaran Biologi. Nilai gain menunjukkan selisih antara hasil kelompok kontrol dan kelompok eksperimen yang menggunakan media 3D printing, sehingga dapat menggambarkan sejauh mana pengaruh penggunaan media tersebut terhadap capaian belajar peserta didik setelah perlakuan. Dengan demikian, nilai gain menjadi indikator penting untuk menilai efektivitas penerapan 3D printing dalam meningkatkan kualitas pembelajaran biologi.

Pada posisi pertama, media pembelajaran biologi berbasis 3D printing dari botol plastik bekas (model ADDIE) yang dikembangkan oleh Anshori & Sohriati (2024) menunjukkan peningkatan sebesar 28,14%. Peningkatan ini terutama terlihat pada aspek afektif, seperti meningkatnya minat dan kepedulian siswa terhadap lingkungan melalui penggunaan bahan daur ulang dalam proses pembuatan media.

Selanjutnya, penelitian Syam et al. (2023) yang mengembangkan media sel berbasis filamen PLA memperlihatkan peningkatan 20,47% terhadap ketertarikan dan pemahaman visual siswa. Meskipun relatif rendah, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan filamen 3D printing tetap memberikan kontribusi positif terhadap keterlibatan belajar.

Peningkatan lebih besar ditemukan pada penelitian Andić et al. (2022) dengan model 3D struktur sel, yang menghasilkan peningkatan 38,5%. Media ini memungkinkan visualisasi spasial yang lebih jelas dan pembelajaran kolaboratif, sehingga mendukung pemahaman konseptual siswa secara lebih mendalam.

Sementara itu, dalam penelitian F. A. L. Anshori et al. (2023) menggunakan software *Blender*, *Cults3D*, dan *Ultimaker Cura* dalam pengembangan media mencatat peningkatan keterampilan guru sebesar 75%, menunjukkan bahwa integrasi teknologi 3D printing juga berpengaruh positif terhadap kompetensi profesional tenaga pendidik, bukan hanya terhadap hasil belajar siswa.

Seiring dengan hal tersebut terdapat peningkatan pada aspek kognitif, dalam penelitian Monkovic et al. (2021) melaporkan peningkatan 71,4% melalui penggunaan model 3D untuk homeostasis dan imunitas, dari skor rata-rata 3,5 menjadi 6,0 pada kelompok eksperimen. Media ini terbukti mampu mempermudah pemahaman konsep fisiologis yang bersifat abstrak.

Sedangkan pada penelitian Howell et al. (2019) yang mengembangkan modul 3D interaktif DNA/RNA juga mencatat peningkatan 40% lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol, memperlihatkan efektivitas visualisasi molekul dalam menjembatani konsep bentuk dan fungsi biomolekul. Penelitian lain yang menunjukkan hasil signifikan dalam efektifitas hasil dari 3D printing adalah dalam Colorado et al. (2020) yang mengembangkan model 3D hewan dan kartu informasi teknis. Penelitian ini menunjukkan peningkatan sebesar 85,3%, yang menandakan bahwa pendekatan berbasis objek nyata dan informasi kontekstual mampu meningkatkan pemahaman serta keterlibatan belajar pada siswa.

Hasil serupa juga ditemukan pada penelitian Guenther et al. (2021) yang melibatkan proyek pembelajaran berbasis model 3D printing, dengan peningkatan 87% pada minat dan antusiasme mahasiswa. Hal ini menegaskan bahwa efektivitas pendekatan berbasis proyek dalam penggunaan 3D printing dapat meningkatkan motivasi belajar dan kerja secara kolaboratif.

Selain hal tersebut, dalam penelitian Leitão et al. (2023) melalui pengembangan model molekul 3D untuk biologi sintetis melaporkan bahwa hasil tersebut

mendapatkan median gain score sebesar 40% lebih tinggi dibandingkan kontrol. Hal ini menandakan bahwa visualisasi spasial oleh model 3D dapat memperkuat pemahaman struktur biomolekul yang kompleks. Sebaliknya, dalam penelitian Yap et al. (2017) justru menunjukkan peningkatan yang sangat kecil, yaitu kurang dari 2%, hal ini dikarenakan model 3D yang dikembangkan berfokus pada simulasi medis, bukan pada pembelajaran biologi konseptual di dalam kelas.

Penelitian Bonorden & Papenbrock (2022) yang juga mengembangkan keterampilan modelling 3D dengan konsep Blender/Tinkercad menunjukkan peningkatan pemahaman sebesar 48%, disertai dengan peningkatan motivasi dan kemampuan teknis siswa dalam memanipulasi model digital. Selain itu, pada penelitian Gordy et al. (2020) dengan pengembangan alat pembelajaran taktil 3D untuk genetika (TTT GIL) menunjukkan peningkatan skor hingga 50%, hal ini menegaskan bahwa media 3D printing ternyata dapat mendukung pembelajaran inklusif, terutama bagi siswa dengan kebutuhan khusus seperti pada siswa tunanetra.

Peningkatan tertinggi dalam kajian ini dicapai oleh penelitian Lampert et al. (2025) yang mengembangkan model bunga 3D dengan peningkatan efektifitas sebesar 83%. Media ini terukur dengan sangat efektif dalam membantu siswa memahami struktur anatomi bunga dan proses penyerbukan secara konkret dan interaktif.

Secara keseluruhan, pola yang tampak pada bagan menunjukkan bahwa semakin kontekstual, visual, dan interaktif model 3D yang digunakan, semakin besar pula peningkatan hasil belajar yang diperoleh. Model yang menggabungkan pengalaman nyata, interaksi taktil, atau proyek kolaboratif seperti pada penelitian Guenther et al. (2021) dan Lampert et al. (2025) cenderung berhasil menghasilkan peningkatan tertinggi. Sebaliknya, media yang bersifat simulatif atau belum terintegrasi dengan aktivitas belajar langsung, seperti pada studi Yap et al. (2017) menunjukkan peningkatan yang kurang maksimal.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis komparatif terhadap 13 publikasi ilmiah tentang pemanfaatan 3D printing dalam pendidikan pada periode 2017–2025, ditemukan bahwa integrasi 3D printing berbasis Augmented Reality (AR) dalam pembelajaran Biologi memberikan peningkatan hasil belajar yang signifikan di berbagai jenjang pendidikan. Peningkatan tersebut tidak hanya muncul pada ranah kognitif melalui skor pemahaman konsep, tetapi juga pada ranah afektif dan psikomotor yang tercermin dari motivasi belajar, partisipasi aktif, serta keterampilan teknis peserta didik. Konsistensi temuan

lintas studi menunjukkan bahwa media berbasis 3D printing mampu mentransformasi pengalaman belajar melalui visualisasi konkret dan manipulasi objek secara interaktif, sehingga memfasilitasi proses konstruksi pengetahuan yang lebih mendalam.

Efektivitas tinggi yang dicapai tidak semata-mata disebabkan oleh kecanggihan teknologi, melainkan oleh keberhasilan integrasi antara 3D printing, AR, dan strategi pedagogis berbasis konstruktivisme. Hal ini menegaskan bahwa keberhasilan inovasi pendidikan tidak bertumpu pada perangkat semata, tetapi pada desain pembelajaran yang memungkinkan peserta didik mengeksplorasi, berkolaborasi, dan merefleksikan proses belajar mereka. Dalam konteks tersebut, 3D printing berfungsi sebagai katalis pedagogis yang memperkuat keterlibatan kognitif dan menciptakan pengalaman belajar yang sulit dicapai melalui metode konvensional.

Secara keseluruhan, integrasi 3D printing berbasis AR memiliki potensi besar dalam menumbuhkan kemampuan berpikir tingkat tinggi (HOTS), kolaborasi, dan literasi digital, sekaligus menanamkan kesadaran ekologis melalui penggunaan material yang lebih berkelanjutan. Implikasi temuan ini menunjukkan bahwa lembaga pendidikan perlu mengembangkan kurikulum adaptif yang menggabungkan dimensi teknologi, pedagogi, dan keberlanjutan dalam satu kerangka pembelajaran terpadu.

Dengan pendekatan yang terencana dan berbasis data empiris, 3D printing tidak hanya menjadi media inovatif, tetapi juga instrumen strategis yang mampu membentuk ekosistem pembelajaran sains yang lebih kritis, kreatif, inovatif, dan berorientasi masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andić, B., Lavicza, Z., Ulbrich, E., Cvjetićanin, S., Petrović, F., & Ulbrich, E. (2022). Contribution of 3d Modelling and Printing To Learning in Primary Schools : A Case Study With Visually Impaired Students From An Inclusive Biology Classroom. *Journal of Biological Education*, 1-17. <https://doi.org/10.1080/00219266.2022.2118352>
- Anshori, F. Al, & Sohriati, E. (2024). Pengembangan Media Pembelajaran Biologi SMA Berbasis 3D Printing Berbahan Filamen Botol Plastik Bekas untuk Meningkatkan Sikap Peduli Lingkungan. *Jurnal Kependidikan*, 13(4), 4515–4524.
- Anshori, F. Al, Wahyu, H., & Kurniadi, W. (2023). Adaptasi Teknologi 3D Printer sebagai Media Pembelajaran Modern Bagi Guru Biologi di Kota Palopo. *Jurnal Abdi Insani*, 10, 1862–1871.
- Bonorden, M., & Papenbrock, J. (2022). Evidence-Based Optimization of Classroom Teaching Units Using 3D Printers for Designing Models — From the 2D Picture to the 3D Flower Model. *Education Sciences*, 12(831).
- Colorado, H. A., Mendoza, D. E., & Valencia, F. L. (2020). A Combined Strategy of Additive Manufacturing to Support Multidisciplinary Education in Arts , Biology , and Engineering. *Journal of Science Education and Technology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s10956-020-09873-1>
- Gordy, C. L., Sandefur, C. I., Lacara, T., Harris, F. R., & Ramirez, M. V. (2020). Building the lac Operon : A Guided-Inquiry Activity Using 3D-Printed Models †. *Inclusive Science*, 21.
- Guenther, C., Hayes, M., Davis, A., & Stern, M. (2021). Building Confidence : Engaging Students Through 3D Printing in Biology Courses. *Bioscene: Journal of College Biology Teaching*, 47(1), 40–58.
- Howell, M. E., Booth, C. S., Sikich, S. M., & Couch, B. A. (2019). Article Student Understanding of DNA Structure – Function Relationships Improves from Using 3D Learning Modules with Dynamic 3D Printed Models S. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 00(00), 1–15. <https://doi.org/10.1002/bmb.21234>
- Lampert, P., Pany, P., Gericke, N., Lampert, P., & Pany, P. (2025). Hands-On Learning With 3d-Printed Flower Models Hands-On Learning with 3D-Printed Flower Models. *Journal of Biological Education*, 59(1), 181–191. <https://doi.org/10.1080/00219266.2023.2282427>
- Leitão, M. D. C., Garay, A. V., Carolina, A., Batista, C., Resende, S. G. De, Ferreira, L., Vieira, E. M., Coelho, C. M., & Meier, M. (2023). SynBio in 3D: The First Synthetic Genetic Circuit as a 3D-Printed STEM Educational Resource. *Frontiers in Education*, March, 1–12. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1110464>
- Monkovic, J. M., Jones, S. M., Nicolas, M., Punia, K., Noland, D., Montclare, J. K., Marie, J., Jones, S. M., & Nicolas, M. (2021). From Concept to Reality: The Use and Impact of 3D Prints as Academic Tools for High School Biology Education. *Journal of Biological Education*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/00219266.2020.1858927>
- Syam, S., Anshori, F. Al, & Alfat, N. (2023). Pengembangan Media Pembelajaran Berbasis 3D Printing Mata Kuliah Biologi Sel. *ORYZA: Jurnal Pendidikan Biologi*, 12(2), 2089–3205.

Yap, Y. L., Sheng, Y., Kuan, E. T. H., Tan, J., Peh, Z. K., Low, X. Y., Yeong, W. Y., Tan, C. S. H., & Augustinus, L. (2017). 3D Printed Bio-models for Medical Applications. *Emerald Insight*, 23(2), 1–18.