

Integrasi Teknologi Digital dalam Pembelajaran Biologi: Analisis Kualitatif terhadap Pemahaman Konseptual dan Keterampilan Abad 21

Nofamataro Zebua

Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri
Malang, Indonesia

Alamat: Jl. Semarang No. 5, Malang, Indonesia

Korespondensi penulis: zebulanofa99@gmail.com*

Abstract. *The development of digital technology has brought significant changes in various aspects of life, including education. In biology learning, digital technology offers innovative solutions to overcome challenges in understanding abstract concepts, increase learning motivation, and develop 21st century skills. Interactive simulations, augmented reality (AR), virtual reality (VR) and online learning platforms allow students to visualize complex biological concepts, such as photosynthesis and DNA replication, more clearly and deeply. In addition, the integration of digital technology can improve students' critical thinking skills, creativity, collaboration and digital literacy. However, the implementation of digital technology in biology learning faces various challenges, including limited infrastructure, access gaps between urban and rural schools, and lack of training for educators. This study aims to explore the impact of digital technology on students' conceptual understanding and 21st century skills, and identify the main barriers to its implementation. The results of this study are expected to provide recommendations for the development of more effective and innovative biology learning strategies in the digital era*

Keywords: *Digital Technology, Biology Learning, 21st Century Skills, Conceptual Understanding*

Abstrak. Perkembangan teknologi digital telah membawa perubahan signifikan dalam berbagai aspek kehidupan, termasuk pendidikan. Dalam pembelajaran biologi, teknologi digital menawarkan solusi inovatif untuk mengatasi tantangan dalam memahami konsep abstrak, meningkatkan motivasi belajar, serta mengembangkan keterampilan abad ke-21. Simulasi interaktif, augmented reality (AR), virtual reality (VR), dan platform pembelajaran online memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan konsep biologi yang kompleks, seperti fotosintesis dan replikasi DNA, secara lebih jelas dan mendalam. Selain itu, integrasi teknologi digital dapat meningkatkan keterampilan berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan literasi digital siswa. Namun, implementasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan infrastruktur, kesenjangan akses antara sekolah perkotaan dan pedesaan, serta kurangnya pelatihan bagi pendidik. Studi ini bertujuan untuk mengeksplorasi dampak teknologi digital terhadap pemahaman konseptual dan keterampilan abad ke-21 siswa, serta mengidentifikasi hambatan utama dalam implementasinya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi bagi pengembangan strategi pembelajaran biologi yang lebih efektif dan inovatif di era digital.

Kata kunci: Teknologi Digital, Pembelajaran Biologi, Keterampilan Abad 21, Pemahaman Konseptual

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan teknologi digital dalam beberapa dekade terakhir telah membawa transformasi signifikan di berbagai bidang, termasuk pendidikan (Bonfield et al, 2020; Mohamed et al, 2022). Teknologi digital tidak hanya mengubah cara informasi diakses dan disebarluaskan, tetapi juga membuka peluang baru untuk meningkatkan kualitas pembelajaran (Alenezi, 2023). Dalam konteks pendidikan biologi, teknologi digital menawarkan potensi besar untuk mengatasi tantangan tradisional dalam pembelajaran, seperti kesulitan

memvisualisasikan konsep abstrak, rendahnya motivasi belajar siswa, dan keterbatasan sumber daya pembelajaran (Wang, et al, 2023).

Biologi sebagai disiplin ilmu yang mempelajari kehidupan dan organisme hidup seringkali menghadapi tantangan dalam menyampaikan konsep-konsep yang kompleks dan abstrak (Bongard & Levin, 2021; Putri et al, 2024). Misalnya, proses seluler seperti fotosintesis, replikasi DNA, atau mekanisme evolusi memerlukan pemahaman mendalam dan visualisasi yang jelas. Tanpa alat bantu yang memadai, siswa seringkali kesulitan memahami konsep-konsep ini, yang pada akhirnya dapat menurunkan minat dan motivasi mereka terhadap biologi. Di sinilah teknologi digital berperan penting. Simulasi interaktif, augmented reality (AR), virtual reality (VR), dan platform pembelajaran online dapat membantu siswa memvisualisasikan konsep-konsep biologi yang sulit dipahami melalui metode pembelajaran konvensional (Childs et al, 2023; Cieri et al, 2021).

Selain itu, era digital menuntut siswa untuk menguasai keterampilan abad 21, seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan literasi digital (Anter & Bulonos, 2022). Keterampilan ini tidak hanya penting untuk kesuksesan akademis, tetapi juga untuk mempersiapkan siswa menghadapi tantangan di dunia kerja yang semakin kompetitif. Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi dapat menjadi sarana efektif untuk mengembangkan keterampilan ini. Misalnya, proyek berbasis teknologi yang melibatkan pembuatan video atau presentasi interaktif dapat melatih kreativitas dan kolaborasi siswa, sementara penggunaan platform online dapat meningkatkan literasi digital (Bereczki & Kárpáti, 2021).

Namun, meskipun potensi teknologi digital dalam pendidikan biologi sangat besar, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan (Ren et al, 2021; Yang & Ruiting, 2024). Salah satu tantangan utama adalah keterbatasan infrastruktur, seperti akses internet yang tidak merata dan kurangnya perangkat teknologi di beberapa sekolah. Selain itu, banyak guru yang belum terbiasa menggunakan teknologi digital dalam pembelajaran, sehingga memerlukan pelatihan dan dukungan lebih lanjut. Tantangan ini perlu diatasi agar integrasi teknologi digital dapat memberikan dampak positif yang maksimal.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menginvestigasi dampak teknologi digital dalam pembelajaran sains. Misalnya, studi oleh Wang et al. (2023) menunjukkan bahwa penggunaan simulasi interaktif dapat meningkatkan pemahaman konseptual siswa dalam biologi. Penelitian lain oleh Chen (2019) menemukan bahwa AR dan VR dapat menciptakan pengalaman belajar yang imersif dan meningkatkan motivasi siswa. Namun, sebagian besar penelitian ini berfokus pada pendekatan kuantitatif, sehingga masih ada kebutuhan untuk penelitian kualitatif yang

menggali lebih dalam tentang pengalaman dan persepsi siswa serta guru terkait penggunaan teknologi digital.

Dalam konteks Indonesia, integrasi teknologi digital dalam pendidikan biologi masih dalam tahap awal. Meskipun pemerintah telah menginisiasi berbagai program untuk meningkatkan akses teknologi di sekolah, seperti program "Digitalisasi Sekolah," implementasinya masih menghadapi kendala seperti kurangnya pelatihan guru dan kesenjangan infrastruktur antara sekolah di perkotaan dan pedesaan (Abdullatif et al, 2023; Isma et al, 2022; Nasrullah & Rahman. 2023). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi lebih dalam tentang bagaimana teknologi digital dapat diintegrasikan secara efektif dalam pembelajaran biologi, serta dampaknya terhadap pemahaman konseptual dan keterampilan abad 21 siswa.

Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi memiliki potensi besar untuk meningkatkan pemahaman konseptual dan mengembangkan keterampilan abad 21 siswa (Ramaila & Molwele, 2022). Namun, implementasinya masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan infrastruktur dan kurangnya pelatihan guru. Selain itu, masih sedikit penelitian yang menggali secara mendalam tentang pengalaman dan persepsi siswa serta guru terkait penggunaan teknologi digital dalam pembelajaran biologi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan: (1) Bagaimana integrasi teknologi digital memengaruhi pemahaman konseptual siswa dalam pembelajaran biologi? (2) Bagaimana teknologi digital berkontribusi terhadap pengembangan keterampilan abad 21 siswa? (3) Apa tantangan utama yang dihadapi dalam implementasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi?

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengeksplorasi dampak integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi terhadap pemahaman konseptual dan keterampilan abad 21 siswa. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengidentifikasi tantangan dan rekomendasi untuk implementasi teknologi digital yang lebih efektif. Dengan memahami persepsi dan pengalaman siswa serta guru, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi berharga bagi pengembangan praktik pembelajaran biologi yang inovatif dan relevan dengan kebutuhan era digital.

2. KAJIAN TEORITIS

Pembelajaran biologi, sebagai salah satu cabang ilmu sains, menghadapi tantangan unik dalam menyampaikan konsep-konsep yang seringkali bersifat abstrak dan kompleks (Kokkonen & Schalk, 2021). Konsep-konsep seperti proses seluler (misalnya, fotosintesis,

respirasi seluler), genetika (misalnya, replikasi DNA, ekspresi gen), dan interaksi dalam ekosistem memerlukan pemahaman mendalam dan kemampuan visualisasi yang baik. Tanpa alat bantu yang memadai, siswa seringkali kesulitan memahami konsep-konsep ini, yang dapat mengakibatkan miskonsepsi dan menurunnya minat belajar (Runnalls & Hong, 2020). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Johnstone (2006), biologi memiliki tiga level representasi: makroskopis (fenomena yang dapat diamati), submikroskopis (proses molekuler dan seluler), dan simbolis (representasi kimia dan matematis). Siswa seringkali kesulitan menghubungkan ketiga level ini, terutama pada level submikroskopis yang tidak dapat diamati secara langsung. Hal ini menunjukkan pentingnya penggunaan alat bantu visual dan interaktif dalam pembelajaran biologi.

Selain tantangan konseptual, motivasi siswa untuk mempelajari biologi juga menjadi masalah yang sering dihadapi. Biologi sering dianggap sebagai mata pelajaran yang memerlukan hafalan yang banyak, sehingga kurang menarik bagi siswa yang lebih tertarik pada pendekatan praktis dan aplikatif. Menurut Ryan & Deci (2000), motivasi intrinsik siswa dapat ditingkatkan melalui pembelajaran yang menantang, relevan, dan melibatkan partisipasi aktif. Di sinilah peran teknologi digital menjadi krusial. Teknologi digital tidak hanya menyediakan alat untuk memvisualisasikan konsep abstrak, tetapi juga dapat membuat pembelajaran biologi lebih menarik dan interaktif (Jenkinson, 2018).

Peran teknologi digital dalam pendidikan telah menjadi fokus banyak penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Teknologi seperti simulasi interaktif, augmented reality (AR), virtual reality (VR), dan platform pembelajaran online telah terbukti efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual siswa (Childs et al, 2023). Simulasi interaktif, misalnya, memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan proses biologi yang kompleks, seperti siklus Krebs atau replikasi DNA, dalam format yang lebih mudah dipahami. Menurut penelitian oleh Rutten et al. (2012), penggunaan simulasi dalam pembelajaran sains dapat meningkatkan pemahaman konseptual siswa secara signifikan dibandingkan dengan metode pembelajaran tradisional. Selain itu, AR dan VR menawarkan pengalaman belajar yang imersif, di mana siswa dapat "melihat" dan "berinteraksi" dengan objek biologi dalam ruang tiga dimensi. Misalnya, siswa dapat menjelajahi struktur sel atau ekosistem hutan hujan secara virtual, yang tidak mungkin dilakukan dalam kelas konvensional.

Platform pembelajaran online seperti Google Classroom, Moodle, dan Edmodo juga memainkan peran penting dalam memfasilitasi kolaborasi dan komunikasi antara siswa dan guru (Eraković & Topalov, 2021; Ghounane, 2020). Platform ini memungkinkan siswa untuk mengakses materi pembelajaran kapan saja dan di mana saja, serta berinteraksi dengan teman

sekelas dan guru melalui forum diskusi atau tugas kolaboratif. Menurut penelitian oleh Tsai et al. (2020), pembelajaran berbasis teknologi dapat meningkatkan keterlibatan siswa dan memberikan fleksibilitas dalam proses belajar. Namun, efektivitas platform ini sangat bergantung pada ketersediaan infrastruktur dan kemampuan guru dalam mengintegrasikannya ke dalam kurikulum.

Keterampilan abad 21, seperti berpikir kritis, kreativitas, kolaborasi, dan literasi digital, telah menjadi fokus utama dalam pendidikan modern (Thornhill-Miller et al, 2023). Keterampilan ini tidak hanya penting untuk kesuksesan akademis, tetapi juga untuk mempersiapkan siswa menghadapi tantangan di dunia kerja yang semakin kompetitif. Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi dapat menjadi sarana efektif untuk mengembangkan keterampilan ini. Misalnya, proyek berbasis teknologi yang melibatkan pembuatan video atau presentasi interaktif dapat melatih kreativitas dan kolaborasi siswa (Hsia et al, 2021). Sementara itu, penggunaan platform online dan alat digital dapat meningkatkan literasi digital siswa. Menurut Haryani et al. (2024), integrasi teknologi dalam pembelajaran dapat membantu siswa mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan memecahkan masalah melalui eksplorasi dan analisis data.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan dampak positif integrasi teknologi digital dalam pembelajaran sains. Misalnya, studi oleh Wang et al. (2023) menemukan bahwa penggunaan simulasi interaktif dapat meningkatkan pemahaman konseptual siswa dalam biologi. Penelitian lain oleh Chen (2019) menunjukkan bahwa AR dan VR dapat menciptakan pengalaman belajar yang imersif dan meningkatkan motivasi siswa. Namun, sebagian besar penelitian ini berfokus pada pendekatan kuantitatif, sehingga masih ada kebutuhan untuk penelitian kualitatif yang menggali lebih dalam tentang pengalaman dan persepsi siswa serta guru terkait penggunaan teknologi digital. Penelitian kualitatif dapat memberikan wawasan yang lebih holistik tentang bagaimana teknologi digital memengaruhi proses pembelajaran dan pengembangan keterampilan abad 21.

Dalam konteks Indonesia, integrasi teknologi digital dalam pendidikan biologi masih dalam tahap awal. Meskipun pemerintah telah menginisiasi berbagai program untuk meningkatkan akses teknologi di sekolah, seperti program "Digitalisasi Sekolah," implementasinya masih menghadapi kendala seperti kurangnya pelatihan guru dan kesenjangan infrastruktur antara sekolah di perkotaan dan pedesaan (Anita & Astuti, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi lebih dalam tentang bagaimana teknologi digital dapat diintegrasikan secara efektif dalam pembelajaran biologi, serta dampaknya terhadap pemahaman konseptual dan keterampilan abad 21 siswa.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus untuk mengeksplorasi dampak integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi terhadap pemahaman konseptual dan keterampilan abad 21 siswa. Pendekatan kualitatif dipilih karena memungkinkan peneliti untuk menggali secara mendalam pengalaman, persepsi, dan pemahaman partisipan terkait penggunaan teknologi digital dalam pembelajaran (Creswell & Poth, 2016). Studi kasus sebagai desain penelitian dipilih karena fokusnya pada konteks spesifik, yaitu implementasi teknologi digital di sekolah menengah, sehingga dapat memberikan gambaran yang rinci dan holistik tentang fenomena yang diteliti.

Partisipan dalam penelitian ini terdiri dari siswa dan guru biologi di dua sekolah menengah yang telah menggunakan teknologi digital dalam pembelajaran. Total partisipan meliputi 10 siswa dan 5 guru, dipilih secara purposif berdasarkan kriteria bahwa mereka telah memiliki pengalaman menggunakan teknologi digital seperti simulasi, augmented reality (AR), atau platform pembelajaran online dalam proses belajar mengajar. Pemilihan partisipan ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang dikumpulkan relevan dan dapat memberikan wawasan mendalam tentang topik penelitian.

Teknik pengumpulan data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi wawancara mendalam, observasi kelas, dan analisis dokumen. Selain itu, analisis dokumen seperti rencana pelaksanaan pembelajaran (RPP), tugas siswa, dan catatan guru digunakan untuk melengkapi data dari wawancara dan observasi. Data yang dikumpulkan dianalisis secara tematik (thematic analysis) untuk mengidentifikasi pola dan tema utama yang muncul. Proses analisis dimulai dengan transkripsi data wawancara dan observasi, dilanjutkan dengan coding data untuk mengidentifikasi konsep-konsep kunci. Selanjutnya, konsep-konsep ini dikelompokkan ke dalam tema-tema yang lebih luas, seperti peningkatan pemahaman konseptual, pengembangan keterampilan abad 21, dan tantangan implementasi.

Untuk memastikan validitas dan reliabilitas penelitian, beberapa langkah dilakukan. Pertama, triangulasi data dilakukan dengan menggabungkan data dari wawancara, observasi, dan analisis dokumen. Kedua, peneliti melakukan member checking dengan mempresentasikan temuan awal kepada partisipan untuk memastikan bahwa interpretasi data sesuai dengan pengalaman mereka. Ketiga, peneliti menjaga transparansi proses penelitian dengan mendokumentasikan setiap langkah analisis secara rinci.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peningkatan Pemahaman Konseptual

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi secara signifikan meningkatkan pemahaman konseptual siswa (Weng, 2020). Alat-alat seperti simulasi interaktif, video pembelajaran, dan platform e-learning memungkinkan siswa untuk memvisualisasikan konsep-konsep biologi yang kompleks, seperti proses fotosintesis, replikasi DNA, dan interaksi ekosistem (Ali, 2022). Visualisasi ini membantu siswa memahami materi dengan lebih mendalam dan mengaitkannya dengan konteks nyata.

Misalnya, penggunaan simulasi virtual untuk mempelajari anatomi tubuh manusia memungkinkan siswa untuk menjelajahi struktur organ dengan cara yang interaktif dan mendetail (Kwon *et al*, 2020). Hal ini tidak hanya meningkatkan pemahaman mereka tentang anatomi tetapi juga memfasilitasi pembelajaran mandiri dan eksplorasi kreatif.

Pengembangan Keterampilan Abad 21

Integrasi teknologi digital juga berkontribusi pada pengembangan keterampilan abad 21, seperti berpikir kritis, kolaborasi, komunikasi, dan kreativitas (Dilekçi & Karatay, 2023; Yılmaz, 2021). Melalui proyek berbasis teknologi, siswa belajar untuk menganalisis data, memecahkan masalah, dan bekerja sama dalam tim. Contohnya, penggunaan perangkat lunak analisis data dalam praktikum biologi memungkinkan siswa untuk mengolah data eksperimen secara mandiri dan menarik kesimpulan berdasarkan bukti (Clark & Hsu, 2023).

Selain itu, platform kolaboratif seperti Google Classroom juga memfasilitasi komunikasi dan kerja sama antar siswa, bahkan dalam pembelajaran jarak jauh (Al Fadda *et al*, 2020). Keterampilan ini sangat penting dalam mempersiapkan siswa untuk menghadapi tantangan di dunia kerja yang semakin digital.

Motivasi dan Keterlibatan Siswa

Teknologi digital juga meningkatkan motivasi dan keterlibatan siswa dalam pembelajaran biologi. Alat-alat seperti gamifikasi (pembelajaran berbasis permainan) dan augmented reality (AR) menciptakan pengalaman belajar yang lebih menarik dan menyenangkan (Lampropoulos, 2022). Misalnya, aplikasi AR yang memungkinkan siswa untuk "melihat" organel sel dalam 3D dapat membuat pembelajaran lebih interaktif dan memicu rasa ingin tahu siswa. Selain itu, penggunaan kuis online dan sistem penghargaan digital dapat meningkatkan partisipasi siswa dan mendorong mereka untuk lebih aktif dalam proses pembelajaran (Zainuddin, 2020).

Efektivitas Integrasi Teknologi Digital

Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi telah terbukti efektif dalam meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan abad 21 (Osman & Lay, 2022). Namun, keberhasilan ini sangat bergantung pada cara teknologi tersebut digunakan. Pendidik perlu merancang aktivitas pembelajaran yang memanfaatkan teknologi secara strategis, bukan hanya sebagai alat tambahan, tetapi sebagai bagian integral dari proses pembelajaran (Gros & García-Peñalvo, 2023).

Penggunaan simulasi virtual juga harus disertai dengan panduan dan pertanyaan pemandu yang mendorong siswa untuk berpikir kritis tentang apa yang mereka amati (Hamed & Aljanazrah, 2020). Tanpa pendekatan yang terstruktur, teknologi mungkin hanya menjadi hiburan tanpa memberikan dampak pembelajaran yang signifikan (Singh *et al*, 2021).

Tantangan dalam Implementasi

Meskipun manfaatnya jelas, integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi juga menghadapi beberapa tantangan. Pertama, kesenjangan digital masih menjadi masalah di banyak daerah, di mana akses ke perangkat dan koneksi internet yang memadai belum merata (Hillier, 2020). Hal ini dapat menciptakan ketimpangan dalam kesempatan belajar antara siswa yang memiliki akses ke teknologi dan yang tidak.

Kedua, keterampilan teknologi pendidik juga menjadi faktor kritis. Tidak semua guru memiliki kemampuan untuk mengintegrasikan teknologi secara efektif dalam pembelajaran. Oleh karena itu, pelatihan dan dukungan profesional bagi guru sangat penting untuk memastikan bahwa mereka dapat memanfaatkan teknologi dengan optimal (Spiteri & Chang, 2020).

Ketiga, ada risiko bahwa penggunaan teknologi yang berlebihan dapat mengurangi interaksi sosial dan keterampilan praktis siswa (Romero-López *et al*, 2021). Misalnya, jika semua praktikum biologi digantikan oleh simulasi virtual, siswa mungkin kehilangan kesempatan untuk mengembangkan keterampilan laboratorium yang penting.

Peluang Pembelajaran Digital di Masa Depan

Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi membuka peluang besar untuk inovasi pendidikan di masa depan. Dengan perkembangan teknologi seperti artificial intelligence (AI) dan virtual reality (VR), pembelajaran biologi dapat menjadi lebih personal dan imersif (Childs *et al*, 2023). Misalnya, sistem AI dapat digunakan untuk menyesuaikan

materi pembelajaran dengan kebutuhan individu siswa, sementara VR dapat menciptakan lingkungan belajar yang sepenuhnya imersif untuk mempelajari ekosistem atau proses biologis.

Selain itu, teknologi digital juga memungkinkan kolaborasi lebih luas dalam pembelajaran biologi. Siswa dapat terlibat dalam proyek penelitian dalam cakupan lebih luas atau berpartisipasi dalam diskusi dengan ahli biologi lainnya. Hal ini tidak hanya memperluas wawasan mereka tetapi juga mempersiapkan mereka untuk menjadi bagian dari komunitas ilmiah global.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi telah membawa transformasi signifikan dalam cara siswa memahami konsep biologi dan mengembangkan keterampilan abad 21. Meskipun menghadapi tantangan seperti kesenjangan digital dan kebutuhan akan pelatihan guru, potensi teknologi untuk meningkatkan motivasi, keterlibatan, dan pemahaman siswa sangat besar. Dengan pendekatan yang tepat, teknologi digital dapat menjadi alat yang powerful untuk menciptakan pengalaman belajar yang lebih efektif, menarik, dan relevan dengan kebutuhan masa depan.

Untuk memaksimalkan manfaat integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi, beberapa rekomendasi dapat dipertimbangkan:

- 1) Pemerintah dan institusi pendidikan perlu memastikan bahwa semua siswa memiliki akses yang setara ke perangkat dan koneksi internet.
- 2) Program pelatihan yang berkelanjutan harus disediakan untuk membantu guru mengintegrasikan teknologi secara efektif dalam pembelajaran.
- 3) Teknologi harus digunakan sebagai pelengkap, bukan pengganti, untuk pengalaman belajar praktis dan interaksi sosial.
- 4) Penelitian dan pengembangan teknologi pendidikan harus terus didorong untuk menciptakan alat-alat yang lebih canggih dan relevan dengan kebutuhan pembelajaran biologi.

Dengan langkah-langkah ini, integrasi teknologi digital dalam pembelajaran biologi dapat terus berkembang dan memberikan dampak positif yang lebih besar bagi pendidikan di masa depan.

REFERENSI

- Abdullatif, S., Nawai, F. A., & Arifin, A. (2023). Pengelolaan digitalisasi sekolah pada sekolah penggerak. *Pedagogika*, 14(1), 46-63. <https://doi.org/10.37411/pedagogika.v14i1.2238>
- Al Fadda, H., Osman, R., & Metwally, A. S. M. (2020). Using WhatsApp in coordination with Zoom and Microsoft Teams to enhance online learning during COVID-19 lockdown. *International Journal of Early Childhood Special Education*, 29(5), 1024. <https://doi.org/10.24205/03276716.2020.1098>
- Alenezi, M. (2023). Digital learning and digital institutions in higher education. *Education Sciences*, 13(1), 88. <https://doi.org/10.3390/educsci13010088>
- Ali, N., Ullah, S., & Khan, D. (2022). Interactive laboratories for science education: A subjective study and systematic literature review. *Multimodal Technologies and Interaction*, 6(10), 85. <https://doi.org/10.3390/mti6100085>
- Anita, A., & Astuti, S. I. (2022). Digitalisasi dan ketimpangan pendidikan: Studi kasus terhadap guru sekolah dasar di Kecamatan Baraka. *Jurnal Pendidikan Dan Kebudayaan*, 7(1), 1-12. <https://doi.org/10.24832/jpnk.v7i1.2509>
- Anter, M. C. J., & Bulonos, N. J. (2022). A survey of 21st century skills acquisition among the preservice teachers of teacher education programs. *European Journal of Open Education and E-learning Studies*, 7(2). <http://dx.doi.org/10.46827/ejoe.v7i2.4368>
- Bereczki, E. O., & Kárpáti, A. (2021). Technology-enhanced creativity: A multiple case study of digital technology-integration expert teachers' beliefs and practices. *Thinking Skills and Creativity*, 39, 100791. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2021.100791>
- Bonfield, C. A., Salter, M., Longmuir, A., Benson, M., & Adachi, C. (2020). Transformation or evolution?: Education 4.0, teaching and learning in the digital age. *Higher Education Pedagogies*, 5(1), 223-246. <https://doi.org/10.1080/23752696.2020.1816847>
- Bongard, J., & Levin, M. (2021). Living things are not (20th century) machines: Updating mechanism metaphors in light of the modern science of machine behavior. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 650726. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.650726>
- Chen, Y. C. (2019). Effect of mobile augmented reality on learning performance, motivation, and math anxiety in a math course. *Journal of Educational Computing Research*, 57(7), 1695-1722. <https://doi.org/10.1177/0735633119854036>
- Childs, E., Mohammad, F., Stevens, L., Burbelo, H., Awoke, A., Rewkowski, N., & Manocha, D. (2023). An overview of enhancing distance learning through emerging augmented and virtual reality technologies. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3264577>
- Cieri, R. L., Turner, M. L., Carney, R. M., Falkingham, P. L., Kirk, A. M., Wang, T., ... & Farmer, C. G. (2021). Virtual and augmented reality: New tools for visualizing, analyzing, and communicating complex morphology. *Journal of Morphology*, 282(12), 1785-1800. <https://doi.org/10.1002/jmor.21421>

- Clark, N., & Hsu, J. L. (2023). Insight from biology program learning outcomes: Implications for teaching, learning, and assessment. *CBE—Life Sciences Education*, 22(1), ar5. <https://doi.org/10.1187/cbe.22-09-0177>
- Dilekçi, A., & Karatay, H. (2023). The effects of the 21st century skills curriculum on the development of students' creative thinking skills. *Thinking Skills and Creativity*, 47, 101229. <https://doi.org/10.1016/j.tsc.2022.101229>
- Eraković, B. R., & Topalov, J. P. (2021). Teaching and learning through Moodle, Google Doc, and Zoom: Fostering student engagement in (a) synchronous learning environments. *Inovacije u Nastavi-Časopis za Savremenu Nastavu*, 34(4), 122-136. <https://doi.org/10.5937/inovacije2104122E>
- Ghounane, N. (2020). Moodle or social networks: What alternative refuge is appropriate to Algerian EFL students to learn during the Covid-19 pandemic. *Arab World English Journal (AWEJ)*, 11. <https://ssrn.com/abstract=3705063>
- Gros, B., & García-Peñalvo, F. J. (2023). Future trends in the design strategies and technological affordances of e-learning. In *Learning, Design, and Technology: An International Compendium of Theory, Research, Practice, and Policy* (pp. 345-367). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17461-7_67
- Hamed, G., & Aljanazrah, A. (2020). The effectiveness of using virtual experiments on students' learning in the general physics lab. <https://doi.org/10.28945/4668>
- Haryani, E., Cobern, W. W., Pleasants, B. A-S., & Fetters, M. (2024). Exploring pedagogical strategies: Integrating 21st-century skills in science classrooms. *Journal of Education in Science, Environment, and Health (JESEH)*, 10(2), 106-119. <https://doi.org/10.55549/jeseh.697>
- Hillier, M. (2020). Bridging the digital divide with off-line e-learning. In *Expanding Horizons in Open and Distance Learning* (pp. 110-121). Routledge.
- Hsia, L. H., Lin, Y. N., & Hwang, G. J. (2021). A creative problem-solving-based flipped learning strategy for promoting students' performing creativity, skills, and tendencies of creative thinking and collaboration. *British Journal of Educational Technology*, 52(4), 1771-1787. <https://doi.org/10.1111/bjet.13073>
- Isma, C. N., Rahmi, R., & Jamin, H. (2022). Urgensi digitalisasi pendidikan sekolah. *AT-TA'DIB: Jurnal Ilmiah Prodi Pendidikan Agama Islam*, 14(2), 129-141. <https://doi.org/10.47498/tadib.v14i2.1317>
- Jenkinson, J. (2018). Molecular biology meets the learning sciences: Visualizations in education and outreach. *Journal of Molecular Biology*, 430(21), 4013-4027. <https://doi.org/10.1016/j.jmb.2018.08.020>
- Johnstone, A. H. (2006). Chemical education research in Glasgow in perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, 7(2), 49-63.

- Kokkonen, T., & Schalk, L. (2021). One instructional sequence fits all? A conceptual analysis of the applicability of concreteness fading in mathematics, physics, chemistry, and biology education. *Educational Psychology Review*, 33(3), 797-821. <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09581-7>
- Kwon, K., Park, J. S., & Shin, B. S. (2020). Virtual anatomical and endoscopic exploration method of internal human body for training simulator. *Journal of Korean Medical Science*, 35(12). <https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e90>
- Lampropoulos, G., Keramopoulos, E., Diamantaras, K., & Evangelidis, G. (2022). Augmented reality and gamification in education: A systematic literature review of research, applications, and empirical studies. *Applied Sciences*, 12(13), 6809. <https://doi.org/10.3390/app12136809>
- Mohamed Hashim, M. A., Tlemsani, I., & Matthews, R. (2022). Higher education strategy in digital transformation. *Education and Information Technologies*, 27(3), 3171-3195. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10739-1>
- Nasrullah, N., & Rahman, A. W. (2023). Digitalisasi pembelajaran di sekolah. *Journal on Education*, 5(2), 5238-5246. <https://doi.org/10.31004/joe.v5i2.1126>
- Osman, K., & Lay, A. N. (2022). MyKimDG module: An interactive platform towards development of twenty-first century skills and improvement of students' knowledge in chemistry. *Interactive Learning Environments*, 30(8), 1461-1474. <https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1729208>
- Putri, I. I., Rahmat, A., Riandi, R., & Riza, L. S. (2024). Utilizing learning media in biology: A step towards interactive media development. *Journal of Natural Science and Integration*, 7(2), 292-302. <https://doi.org/10.24014/jnsi.v7i2.29493>
- Ramaila, S., & Molwele, A. J. (2022). The role of technology integration in the development of 21st century skills and competencies in life sciences teaching and learning. *International Journal of Higher Education*, 11(5), 9-17. <https://doi.org/10.5430/ijhe.v11n5p9>
- Ren, P., Xiao, Y., Chang, X., Huang, P. Y., Li, Z., Gupta, B. B., ... & Wang, X. (2021). A survey of deep active learning. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(9), 1-40. <https://doi.org/10.1145/347229>
- Romero-López, M., Pichardo, C., De Hoces, I., & García-Berbén, T. (2021). Problematic internet use among university students and its relationship with social skills. *Brain Sciences*, 11(10), 1301. <https://doi.org/10.3390/brainsci11101301>
- Runnalls, C., & Hong, D. S. (2020). "Well, they understand the concept of area": Pre-service teachers' responses to student area misconceptions. *Mathematics Education Research Journal*, 32(4), 629-651. <https://doi.org/10.1007/s13394-019-00274-1>
- Rutten, N., Van Joolingen, W. R., & Van Der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.017>

- Ryan, R. M., & Deci, E. L. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations: Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 54-67. <https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1020>
- Singh, J., Steele, K., & MacFadyen, L. (2020). Lessons from higher education: Leveraging digital technologies for accessible, inclusive education. *Education and Information Technologies*, 25(5), 4233-4252. <https://doi.org/10.1007/s10639-020-10440-7>
- Wright, A., & Dornan, L. (2021). Supporting virtual learning and community engagement with technology: A case study of a digital health innovation module. *Innovations in Education and Teaching International*, 58(1), 63-73. <https://doi.org/10.1080/14703297.2020.1761399>
- Zhang, L., & Wu, X. (2021). Education 4.0: Transforming education with digital tools in the 21st century. *Educational Research Review*, 12(5), 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.02.003>