

PENGEMBANGAN E-MODUL INTERAKTIF BERBASIS STEM UNTUK MENINGKATKAN KETERAMPILAN BERPIKIR KRITIS SISWA PADA MATERI STRUKTUR DAN FUNGSI JANTUNG DI KELAS XI

Yuyun Amalia Caniago¹, Khairuna²
Universitas Islam Negeri Sumatera Utara^{1,2}
yuyun0310221010@uinsu.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan e-modul interaktif berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) pada materi struktur dan fungsi jantung untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa kelas XI SMA. Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan 4-D yang meliputi tahap *Define, Design, Develop, dan Disseminate*. Subjek penelitian ini adalah siswa kelas XI MIPA SMA Swasta Prima Tembung sebanyak 30 responden. Instrumen penelitian meliputi lembar observasi, pedoman wawancara, angket analisis kebutuhan, lembar validasi ahli, angket respons guru dan peserta didik, serta tes keterampilan berpikir kritis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa e-modul memperoleh persentase validasi ahli materi sebesar 92,85%, ahli media sebesar 97,91%, validasi instrumen sebesar 87,50%, respons guru sebesar 100%, respons peserta didik sebesar 90%, serta nilai N-Gain sebesar 0,76 yang termasuk kategori tinggi. Dengan demikian, e-modul interaktif berbasis STEM dinyatakan valid, praktis, dan efektif sehingga layak digunakan sebagai bahan ajar untuk mendukung implementasi Kurikulum Merdeka serta meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa pada materi struktur dan fungsi jantung.

Kata Kunci: Berpikir Kritis, E-Modul Interaktif, Pengembangan 4-D, STEM, Struktur dan Fungsi Jantung

ABSTRACT

This study aimed to develop a Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM)-based interactive e-module on the structure and function of the heart to improve the critical thinking skills of eleventh-grade senior high school students. This study used a Research and Development (R&D) method with the 4-D development model, consisting of Define, Design, Develop, and Disseminate stages. The research subjects were 30 eleventh-grade MIPA students at SMA Swasta Prima Tembung. The research instruments included observation sheets, interview guidelines, needs analysis questionnaires, expert validation sheets, teacher and student response questionnaires, and critical thinking skills tests. The results showed that the e-module obtained material expert validation of 92.85%, media expert validation of 97.91%, instrument validation of 87.50%, teacher response of

100%, student response of 90%, and an N-Gain score of 0.76 in the high category. Therefore, the STEM-based interactive e-module was declared valid, practical, and effective, making it suitable as teaching material to support the implementation of the Merdeka Curriculum and improve students' critical thinking skills on the structure and function of the heart.

Keywords: 4-D Development, Critical Thinking Skills, Interactive E-Module, STEM, Structure and Function of The Heart

PENDAHULUAN

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pada abad ke-21 menuntut peserta didik untuk memiliki berbagai keterampilan berpikir tingkat tinggi agar mampu beradaptasi dengan tantangan global (Jufriadi et al., 2022). Salah satu keterampilan yang sangat penting dalam pembelajaran abad ke-21 adalah keterampilan berpikir kritis (Anfa et al., 2023; Kustiani et al., 2020). Keterampilan ini diperlukan agar siswa mampu menganalisis informasi, mengevaluasi permasalahan, serta mengambil keputusan secara rasional berdasarkan bukti ilmiah. Pembelajaran di sekolah diharapkan tidak hanya berfokus pada penguasaan konsep, tetapi juga mampu mengembangkan kemampuan berpikir kritis peserta didik (Facione, 2015).

Namun, keterampilan berpikir kritis siswa di Indonesia masih tergolong rendah. Hal ini dapat dilihat dari hasil *Programme for International Student Assessment* (PISA) yang menunjukkan bahwa kemampuan literasi sains siswa Indonesia masih berada di bawah rata-rata negara OECD (Damayanti et al., 2022). Hasil PISA tahun 2022 menunjukkan bahwa skor literasi sains Indonesia berada pada angka 383, jauh di bawah rata-rata OECD yaitu 485. Rendahnya kemampuan tersebut menunjukkan bahwa siswa masih mengalami kesulitan dalam menginterpretasikan data ilmiah, menarik kesimpulan, serta memecahkan masalah berbasis sains (OECD, 2023).

Salah satu faktor yang menyebabkan rendahnya kemampuan berpikir kritis siswa adalah proses pembelajaran yang masih bersifat *teacher-centered* dan kurang memberikan kesempatan kepada siswa untuk mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi (Gayatri & Sugiharti, 2021; Rahayu et al., 2024). Pembelajaran sering kali masih menekankan kegiatan menghafal konsep daripada memahami konsep secara mendalam. Selain itu, penggunaan bahan ajar yang kurang variatif juga menjadi salah satu kendala dalam proses pembelajaran (Rahmawati & Suryadi, 2021).

Bahan ajar merupakan salah satu komponen penting dalam proses pembelajaran karena dapat membantu siswa memahami materi secara lebih sistematis dan terarah. Namun, bahan ajar yang digunakan di sekolah masih didominasi oleh buku teks yang bersifat konvensional dan kurang interaktif. Hal ini

menyebabkan siswa kurang tertarik dalam mempelajari materi dan kurang termotivasi untuk berpikir secara kritis (Prastowo, 2018).

Seiring dengan perkembangan teknologi digital, penggunaan bahan ajar berbasis elektronik menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran. Salah satu bentuk bahan ajar digital yang dapat digunakan adalah e-modul interaktif. E-modul interaktif merupakan bahan ajar berbentuk digital yang disusun secara sistematis sehingga memungkinkan siswa untuk belajar secara mandiri. Keunggulan e-modul interaktif adalah mampu menyajikan materi pembelajaran dalam bentuk multimedia seperti teks, gambar, animasi, video, dan kuis interaktif sehingga dapat membantu siswa memahami konsep secara lebih konkret dan menarik (Sari et al., 2022).

Selain penggunaan media digital, pendekatan pembelajaran yang digunakan juga memiliki peran penting dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*). Pendekatan STEM merupakan pendekatan pembelajaran yang mengintegrasikan empat disiplin ilmu, yaitu sains, teknologi, rekayasa, dan matematika untuk menyelesaikan suatu permasalahan secara kontekstual. Pendekatan ini menekankan proses berpikir kritis, pemecahan masalah, kreativitas, serta kemampuan kolaborasi siswa (Bybee, 2013).

Oleh karena itu, e-modul perlu diintegrasikan dengan pendekatan STEM agar tidak hanya berfungsi sebagai media penyampaian materi, tetapi juga mampu memfasilitasi peserta didik dalam menghubungkan konsep dengan permasalahan nyata melalui kegiatan yang interaktif, kontekstual, dan berorientasi pada pemecahan masalah. Integrasi tersebut diharapkan dapat meningkatkan pemahaman konsep sekaligus mengembangkan keterampilan berpikir kritis siswa (Kelley & Knowles, 2016).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis STEM dapat meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa. Han et al. (2015) menunjukkan bahwa penerapan pembelajaran berbasis STEM mampu meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah siswa secara signifikan. Selain itu, Sutrisno et al. (2021) juga menunjukkan bahwa penggunaan bahan ajar berbasis STEM dapat meningkatkan hasil belajar dan kemampuan berpikir kritis siswa pada pembelajaran sains.

Berdasarkan hasil observasi dan wawancara dengan guru Biologi di SMA Swasta Prima Tembung, pembelajaran masih didominasi metode ceramah dengan bahan ajar berupa buku dan LKS yang kurang interaktif. Penggunaan media digital belum optimal dan belum mampu memfasilitasi keterlibatan aktif siswa. Akibatnya, siswa mengalami kesulitan memahami materi struktur dan fungsi jantung, terutama dalam mengaitkan struktur organ dengan mekanisme kerjanya, serta menunjukkan rendahnya keterampilan berpikir kritis. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa

pelaksanaan pembelajaran di kelas belum mampu memenuhi tuntutan pengembangan kemampuan berpikir siswa.

Materi sistem peredaran darah merupakan salah satu materi esensial dalam pembelajaran Biologi karena membahas mekanisme transportasi oksigen, zat makanan, hormon, dan sisa metabolisme yang berperan penting dalam menjaga kelangsungan hidup organisme. Salah satu pokok bahasan utama pada materi tersebut adalah struktur dan fungsi jantung sebagai organ utama yang mengatur sirkulasi darah ke seluruh tubuh. Materi struktur dan fungsi jantung dipilih karena memiliki konsep yang kompleks dan menuntut kemampuan analisis yang tinggi, terutama dalam memahami keterkaitan antara struktur organ dengan mekanisme kerjanya.

Namun, bahan ajar yang digunakan belum mendukung pembelajaran interaktif dan pemecahan masalah. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan bahan ajar yang mampu memvisualisasikan konsep secara lebih jelas serta melibatkan siswa secara aktif dalam proses pembelajaran. Salah satu solusi yang dapat dilakukan adalah mengembangkan e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung. Melalui e-modul ini, siswa dapat mempelajari konsep secara mandiri, melakukan eksplorasi melalui berbagai aktivitas pembelajaran berbasis STEM, serta melatih keterampilan berpikir kritis melalui berbagai tugas dan permasalahan kontekstual (Campbell et al., 2021; Utami & Widodo, 2020).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengembangkan e-modul dalam pembelajaran Biologi. Wulandari et al. (2022) menunjukkan bahwa penggunaan e-modul interaktif dapat meningkatkan motivasi dan hasil belajar siswa. Namun, penelitian tersebut belum secara khusus mengintegrasikan pendekatan STEM dalam e-modul yang dikembangkan. Selain itu, e-modul yang digunakan masih lebih berfokus pada penyampaian materi dan latihan soal, sehingga peluang untuk melatih keterampilan berpikir tingkat tinggi siswa belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini menunjukkan perlunya pengembangan bahan ajar yang tidak hanya menarik secara visual, tetapi juga mampu mendorong siswa untuk memecahkan masalah melalui pendekatan yang terintegrasi. Penelitian lain oleh Fitriani et al. (2023) juga mengembangkan e-modul berbasis STEM pada pembelajaran sains, tetapi belum secara spesifik berfokus pada pengembangan keterampilan berpikir kritis siswa pada materi sistem peredaran darah.

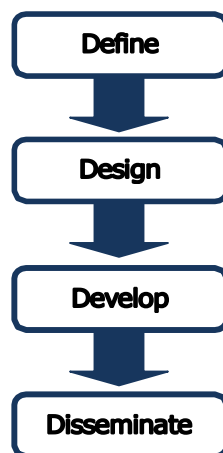
Berdasarkan kajian penelitian sebelumnya, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) terkait pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM yang secara khusus dirancang untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa pada materi struktur dan fungsi jantung di tingkat SMA/MA. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan e-modul interaktif yang mengintegrasikan pendekatan STEM secara sistematis pada materi struktur dan fungsi jantung serta dirancang secara khusus untuk melatih keterampilan berpikir kritis siswa melalui aktivitas pembelajaran, simulasi interaktif, dan soal berbasis

pemecahan masalah. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan bahan ajar digital yang inovatif serta membantu meningkatkan kualitas pembelajaran Biologi di tingkat SMA/MA.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk menghasilkan produk berupa e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung. Model pengembangan yang digunakan adalah model 4-D (*Four-D Model*) yang dikemukakan oleh Thiagarajan, yaitu *Define*, *Design*, *Develop*, dan *Disseminate* (Thiagarajan, 1974). Penelitian ini dilakukan di SMA Swasta Prima Tembung yang berlokasi di Jl. Prima Pasar VII, Desa Tembung, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Subjek penelitian ini adalah siswa kelas XI MIPA dengan jumlah 30 responden.

Tahapan pengembangan model 4-D terdiri atas *Define*, *Design*, *Develop*, dan *Disseminate*. Alur model penelitian pengembangan ini disajikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Alur Model Penelitian 4D (Thiagarajan, 1974)

Berdasarkan Gambar 1, penelitian pengembangan ini dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu pendefinisian, perancangan, pengembangan, dan penyebaran. Setiap tahapan digunakan secara sistematis untuk menghasilkan e-modul interaktif berbasis STEM yang valid, praktis, dan efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis siswa.

Tahap *Define* (Pendefinisian)

Tahap *define* bertujuan untuk mengidentifikasi kebutuhan pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM sesuai dengan implementasi Kurikulum Merdeka pada materi struktur dan fungsi jantung. Kegiatan pada tahap ini meliputi analisis Capaian Pembelajaran (CP), Tujuan Pembelajaran (TP), karakteristik

peserta didik, materi, serta kebutuhan pembelajaran melalui observasi, wawancara dengan guru Biologi, dan penyebaran angket kepada peserta didik. Hasil analisis menunjukkan perlunya bahan ajar digital yang interaktif, kontekstual, dan berpusat pada peserta didik. Oleh karena itu, e-modul dirancang dengan memuat tujuan pembelajaran, materi, video pembelajaran, aktivitas berbasis STEM, LKPD, asesmen, dan penguatan Profil Pelajar Pancasila sesuai karakteristik Kurikulum Merdeka.

Tahap *Design* (Perancangan)

Tahap *design* merupakan tahap perancangan e-modul interaktif berbasis STEM berdasarkan hasil analisis pada tahap *define*. Pada tahap ini disusun rancangan isi e-modul yang mengacu pada Capaian Pembelajaran (CP) dan Tujuan Pembelajaran (TP) Kurikulum Merdeka, meliputi penyusunan peta konsep, tujuan pembelajaran, materi struktur dan fungsi jantung, mekanisme kerja otot jantung, serta sistem peredaran darah besar dan kecil. Selain itu, dirancang komponen pendukung berupa gambar, video pembelajaran yang diakses melalui QR Code, aktivitas pembelajaran berbasis STEM, Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD), asesmen sumatif, glosarium, dan penguatan Profil Pelajar Pancasila. Seluruh komponen dirancang menggunakan aplikasi Canva dan Publu-Flipbook serta disusun secara sistematis agar menghasilkan e-modul yang interaktif, kontekstual, dan mampu memfasilitasi pengembangan keterampilan berpikir kritis peserta didik sesuai karakteristik Kurikulum Merdeka.

Tahap *Develop* (Pengembangan)

Tahap *develop* bertujuan untuk menghasilkan e-modul interaktif berbasis STEM yang layak digunakan dalam pembelajaran. Pada tahap ini dilakukan pengembangan produk sesuai dengan rancangan yang telah disusun, kemudian dilanjutkan dengan validasi oleh ahli materi, ahli media, dan ahli instrumen untuk menilai aspek kelayakan isi, penyajian, kebahasaan, tampilan, serta kesesuaian e-modul dengan Capaian Pembelajaran (CP) dan Tujuan Pembelajaran (TP) Kurikulum Merdeka. Saran dan masukan dari para validator digunakan sebagai dasar revisi hingga diperoleh e-modul yang layak digunakan. Selanjutnya, produk yang telah direvisi diujicobakan kepada peserta didik untuk memperoleh respons pengguna serta mengetahui kepraktisan penggunaan e-modul dalam mendukung pembelajaran dan pengembangan keterampilan berpikir kritis.

Tahap *Disseminate* (Penyebaran)

Tahap *disseminate* merupakan tahap penyebarluasan e-modul interaktif berbasis STEM yang telah dinyatakan layak berdasarkan hasil validasi dan uji coba. Pada tahap ini, e-modul diperkenalkan kepada guru Biologi dan peserta didik di sekolah penelitian sebagai alternatif bahan ajar digital pada materi struktur dan fungsi jantung sesuai dengan Kurikulum Merdeka. Penyebaran dilakukan dalam

skala terbatas dengan membagikan tautan akses e-modul sehingga dapat digunakan dalam proses pembelajaran secara mandiri maupun di kelas.

Instrumen Penelitian dan Teknik Pengumpulan Data

Instrumen penelitian yang digunakan meliputi lembar observasi, pedoman wawancara, angket analisis kebutuhan, lembar validasi ahli, angket respons guru dan peserta didik, serta tes keterampilan berpikir kritis. Lembar observasi, pedoman wawancara, dan angket analisis kebutuhan digunakan pada tahap *define* untuk memperoleh informasi mengenai kondisi pembelajaran, karakteristik peserta didik, penggunaan bahan ajar, serta kebutuhan pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM.

Lembar validasi digunakan untuk menilai kelayakan produk dari aspek materi, media, dan instrumen. Angket respons guru dan peserta didik digunakan untuk mengetahui kepraktisan penggunaan e-modul. Tes keterampilan berpikir kritis terdiri atas enam soal esai yang disusun berdasarkan indikator keterampilan berpikir kritis menurut Facione, yaitu *interpretation*, *analysis*, *evaluation*, *inference*, *explanation*, dan *self-regulation*. Setiap butir soal dirancang untuk mengukur kemampuan peserta didik dalam menganalisis, mengevaluasi, dan menyelesaikan permasalahan yang berkaitan dengan materi sistem peredaran darah. Tes ini digunakan untuk mengukur keterampilan berpikir kritis peserta didik sebelum dan sesudah menggunakan e-modul.

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi, wawancara, penyebaran angket, dan pemberian tes. Observasi dan wawancara dilakukan kepada guru Biologi untuk memperoleh informasi mengenai proses pembelajaran dan kebutuhan bahan ajar. Angket diberikan kepada peserta didik untuk menganalisis kebutuhan serta memperoleh respons terhadap e-modul yang dikembangkan. Selanjutnya, lembar validasi diisi oleh validator yang terdiri atas ahli materi, ahli media, dan ahli instrumen. Tes keterampilan berpikir kritis diberikan kepada peserta didik dalam bentuk *pretest* dan *posttest* untuk memperoleh data mengenai peningkatan keterampilan berpikir kritis setelah penggunaan e-modul.

Teknik Analisis Data

Analisis Kevalidan dan Kepraktisan

Analisis kevalidan dilakukan untuk mengetahui tingkat kelayakan e-modul interaktif berbasis STEM berdasarkan penilaian validator. Sementara itu, analisis kepraktisan dilakukan berdasarkan respons guru dan peserta didik setelah menggunakan e-modul. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan skala Likert, kemudian dihitung dalam bentuk persentase dengan rumus berikut.

$$\text{Persentase} = \frac{\text{Skor yang diperoleh}}{\text{Skor maksimum}} \times 100\% \quad (1)$$

Hasil persentase validasi dan kepraktisan kemudian diinterpretasikan berdasarkan kriteria pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Kriteria Tingkat Kevalidan & Kepraktisan

Persentase	Keterangan
0% - 20%	Tidak Valid / Tidak Praktis
21% - 40%	Kurang Valid / Kurang Praktis
41% - 60%	Cukup Valid / Cukup Praktis
61% - 80%	Valid / Praktis
81% - 100%	Sangat Valid / Sangat Praktis

Sumber: Mahadiraja dan Syamsuarnis (2020).

Berdasarkan Tabel 1, semakin tinggi persentase yang diperoleh, semakin tinggi pula tingkat kevalidan dan kepraktisan produk yang dikembangkan. Produk dinyatakan sangat valid atau sangat praktis apabila memperoleh persentase pada rentang 81–100%.

Analisis Keefektifan

Analisis keefektifan dilakukan untuk mengetahui peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah menggunakan e-modul interaktif berbasis STEM. Data diperoleh dari hasil *pretest* dan *posttest*, kemudian dianalisis menggunakan rumus N-Gain sebagai berikut.

$$N\text{-Gain} = \frac{\text{Skor post test} - \text{skor pre test}}{\text{Skor maksimum} - \text{skor retest}} \quad (2)$$

Nilai N-Gain yang diperoleh kemudian dikategorikan berdasarkan kriteria pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Klasifikasi N-Gain

Skor N-Gain	Klasifikasi	Keterangan
$N\text{-Gain} \geq 0.7$	Tinggi	Efektif
$0.3 \leq N\text{-Gain} < 0.7$	Sedang	Cukup Efektif
$N\text{-Gain} < 0.3$	Rendah	Tidak Efektif

Sumber: Hake (1998).

Berdasarkan Tabel 2, nilai N-Gain digunakan untuk mengetahui tingkat peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah menggunakan e-modul interaktif berbasis STEM. Produk dikatakan efektif apabila nilai N-Gain berada pada kategori tinggi.

HASIL PENELITIAN

Tahap *Define* (Pendefenisian)

Pada tahap *define* (Pendefenisian) dilakukan analisis kebutuhan sebagai dasar pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung. Analisis meliputi analisis kurikulum, analisis peserta didik, analisis

materi, dan analisis kebutuhan pembelajaran. Analisis kurikulum dilakukan dengan mengkaji Capaian Pembelajaran (CP) dan Tujuan Pembelajaran (TP) Fase F Kurikulum Merdeka pada materi sistem peredaran darah, khususnya struktur dan fungsi jantung. Hasil analisis menunjukkan bahwa peserta didik diharapkan mampu menganalisis struktur dan fungsi organ jantung, hubungan struktur dengan mekanisme kerja jantung, fase sistole dan diastole, serta mekanisme peredaran darah besar dan kecil.

Analisis kebutuhan dilakukan melalui observasi, wawancara dengan guru Biologi, dan penyebaran angket kepada peserta didik untuk memperoleh gambaran mengenai kondisi pembelajaran yang berlangsung. Hasil observasi menunjukkan bahwa proses pembelajaran masih didominasi oleh metode ceramah, sedangkan sumber belajar yang digunakan terutama berupa buku paket dan lembar kerja peserta didik (LKS). Pola pembelajaran tersebut menyebabkan peserta didik lebih banyak menerima informasi secara pasif daripada terlibat aktif dalam proses menemukan dan membangun pengetahuan. Selain itu, pemanfaatan media digital dalam pembelajaran masih belum optimal, baik dari segi variasi maupun intensitas penggunaannya. Kondisi ini berdampak pada kesulitan peserta didik dalam memahami materi yang bersifat abstrak, khususnya struktur dan fungsi jantung yang memerlukan visualisasi dinamis agar konsep-konsep yang dipelajari dapat dipahami secara lebih konkret dan mendalam.

Hasil wawancara dan angket juga mengungkapkan bahwa keterampilan berpikir kritis peserta didik masih tergolong rendah. Hal ini terlihat dari kemampuan peserta didik yang masih terbatas dalam mengidentifikasi masalah, menganalisis informasi, menghubungkan konsep dengan fenomena kehidupan sehari-hari, serta menarik kesimpulan berdasarkan data yang diperoleh. Pembelajaran yang berlangsung belum banyak menghadirkan aktivitas yang mendorong peserta didik untuk mengeksplorasi konsep, menyelesaikan masalah kontekstual, dan mengembangkan keterampilan berpikir tingkat tinggi. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM (Science, Technology, Engineering, and Mathematics) yang mampu mengintegrasikan teknologi digital dengan pendekatan pembelajaran yang berpusat pada peserta didik. E-modul tersebut diharapkan dapat menjadi sarana pembelajaran yang menarik, interaktif, dan sesuai dengan karakteristik Kurikulum Merdeka, sehingga mampu meningkatkan pemahaman konsep peserta didik pada materi struktur dan fungsi jantung sekaligus mengembangkan keterampilan berpikir kritis melalui kegiatan pembelajaran yang kontekstual dan berbasis pemecahan masalah.

Tahap *Design* (Perancangan)

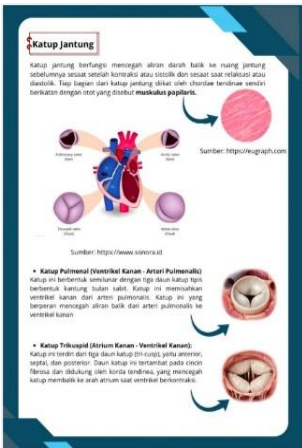
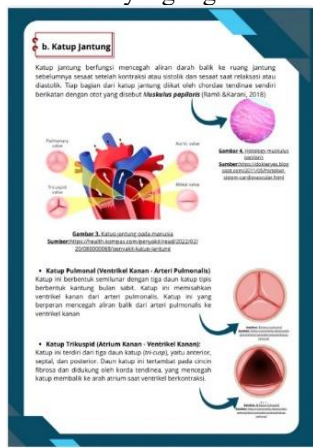
Tahap *design* (Perancangan) dilakukan berdasarkan hasil analisis kebutuhan pada tahap *define*. Pada tahap ini disusun rancangan e-modul interaktif berbasis STEM yang mengacu pada Capaian Pembelajaran (CP) dan Tujuan Pembelajaran (TP) Kurikulum Merdeka. Komponen e-modul meliputi sampul, petunjuk penggunaan, peta konsep, tujuan pembelajaran, materi struktur dan fungsi jantung,

video pembelajaran yang terintegrasi melalui QR Code, aktivitas pembelajaran berbasis STEM, LKPD, asesmen sumatif, glosarium, dan daftar pustaka.

Selain perancangan e-modul, pada tahap ini juga disusun instrumen penelitian berupa lembar validasi ahli materi, ahli media, instrumen tes keterampilan berpikir kritis, serta angket respon guru dan peserta didik. Tes keterampilan berpikir kritis terdiri atas enam soal esai yang disusun berdasarkan indikator berpikir kritis menurut Facione, yaitu *interpretation, analysis, evaluation, inference, explanation, dan self-regulation*.

Data penelitian disajikan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Revisi Modul Berdasarkan Masukan Validator

No	Aspek yang Direvisi	Saran Validator (Sebelum)	Hasil Revisi (Sesudah)
1	Materi pembelajaran	Seluruh pengertian yang terdapat dalam modul perlu dilengkapi dengan sitasi atau kutipan dari sumber ilmiah yang relevan.	Seluruh pengertian dalam modul telah direvisi dengan menambahkan sitasi yang sesuai dan mengacu pada referensi yang digunakan.
			
2	Gambar	Setiap gambar perlu dilengkapi dengan informasi mengenai sumber serta tahun aksesnya.	Semua gambar telah dilengkapi dengan informasi sumber beserta tahun akses sesuai dengan referensi yang digunakan.
			

Setiap materi perlu dilengkapi dengan subbab agar penyajiannya lebih sistematis dan terstruktur. penyajiannya lebih sistematis dan terstruktur.

Seluruh materi telah dilengkapi dengan poin-poin subbab yang sesuai sehingga penyajiannya menjadi lebih sistematis dan mudah dipahami

3 Sub-bab Materi



Daftar pustaka tidak perlu disajikan dalam bentuk poin.

Daftar pustaka telah disusun tanpa menggunakan format poin sesuai dengan ketentuan penulisan ilmiah.

4 Glosarium



Sumber : (Hasil Validasi dan Revisi produk, 2026)

Tahap Develop (Pengembangan)

Tahap *develop* (Pengembangan) merupakan tahap pengembangan e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung. Pada tahap ini dilakukan validasi produk oleh ahli materi, ahli media, dan validator instrumen tes keterampilan berpikir kritis. Setelah dilakukan validasi, produk direvisi berdasarkan saran validator sebelum diimplementasikan kepada peserta didik.

Validasi Ahli Materi

Validasi ahli materi bertujuan untuk mengetahui tingkat kelayakan isi e-modul yang dikembangkan. Penilaian dilakukan terhadap aspek kelayakan

isi/materi, penggunaan bahasa, dan penyajian materi. Hasil validasi ahli materi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Penilaian Ahli Materi

No.	Aspek Penilaian	Persentase	Kriteria
1	Kelayakan isi	92,86%	Sangat Valid
2	Cara penyajian	91,67%	Sangat Valid
3	Penggunaan Bahasa	93,75%	Sangat Valid
	Rata-rata	92,85%	Sangat Valid

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 4, hasil validasi ahli materi menunjukkan bahwa e-modul interaktif berbasis STEM memperoleh persentase rata-rata sebesar 92,85% dengan kategori sangat valid. Aspek penggunaan bahasa memperoleh persentase tertinggi sebesar 93,75%, diikuti aspek kelayakan isi/materi sebesar 92,86%, sedangkan aspek penyajian materi memperoleh persentase sebesar 91,67%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa e-modul telah memenuhi kriteria kelayakan materi sehingga layak digunakan pada tahap uji coba setelah dilakukan revisi sesuai masukan validator.

Validasi Ahli Media

Validasi ahli media dilakukan untuk mengetahui kelayakan e-modul dari aspek media pembelajaran. Penilaian meliputi aspek kelengkapan komponen e-modul, kualitas media, serta penyajian dan kegrafikan. Hasil validasi ahli media disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Penilaian Ahli Media

No.	Aspek Penilaian	Persentase	Kriteria
1	Kelengkapan Komponen E-Modul	100,00%	Sangat Valid
2	Kualitas Media	97,92%	Sangat Valid
3	Penyajian dan Keagrafikan	95,83%	Sangat Valid
	Rata-rata	97,91%	Sangat Valid

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 5, hasil validasi ahli media memperoleh persentase rata-rata sebesar 97,91% dengan kategori sangat valid. Aspek kelengkapan komponen e-modul memperoleh persentase sebesar 100%, aspek kualitas media memperoleh persentase sebesar 97,92%, sedangkan aspek penyajian dan kegrafikan memperoleh persentase sebesar 95,83%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa e-modul memiliki kualitas media yang sangat baik dan layak digunakan dalam proses pembelajaran.

Validasi Instrumen Tes Keterampilan Berpikir Kritis

Instrumen tes keterampilan berpikir kritis divalidasi sebelum digunakan pada tahap implementasi. Instrumen terdiri atas enam soal esai yang disusun berdasarkan indikator keterampilan berpikir kritis menurut Facione. Penilaian

dilakukan terhadap aspek kesesuaian indikator, konstruksi soal, dan penggunaan bahasa. Hasil validasi instrumen tes disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Penilaian Ahli Soal

No.	Aspek Penilaian	Persentase	Kriteria
1	Kesesuaian Indikator	81,25%	Sangat Valid
2	Konstruksi Soal	87,50%	Sangat Valid
3	Penggunaan Bahasa	93,75%	Sangat Valid
Rata-rata		87,50%	Sangat Valid

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 6, hasil validasi instrumen tes memperoleh persentase rata-rata sebesar 87,50% dengan kategori sangat valid. Aspek penggunaan bahasa memperoleh persentase tertinggi sebesar 93,75%, diikuti aspek konstruksi soal sebesar 87,50%, sedangkan aspek kesesuaian indikator memperoleh persentase sebesar 81,25%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa instrumen tes layak digunakan untuk mengukur keterampilan berpikir kritis peserta didik. Tingginya tingkat validitas tersebut menunjukkan bahwa instrumen mampu merepresentasikan indikator keterampilan berpikir kritis yang diukur secara tepat.

Respon Guru

Kepraktisan e-modul diketahui melalui angket respon guru Biologi setelah menggunakan e-modul dalam pembelajaran. Hasil angket respon guru disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Respon Guru

No.	Aspek Penilaian	Rata-rata	Kriteria
1	Kesesuaian Materi	100%	Sangat Praktis
2	Kemudahan Penggunaan	100%	Sangat Praktis
3	Tampilan E-Modul	100%	Sangat Praktis
Rata-rata		100%	Sangat Praktis

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 7, hasil angket respon guru memperoleh persentase rata-rata sebesar 100% dengan kategori sangat praktis. Seluruh aspek penilaian memperoleh persentase maksimal sehingga menunjukkan bahwa e-modul sangat mudah digunakan, sesuai dengan kebutuhan pembelajaran, dan layak diterapkan dalam proses pembelajaran. Temuan ini menegaskan bahwa e-modul yang dikembangkan memiliki tingkat kemudahan penggunaan yang sangat tinggi sehingga dapat mendukung pelaksanaan pembelajaran secara optimal.

Respon Peserta Didik

Kepraktisan e-modul juga dinilai melalui angket respon peserta didik setelah menggunakan e-modul pada proses pembelajaran. Hasil respon peserta didik disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Respon Peserta Didik

No.	Aspek Penilaian	Rata-rata	Kriteria
1	Isi	90,00%	Sangat Praktis
2	Bahasa	90,00%	Sangat Praktis
3	Keagrafikan	90,00%	Sangat Praktis
	Rata-rata	90,00%	Sangat Praktis

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 8, hasil angket respon peserta didik memperoleh persentase rata-rata sebesar 90,00% dengan kategori sangat praktis. Seluruh aspek penilaian memperoleh kategori sangat praktis, sehingga menunjukkan bahwa e-modul mudah dipahami, menarik digunakan, dan dapat mendukung kegiatan pembelajaran secara mandiri maupun di kelas.

Tahap *Disseminate* (Penyebaran)

Tahap *disseminate* (Penyebaran) merupakan tahap akhir dalam model pengembangan 4D yang bertujuan untuk mengetahui keefektifan e-modul interaktif berbasis STEM dalam pembelajaran Biologi pada materi struktur dan fungsi jantung. Pada penelitian ini, penyebaran dilakukan secara terbatas kepada peserta didik kelas XI di salah satu SMA di Tembung, Deli Serdang. Implementasi e-modul dilakukan melalui kegiatan pembelajaran menggunakan e-modul yang telah dinyatakan layak berdasarkan hasil validasi ahli dan uji kepraktisan. Selanjutnya, peserta didik diberikan tes keterampilan berpikir kritis sebelum (*pretest*) dan sesudah (*posttest*) penggunaan e-modul untuk mengetahui peningkatan keterampilan berpikir kritis.

Hasil Pretest dan Posttest

Tes keterampilan berpikir kritis diberikan kepada peserta didik sebelum dan sesudah pembelajaran menggunakan e-modul interaktif berbasis STEM. Tes terdiri atas enam soal esai yang disusun berdasarkan indikator keterampilan berpikir kritis menurut Facione. Hasil rata-rata nilai *pretest* dan *posttest* disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Pretest dan Posttest

No.	Jenis Tes	Rata-rata
1	Pretest	61,67%
2	Posttest	90,83%

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 9, rata-rata nilai *pretest* peserta didik sebesar 61,67, sedangkan rata-rata nilai *posttest* sebesar 90,83. Hasil tersebut menunjukkan adanya peningkatan nilai setelah peserta didik mengikuti pembelajaran menggunakan e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung.

Hasil Analisis N-Gain

Peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik dianalisis menggunakan *Normalized Gain* (N-Gain). Hasil analisis N-Gain disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Analisis N-Gain

No.	Aspek Penilaian	Nilai
1	Rata-rata Pretest	61,67
2	Rata-rata Posttest	90,83
3	Nilai N-Gain	0,76
4	Persentase N-Gain	76,00%
	Kategori	Tinggi

Sumber : (Hasil Analisis Data Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 10, hasil analisis menunjukkan bahwa nilai N-Gain yang diperoleh sebesar 0,76 dengan persentase 76,00%, yang termasuk dalam kategori tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa terjadi peningkatan keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah menggunakan e-modul interaktif berbasis STEM pada materi struktur dan fungsi jantung. Temuan ini mengindikasikan bahwa penggunaan e-modul interaktif berbasis STEM efektif dalam mendukung proses pembelajaran dan meningkatkan kemampuan berpikir kritis peserta didik.

PEMBAHASAN

Bagian Kelayakan E-modul Interaktif Berbasis STEM

Hasil validasi menunjukkan bahwa e-modul interaktif berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) yang dikembangkan memiliki tingkat kelayakan sangat tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh persentase validasi ahli materi sebesar 92,85%, ahli media sebesar 97,91%, dan validasi instrumen tes sebesar 87,50%. Seluruh hasil tersebut berada pada kategori sangat valid. Temuan ini menunjukkan bahwa e-modul telah memenuhi aspek kelayakan isi, penyajian, kebahasaan, tampilan media, serta kesesuaian instrumen evaluasi dengan tujuan pembelajaran dalam Kurikulum Merdeka.

Tingginya hasil validasi ahli materi menunjukkan bahwa materi yang disajikan telah sesuai dengan Capaian Pembelajaran (CP) dan Tujuan Pembelajaran (TP) Fase F Kurikulum Merdeka. Materi struktur dan fungsi jantung disusun secara sistematis, mulai dari konsep dasar sistem peredaran darah, struktur anatomi jantung, mekanisme kerja jantung, hingga mekanisme peredaran darah besar dan kecil. Penyajian materi juga dilengkapi dengan ilustrasi, gambar, video pembelajaran, dan aktivitas berbasis STEM sehingga membantu peserta didik memahami konsep secara lebih konkret. Materi yang disusun secara sistematis dan kontekstual memudahkan peserta didik menghubungkan konsep Biologi dengan permasalahan dalam kehidupan sehari-hari.

Integrasi pendekatan STEM menjadi salah satu keunggulan e-modul yang dikembangkan. Pendekatan STEM tidak hanya menyajikan konsep sains, tetapi

juga mengintegrasikan unsur teknologi, rekayasa, dan matematika dalam aktivitas pembelajaran. Melalui kegiatan mengamati fenomena, menganalisis permasalahan, merancang solusi, dan mengevaluasi hasil, peserta didik memperoleh pengalaman belajar yang lebih bermakna. Menurut Bybee (2013), pembelajaran berbasis STEM mampu mengembangkan keterampilan berpikir kritis, pemecahan masalah, kreativitas, dan kolaborasi karena peserta didik terlibat secara aktif dalam menemukan solusi terhadap masalah kontekstual.

Hasil validasi ahli media yang mencapai 97,91% menunjukkan bahwa e-modul memiliki kualitas tampilan yang sangat baik. Penggunaan kombinasi warna yang proporsional, ilustrasi anatomi jantung, ikon yang konsisten, navigasi yang sederhana, serta video pembelajaran yang dapat diakses melalui kode QR menjadikan e-modul lebih menarik dan mudah digunakan. Desain media yang interaktif berkontribusi dalam meningkatkan perhatian dan motivasi belajar peserta didik. Temuan ini sejalan dengan Febliza et al. (2023) yang menyatakan bahwa desain antarmuka media pembelajaran digital yang menarik dan mudah dioperasikan dapat meningkatkan pengalaman belajar pengguna.

Instrumen tes keterampilan berpikir kritis juga memperoleh persentase validasi sebesar 87,50% dengan kategori sangat valid. Instrumen berupa enam soal esai disusun berdasarkan indikator berpikir kritis Facione, yaitu *interpretation*, *analysis*, *evaluation*, *inference*, *explanation*, dan *self-regulation*. Bentuk soal esai memungkinkan peserta didik menjelaskan alasan, menganalisis hubungan antarkonsep, mengevaluasi informasi, menarik kesimpulan, serta merumuskan solusi terhadap permasalahan yang diberikan. Dengan demikian, instrumen tersebut tidak hanya mengukur penguasaan materi, tetapi juga mengukur keterampilan berpikir kritis peserta didik secara lebih komprehensif.

Secara keseluruhan, hasil validasi menunjukkan bahwa e-modul interaktif berbasis STEM telah memenuhi aspek kelayakan materi, media, dan instrumen sehingga layak digunakan dalam pembelajaran Biologi pada materi struktur dan fungsi jantung. Kelayakan tersebut menunjukkan bahwa e-modul dapat digunakan sebagai alternatif bahan ajar digital yang mendukung implementasi Kurikulum Merdeka melalui pembelajaran yang interaktif, kontekstual, dan berpusat pada peserta didik.

Kepraktisan E-Modul Interaktif Berbasis STEM

Kepraktisan e-modul diketahui melalui angket respons guru dan peserta didik setelah menggunakan produk dalam pembelajaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa respons guru memperoleh persentase sebesar 100%, sedangkan respons peserta didik memperoleh persentase sebesar 90%. Kedua hasil tersebut berada pada kategori sangat praktis. Temuan ini menunjukkan bahwa e-modul mudah digunakan, menarik, dan dapat mendukung proses pembelajaran dari sudut pandang guru maupun peserta didik.

Persentase respons guru yang mencapai 100% menunjukkan bahwa e-modul telah sesuai dengan kebutuhan pembelajaran Biologi dalam Kurikulum Merdeka. Guru menilai bahwa penyajian materi mudah dipahami, tampilan media menarik, dan aktivitas pembelajaran berbasis STEM mampu mendukung pelaksanaan pembelajaran yang lebih aktif serta berpusat pada peserta didik. Selain itu, keberadaan video pembelajaran, LKPD, dan asesmen dalam satu media memudahkan guru mengelola proses pembelajaran secara lebih efektif dan efisien.

Respons peserta didik sebesar 90% menunjukkan bahwa e-modul diterima dengan sangat baik oleh pengguna. Peserta didik menilai bahwa materi lebih mudah dipahami karena disajikan melalui ilustrasi, gambar, dan video yang menarik. Aktivitas pembelajaran berbasis STEM juga memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk berdiskusi, menganalisis masalah, dan menyelesaikan tugas secara mandiri maupun berkelompok. Kondisi tersebut membuat peserta didik lebih aktif dalam pembelajaran dibandingkan ketika hanya menggunakan buku paket atau LKS.

Hasil penelitian ini didukung oleh Nurlita dan Suryaningsih (2021) yang menyatakan bahwa bahan ajar elektronik interaktif dapat meningkatkan keterlibatan peserta didik dalam proses pembelajaran. Selain itu, penggunaan e-modul memberikan fleksibilitas belajar karena dapat diakses melalui perangkat digital sehingga peserta didik memiliki kesempatan untuk mempelajari kembali materi sesuai dengan kebutuhan dan kecepatan belajarnya.

Dengan demikian, hasil respons guru dan peserta didik menunjukkan bahwa e-modul interaktif berbasis STEM memiliki tingkat kepraktisan sangat tinggi. E-modul tersebut mudah diakses, mudah digunakan, dan dapat diimplementasikan dalam pembelajaran Biologi pada materi struktur dan fungsi jantung.

Keefektifan E-Modul Interaktif Berbasis STEM dalam Meningkatkan Keterampilan Berpikir Kritis

Keefektifan e-modul dianalisis berdasarkan hasil *pretest* dan *posttest* keterampilan berpikir kritis peserta didik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata nilai *pretest* sebesar 61,67 meningkat menjadi 90,83 pada *posttest*. Analisis N-Gain menghasilkan nilai sebesar 0,76 atau 76,00% yang termasuk kategori tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan e-modul interaktif berbasis STEM efektif dalam meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik.

Peningkatan keterampilan berpikir kritis menunjukkan bahwa aktivitas pembelajaran yang dirancang dalam e-modul mampu mendorong peserta didik untuk tidak hanya menghafal materi. Peserta didik juga diarahkan untuk memahami hubungan antara struktur dan fungsi jantung melalui penyelesaian masalah yang kontekstual. Setiap aktivitas pembelajaran disusun dengan mengintegrasikan unsur STEM sehingga peserta didik terlibat dalam mengidentifikasi masalah, menganalisis informasi, menggunakan data, merancang solusi, dan mengevaluasi

hasil. Proses tersebut memberikan pengalaman belajar yang lebih aktif dan bermakna.

Elemen sains dalam e-modul diwujudkan melalui kegiatan memahami struktur anatomi dan mekanisme kerja jantung. Elemen teknologi diterapkan melalui penggunaan video pembelajaran, kode QR, serta penyajian e-modul dalam format digital. Elemen rekayasa diterapkan melalui aktivitas merancang solusi atau model yang berkaitan dengan mekanisme kerja jantung. Sementara itu, elemen matematika digunakan dalam kegiatan membaca, menghitung, dan menganalisis data yang berkaitan dengan denyut jantung atau sistem peredaran darah. Integrasi keempat unsur tersebut memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk menggunakan konsep yang dipelajari dalam penyelesaian masalah secara sistematis.

Penyusunan soal evaluasi berdasarkan indikator berpikir kritis Facione juga memberikan kesempatan kepada peserta didik untuk mengembangkan kemampuan interpretasi, analisis, evaluasi, inferensi, eksplanasi, dan regulasi diri. Peserta didik tidak hanya diminta menentukan jawaban, tetapi juga menjelaskan alasan dan menggunakan konsep ilmiah dalam menyelesaikan permasalahan yang berkaitan dengan struktur dan fungsi jantung. Dengan demikian, peningkatan nilai yang diperoleh mencerminkan perkembangan keterampilan berpikir kritis peserta didik setelah mengikuti pembelajaran menggunakan e-modul.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Bybee (2013) yang menyatakan bahwa pembelajaran berbasis STEM mampu meningkatkan keterampilan berpikir kritis karena mengintegrasikan konsep sains dengan penerapan teknologi, rekayasa, dan matematika dalam penyelesaian masalah nyata. Hasil penelitian ini juga memperkuat temuan bahwa penggunaan bahan ajar digital interaktif berbasis STEM dapat memberikan dampak positif terhadap keterampilan berpikir kritis dan kemampuan pemecahan masalah peserta didik dalam pembelajaran sains.

Secara keseluruhan, e-modul interaktif berbasis STEM yang dikembangkan telah memenuhi kriteria valid, sangat praktis, dan efektif. Oleh karena itu, e-modul ini dapat digunakan sebagai alternatif bahan ajar digital untuk mendukung implementasi Kurikulum Merdeka, khususnya pada pembelajaran materi struktur dan fungsi jantung, sekaligus membantu meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, e-modul interaktif berbasis *Science, Technology, Engineering, and Mathematics* (STEM) pada materi struktur dan fungsi jantung yang dikembangkan menggunakan model 4-D telah memenuhi kriteria valid, sangat praktis, dan efektif. Kelayakan produk ditunjukkan oleh hasil validasi ahli materi sebesar 92,85%, ahli media sebesar 97,91%, dan validasi instrumen tes sebesar 87,50%. Seluruh hasil validasi tersebut berada pada kategori sangat valid.

Kepraktisan e-modul ditunjukkan oleh respons guru sebesar 100% dan respons peserta didik sebesar 90% yang termasuk kategori sangat praktis. Keefektifan produk ditunjukkan oleh peningkatan rata-rata nilai keterampilan berpikir kritis dari 61,67 pada *pretest* menjadi 90,83 pada *posttest*, dengan nilai N-Gain sebesar 0,76 yang termasuk kategori tinggi. Dengan demikian, e-modul interaktif berbasis STEM layak digunakan sebagai alternatif bahan ajar digital untuk mendukung implementasi Kurikulum Merdeka dan meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik pada materi struktur dan fungsi jantung.

DAFTAR PUSTAKA

- Anfa, Q., Agnafia, D. N., & Astriawati, F. (2023). Improving undergraduate biology students' critical thinking skills through a case study-based free inquiry module. *BIO-INOVED: Jurnal Biologi-Inovasi Pendidikan*, 5(3), 314–320. <https://doi.org/10.20527/bino.v5i3.16713>
- Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. NSTA Press.
- Campbell, N. A., Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., & Orr, R. B. (2021). *Campbell biology* (12th ed.). Pearson.
- Damayanti, S., Zaini, M., & Halang, B. (2022). Development of high school biology student worksheets based on critical thinking skills on the coordination system concept. *BIO-INOVED: Jurnal Biologi-Inovasi Pendidikan*, 4(1), 46–55. <https://doi.org/10.20527/bino.v4i1.11816>
- Facione, P. A. (2015). *Critical thinking: What it is and why it counts*. Insight Assessment.
- Febliza, A., Afdal, Z., & Copriady, J. (2023). Improving students' critical thinking skills: Is interactive video and interactive web module beneficial? *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 17(3), 70–86. <https://doi.org/10.3991/ijim.v17i03.34699>
- Fitriani, A., Suryani, N., & Wibowo, A. (2023). Development of STEM-based digital modules to improve students' critical thinking skills in science learning. *Journal of Science Education*, 7(2), 145–156.
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Han, S., Capraro, R. M., & Capraro, M. M. (2015). How science, technology, engineering, and mathematics project-based learning affects high, middle, and low achievers differently: The impact of student factors on achievement. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 13(5), 1089–1113. <https://doi.org/10.1007/s10763-014-9526-0>
- Jufriadi, A., Huda, C., Aji, S. D., Pratiwi, H. Y., & Ayu, H. D. (2022). Analisis keterampilan abad ke-21 melalui implementasi Kurikulum Merdeka Belajar

- Kampus Merdeka. *Jurnal Pendidikan dan Kebudayaan*, 7(1), 39–53.
<https://doi.org/10.24832/jpnk.v7i1.2482>
- Kelley, T. R., & Knowles, J. G. (2016). A conceptual framework for integrated STEM education. *International Journal of STEM Education*, 3, Article 11.
<https://doi.org/10.1186/s40594-016-0046-z>
- Kustiani, H., Zaini, M., & Mulyadi, M. (2020). Critical thinking skills of high school students in biology learning on the concept of structure and function of plant tissues. *BIO-INOVED: Jurnal Biologi-Inovasi Pendidikan*, 2(1), 20–25. <https://doi.org/10.20527/bino.v2i1.7888>
- Mahadiraja, D., & Syamsuarnis. (2020). Pengembangan modul pembelajaran berbasis daring pada mata pelajaran instalasi penerangan listrik kelas XI Teknik Instalasi Tenaga Listrik T.P. 2019/2020 di SMK Negeri 1 Pariaman. *JTEV: Jurnal Teknik Elektro dan Vokasional*, 6(1), 77–82.
<https://doi.org/10.24036/jtev.v6i1.107612>
- OECD. (2023). *PISA 2022 results: The state of learning and equity in education* (Vol. 1). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/53f23881-en>
- Prastowo, A. (2018). *Pengembangan bahan ajar tematik*. Kencana.
- Rahayu, E., Sadikin, A., & Hamidah, A. (2024). Pengembangan e-modul interaktif berbentuk *flipbook* pada materi sistem ekskresi untuk kelas XI SMA. *Biodik*, 10(2), 210–220. <https://doi.org/10.22437/biodik.v10i2.35172>
- Rahmawati, D., & Suryadi, D. (2021). Improving students' critical thinking skills through innovative learning media. *Journal of Educational Research*, 15(2), 120–128.
- Sari, N., Hidayat, T., & Putri, D. (2022). Development of interactive e-modules in biology learning. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia*, 8(1), 45–54.
- Sugiharti, N., & Gayatri, Y. (2021). Profil kemampuan berpikir kritis siswa SMA Muhammadiyah Kota Surabaya pada pembelajaran biologi. *Jurnal Pedago Biologi*, 9(1), 34–40.
- Suryaningsih, Y., & Nurlita, R. (2021). Pengembangan e-modul berbasis STEM untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis peserta didik. *Jurnal Inovasi Pendidikan IPA*, 7(2), 214–224.
- Sutrisno, H., Widodo, A., & Sumarno. (2021). STEM-based learning to enhance critical thinking skills in science education. *Journal of Science Learning*, 4(3), 210–218.
- Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional development for training teachers of exceptional children: A sourcebook*. Leadership Training Institute/Special Education, University of Minnesota.
- Utami, R., & Widodo, A. (2020). Students' difficulties in understanding human circulatory system concepts. *Journal of Biological Education*, 9(2), 134–142.
- Wulandari, S., Kurniawan, D., & Pratama, R. (2022). Development of interactive e-modules to improve learning outcomes in biology. *Jurnal Pendidikan Sains*, 10(1), 75–83.