

AKTIVITAS KOGNITIF SISWA SMA PADA PEMBELAJARAN EUBACTERIA MENGGUNAKAN LABORATORIUM VIRTUAL BERBASIS *AUGMENTED REALITY*

Dewi Susanti¹, Heri Setiadi², Kusnadi³, Yanti Hamdiyati⁴, Eni Nuraeni⁵
Universitas Pendidikan Indonesia^{1,3,4,5}, SEAMEO QITEP in Science²
dewisusanti@upi.edu¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai aktivitas kognitif siswa SMA dalam pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis AR. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif dengan metode studi kasus. Partisipan penelitian terdiri atas 20 siswa kelas X SMA. Data aktivitas kognitif dikumpulkan menggunakan lembar observasi berbasis *Think-Aloud Protocols* (TAPs). Data verbal siswa dikodekan dan dikategorikan berdasarkan jenis serta ketepatan aktivitas kognitif yang muncul selama proses pembelajaran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas kognitif yang paling banyak muncul adalah mengidentifikasi. Aktivitas kognitif tidak akurat paling banyak ditemukan ketika siswa membuat hipotesis. Rata-rata nilai aktivitas kognitif siswa dalam pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis AR sebesar 70,28 dan termasuk dalam kategori tinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa laboratorium virtual berbasis AR dapat memfasilitasi munculnya berbagai aktivitas kognitif siswa dalam mempelajari Eubacteria.

Kata Kunci: Aktivitas Kognitif, *Augmented Reality*, Eubacteria, Laboratorium Virtual, *Think-Aloud Protocols*

ABSTRACT

This study aimed to obtain information about high school students' cognitive activities during Eubacteria learning using an AR-based virtual laboratory. This study employed a descriptive approach with a case study method. The participants consisted of 20 tenth-grade high school students. Data on students' cognitive activities were collected using an observation sheet based on Think-Aloud Protocols (TAPs). Students' verbal data were coded and categorized according to the types and accuracy of cognitive activities that emerged during learning. The results showed that identifying was the most frequently occurring cognitive activity. The highest frequency of inaccurate cognitive activities occurred when students formulated hypotheses. The mean score of students' cognitive activities during Eubacteria learning using the AR-based virtual laboratory was 70.28 and was categorized as high. These findings indicate that an AR-based virtual laboratory can facilitate the emergence of various cognitive activities when students learn about Eubacteria.

Keywords: *Augmented Reality, Cognitive Activity, Eubacteria, Think-Aloud Protocols, Virtual Laboratory*

PENDAHULUAN

Kegiatan praktikum merupakan bagian integral dari pembelajaran Biologi dan pendidikan sains karena memberikan kesempatan kepada siswa untuk menghubungkan pengetahuan teoretis dengan kegiatan pengamatan serta penyelidikan (Rustaman, 2013). Melalui praktikum, siswa tidak hanya memperoleh informasi, tetapi juga terlibat dalam proses mengamati, mempertanyakan, memprediksi, merencanakan penyelidikan, mengolah data, mengevaluasi hasil, dan mengomunikasikan temuan.

Materi Eubacteria dipelajari oleh siswa SMA kelas X. Dalam Kurikulum Merdeka, pembelajaran materi tersebut berkaitan dengan capaian pembelajaran pada aspek pemahaman dan keterampilan proses. Capaian pembelajaran pada aspek pemahaman mengarahkan siswa untuk mendeskripsikan peranan bakteri dalam kehidupan. Sementara itu, capaian keterampilan proses menuntut siswa untuk mengamati, mempertanyakan dan memprediksi, merencanakan dan melakukan penyelidikan, memproses dan menganalisis data, mengevaluasi dan melakukan refleksi, serta mengomunikasikan hasil. Keterampilan tersebut dapat dikembangkan melalui kegiatan praktikum yang memberikan pengalaman belajar secara langsung.

Dalam pembelajaran Eubacteria, guru umumnya menggunakan gambar atau media visual untuk menjelaskan struktur, bentuk, klasifikasi, dan karakteristik bakteri. Pemahaman terhadap representasi visual melibatkan aktivitas kognitif siswa. Aktivitas kognitif berkaitan dengan kegiatan mengingat, menerapkan pengetahuan awal, mengidentifikasi informasi, menghubungkan konsep, dan mengungkapkan alasan secara logis (Schnotz, 2014).

Efektivitas representasi visual sangat dipengaruhi oleh proses persepsi dan pengolahan informasi secara kognitif. Persepsi visual bersifat selektif karena siswa hanya dapat memusatkan perhatian pada sejumlah elemen visual dalam waktu tertentu (de Koning et al., 2009). Kemampuan siswa memahami suatu representasi visual juga berkaitan dengan pengetahuan awal yang dimiliki (Susanti & Rahmat, 2025). Prinsip tersebut menjadi penting ketika media visual digunakan untuk menggantikan pengalaman pengamatan langsung terhadap objek yang tidak dapat dilihat tanpa bantuan peralatan, seperti bakteri.

Pembelajaran Eubacteria tidak cukup hanya disajikan melalui penjelasan teoretis, tetapi perlu didukung oleh kegiatan pengamatan di laboratorium. Namun, keterbatasan sarana dan prasarana menyebabkan siswa tidak selalu dapat melaksanakan praktikum secara langsung. Siswa juga dapat mengalami kesulitan dalam memahami objek mikroskopis seperti Eubacteria karena objek tersebut tidak dapat diamati dengan penglihatan biasa (Khotimah, 2014). Guru juga menghadapi

tantangan dalam membantu siswa memahami struktur dan klasifikasi Eubacteria secara konkret (Eady & Lockyer, 2013).

Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk mengatasi keterbatasan praktikum adalah laboratorium virtual. Laboratorium virtual merupakan lingkungan eksperimental berbasis simulasi komputer dan teknologi digital yang memungkinkan siswa melaksanakan atau mempelajari kegiatan praktikum dalam lingkungan virtual (Li & Liang, 2024). Laboratorium virtual dapat digunakan untuk menyimulasikan konsep atau objek yang abstrak dan sulit dipraktikkan secara langsung (Putra, 2014).

Simulasi laboratorium virtual dapat membantu siswa mengenali prosedur, peralatan, dan tahapan kegiatan laboratorium serta mengembangkan keterampilan praktis awal (Casado et al., 2025). Penggunaan laboratorium virtual juga menawarkan sejumlah kelebihan, seperti fleksibilitas waktu dan tempat, pengurangan kebutuhan pengadaan peralatan secara berkelanjutan, keamanan kegiatan eksperimen, dan efisiensi waktu pada percobaan yang memerlukan proses panjang (Špernjak & Šorgo, 2009).

Pemanfaatan laboratorium virtual dapat diperkuat melalui teknologi *augmented reality* (AR). *Augmented reality* merupakan teknologi yang menggabungkan objek virtual dua atau tiga dimensi dengan lingkungan nyata (Pamoedji et al., 2017). Teknologi tersebut memungkinkan siswa mengamati objek tiga dimensi yang sebelumnya hanya disajikan dalam bentuk gambar dua dimensi.

Teknologi AR memadukan lingkungan nyata dengan objek virtual berbantuan komputer sehingga kedua unsur tersebut tampak berada dalam ruang yang sama (Wang et al., 2018). AR memiliki karakteristik yang berbeda dengan *virtual reality* (VR). VR membawa pengguna ke lingkungan virtual, sedangkan AR menambahkan objek virtual ke dalam lingkungan nyata dan memungkinkan pengguna berinteraksi dengan objek tersebut (Subran & Mahmud, 2024).

Penggunaan AR dalam pembelajaran Biologi dapat membantu menjembatani kesenjangan konseptual melalui visualisasi interaktif terhadap objek dan proses biologis yang sulit diamati menggunakan media konvensional. Arifin dan Rahmatullah (2025) menunjukkan bahwa AR mampu menyajikan fenomena biologis secara interaktif dan waktu nyata sehingga membantu pengguna memahami konsep yang sulit divisualisasikan.

Pengembangan simulasi berbasis AR juga telah dilakukan untuk membantu siswa memahami teknik penanaman bakteri dan dinamika pertumbuhan sel *Escherichia coli* pada media agar (Hartman, 2011). Selain itu, penerapan AR dalam pembelajaran bakteri memperoleh respons positif dari siswa, membantu memperkenalkan prosedur eksperimen, dan dapat menjadi salah satu solusi terhadap keterbatasan alat praktikum (Wildan et al., 2019).

Penelitian mengenai laboratorium virtual dan AR telah dilakukan dalam berbagai konteks pembelajaran. Namun, kajian mengenai keduanya masih sering dilakukan secara terpisah dan lebih banyak berfokus pada hasil belajar, respons

pengguna, atau kelayakan media. Aktivitas kognitif yang muncul ketika siswa melaksanakan praktikum Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis AR belum banyak dijelaskan secara mendalam.

Teknologi AR juga telah dikaji dalam kaitannya dengan beban kognitif atau *cognitive load*. Penggunaan AR dilaporkan dapat membantu mengelola beban kognitif dan meningkatkan pemahaman siswa (Sattar et al., 2025). Meskipun demikian, penelitian tersebut belum secara khusus menggambarkan jenis dan ketepatan aktivitas kognitif yang muncul selama siswa menggunakan laboratorium virtual berbasis AR.

Kebaruan penelitian ini terletak pada penggunaan *Think-Aloud Protocols* untuk mengungkap aktivitas kognitif siswa ketika melaksanakan pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis AR. Pendekatan tersebut memungkinkan proses berpikir siswa diamati melalui laporan verbal yang muncul selama penggunaan media.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai aktivitas kognitif siswa SMA dalam pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*. Penelitian secara khusus diarahkan untuk mengidentifikasi jenis aktivitas kognitif yang muncul, ketepatan aktivitas kognitif, dan capaian aktivitas kognitif siswa selama proses pembelajaran.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif dengan metode studi kasus. Penelitian bertujuan untuk menggambarkan aktivitas kognitif siswa selama pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*. Studi kasus digunakan untuk memperoleh gambaran terperinci mengenai aktivitas kognitif siswa dalam konteks pembelajaran tertentu. Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengamati secara mendalam proses berpikir siswa selama berinteraksi dengan fitur-fitur laboratorium virtual. Selain itu, penelitian berfokus pada bagaimana siswa menerima, mengolah, dan menghubungkan informasi yang diperoleh dari visualisasi objek Eubacteria berbasis *augmented reality*. Data yang diperoleh diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai peran teknologi *augmented reality* dalam mendukung perkembangan aktivitas kognitif siswa pada pembelajaran biologi.

Laboratorium virtual berbasis AR yang digunakan dalam penelitian dikembangkan oleh peneliti menggunakan aplikasi Assemblr Edu. Media tersebut telah melalui tahap validasi, uji coba, implementasi, dan evaluasi sebelum digunakan dalam kegiatan pembelajaran. Laboratorium virtual menggunakan sistem pelacakan tanpa penanda atau *markerless tracking* sehingga rangkaian tahapan praktikum bakteri dapat ditampilkan secara langsung pada meja kerja laboratorium dengan skala yang menyerupai ukuran sebenarnya dan berdampingan dengan peralatan fisik yang digunakan siswa.

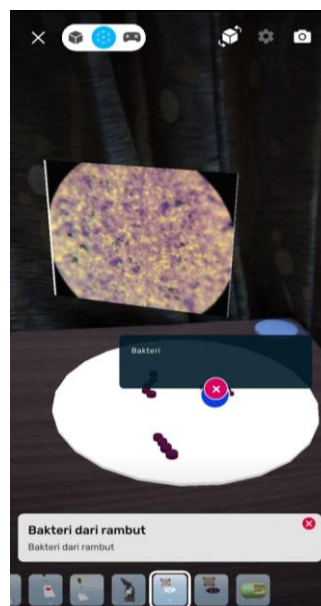
Tahapan pengambilan koloni bakteri dari biakan hasil isolasi plak gigi menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality* disajikan pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tahap Pengambilan Koloni Bakteri

Gambar 1 menampilkan tahapan pengambilan koloni bakteri dari biakan hasil isolasi plak gigi. Koloni yang ditunjukkan oleh anotasi angka 2 diambil menggunakan ose yang ditunjukkan oleh anotasi angka 1. Pengambilan koloni dilakukan secara aseptik pada zona steril di sekitar nyala pembakar Bunsen.

Hasil pengamatan mikroskopis bakteri dari sampel rambut setelah dilakukan pewarnaan Gram disajikan pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Bakteri dari Rambut

Gambar 2 menampilkan hasil pengamatan mikroskopis sampel dari rambut setelah dilakukan pewarnaan Gram. Pengamatan dilakukan pada perbesaran $1.000\times$ menggunakan minyak imersi. Sel bakteri yang teramati berbentuk kokus dengan susunan menyerupai rantai. Sel bakteri tampak berwarna ungu, yang menunjukkan bahwa kompleks kristal violet-iodin tetap dipertahankan setelah proses dekolorisasi. Berdasarkan hasil pewarnaan tersebut, bakteri menunjukkan karakteristik Gram positif.

Pemilihan kelas dilakukan secara purposif dengan kriteria kelas yang belum memperoleh pembelajaran mengenai materi Eubacteria. Kriteria tersebut digunakan untuk mengendalikan pengaruh pengalaman belajar sebelumnya terhadap aktivitas kognitif siswa. Selanjutnya, seluruh siswa pada kelas terpilih dijadikan partisipan penelitian melalui teknik sampling total. Partisipan penelitian berjumlah 20 siswa, terdiri atas 12 siswa perempuan dan delapan siswa laki-laki. Penelitian ini telah memperoleh izin pelaksanaan dari pihak sekolah sebelum proses pengumpulan data dilakukan.

Instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah lembar observasi aktivitas kognitif berbasis *Think-Aloud Protocols* (TAPs). Instrumen TAPs digunakan untuk mengidentifikasi aktivitas kognitif yang berlangsung dalam memori kerja siswa selama mengikuti pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*. Dalam pelaksanaannya, siswa diminta mengungkapkan secara verbal hal-hal yang sedang dipikirkan ketika mengamati objek, membaca petunjuk, menentukan langkah praktikum, membuat hipotesis, dan menyimpulkan hasil pengamatan.

Laporan verbal yang diperoleh melalui TAPs kemudian ditranskripsikan, disegmentasi, dan dikategorikan ke dalam jenis aktivitas kognitif melalui proses pengodean. Proses pengodean dilakukan dengan menganalisis setiap unit pernyataan siswa untuk menentukan jenis aktivitas kognitif yang muncul dan ketepatannya berdasarkan konsep ilmiah. Hasil pengodean selanjutnya digunakan sebagai data untuk menggambarkan jenis, frekuensi, dan ketepatan aktivitas kognitif siswa selama proses pembelajaran (Cromley et al., 2010).

Penggunaan TAPs perlu dipertimbangkan karena kegiatan mengungkapkan pikiran secara verbal dapat memengaruhi cara siswa memproses informasi. Park et al. (2020) menemukan bahwa TAP dapat memengaruhi pemrosesan informasi visual yang diukur melalui *eye-tracking*, beban kognitif, dan performa retensi, tetapi tidak memengaruhi pemahaman atau performa transfer. Oleh karena itu, data TAPs dalam penelitian ini digunakan untuk menggambarkan laporan verbal aktivitas kognitif yang muncul selama proses pembelajaran.

Skema pengodean data verbal ke dalam jenis aktivitas kognitif disajikan pada Tabel 1 berikut. Skema ini digunakan sebagai pedoman untuk mengklasifikasikan respons verbal siswa berdasarkan indikator aktivitas kognitif yang telah ditetapkan. Melalui proses pengodean tersebut, data verbal dapat

dianalisis secara sistematis sehingga memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai aktivitas kognitif siswa selama proses pembelajaran berlangsung.

Tabel 1. Skema Pengkodean Data Verbal ke dalam Jenis Aktivitas Kognitif

Jenis aktivitas kognitif yang muncul	Definisi	Contoh laporan verbal siswa
Aktivasi pengetahuan awal	Siswa mengaktifkan pengetahuan awal yang relevan dari memori jangka panjang sebelum atau saat mempelajari materi Eubacteria.	“Saya tahu bahwa bakteri ukurannya mikroskopis, sehingga hanya bisa dilihat menggunakan bantuan mikroskop.”
Mengidentifikasi	Siswa dapat mengidentifikasi informasi-informasi pada materi Eubacteria.	Langkah pertama pada praktikum bakteri yaitu mencairkan medium agar menggunakan bunsen.
Memaknai simbol	Siswa dapat memaknai simbol yang ada dalam pembelajaran Eubacteria. Misalnya simbol tanda bentuk dan warna.	Bakteri dari rambut berwarna ungu, bakteri tersebut termasuk bakteri gram positif.
Membuat hipotesis	Siswa dapat membuat hipotesis tentang sesuatu atau informasi apa yang akan muncul selanjutnya dalam materi Eubacteria.	“Jika tumbuhan memerlukan karbon dioksida, maka bakteri mengeluarkan karbon dioksida, saya rasa itu disebut proses respirasi.”
Menginferensi pengetahuan	Siswa dapat menarik kesimpulan tentang materi Eubacteria.	“Eubacteria terdiri dari bakteri yang mempunyai bentuk batang, bulat, koma, dan spiral. Eubacteria merupakan organisme prokariotik”
Mengelaborasi pengetahuan	Siswa dapat menarik kesimpulan tentang materi Eubacteria dan diperkuat dengan pengetahuan awal yang dimilikinya.	“Eubacteria berukuran mikroskopis. Memiliki bentuk batang, bulat, koma, dan spiral. Eubacteria dapat bergerak karena memiliki alat gerak berupa flagel.”

Data aktivitas kognitif dibedakan berdasarkan tingkat ketepatannya menjadi aktivitas kognitif akurat dan tidak akurat. Aktivitas kognitif yang dianalisis meliputi mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Pengelompokan tersebut dilakukan untuk mengetahui jenis, frekuensi kemunculan, dan ketepatan aktivitas kognitif siswa selama pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*.

Data verbal siswa diperoleh melalui rekaman audio dan video menggunakan Google Meet atau Zoom. Selain itu, data aktivitas kognitif diperoleh dari jawaban siswa pada Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD) praktikum bakteri. Data yang diperoleh selanjutnya ditranskripsikan, direduksi, dikodekan, dan dikelompokkan berdasarkan indikator aktivitas kognitif yang telah ditetapkan.

Analisis data menggunakan model analisis interaktif Miles dan Huberman (1994), yang meliputi pengumpulan data, reduksi data, penyajian data, serta penarikan kesimpulan dan verifikasi. Pengumpulan data dilakukan melalui laporan verbal siswa dan jawaban pada LKPD. Reduksi data dilakukan dengan memilih data yang relevan dengan indikator aktivitas kognitif. Data kemudian disajikan berdasarkan jenis, frekuensi, dan ketepatan aktivitas kognitif yang muncul selama pembelajaran. Tahap terakhir dilakukan melalui penarikan kesimpulan dan verifikasi berdasarkan pola yang ditemukan dalam data.

Frekuensi aktivitas kognitif dihitung berdasarkan jumlah kemunculan setiap indikator selama pembelajaran. Ketepatan aktivitas kognitif ditentukan dengan membandingkan laporan verbal dan jawaban siswa dengan konsep ilmiah yang relevan. Berdasarkan hasil pengodean tersebut, setiap aktivitas kognitif dikategorikan sebagai aktivitas akurat atau tidak akurat.

Nilai aktivitas kognitif diperoleh berdasarkan skor frekuensi dan akurasi aktivitas kognitif siswa. Penilaian dilakukan menggunakan rubrik dengan rentang skor 1 sampai dengan 3. Nilai yang diperoleh kemudian dikonversi dan diinterpretasikan berdasarkan kategori aktivitas kognitif. Kategorisasi nilai aktivitas kognitif siswa disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kategorisasi Nilai Aktivitas Kognitif

Nilai	Keterangan
80-100	Sangat tinggi
60-79	Tinggi
40-59	Sedang
20-39	Rendah
0-19	Sangat rendah

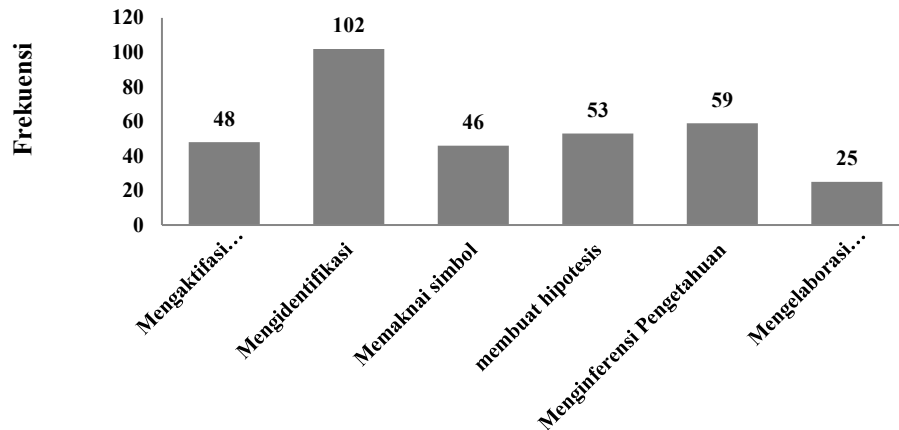
Berdasarkan Tabel 2, nilai aktivitas kognitif pada rentang 80–100 termasuk kategori sangat tinggi, sedangkan nilai pada rentang 60–79 termasuk kategori tinggi. Nilai pada rentang 40–59 termasuk kategori sedang, nilai pada rentang 20–39 termasuk kategori rendah, dan nilai pada rentang 0–19 termasuk kategori sangat rendah. Kriteria tersebut digunakan untuk menginterpretasikan capaian aktivitas kognitif siswa selama pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*.

HASIL PENELITIAN

Aktivitas kognitif merupakan kegiatan mental yang berlangsung dalam *working memory* ketika seseorang berpikir (Cromley et al., 2010). Berdasarkan hasil analisis data verbal dan tertulis siswa, ditemukan enam jenis aktivitas kognitif, yaitu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Jenis aktivitas kognitif tersebut memiliki kesamaan dengan aktivitas kognitif yang

ditemukan oleh Cromley et al. (2010), Kragten et al. (2015), dan Brandstetter et al. (2017).

Frekuensi kemunculan setiap jenis aktivitas kognitif selama pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality* disajikan pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Frekuensi Jenis Aktivitas Kognitif

Berdasarkan Gambar 3, aktivitas kognitif yang paling banyak muncul selama pembelajaran adalah mengidentifikasi. Tingginya frekuensi aktivitas tersebut menunjukkan bahwa siswa banyak terlibat dalam mengenali objek, menjelaskan tahapan praktikum, dan menentukan karakteristik bakteri yang diamati melalui laboratorium virtual berbasis *augmented reality*.

Seluruh siswa telah mampu mengaktifkan pengetahuan awalnya mengenai bakteri. Selama pembelajaran Eubacteria, aktivitas mengaktifkan pengetahuan awal muncul sebanyak 48 kali. Siswa menyampaikan bahwa materi bakteri pernah dipelajari ketika berada pada jenjang sekolah dasar dan sekolah menengah pertama. Beberapa siswa juga memperoleh informasi mengenai bakteri melalui buku dan tayangan televisi.

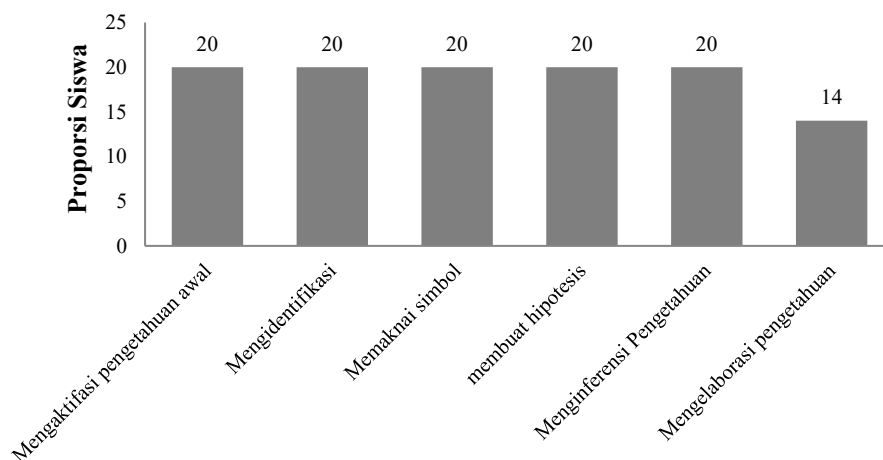
Pengetahuan awal yang diungkapkan siswa meliputi pengertian bakteri sebagai mikroorganisme atau kuman, kemampuan bakteri menyebabkan penyakit, ukuran bakteri yang tidak dapat dilihat secara langsung, keberagaman bentuk bakteri, habitat bakteri pada tubuh manusia dan berbagai benda, karakteristik bakteri sebagai organisme prokariotik, serta kemampuan beberapa jenis bakteri dalam melakukan fotosintesis. Pernyataan tersebut merupakan pengetahuan yang sebelumnya telah tersimpan dalam *long-term memory* siswa dan diaktifkan kembali selama pembelajaran.

Selain mengaktifkan pengetahuan awal dan mengidentifikasi, siswa juga mampu menginferensi pengetahuan. Aktivitas tersebut tampak ketika siswa menarik kesimpulan mengenai bentuk bakteri dari sampel rambut dan plak gigi serta struktur sel bakteri. Sebagai contoh, siswa menjelaskan bahwa sel bakteri

memiliki tiga lapisan pembungkus, yaitu kapsul, dinding sel, dan membran sel. Siswa juga menjelaskan bahwa dinding sel bakteri mengandung peptidoglikan.

Aktivitas mengelaborasi pengetahuan muncul ketika siswa mengembangkan penjelasan dengan menghubungkan hasil pengamatan, pengetahuan awal, dan konsep yang dipelajari. Elaborasi tersebut antara lain berkaitan dengan bentuk bakteri dari sampel rambut dan plak gigi serta hubungan antara struktur dinding sel dan hasil pewarnaan Gram. Frekuensi setiap jenis aktivitas kognitif kemudian diperkuat dengan data mengenai proporsi siswa yang memunculkan masing-masing aktivitas.

Proporsi siswa yang memunculkan setiap jenis aktivitas kognitif selama pembelajaran Eubacteria disajikan pada Gambar 4 berikut.

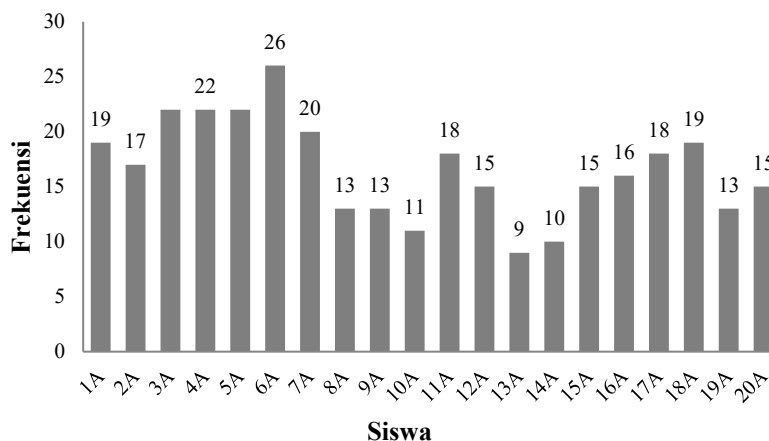


Gambar 4. Proporsi Siswa yang Memunculkan Aktivitas Kognitif

Berdasarkan Gambar 4, seluruh siswa yang berjumlah 20 orang atau 100% mampu memunculkan aktivitas kognitif berupa mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, dan menginferensi pengetahuan. Sementara itu, aktivitas mengelaborasi pengetahuan hanya dimunculkan oleh 14 siswa.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa aktivitas mengelaborasi pengetahuan belum muncul secara merata pada seluruh siswa. Elaborasi membutuhkan kemampuan untuk menghubungkan beberapa informasi, mengembangkan penjelasan, dan menggunakan pengetahuan yang telah dimiliki untuk menjelaskan situasi baru. Oleh karena itu, aktivitas mengelaborasi pengetahuan memiliki tuntutan kognitif yang lebih kompleks dibandingkan aktivitas mengidentifikasi atau mengaktifkan pengetahuan awal.

Selain dianalisis berdasarkan jenis aktivitas dan proporsi siswa, aktivitas kognitif juga dianalisis berdasarkan frekuensi kemunculannya pada setiap siswa. Frekuensi aktivitas kognitif siswa 1A sampai dengan 20A selama pembelajaran Eubacteria disajikan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Frekuensi Aktivitas Kognitif Siswa 1A-20A Pada Saat Pembelajaran Eubacteria

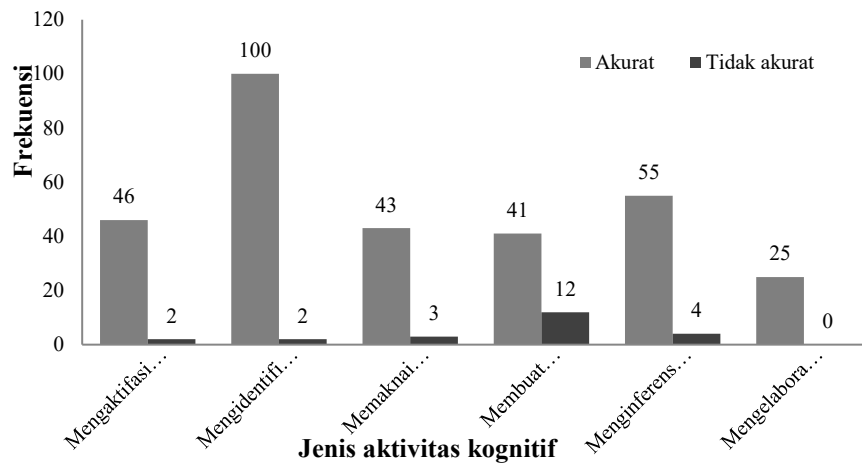
Berdasarkan Gambar 5, siswa 6A memunculkan aktivitas kognitif dengan frekuensi paling tinggi dibandingkan siswa lainnya. Siswa 6A mampu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan.

Siswa 6A menyampaikan bahwa materi bakteri pernah dipelajari saat berada di sekolah menengah pertama melalui kegiatan praktikum. Pada kegiatan tersebut, siswa mengamati bakteri dari tanaman yang membusuk menggunakan mikroskop. Pengalaman tersebut menjadi bagian dari pengetahuan awal yang dapat diaktifkan kembali ketika siswa mengikuti pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*. Pengetahuan awal tersebut membantu siswa mengikuti kegiatan pembelajaran dan memunculkan seluruh jenis aktivitas kognitif yang dianalisis.

Siswa 3A, 4A, dan 5A masing-masing memunculkan 22 aktivitas kognitif selama pembelajaran Eubacteria. Ketiga siswa tersebut mampu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Dari keenam jenis aktivitas kognitif tersebut, aktivitas mengidentifikasi paling banyak muncul.

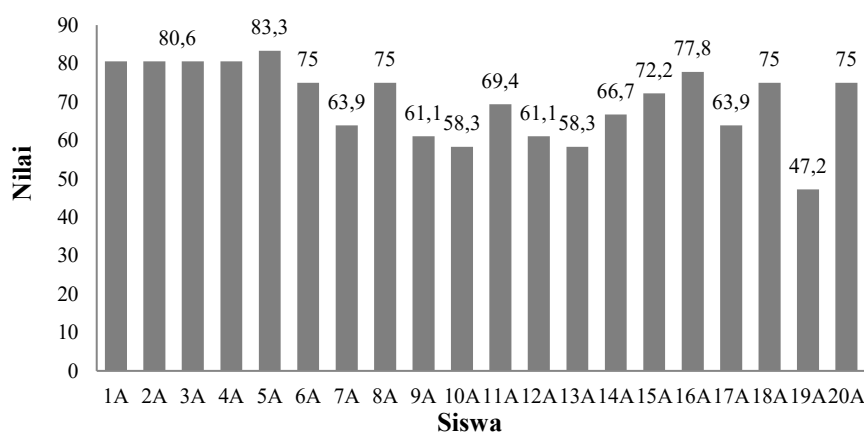
Aktivitas mengidentifikasi terlihat ketika siswa menjelaskan tahapan praktikum kepada teman-teman di kelas. Sebagai contoh, siswa menjelaskan bahwa media *nutrient agar* terlebih dahulu dipanaskan, kemudian dituangkan ke dalam cawan Petri setelah mencair dan selanjutnya ditutup. Siswa juga mengidentifikasi bentuk bakteri dari sampel rambut dan plak gigi serta bagian-bagian struktur sel bakteri.

Tingginya frekuensi aktivitas mengidentifikasi turut berkaitan dengan jumlah aktivitas kognitif akurat dan tidak akurat yang dihasilkan siswa. Perbandingan frekuensi aktivitas kognitif akurat dan tidak akurat disajikan pada Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Jumlah Frekuensi Aktivitas Kognitif Akurat dan Tidak Akurat

Gambar 6 memvisualisasikan jumlah frekuensi aktivitas kognitif yang akurat dan tidak akurat. Aktivitas kognitif mengelaborasi pengetahuan muncul paling sedikit, tetapi semua yang muncul tersebut akurat. Contohnya, siswa mengungkapkan bahwa bakteri dari rambut dan kotoran gigi termasuk bakteri gram positif karena berwarna ungu. Bakteri tersebut memiliki dinding sel yang tebal sehingga bisa menyerap warna ungu dari larutan kristal violet. Bakteri dari rambut berbentuk streptococcus, dan bakteri dari kotoran gigi berbentuk monobasil. Bakteri tersebut hidup di rambut dan gigi manusia. Pernyataan siswa tersebut akurat, karena pada praktikum bakteri menggunakan *augmented reality*, digunakan larutan kristal violet untuk pewarna ungu. Berdasarkan jumlah frekuensi aktivitas kognitif, berikutnya diperoleh data nilai aktivitas kognitif siswa yang dapat diamati pada Gambar 7.



Gambar 7. Nilai Aktivitas Kognitif Siswa pada Pembelajaran Eubacteria Menggunakan Laboratorium Virtual Berbasis *Augmented Reality*

Berdasarkan Gambar 7, rata-rata nilai aktivitas kognitif siswa sebesar 70,28 dan termasuk dalam kategori tinggi. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan skor

frekuensi serta ketepatan aktivitas kognitif yang dikategorikan menjadi akurat dan tidak akurat. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan laboratorium virtual berbasis *augmented reality* dapat memfasilitasi munculnya aktivitas kognitif siswa selama pembelajaran Eubacteria.

Siswa 5A memperoleh nilai aktivitas kognitif tertinggi dan termasuk dalam kategori sangat tinggi. Seluruh jenis aktivitas kognitif dapat dimunculkan oleh siswa 5A dan dikategorikan akurat. Meskipun siswa 5A memiliki jumlah frekuensi aktivitas kognitif yang sama dengan siswa 3A dan 4A, nilai aktivitas kognitif siswa 5A lebih tinggi karena aktivitas yang dimunculkan memiliki tingkat akurasi yang lebih baik.

Siswa 5A juga lebih banyak memunculkan aktivitas menginferensi pengetahuan. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai aktivitas kognitif tidak hanya ditentukan oleh jumlah aktivitas yang muncul, tetapi juga oleh ketepatan konsep pada aktivitas tersebut. Selain siswa 5A, siswa 1A, 2A, 3A, dan 4A juga memperoleh nilai aktivitas kognitif dalam kategori sangat tinggi.

Sebagian besar siswa lainnya memperoleh nilai aktivitas kognitif dalam kategori tinggi. Siswa dalam kategori tersebut telah mampu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Namun, tidak seluruh siswa memunculkan keenam jenis aktivitas kognitif. Siswa 7A, 12A, dan 17A, misalnya, belum memunculkan aktivitas mengelaborasi pengetahuan selama pembelajaran.

Temuan tersebut menunjukkan adanya variasi aktivitas kognitif antarsiswa. Laboratorium virtual berbasis *augmented reality* memberikan kesempatan kepada siswa untuk mengamati objek, mengikuti prosedur, menafsirkan simbol, menyusun hipotesis, menarik inferensi, dan mengembangkan penjelasan. Namun, munculnya aktivitas dengan tingkat kompleksitas yang lebih tinggi, terutama mengelaborasi pengetahuan, masih dipengaruhi oleh pengetahuan awal dan kemampuan siswa dalam menghubungkan berbagai informasi.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas mengidentifikasi merupakan aktivitas kognitif yang paling banyak muncul, sedangkan aktivitas mengelaborasi pengetahuan memiliki frekuensi kemunculan paling rendah. Meskipun demikian, aktivitas elaborasi yang muncul seluruhnya dikategorikan akurat. Rata-rata nilai aktivitas kognitif siswa sebesar 70,28 menunjukkan bahwa aktivitas kognitif siswa berada pada kategori tinggi selama pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*.

PEMBAHASAN

Pada pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality* (AR), ditemukan enam jenis aktivitas kognitif, yaitu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat

hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Dari keenam jenis aktivitas tersebut, aktivitas mengidentifikasi memiliki frekuensi kemunculan tertinggi, yaitu 102 kali.

Proses identifikasi muncul lebih sering dibandingkan proses pengorganisasian atau pengintegrasian pengetahuan. Hal tersebut dapat terjadi karena identifikasi merupakan proses awal yang diperlukan sebelum siswa melakukan aktivitas kognitif yang lebih mendalam. Identifikasi membantu siswa mengenali informasi, objek, simbol, dan prosedur yang relevan sehingga dapat mengurangi upaya kognitif ketika melanjutkan pada proses pemahaman berikutnya (Sweller et al., 2011).

Aktivitas mengidentifikasi paling banyak muncul ketika siswa mengenali dan menjelaskan langkah-langkah praktikum uji bakteri menggunakan AR. Temuan tersebut sejalan dengan Buchner et al. (2022), yang menjelaskan bahwa pembelajaran menggunakan AR dapat mendukung perolehan pengetahuan prosedural, termasuk pemahaman mengenai langkah-langkah dalam kegiatan praktikum.

Contoh data verbal yang menunjukkan aktivitas mengidentifikasi adalah sebagai berikut:

Siswa 2A: “Selain ada kristal violet dan safranin, pada praktikum tersebut digunakan juga akuades dan alkohol.”

Siswa 9A: “Bakteri dari plak gigi berwarna ungu.”

Siswa 2A mampu mengidentifikasi jenis pewarna, pelarut, dan reagen yang digunakan dalam praktikum bakteri. Sementara itu, siswa 9A mampu mengidentifikasi warna sel bakteri dari sampel plak gigi setelah dilakukan pewarnaan Gram. Warna ungu menunjukkan bahwa sel bakteri mempertahankan kompleks kristal violet-iodin setelah proses dekolorisasi. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa bakteri yang diamati bersifat Gram positif. Bakteri Gram positif memiliki lapisan peptidoglikan yang relatif tebal sehingga mampu mempertahankan warna kristal violet dan tampak berwarna ungu setelah proses pewarnaan Gram (Smith & Hussey, 2005).

Aktivitas kognitif dengan frekuensi kemunculan paling rendah adalah mengelaborasi pengetahuan, yaitu sebanyak 25 kali, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Temuan tersebut juga didukung oleh data pada Gambar 4 yang menunjukkan bahwa hanya 14 dari 20 siswa yang memunculkan aktivitas mengelaborasi pengetahuan. Dengan demikian, terdapat enam siswa yang belum memunculkan aktivitas tersebut selama pembelajaran.

Mengelaborasi pengetahuan terjadi ketika siswa mampu menghubungkan informasi baru dengan pengetahuan awal yang telah dimiliki untuk menghasilkan penjelasan yang lebih lengkap. Salah satu contoh aktivitas tersebut terlihat ketika siswa menghubungkan bentuk dan susunan sel bakteri dari sampel rambut dengan hasil pewarnaan Gram serta karakteristik dinding sel bakteri.

Siswa menjelaskan bahwa sel bakteri dari sampel rambut memiliki bentuk kokus dengan susunan menyerupai rantai dan menunjukkan karakteristik Gram positif karena tampak berwarna ungu. Siswa kemudian menghubungkan warna tersebut dengan lapisan peptidoglikan yang relatif tebal pada dinding sel bakteri. Elaborasi memungkinkan siswa mengintegrasikan informasi baru dengan pengetahuan awal yang tersimpan dalam memorinya (Kalyuga, 2009). Kemampuan mengelaborasi pengetahuan dapat dikembangkan melalui pemberian asesmen dan umpan balik yang sesuai selama proses pembelajaran (Zheng et al., 2023).

Berdasarkan Gambar 5, rata-rata frekuensi aktivitas kognitif yang muncul selama pembelajaran Eubacteria adalah 17 kali per siswa. Aktivitas kognitif paling banyak muncul ketika siswa melakukan praktikum bakteri menggunakan AR dan menjelaskan hasil kegiatan praktikum tersebut. Siswa 6A memperoleh frekuensi aktivitas kognitif tertinggi, yaitu sebanyak 26 kali.

Siswa 6A mampu memunculkan seluruh jenis aktivitas kognitif, yaitu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Siswa 6A juga memiliki pengalaman belajar sebelumnya mengenai bakteri melalui kegiatan praktikum ketika berada di sekolah menengah pertama. Dalam kegiatan tersebut, siswa pernah mengamati bakteri dari tanaman yang membusuk menggunakan mikroskop. Pengalaman tersebut menjadi pengetahuan awal yang dapat diaktifkan kembali sehingga membantu siswa mengikuti pembelajaran dan memunculkan beragam aktivitas kognitif.

Sebaliknya, siswa 13A memperoleh frekuensi aktivitas kognitif paling rendah, yaitu sebanyak sembilan kali sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Siswa 13A memiliki pengetahuan awal bahwa bakteri merupakan mikroorganisme. Pengetahuan awal dapat memengaruhi proses pemilihan informasi, interpretasi, dan penarikan kesimpulan (Cook, 2006). Namun, siswa 13A relatif terbatas dalam mengungkapkan proses berpikir secara verbal.

Siswa 13A mampu mengidentifikasi proses pengambilan koloni bakteri dan mengenali beberapa struktur bakteri. Siswa tersebut juga mampu menginferensi bahwa sel bakteri memiliki dinding sel, membran plasma, ribosom, sitoplasma, kromosom, dan pili. Inferensi merupakan bagian penting dalam memahami representasi visual atau grafis karena memungkinkan siswa memperoleh informasi yang tidak selalu disajikan secara eksplisit (Kriz & Hegarty, 2007).

Meskipun demikian, siswa 13A belum memunculkan aktivitas mengelaborasi pengetahuan. Siswa tersebut belum mampu menghubungkan hasil inferensi dari kegiatan praktikum berbasis AR dengan pengetahuan awal yang telah dimiliki. Padahal, kemampuan menginferensi dapat digunakan untuk membentuk pengetahuan baru dengan menghubungkannya pada pengetahuan yang telah tersimpan sebelumnya (Chi, 2000).

Selain dianalisis berdasarkan frekuensi kemunculannya, aktivitas kognitif juga dianalisis berdasarkan tingkat akurasi. Berdasarkan Gambar 6, aktivitas

kognitif tidak akurat paling banyak ditemukan pada aktivitas membuat hipotesis. Membuat hipotesis merupakan aktivitas memperkirakan cara kerja suatu objek, penyebab sebuah fenomena, atau peristiwa yang mungkin terjadi berikutnya (Cromley et al., 2010).

Salah satu siswa menyatakan bahwa lup inokulasi dipanaskan agar terjadi reaksi dan untuk mengetahui perubahan yang muncul di sekitarnya. Pernyataan tersebut dikategorikan tidak akurat karena pemanasan lup inokulasi bertujuan mensterilkan alat dan mencegah kontaminasi bakteri. Lup inokulasi digunakan untuk mengambil atau memindahkan koloni bakteri sehingga harus berada dalam keadaan steril sebelum dan setelah digunakan (Public Health England, 2017).

Hipotesis tidak akurat juga ditemukan ketika siswa menjelaskan cara hidup bakteri dari sampel rambut dan plak gigi. Siswa menyatakan bahwa bakteri dari rambut dapat menyintesis makanan menggunakan cahaya matahari sehingga termasuk fotoautotrof, sedangkan bakteri dari plak gigi dianggap hidup secara saprofit. Pernyataan tersebut belum didukung oleh informasi yang cukup dari hasil pengamatan. Bentuk sel, susunan sel, warna hasil pewarnaan Gram, dan asal sampel tidak dapat digunakan secara langsung untuk menentukan kemampuan fotosintesis maupun cara hidup bakteri.

Bakteri yang ditemukan pada plak gigi dapat berkaitan dengan pembentukan karies dan gangguan kesehatan rongga mulut (Putri et al., 2017). Namun, penentuan cara hidup bakteri sebagai saprofit atau parasit memerlukan identifikasi lebih lanjut. Oleh karena itu, kesimpulan mengenai karakteristik fisiologis dan cara hidup bakteri tidak dapat ditetapkan hanya berdasarkan pengamatan morfologi serta pewarnaan Gram.

Aktivitas menginferensi pengetahuan juga belum seluruhnya akurat. Salah satu siswa menyatakan bahwa bakteri dari sampel rambut berbentuk stafilocokus berdasarkan warna ungu dan susunan bentuk sel yang diamati. Pernyataan tersebut belum tepat karena istilah stafilocokus mengacu pada susunan sel kokus yang menyerupai kelompok atau gerombolan, sedangkan hasil pengamatan menunjukkan susunan sel yang menyerupai rantai.

Meskipun demikian, pengamatan terhadap morfologi dan pewarnaan Gram belum cukup untuk memastikan identitas bakteri pada tingkat genus atau spesies. Hasil tersebut sebaiknya hanya dijelaskan sebagai bakteri Gram positif berbentuk kokus dengan susunan menyerupai rantai. Identifikasi yang lebih spesifik memerlukan pengujian tambahan, seperti uji biokimia atau analisis molekuler.

Aktivitas mengelaborasi pengetahuan memiliki frekuensi kemunculan paling rendah, tetapi seluruh aktivitas elaborasi yang muncul dikategorikan akurat sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Salah satu contoh elaborasi terlihat ketika siswa menghubungkan warna ungu hasil pewarnaan Gram dengan karakteristik dinding sel bakteri. Siswa menjelaskan bahwa bakteri dari sampel rambut dan plak gigi memiliki karakteristik Gram positif karena mempertahankan warna kristal violet setelah proses pewarnaan.

Siswa juga mampu menjelaskan tahapan praktikum, mulai dari memanaskan media *nutrient agar*, melakukan pengambilan koloni, melaksanakan pewarnaan Gram, hingga mengamati preparat menggunakan mikroskop. Selain itu, siswa menghubungkan hasil praktikum dengan bentuk dan struktur sel bakteri. Aktivitas tersebut menunjukkan bahwa siswa tidak hanya mengidentifikasi informasi, tetapi juga mengintegrasikan beberapa informasi menjadi penjelasan yang lebih lengkap.

AR merupakan teknologi yang mengintegrasikan objek virtual dua atau tiga dimensi ke dalam lingkungan nyata (Pamoedji et al., 2017). Dalam penelitian ini, teknologi tersebut memungkinkan siswa mengamati tahapan praktikum dan objek bakteri secara tiga dimensi. Penggunaan AR dapat memperkaya pengalaman belajar dan membantu siswa memahami informasi yang sulit ditampilkan melalui media dua dimensi (Tian & Ironsi, 2025).

Skor frekuensi dan akurasi selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai aktivitas kognitif siswa. Berdasarkan Gambar 7, rata-rata nilai aktivitas kognitif siswa sebesar 70,28 dan termasuk dalam kategori tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa laboratorium virtual berbasis AR mampu memfasilitasi munculnya aktivitas kognitif selama pembelajaran Eubacteria.

Laboratorium virtual dapat membantu mengatasi keterbatasan pembelajaran dengan menyimulasikan materi, objek, dan prosedur yang sulit dipraktikkan secara langsung, khususnya materi yang bersifat abstrak atau membutuhkan peralatan tertentu (Antonio & Castro, 2023; Laricheva & Ilikchyan, 2023; Putra, 2014). Dalam pembelajaran Eubacteria, laboratorium virtual berbasis AR memberikan kesempatan kepada siswa untuk mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi prosedur dan objek, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi, dan mengelaborasi pengetahuan.

Namun, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa tingginya frekuensi aktivitas kognitif tidak selalu menunjukkan ketepatan pemahaman. Aktivitas membuat hipotesis memiliki frekuensi ketidakakuratan tertinggi, sedangkan aktivitas elaborasi hanya dimunculkan oleh sebagian siswa. Oleh karena itu, penggunaan laboratorium virtual berbasis AR perlu disertai bimbingan, pertanyaan penuntun, klarifikasi konsep, dan umpan balik agar aktivitas kognitif yang muncul tidak hanya banyak secara kuantitatif, tetapi juga akurat secara ilmiah.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, ditemukan enam jenis aktivitas kognitif siswa dalam pembelajaran Eubacteria menggunakan laboratorium virtual berbasis *augmented reality*, yaitu mengaktifkan pengetahuan awal, mengidentifikasi, memaknai simbol, membuat hipotesis, menginferensi pengetahuan, dan mengelaborasi pengetahuan. Aktivitas mengidentifikasi memiliki frekuensi kemunculan tertinggi, yaitu sebanyak 102 kali, sedangkan aktivitas mengelaborasi pengetahuan memiliki frekuensi terendah, yaitu sebanyak 25 kali.

Aktivitas mengaktifkan pengetahuan awal dan mengidentifikasi memiliki frekuensi ketidakakuratan yang relatif rendah. Sebaliknya, aktivitas membuat hipotesis memiliki frekuensi ketidakakuratan paling tinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa siswa telah mampu mengenali informasi, objek, prosedur, dan simbol, tetapi masih memerlukan bimbingan dalam menyusun dugaan yang didasarkan pada konsep ilmiah.

Rata-rata nilai aktivitas kognitif siswa sebesar 70,28 dan termasuk dalam kategori tinggi. Dengan demikian, laboratorium virtual berbasis *augmented reality* dapat memfasilitasi munculnya berbagai aktivitas kognitif siswa dalam pembelajaran Eubacteria. Namun, penggunaannya perlu disertai pertanyaan penuntun, klarifikasi konsep, asesmen formatif, dan umpan balik agar aktivitas membuat hipotesis, menginferensi, dan mengelaborasi pengetahuan dapat berkembang secara lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Antonio, R. P., & Castro, R. R. (2023). Effectiveness of virtual simulations in improving secondary students' achievement in physics: A meta-analysis. *International Journal of Instruction*, 16(2), 533–556. <https://ejournal.ats/index.php/pub/article/view/155>
- Arifin, M., & Rahmatullah, Z. H. (2025). Development of an augmented reality-based interactive digital module for biology learning at High School 76 Jakarta. *Journal of Science and Mathematics Education*, 1(4), 96–102. <https://doi.org/10.70716/josme.v1i4.330>
- Buchner, J., Buntins, K., & Kerres, M. (2022). The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 38(1), 285–303. <https://doi.org/10.1111/jcal.12617>
- Casado, J. G., Tarazona, R., & Cordero, H. (2025). Implementation of LABSTER virtual lab in immunology for innovative teaching and improved learning in veterinary degree. *Frontiers in Veterinary Science*, 12, Article 1603469. <https://doi.org/10.3389/fvets.2025.1603469>
- Chi, M. T. H. (2000). Self-explaining expository texts: The dual processes of generating inferences and repairing mental models. In R. Glaser (Ed.), *Advances in instructional psychology* (Vol. 5, pp. 161–238). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cook, M. P. (2006). Visual representations in science education: The influence of prior knowledge and cognitive load theory on instructional design principles. *Science Education*, 90(6), 1073–1091. <https://doi.org/10.1002/sce.20164>
- Cromley, J. G., Snyder-Hogan, L. E., & Luciw-Dubas, U. A. (2010). Cognitive activities in complex science text and diagrams. *Contemporary Educational Psychology*, 35(1), 59–74. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2009.10.002>

- de Koning, B. B., Tabbers, H. K., Rikers, R. M. J. P., & Paas, F. (2009). Towards a framework for attention cueing in instructional animations: Guidelines for research and design. *Educational Psychology Review*, 21(2), 113–140. <https://doi.org/10.1007/s10648-009-9098-7>
- Eady, M. J., & Lockyer, L. (2013). Tools for learning: Technology and teaching strategies. In P. Hudson (Ed.), *Learning to teach in the primary school* (pp. 71–89). Cambridge University Press.
- Hartman, D. (2011). Perfecting your spread plate technique. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 12(2), 204–205. <https://doi.org/10.1128/jmbe.v12i2.324>
- Hidayati, A. N., Damayanti, Sari, S., Alinda, M. D., Reza, N. R., Anggraeni, S., & Widia, Y. (2019). *Infeksi bakteri di kulit*. Airlangga University Press.
- Kalyuga, S. (2009). Knowledge elaboration: A cognitive load perspective. *Learning and Instruction*, 19(5), 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.02.003>
- Kragten, M., Admiraal, W., & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' learning activities while studying biological process diagrams. *International Journal of Science Education*, 37(12), 1915–1937. <https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1057775>
- Kriz, S., & Hegarty, M. (2007). Top-down and bottom-up influences on learning from animations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(11), 911–930. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2007.06.005>
- Laricheva, E. N., & Ilikchyan, A. (2023). Exploring the effect of virtual reality on learning in general chemistry students with low visual-spatial skills. *Journal of Chemical Education*, 100(2), 589–596. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00732>
- Li, J., & Liang, W. (2024). Effectiveness of virtual laboratory in engineering education: A meta-analysis. *PLOS ONE*, 19(12), e0316269. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0316269>
- Miles, M. B., & Huberman, A. M. (1994). *Qualitative data analysis: An expanded sourcebook* (2nd ed.). SAGE Publications.
- Pamoedji, A. K., Maryuni, & Sanjaya, R. (2017). *Mudah membuat game augmented reality dan virtual reality dengan Unity 3D*. Elex Media Komputindo.
- Park, B., Korbach, A., & Brünken, R. (2020). Does thinking-aloud affect learning, visual information processing, and cognitive load when learning with seductive details as expected from a self-regulation perspective? *Computers in Human Behavior*, 111, Article 106411. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106411>
- Public Health England. (2017). *UK standards for microbiology investigations: Inoculation of culture media for bacteriology*. Public Health England.

- Putra, A. P. (2014). Pengembangan laboratorium virtual untuk kegiatan praktikum dan memfasilitasi pendidikan karakter dalam pembelajaran Biologi. *Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia*, 1(1), 83–92.
- Putri, M. H., Sukini, & Yodong. (2017). *Mikrobiologi*. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Rustaman, N. Y. (2013). *Strategi belajar mengajar Biologi*. FPMIPA Universitas Pendidikan Indonesia.
- Sattar, M. A., Maqbool, M. U., Zakir, F., & Billah, M. (2025). Enhancing student engagement through augmented reality in secondary biology education. *Frontiers in Education*, 10, Article 1628004. <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1628004>
- Schnotz, W. (2014). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Ed.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (2nd ed., pp. 72–103). Cambridge University Press.
- Smith, A. C., & Hussey, M. A. (2005). *Gram stain protocols*. American Society for Microbiology.
- Špernjak, A., & Šorgo, A. (2010). Recent usage of computer-supported laboratory in the biology classroom: Is virtual laboratory an alternative? In *Proceedings of the 33rd International Convention MIPRO* (pp. 1067–1071). IEEE.
- Subran, S., & Mahmud, S. N. D. (2024). Augmented reality technology in biology and life science education: A systematic literature review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 13(1), 1810–1837. <https://doi.org/10.6007/IJARPED/v13-i1/20455>
- Susanti, D., & Rahmat, A. (2025). Analisis kemampuan representasi visual siswa dalam menginterpretasi diagram siklus hidup Bryophyta. *Spizaetus: Jurnal Biologi dan Pendidikan Biologi*, 6(2), 364–375. <https://doi.org/10.55241/spibio.v6i2.564>
- Sweller, J., Ayres, P., & Kalyuga, S. (2011). *Cognitive load theory*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8126-4>
- Tian, X., & Ironsi, C. S. (2025). Examining the impact of augmented reality on students' learning outcomes. *Scientific Reports*, 15, Article 36957. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20833-w>
- Wang, Y., Ong, S. K., & Nee, A. Y. C. (2018). Enhancing mechanisms education through interaction with augmented reality simulation. *Computer Applications in Engineering Education*, 26(5), 1552–1564. <https://doi.org/10.1002/cae.21951>
- Wildan, A., Cheong, B. H.-P., Xiao, K., Liew, O. W., & Ng, T. W. (2020). Growth measurement of surface colonies of bacteria using augmented reality. *Journal of Biological Education*, 54(4), 419–432. <https://doi.org/10.1080/00219266.2019.1600571>

Zheng, L., Long, M., Chen, B., & Fan, Y. (2023). Promoting knowledge elaboration, socially shared regulation, and group performance in collaborative learning: An automated assessment and feedback approach based on knowledge graphs. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 20, Article 46. <https://doi.org/10.1186/s41239-023-00415-4>