

Optimalisasi Kapasitas Kognitif Mahasiswa pada Matakuliah Bioteknologi melalui Teknologi AI

Mimi Halimah

Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Pasundan

Jl. Tamansari No. 6-8 Bandung Indonesia

e-mail: mimi@unpas.ac.id

Abstrak

Bioteknologi merupakan matakuliah yang menuntut kapasitas kognitif tinggi karena melibatkan konsep-konsep kompleks dan aplikasi teknologi dalam sistem biologis. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan kapasitas kognitif mahasiswa melalui integrasi teknologi Artificial Intelligence (AI) dalam pembelajaran Bioteknologi. Metode penelitian menggunakan quasi-experimental design dengan pre-test post-test control group pada 60 mahasiswa yang dibagi menjadi kelompok eksperimen menggunakan AI dan kelompok kontrol dengan pembelajaran konvensional. Instrumen penelitian meliputi tes kapasitas kognitif yang mencakup dimensi pemahaman konsep, analisis, sintesis, dan evaluasi. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan kapasitas kognitif mahasiswa pada kelompok eksperimen dengan N-gain 0,72 (kategori tinggi) dibandingkan kelompok kontrol dengan N-gain 0,45 (kategori sedang). Teknologi AI berupa adaptive learning system, virtual laboratory, dan intelligent tutoring system terbukti efektif meningkatkan pemahaman konsep kompleks seperti rekayasa genetika dan kultur jaringan. Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa AI mampu memberikan personalisasi pembelajaran sesuai dengan kecepatan belajar dan gaya kognitif masing-masing mahasiswa. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa teknologi AI dapat menjadi solusi inovatif dalam mengoptimalkan kapasitas kognitif mahasiswa pada pembelajaran Bioteknologi yang kompleks.

Kata kunci — *adaptive learning, artificial intelligence, bioteknologi, kapasitas kognitif, personalisasi pembelajaran*

Abstract

Biotechnology is a course that requires high cognitive capacity as it involves complex concepts and technology applications in biological systems. This research aims to optimize students' cognitive capacity through the integration of Artificial Intelligence (AI) technology in Biotechnology learning. The research method employed a quasi-experimental design with pre-test post-test control group on 60 students divided into an experimental group using AI and a control group with conventional learning. Research instruments included cognitive capacity tests covering dimensions of concept understanding, analysis, synthesis, and evaluation. The results showed a significant increase in students' cognitive capacity in the experimental group with an N-gain of 0.72 (high category) compared to the control group with an N-gain of 0.45 (medium category). AI technologies in the form of adaptive learning systems, virtual laboratories, and intelligent tutoring systems proved effective in enhancing understanding of complex concepts such as genetic engineering and tissue culture. Further analysis indicated that AI was capable of providing personalized learning according to each student's learning pace and cognitive style. The conclusion of this research confirms that AI technology can be an innovative solution in optimizing students' cognitive capacity in complex Biotechnology learning.

Keywords — *adaptive learning, artificial intelligence, biotechnology, cognitive capacity, personalized learning*

I. PENDAHULUAN

Bioteknologi sebagai salah satu matakuliah wajib pada program studi biologi dan pendidikan biologi memiliki karakteristik konten yang kompleks dan multidisiplin. Matakuliah ini mengintegrasikan konsep-konsep dari berbagai bidang seperti genetika molekuler,

mikrobiologi, biokimia, dan teknik fermentasi yang menuntut kapasitas kognitif tinggi dari mahasiswa. Kompleksitas materi bioteknologi sering menjadi kendala dalam pencapaian tujuan pembelajaran, terutama dalam aspek pemahaman mendalam dan kemampuan aplikasi konsep.

Kapasitas kognitif merujuk pada kemampuan mental individu dalam memproses informasi, termasuk di dalamnya kemampuan memori kerja, perhatian, pemecahan masalah, dan pengambilan keputusan. Dalam konteks pembelajaran bioteknologi, kapasitas kognitif mahasiswa sangat menentukan keberhasilan mereka dalam memahami proses-proses kompleks seperti teknologi DNA rekombinan, PCR (Polymerase Chain Reaction), kultur jaringan, dan aplikasi CRISPR-Cas9. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa beban kognitif yang berlebihan dapat menghambat proses pembelajaran pada materi-materi yang abstrak dan kompleks.

Perkembangan teknologi Artificial Intelligence (AI) dalam dekade terakhir membuka peluang baru dalam dunia pendidikan. AI telah terbukti mampu memberikan solusi personalisasi pembelajaran yang adaptif terhadap kebutuhan individual peserta didik. Berbagai aplikasi AI dalam pendidikan seperti intelligent tutoring system, adaptive learning platform, dan virtual laboratory telah menunjukkan hasil positif dalam meningkatkan efektivitas pembelajaran. Namun, implementasi AI dalam pembelajaran bioteknologi di perguruan tinggi Indonesia masih sangat terbatas dan memerlukan kajian empiris yang mendalam.

Beberapa studi menunjukkan bahwa teknologi AI dapat mengurangi beban kognitif eksternal dengan menyediakan scaffolding yang tepat, visualisasi konsep yang interaktif, dan feedback yang real-time. Sistem pembelajaran berbasis AI mampu mengidentifikasi miskonsepsi mahasiswa

secara otomatis dan menyediakan interusi pembelajaran yang sesuai. Selain itu, AI juga memungkinkan simulasi eksperimen bioteknologi yang kompleks dan mahal menjadi lebih accessible melalui virtual laboratory.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kapasitas kognitif mahasiswa pada matakuliah Bioteknologi melalui integrasi teknologi AI. Hipotesis penelitian adalah terdapat perbedaan signifikan kapasitas kognitif antara mahasiswa yang menggunakan teknologi AI dalam pembelajaran Bioteknologi dengan mahasiswa yang menggunakan metode konvensional. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis bagi pengembangan strategi pembelajaran bioteknologi yang lebih efektif di era digital.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan quasi-experimental design dengan desain pre-test post-test control group. Lokasi penelitian dilaksanakan di Program Studi Biologi Universitas Pasundan pada semester genap tahun akademik 2024/2025. Waktu penelitian berlangsung selama 14 minggu yang merupakan durasi satu semester pembelajaran matakuliah Bioteknologi.

Populasi penelitian adalah seluruh mahasiswa yang mengambil matakuliah Bioteknologi semester 6 yang berjumlah 120 mahasiswa. Sampel penelitian dipilih menggunakan teknik purposive sampling dengan kriteria mahasiswa yang memiliki nilai prasyarat matakuliah Genetika minimal B dan telah menempuh matakuliah Biokimia. Berdasarkan kriteria tersebut, terpilih 60 mahasiswa yang kemudian

dibagi menjadi dua kelompok, yaitu 30 mahasiswa kelompok eksperimen dan 30 mahasiswa kelompok kontrol. Pembagian kelompok dilakukan secara random assignment untuk meminimalkan bias.

Kelompok eksperimen mendapatkan pembelajaran Bioteknologi dengan integrasi teknologi AI yang terdiri dari tiga komponen utama. Pertama, adaptive learning system yang menyesuaikan tingkat kesulitan materi berdasarkan performa mahasiswa secara real-time. Kedua, virtual laboratory berbasis AI yang memungkinkan mahasiswa melakukan simulasi eksperimen bioteknologi seperti transformasi bakteri, elektroforesis DNA, dan kultur jaringan tanaman. Ketiga, intelligent tutoring system yang memberikan feedback personalisasi dan scaffolding adaptif ketika mahasiswa mengalami kesulitan dalam memahami konsep tertentu. Kelompok kontrol mendapatkan pembelajaran konvensional dengan metode ceramah, diskusi, dan praktikum laboratorium sesuai dengan silabus yang berlaku.

Instrumen penelitian menggunakan tes kapasitas kognitif yang dikembangkan berdasarkan Taksonomi Bloom revisi Anderson dan Krathwohl. Tes terdiri dari 40 soal yang mencakup empat dimensi kognitif yaitu pemahaman konsep (C2) sebanyak 10 soal, analisis (C4) sebanyak 10 soal, evaluasi (C5) sebanyak 10 soal, dan kreativitas atau kreasi (C6) sebanyak 10 soal. Instrumen telah divalidasi oleh tiga ahli bioteknologi dan memiliki reliabilitas Alpha Cronbach sebesar 0,89 yang termasuk kategori tinggi. Konten tes mencakup materi-materi utama dalam bioteknologi seperti rekayasa genetika,

teknologi fermentasi, kultur jaringan, dan bioteknologi lingkungan.

Prosedur penelitian dimulai dengan pemberian pre-test kepada kedua kelompok untuk mengukur kapasitas kognitif awal mahasiswa. Selanjutnya dilaksanakan treatment selama 14 minggu dengan total 42 jam perkuliahan dan 28 jam praktikum. Pada kelompok eksperimen, mahasiswa mengakses platform pembelajaran AI yang telah dikonfigurasi khusus untuk matakuliah Bioteknologi. Platform ini dilengkapi dengan dashboard analitik yang memungkinkan dosen memantau progress dan kesulitan belajar setiap mahasiswa. Di akhir semester, kedua kelompok diberikan post-test dengan soal yang ekuivalen dengan pre-test untuk mengukur peningkatan kapasitas kognitif.

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan statistik deskriptif untuk menggambarkan profil kapasitas kognitif mahasiswa dan statistik inferensial untuk menguji hipotesis penelitian. Uji normalitas data menggunakan Shapiro-Wilk test dan uji homogenitas menggunakan Levene's test. Pengujian hipotesis menggunakan Independent Sample t-test untuk membandingkan rerata post-test antara kelompok eksperimen dan kontrol dengan taraf signifikansi 0,05. Untuk mengukur besarnya peningkatan kapasitas kognitif digunakan perhitungan N-gain dengan rumus Hake. Seluruh analisis data menggunakan software SPSS versi 26.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kapasitas Kognitif Mahasiswa Sebelum dan Sesudah Pembelajaran

Hasil pre-test menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan signifikan

kapasitas kognitif awal antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Rerata skor pre-test kelompok eksperimen adalah 52,3 (SD=8,4) sedangkan kelompok kontrol adalah 51,8 (SD=7,9). Hasil uji Independent Sample t-test menunjukkan nilai $p=0,812$ yang lebih besar dari 0,05, sehingga dapat disimpulkan bahwa kedua kelompok memiliki kapasitas kognitif awal yang setara. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses random assignment telah berhasil menghasilkan kelompok yang homogen.

Setelah pembelajaran selama 14 minggu, terdapat peningkatan kapasitas kognitif pada kedua kelompok. Kelompok eksperimen menunjukkan rerata post-test sebesar 87,6 (SD=6,2) sedangkan kelompok kontrol sebesar 72,4 (SD=8,1). Hasil uji Independent Sample t-test menunjukkan nilai $p=0,000$ yang lebih kecil dari 0,05, sehingga terdapat perbedaan signifikan kapasitas kognitif antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Perhitungan N-gain menunjukkan bahwa kelompok eksperimen memiliki N-gain sebesar 0,72 yang termasuk kategori tinggi, sedangkan kelompok kontrol memiliki N-gain sebesar 0,45 yang termasuk kategori sedang.

Tabel I Perbandingan Kapasitas Kognitif Mahasiswa

Kelompok	Pre-test (SD)	Post-test (SD)	N- gain	Kategori
Eksperimen	52,3 (8,4)	87,6 (6,2)	0,72	Tinggi
Kontrol	51,8 (7,9)	72,4 (8,1)	0,45	Sedang

Analisis per dimensi kognitif menunjukkan bahwa peningkatan paling signifikan pada kelompok eksperimen terjadi pada dimensi analisis dan evaluasi. Pada dimensi analisis,

kelompok eksperimen mengalami peningkatan N-gain sebesar 0,78 dibandingkan kelompok kontrol yang hanya 0,42. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi AI sangat efektif dalam memfasilitasi mahasiswa untuk menganalisis masalah-masalah kompleks dalam bioteknologi. Pada dimensi evaluasi, kelompok eksperimen menunjukkan N-gain 0,74 sedangkan kelompok kontrol 0,48. Kemampuan evaluasi yang lebih baik pada kelompok eksperimen menunjukkan bahwa mahasiswa mampu menilai dan membuat keputusan terhadap aplikasi bioteknologi dengan lebih kritis.

B. Efektivitas Komponen AI dalam Pembelajaran Bioteknologi

learning system yang digunakan dalam penelitian ini mampu menyesuaikan tingkat kesulitan materi secara dinamis berdasarkan performa mahasiswa. Sistem ini menggunakan algoritma machine learning untuk mengidentifikasi pola belajar dan kesulitan spesifik setiap mahasiswa. Hasil analisis log aktivitas menunjukkan bahwa sistem telah melakukan penyesuaian materi sebanyak rata-rata 18 kali per mahasiswa selama semester. Mahasiswa dengan kemampuan awal rendah mendapatkan lebih banyak materi penguatan dasar, sedangkan mahasiswa dengan kemampuan tinggi mendapatkan materi pengayaan yang lebih menantang.

Virtual laboratory berbasis AI menjadi komponen yang paling disukai mahasiswa berdasarkan hasil survei kepuasan. Laboratorium virtual ini memungkinkan mahasiswa melakukan eksperimen yang secara konvensional memerlukan biaya tinggi dan risiko

keamanan, seperti transformasi gen menggunakan elektroporasi atau teknik CRISPR-Cas9. Sistem AI dalam virtual laboratory mampu memberikan feedback langsung ketika mahasiswa melakukan kesalahan prosedur dan menyarankan perbaikan. Data menunjukkan bahwa mahasiswa melakukan rata-rata 12 simulasi eksperimen per topik, jauh lebih banyak dibandingkan praktikum konvensional yang hanya 2-3 kali karena keterbatasan alat dan bahan.

Intelligent tutoring system berperan penting dalam memberikan scaffolding adaptif ketika mahasiswa mengalami kesulitan. Sistem ini dilengkapi dengan natural language processing yang memungkinkan mahasiswa bertanya dalam bahasa natural dan mendapatkan penjelasan yang disesuaikan dengan level pemahaman mereka. Analisis interaksi menunjukkan bahwa mahasiswa mengajukan rata-rata 45 pertanyaan per semester kepada AI tutor, dengan tingkat kepuasan respons sebesar 4,2 dari skala 5. AI tutor juga mampu mengidentifikasi miskonsepsi mahasiswa dan memberikan intervensi pembelajaran yang tepat.

C. Analisis Kualitatif Proses Pembelajaran

Observasi terhadap proses pembelajaran menunjukkan bahwa mahasiswa pada kelompok eksperimen lebih aktif dan engaged dalam pembelajaran. Teknologi AI memberikan elemen gamifikasi yang meningkatkan motivasi mahasiswa untuk terus belajar. Dashboard progress yang menampilkan pencapaian dalam bentuk visual menarik membuat mahasiswa lebih termotivasi untuk menyelesaikan seluruh modul

pembelajaran. Berbeda dengan kelompok kontrol yang menunjukkan penurunan tingkat kehadiran di pertengahan semester, kelompok eksperimen mempertahankan tingkat kehadiran di atas 90% hingga akhir semester.

Wawancara dengan mahasiswa kelompok eksperimen mengungkapkan beberapa keunggulan pembelajaran dengan AI. Mahasiswa merasa bahwa mereka dapat belajar sesuai dengan kecepatan masing-masing tanpa tekanan untuk mengikuti tempo kelas. Kemampuan untuk mengulang materi yang sulit sebanyak yang diperlukan memberikan rasa aman dalam proses belajar. Mahasiswa juga mengapresiasi feedback yang immediate dari sistem AI yang membantu mereka segera memperbaiki pemahaman yang keliru.

Namun, penelitian ini juga menemukan beberapa tantangan dalam implementasi AI. Pada minggu-minggu awal, beberapa mahasiswa mengalami kesulitan adaptasi dengan teknologi baru dan memerlukan bimbingan intensif. Terdapat juga concern terkait ketergantungan pada teknologi yang dapat mengurangi interaksi sosial antar mahasiswa. Untuk mengatasi hal ini, pembelajaran dirancang dengan kombinasi sesi online menggunakan AI dan sesi tatap muka untuk diskusi dan kolaborasi.

D. Implikasi untuk Pembelajaran Bioteknologi

Hasil penelitian ini memberikan implikasi penting untuk pengembangan pembelajaran bioteknologi di perguruan tinggi. Pertama, teknologi AI terbukti efektif sebagai tools untuk personalisasi pembelajaran yang selama ini sulit

dilakukan dalam kelas dengan jumlah mahasiswa besar. Dosen dapat memanfaatkan AI untuk memberikan perhatian individual kepada setiap mahasiswa melalui sistem adaptif. Kedua, virtual laboratory berbasis AI dapat menjadi solusi untuk keterbatasan fasilitas laboratorium yang sering menjadi kendala dalam pembelajaran bioteknologi.

Ketiga, integrasi AI dalam pembelajaran tidak bermaksud menggantikan peran dosen tetapi justru memperkuat peran dosen sebagai fasilitator dan mentor. Data analitik yang dihasilkan oleh sistem AI memberikan insight berharga bagi dosen untuk memahami kesulitan belajar mahasiswa secara detail dan memberikan intervensi yang tepat waktu. Keempat, pembelajaran dengan AI memerlukan persiapan infrastruktur digital yang memadai termasuk akses internet yang stabil dan perangkat yang sesuai.

Temuan penelitian ini sejalan dengan teori cognitive load yang menyatakan bahwa pembelajaran akan lebih efektif ketika beban kognitif eksternal dapat diminimalkan. Teknologi AI membantu mengurangi beban kognitif eksternal dengan menyajikan informasi secara terstruktur, memberikan visualisasi yang jelas, dan menyediakan scaffolding yang sesuai dengan kebutuhan. Hal ini memungkinkan kapasitas kognitif mahasiswa dapat difokuskan pada pemrosesan informasi dan konstruksi pengetahuan yang bermakna.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa teknologi Artificial Intelligence efektif dalam mengoptimalkan kapasitas kognitif mahasiswa pada matakuliah Bioteknologi.

Terdapat perbedaan signifikan kapasitas kognitif antara kelompok yang menggunakan AI ($N\text{-gain } 0,72$) dengan kelompok pembelajaran konvensional ($N\text{-gain } 0,45$). Tiga komponen AI yang diintegrasikan yaitu adaptive learning system, virtual laboratory, dan intelligent tutoring system berkontribusi secara sinergis dalam meningkatkan pemahaman konsep, kemampuan analisis, evaluasi, dan kreativitas mahasiswa terhadap materi bioteknologi yang kompleks.

Implementasi AI dalam pembelajaran bioteknologi memungkinkan personalisasi pembelajaran sesuai dengan kecepatan dan gaya belajar individual mahasiswa. Virtual laboratory berbasis AI memberikan kesempatan mahasiswa untuk melakukan eksperimen simulasi berkali-kali tanpa keterbatasan biaya dan risiko keamanan. Intelligent tutoring system mampu memberikan feedback real-time dan scaffolding adaptif yang membantu mahasiswa mengatasi kesulitan belajar secara mandiri.

Penelitian ini merekomendasikan pengembangan lebih lanjut teknologi AI untuk pembelajaran bioteknologi dengan konten yang lebih komprehensif dan interface yang lebih user-friendly. Penelitian lanjutan dapat mengeksplorasi dampak jangka panjang pembelajaran dengan AI terhadap retensi pengetahuan dan kemampuan aplikasi bioteknologi dalam konteks profesional. Institusi pendidikan tinggi perlu mempersiapkan infrastruktur digital dan pengembangan kompetensi dosen dalam memanfaatkan teknologi AI untuk pembelajaran yang lebih efektif di era digital.

DAFTAR PUSTAKA

- Aleven, V., McLaughlin, E.A., Glenn, R.A., & Koedinger, K.R. (2017). Instruction based on adaptive learning technologies. In R.E. Mayer & P.A. Alexander (Eds.), *Handbook of research on learning and instruction* (2nd ed., pp. 522-560). New York: Routledge.
- Anderson, L.W., & Krathwohl, D.R. (Eds.). (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. New York: Longman.
- Chen, X., Xie, H., Zou, D., & Hwang, G.J. (2020). Application and theory gaps during the rise of artificial intelligence in education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 1, 100002.
- Glaser, J. (2018). Molecular biology education in the age of biotechnology: A case for teaching core concepts. *Journal of Microbiology & Biology Education*, 19(2), 1-5.
- Holmes, W., Bialik, M., & Fadel, C. (2019). *Artificial intelligence in education: Promises and implications for teaching and learning*. Boston, MA: Center for Curriculum Redesign.
- Hwang, G.J., Xie, H., Wah, B.W., & Gašević, D. (2020). Vision, challenges, roles and research issues of Artificial Intelligence in Education. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 1, 100001.
- Kalyuga, S., & Singh, A.M. (2016). Rethinking the boundaries of cognitive load theory in complex learning. *Educational Psychology Review*, 28(4), 831-852.
- Luckin, R., Holmes, W., Griffiths, M., & Forcier, L.B. (2016). *Intelligence unleashed: An argument for AI in education*. London: Pearson Education.
- Mayer, R.E. (2020). Multimedia learning (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mikropoulos, T.A., & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999-2009). *Computers & Education*, 56(3), 769-780.
- Roll, I., & Wylie, R. (2016). Evolution and revolution in artificial intelligence in education. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 26(2), 582-599.
- Sweller, J., van Merriënboer, J.J.G., & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational Psychology Review*, 31(2), 261-292.
- Zawacki-Richter, O., Marín, V.I., Bond, M., & Gouverneur, F. (2019). Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1), 39.