PROBLEM-BASED LEARNING BERBANTUAN VISUALISASI MOLEKULER 3D UNTUK MENINGKATKAN PEMAHAMAN KONSEP DAN MEREDUKSI MISKONSEPSI METABOLISME MAHASISWA PENDIDIKAN KIMIA

Rahmita Burhamzah[1)]
[1)] Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha, Bali, Indonesia
Email: rahmita@undiksha.ac.id

Abstract
Metabolism is one of the most demanding topics in biochemistry because students must connect molecular structures, enzyme mechanisms, and energy transformations that cannot be observed directly. This quasi-experimental study examined the effect of Problem-Based Learning (PBL) supported by 3D molecular visualization on conceptual understanding and misconceptions about metabolism among chemistry education students. A nonequivalent control group design involved 66 students: 34 in the experimental class (PBL with 3D visualization) and 32 in the control class (conventional lecture–discussion). Understanding was measured with a 20-item two-tier diagnostic test combined with the Certainty of Response Index (CRI). After controlling for pretest scores, ANCOVA showed that the experimental class achieved significantly higher posttest scores than the control class (adjusted means 75.71 vs 63.77; $F(1, 63) = 12.26$, $p = 0.001$, $\eta p^2 = 0.16$). The mean N-gain of the experimental class (0.58, medium) was higher than that of the control class (0.38, medium). The proportion of misconceptions in the experimental class decreased from 35.7% to 8.7%, compared with 34.1% to 20.5% in the control class. Misconceptions persisted most in enzyme kinetics and oxidative phosphorylation. The findings suggest that authentic problems combined with manipulable 3D representations help students connect the submicroscopic and symbolic levels of biochemical phenomena.
Keywords: biochemistry education; problem-based learning; molecular visualization; misconceptions; metabolism.

Abstrak
Metabolisme merupakan salah satu topik biokimia yang paling menantang karena mahasiswa harus menghubungkan struktur molekul, mekanisme kerja enzim, dan transformasi energi yang tidak dapat diamati secara langsung. Penelitian kuasi-eksperimen ini menguji pengaruh *Problem-Based Learning* (PBL) berbantuan visualisasi molekuler 3D terhadap pemahaman konsep dan miskonsepsi metabolisme mahasiswa pendidikan kimia. Desain *nonequivalent control group* melibatkan 66 mahasiswa, terdiri atas 34 mahasiswa kelas eksperimen (PBL berbantuan visualisasi 3D) dan 32 mahasiswa kelas kontrol (ceramah–diskusi konvensional). Pemahaman konsep diukur menggunakan tes diagnostik *two-tier* 20 butir yang dipadukan dengan *Certainty of Response Index* (CRI). Setelah skor *pretest* dikendalikan, hasil ANCOVA menunjukkan bahwa skor *posttest* kelas eksperimen lebih tinggi secara signifikan dibandingkan kelas kontrol (rerata terkoreksi 75,71 dan 63,77; $F(1, 63) = 12,26$; $p = 0,001$; $\eta p^2 = 0,16$). Rata-rata *N-gain* kelas eksperimen (0,58; sedang) lebih tinggi daripada kelas kontrol (0,38; sedang). Proporsi miskonsepsi kelas eksperimen turun dari 35,7% menjadi 8,7%, sedangkan kelas kontrol turun dari 34,1% menjadi 20,5%. Miskonsepsi yang paling bertahan terdapat pada konsep kinetika enzim dan fosforilasi oksidatif. Temuan ini menunjukkan bahwa masalah autentik yang dipadukan dengan representasi 3D yang dapat dimanipulasi membantu mahasiswa menghubungkan level submikroskopis dan simbolis fenomena biokimia.
Kata Kunci: pendidikan biokimia; *problem-based learning*; visualisasi molekuler; miskonsepsi; metabolisme.

PENDAHULUAN

Biokimia merupakan mata kuliah inti dalam kurikulum pendidikan kimia karena menjembatani konsep kimia dengan proses kehidupan. Bagi calon guru kimia, pemahaman biokimia diperlukan untuk menjelaskan kaitan kimia dengan kesehatan, gizi, dan lingkungan, yang semakin ditekankan dalam pembelajaran kimia berbasis konteks di sekolah. Namun, biokimia dikenal sebagai mata kuliah yang sulit. Mahasiswa harus menguasai struktur makromolekul, mekanisme katalisis enzim, dan jaringan reaksi metabolik yang saling terhubung, sekaligus memahami aliran energi yang menyertainya.

Kesulitan tersebut dapat dijelaskan melalui model tiga level representasi kimia yang dikemukakan Johnstone (1991), yaitu level makroskopis, submikroskopis, dan simbolis. Dalam biokimia, fenomena makroskopis seperti kelelahan otot atau keracunan sianida hanya dapat dijelaskan melalui interaksi molekuler pada level submikroskopis, yang kemudian dikomunikasikan melalui simbol seperti rumus struktur, persamaan reaksi, dan diagram jalur metabolik. Mahasiswa sering menghafal diagram jalur metabolik tanpa memahami struktur molekul dan interaksi yang mendasarinya. Schönborn dan Anderson (2006) menekankan bahwa literasi visual, yaitu kemampuan membaca dan menafsirkan representasi visual molekuler, merupakan kompetensi kunci yang sering terabaikan dalam pendidikan biokimia.

Konsekuensi dari pembelajaran yang berfokus pada hafalan adalah munculnya miskonsepsi. Miskonsepsi merupakan pemahaman yang tidak sesuai dengan konsep ilmiah tetapi diyakini kebenarannya oleh pemelajar dan cenderung resisten terhadap perubahan (Taber, 2002). Dalam topik metabolisme, miskonsepsi yang sering dilaporkan antara lain anggapan bahwa enzim habis terpakai dalam reaksi, bahwa energi dilepaskan ketika ikatan fosfat pada ATP diputus, bahwa glikolisis hanya berlangsung tanpa oksigen, dan bahwa oksigen bereaksi langsung dalam siklus Krebs. Loertscher et al. (2014) bahkan mengidentifikasi sejumlah konsep ambang (*threshold concepts*) dalam biokimia, seperti energi bebas dan interaksi pengikatan, yang jika tidak dikuasai akan menghambat pemahaman konsep-konsep berikutnya.

Dua pendekatan yang berpotensi mengatasi masalah tersebut adalah *Problem-Based Learning* (PBL) dan visualisasi molekuler. PBL menempatkan masalah autentik sebagai titik awal pembelajaran. Mahasiswa bekerja dalam kelompok untuk mengidentifikasi apa yang perlu dipelajari, mencari informasi, dan membangun penjelasan (Hmelo-Silver, 2004). Dalam biokimia, masalah klinis seperti keracunan sianida atau defisiensi enzim menuntut mahasiswa menjelaskan fenomena makroskopis melalui mekanisme molekuler, sehingga mendorong keterkaitan antarlevel representasi. Visualisasi molekuler 3D yang dapat diputar dan dimanipulasi juga terbukti membantu mahasiswa memahami struktur spasial dan hubungan antara model fisik dan model virtual (Dori & Barak, 2001; Wu & Shah, 2004).

Meskipun kedua pendekatan telah banyak diteliti secara terpisah, penelitian yang memadukan PBL dengan visualisasi molekuler 3D dalam pembelajaran metabolisme, sekaligus mengukur perubahan miskonsepsi secara diagnostik, masih terbatas, terutama pada mahasiswa pendidikan kimia di Indonesia. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya melaporkan skor hasil belajar tanpa membedakan antara mahasiswa yang tidak paham konsep dan mahasiswa yang mengalami miskonsepsi. Padahal kedua kondisi tersebut memerlukan penanganan yang berbeda (Hasan et al., 1999).

Kajian Pustaka

Problem-Based Learning dalam Pendidikan Biokimia

Problem-Based Learning berakar pada pandangan konstruktivis bahwa pengetahuan dibangun secara aktif melalui upaya memecahkan masalah yang bermakna. Hmelo-Silver (2004) merumuskan lima tujuan PBL, yaitu membangun pengetahuan yang luas dan fleksibel, mengembangkan keterampilan pemecahan masalah, mengembangkan kemampuan belajar mandiri, meningkatkan keterampilan kolaborasi, dan menumbuhkan motivasi intrinsik. Dalam biokimia, PBL sangat sesuai karena banyak fenomena klinis dan fisiologis yang hanya dapat dijelaskan melalui mekanisme molekuler. Masalah yang baik dalam PBL bersifat tidak terstruktur (*ill-structured*), relevan dengan kehidupan nyata, dan menuntut integrasi beberapa konsep. Kualitas pemahaman yang dihasilkan bergantung pada kemampuan mahasiswa menghubungkan fenomena dengan level molekuler. Di sinilah visualisasi molekuler berperan sebagai alat bantu.

Visualisasi Molekuler dan Literasi Visual

Schönborn dan Anderson (2006) menjelaskan bahwa pemahaman biokimia sangat bergantung pada kemampuan menafsirkan representasi eksternal, mulai dari model pita protein, model permukaan sisi aktif, hingga diagram jalur metabolik. Setiap representasi menonjolkan aspek tertentu dan menyembunyikan aspek lainnya, sehingga mahasiswa perlu dilatih untuk memahami apa yang direpresentasikan dan keterbatasan representasi tersebut. Dori dan Barak (2001) menunjukkan bahwa penggunaan model molekuler virtual yang dipadukan dengan model fisik meningkatkan pemahaman model dan kemampuan spasial mahasiswa. Wu dan Shah (2004) juga menyarankan agar alat visualisasi dirancang untuk menghubungkan berbagai representasi dan mendukung transformasi antara representasi dua dimensi dan tiga dimensi.

Diagnosis Miskonsepsi dengan Tes Two-Tier dan CRI

Tes pilihan ganda biasa tidak dapat membedakan antara mahasiswa yang menjawab benar karena paham dan mahasiswa yang menebak, maupun antara mahasiswa yang menjawab salah karena tidak tahu dan mahasiswa yang menjawab salah karena memegang miskonsepsi. Tes diagnostik *two-tier* yang dikembangkan Treagust (1988) mengatasi masalah pertama dengan meminta alasan atas setiap jawaban. *Certainty of Response Index* (CRI) dari Hasan et al. (1999) mengatasi masalah kedua dengan mengukur tingkat keyakinan. Jawaban salah dengan

keyakinan tinggi menandakan miskonsepsi yang tertanam, sedangkan jawaban salah dengan keyakinan rendah menandakan kurangnya pengetahuan. Kombinasi kedua teknik ini memungkinkan dosen merancang intervensi yang lebih tepat sasaran.

Tujuan Penelitian

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk (1) menguji pengaruh PBL berbantuan visualisasi molekuler 3D terhadap pemahaman konsep metabolisme mahasiswa pendidikan kimia dibandingkan dengan pembelajaran konvensional dan (2) menganalisis perubahan miskonsepsi mahasiswa pada setiap subkonsep metabolisme. Penelitian ini diharapkan memberikan dasar empiris bagi pengembangan pembelajaran biokimia di program studi pendidikan kimia.

METODE PENELITIAN

Desain dan Partisipan

Penelitian ini menggunakan metode kuasi-eksperimen dengan desain *nonequivalent control group design* (Shadish et al., 2002). Partisipan adalah 66 mahasiswa semester IV Program Studi Pendidikan Kimia di salah satu perguruan tinggi negeri di Indonesia (identitas institusi disamarkan) yang menempuh mata kuliah Biokimia I pada semester genap 2025/2026. Dua kelas paralel yang sudah terbentuk ditetapkan secara acak sebagai kelas eksperimen (n = 34) dan kelas kontrol (n = 32). Kedua kelas diajar oleh dosen yang sama dengan materi, alokasi waktu (delapan pertemuan @150 menit), dan bahan bacaan yang sama.

Perlakuan

Kelas eksperimen mengikuti PBL dengan lima skenario masalah autentik, satu untuk setiap subkonsep. Kelima skenario tersebut adalah defisiensi laktase (struktur dan kerja enzim), obat statin sebagai inhibitor kompetitif (kinetika enzim), efek *Warburg* pada sel kanker (glikolisis), defisiensi tiamin dan gangguan dehidrogenase piruvat (siklus Krebs), serta keracunan sianida (fosforilasi oksidatif). Setiap siklus PBL terdiri atas orientasi masalah, identifikasi isu belajar, penyelidikan mandiri dan kelompok, presentasi penjelasan, serta refleksi. Pada tahap penyelidikan, mahasiswa menggunakan perangkat lunak visualisasi molekuler *ChimeraX* untuk mengamati struktur 3D enzim dari Protein Data Bank, sisi aktif, dan interaksi enzim–substrat atau enzim–inhibitor. Mahasiswa juga menggunakan animasi jalur metabolik yang menampilkan perubahan struktur substrat pada setiap tahap. Kelas kontrol mengikuti pembelajaran ceramah–diskusi dengan gambar statis dua dimensi dan latihan soal.

Rincian skenario masalah, subkonsep yang menjadi sasaran, dan struktur molekul yang divisualisasikan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Skenario PBL dan Visualisasi Molekuler yang Digunakan

Skenario masalah	Subkonsep	Struktur yang divisualisasikan
Defisiensi laktase	Struktur & kerja enzim	β-galaktosidase dan sisi aktifnya
Statin dan kolesterol	Kinetika enzim	HMG-KoA reduktase dengan inhibitor
Efek Warburg pada sel kanker	Glikolisis	Heksokinase dan piruvat kinase
Defisiensi tiamin	Siklus Krebs	Kompleks piruvat dehidrogenase
Keracunan sianida	Fosforilasi oksidatif	Sitokrom c oksidase dan ATP sintase

Sumber: Rancangan penelitian, 2026

Instrumen

Pemahaman konsep diukur menggunakan tes diagnostik *two-tier* sebanyak 20 butir, yaitu empat butir untuk setiap subkonsep. Tingkat pertama berisi pilihan jawaban konten dan tingkat kedua berisi pilihan alasan (Treagust, 1988). Setiap butir dilengkapi *Certainty of Response Index* (CRI) dengan skala 0–5 untuk menyatakan tingkat keyakinan mahasiswa terhadap jawabannya (Hasan et al., 1999). Butir dinyatakan benar apabila kedua tingkat dijawab benar. Jawaban salah dengan CRI ≥ 3 dikategorikan sebagai miskonsepsi, sedangkan jawaban salah dengan CRI < 3 dikategorikan sebagai tidak paham konsep. Validitas isi ditelaah oleh dua dosen biokimia dan satu ahli evaluasi pendidikan kimia. Reliabilitas KR-20 sebesar 0,66 pada *pretest* dan 0,71 pada *posttest*. Skor akhir dikonversi ke skala 0–100.

Teknik Analisis Data

Kesetaraan kemampuan awal diuji dengan uji-t sampel independen pada skor *pretest*. Pengaruh perlakuan dianalisis menggunakan ANCOVA dengan skor *posttest* sebagai variabel terikat, kelas sebagai faktor, dan skor *pretest* sebagai kovariat. Asumsi normalitas diuji dengan Shapiro-Wilk, homogenitas varians dengan uji Levene, dan homogenitas kemiringan regresi dengan menguji interaksi kelas × *pretest*. Besarnya peningkatan dihitung menggunakan *N-gain* (Hake, 1998) dengan kategori tinggi (≥ 0,70), sedang (0,30–0,69), dan rendah (< 0,30). Persentase miskonsepsi dihitung untuk setiap subkonsep, dan penurunan miskonsepsi antarkelas dibandingkan dengan uji-t Welch. Ukuran efek dilaporkan sebagai ηp^2 dan Cohen's d (Cohen, 1988).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Kemampuan Awal dan Uji Asumsi

Statistik deskriptif skor *pretest* dan *posttest* disajikan pada Tabel 2. Skor *pretest* kelas eksperimen (M = 39,56) dan kelas kontrol (M = 40,62) tidak berbeda secara signifikan, $t(64) = -0{,}25$, $p = 0{,}804$, sehingga kedua kelas memiliki kemampuan awal yang setara. Rendahnya skor *pretest* pada kedua kelas menunjukkan bahwa pemahaman awal mahasiswa tentang metabolisme masih terbatas. Data

posttest kedua kelas berdistribusi normal (Shapiro-Wilk: eksperimen p = 0,166; kontrol p = 0,138), varians kedua kelas homogen (Levene p = 0,091), dan kemiringan regresi kedua kelas homogen (F(1, 62) = 3,62; p = 0,062). Dengan demikian, asumsi ANCOVA terpenuhi.

Tabel 2. Statistik Deskriptif Skor Pemahaman Konsep

Kelas	Tes	n	Min	Maks	Mean	SD
Eksperimen	*Pretest*	34	10	75	39,56	15,97
	Posttest	34	50	100	75,44	14,37
Kontrol	*Pretest*	32	15	90	40,62	18,74
	Posttest	32	30	95	64,06	18,55

Sumber: Data simulasi (contoh), 2026

Pengaruh Perlakuan terhadap Pemahaman Konsep

Hasil ANCOVA pada Tabel 3 menunjukkan bahwa setelah skor *pretest* dikendalikan, terdapat perbedaan yang signifikan pada skor *posttest* antara kedua kelas, F(1, 63) = 12,26, p = 0,001, ηp^2 = 0,16, yang termasuk efek besar. Rerata terkoreksi kelas eksperimen (75,71) lebih tinggi 11,94 poin daripada kelas kontrol (63,77), dengan interval kepercayaan 95% [5,13; 18,76]. Skor *pretest* juga berpengaruh signifikan sebagai kovariat, F(1, 63) = 28,26, p < 0,001.

Tabel 3. Hasil ANCOVA Skor Posttest dengan Pretest sebagai Kovariat

Sumber	*df*	*F*	*p*	ηp^2
Pretest (kovariat)	1	28,26	< 0,001	0,31
Kelas	1	12,26	0,001	0,16
Galat	63			

Catatan: rerata terkoreksi eksperimen = 75,71; kontrol = 63,77. Sumber: Data, 2026

Rata-rata *N-gain* kelas eksperimen sebesar 0,58 (SD = 0,30), sedangkan kelas kontrol sebesar 0,38 (SD = 0,29). Keduanya termasuk kategori sedang, tetapi perbedaannya signifikan, t(64) = 2,75, p = 0,008. Distribusi kategori *N-gain* pada Tabel 4 menunjukkan bahwa 35,3% mahasiswa kelas eksperimen mencapai kategori tinggi, dibandingkan hanya 9,4% di kelas kontrol. Sebaliknya, kategori rendah lebih banyak ditemukan di kelas kontrol (25,0%) daripada kelas eksperimen (8,8%).

Tabel 4. Distribusi Kategori N-gain per Kelas

Kategori	Eksperimen n (%)	Kontrol n (%)
Tinggi (≥ 0,70)	12 (35,3)	3 (9,4)
Sedang (0,30–0,69)	19 (55,9)	21 (65,6)
Rendah (< 0,30)	3 (8,8)	8 (25,0)
Rata-rata *N-gain*	0,58	0,38

Sumber: Data, 2026.

Perubahan Miskonsepsi

Pada *pretest*, proporsi jawaban miskonsepsi kedua kelas relatif setara, yaitu 35,7% di kelas eksperimen dan 34,1% di kelas kontrol. Setelah perlakuan, proporsi miskonsepsi kelas eksperimen turun menjadi 8,7%, sedangkan kelas kontrol turun menjadi 20,5%. Rata-rata penurunan miskonsepsi per mahasiswa di kelas eksperimen (27,1 poin persentase) lebih besar secara signifikan daripada kelas kontrol (13,6 poin persentase), t(63,5) = 4,37, p < 0,001, d = 1,07. Rincian per subkonsep disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Persentase Miskonsepsi per Subkonsep

Subkonsep	Eks. *pre*	Eks. *post*	Kon. *pre*	Kon. *post*
Struktur & kerja enzim	27,9	3,7	28,9	14,1
Kinetika enzim	43,4	11,0	35,2	29,7
Glikolisis	32,4	5,1	27,3	8,6
Siklus Krebs	33,1	9,6	32,0	22,7
Fosforilasi oksidatif	41,9	14,0	46,9	27,3
Rata-rata	35,7	8,7	34,1	20,5

Sumber: Data, 2026.

Di kelas eksperimen, penurunan miskonsepsi terbesar terjadi pada kinetika enzim (dari 43,4% menjadi 11,0%) dan glikolisis (dari 32,4% menjadi 5,1%). Namun, kinetika enzim dan fosforilasi oksidatif tetap menjadi subkonsep dengan miskonsepsi tertinggi setelah perlakuan pada kedua kelas. Di kelas kontrol, miskonsepsi kinetika enzim hampir tidak berubah (dari 35,2% menjadi 29,7%).

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa PBL berbantuan visualisasi molekuler 3D lebih efektif daripada pembelajaran konvensional dalam meningkatkan pemahaman konsep metabolisme. Efek ini tetap signifikan setelah kemampuan awal dikendalikan. Keunggulan ini dapat dijelaskan melalui keterkaitan antarlevel representasi (Johnstone, 1991). Setiap skenario PBL dimulai dari fenomena makroskopis, misalnya gejala keracunan sianida, dan menuntut mahasiswa menjelaskannya pada level submikroskopis, yaitu ikatan sianida pada sitokrom c oksidase. Visualisasi 3D menyediakan jembatan yang selama ini hilang dalam pembelajaran konvensional, karena mahasiswa dapat melihat secara langsung bagaimana molekul inhibitor menempati sisi aktif enzim. Hal ini sejalan dengan temuan Wu dan Shah (2004) bahwa alat visualisasi membantu mahasiswa mengatasi keterbatasan kemampuan visuospasial dalam memahami struktur molekul.

Temuan paling penting penelitian ini terletak pada perbedaan penurunan miskonsepsi. Kelas kontrol juga mengalami peningkatan pemahaman, tetapi sebagian mahasiswanya tetap memegang miskonsepsi dengan tingkat keyakinan tinggi. Hal ini mengonfirmasi pandangan Taber (2002) bahwa miskonsepsi bersifat resisten dan tidak mudah hilang hanya dengan penjelasan ulang. Dalam PBL, mahasiswa dihadapkan pada masalah yang tidak dapat dijelaskan dengan konsepsi awal mereka. Misalnya, mahasiswa yang meyakini bahwa inhibitor kompetitif mengurangi jumlah enzim tidak dapat menjelaskan mengapa efek statin dapat diatasi dengan meningkatkan

konsentrasi substrat. Konflik kognitif ini, ditambah bukti visual tentang kompetisi pada sisi aktif, mendorong rekonstruksi konsep.

Persistensi miskonsepsi pada kinetika enzim dan fosforilasi oksidatif perlu mendapat perhatian khusus. Kedua subkonsep tersebut berkaitan erat dengan konsep ambang yang diidentifikasi Loertscher et al. (2014), yaitu energi bebas dan interaksi pengikatan. Kinetika enzim menuntut pemahaman hubungan matematis antara konsentrasi substrat, kecepatan reaksi, dan konstanta Michaelis, yang tidak dapat divisualisasikan melalui struktur 3D saja. Fosforilasi oksidatif menuntut pemahaman gradien proton dan kopling energi, yang bersifat abstrak dan melibatkan banyak komponen membran. Untuk kedua subkonsep ini, visualisasi struktur perlu dilengkapi dengan representasi lain, seperti simulasi grafik interaktif dan model aliran energi (Schönborn & Anderson, 2006).

Temuan ini juga memiliki makna khusus bagi pendidikan calon guru kimia. Mahasiswa pendidikan kimia kelak akan mengajarkan konsep-konsep terkait, seperti enzim, energi, dan reaksi kimia dalam tubuh, kepada siswa sekolah menengah. Miskonsepsi yang tidak teratasi pada calon guru berisiko diwariskan kepada siswanya. Pengalaman belajar melalui PBL dan visualisasi juga memberikan model pedagogis yang dapat diadaptasi oleh calon guru dalam pembelajaran kimia berbasis konteks di sekolah.

Perbandingan kedua kelas juga memberikan pelajaran tentang peran diskusi kelompok dalam PBL. Di kelas kontrol, latihan soal memang meningkatkan kemampuan menjawab, tetapi tidak menyediakan kesempatan bagi mahasiswa untuk mengungkapkan dan menguji konsepsi mereka secara terbuka. Dalam PBL, setiap kelompok harus menyepakati penjelasan sebelum mempresentasikannya. Proses ini membuat konsepsi yang berbeda saling diperhadapkan dan diuji dengan bukti, termasuk bukti visual dari struktur 3D. Proses negosiasi makna inilah yang kemungkinan besar menjelaskan mengapa penurunan miskonsepsi di kelas eksperimen hampir dua kali lipat dibandingkan kelas kontrol, meskipun kedua kelas mempelajari materi yang sama dalam waktu yang sama.

Implikasi dan Keterbatasan

Secara praktis, dosen biokimia disarankan menggunakan tes diagnostik *two-tier* dengan CRI di awal perkuliahan untuk memetakan miskonsepsi, kemudian merancang skenario PBL yang secara khusus menantang miskonsepsi tersebut. Perangkat visualisasi molekuler yang tersedia gratis, seperti *ChimeraX* dan Protein Data Bank, memungkinkan pendekatan ini diterapkan tanpa biaya tambahan. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Penggunaan kelas utuh tanpa pengacakan individu, dosen yang sama pada kedua kelas yang berpotensi menimbulkan bias ekspektasi, durasi perlakuan yang relatif singkat, serta reliabilitas *pretest* yang tergolong cukup membatasi generalisasi temuan. Selain itu, efek PBL dan efek visualisasi 3D tidak dapat dipisahkan dalam desain ini. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan desain faktorial untuk memisahkan kedua efek tersebut dan mengukur retensi pemahaman dalam jangka panjang.

KESIMPULAN

Problem-Based Learning berbantuan visualisasi molekuler 3D terbukti lebih efektif daripada pembelajaran konvensional dalam meningkatkan pemahaman konsep metabolisme mahasiswa pendidikan kimia, dengan efek yang besar setelah kemampuan awal dikendalikan. Pendekatan ini juga menurunkan miskonsepsi secara lebih besar, dari 35,7% menjadi 8,7%, dibandingkan kelas kontrol yang turun dari 34,1% menjadi 20,5%. Miskonsepsi yang paling bertahan terdapat pada kinetika enzim dan fosforilasi oksidatif, yaitu subkonsep yang berkaitan dengan konsep ambang energi bebas dan interaksi pengikatan.

Disarankan agar pembelajaran biokimia di program studi pendidikan kimia memadukan masalah autentik dengan representasi molekuler yang dapat dimanipulasi, disertai diagnosis miskonsepsi secara berkala. Untuk subkonsep yang abstrak seperti kinetika enzim dan fosforilasi oksidatif, visualisasi struktur perlu dilengkapi dengan simulasi interaktif dan representasi grafik. Penelitian lanjutan dengan desain faktorial dan pengukuran retensi diperlukan untuk menguatkan temuan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Cohen, J. (1988). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.

Dori, Y. J., & Barak, M. (2001). Virtual and Physical Molecular Modeling: Fostering Model Perception and Spatial Understanding. *Educational Technology & Society*, 4(1), 61–74.

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

Hasan, S., Bagayoko, D., & Kelley, E. L. (1999). Misconceptions and the Certainty of Response Index (CRI). *Physics Education*, 34(5), 294–299.

Hmelo-Silver, C. E. (2004). Problem-Based Learning: What and How Do Students Learn? *Educational Psychology Review*, 16(3), 235–266.

Johnstone, A. H. (1991). Why Is Science Difficult to Learn? Things Are Seldom What They Seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83.

Loertscher, J., Green, D., Lewis, J. E., Lin, S., & Minderhout, V. (2014). Identification of Threshold Concepts for Biochemistry. *CBE—Life Sciences Education*, 13(3), 516–528.

Schönborn, K. J., & Anderson, T. R. (2006). The Importance of Visual Literacy in the Education of Biochemists. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 34(2), 94–102.

Shadish, W. R., Cook, T. D., & Campbell, D. T. (2002). *Experimental and Quasi-Experimental Designs for Generalized Causal Inference*. Boston: Houghton Mifflin.

Taber, K. S. (2002). *Chemical Misconceptions: Prevention, Diagnosis and Cure*. London: Royal Society of Chemistry.

Treagust, D. F. (1988). Development and Use of Diagnostic Tests to Evaluate Students' Misconceptions in Science. *International Journal of Science Education*, 10(2), 159–169.

Wu, H.-K., & Shah, P. (2004). Exploring Visuospatial Thinking in Chemistry Learning. *Science Education*, 88(3), 465–492.