



Integrasi Pembelajaran Berbasis Proyek dalam Media Animasi Interaktif (*BreathQuest*-PjBL): Meningkatkan Pemahaman Konsep Sistem Pernapasan Manusia pada Siswa SMA

Risya Pramana Situmorang^{1*}, Refisman Halawa¹, Yakin Teguh Zega¹

¹ Program Studi S-1 Pendidikan Biologi, Fakultas Biologi, Universitas Kristen Satya Wacana, Indonesia

*Email: risya.situmorang@uksw.edu

Info Artikel

Diterima: 12 April 2025
Direvisi: 20 Oktober 2025
Diterima
untuk diterbitkan: 30 November
2025

Keywords:

Pembelajaran Interaktif, Sistem
Pernapasan, *Project-Based
Learning*, Beban Kognitif, Media
Digital.

Abstrak

Media pembelajaran konvensional memiliki keterbatasan dalam menyajikan visualisasi dinamis proses biologis yang abstrak seperti sistem pernapasan manusia sehingga diperlukan pendekatan inovatif berbasis teknologi. Penelitian ini menguji efektivitas media pembelajaran *BreathQuest*-PjBL yang mengintegrasikan animasi interaktif 2D dengan *project-based learning* menggunakan desain *randomized pretest-posttest control group* pada 72 siswa SMA. Hasil uji-t independen menunjukkan perbedaan signifikan ($p < 0.05$) antara kelompok eksperimen (73.67 ± 7.82) dan kontrol (69.61 ± 6.23) dengan *effect size* moderat ($d = 0.58$). Peningkatan paling menonjol terlihat pada pemahaman pertukaran gas (kelompok eksperimen 75% berbanding kelompok kontrol 53%) dan aplikasi klinis (60% berbanding 45%). Analisis kualitatif mengungkap bahwa segmentasi animasi dan scaffolding proyek dalam *BreathQuest* berhasil mengoptimalkan beban kognitif, meskipun terdapat tantangan implementasi seperti kesenjangan literasi digital di antara siswa. Temuan ini mendukung penggunaan media interaktif berbasis PjBL untuk pembelajaran biologi kompleks dengan rekomendasi pengembangan pelatihan guru dan pertimbangan penggunaan strategi diferensiasi pembelajaran.

© 2025 Risya Pramana Situmorang. This is an open-access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi telah membawa transformasi pendidikan khususnya dalam penyajian muatan materi menjadi lebih menarik dan mudah dipahami. Salah satu potensi teknologi yang dapat dijadikan sebagai media pembelajaran adalah media animasi (Singh & Ozarkar, 2025; Yunus *et al.*, 2025). Media animasi dalam pembelajaran biologi membantu untuk menyajikan visualisasi konsep sekaligus memungkinkan simulasi mengenai konsep-konsep yang saling berkaitan (Pathak *et al.*, 2025; Stenlund *et al.*, 2024). Pemanfaatan animasi berbasis dua dimensi menjadi alat

mampu menyajikan proses biologis yang abstrak (Jantzen *et al.*, 2024; Pinto *et al.*, 2024). Selain itu, animasi berbasis dua dimensi memungkinkan penyajian proses biologis kompleks dalam format yang lebih sederhana dan menarik.

Animasi memiliki potensi besar untuk mempermudah pemahaman materi sistem pernapasan manusia yang seringkali dianggap sulit oleh siswa. Topik sistem pernapasan manusia memerlukan visualisasi jelas tentang proses sistematis, seperti inspirasi-ekspirasi, serta konsep dinamis seperti pertukaran oksigen dan karbon dioksida (Dhaniawaty & Fadillah, 2022). Alur pernapasan dapat divisualisasikan secara bertahap melalui animasi mulai dari masuknya udara hingga pertukaran gas di alveoli (Schmid *et al.*, 2022). Visualisasi yang dinamis memungkinkan siswa mengamati proses mikroskopis yang sulit dilihat secara langsung. Konsep anatomi dan fisiologi pernapasan yang kompleks menjadi lebih mudah dipelajari jika difasilitasi dengan bantuan alat visual yang relevan dan interaktif. Keunggulan ini justru menjadi kelemahan media konvensional yang selama ini digunakan dalam pembelajaran.

Media pembelajaran konvensional seperti gambar statis dan teks memiliki beberapa keterbatasan dalam menyajikan konsep (Hao, 2023; Tsehay Mengistie, 2025). Media pembelajaran konvensional kesulitan menampilkan urutan mekanisme pernapasan secara berkesinambungan sehingga siswa harus membayangkan sendiri pergerakan diafragma dan otot-otot respirasi. Selain itu, proses pertukaran gas dinamis di alveoli melibatkan difusi molekul yang tidak dapat divisualisasikan dengan efektif melalui gambar diam (Reinke *et al.*, 2021). Secara keseluruhan, hubungan spasial antar organ pernapasan seperti posisi paru-paru terhadap diafragma dan trakea sering kali terlihat datar dan kurang interaktif dalam representasi dua dimensi. Animasi mampu mengatasi semua keterbatasan dari media konvensional dengan menyajikan gerakan, alur, dan perspektif dua dimensi yang lebih realistis (Koç & Kanadlı, 2025; Wishart, 2017). Akibatnya, pembelajaran konsep sistem pernapasan menjadi lebih komprehensif dan mudah dipahami.

Keterbatasan media konvensional dalam memberikan visualisasi menjadikan media animasi pada materi sistem pernapasan semakin dibutuhkan. Representasi anatomi dinamis yang dapat menampilkan gerakan diafragma dan perubahan volume paru-paru secara *real-time* (McLaughlin *et al.*, 2025; Si & Xi, 2022). Selain itu konsep terkait visualisasi proses mikroskopis seperti pertukaran O₂ dan CO₂ di alveoli harus mampu menampilkan proses difusi molekuler secara akurat. Media pembelajaran yang ideal harus dapat menjelaskan hubungan struktur-fungsi tiap komponen sistem pernapasan, mulai dari hidung hingga alveoli, dalam satu kesatuan yang utuh (Mayer, 2020). Animasi dua dimensi yang didesain secara interaktif mampu memenuhi semua kebutuhan tersebut dengan menggabungkan aspek visual dinamis, akurasi ilmiah, dan pendekatan sistemik (Mamonto *et al.*, 2024). Pada akhirnya pembelajaran biologi tentang sistem pernapasan dapat difasilitasi untuk mencapai tingkat pemahaman yang lebih mendalam dan holistik.

Meskipun animasi mampu mengatasi keterbatasan media konvensional, media animasi 2D yang tersedia saat ini masih memiliki beberapa kelemahan mendasar. Mayoritas animasi 2D yang ada masih bersifat linear dan pasif (Beautemps *et al.*, 2025), hanya menyajikan alur satu arah tanpa memberi kesempatan bagi siswa untuk berinteraksi dengan konten. Selain itu, media ini juga minim unsur interaktivitas dan jarang menyertakan proyek praktik yang memungkinkan siswa menerapkan konsep secara langsung (Plass, 2020). Lebih lanjut, sebagian besar animasi juga belum mengintegrasikan penilaian formatif untuk memantau kemajuan pemahaman konseptual siswa secara *real-time* (Ploetzner *et al.*, 2020). Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun animasi 2D menawarkan beberapa keunggulan dibanding media statis, pengembangannya masih perlu menyempurnakan aspek keterlibatan aktif siswa dan evaluasi pembelajaran, sebagaimana ditekankan dalam teori pembelajaran multimedia.

Menyikapi berbagai keterbatasan animasi 2D konvensional yang telah diidentifikasi, perkembangan terkini dalam desain media pembelajaran mulai mengadopsi beberapa inovasi penting. Pertama, teknik *motion graphic* kini semakin banyak digunakan untuk memecah penjelasan kompleks sistem pernapasan menjadi segmen-segmen visual yang lebih mudah dipahami, sebagaimana terbukti dalam penelitian Fan *et al.* (2018) yang menunjukkan peningkatan pemahaman

konseptual. Kedua, integrasi elemen interaktif sederhana seperti tombol kontrol kecepatan *playback* atau *hotspot* informasi yang didukung oleh Mayer (2020) tentang prinsip personalisasi sehingga memungkinkan siswa mengatur ritme belajar secara mandiri. Ketiga, penggunaan visual metaphor menurut penelitian Jahic *et al.* (2025) menyatakan bahwa animasi mampu memberikan penguatan konsep pada materi biologi yang bersifat abstrak. Inovasi media animasi ini menunjukkan upaya implementasi prinsip pembelajaran menggunakan multimedia untuk menjembatani kesenjangan antara potensi teoretis dan praktik kelas.

Inovasi media pembelajaran yang digunakan untuk diimplementasikan dalam penelitian ini dinamakan *BreathQuest*-PjBL. Istilah *breath* merujuk pada fokus materi sistem pernapasan dan *quest* merepresentasikan pada petualangan yang diarahkan pada pembelajaran dengan mengajak siswa untuk mengeksplorasi, menyelidiki dan memecahkan masalah terkait sistem pencernaan. Integrasi model pembelajaran PjBL diarahkan sebagai kerangka pedagogis untuk memfasilitasi siswa proyek nyata sebagai inti dari proses pembelajaran. Penggunaan nama *BreathQuest*-PjBL dimaknai sebagai sebuah petualangan belajar berbasis proyek untuk mendalami sistem pernapasan melalui penguatan konsep menggunakan media animasi.

Inovasi media pembelajaran yang diimplementasi dalam penelitian adalah *BreathQuest*-PjBL. Perkembangan media animasi bidang edukasi mengadopsi *motion graphic* tersegmentasi terbukti meningkatkan pemahaman konseptual (Spanjers *et al.*, 2012; Zamzuri *et al.*, 2019). Temuan Strømme & Mork (2021) menunjukkan bahwa animasi dengan kontrol interaktif meningkatkan keterlibatan kognitif siswa sebesar 30% dalam pembelajaran biologi. Animasi yang dirancang dikhususkan untuk meningkatkan keterampilan pemecahan masalah siswa melalui alur kegiatan proyek (Suharto *et al.*, 2024), menunjukkan transformasi dari media pasif menjadi lingkungan belajar konstruktivis. Karakteristik inilah yang membuat animasi modern ideal untuk model pembelajaran *Project-based Learning* (PjBL) khususnya pada tiga aspek utama yaitu: (1) visualisasi proses biologis dinamis, (2) simulasi percobaan virtual, dan (3) scaffolding penyelesaian masalah kompleks (Rolfes *et al.*, 2020).

Kesesuaian animasi dengan PjBL terwujud dalam integrasi stimulus proyek, misalnya animasi kasus gangguan pernapasan memicu pertanyaan investigasi. Selain itu, animasi menjadi alat scaffolding melalui animasi interaktif untuk membantu analisis data respirasi. Penelitian Hidayati & Roesdiana (2025) membuktikan integrasi animasi pada suatu model pembelajaran saintifik dapat meningkatkan tidak hanya pemahaman konseptual, tetapi juga keterampilan desain yang mengarah pada berpikir solutif. Oleh karena itu, animasi tidak lagi sekadar media penyampai informasi, tetapi telah berevolusi menjadi lingkungan belajar konstruktivis yang utuh. Tujuan penelitian ini adalah menguji efektivitas pembelajaran *BreathQuest*-PjBL dalam meningkatkan pemahaman konsep siswa pada materi sistem pernapasan manusia.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan *randomized pretest-posttest control group design* untuk mengevaluasi efektivitas media *BreathQuest*-PjBL dalam pembelajaran sistem pernapasan manusia. Desain ini dipilih karena memungkinkan perbandingan yang valid antara kelompok eksperimen (pembelajaran *BreathQuest*-PjBL) dan kelompok kontrol (pembelajaran konvensional berupa gambar statis, video edukasi, dan buku teks) tentang evaluasi media pembelajaran digital (Styles & Torgerson, 2018). Proses penelitian berlangsung selama empat minggu dan mengikuti protokol intervensi penelitian pendidikan yang dikembangkan Cohen *et al.* (2018) untuk memastikan validitas internal yaitu: *pretest* (pemahaman awal siswa diukur sebelum intervensi), intervensi (pelaksanaan pembelajaran), dan *posttest* (pemahaman akhir diukur setelah intervensi).

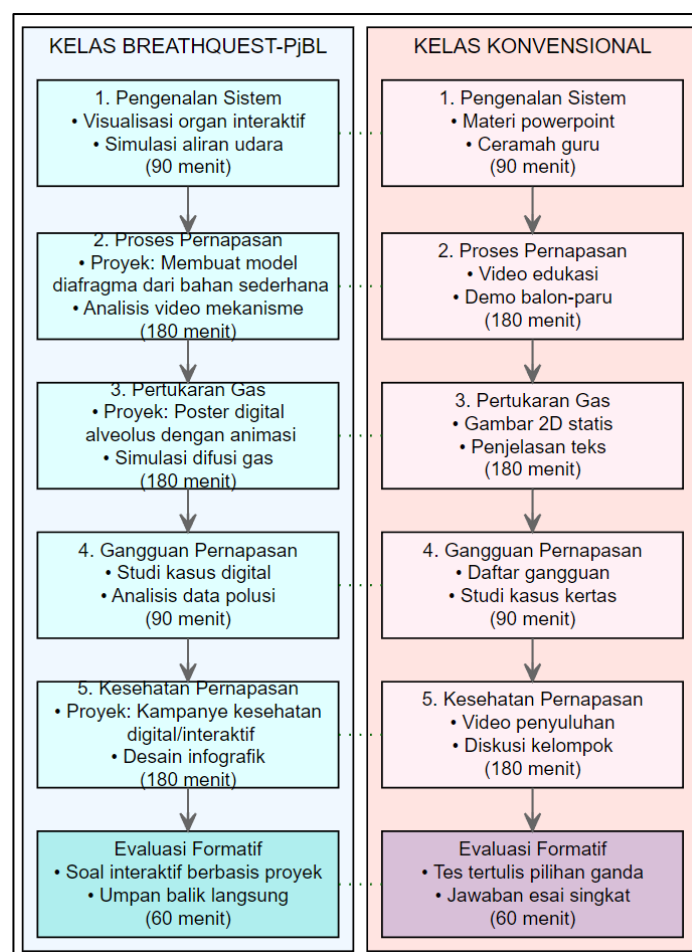
Populasi dan Sampel

Penelitian ini memiliki populasi sebesar 288 siswa kelas XI IPA di SMA Negeri 1 Bringin, Kabupaten Semarang dengan sampel 72 siswa (25%) yang dipilih melalui *purposive sampling* berbasis *placement test*. *Placement test* dilakukan untuk mengidentifikasi siswa dengan kemampuan awal setara (nilai 40-70 persentil) mengacu pada metode Hu, (2019) untuk menghindari *ceiling* atau

floor effect, sedangkan siswa di luar rentang tersebut (≤ 30 atau ≥ 80 persentil) tidak termasuk dalam kriteria untuk menghindari bias. Randomisasi dilakukan dengan teknik *block randomization* sebagaimana dijelaskan Davies & Yanchar (2017) dalam konteks penelitian pendidikan sains, dengan alokasi 36 siswa per kelompok memenuhi syarat analisis statistik parametrik. Berdasarkan hasil tes, diperoleh 72 siswa terpilih kemudian dilakukan randomisasi ke kelompok eksperimen dan kontrol (masing-masing 36 siswa).

Prosedur Penelitian

Kelompok eksperimen dalam penelitian mendapatkan perlakuan berupa pembelajaran menggunakan *BreathQuest* yang terintegrasi dengan *Project-Based Learning* (PjBL). Media ini dirancang dengan fitur-fitur khusus meliputi: (1) visualisasi akurat tentang arah aliran udara dalam sistem pernapasan, (2) simulasi dinamis mekanisme tekanan udara selama proses pernapasan, serta (3) demonstrasi interaktif proses difusi gas di alveolus. Sebagai pembanding, kelompok kontrol menerima pembelajaran konvensional menggunakan metode ceramah dan *textbook* tanpa bantuan media animasi.



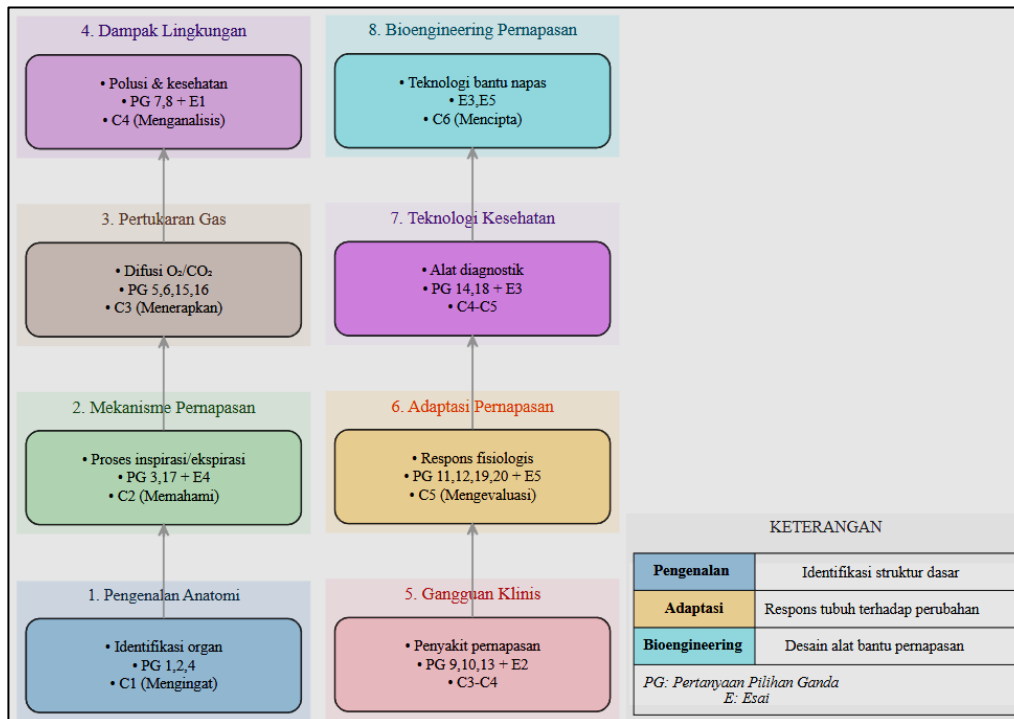
Gambar 1. Prosedur Penelitian antara Kelas Eksperimen dan Konvensional

Gambar 1 merupakan prosedur penelitian yang menggambarkan perbandingan dari dua perlakuan (*BreathQuest*-PjBL dan kelas konvensional) kegiatan pembelajaran pada materi sistem pernapasan manusia. Kelas dengan menggunakan pembelajaran *BreathQuest*-PjBL menekankan pada pembelajaran interaktif dan berbasis proyek, yaitu: visualisasi organ interaktif, pembuatan model diafragma, poster digital alveolus, studi kasus digital, serta kampanye kesehatan berbasis proyek, dengan evaluasi formatif melalui soal interaktif dan umpan balik langsung. Sementara itu, kelas konvensional lebih mengandalkan aktivitas pembelajaran tradisional seperti ceramah dari guru, video edukasi, gambar statis, studi kasus menggunakan lembar kerja, dan diskusi kelompok.

Perbandingan antara kedua perlakuan ini membedakan aktivitas belajar siswa meliputi: keterlibatan siswa, penggunaan teknologi, dan umpan balik berupa evaluasi formatif.

Instrumen Penilaian

Penelitian ini menggunakan tiga instrumen utama dalam pengumpulan data. Pertama, Tes Pemahaman Konseptual yang terdiri dari 20 soal pilihan ganda dan 5 soal esai yang telah melalui proses validasi ahli dengan koefisien reliabilitas Cronbach's α sebesar 0,82. Standar validasi instrumen mengikuti standar penelitian bidang sosial yang dilakukan Mejía-clavo *et al.* (2024) dengan reliabilitas $0.8 \leq \alpha < 0.9$ tergolong pada kategori baik.



Gambar 2. Diagram Alur Indikator Penilaian Sistem Pernapasan

Gambar 2 merupakan representasi dari diagram penilaian yang mengukur pemahaman konsep sistem pernapasan manusia melalui delapan indikator utama yang dimulai dari pengenalan anatomi dasar (C1: Mengingat) hingga aplikasi teknologi *bioengineering* (C6: Mencipta). Diagram secara hierarkis mencakup mekanisme pernapasan (C2), pertukaran gas (C3), dampak lingkungan terhadap kesehatan respirasi (C4), gangguan klinis (C3-C4), adaptasi fisiologis (C5), serta integrasi teknologi kesehatan dan bantuan pernapasan (C4-C6), dengan menggunakan kombinasi instrumen penilaian berupa pertanyaan pilihan ganda (PG) dan esai (E) untuk mengukur berbagai level kognitif sesuai taksonomi Bloom.

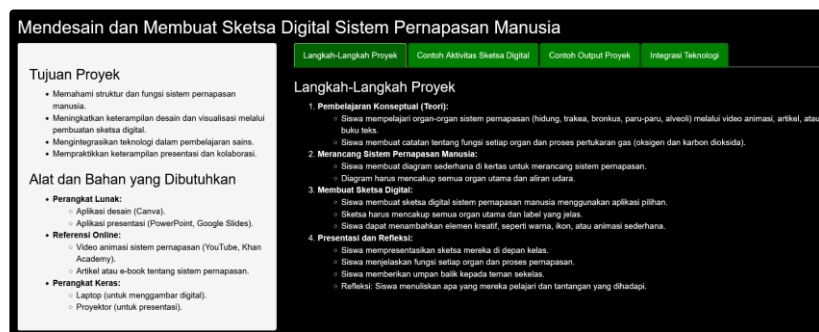
Pembelajaran *BreathQuest*-PjBL

Aplikasi media pembelajaran *BreathQuest* dikembangkan menggunakan Adobe Animate dengan mengacu pada *storyboard* yang telah dirancang sebelumnya dan memastikan konsistensi antara produk akhir dan desain awal. Proses validasi melibatkan evaluasi oleh empat pakar (ahli media dan ahli materi biologi) menggunakan Aiken's V, yang menunjukkan hasil sangat valid untuk desain produk (0,95), kesesuaian dengan tujuan pembelajaran (0,95), dan kemudahan penggunaan (0,90), sementara aspek interaktivitas (0,75) dan materi konten (0,85) tergolong valid. Secara keseluruhan, *BreathQuest* dinyatakan layak dengan persentase kelayakan 88% sehingga hasil validasi ini membuktikan bahwa *BreathQuest* memenuhi standar kelayakan sebagai media pembelajaran.

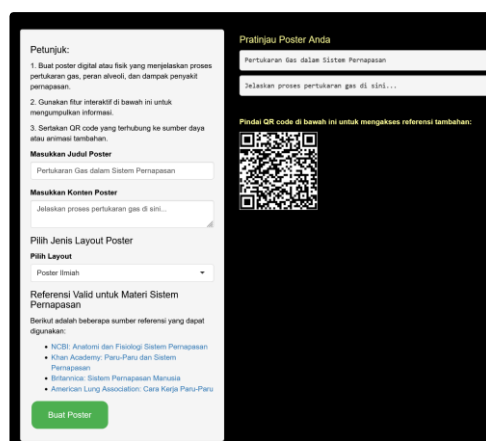


Gambar 3. (a) Deskripsi kompetensi dasar terkait materi yang akan disajikan; (b) Bagian antarmuka yang menampilkan struktur paru-paru; (c) Antarmuka untuk memulai evaluasi atau kuis, terdiri dari kolom pengisian nama dan kelas serta tombol "Mulai" untuk memulai evaluasi; (d) Tampilan hasil evaluasi/kuis yang menampilkan pesan "Jawaban Benar!!!" beserta nilai skor di sisi kanan layar.

Berdasarkan Gambar 3 aplikasi *BreathQuest-PjBL* menampilkan konten pembelajaran secara visual dan interaktif sehingga aplikasi didesain berbasis kompetensi dengan pendekatan multimedia interaktif khususnya pada materi kompleks seperti proses pertukaran gas dan dampaknya terhadap kesehatan. Aplikasi *BreathQuest-PjBL* dilengkapi dengan berbagai fitur seperti editor sketsa digital, alat pembuatan poster (baik digital maupun fisik), dan mode presentasi interaktif yang memungkinkan siswa membuat diagram berlabel, animasi sederhana, serta poster ilmiah tentang proses pertukaran gas dan dampak penyakit pernapasan (Gambar 4). Aplikasi juga menyediakan QR code yang terhubung dengan sumber pembelajaran tambahan dari referensi terpercaya seperti NCBI dan Khan Academy, fasilitas kolaborasi berbasis cloud, serta umpan balik langsung yang mendukung pengembangan keterampilan desain, presentasi, dan literasi digital siswa. Melalui kegiatan pembelajaran berbasis proyek, siswa akan berpikir serta membuat inovasi solusi melalui pembuatan poster interaktif dan representasi digital sistem pernapasan (Gambar 5).



Gambar 4. Panduan Proyek untuk Perancangan dan Pembuatan Sketsa Digital Sistem Pernapasan Manusia.



Gambar 5. Pembuatan Poster tentang Sistem Pernapasan yang Terkait dengan Proses Pertukaran Gas dan Dampaknya terhadap Kesehatan.

Teknik Pengumpulan Data

Interval nilai pada Tabel 4 adalah parameter kategorisasi tingkat penguasaan materi sistem pernapasan manusia berdasarkan standar kompetensi minimal (Permendikbud RI Nomor 21 Tahun 2022 Tentang Standar Isi Pendidikan Dasar Dan Menengah, 2022).

Tabel 1.

Kategorisasi Tingkat Penguasaan Materi Sistem Pernapasan Manusia

Interval Nilai	Kategori
90-100	Sangat Baik
80-89	Baik
70-79	Cukup
60-69	Kurang
0-59	Sangat Kurang

Teknik Analisis Data

Analisis statistik inferensial dilakukan untuk menguji signifikansi perbedaan antara kelompok kontrol dan eksperimen. Tahap pertama dilakukan uji asumsi yang dimulai dengan uji normalitas (Shapiro-Wilk) untuk menentukan apakah data berdistribusi normal (Khatun, 2021). Jika asumsi normalitas terpenuhi, analisis dilanjutkan dengan *Independent Samples t-test* namun jika tidak akan digunakan uji non-parametrik Mann-Whitney U Test. Uji homogenitas varians (Levene's Test) dilakukan untuk memeriksa kesamaan varians antar kelompok. Jika varians homogen, digunakan t-test dengan asumsi varians sama (*equal variances assumed*) namun jika data tidak homogen digunakan t-test tanpa asumsi varians sama (*equal variances not assumed*).

Hipotesis statistik yang dirumuskan yaitu: H_0 menyatakan tidak ada perbedaan gain score antara kelompok kontrol dan eksperimen, sedangkan H_1 menyatakan adanya perbedaan. Selain signifikansi statistik (nilai-p), *effect size* (Cohen's d) dihitung untuk mengukur besarnya perbedaan secara praktis dengan interpretasi berdasarkan kriteria Cohen (kecil, sedang, atau besar) (Lakens, 2013). Analisis terhadap effect size bertujuan untuk mengetahui dampak praktis intervensi.

Pertimbangan Etika

Penelitian ini memperhatikan beberapa aspek etika penelitian (BERA, 2018) meliputi: (1) persetujuan tertulis dari seluruh partisipan penelitian, (2) kerahasiaan dan anonimitas data responden, serta (3) pemberian kesempatan yang sama bagi kelompok kontrol untuk mengakses media pembelajaran setelah penelitian selesai dilaksanakan.

Formulir Persetujuan

Pertimbangan Etika Penelitian

Penelitian ini memperhatikan aspek-aspek etika berikut:

- ☐ 1. Persetujuan Tertulis
Saya memberikan persetujuan tertulis untuk berpartisipasi dalam penelitian ini
- ☐ 2. Kerahasiaan dan Anonimitas Data
Saya memahami bahwa identitas dan data saya akan dijaga kerahasiaannya
- ☐ 3. Akses Setara untuk Media Pembelajaran
Saya memahami bahwa kelompok kontrol akan mendapatkan akses yang sama setelah penelitian

Nama Partisipan: _____

Sekolah/Kelas: _____

Tanggal: _____
2025-04-07

Tanda Tangan Digital (ketik nama lengkap): _____

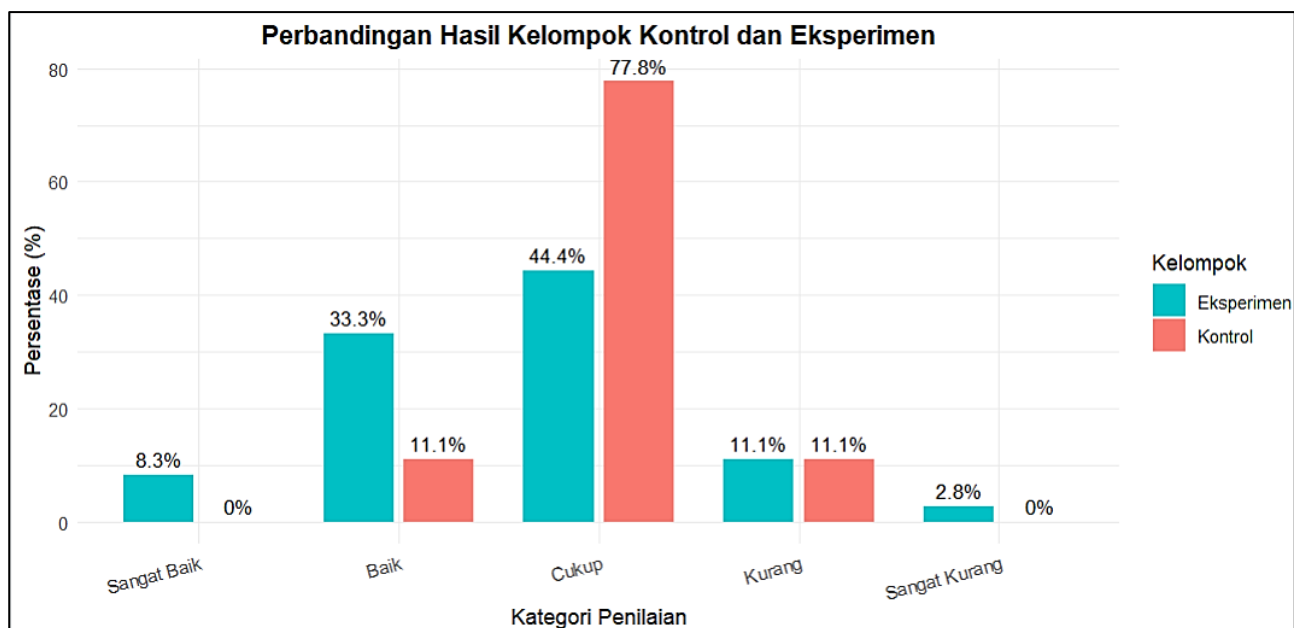
Submit Persetujuan

Gambar 6. Formulir Persetujuan untuk persetujuan etis (*ethical clearance*)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Analisis statistik deskriptif dalam penelitian ini menunjukkan adanya dampak yang signifikan dari penerapan *BreathQuest*-PjBL terhadap hasil belajar siswa. Terdapat perubahan positif dalam pencapaian hasil belajar siswa setelah menerapkan *BreathQuest*-PjBL. Hasil analisis menunjukkan bahwa media *BreathQuest* mampu meningkatkan keterlibatan siswa dan memperdalam pemahaman konsep terhadap materi yang diajarkan. Siswa tidak hanya memperoleh pengetahuan teoritis, tetapi juga keterampilan praktis yang relevan, yang berkontribusi pada peningkatan hasil belajar secara signifikan. Berikut disajikan statistik deskriptif perbandingan kategori hasil belajar kelompok kontrol dan eksperimen pada Gambar 7.



Gambar 7. Statistik Deskriptif Perbandingan Kategori Hasil Belajar Kelompok Kontrol dan Eksperimen

Hasil statistik deskriptif pada Gambar 3 menunjukkan perbedaan pencapaian *posttest* yang berbeda antara kelompok eksperimen dan kelompok kontrol. Perbedaan nilai yang paling menonjol yaitu kelompok eksperimen berhasil mendorong 41,6% siswa mencapai kategori baik hingga sangat baik, sementara kelompok kontrol hanya 11,1%. Sebaliknya, distribusi siswa paling dominan pada kelompok kontrol justru berada di kategori Cukup (77,8%), yang hampir dua kali lipat lebih tinggi dibandingkan kelompok eksperimen (44,4%). Capaian ini mengindikasikan bahwa kelompok eksperimen lebih efektif dalam meningkatkan hasil belajar dibandingkan dengan kelompok kontrol. Di sisi lain, persentase siswa di kategori rendah relatif memiliki capaian yang hampir sama antara kedua kelompok. Namun, terdapat satu siswa (2,8%) di kategori sangat kurang pada kelompok eksperimen yang tidak dimiliki kelompok kontrol. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun intervensi berhasil meningkatkan pencapaian di level atas, tetap ditemukan tantangan untuk meningkatkan hasil belajar siswa yang memiliki kemampuan belajar yang rendah ditinjau dari hasil *pretest*.

Tabel 2.

Hasil Uji Normalitas menggunakan Shapiro-Wilk

Kelompok	Variabel	Statistik	df	p-value	Kesimpulan
Kontrol	Pretest	0.981	36	0.762	Normal ($p>0.05$)
	Posttest	0.965	36	0.284	Normal ($p>0.05$)
Eksperimen	Pretest	0.974	36	0.482	Normal ($p>0.05$)
	Posttest	0.958	36	0.173	Normal ($p>0.05$)

Hasil uji normalitas Shapiro-Wilk pada Tabel 2 menunjukkan bahwa seluruh variabel (Pretest dan Posttest) pada kedua kelompok berdistribusi normal dengan nilai $p\text{-value} > 0.05$ (Pretest kontrol $p = 0.762$; Posttest eksperimen $p = 0.173$). Justifikasi normalitas didasarkan pada nilai statistik Shapiro-Wilk yang Posttest mendekati 1 mengindikasikan tidak ada penyimpangan signifikan dari distribusi normal. Selain itu, asumsi normalitas terpenuhi sehingga uji parametrik menggunakan *Independent Samples t-test* dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut. Ketercapaian asumsi normalitas juga didukung oleh jumlah sampel yang seimbang (masing-masing 36 siswa) dan tidak adanya *outlier* ekstrem yang memengaruhi distribusi data.

Tabel 3.

Hasil Uji Homogenitas menggunakan Levene's Test

Variabel	F	df1	df2	p-value	Kesimpulan
Pretest	0.127	1	70	0.723	Homogen ($p > 0.05$)
Posttest	2.845	1	70	0.096	Homogen ($p > 0.05$)

Berdasarkan Tabel 3 menunjukkan bahwa uji Levene's Test memberikan konfirmasi terhadap varians data yang bersifat homogen untuk semua variabel (Pretest $p = 0.723$; Posttest $p = 0.096$), dengan nilai $p\text{-value} > 0.05$. Nilai F yang rendah menunjukkan tidak ada perbedaan varians yang signifikan antar kelompok. Hasil ini memperkuat kelayakan penggunaan uji parametrik yang menempatkan uji homogenitas varians sebagai prasyarat untuk memastikan keakuratan perbandingan rata-rata sehingga analisis dapat dilanjutkan dengan t-test tanpa penyesuaian khusus.

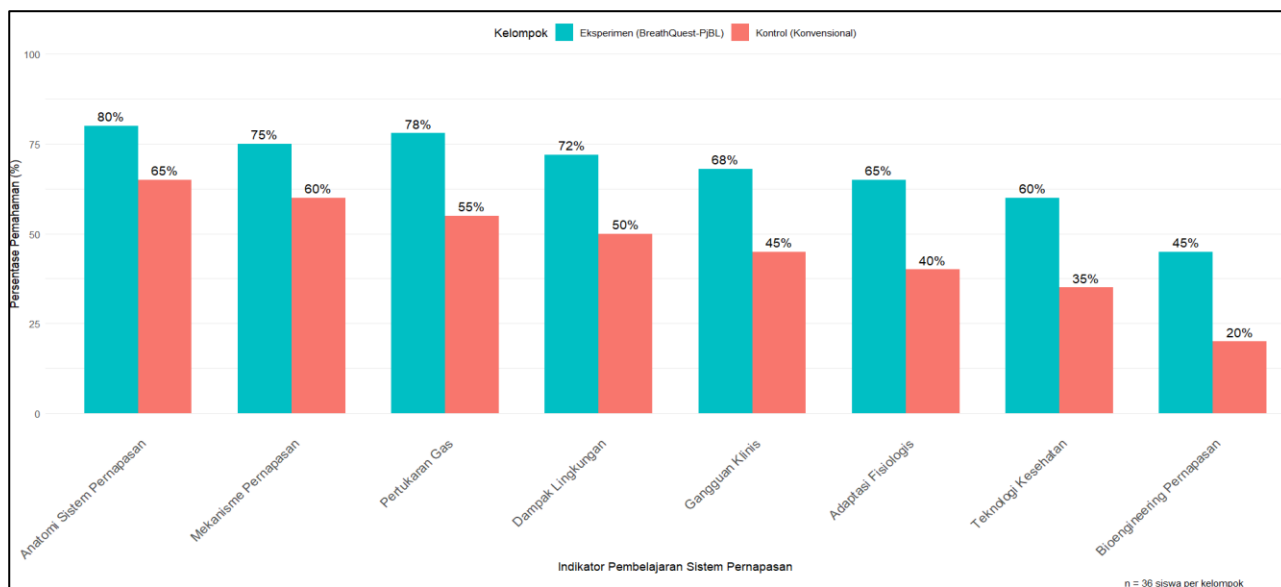
Tabel 4.

Perbandingan Hasil Pretest dan Posttest antara Kelompok Kontrol dan Eksperimen

Variabel	Kontrol (Mean $\pm$ SD)	Eksperimen (Mean $\pm$ SD)	p-value	Effect Size (d)
Pretest	50.61 $\pm$ 2.64	50.33 $\pm$ 2.45	> 0.05	-
Posttest	69.61 $\pm$ 6.23	73.67 $\pm$ 7.82	< 0.05	0.58

Hasil analisis pretest dan posttest antara kelompok kontrol dan eksperimen pada Tabel 4 menunjukkan bahwa pada hasil pretest tidak terdapat perbedaan signifikan antara kelompok kontrol dan eksperimen dengan nilai rata-rata masing-masing 50,61 $\pm$ 2,64 dan 50,33 $\pm$ 2,45 ($p\text{-value} > 0,05$). Capaian ini mengindikasikan bahwa kedua kelompok memiliki kemampuan awal yang setara sebelum intervensi diberikan. Namun, setelah diberikan perlakuan posttest kelompok eksperimen (73,67 $\pm$ 7,82) secara signifikan lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol (69,61 $\pm$ 6,23) dengan $p\text{-value} < 0,05$. Perbedaan ini juga didukung oleh *effect size* ($d = 0,58$) yang termasuk dalam kategori efek sedang (*moderate effect*) menunjukkan bahwa intervensi yang diberikan memberikan dampak yang cukup berarti dalam meningkatkan hasil belajar.

Peningkatan yang lebih besar pada kelompok eksperimen mengindikasikan bahwa penggunaan *BreathQuest* yang diterapkan lebih efektif dibandingkan dengan model konvensional pada kelompok kontrol. Meskipun kedua kelompok mengalami peningkatan dari pretest ke posttest, kelompok eksperimen menunjukkan kemajuan yang lebih substansial dengan selisih rata-rata 4,06 poin. Temuan ini memperkuat relevansi bahwa intervensi yang dirancang untuk kelompok eksperimen berhasil meningkatkan pemahaman siswa secara lebih optimal sehingga dapat dipertimbangkan untuk diterapkan dalam konteks pembelajaran yang lebih luas. Oleh karena itu, perbedaan signifikan antara kedua kelompok tidak hanya bersifat statistik ($p < 0,05$), tetapi juga memiliki implikasi praktis yang nyata seperti terlihat dari *effect size* yang cukup berpengaruh ($d = 0,58$).



Gambar 8. Komparasi antara Kelompok Eksperimen dan Kontrol terkait Capaian Hasil Belajar Kognitif berdasarkan Indikator Sistem Pernapasan Manusia

Gambar 8 menunjukkan bahwa kelompok eksperimen yang menggunakan pembelajaran *BreathQuest* berbasis *Project-Based Learning* secara konsisten mencapai persentase pemahaman lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol (konvensional) pada seluruh indikator sistem pernapasan. Pada indikator anatomi sistem pernapasan, kelompok eksperimen mencapai 80% berbanding 65% pada kelompok kontrol yang mengindikasikan bahwa simulasi *BreathQuest* membantu siswa menghubungkan konsep anatomi-fisiologi pernapasan manusia. Demikian pula pada indikator mekanisme pernapasan, capaian 75% kelompok eksperimen dibandingkan dengan kelompok kontrol sebesar 60% menunjukkan keunggulan pembelajaran *BreathQuest-PjBL* dalam memvisualisasikan proses inspirasi-ekspirasi secara interaktif. Perbedaan signifikan juga terlihat pada indikator Pertukaran Gas, di mana kelompok eksperimen unggul 22% yang membuktikan keunggulan *BreathQuest* dalam menjelaskan konsep difusi O_2 - CO_2 melalui praktik simulasi secara langsung.

Pada indikator adaptasi fisiologis dan aplikasi klinis, kelompok eksperimen tetap unggul dengan capaian 65% dan 60%, sementara kelompok kontrol hanya mencapai 40-45%. Capaian ini menegaskan bahwa pendekatan konvensional cenderung terbatas dalam mengajarkan konsep dinamik seperti respons tubuh terhadap hipoksia atau analisis gangguan pernapasan. Sebaliknya, *BreathQuest-PjBL* memberi kesempatan kepada siswa untuk mengeksplorasi konsep-konsep kompleks dalam cakupan sistem pernapasan melalui kegiatan simulasi dan proyek berbasis masalah sehingga dapat mendorong pemikiran kritis dan analitis. *BreathQuest PBL* memfasilitasi kemampuan berpikir tingkat tinggi melalui skenario kasus (misalnya: simulasi dampak polusi) dan desain alat bantu napas (*bioengineering*). Temuan ini juga memperkuat integrasi antara *BreathQuest* dan PjBL tidak hanya meningkatkan pemahaman konseptual tetapi juga kemampuan aplikatif dalam konsep teoritik dan kehidupan sehari-hari yang sering kali kurang tersentuh pembelajaran konvensional.

Pembahasan

Peningkatan signifikan pemahaman konsep siswa pada kelompok eksperimen menunjukkan keselarasan antara pembelajaran menggunakan *BreathQuest-PjBL* dengan prinsip pembelajaran konstruktivis. Temuan ini didukung oleh penelitian Luo (2022) mengenai desain pembelajaran yang bersifat multimodal dari *BreathQuest-PjBL* (simulasi visual dan proyek praktis) meningkatkan pemrosesan kognitif. Hasil ini juga sejalan dengan penelitian Shangguan *et al.* (2020) tentang retensi pengetahuan yang lebih baik ketika proses konsep yang abstrak disajikan melalui desain visualisasi dinamis dan dikombinasikan dengan aplikasi praktis.

Temuan penelitian menunjukkan bukti empiris yang konsisten tentang efektivitas pembelajaran *BreathQuest-PjBL*. Data pada Tabel 4 mengungkapkan bahwa meskipun kedua

kelompok memiliki kemampuan awal yang setara (pretest: 50,61 pada kelompok eksperimen berbanding 50,33 pada kelompok kontrol; $p > 0,05$), kelompok eksperimen yang menggunakan *BreathQuest* mencapai skor posttest yang secara signifikan lebih tinggi (73,67 berbanding 69,61 pada kelompok kontrol; $p < 0,05$) dengan selisih rata-rata 4,06 poin. Keberhasilan capaian ini dapat dijelaskan melalui tiga fitur utama dalam *BreathQuest*-PjBL: (1) visualisasi akurat terhadap konsep aliran udara memungkinkan siswa melacak pergerakan oksigen dari hidung hingga alveolus sehingga memperkuat pemahaman anatomi sistem pernapasan; (2) simulasi dinamis mekanisme tekanan udara yang membantu siswa memvisualisasikan hubungan antara kontraksi-relaksasi otot pernapasan dengan perubahan volume rongga dada; dan (3) demonstrasi interaktif proses difusi gas di alveolus yang menyajikan konsep abstrak pertukaran O_2 dan CO_2 dalam format konkret melalui animasi molekuler. Fitur-fitur yang disediakan dalam media pembelajaran secara kolektif mentransformasi pembelajaran konsep sistem pernapasan dari yang semula dianggap abstrak menjadi nyata melalui kehadiran visual sehingga menjadi lebih mudah dipahami.

BreathQuest-PjBL mampu mengubah cara belajar siswa dari sekedar mendengar penjelasan guru dan menghafal materi menjadi proses belajar untuk terlibat, misalnya aktif mengobservasi dan mengaitkan pelajaran dengan kehidupan nyata. Kelompok kontrol cenderung mengandalkan proses ceramah dari guru dan dominan hafalan kurang efektif untuk memfasilitasi siswa terhadap konsep materi yang bersifat dinamis pada sistem pernapasan. Pengalaman langsung yang diberikan melalui pembelajaran *BreathQuest*-PjBL melalui simulasi interaktif dan tantangan proyek nyata melatih siswa untuk tidak sekedar mengetahui materi tetapi dapat memahami hingga menerapkan konsep yang dipelajari.

Perolehan hasil *size effect* pada kategori moderat ($d = 0,58$) menunjukkan pengelolaan beban kognitif intrinsik yang efektif melalui desain aplikasi *BreathQuest*. Proses pembelajaran melalui simulasi interaktif yang memungkinkan siswa mengalami kesulitan awal, kemudian mendapatkan bimbingan dalam proyek lanjutan, terbukti mampu menciptakan pemahaman yang lebih mendalam dan bermakna termasuk dalam proses desain kognitif. Mekanisme ini menjelaskan mengapa kelompok eksperimen menunjukkan peningkatan hasil belajar yang lebih substansial dibandingkan kelompok kontrol. Sweller (2020) menjelaskan bahwa beban kognitif dicapai melalui: (1) segmentasi animasi yang sesuai fase pernapasan, dan (2) scaffolding tepat waktu selama tugas proyek. Temuan ini selaras dengan penelitian Wischgoll *et al.* (2019) tentang pembelajaran berbasis simulasi yang menekankan pengendalian aliran informasi dalam alat digital.

Keunggulan kelompok eksperimen terutama terlihat dalam penguasaan konsep dalam konsep adaptasi fisiologis dan pertukaran gas dengan selisih performa 22-25% (Gambar 5). Simulasi interaktif berfungsi sebagai jembatan kognitif dengan memvisualisasikan proses belajar secara spasial-temporal (Chikha *et al.*, 2021). Selain itu, pendekatan proyek berbasis kasus meningkatkan pemahaman aplikatif (60 persen berbanding 45 persen pada kelompok kontrol). Kombinasi simulasi dinamis dan *problem-solving* secara iteratif terbukti efektif mengembangkan pemahaman konseptual siswa. Implementasi *BreathQuest* PjBL lebih unggul dari pembelajaran konvensional karena dapat memfasilitasi encoding memori ganda yang mencakup visual dan verbal sehingga memungkinkan siswa untuk dapat mengkonstruksi pengetahuannya sendiri melalui proses pembelajaran aktif. Seperti dinyatakan dalam meta-analisis Bai & Jiang (2024), pengajaran konvensional sering gagal mengatasi hambatan sehingga siswa yang merasa tidak mampu (*self-efficacy* rendah) akan lebih cepat menyerah saat berhadapan dengan tantangan seperti materi yang bersifat abstrak. Temuan penelitian ini semakin memperkuat bahwa simulasi interaktif menggunakan *BreathQuest* dapat menjembatani kesenjangan terhadap konsep-konsep yang membutuhkan visualisasi spasial-temporal.

Penguasaan materi sebesar 60% dari kelompok eksperimen dalam konteks indikator materi aplikasi klinis (berbanding 45% pada kelompok kontrol) menunjukkan keefektifan *BreathQuest*-PjBL dalam berpikir tingkat tinggi. Sejalan dengan kerangka pembelajaran autentik oleh (Herrington *et al.*, 2009) tentang skenario pembelajaran digital yang optimal menyediakan beberapa aspek yaitu: (1) ruang masalah yang terkontakstualisasi, dan (2) penyempurnaan iteratif melalui kasus pasien virtual. Capaian pemahaman konsep materi yang lebih baik dari pembelajaran *BreathQuest*-PjBL

dalam konsep anatomis-mekanis (80% pada kelompok eksperimen berbanding 65% pada kelompok kontrol) menegaskan keselarasan teknologi dan pedagogi. Mario *et al.* (2023) menjelaskan bahwa pembelajaran berbasis digital yang efektif harus mentransformasi penyampaian konten. *BreathQuest* terbukti mampu memfasilitasi pembelajaran dengan mengubah gambar statis menjadi model 2D yang dapat dimanipulasi dan menyematkan umpan balik hasil kerja siswa pada kegiatan simulasi. Konsistensi keunggulan dari *BreathQuest*-PjBL juga terlihat pada penguasaan konsep pada indikator anatomis-mekanis yang mencapai 80% (sementara kelompok kontrol mencapai 65%).

Tantangan implementasi juga terlihat dari adanya satu siswa di kategori sangat kurang pada kelompok eksperimen, sementara kelompok kontrol tidak memilikinya. Fenomena ini digali lebih lanjut melalui wawancara mendalam dengan 15 siswa (dibagi merata berdasarkan tingkat pencapaian) yang kemudian teridentifikasi dua masalah utama yaitu: (1) terdapat perbedaan besar dalam pengalaman belajar digital sebelumnya. Sebagian siswa hanya terbiasa dengan materi pasif (seperti buku teks), sementara lainnya sudah mahir menggunakan alat interaktif. Siswa dengan pengalaman terbatas cenderung kesulitan beradaptasi dengan simulasi 2D dalam aplikasi *BreathQuest*; (2) kemampuan mengatur waktu dan memantau kemajuan belajar (*self-monitoring*) bervariasi di antara siswa. Bagi siswa yang memiliki strategi belajar terstruktur (seperti membuat jadwal dan evaluasi mandiri) lebih berhasil memanfaatkan fitur bantuan (*BreathQuest*) dalam aplikasi pembelajaran *BreathQuest*-PjBL. Terkait dengan kurangnya adaptasi teknologi bagi siswa, menurut temuan penelitian Gui *et al.* (2023) dalam pembelajaran berbasis digital masih diperlukan pendampingan guru karena siswa membutuhkan *BreathQuest* (dukungan) untuk memastikan bahwa pengalaman bermain benar-benar mengarah ke hasil belajar yang diinginkan.

Implikasi praktis dari penelitian ini adalah perlunya pelatihan guru dalam merancang PjBL yang diintegrasikan dengan teknologi digital. Kajian yang dilakukan Tene *et al.* (2025) tentang pembelajaran digital menekankan bahwa keberhasilan integrasi teknologi tidak hanya bergantung pada alat, tetapi juga pada kemampuan pedagogik guru dalam mengelola proyek dan memfasilitasi diskusi. Tanpa pelatihan memadai, risiko miskonsepsi atau dominasi siswa tertentu dalam kelompok dapat mengurangi efektivitas intervensi. Keterbatasan penelitian ini antara lain durasi intervensi yang relatif singkat dan sampel terbatas pada satu jenjang pendidikan. Penelitian lanjutan dapat menguji efek jangka panjang serta penerapan di berbagai konteks (misalnya, sekolah dengan fasilitas teknologi minim). Selain itu, eksplorasi faktor motivasi siswa juga dapat memperkaya pemahaman tentang variasi respons terhadap intervensi.

KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa pembelajaran menggunakan *BreathQuest*-PjBL secara signifikan meningkatkan pemahaman konsep siswa pada materi sistem pernapasan. Kelompok eksperimen menunjukkan pencapaian lebih tinggi dibandingkan kelompok kontrol, terutama dalam pemahaman konsep kompleks seperti adaptasi fisiologis dengan selisih 22-25 persen dan aplikasi klinis dengan perbedaan 15 persen (60 persen pada kelompok eksperimen berbanding 45 persen di kelompok kontrol). Keberhasilan pembelajaran *BreathQuest*-PjBL didukung oleh desain multimodal yang mengintegrasikan simulasi interaktif dengan pendekatan berbasis proyek sehingga mampu mengoptimalkan beban kognitif melalui segmentasi animasi dan pemberian scaffolding tepat waktu. Namun, ditemukan beberapa tantangan implementasi terkait kesenjangan literasi digital dan variasi kemampuan regulasi diri siswa yang memerlukan pendekatan lebih personal. Sebagai upaya mengoptimalkan implementasi, diperlukan pelatihan guru yang berfokus pada penguasaan *BreathQuest* digital dan pengembangan strategi pembelajaran berdiferensiasi. Pengayaan media pembelajaran dapat dilakukan dengan menambahkan fitur multimodal. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi faktor motivasi siswa, menguji efek jangka panjang dari pembelajaran *BreathQuest*-PjBL, serta mengembangkan adaptasinya untuk berbagai konteks pendidikan. Temuan mengenai siswa yang mengalami kesulitan beradaptasi dengan teknologi juga mengindikasikan pentingnya pendekatan inklusif dalam pembelajaran berbasis digital.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dan pendanaan yang diberikan oleh Universitas Kristen Satya Wacana (UKSW) melalui Skema Penelitian Riset Bersama Dosen dan Mahasiswa (RBDM) berdasarkan Surat Keputusan No. 107/RIK-RPM/09/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- Bai, Y., & Jiang, J. (2024). Meta-analysis of factors affecting the use of digital learning resources. *Interactive Learning Environments*, 32(2), 522–533. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2091608>
- Beautemps, J., Bresges, A., & Becker-Genschow, S. (2025). Enhancing Learning Through Animated Video: An Eye-Tracking Methodology Approach. *Journal of Science Education and Technology*, 34(1), 148–159. <https://doi.org/10.1007/s10956-024-10162-4>
- BERA. (2018). *Ethical Guidelines for Educational Research* (fourth edi). British Educational Research Association. <https://www.bera.ac.uk/researchers-resources/publications/ethical-guidelines-for-educational-research-2018>
- Chikha, A. Ben, Khacharem, A., Trabelsi, K., Bragazzi, N. L., & Castro-alonso, J. C. (2021). The Effect of Spatial Ability in Learning From Static and Dynamic Visualizations : A Moderation Analysis in 6-Year-Old Children. *Original Research*, 12(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.583968>
- Cohen, L., Manion, L., & Morrison, K. (2018). *Research Methods in Education (Eighth edition)*. London and New York: Routledge Taylor and Francis Group.
- Davies, R. S., & Yanchar, S. C. (2017). The Use of Randomisation in Educational Research and Evaluation : A Critical Analysis of Underlying Assumptions. *Randomization in Educational Research*, November 2008, 1–19. <https://doi.org/10.1080/09500790802307837>
- Dhaniawaty, R. P., & Fadillah, A. P. (2022). Interactive Learning Media for Human Respiratory System Topic. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Pendidikan*, 14(3), 257–262.
- Fan, Lim Chu, Salleh, Sallimah, & Laxman, Kumar. (2018). Embedding video technology in enhancing the understanding of the biology concept of breathing: A Brunei perspective. *E-Learning and Digital Media*, 15(5), 217–234. <https://doi.org/10.1177/2042753018797260>
- Gui, Y., Cai, Z., Yang, Y., Kong, L., Fan, X., & Tai, R. H. (2023). Effectiveness of digital educational game and game design in STEM learning : a meta - analytic review. *International Journal of STEM Education*. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00424-9>
- Hao, K. C. (2023). Creating a DGBL integrating ARCS motivation theory with animation, narrative story, fun, and usability to enhance learning motivation and effectiveness. *Interactive Learning Environments*, 31(9), 5698–5714. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.2016862>
- Herrington, J., Reeves, T. ., & Oliver, R. (2009). *A Guide to Authentic e-Learning (1st ed.)*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203864265>
- Hidayati, N., & Roesdiana, L. (2025). The effect of animation assisted project-based learning model on mathematics learning outcomes of elementary students. *Proceedings of the International Conference on Mathematics and Science Education (ICMSE)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1063/5.0254247>
- Hu, S. (2019). Strategies on Improvement of Random Experiment Validity in Statistical Teaching. *5th International Conference on Economics, Management, Law and Education*, 110(Emle), 1164–1167.
- Jahic, A., Kristina, P., & Rundgren, C. (2025). The Affordances of Metaphors in Meaning-Making of Nutrient Uptake in Upper Primary School. *Research in Science Education*, 55, 297–315.
- Jantzen, S. G., McGill, G., & Jenkinson, J. (2024). *Design principles for molecular animation*. August, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fbinf.2024.1353807>
- Permendikbud RI Nomor 21 Tahun 2022 tentang Standar Isi Pendidikan Dasar dan Menengah, (2022). <https://jdih.kemdikbud.go.id/>
- Khatun, N. (2021). Applications of Normality Test in Statistical Analysis. *Open Journal of Statistics*,

- 11, 113–122. <https://doi.org/10.4236/ojs.2021.111006>
- Koç, A., & Kanadlı, S. (2025). Effect of Interactive Learning Environments on Learning Outcomes in Science Education: A Network Meta-Analysis. *Journal of Science Education and Technology*, 34(4), 681–703. <https://doi.org/10.1007/s10956-025-10202-7>
- Lakens, D. (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science : a practical primer for t -tests and ANOVAs. *Frontiers in Psychology*, 4(November), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>
- Luo, L. (2022). A Study on the Application of Computer-Aided Dual-Coding Theory in English Vocabulary Teaching. *Scientific Programming*, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2022/5951844%0AResearch>
- Mamonto, S. W., Prasetyo, Z. K., Sugara, U., & Susan, N. H. (2024). *STEM-Based Animation Learning Videos to Improve Critical Thinking Skills and Self-Directed Learning*. 13(3), 415–425.
- Mario, J., Iglesias, O., Cabero-almenara, J., & Palacios-rod r guez, A. (2023). Development of the teacher ’ s technological pedagogical content knowledge (TPACK) from the Lesson Study : A systematic review. *Frontiers in Education*, 8(February), 1–11. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1078913>
- Mayer, R. E. (2020). *Multimedia Learning* (3rd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/DOI: 10.1017/9781316941355>
- Mclaughlin, R. A., Yang, X., Quirk, B. C., Lorensen, D., Kirk, R. W., Noble, P. B., & Sampson, D. D. (2025). *Static and dynamic imaging of alveoli using optical coherence tomography needle probes*. 967–974. <https://doi.org/10.1152/japplphysiol.00051.2012>
- Mejía-clavo, F. E., Regalado, O. L., Fernández, R., Esmit, A., Fernández, F., Aurora, H., & Cueva, T. (2024). Validity and Reliability of Mathematics Research Instruments : Systematic Review. *TEM Journal*, 13(4), 3304–3314. <https://doi.org/10.18421/TEM134>
- Pathak, D., Kapoor, K., Choudhary, R. K., Singh, O., Uppal, V., & Bansal, N. (2025). Sketch-based animation teaching in veterinary anatomy via virtual mode during COVID-19 versus physical mode: a comparative analysis. *Journal of Visual Communication in Medicine*, 48(2), 69–75. <https://doi.org/10.1080/17453054.2025.2535999>
- Pinto, A. M., Soussi, D., Qasim, S., Dunin-Borkowska, A., Rupasinghe, T., Ubhi, N., & Ranasinghe, L. (2024). The Use of Animations Depicting Cardiac Electrical Activity to Improve Confidence in Understanding of Cardiac Pathology and Electrocardiography Traces Among Final-Year Medical Students: Nonrandomized Controlled Trial. *JMIR Medical Education*, 10, e46507. <https://doi.org/10.2196/46507>
- Plass, J. L. (2020). Emotional design for digital games for learning: The effect of expression, color, shape, and dimensionality on the affective quality of game characters. *Learning and Instruction*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2019.01.005>
- Ploetzner, R., Berney, S., & B trancourt, M. (2020). A review of learning demands in instructional animations : The educational effectiveness of animations unfolds if the features of change need to be learned. *Journal of Computer Assisted Learning*, 36(2), 838–860. <https://doi.org/10.1111/jcal.12476>
- Reinke, N. B., Kynn, M., & Parkinson, A. L. (2021). Immersive 3D experience of osmosis improves learning outcomes of first-year cell biology students. *CBE Life Sciences Education*, 20(1), 1–10. <https://doi.org/10.1187/cbe.19-11-0254>
- Rolfes, T., Roth, J., & Schnotz, W. (2020). Learning the Concept of Function With Dynamic Visualizations. *Original Research*, 11(April), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00693>
- Schmid, K., Knote, A., M ck, A., Pfeiffer, K., Mammen, S. Von, Fischer, S. C., & Gregg, L. (2022). *Interactive , Visual Simulation of a Spatio-Temporal Model of Gas Exchange in the Human Alveolus*. 1(January), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fbinf.2021.774300>
- Shangguan, C., Gong, S., Guo, Y., Wang, X., & Lu, J. (2020). The effects of emotional design on

- middle school students' multimedia learning: the role of learners' prior knowledge. *Educational Psychology*, 40(9), 1076–1093. <https://doi.org/10.1080/01443410.2020.1714548>
- Si, X. A., & Xi, J. (2022). *Pulmonary Oxygen Exchange in a Rhythmically Expanding – Contracting Alveolus – Capillary Model*. 159–173.
- Singh, P. K., & Ozarkar, A. (2025). Design education and NEP 2020: Understanding the shift towards animation in pedagogy. *Innovations in Education and Teaching International*, 00(00), 1–15. <https://doi.org/10.1080/14703297.2025.2514241>
- Spanjers, I. A. E., van Gog, T., Wouters, P., & van Merriënboer, J. J. G. (2012). Explaining the segmentation effect in learning from animations: The role of pausing and temporal cueing. *Computers & Education*, 59(2), 274–280. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.12.024>
- Stenlund, J., Schönborn, K., & Johansson Sydqvist, V. (2024). Visualisation of deep evolutionary time: looking back and looking forward. *Journal of Biological Education*, 00(00), 1–25. <https://doi.org/10.1080/00219266.2024.2420014>
- Strømme, T. A., & Mork, S. M. (2021). *Students' Conceptual Sense-making of Animations and Static Visualizations of Protein Synthesis: a Sociocultural Hypothesis Explaining why Animations May Be Beneficial for Student Learning. 1*, 1013–1038.
- Styles, B., & Torgerson, C. (2018). Randomised controlled trials (RCTs) in education research – methodological debates, questions, challenges. *Educational Research*, 60(3), 255–264. <https://doi.org/10.1080/00131881.2018.1500194>
- Suharto, R. P., Zubaidi, Z., Maulidiyah, F., & Setiawan, A. W. (2024). The implementation of project-based learning through animated videos in reading for specialized information. *Journal of Research on English and Language Learning*, 5(1), 75–83.
- Sweller, J. (2020). Cognitive load theory and educational technology. *Educational Technology Research and Development*, 68(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11423-019-09701-3>
- Tene, T., Fabián, D., López, V., Elizabeth, P., Aguirre, V., Gomez, C. V., & Bellucci, S. (2025). A systematic review of serious games as tools for STEM education. *FRONTI*, 10(February). <https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1432982>
- Tschay Mengistie, S. (2025). Effect of simulation and animation-integrated technology instruction on pre-service geography teacher trainees' conceptual understanding and retention in learning the earth's rotation and revolution. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 0(0), 1–22. <https://doi.org/10.1080/10382046.2025.2531014>
- Wischgoll, A., Pauli, C., & Reusser, K. (2019). High levels of cognitive and motivational contingency with increasing task complexity results in higher performance. *Instructional Science*, 47(3), 319–352. <https://doi.org/10.1007/s11251-019-09485-2>
- Wishart, J. (2017). Exploring How Creating Stop-Motion Animations Supports Student Teachers in Learning to Teach Science. *Journal of Research on Technology in Education*, 49(1–2), 88–101. <https://doi.org/10.1080/15391523.2017.1291316>
- Yunus, Suwito, D., Indriyanti, A. D., Pambudi, R. G., & Sari, D. P. (2025). Development of welding technique teaching module based on augmented reality integrated (ARI) equipped with 3D animation simulation to improve 21st century skills of vocational high school students. *Cogent Education*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/2331186X.2025.2505279>
- Zamzuri, A., Ali, M., & Hassan, A. (2019). Segmented Animation, User-Control Strategy and Cognition Segmented Animation, User-Control Strategy and Cognition. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 35(12), 1125–1134. <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1511180>