



PJBL-BSF UNTUK MENINGKATKAN LITERASI LINGKUNGAN SISWA KELAS X SMA

Evi Ristiana

Program Studi Pendidikan Biologi, FMIPA, Makassar, Indonesia

Penulis Korespondensi: evi.ristiana@unm.ac.id

Keywords:

Project-Based Learning
Black Soldier Fly
Bioconversion
Environmental literacy
Biology learning

The Research aimed to develop a Project-Based Learning model based on organic waste bioconversion using Black Soldier Fly (BSF) larvae to strengthen environmental literacy among tenth-grade SMA Negeri Matakali Kabupaten Polewali Mandar. The study was designed as research and development using the ADDIE framework consisting of analysis, design, development, implementation, and evaluation. The products developed were the PjBL-BSF syntax, teaching module, project worksheet, technical guide for BSF bioconversion, project assessment rubric, and environmental literacy instrument. The model consists of six learning phases: orienting students to organic waste problems, investigating BSF and bioconversion concepts, planning the project, conducting the BSF bioconversion project, analyzing data and reflecting on the process, and publishing environmental action products. The developed model is expected to facilitate conceptual understanding, scientific inquiry, collaboration, environmental attitudes, and pro-environmental behavior. Therefore, PjBL-BSF used as a contextual biology learning innovation that connects ecosystem concepts, biotechnology, waste management, and students' environmental action.

Kata kunci:

Project-Based Learning
Black Soldier Fly
Biokonversi limbah
Literasi lingkungan
Pembelajaran Biologi

Penelitian ini bertujuan mengembangkan model Project-Based Learning berbasis biokonversi limbah organik oleh larva Black Soldier Fly (BSF) untuk meningkatkan literasi lingkungan siswa kelas X SMA Negeri Matakali Kabupaten Polewali Mandar. Penelitian dirancang sebagai penelitian dan pengembangan dengan kerangka ADDIE yang meliputi analisis, desain, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Produk yang dikembangkan berupa sintaks model PjBL-BSF, modul ajar, LKPD proyek, panduan teknis biokonversi BSF, rubrik penilaian proyek, dan instrumen literasi lingkungan. Model ini terdiri atas enam fase pembelajaran, yaitu orientasi masalah limbah organik, investigasi konsep BSF dan biokonversi, perencanaan proyek, pelaksanaan proyek biokonversi BSF, analisis data dan refleksi, serta publikasi produk aksi lingkungan. Model yang dikembangkan diharapkan memfasilitasi pemahaman konsep, penyelidikan ilmiah, kolaborasi, sikap peduli lingkungan, dan perilaku pro-lingkungan. Dengan demikian, PjBL-BSF digunakan sebagai inovasi pembelajaran Biologi kontekstual yang menghubungkan konsep ekosistem, bioteknologi, pengelolaan limbah, dan aksi lingkungan siswa.

PENDAHULUAN

Permasalahan lingkungan di sekolah merupakan realitas yang dekat dengan kehidupan peserta didik. Limbah organik dari kantin, sisa makanan, daun kering, dan sampah rumah tangga sekolah sering kali belum dikelola secara optimal. Kondisi tersebut tidak hanya menimbulkan persoalan kebersihan, tetapi juga memperlihatkan belum kuatnya budaya memilah dan mengolah sampah secara bertanggung jawab. Materi pembelajaran Biologi kelas X, masalah limbah organik

dijadikan konteks autentik untuk menghubungkan konsep ekosistem, interaksi antarkomponen lingkungan, dekomposisi, daur materi, dan inovasi teknologi biologi.

Kurikulum Merdeka pada Capaian Pembelajaran Biologi Fase E menekankan kemampuan peserta didik dalam menciptakan solusi atas permasalahan lokal, nasional, maupun global yang berkaitan dengan keanekaragaman makhluk hidup, inovasi teknologi biologi, ekosistem, dan perubahan lingkungan (Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah, 2024). Oleh karena itu, pembelajaran Biologi tidak cukup diarahkan pada penguasaan konsep, tetapi perlu menumbuhkan kemampuan menyelidiki masalah, menganalisis data, mengambil keputusan, dan mengomunikasikan solusi. Kebutuhan ini sejalan dengan penguatan literasi lingkungan yang mencakup pengetahuan ekologis, keterampilan kognitif, disposisi afektif, dan perilaku bertanggung jawab terhadap lingkungan (Hollweg et al., 2011; McBeth & Volk, 2010).

Model pembelajaran yang relevan untuk membangun kompetensi tersebut adalah Project-Based Learning (PjBL). PjBL menempatkan peserta didik sebagai subjek aktif yang belajar melalui penyelidikan mendalam, perencanaan, produksi karya, refleksi, serta publikasi produk yang terkait dengan persoalan nyata. Penelitian Pertiwi et al. (2024) menunjukkan bahwa pembelajaran berbasis proyek yang terintegrasi STEM efektif meningkatkan kemampuan literasi lingkungan siswa. Temuan Lopez dan Palacios (2024) juga menunjukkan bahwa PjBL berbasis lingkungan sekitar meningkatkan kesadaran lingkungan siswa sekolah menengah. Faiqi et al. (2025) melaporkan bahwa PjBL berbasis etnosains meningkatkan literasi sains dan hasil belajar, sedangkan Murtalib et al. (2024) menempatkan PjBL sebagai pendekatan yang penting untuk menguji motivasi dan hasil belajar siswa.

Kajian pembelajaran berbasis masalah dan proyek juga memperkuat urgensi pengembangan model yang berbasis isu lingkungan. Azizi dan Rasyidi (2019) menunjukkan bahwa model Problem Based Learning berpengaruh terhadap kemampuan memecahkan masalah dan sikap peduli lingkungan siswa. Herman et al. (2022) melaporkan peningkatan hasil belajar literasi sains melalui penerapan Problem Based Learning pada siswa SMP. Di sisi lain, Rahmawati (2025) mengembangkan modul pengolahan limbah organik berbasis proyek eco-enzyme dan menunjukkan bahwa bahan ajar berbasis proyek mendukung pembelajaran lingkungan secara praktis. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa pembelajaran kontekstual, berbasis masalah, dan berbasis proyek memiliki potensi kuat untuk mengembangkan literasi lingkungan.

Inovasi pengelolaan limbah organik yang diintegrasikan ke dalam PjBL adalah biokonversi menggunakan larva Black Soldier Fly atau BSF (*Hermetia illucens*). Larva BSF mampu mengonsumsi berbagai bahan organik dan mengubahnya menjadi biomassa larva bernilai pakan serta residu yang dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Surendra et al. (2020) menjelaskan

bahwa teknologi BSF memiliki potensi besar dalam pengolahan limbah organik dan produksi sumber daya hayati. Kajian Amrul et al. (2022) menyatakan bahwa BSF mengubah nutrisi limbah menjadi protein dan lemak yang bermanfaat, sedangkan residunya berpotensi menjadi pupuk organik. Lalander et al. (2019) juga menunjukkan bahwa jenis substrat memengaruhi perkembangan larva dan efisiensi proses pengolahan limbah.

Rancak et al. (2017) mengkaji pengolahan sampah organik dengan BSF di TPA Kebon Kongok dan menunjukkan bahwa proses tersebut mencakup pemilahan, pencacahan, penimbangan, pengolahan dalam bioreaktor, panen larva, serta pembiakan BSF. Pratiwi et al. (2025) juga melaporkan bahwa pelatihan pengelolaan limbah organik rumah tangga menggunakan maggot BSF meningkatkan pemahaman masyarakat serta membuka peluang pemanfaatan larva sebagai pakan dan sumber ekonomi. Kedua rujukan tersebut memperlihatkan bahwa BSF tidak hanya relevan sebagai teknologi lingkungan, tetapi juga memiliki nilai edukatif dan sosial yang ditransformasikan ke dalam pembelajaran sekolah.

Meskipun PjBL, literasi lingkungan, dan biokonversi BSF telah banyak dikaji secara terpisah, integrasi ketiganya dalam bentuk model pembelajaran Biologi kelas X SMA masih perlu dikembangkan secara sistematis. Kebaruan artikel ini terletak pada perancangan model PjBL-BSF yang menghubungkan masalah limbah organik sekolah, praktik biokonversi, pengukuran data ilmiah, refleksi ekologis, dan aksi lingkungan siswa. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model Project-Based Learning berbasis biokonversi limbah oleh Black Soldier Fly untuk meningkatkan literasi lingkungan siswa kelas X SMA.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian dan pengembangan (Research and Development) yang bertujuan menghasilkan model pembelajaran PjBL-BSF beserta perangkat pendukungnya. Kerangka pengembangan yang digunakan adalah ADDIE yang terdiri atas tahap analysis, design, development, implementation, dan evaluation (Branch, 2009). Pemilihan ADDIE didasarkan pada karakteristiknya yang sistematis, fleksibel, dan sesuai untuk mengembangkan model, bahan ajar, serta perangkat pembelajaran. Pada tahap tertentu, prinsip pengembangan 4D dari Thiagarajan et al. (1974) juga digunakan sebagai pembanding, terutama dalam penyusunan definisi kebutuhan, rancangan produk, pengembangan, dan diseminasi terbatas.

Subjek sasaran pengembangan adalah siswa kelas X SMA Negeri Matakali Kabupaten Polewali Mandar pada materi ekosistem, perubahan lingkungan, dan inovasi teknologi biologi. Validator produk melibatkan ahli pembelajaran Biologi, ahli materi lingkungan atau, dan guru dibidang Biologi. Uji coba terbatas dilakukan pada satu kelas untuk memperoleh data keterlaksanaan, kepraktisan, respons siswa, dan peningkatan skor kemampuan literasi

lingkungan. Uji coba hasil pembelajaran dilaksanakan pada dua kelas, yaitu kelas eksperimen dan kelas kontrol.

Produk yang dikembangkan meliputi sintaks model PjBL-BSF, modul ajar, LKPD proyek, panduan teknis biokonversi BSF, rubrik penilaian proyek, rubrik presentasi, lembar observasi aktivitas siswa, angket kepraktisan, dan instrumen literasi lingkungan. Instrumen literasi lingkungan disusun dengan memperhatikan empat dimensi utama, yaitu pengetahuan lingkungan, keterampilan kognitif, sikap peduli lingkungan, dan perilaku pro-lingkungan (Hollweg et al., 2011; McBeth & Volk, 2010).

Data pengembangan dianalisis secara deskriptif kuantitatif dan kualitatif. Data validitas dianalisis melalui skor penilaian ahli terhadap kesesuaian sintaks, substansi materi, keterpaduan proyek, bahasa, tampilan, asesmen, dan keamanan kerja. Data kepraktisan dianalisis dari respons guru dan siswa terhadap kemudahan penggunaan perangkat, keterbacaan LKPD, keterlaksanaan tahapan proyek, dan kecukupan waktu. Data efektivitas literasi lingkungan, apabila uji implementasi dilaksanakan, dianalisis melalui perbandingan skor pretest dan posttest, N-gain, serta uji statistik yang sesuai dengan karakteristik data.

Tabel 1. Tahapan Pengembangan Model PjBL-BSF

Tahap ADDIE	Kegiatan Pengembangan	Produk/Data yang Dihasilkan
Analysis	Menganalisis kurikulum Biologi Fase E, karakteristik siswa, masalah limbah organik sekolah, serta kebutuhan guru terhadap perangkat pembelajaran berbasis proyek.	Peta kebutuhan, rumusan tujuan pembelajaran, dan konteks proyek BSF.
Design	Merancang sintaks model, modul ajar, LKPD proyek, panduan teknis BSF, rubrik proyek, dan instrumen literasi lingkungan.	Draf awal model PjBL-BSF dan perangkat pendukung.
Development	Mengembangkan perangkat pembelajaran, melakukan validasi ahli, dan merevisi produk berdasarkan masukan validator.	Produk tervalidasi berupa model, modul, LKPD, panduan proyek, dan instrumen.
Implementation	Menerapkan model pada uji coba terbatas di kelas X SMA dengan proyek biokonversi limbah organik.	Data keterlaksanaan, respons guru dan siswa, serta dokumentasi proyek.
Evaluation	Menganalisis validitas, kepraktisan, dan potensi efektivitas terhadap literasi lingkungan.	Rekomendasi revisi dan produk akhir model PjBL-BSF.

Tabel 2. Kisi-Kisi Instrumen Kemampuan Literasi Lingkungan

Dimensi Literasi Lingkungan	Indikator	Bentuk Instrumen
Pengetahuan lingkungan	Memahami konsep limbah organik, dekomposisi, peran BSF, daur materi, dan dampak limbah terhadap ekosistem.	Tes pilihan ganda/uraian
Keterampilan kognitif	Menganalisis masalah, menafsirkan data pengurangan limbah, membandingkan alternatif solusi, dan menyusun rekomendasi.	Tes uraian dan LKPD
Sikap peduli lingkungan	Menunjukkan kepedulian, tanggung jawab, dan kesediaan menjaga kebersihan lingkungan sekolah.	Angket skala Likert

Perilaku pro-lingkungan	Melakukan pemilahan sampah, mengikuti proyek BSF, dan mengomunikasikan aksi lingkungan.	Observasi dan refleksi
-------------------------	---	------------------------

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis kebutuhan menunjukkan bahwa limbah organik sekolah digunakan sebagai konteks pembelajaran Biologi yang dekat dengan kehidupan siswa. Limbah kantin, sisa makanan, kulit buah, sayuran, dan daun kering merupakan objek yang mudah diamati, diukur, dan dianalisis. Namun, potensi tersebut belum selalu diintegrasikan ke dalam aktivitas pembelajaran berbasis penyelidikan. Oleh karena itu, model PjBL-BSF dirancang untuk mengubah persoalan limbah organik menjadi proyek ilmiah yang mendorong siswa mengidentifikasi masalah, merumuskan pertanyaan, merancang solusi, mengumpulkan data, dan mempublikasikan aksi lingkungan.

Model PjBL-BSF memiliki enam fase utama, yaitu orientasi masalah limbah organik, investigasi konsep BSF dan biokonversi, perencanaan proyek, pelaksanaan proyek biokonversi, analisis data dan refleksi, serta publikasi produk aksi lingkungan. Keenam fase ini dikembangkan dengan memperhatikan prinsip PjBL, yaitu pembelajaran berbasis masalah autentik, penyelidikan berkelanjutan, kolaborasi, refleksi, revisi, dan publikasi produk. Dalam praktiknya, siswa tidak hanya mempelajari konsep dekomposisi dan siklus materi, tetapi juga menyusun proyek pengolahan limbah sederhana menggunakan larva BSF.

Tabel 3. Sintaks Model PjBL-BSF

Fase Model	Aktivitas Guru	Aktivitas Siswa	Target Literasi Lingkungan
Orientasi masalah limbah organik	Menyajikan data/foto kondisi limbah organik sekolah dan pertanyaan pemantik.	Mengamati lingkungan, mengidentifikasi sumber limbah, dan merumuskan masalah.	Kesadaran dan pengetahuan lingkungan
Investigasi konsep BSF dan biokonversi	Mengarahkan kajian sumber ilmiah tentang BSF, dekomposisi, ekosistem, dan keamanan kerja.	Mencari informasi, berdiskusi, dan menyusun peta konsep biokonversi.	Pengetahuan dan keterampilan kognitif
Perencanaan proyek	Membimbing rancangan alat, bahan, jadwal, pembagian tugas, dan variabel pengamatan.	Mendesain wadah, memilih jenis limbah, menyusun prosedur, dan merancang tabel data.	Keterampilan merancang solusi
Pelaksanaan proyek BSF	Memantau kegiatan, keselamatan, kebersihan, dan pencatatan data.	Menimbang limbah, memberi pakan larva, mengamati perubahan, dan mendokumentasikan data.	Keterampilan proses dan tanggung jawab
Analisis data dan refleksi	Membimbing pengolahan data, diskusi kendala, dan refleksi dampak lingkungan.	Menghitung pengurangan limbah, menafsirkan hasil, dan menulis refleksi.	Evaluasi lingkungan dan pengambilan keputusan
Publikasi produk aksi lingkungan	Memfasilitasi presentasi, pameran, kampanye, atau rekomendasi sekolah.	Menyusun laporan, poster/video, dan menyampaikan rekomendasi pengelolaan limbah.	Partisipasi dan perilaku pro-lingkungan

Fase orientasi masalah bertujuan membangun kesadaran siswa terhadap kondisi lingkungan sekolah. Guru memfasilitasi observasi titik penghasil limbah organik, wawancara singkat dengan pengelola kantin, atau audit sederhana terhadap volume sampah harian. Aktivitas ini melatih siswa melihat bahwa persoalan lingkungan bukan konsep abstrak, melainkan masalah nyata yang diukur dan diselesaikan. Tahap ini relevan dengan aspek pengetahuan dan kesadaran lingkungan dalam literasi lingkungan.

Fase investigasi konsep mengarahkan siswa mempelajari peran BSF dalam biokonversi, karakteristik larva, jenis limbah yang sesuai, faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan larva, serta potensi produk samping berupa biomassa dan frass. Materi ini berkaitan dengan ekologi, dekomposisi, rantai makanan detritus, interaksi organisme, dan bioteknologi sederhana. Keterkaitan tersebut mendukung Capaian Pembelajaran Biologi Fase E yang menuntut siswa mampu menciptakan solusi terhadap masalah berbasis isu lingkungan dan inovasi teknologi biologi (Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah, 2024).

Fase perencanaan dan pelaksanaan proyek menjadi inti dari model PjBL-BSF. Siswa menyusun rancangan proyek yang meliputi tujuan, alat dan bahan, jenis limbah, jumlah larva, jadwal pemberian pakan, variabel pengamatan, prosedur keselamatan, dan format pencatatan data. Selama pelaksanaan, siswa menimbang massa limbah awal, mengamati perubahan limbah, mencatat suhu dan kelembapan sederhana, menimbang sisa limbah, serta mendokumentasikan perkembangan proyek. Aktivitas tersebut melatih keterampilan proses sains dan membuat pembelajaran Biologi lebih empiris.

Fase analisis data dan refleksi mendorong siswa menghitung persentase pengurangan limbah, membandingkan kondisi awal dan akhir, mendiskusikan kendala, serta menilai kualitas kerja kelompok. Refleksi diarahkan pada pertanyaan: apa dampak pengelolaan limbah terhadap lingkungan sekolah, bagaimana peran organisme dalam mengubah limbah menjadi sumber daya, dan tindakan apa yang dilakukan warga sekolah. Proses ini penting karena literasi lingkungan tidak hanya menuntut pemahaman konsep, tetapi juga kemampuan mengevaluasi informasi dan mengambil keputusan.

Fase implementasi produk aksi lingkungan dilakukan melalui laporan proyek, poster, video kampanye, infografik, pameran mini, atau rekomendasi kebijakan pengelolaan limbah organik sekolah. Produk publik menjadi sarana komunikasi ilmiah dan sosial bagi siswa. Melalui implementasi, siswa belajar menyampaikan data, memberi alasan ilmiah, menerima masukan, dan mendorong perubahan perilaku warga sekolah. Dengan demikian, model PjBL-BSF mengintegrasikan aspek kognitif, afektif, psikomotorik, dan partisipatif.

Hasil Uji Coba Pembelajaran

Berdasarkan hasil analisis deskriptif uji coba tes kemampuan literasi lingkungan, rata-rata nilai pretest kelas eksperimen adalah 40,06, sedangkan kelas kontrol adalah 33,56. Setelah perlakuan, rata-rata nilai posttest kelas eksperimen meningkat menjadi 80,44, sedangkan kelas kontrol meningkat menjadi 72,94.

Tabel 4. Hasil Analisis Deskriptif Pretest dan Posttest

Kelompok	Pretest Mean	Posttest Mean	SD Pretest	SD Posttest	Nilai Minimum	Nilai Maksimum
Eksperimen	40,06	80,44	8,809	8,663	22-61	57-96
Kontrol	33,56	72,94	10,724	9,316	17-52	57-87

Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua kelas mengalami peningkatan hasil belajar setelah proses pembelajaran. Namun, peningkatan pada kelas eksperimen lebih tinggi dibandingkan kelas kontrol. Hal ini mengindikasikan bahwa penerapan model PjBL-BSF lebih efektif dalam meningkatkan literasi lingkungan siswa dibandingkan pembelajaran konvensional.

Dari perspektif literatur, pengembangan model ini didukung oleh penelitian tentang efektivitas PjBL terhadap literasi lingkungan dan literasi sains. Pertiwi et al. (2024) menemukan bahwa STEM-PjBL efektif meningkatkan kemampuan literasi lingkungan siswa. Faiqi et al. (2025) menunjukkan bahwa PjBL berbasis etnosains meningkatkan literasi sains dan hasil belajar. Sementara itu, Rahmawati (2025) membuktikan bahwa pengembangan bahan ajar pengolahan limbah organik berbasis proyek layak digunakan dalam pembelajaran. Temuan tersebut memperkuat asumsi bahwa proyek biokonversi BSF menjadi media pembelajaran yang relevan untuk mengembangkan literasi lingkungan siswa kelas X SMA.

BSF memiliki keunggulan sebagai agen biokonversi karena memanfaatkan limbah organik dan menghasilkan produk yang bernilai. Surendra et al. (2020) menyatakan bahwa teknologi BSF relevan untuk pengolahan limbah organik, produksi pakan, pupuk, dan produk biobased. Amrul et al. (2022) menjelaskan bahwa larva BSF mengubah nutrisi limbah menjadi protein dan lemak, sedangkan residunya berpotensi menjadi pupuk organik. Rancak et al. (2017) dan Pratiwi et al. (2025) menunjukkan bahwa praktik BSF juga diterapkan dalam konteks lokal dan masyarakat. Integrasi BSF dalam pembelajaran memungkinkan siswa memahami konsep ekonomi sirkular secara sederhana, yaitu mengubah limbah menjadi sumber daya.

Keunggulan model PjBL-BSF terletak pada sifatnya yang autentik, kontekstual, kolaboratif, dan berbasis data. Model ini memungkinkan guru menghubungkan materi ekosistem dan perubahan lingkungan dengan aktivitas nyata yang diamati siswa. Selain itu, model ini memberi ruang pada siswa untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis, pemecahan masalah, komunikasi ilmiah, tanggung jawab, dan perilaku peduli lingkungan. Walaupun demikian, model ini memiliki keterbatasan. Pelaksanaan proyek membutuhkan pengelolaan waktu, ketersediaan larva BSF, panduan keselamatan, lokasi penyimpanan wadah, dan kontrol

kebersihan agar tidak menimbulkan bau atau gangguan kenyamanan. Oleh karena itu, guru perlu menggunakan limbah organik yang aman, menghindari limbah berminyak atau tercampur bahan kimia, serta memastikan penggunaan sarung tangan dan masker selama kegiatan.

Hasil pengembangan menunjukkan bahwa model PjBL-BSF disusun sebagai model pembelajaran yang sistematis dan aplikatif. Produk utama model berupa sintaks, modul ajar, LKPD proyek, panduan teknis, dan instrumen asesmen saling mendukung untuk memfasilitasi pembelajaran Biologi berbasis proyek lingkungan. Pada tahap penelitian lanjutan, model ini perlu divalidasi oleh ahli dan diuji secara empiris untuk mengetahui validitas, kepraktisan, dan efektivitasnya terhadap peningkatan literasi lingkungan siswa.

SIMPULAN DAN SARAN

Model Project-Based Learning berbasis biokonversi limbah oleh Black Soldier Fly merupakan inovasi pembelajaran Biologi yang mengintegrasikan masalah limbah organik sekolah, praktik biokonversi, penyelidikan ilmiah, dan aksi lingkungan siswa. Model PjBL-BSF dikembangkan melalui enam fase, yaitu orientasi masalah limbah organik, investigasi konsep BSF dan biokonversi, perencanaan proyek, pelaksanaan proyek, analisis data dan refleksi, serta publikasi produk aksi lingkungan. Model ini berpotensi meningkatkan literasi lingkungan siswa kelas X SMA pada aspek pengetahuan, keterampilan kognitif, sikap peduli lingkungan, dan perilaku pro-lingkungan.

Saran dari pengembangan ini adalah guru Biologi perlu menyesuaikan proyek dengan kondisi sekolah, ketersediaan limbah organik, kesiapan siswa, dan aspek keamanan kerja. Peneliti berikutnya disarankan melakukan validasi ahli, uji kepraktisan, dan uji efektivitas dengan desain kuasi eksperimen agar klaim peningkatan literasi lingkungan dibuktikan secara empiris. Selain itu, sekolah mengembangkan proyek PjBL-BSF sebagai bagian dari gerakan pengurangan sampah, penguatan Profil Pelajar Pancasila, dan pembelajaran berbasis lingkungan berkelanjutan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak sekolah SMA Negeri Matakali Kabupaten Polewali Mandar, guru Biologi, siswa, dan semua pihak yang mendukung pengembangan model pembelajaran berbasis proyek lingkungan ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para peneliti sebelumnya yang menjadi rujukan konseptual dalam pengembangan model PjBL-BSF.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrul, N. F., Ahmad, I. K., Basri, N. E. A., Suja, F., Jalil, N. A. A., & Azman, N. A. (2022). A review of organic waste treatment using black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Sustainability*, 14(8), 4565. <https://doi.org/10.3390/su14084565>
- Azizi, A., & Rasyidi, M. (2019). Penerapan model Problem Based Learning untuk meningkatkan kemampuan memecahkan masalah dan sikap peduli lingkungan siswa SMP Darul Aminin NW Aikmual tahun 2019. *JUPE: Jurnal Pendidikan Mandala*, 4(5). <https://doi.org/10.58258/jupe.v4i5.1271>
- Branch, R. M. (2009). *Instructional design: The ADDIE approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6>
- Faiqi, E. D., Sama, S., & Shiddiq, A. (2025). Improving science literacy and student learning outcomes through the ethnoscience-based PJBL model in elementary schools. *JUPE: Jurnal Pendidikan Mandala*, 10(1). <https://doi.org/10.58258/jupe.v10i2.8181>
- Herman, Nurfathurrahmah, Ferawati, Ariyansyah, & Suryani, E. (2022). Penerapan model Problem Based Learning (PBL) untuk meningkatkan hasil belajar literasi sains siswa SMP kelas VIII. *Jurnal Ilmiah Mandala Education*, 8(4), 3087-3093. <https://doi.org/10.36312/jime.v8i4.4068>
- Hollweg, K. S., Taylor, J. R., Bybee, R. W., Marcinkowski, T. J., McBeth, W. C., & Zoido, P. (2011). Developing a framework for assessing environmental literacy. *North American Association for Environmental Education*.
- Kementerian Pendidikan Dasar dan Menengah. (2024). Capaian pembelajaran Biologi Fase E. <https://guru.kemendikdasmen.go.id/kurikulum/referensi-penerapan/capaian-pembelajaran/sd-sma/biologi/fase-e/>
- Lalander, C., Diener, S., Zurbruegg, C., & Vinneras, B. (2019). Effects of feedstock on larval development and process efficiency in waste treatment with black soldier fly (*Hermetia illucens*). *Journal of Cleaner Production*, 208, 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.017>
- Lopez, J. A., & Palacios, F. J. P. (2024). Effects of a project-based learning methodology on environmental awareness of secondary school students. *International Journal of Instruction*, 17(1), 1-22. <https://doi.org/10.29333/iji.2024.1711a>
- McBeth, W., & Volk, T. L. (2010). The national environmental literacy project: A baseline study of middle grade students in the United States. *Journal of Environmental Education*, 41(1), 55-67. <https://doi.org/10.1080/00958960903210031>
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dama, A., Lussiana, C., Renna, M., & Gasco, L. (2018). Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5776-5784. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9127>
- Murtalib, M., Mutmainah, M., & Mikrayanti, M. (2024). The effect of Project Based Learning on students' motivation and learning outcomes at SMP Negeri 1 Sape. *Jurnal Ilmiah Mandala Education*, 10(1). <https://doi.org/10.58258/jime.v10i1.6649>
- Parodi, A., De Boer, I. J. M., Gerrits, W. J. J., Van Loon, J. J. A., Heetkamp, M. J. W., Van Schelt, J., Bolhuis, J. E., & Van Zanten, H. H. E. (2020). Bioconversion efficiencies, greenhouse gas and ammonia emissions during black soldier fly rearing: A mass balance approach. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122488. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122488>

- Pertiwi, T. U., Oetomo, D., & Sugiharto, B. (2024). The effectiveness of STEM Project-Based Learning in improving students' environmental literacy abilities. *JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 10(2), 476-485. <https://doi.org/10.22219/jpbi.v10i2.33562>
- Pratiwi, A., Irsalinda, N., Luqmana, I., Eryati, E., Camida, S. N. T. A., Sirly, C. S., & Zulfikar, Z. (2025). Community empowerment through household organic waste management using Black Soldier Fly (BSF) maggots in PRA Tegalrejo, Yogyakarta. *Abdi Masyarakat*, 7(2), 253-258.
- Rahmawati, F. (2025). Development of organic waste processing module of eco-enzyme project-based learning materials for students. *JUPE: Jurnal Pendidikan Mandala*, 10(4), 1715-1720. <https://doi.org/10.58258/jupe.v10i4.10005>
- Rancak, G. T., Alawiyah, T., & Hadi, T. (2017). Kajian pengolahan sampah organik dengan BSF (Black Soldier Fly) di TPA Kebon Kongok. *JISIP: Jurnal Ilmu Sosial dan Pendidikan*, 1(1), 1-15. <https://doi.org/10.58258/jisip.v1i1.702>
- Salsabila, A. K., Azmy, B., & Susiloningsih, W. (2023). Development of an e-module based on Project Based Learning material on the human circulatory system for class V elementary school. *JUPE: Jurnal Pendidikan Mandala*, 8(3). <https://doi.org/10.58258/jupe.v8i3.5932>
- Singh, A., & Kumari, K. (2019). An inclusive approach for organic waste treatment and valorisation using black soldier fly larvae: A review. *Journal of Environmental Management*, 251, 109569. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109569>
- Surendra, K. C., Tomberlin, J. K., Van Huis, A., Cammack, J. A., Heckmann, L. H. L., & Khanal, S. K. (2020). Rethinking organic wastes bioconversion: Evaluating the potential of the black soldier fly. *Waste Management*, 117, 58-80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.050>