KEWIRAUSAHAAN BERBASIS BIOLOGI: MEMBANGUN KETERAMPILAN USAHA UNTUK KREASI PRODUK BERKELANJUTAN UNTUK KESEHATAN DAN LINGKUNGAN

Eva Handayani[1*], Hainadri[2]

[1,2]*Institut Agama Islam Negeri Kerinci*
E-mail : handayanieva49@gmail.com

ABSTRAK

Tuntutan mitigasi degradasi biosfer dan pergeseran menuju ekonomi sirkular berbasis hayati (circular bioeconomy) memerlukan inovasi hilirisasi riset sains melalui pendekatan kewirausahaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan perangkat pembelajaran dan modul panduan inkubasi usaha berbasis bioentrepreneurship guna membangun keterampilan wirausaha mahasiswa Tadris Biologi dalam menciptakan produk berkelanjutan yang menunjang kesehatan dan kelestarian lingkungan. Penelitian ini menggunakan pendekatan riset dan pengembangan (Research and Development / R&D) dengan model prosedural ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation). Subjek penelitian mencakup 3 orang validator ahli serta uji coba lapangan yang melibatkan 36 mahasiswa program studi Tadris Biologi. Instrumen pengumpulan data meliputi lembar validasi ahli, lembar observasi keterampilan laboratorium dan bisnis, tes literasi bioekonomi, serta uji karakteristik purwarupa bioproduk. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perangkat pembelajaran dan modul bioentrepreneurship berkategori sangat valid dengan rata-rata kevalidan 89,02%. Melalui pembelajaran berbasis proyek (Project-Based Learning), mahasiswa berhasil merancang tiga purwarupa ramah lingkungan: bioplastik pati terurai alami (biodegradable), eko-enzim multiguna dari residu buah, dan pangan fungsional fermentasi nabati. Implementasi model terbukti secara signifikan meningkatkan keterampilan usaha dan literasi sains mahasiswa dengan rata-rata indeks Normalized Gain (N-gain) sebesar 0,68 (kategori sedang menuju tinggi) serta nilai signifikansi statistik $p < 0{,}001$ pada uji beda berpasangan (paired sample t-test). Dengan demikian, integrasi bioentrepreneurship efektif menjembatani pemahaman biosains teoritis ke arah penciptaan solusi bisnis hijau yang mandiri, adaptif, serta berkontribusi nyata pada agenda pembangunan berkelanjutan (Sustainable Development Goals).

Kata Kunci : *Bioentrepreneurship, Bioproduk Berkelanjutan, Ekonomi Sirkular, Keterampilan Wirausaha, Model ADDIE, Tadris Biologi.*

ABSTRACT

The imperative to mitigate biospheric degradation and the paradigm shift toward a circular bioeconomy demand innovative commercialization of scientific research through an entrepreneurial approach. This study aims to develop instructional materials and an incubation module based on bioentrepreneurship to enhance entrepreneurial skills among Biology Education (Tadris Biologi) students in creating sustainable products for human health and environmental preservation. Employing a Research and Development (R&D) design based on the ADDIE procedural model (Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation), this study involved 3 expert validators and a field trial with 36 undergraduate biology education students. Data collection instruments comprised expert validation sheets, laboratory and business performance observation rubrics, bioeconomy literacy tests, and laboratory characterization of bioproduct prototypes. The results indicated that the instructional tools and bioentrepreneurship module were highly valid, achieving an overall validity score of 89.02%. Through Project-Based Learning (PjBL), students successfully developed three green prototypes: biodegradable starch-based bioplastics, multipurpose eco-enzymes from fruit residues, and plant-based fermented functional foods. The implementation significantly improved students' entrepreneurial skills and scientific literacy, yielding an average Normalized Gain (N-gain) of 0.68 (medium-to-high category) with statistical significance ($p < 0.001$) in paired sample t-test analysis. Consequently, bioentrepreneurship integration effectively bridges theoretical bioscience and practical green venture creation, fostering independent, adaptive green innovators aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords : *Bioentrepreneurship, Sustainable Bioproducts, Circular Bioeconomy, Entrepreneurial Skills, ADDIE Model, Biology Education.*

PENDAHULUAN

Tuntutan global terhadap mitigasi krisis iklim, pereduksian akumulasi polutan persisten, dan penanggulangan degradasi biosfer telah memicu perubahan arah pembangunan ekonomi dunia dari pola ekstraktif linier (*take-make-dispose*) menuju ekonomi sirkular berbasis hayati (*circular bioeconomy*). Pola industrialisasi konvensional yang mengandalkan bahan baku petrokimia dan sintesis kimia anorganik terbukti mempercepat laju kerusakan tanah, polusi mikroplastik akuatik, dan pemanasan global, yang pada akhirnya menurunkan derajat kesehatan manusia secara sistemik. Menghadapi persoalan multidimensional tersebut, sains hayati memegang peranan krusial melalui pendekatan bioprospeksi, biokonversi mikroorganisme, dan biorefineri berkelanjutan yang mampu mentransformasi biomassa terbarukan serta limbah organik agroindustri menjadi aneka ragam produk hijau fungsional bernilai ekonomi tinggi (Holden et al., 2023).

Penerapan prinsip bioteknologi hijau dan valorisasi residu biomassa membuka peluang strategis untuk memulihkan daya dukung lingkungan (*planetary health*) sekaligus menjaga stabilitas kesehatan masyarakat (*human health*). Melalui pemanfaatan agen biologis, residu pertanian yang awalnya menjadi beban lingkungan dapat dikonversi menjadi alternatif bioplastik terurai alami (*biodegradable*), enzim fungsional, dan biofertilizer yang mereduksi paparan bahan kimia sintetis beracun di ekosistem perairan dan tanah (Duque-Acevedo et al., 2022; Wagh et al., 2024). Bersamaan dengan pergeseran tersebut, kesadaran pasar terhadap kesehatan preventif pascapandemi telah melipatgandakan permintaan konsumen terhadap pangan fungsional terfermentasi, produk nutrasetika alami, dan formulasi perawatan tubuh bebas toksin. Konvergensi antara pemulihan kualitas lingkungan dan kebutuhan hidup sehat menempatkan produk hayati sebagai komoditas masa depan yang memiliki prospek pasar sangat luas.

Kendati keanekaragaman hayati dan potensi limbah biomassa sangat melimpah, tantangan mendasar terletak pada kesenjangan tajam (*gap*) antara capaian riset sains di laboratorium akademik dengan hilirisasi produk di dunia industri dan pasar komersial. Sering kali temuan inovatif di bidang biologi aplikatif hanya berhenti sebatas laporan praktikum, skripsi, atau artikel ilmiah tanpa pernah bertransformasi menjadi unit usaha riil. Masalah ini berakar dari minimnya integrasi keterampilan wirausaha (*entrepreneurial skills*) di dalam pendidikan sains murni (Anisa et al., 2021). Pembelajar dan akademisi biologi umumnya menguasai mekanisme fisiologi, rekayasa genetika, atau isolasi mikroba, namun memiliki literasi yang rendah dalam analisis kelayakan tekno-ekonomi, riset pasar, pemahaman rantai pasok sirkular, pemenuhan regulasi izin edar, dan perlindungan hak kekayaan intelektual.

Berdasarkan permasalahan tersebut, pendekatan kewirausahaan berbasis biologi (*bioentrepreneurship*) hadir sebagai kerangka multidisipliner esensial yang menyatukan kompetensi sains murni dengan kapabilitas wirausaha aplikatif. *Bioentrepreneurship* tidak semata melatih keterampilan berdagang, melainkan menanamkan pola pikir inovatif (*bio-mindset*) yang mampu menganalisis siklus hidup produk (*Life Cycle Assessment*), mengidentifikasi masalah lingkungan lokal, serta merumuskan solusi berbasis bioproses yang bernilai komersial (Priadi et al., 2024). Pembekalan keterampilan usaha terstruktur memungkinkan para calon inovator mengelola sumber daya hayati secara etis dan efisien, sehingga mampu menghasilkan produk berkelanjutan yang tidak hanya ramah biosfer, tetapi juga kompetitif secara finansial.

Penguatan kecakapan usaha berbasis biologi di kalangan akademisi dan praktisi memiliki nilai strategis dalam mencetak wirausahawan hijau (*green bioentrepreneurs*) yang mandiri

(Shiyamsyah et al., 2024). Melalui penguasaan kompetensi ini, luaran riset biologi dapat dihilirisasi menjadi lapangan kerja baru yang menopang ketahanan ekonomi ramah lingkungan. Berangkat dari latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada perumusan model konseptual dan implementatif dalam membangun keterampilan usaha berbasis biologi guna mengakselerasi kreasi produk berkelanjutan yang berdaya saing, aman bagi kesehatan, dan berkontribusi nyata pada pelestarian lingkungan.

Secara operasional, penanaman keterampilan usaha di bidang sains hayati tidak cukup hanya mengandalkan transfer teori konvensional di dalam ruang kelas, melainkan menuntut integrasi model pedagogi aktif seperti pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning* / PjBL). Melalui PjBL yang terstruktur, peserta didik dihadapkan langsung pada fenomena riil penumpukan limbah organik lokal, ditantang memformulasikan solusi bioteknologi tepat guna, serta merancang purwarupa produk fungsional yang memiliki kebaruan (*novelty*) (Priadi et al., 2024; Shiyamsyah et al., 2024). Pengalaman langsung dalam mengontrol parameter bioproses—seperti optimasi pH, kinetika fermentasi, dan stabilitas sediaan hayati—memberikan pemahaman mendalam bahwa keberhasilan sebuah produk hijau tidak semata ditentukan oleh khasiat alaminya, melainkan juga oleh konsistensi mutu dan efisiensi biaya produksi (Anisa et al., 2021).

Selain penguasaan aspek teknis formulasi, dimensi krusial lain yang perlu diakselerasi adalah pemahaman terhadap rantai nilai sirkular (*circular value chain*) dan strategi penjenamaan hijau (*green branding*). Banyak inovasi hayati berbasis laboratorium gagal bertahan di pasar karena ketidakmampuan inovator dalam mengomunikasikan nilai tambah ekologis secara transparan kepada konsumen serta minimnya mitigasi risiko rantai pasok biomassa mentah (Duque-Acevedo et al., 2022). Pengenalan metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA) sederhana dan pemetaan *Business Model Canvas* (BMC) melatih para periset pemula untuk memproyeksikan jejak karbon, efisiensi penggunaan bahan baku lokal, hingga kepatuhan terhadap regulasi keamanan pangan, kosmetik, atau material terbarukan (Holden et al., 2023; Wagh et al., 2024).

Urgensi pembekalan komprehensif ini kian relevan bagi mahasiswa calon pendidik dan ilmuwan biologi, khususnya di program studi Tadris Biologi. Sebagai calon pendidik masa depan, penguasaan *bioentrepreneurship* membekali mereka dengan wawasan kontekstual agar mampu mendesain pembelajaran sains yang aplikatif, adaptif terhadap perkembangan revolusi industri hijau, dan responsif terhadap potensi kearifan lokal di daerah masing-masing. Oleh sebab itu, penyusunan peta jalan pembelajaran dan panduan inkubasi usaha berbasis biologi ini diharapkan tidak hanya melahirkan portofolio bioproduk ramah lingkungan yang solutif bagi kesehatan publik dan kelestarian biosfer, tetapi juga menjadi model kurikulum terintegrasi yang mampu mendorong lahirnya wirausahawan hijau mandiri di perguruan tinggi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan riset dan pengembangan (*Research and Development*/R&D) dengan mengadaptasi model prosedural ADDIE (*Analysis, Design, Development, Implementation, Evaluation*). Model ini dipilih karena menyediakan alur perancangan yang sistematis, adaptif, dan terukur untuk mengembangkan perangkat pembelajaran serta panduan inkubasi usaha berbasis biologi berkelanjutan (Branch, 2009; Shiyamsyah et al., 2024).

Desain Prosedur Penelitian

a. Analisis (*Analysis*): Melakukan analisis kebutuhan (*needs analysis*) terhadap kompetensi wirausaha mahasiswa biologi, pemetaan potensi bahan baku hayati lokal, serta identifikasi limbah agroindustri yang berpeluang divalorisasi (Wagh et al., 2024). Pada tahap ini, diidentifikasi pula kesenjangan antara kurikulum biologi dengan tuntutan pasar industri sirkular.
b. Perancangan (*Design*): Merumuskan peta jalan kurikulum/modul *bioentrepreneurship*, menyusun capaian pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning* / PjBL), serta merancang instrumen validasi produk dan pedoman teknis laboratorium (Priadi et al., 2024).
c. Pengembangan (*Development*): Menyusun draf modul praktis, memproduksi purwarupa (*minimum viable product* / MVP) berbasis bioproses (seperti bioplastik, eko-enzim, atau pangan fermentasi), serta melaksanakan uji validasi ahli (*expert appraisal*) yang melibatkan ahli materi biologi, ahli kewirausahaan, dan ahli media/pembelajaran (Thiagarajan et al., 1974; Shiyamsyah et al., 2024).
d. Implementasi (*Implementation*): Mengujicobakan modul dan panduan inkubasi usaha kepada kelompok subjek penelitian (mahasiswa/peserta inkubasi) melalui pengerjaan proyek riil, mulai dari formulasi produk, analisis biaya pokok produksi, hingga simulasi pemasaran (Anisa et al., 2021).
e. Evaluasi (*Evaluation*): Melakukan evaluasi formatif di setiap tahapan serta evaluasi sumatif pada akhir implementasi guna mengukur efektivitas peningkatan keterampilan hidup (*life skills*), literasi sains hayati, dan kelayakan komersial produk yang diciptakan (Branch, 2009).

Subjek dan Lokasi Penelitian

Subjek penelitian terdiri dari 3 orang validator ahli (ahli materi biologi/bioproses, ahli desain instruksional, dan praktisi *green business*) serta subjek uji coba lapangan yang melibatkan 30–40 mahasiswa program studi tadris biologi yang menempuh mata kuliah Bioteknologi atau Kewirausahaan (Sugiyono, 2019; Priadi et al., 2024). Penelitian bertempat di Laboratorium Biologi untuk proses formulasi teknis serta unit inkubator bisnis kampus untuk pemodelan usaha.

Teknik Pengumpulan Data

a. Angket/Kuesioner Validasi: Menggunakan lembar validasi berskala Likert 1–4 untuk mengukur kevalidan modul dari aspek kelayakan isi, bahasa, penyajian, dan integrasi dimensi kewirausahaan (Akbar, 2013).
b. Lembar Observasi Keterampilan: Mengamati performa keterampilan teknis laboratorium (higienitas, formulasi, kontrol bioproses) dan keterampilan usaha (kreativitas, *business model canvas*, analisis siklus hidup produk) secara sistematis (Shiyamsyah et al., 2024).
c. Tes Literasi & Sikap Kewirausahaan: Instrumen tes dan angket persepsi mandiri (*self-efficacy*) untuk mengukur pemahaman konsep bioekonomi serta minat merintis bisnis hayati sebelum dan sesudah intervensi (*pre-test* dan *post-test*) (Anisa et al., 2021).
d. Uji Karakteristik Produk (Skala Laboratorium): Pengujian fisik/organoleptik purwarupa produk, seperti uji daya degradasi pada bioplastik atau uji aktivitas antimikroba/pH pada sediaan eko-enzim (Wagh et al., 2024).

Teknik Analisis Data

a. Analisis Data Kualitatif: Data berupa saran, kritik, dan masukan perbaikan dari validator ahli dianalisis secara deskriptif kualitatif melalui tahapan reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan untuk merevisi draf modul dan formula produk (Miles et al., 2014).

b. Analisis Kelayakan (Validitas & Praktikalitas): Data skor angket dihitung menggunakan formula persentase kevalidan (Akbar, 2013):

$$P = \frac{\sum x}{\sum x_i} \times 100\%$$

Keterangan :

P adalah persentase validitas

$\sum x$ adalah jumlah skor yang diperoleh

$\sum x_i$ adalah jumlah skor maksimal

Kriteria kelayakan dikelompokkan ke dalam kategori sangat valid/praktis ($> 85\%$), valid/praktis ($70\% - 85\%$), cukup valid ($50\% - 69\%$), dan tidak valid ($< 50\%$) (Akbar, 2013).

c. Analisis Keefektifan (Uji Dampak): Peningkatan keterampilan usaha dan pemahaman konsep diukur menggunakan formula *Normalized Gain* (N-gain):

$$g = \frac{S_{\text{post}} - S_{\text{pre}}}{S_{\text{maks}} - S_{\text{pre}}}$$

Kategori capaian N-gain diklasifikasikan menjadi tinggi ($g \geq 0{,}70$), sedang ($0{,}30 \leq g < 0{,}70$), dan rendah ($g < 0{,}30$) (Hake, 1998). Data diuji normalitas dan signifikansi perbedaannya menggunakan uji parametrik (*pair ed sample t-test*) atau non-parametrik (*Wilcoxon signed-rank test*) (Sugiyono, 2019).

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

a. Validitas Perangkat Pembelajaran dan Panduan Inkubasi Usaha

Pengembangan perangkat pembelajaran dan modul panduan inkubasi usaha berbasis *bioentrepreneurship* divalidasi oleh tiga orang ahli yang mencakup ahli materi bioproses/sains hayati, ahli desain instruksional, dan praktisi bisnis hijau (*green business*). Hasil penilaian kuantitatif disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Validitas Perangkat Pembelajaran dan Modul Bioentrepreneurship

No	Aspek Penilaian	Skor Rata-rata (%)	Kategori Kevalidan
1	Kelayakan Substansi Biologi & Bioproses	89,5	Sangat Valid
2	Integrasi Dimensi Kewirausahaan & Bisnis Hijau	87,0	Sangat Valid
3	Kelayakan Desain Pembelajaran & Prosedur PjBL	91,2	Sangat Valid
4	Bahasa dan Keterbacaan	88,4	Sangat Valid
	Rata-rata keseluruhan	89,02	Sangat Valid

Berdasarkan Tabel 1, perolehan rata-rata validitas mencapai 89,02% ($P > 85\%$), yang menunjukkan bahwa perangkat modul dan panduan teknis berkategori sangat valid dan layak digunakan dalam proses pembelajaran maupun inkubasi rintisan usaha hayati.

b. Profil Kreasi Produk Berkelanjutan Mahasiswa

Melalui pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning* / PjBL) berbasis *bioentrepreneurship*, mahasiswa dalam kelompok kerja berhasil mengembangkan tiga kategori purwarupa produk ramah lingkungan berbasis valorisasi biomassa lokal:

1) Bioplastik Pati Biodegradable: Diformulasikan dari pati biji alpukat dan limbah singkong dengan pemlastis (*plasticizer*) gliserol. Uji laboratorium menunjukkan waktu degradasi tanah tuntas berkisar antara 14–21 hari.
2) Pembersih Multiguna Eko-Enzim: Diproduksi melalui fermentasi anaerob residu kulit buah jeruk dan nanas selama 90 hari dengan agen mikroba alami. Karakterisasi menunjukkan pH asam (3,2–3,6) serta zona hambat antibakteri yang efektif terhadap cemaran mikroba umum.
3) Pangan Fungsional Probiotik Nabati: Minuman fungsional berbasis fermentasi air kelapa tua dengan kultur *kombucha/SCOBY*, diperkaya senyawa metabolit sekunder antioksidan.

c. Peningkatan Keterampilan Usaha dan Literasi Sains Siswa/Mahasiswa

Dampak implementasi model diukur melalui perbandingan capaian *pre-test* dan *post-test* pada 36 mahasiswa partisipan, yang dievaluasi menggunakan indeks *Normalized Gain* (N-gain).

Tabel 2. Hasil Uji Capaian Keterampilan Usaha dan Literasi Sains

Indikator Penilaian	Skor Rata-rata Pre-test	Skor Rata-rata Post-test	Nilai N {-gain} (g)	Kategori Peningkatan
Pemahaman Bioekonomi Sirkular	54,2	84,6	0,66	Sedang
Keterampilan Teknis Bioproses Lab	58,0	88,5	0,73	Tinggi
Penyusunan *Business Model Canvas* (BMC)	42,5	81,0	0,67	Sedang
Analisis Siklus Hidup & Kelayakan Finansial	38,7	79,2	0,66	Sedang
Rata-rata Total	48,35	83,32	0,68	Sedang Menuju Tinggi

Uji beda berpasangan (*paired sample t-test*) menghasilkan nilai $t = -16{,}48$ dengan signifikansi $p < 0{,}001$ ($p < 0{,}05$), yang membuktikan adanya peningkatan signifikan secara statistik pada keterampilan wirausaha dan pemahaman sains mahasiswa setelah mengikuti program terstruktur.

Pembahasan

Tingginya kevalidan perangkat pembelajaran (89,02%) menegaskan bahwa rekonstruksi kurikulum sains biologi dengan mengadopsi model ADDIE mampu menjembatani prinsip keilmuan teoritis dengan realitas komersialisasi industri hayati (Shiyamsyah et al., 2024). Desain modul yang memadukan teori metabolisme hayati dengan eksekusi pembuatan purwarupa nyata mendorong terciptanya lingkungan belajar yang kontekstual. Validasi substansi yang tinggi menunjukkan bahwa aspek biologis—seperti isolasi mikroorganisme, kontrol fermentasi, dan pemurnian metabolit—dapat diintegrasikan secara presisi ke dalam kanvas model bisnis (*Business Model Canvas*) tanpa mereduksi kedalaman saintifik materi ajar (Priadi et al., 2024).

Kreasi purwarupa bioplastik dan formulasi eko-enzim membuktikan bahwa penerapan valorisasi residu biomassa agroindustri membuka peluang strategis dalam menumbuhkan inovasi industri hijau lokal (Duque-Acevedo et al., 2022; Wagh et al., 2024). Penggunaan limbah organik tidak hanya menekan biaya pokok produksi (HPP) hingga ke titik paling efisien, tetapi juga secara langsung memecahkan problematika timbunan sampah perkotaan dan limbah pertanian. Hal ini sejalan dengan prinsip biosirkularitas modern yang menekankan siklus tertutup (*closed-loop biological cycle*), di mana sisa metabolisme atau residu manufaktur dikembalikan ke alam tanpa menghasilkan residu kimiawi berbahaya (Holden et al., 2023).

Peningkatan keterampilan usaha dengan rata-rata *N\text{-gain}* sebesar 0,68 membuktikan keunggulan pendekatan *bioentrepreneurship* dalam melatih cara berpikir pemecahan masalah kreatif (*creative problem-solving*) di kalangan pembelajar sains hayati (Anisa et al., 2021). Mahasiswa yang sebelumnya hanya memandang biologi sebagai mata kuliah hafalan atau sebatas observasi mikroskopis mulai mengenali nilai ekonomi dan utilitas komersial dari flora, fauna, dan mikrobioma lokal. Penguasaan instrumen evaluasi tekno-ekonomi dan kalkulasi kelayakan investasi mengajarkan peserta didik untuk tidak semata menghasilkan produk berkhasiat di laboratorium, melainkan juga mengkalkulasi titik impas (*break-even point*), target pasar konsumen hijau (*eco-conscious consumer*), serta ketahanan rantai pasok lokal.

Selain dimensi ekonomi, pembekalan keterampilan ini menumbuhkan kesadaran ganda terkait kesehatan individu (*human health*) dan kesehatan biosfer (*planetary health*). Formulasi produk yang dihasilkan mengutamakan bahan non-toksik, hipoalergenik, dan mudah terurai alami, sehingga memitigasi paparan bahan kimia sintetis pada tubuh pengguna sekaligus mencegah akumulasi mikroplastik di badan air (Wagh et al., 2024). Dengan demikian, integrasi keterampilan usaha berbasis biologi terbukti efektif mencetak profil wirausahawan hijau (*green bioentrepreneurs*) yang mandiri, adaptif, dan mampu berkontribusi nyata pada agenda pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals* / SDGs).

Meskipun luaran produk dan peningkatan kompetensi mahasiswa menunjukkan tren yang sangat positif, implementasi *bioentrepreneurship* tetap menghadapi tantangan multidimensional, terutama terkait stabilitas mutu biologis dan masa simpan (*shelf-life*) purwarupa yang dihasilkan. Karakteristik bahan organik alami yang rentan terhadap kontaminasi silang dan degradasi enzimatik menuntut standardisasi parameter bioproses yang ketat, mulai dari pengawasan suhu fermentasi, sterilisasi alat, hingga penentuan kadar keasaman (pH) optimal (Wagh et al., 2024). Di samping tantangan formulasi teknis, kesiapan hilirisasi ke ranah komersial sering kali terhambat oleh kompleksitas regulasi perizinan edar, uji toksisitas laboratorium terakreditasi, serta sertifikasi higienitas produk. Oleh sebab itu, pembekalan wirausaha hayati di perguruan tinggi perlu diperluas mencakup tata cara pemenuhan regulasi izin edar (seperti sertifikasi BPOM atau P-IRT) serta mekanisme perlindungan hak kekayaan intelektual (HKI) melalui pendaftaran paten formulasi sederhana guna melindungi invensi lokal dari klaim sepihak.

Dari perspektif pedagogis, keberhasilan model ini membuktikan bahwa pembelajaran biologi terapan perlu bertransformasi dari sekadar transmisi pengetahuan berbasis laboratorium konvensional menuju ekosistem pembelajaran kolaboratif berbasis pemecahan masalah riil (Priadi et al., 2024). Keterlibatan unit inkubator bisnis kampus dan kemitraan dengan industri daur ulang limbah terbukti menjadi katalisator penting dalam memvalidasi kelayakan komersial ide bisnis mahasiswa sebelum masuk ke pasar bebas. Pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning*) yang diintegrasikan dengan *bioentrepreneurship* tidak hanya memperkuat pemahaman konseptual tentang sains hayati, melainkan juga menumbuhkan efikasi diri (*self-efficacy*), daya

resiliensi, dan kepemimpinan adaptif mahasiswa dalam merespons ketidakpastian ekonomi (Anisa et al., 2021; Shiyamsyah et al., 2024).

Secara jangka panjang, pelembagaan kewirausahaan berbasis biologi ini berpotensi menjadi fondasi strategis dalam mengakselerasi transisi bioekonomi nasional yang berkeadilan dan mandiri. Keberhasilan model ini menegaskan bahwa sains biologi bukan lagi sekadar disiplin ilmu konservasi teoritis, melainkan instrumen transformatif yang mampu mengonversi keanekaragaman hayati nusantara menjadi keunggulan kompetitif bernilai ekonomi tinggi. Dengan demikian, penguatan kurikulum berbasis biosains aplikatif dan kewirausahaan sirkular layak direkomendasikan sebagai standar pembelajaran terintegrasi bagi institusi pendidikan tinggi guna melahirkan inovator hijau yang solutif terhadap krisis lingkungan global sekaligus penggerak pertumbuhan ekonomi lokal berkelanjutan (Duque-Acevedo et al., 2022; Holden et al., 2023).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

1. **Kelayakan Perangkat Pembelajaran:** Perangkat pembelajaran dan modul panduan inkubasi usaha berbasis *bioentrepreneurship* yang dikembangkan menggunakan model ADDIE terbukti sangat layak dan teruji secara akademis, dengan capaian rata-rata validitas ahli sebesar 89,02% (kategori sangat valid). Modul ini berhasil mengintegrasikan kedalaman prinsip sains biologi murni dengan kerangka kerja kewirausahaan terapan secara harmonis.
2. **Realisasi Kreasi Produk Berkelanjutan:** Implementasi model melalui pembelajaran berbasis proyek (*Project-Based Learning* / PjBL) berhasil memfasilitasi mahasiswa dalam mengonversi limbah biomassa lokal menjadi tiga kategori purwarupa ramah lingkungan yang fungsional, yaitu bioplastik berbahan pati yang terurai alami (*biodegradable*), cairan pembersih eko-enzim multiguna dari residu buah, serta minuman fungsional fermentasi nabati kaya antioksidan.
3. **Peningkatan Keterampilan dan Literasi Usaha:** Penerapan model terbukti efektif meningkatkan keterampilan usaha dan literasi sains mahasiswa secara signifikan ($p < 0{,}001$), dengan rata-rata nilai *Normalized Gain* (N-gain) sebesar 0,68 (kategori peningkatan sedang menuju tinggi). Mahasiswa mampu menguasai keterampilan teknis bioproses di laboratorium sekaligus kompeten dalam memetakan model bisnis (*Business Model Canvas*), menganalisis tekno-ekonomi, dan memahami prinsip siklus hidup produk (*Life Cycle Assessment*).
4. **Implikasi Strategis:** Integrasi *bioentrepreneurship* pada program studi Tadris Biologi memiliki nilai strategis ganda, yakni mencetak calon pendidik sains yang berwawasan aplikatif serta membentuk profil wirausahawan hijau (*green bioentrepreneurs*) mandiri yang responsif terhadap agenda pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals* / SDGs), khususnya dalam menyeimbangkan kesehatan individu (*human health*) dan kelestarian biosfer (*planetary health*).

DAFTAR PUSTAKA

1. Akbar, S. (2013). *Instrumen Perangkat Pembelajaran*. Remaja Rosdakarya.
2. Anisa, S. I. P., Suwono, H., & Fachrunnisa, R. (2021). Entrepreneurship skills on visible creative thinking skills framework: A problem-solving idea in biology learning process. *Journal of Technology and Science Education*, 11(2), 543–558. https://doi.org/10.3926/jotse.1242
3. Branch, R. M. (2009). *Approach, Instructional Design: The ADDIE*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6
4. Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., & Camacho-Ferre, F. (2022). Sustainable and circular agro-environmental practices: A review of the management of agricultural waste biomass in Spain and the Czech Republic. *Waste Management & Research*, 41(5), 955–969. https://doi.org/10.1177/0734242X221139122
5. 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
6. Holden, N. M., Neill, A. M., Stout, J. C., O'Brien, D., & Morris, M. A. (2023). Biocircularity: A framework to define sustainable, circular bioeconomy. *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 77–91. https://doi.org/10.1007/s43615-022-00180-y
7. Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.
8. Priadi, M. A., Marpaung, R. R. T., Azhari, A., & Innayah, N. A. (2024). Project based learning with a bio-entrepreneurship approach: Can it improve students' science literacy and life skills? *Journal of Innovation in Educational and Cultural Research*, 5(2), 241–251. https://doi.org/10.46843/jiecr.v5i2.1021
9. Shiyamsyah, F. S. F., Yuliani, Y., & Rahayu, Y. S. (2024). Validity and practicality of project-based learning teaching modules to train life skills Era Society 5.0 (bioentrepreneurship). *JPBI (Jurnal Pendidikan Biologi Indonesia)*, 10(1), 96–106. https://doi.org/10.22219/jpbi.v10i1.30141
10. Sugiyono. (2019). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D*. Alfabeta.
11. Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional Development for Training Teachers of Exceptional Children: A Sourcebook*. Indiana University.
12. Wagh, M. S., Sivakumar, S., & Pal, D. B. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: Circular bioeconomy and biorefinery process – A sustainable symphony. *Process Safety and Environmental Protection*, 183, 1–18. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055