J-Abdi
Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat
Vol.6, No.6, Nopember 2026

Model *Project-Based Learning* Terintegrasi untuk Pembelajaran Matematika Terapan Berbasis Masalah Nyata di Ekosistem Kebun Kopi Tawangmangu

Sutanto[1], Supriyadi Wibowo[1], Siswanto[1], Nughthoh Arfawi[1],Yogi P Pratama[2], Agus D Priyanto[3]

[1]Program Studi Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

[2]Program Studi Ekonomi Pembangunan, Fakultas Ekonomi Bisnis, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

[3]Program Studi Bahasa Inggris, Sekolah Vokasi, Universitas Sebelas Maret, Surakarta, Indonesia

*Penulis Korespondensi: sutanto71@staff.uns.ac.id

Article History:
Received: 01-10-2026
Revised: 26-10-2026
Accepted: 01-11-2026

Keywords: *Project-Based Learning, Matematika Terapan, Living Laboratory, Ekosistem Kopi, Design-Based Research, SDGs.*

Abstract: *Pembelajaran matematika terapan di perguruan tinggi menghadapi tantangan untuk menghubungkan penguasaan konsep teoretis dengan kemampuan mahasiswa menyelesaikan persoalan nyata yang kompleks dan multidisipliner. Artikel ini mengusulkan model Integrated Coffee-Based Mathematical Project-Based Learning (ICM-PjBL), yaitu rancangan pembelajaran yang menggunakan ekosistem kopi Tawangmangu sebagai living laboratory bagi mahasiswa Program Studi Matematika. Penelitian menggunakan pendekatan Design-Based Research yang mencakup analisis kebutuhan, perancangan model, validasi ahli dan uji coba terbatas, serta evaluasi dan revisi. Hasil perancangan berupa arsitektur model yang mengintegrasikan delapan proyek: pembangunan basis data, analisis statistik, pemodelan pertumbuhan, pengukuran mutu dengan Many-Facet Rasch Model, pemetaan spasial dengan GIS, optimasi pemilahan dan distribusi, prediksi berbasis kecerdasan buatan, dan sistem pendukung keputusan. Integrasi dirancang secara vertikal, dari data hingga rekomendasi keputusan, dan secara horizontal, lintas bidang matematika terapan dan komputasi. Artikel ini juga memetakan proyek terhadap mata kuliah, mekanisme pembelajaran, serta kerangka evaluasi yang mencakup kelayakan desain, kompetensi matematis, kualitas produk, dan relevansi bagi mitra. Secara konseptual, model ini berkaitan dengan Sustainable Development Goals (SDGs), terutama SDG 4 (pendidikan berkualitas), SDG 9 (industri, inovasi, dan infrastruktur), dan SDG 17 (kemitraan untuk mencapai tujuan). Karena data implementasi belum tersedia, hasil yang dilaporkan merupakan rancangan konseptual, bukan bukti efektivitas pembelajaran. Model ini diharapkan menjadi dasar bagi penelitian lanjutan yang menguji keterlaksanaan dan dampaknya secara empiris.*

PENDAHULUAN

Pembelajaran matematika di perguruan tinggi menghadapi tantangan untuk menghubungkan penguasaan konsep teoretis dengan kemampuan mahasiswa

menyelesaikan persoalan nyata yang kompleks dan multidisipliner. Matematika tidak hanya mempelajari struktur, pola, dan hubungan kuantitatif, tetapi juga menyediakan perangkat analisis untuk memahami fenomena, membangun model, melakukan prediksi, dan mendukung pengambilan keputusan. Kebutuhan tersebut mendorong pengembangan pendekatan pembelajaran yang memungkinkan mahasiswa menggunakan pengetahuan matematika dalam situasi yang mendekati praktik profesional dan kebutuhan masyarakat.

Salah satu pendekatan yang relevan adalah *Project-Based Learning* (PjBL), yaitu pembelajaran yang menempatkan proyek sebagai wahana bagi mahasiswa untuk mengembangkan pengetahuan, keterampilan, dan kemampuan memecahkan masalah. Susanti *et al*. (2023), melalui analisis bibliometrik terhadap publikasi PjBL dalam pendidikan matematika, menunjukkan pentingnya pemetaan perkembangan penelitian sebagai dasar untuk mengidentifikasi arah pengembangan pembelajaran matematika. Zhang dan Ma (2023), melalui meta-analisis terhadap 66 penelitian eksperimental atau kuasi-eksperimental, menemukan bahwa PjBL berkontribusi positif terhadap hasil belajar, termasuk pencapaian akademik, keterampilan berpikir, dan aspek afektif. Kajian sistematis mengenai pengaruh PjBL pada pembelajaran matematika di Indonesia (Asmi *et al*., 2022) dan efektivitas PjBL dalam pendidikan STEM (Diana *et al*., 2021) juga menunjukkan bahwa efektivitas PjBL merupakan topik yang terus dikaji. Meskipun demikian, hasil tersebut tidak berarti bahwa setiap rancangan PjBL menghasilkan dampak yang sama, karena efektivitasnya dipengaruhi oleh karakteristik mata kuliah, durasi pembelajaran, ukuran kelompok, dan konteks penerapan (Zhang and Ma, 2023). Tantangan pengembangan PjBL dengan demikian bukan sekadar menyediakan proyek bagi mahasiswa, melainkan merancang keterkaitan yang bermakna antara tujuan pembelajaran, substansi matematika, persoalan nyata, dan luaran proyek.



Gambar 1. Mahasiswa Prodi Matematika peserta observasi Kampus Kopi Tawangmangu

Tantangan tersebut semakin penting dalam program studi matematika karena

persoalan nyata umumnya tidak dapat diselesaikan dengan satu bidang keilmuan saja. Persoalan produksi, kualitas, distribusi, dan pemasaran suatu komoditas, misalnya, dapat memerlukan pengelolaan data, analisis statistik, pemodelan dinamis, pengukuran kualitas, analisis spasial, optimasi, dan prediksi berbasis kecerdasan buatan. Setiap metode memiliki fungsi yang berbeda, tetapi dapat saling melengkapi ketika digunakan untuk menjawab persoalan dalam satu sistem. Oleh karena itu, pembelajaran matematika terapan memerlukan rancangan yang tidak hanya menghubungkan matematika dengan konteks eksternal, tetapi juga menghubungkan berbagai metode matematis dan komputasional ke dalam rangkaian pemecahan masalah yang koheren.

Kebutuhan menghubungkan pembelajaran, penelitian, dan kebutuhan masyarakat sejalan dengan konsep *living laboratory* atau *living lab*. Tercanli dan Jongbloed (2022), melalui tinjauan sistematis, menjelaskan potensi pendekatan ini sebagai antarmuka kolaborasi antara universitas, perusahaan, masyarakat, organisasi nirlaba, dan pemerintah dalam menghadapi persoalan sosial serta pembangunan berkelanjutan. Pengenalan metodologi *living lab* dan ko-kreasi kepada mahasiswa melalui kegiatan pembelajaran berbasis pengalaman juga telah dilaporkan (Konstantinidis *et al*., 2021). Dalam kerangka ini, lingkungan di luar kampus menjadi ruang pembelajaran ketika mahasiswa berinteraksi dengan persoalan autentik, data lapangan, dan pemangku kepentingan yang berpotensi menggunakan hasil kerja mereka. Namun, keterlibatan mitra saja belum cukup. Autentisitas tugas belajar perlu dikelola secara cermat (Hagvall Svensson *et al*., 2022), dan pemecahan masalah nyata dalam PjBL di pendidikan tinggi menuntut kreativitas bersama antarpihak yang terlibat (Isaac *et al*., 2022). Aktivitas lapangan karenanya perlu diintegrasikan dengan tujuan pembelajaran, pendampingan akademik, evaluasi proses, dan refleksi atas penggunaan konsep ilmiah.

Berdasarkan perspektif tersebut, Kampus Kopi Tawangmangu diusulkan sebagai *living laboratory* untuk pembelajaran matematika terapan yang berorientasi pada persoalan dalam ekosistem kopi. Konteks kopi menghubungkan fenomena biologis, kondisi lingkungan, karakteristik mutu hasil panen, pengelolaan data, dan keputusan usaha. Permasalahan dalam ekosistem tersebut dapat diterjemahkan menjadi pertanyaan matematis: data produksi dan lingkungan untuk basis data dan analisis statistik; dinamika pertumbuhan tanaman untuk model matematika; penilaian mutu untuk pendekatan pengukuran; serta persoalan lokasi, pemilahan, distribusi, dan keputusan pengelolaan untuk analisis spasial, optimasi, prediksi, dan sistem pendukung keputusan. Dengan demikian, ekosistem kopi tidak sekadar menjadi ilustrasi penerapan teori, tetapi konteks yang menghubungkan berbagai aktivitas pembelajaran dan pemecahan masalah.

Meskipun PjBL dan *living laboratory* telah dibahas dalam literatur pendidikan, pengembangan model untuk program studi matematika masih perlu memperhatikan bagaimana proyek-proyek yang berbeda dapat disusun menjadi suatu sistem pembelajaran yang terintegrasi. Kajian Susanti *et al*. (2023) dan Tercanli dan Jongbloed (2022) menyediakan landasan konseptual, tetapi tidak secara langsung menguji model delapan proyek yang diusulkan dalam artikel ini. Kesenjangan yang menjadi fokus artikel ini bukan klaim bahwa PjBL atau *living laboratory* belum pernah diterapkan, melainkan kebutuhan merancang keterhubungan antarproyek, integrasi metode matematika terapan, dan kesinambungan luaran pembelajaran dalam satu konteks masalah nyata.

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, artikel ini mengusulkan model *Integrated Coffee-*

Based Mathematical Project-Based Learning (ICM-PjBL), yaitu rancangan pembelajaran berbasis delapan proyek yang berorientasi pada ekosistem kopi Tawangmangu: (1) pembangunan basis data kopi; (2) analisis statistik; (3) pemodelan pertumbuhan kopi; (4) pengukuran mutu menggunakan *Many-Facet Rasch Model* (MFRM); (5) pemetaan spasial menggunakan sistem informasi geografis (GIS); (6) optimasi pemilahan dan distribusi; (7) prediksi berbasis kecerdasan buatan; dan (8) pengembangan sistem pendukung keputusan (*Decision Support System*, DSS). Luaran suatu proyek dirancang sebagai potensi masukan bagi proyek berikutnya, sehingga mahasiswa memahami hubungan antara pengumpulan data, pembentukan model, analisis, prediksi, optimasi, dan pengambilan keputusan. Hubungan tersebut bersifat iteratif: hasil analisis atau prediksi dapat mendorong pengumpulan data tambahan dan perbaikan model.

Kebaruan konseptual yang diajukan terletak pada integrasi vertikal dan horizontal delapan proyek dalam satu ekosistem komoditas. Integrasi vertikal menghubungkan tahapan pengolahan informasi dari data hingga rekomendasi keputusan, sedangkan integrasi horizontal menghubungkan berbagai bidang matematika terapan dan komputasi untuk mengkaji aspek-aspek yang saling berkaitan dalam rantai nilai kopi. Model ini juga menghubungkan tiga dimensi pembelajaran: pencapaian kompetensi akademik, pengembangan produk berbasis data, dan kontribusi potensial terhadap kebutuhan mitra. Kebaruan tersebut merupakan proposisi desain yang perlu dibandingkan lebih lanjut dengan penelitian terdahulu dan dievaluasi melalui implementasi, bukan klaim bahwa efektivitas model telah terbukti.

Artikel ini bertujuan untuk: (1) merumuskan arsitektur model PjBL terintegrasi untuk program studi matematika dengan ekosistem kopi Tawangmangu sebagai *living laboratory*; (2) memetakan keterkaitan delapan proyek dengan konsep matematika terapan, proses pembelajaran, dan luaran yang diharapkan; serta (3) merumuskan kerangka evaluasi untuk menilai kelayakan model, ketercapaian kompetensi mahasiswa, kualitas produk proyek, dan relevansi hasilnya bagi mitra.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diorganisasikan ke dalam tujuh bagian metodologis, yaitu (1) desain penelitian, (2) konteks penelitian dan unit analisis, (3) prosedur penelitian, (4) instrumen pengumpulan data, (5) analisis data, (6) penjaminan kualitas dan pertimbangan etika, serta (7) cakupan dan keterbatasan metode. Masing-masing bagian dijelaskan sebagai berikut.

1. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan penelitian pengembangan pendidikan dengan kerangka *Design-Based Research* (DBR). Pendekatan ini dipilih karena penelitian berfokus pada perancangan model pembelajaran, pengintegrasian konsep matematika terapan ke dalam proyek berbasis masalah nyata, dan penyusunan prosedur evaluasi yang dapat digunakan untuk memperbaiki model berdasarkan bukti implementasi. DBR memungkinkan pengembangan intervensi pembelajaran melalui siklus desain, pengujian dalam konteks pendidikan, evaluasi, dan revisi (Tinoca *et al*., 2022; Radović *et al*., 2022).

Objek penelitian adalah model ICM-PjBL, yaitu rancangan pembelajaran yang menggunakan ekosistem kopi Tawangmangu sebagai *living laboratory* bagi mahasiswa Program Studi Matematika FMIPA. Model ini mengintegrasikan delapan proyek: basis data kopi, analisis statistik, pemodelan pertumbuhan, pengukuran mutu dengan MFRM, pemetaan

spasial dengan GIS, optimasi pemilahan dan distribusi, prediksi berbasis kecerdasan buatan, dan DSS.

Penelitian diarahkan untuk menghasilkan tiga keluaran utama. Pertama, arsitektur model pembelajaran yang menghubungkan masalah nyata, konsep matematika, aktivitas proyek, dan capaian pembelajaran. Kedua, perangkat implementasi berupa peta proyek, panduan aktivitas, format dokumentasi data, dan rubrik penilaian. Ketiga, kerangka evaluasi untuk menilai kelayakan desain, keterlaksanaan pembelajaran, kompetensi matematis mahasiswa, kualitas produk proyek, dan relevansi hasil bagi mitra.

Perlu dibedakan antara pengembangan model dan pengujian efektivitasnya. Pengembangan model dapat dilakukan melalui analisis kebutuhan dan validasi ahli, sedangkan klaim efektivitas memerlukan implementasi dan data evaluasi yang memadai. Oleh karena itu, artikel ini melaporkan hasil perancangan model dan analisis konseptual (arsitektur model, pemetaan proyek, dan kerangka evaluasi), sedangkan validasi ahli, uji coba terbatas, dan evaluasi dirumuskan sebagai prosedur pengembangan lanjutan.

2. Konteks Penelitian dan Unit Analisis

Penelitian dirancang dalam konteks pembelajaran matematika terapan dengan ekosistem kopi Tawangmangu sebagai sumber masalah dan data. Konteks ini dipilih karena kegiatan budidaya, pengamatan lingkungan, penilaian mutu, pengelolaan hasil panen, dan distribusi dapat dirumuskan menjadi persoalan yang memerlukan berbagai metode matematika dan komputasi.

Unit analisis utama adalah rancangan model ICM-PjBL dan keterkaitan di antara delapan proyek. Pada tahap implementasi, unit analisis dapat diperluas mencakup aktivitas pembelajaran mahasiswa, produk proyek, hasil penilaian kompetensi, dan umpan balik mitra.

Partisipan ditentukan berdasarkan tahap pengembangan. Dosen Program Studi Matematika dan ahli pendidikan matematika menilai kesesuaian desain dengan capaian pembelajaran; ahli matematika terapan atau komputasi menilai ketepatan metode; mitra ekosistem kopi, seperti kelompok tani atau pengelola kebun, mengidentifikasi masalah dan menilai relevansi luaran; dan mahasiswa menjadi partisipan pada tahap uji coba pembelajaran. Jumlah partisipan, karakteristik mahasiswa, mata kuliah yang dilibatkan, lokasi pengambilan data, dan durasi implementasi ditetapkan berdasarkan kondisi pelaksanaan yang sebenarnya dan dilaporkan secara eksplisit pada publikasi hasil implementasi.

3. Prosedur Penelitian

Pengembangan ICM-PjBL disusun dalam empat tahap, yaitu analisis kebutuhan, perancangan model, validasi dan uji coba, serta evaluasi dan revisi. Keempat tahap membentuk siklus pengembangan yang memungkinkan hasil evaluasi digunakan untuk menyempurnakan desain pembelajaran.

a. Tahap I: Analisis Kebutuhan dan Identifikasi Masalah

Tahap ini mengidentifikasi persoalan nyata dalam ekosistem kopi yang relevan dengan pembelajaran matematika terapan melalui kajian dokumen, diskusi dengan dosen dan calon mitra, serta identifikasi kebutuhan data dan informasi yang tersedia. Identifikasi diarahkan pada pengelolaan data kopi, hubungan faktor lingkungan dengan hasil pengamatan, dinamika pertumbuhan tanaman, pengukuran mutu, variasi kondisi

geografis, pemilahan dan distribusi hasil panen, prediksi indikator hasil atau mutu, dan kebutuhan informasi untuk mendukung keputusan. Setiap masalah dianalisis berdasarkan lima kriteria: relevansi terhadap kebutuhan mitra, kesesuaian dengan konsep matematika, ketersediaan data, kelayakan penyelesaian dalam durasi pembelajaran, dan potensi menghasilkan luaran yang dapat dievaluasi. Pemetaan awal terhadap mata kuliah dan capaian pembelajaran lulusan (CPL) memastikan setiap proyek memiliki tujuan akademik yang jelas dan tidak hanya berorientasi pada pembuatan produk digital.

b. Tahap II: Perancangan Model ICM-PjBL

Tahap ini menyusun arsitektur model dan perangkat pembelajaran dengan menghubungkan masalah, pertanyaan penelitian, konsep matematis, aktivitas mahasiswa, data yang diperlukan, luaran proyek, dan indikator penilaian. Delapan proyek dikelompokkan ke dalam empat tahapan pembelajaran: pengelolaan data; analisis dan pemodelan (statistika, persamaan diferensial, MFRM, GIS); optimasi dan prediksi; serta integrasi hasil ke dalam DSS. Pengelompokan ini merupakan struktur konseptual, bukan urutan mutlak. Beberapa proyek dapat berjalan paralel bila tidak memiliki ketergantungan data, sedangkan proyek yang membutuhkan data longitudinal atau hasil pengukuran tertentu hanya dapat dilaksanakan setelah persyaratan datanya terpenuhi. Perangkat yang dikembangkan meliputi peta hubungan proyek dengan mata kuliah dan CPL; panduan pelaksanaan proyek (pertanyaan pemantik, aktivitas, luaran); format metadata dan dokumentasi data; rubrik penilaian proses, penalaran matematis, ketepatan metode, kualitas produk, dan komunikasi ilmiah; prosedur validasi data, pemeriksaan asumsi model, dan evaluasi produk digital; serta panduan kolaborasi dengan mitra. Rancangan juga mengidentifikasi risiko metodologis, misalnya model pertumbuhan memerlukan data pengamatan berkala, MFRM memerlukan struktur data penilaian yang sesuai, dan model AI memerlukan data yang cukup untuk pelatihan serta pengujian, sehingga pemilihan metode tidak hanya didasarkan pada ketersediaan perangkat lunak.

c. Tahap III: Validasi Ahli dan Uji Coba Terbatas

Rancangan model dievaluasi melalui validasi ahli oleh validator yang dipilih berdasarkan kompetensinya (pendidikan matematika, matematika terapan atau komputasi, desain pembelajaran, serta bidang kopi atau kebutuhan mitra). Penilaian mencakup kejelasan tujuan, kesesuaian proyek dengan CPL, ketepatan konsep matematis, keterkaitan antarproyek, kelayakan waktu, kebutuhan sumber daya, dan keterukuran indikator evaluasi. Jumlah validator, skala penilaian, dan kriteria penerimaan ditetapkan sebelum pengumpulan data. Setelah revisi awal, model dapat diujicobakan secara terbatas pada satu atau beberapa proyek, misalnya dimulai dari basis data dan analisis statistik, agar kendala data, kesulitan mahasiswa, ketidaksesuaian durasi, dan masalah koordinasi lintas mata kuliah dapat diidentifikasi tanpa membebani peserta dengan seluruh proyek. Data uji coba dikumpulkan melalui observasi pembelajaran, pemeriksaan produk, wawancara atau refleksi mahasiswa, serta umpan balik dosen dan mitra. Apabila penelitian berhenti pada validasi ahli, tahap ini dilaporkan sebagai validasi desain, bukan uji efektivitas.

d. Tahap IV: Evaluasi dan Revisi Model

Tahap ini menilai kelayakan model berdasarkan bukti yang dikumpulkan, mencakup

kesesuaian rancangan dengan tujuan pembelajaran, keterlaksanaan aktivitas, konsistensi hubungan antarproyek, kualitas produk mahasiswa, dan relevansi hasil bagi mitra. Revisi dilakukan dengan menelusuri hubungan antara temuan evaluasi dan komponen desain. Jika mahasiswa kesulitan menggunakan data dari proyek sebelumnya, format metadata dan dokumentasi disederhanakan atau diperjelas; jika proyek membutuhkan data yang tidak tersedia, rancangan pengumpulan data disesuaikan atau proyek ditunda; jika mitra tidak dapat menggunakan prototipe, kebutuhan pengguna dan desain antarmuka dikaji kembali. Kelayakan dan keterlaksanaan desain tidak dengan sendirinya membuktikan peningkatan kompetensi mahasiswa atau dampak ekonomi bagi mitra; kesimpulan semacam itu memerlukan desain evaluasi dan bukti tambahan.

4. Instrumen Pengumpulan Data

Pengumpulan data disesuaikan dengan tujuan setiap tahap. Instrumen utama meliputi lembar analisis kebutuhan, matriks pemetaan kurikulum, lembar validasi ahli, rubrik penilaian proyek, lembar observasi, panduan wawancara atau refleksi, dan daftar periksa kualitas produk. Lembar analisis kebutuhan mendokumentasikan persoalan mitra, ketersediaan data, dan potensi penggunaan matematika. Matriks pemetaan kurikulum menghubungkan setiap proyek dengan CPL dan konsep matematis yang ditargetkan. Lembar validasi ahli mengevaluasi ketepatan dan kelayakan rancangan.

Rubrik penilaian proyek mengukur formulasi masalah, ketepatan pemilihan metode, kualitas pengolahan data, pemeriksaan asumsi, interpretasi hasil, kualitas produk, dokumentasi, dan komunikasi ilmiah. Apabila penelitian mengukur capaian individual, penilaian produk kelompok dilengkapi dengan tugas atau penilaian individual. Instrumen penilaian produk digital disesuaikan dengan karakteristik proyek: basis data dinilai dari konsistensi struktur dan kelengkapan metadata; model matematis dari ketepatan formulasi dan validasi; model prediksi dari prosedur pengujian dan metrik yang relevan; dan DSS dari fungsi, keterbacaan informasi, serta kesesuaiannya dengan kebutuhan pengguna. Pada tahap implementasi, indikator perlu memiliki definisi operasional yang jelas, dan prosedur pemeriksaan validitas serta reliabilitas ditentukan sesuai tujuan pengukuran.

5. Analisis Data

Analisis data menggunakan pendekatan deskriptif dan tematik sesuai dengan jenis data dan pertanyaan penelitian. Pertama, data analisis kebutuhan dan dokumen kurikulum dianalisis untuk mengidentifikasi persoalan prioritas, kebutuhan data, dan kesesuaian proyek dengan CPL, kemudian dituangkan dalam matriks hubungan antara masalah, konsep matematika, aktivitas, dan luaran. Kedua, hasil validasi ahli dianalisis secara deskriptif melalui distribusi skor, ringkasan penilaian, dan komentar terbuka; apabila jumlah validator dan desain instrumen mendukung, indeks validitas isi dapat digunakan dengan prosedur perhitungan yang dijelaskan. Skor validasi tidak diperlakukan sebagai bukti efektivitas pembelajaran. Ketiga, apabila uji coba dilakukan, hasil observasi, wawancara, refleksi mahasiswa, dan umpan balik mitra dianalisis secara tematik terkait keterlaksanaan, kendala implementasi, kualitas kolaborasi, kesesuaian produk dengan kebutuhan pengguna, dan komponen desain yang perlu direvisi. Keempat, kualitas produk proyek dianalisis menggunakan rubrik yang ditetapkan sebelumnya, dan konsistensi antarpenilai diperiksa dengan prosedur yang sesuai dengan skala dan rancangan penilaian apabila tersedia lebih

dari satu penilai.

Jika penelitian bertujuan menguji peningkatan kompetensi, analisis tambahan dapat memakai pengukuran sebelum dan sesudah pembelajaran. Pemilihan uji statistik mempertimbangkan karakteristik data, validitas instrumen, jumlah peserta, dan keberadaan kelompok pembanding. Tanpa data tersebut, penelitian hanya dapat menyimpulkan hasil pengembangan dan kelayakan model, bukan efektivitasnya.

6. Penjaminan Kualitas dan Pertimbangan Etika

Kualitas penelitian dijaga melalui dokumentasi setiap tahap pengembangan, konsistensi definisi variabel, pencatatan keputusan desain, dan penelusuran hubungan antara temuan evaluasi dan revisi model. Data dari kebun atau mitra dikumpulkan dengan persetujuan yang sesuai; informasi rahasia, termasuk identitas pemilik kebun atau data usaha, dilindungi sesuai kesepakatan; dan penggunaan data untuk pembelajaran serta publikasi dijelaskan kepada mitra, termasuk batas akses dan ketentuan penggunaan produk yang dihasilkan. Dalam pengembangan model AI dan DSS, sumber data, keterbatasan model, dan prosedur validasi didokumentasikan, serta dibedakan antara hasil observasi, hasil estimasi, simulasi, dan rekomendasi, agar luaran pembelajaran tidak disalahartikan sebagai dasar keputusan operasional yang telah teruji.

7. Cakupan dan Keterbatasan Metode

Metode ini dirancang untuk mengembangkan dan mengevaluasi model pembelajaran dalam konteks Program Studi Matematika dengan ekosistem kopi sebagai sumber persoalan autentik. Generalisasi hasil perlu dilakukan secara hati-hati karena ketersediaan data, karakteristik mahasiswa, struktur kurikulum, dan kesiapan mitra dapat berbeda antarinstitusi. Integrasi delapan proyek memerlukan koordinasi lintas mata kuliah, sumber daya komputasi, dan akses data yang memadai. Tidak semua proyek harus dilaksanakan bersamaan; urutan implementasi dapat disesuaikan dengan prasyarat akademik dan ketersediaan data, dan penelitian awal dapat difokuskan pada validasi desain dan uji coba terbatas sebelum model diterapkan penuh.

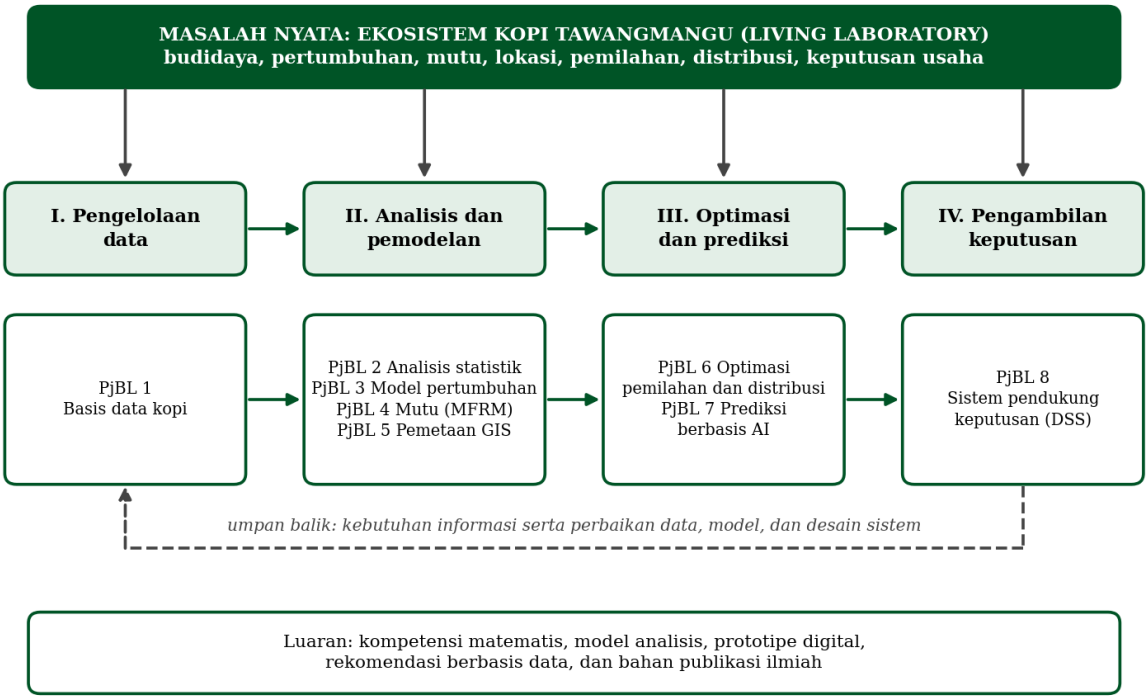
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil perancangan model dan analisis konseptual. Karena data implementasi, hasil penilaian mahasiswa, dan evaluasi mitra belum tersedia, hasil yang disajikan bukan hasil eksperimen yang membuktikan efektivitas pembelajaran. Uraian disusun mengikuti urutan arsitektur model, pemetaan delapan proyek, integrasi antarproyek, integrasi kurikulum, peran *living laboratory*, mekanisme pembelajaran, kerangka evaluasi, pembahasan kontribusi, dan implikasi bagi penelitian selanjutnya.

1. Arsitektur Model *Integrated Coffee-Based Mathematical PjBL*

Hasil utama perancangan adalah model ICM-PjBL, yaitu model pembelajaran yang menghubungkan delapan proyek dalam satu ekosistem masalah nyata. Model ini dirancang agar mahasiswa tidak hanya mempelajari metode matematika secara terpisah, tetapi juga memahami bagaimana berbagai metode berkontribusi pada pengambilan keputusan dalam rantai nilai kopi. Pada pembelajaran yang berorientasi mata kuliah, mahasiswa dapat menyelesaikan tugas statistika, pemodelan, optimasi, atau komputasi secara terpisah.

Pendekatan demikian tetap penting untuk membangun fondasi teoretis, tetapi belum tentu memperlihatkan hubungan antara hasil satu analisis dan kebutuhan analisis berikutnya. ICM-PjBL menawarkan struktur yang menghubungkan proyek-proyek tersebut melalui persoalan, data, dan luaran yang saling berkaitan (Gambar 1).



Gambar 2. *Arsitektur konseptual ICM-PjBL*

Arsitektur tersebut memiliki dua dimensi integrasi. Integrasi vertikal adalah keterkaitan tahapan pengolahan informasi dari pengumpulan data hingga pengambilan keputusan. Integrasi horizontal adalah penggunaan beragam bidang matematika terapan dan komputasi untuk menjawab aspek-aspek berbeda dari persoalan yang sama. Melalui integrasi vertikal, hasil analisis statistik dapat digunakan untuk membentuk variabel prediktor dalam model pembelajaran mesin, hasil pengukuran mutu dapat menjadi masukan bagi model optimasi pemilahan, dan informasi lokasi dapat membantu menentukan strategi pengumpulan dan distribusi produk. Melalui integrasi horizontal, mahasiswa menghubungkan statistika, persamaan diferensial, teori pengukuran, analisis spasial, riset operasi, dan kecerdasan buatan dalam satu konteks penerapan.

Rancangan ini sejalan dengan arah pengembangan PjBL dalam pendidikan matematika yang dipetakan oleh Susanti *et al*. (2023) serta potensi *living laboratory* sebagai ruang kolaborasi perguruan tinggi dengan pemangku kepentingan eksternal (Tercanli and Jongbloed, 2022). Namun, ICM-PjBL merupakan model yang diusulkan; efektivitas dan keunggulannya dibandingkan model pembelajaran lain masih perlu diuji secara empiris.

2. Pemetaan Delapan Proyek terhadap Konsep Matematika dan Persoalan Nyata

Kedelapan proyek dirancang sebagai komponen yang saling melengkapi. Setiap proyek memiliki persoalan utama, konsep matematis atau komputasional, aktivitas mahasiswa, dan luaran yang diharapkan (Tabel 1). Pemetaan ini menjadi dasar untuk menghubungkan

proyek dengan mata kuliah, capaian pembelajaran lulusan (CPL), dan kebutuhan mitra Kampus Kopi Tawangmangu.

Tabel 1. Pemetaan Proyek dalam Model ICM-PjBL

Proyek	Persoalan yang dikaji	Konsep atau metode utama	Luaran yang direncanakan
PjBL 1	Data kopi belum terdokumentasi secara terstruktur	Basis data, algoritma, statistika deskriptif	Basis data dan dasbor
PjBL 2	Hubungan faktor lingkungan dengan pertumbuhan atau mutu belum dianalisis	Statistika deskriptif, inferensial, regresi	Laporan analisis dan model statistik
PjBL 3	Perubahan pertumbuhan tanaman perlu dimodelkan	Persamaan diferensial biasa, sistem dinamis, simulasi	Model pertumbuhan dan simulasi
PjBL 4	Penilaian mutu dapat berbeda antarpengamat	Teori pengukuran, statistika, *Many-Facet Rasch Model*	Model pengukuran dan evaluasi konsistensi penilai
PjBL 5	Informasi lokasi dan variasi kondisi kebun perlu dipetakan	Sistem informasi geografis, analisis spasial	Peta tematik atau prototipe WebGIS
PjBL 6	Pemilahan dan distribusi perlu mempertimbangkan keterbatasan sumber daya	Riset operasi, optimasi, pemrograman matematis	Model optimasi dan skenario distribusi
PjBL 7	Prediksi hasil atau mutu perlu dikembangkan dari data yang tersedia	Pembelajaran mesin, validasi model, evaluasi prediksi	Model prediksi dan laporan evaluasi
PjBL 8	Informasi dari berbagai analisis perlu diterjemahkan menjadi pilihan tindakan	Analisis keputusan, integrasi data, antarmuka digital	Prototipe sistem pendukung keputusan

Sumber: hasil perancangan konseptual penulis. Tabel ini menunjukkan usulan desain, bukan bukti bahwa semua luaran telah dikembangkan atau diuji.

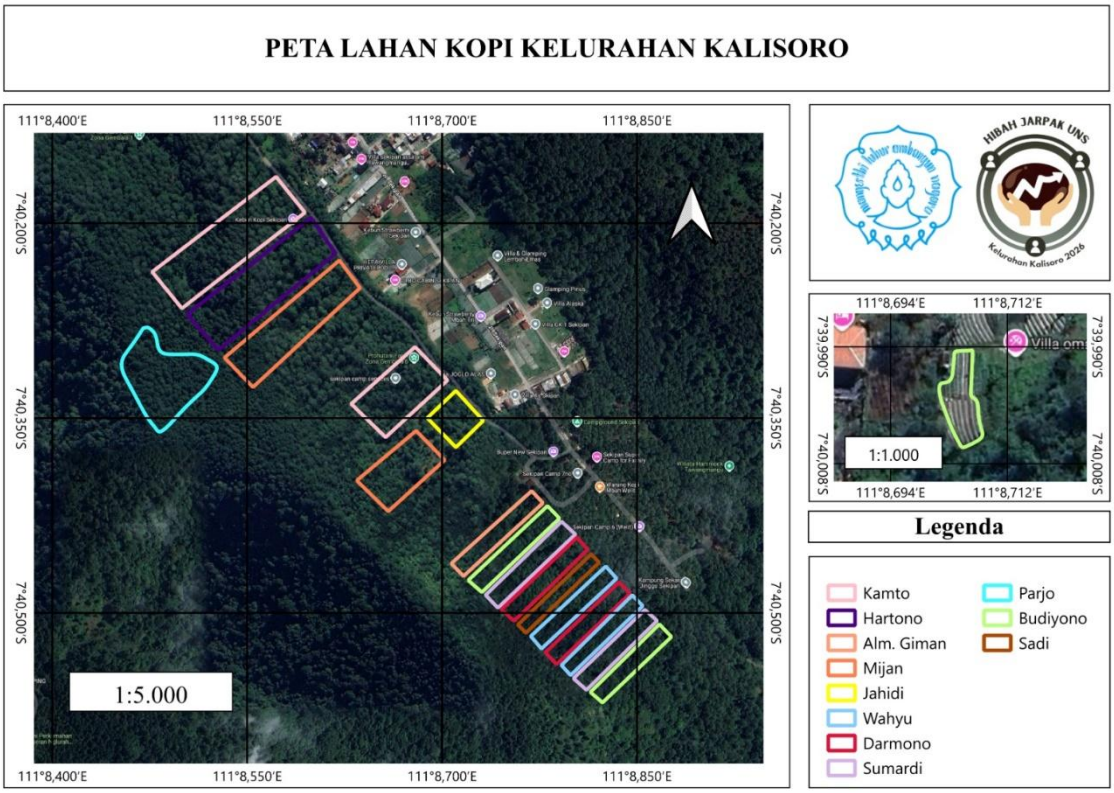
Pemetaan tersebut menunjukkan bahwa setiap proyek berfungsi sebagai unit pembelajaran sekaligus bagian dari sistem yang lebih besar. Kontribusi akademiknya tidak hanya terletak pada penguasaan metode individual, tetapi pada kemampuan mahasiswa menentukan kapan suatu metode sesuai digunakan, bagaimana asumsi model diperiksa, dan bagaimana hasilnya diterjemahkan menjadi rekomendasi yang dapat dipahami pengguna.

a. PjBL 1: Pembangunan Basis Data Kopi

Proyek pertama berfokus pada penyusunan struktur data yang dapat digunakan secara konsisten oleh proyek-proyek berikutnya. Data yang berpotensi dikumpulkan antara lain identitas kebun atau petak, lokasi, varietas, tanggal pengamatan, ketinggian tempat, pH tanah, kelembapan, radiasi matahari, curah hujan, praktik budidaya, hasil panen, dan catatan mutu; variabel yang benar-benar dikumpulkan disepakati bersama mitra sesuai tujuan penelitian. Dari perspektif matematika, proyek ini memperkenalkan variabel, skala pengukuran, struktur tabel, statistik deskriptif, data hilang, pencilan, dan konsistensi satuan. Mahasiswa menentukan definisi operasional setiap variabel, sumber data, frekuensi pengamatan, dan aturan validasi. Catatan

kelembapan tanpa informasi waktu dan lokasi, misalnya, memiliki keterbatasan apabila dibandingkan dengan hasil panen dari petak yang berbeda.

Luaran proyek berupa basis data terdokumentasi dan, bila sesuai kebutuhan, dasbor sederhana. Keberhasilannya dinilai dari kelengkapan metadata, konsistensi format, ketepatan validasi, kemudahan penelusuran sumber, dan kesesuaian data untuk analisis lanjutan. Proyek ini juga menjadi pintu masuk untuk membahas etika pengelolaan data, persetujuan pemilik data, dan pembatasan akses terhadap informasi sensitif. Dengan demikian, proyek ini tidak diposisikan hanya sebagai tugas pemrograman, melainkan fondasi epistemik bagi seluruh rangkaian pembelajaran: kualitas kesimpulan matematis sangat bergantung pada kualitas data yang mendasarinya.



Gambar 3. Peta Lahan Kebun Kopi Kalisoro Tawangmangu

b. PjBL 2: Analisis Statistik Hubungan Kondisi Lingkungan dan Hasil Kopi

Proyek kedua menggunakan data yang telah dikumpulkan untuk menjawab pertanyaan kuantitatif, misalnya apakah terdapat hubungan antara faktor lingkungan dan indikator pertumbuhan atau mutu kopi. Mahasiswa dapat memulai dengan visualisasi distribusi, ringkasan statistik, pemeriksaan pencilan, dan analisis korelasi, kemudian melanjutkan ke regresi atau metode inferensial lain bila struktur data dan jumlah pengamatan memadai. Secara konseptual, model regresi dapat dituliskan sebagai

$$Y_i = \beta_0 + \Sigma_{j=1}^{p} \beta_j X_{ij} + \varepsilon_i,$$

dengan Y_i sebagai indikator hasil atau mutu pengamatan ke-i, X_{ij} variabel penjelas ke-j, β_j parameter yang diestimasi, dan ε_i komponen galat. Bentuk ini merupakan contoh

model yang mungkin digunakan, bukan model empiris yang telah diestimasi untuk kebun kopi Tawangmangu.

Mahasiswa perlu memeriksa asumsi model, potensi multikolinearitas, ketidakpastian estimasi, dan kemungkinan pengaruh faktor yang tidak teramati. Hubungan statistik tidak boleh langsung ditafsirkan sebagai hubungan sebab-akibat; hubungan antara ketinggian lokasi dan mutu kopi, misalnya, dapat dipengaruhi oleh varietas, praktik budidaya, waktu panen, atau proses pascapanen. Luaran proyek berupa laporan analisis yang menjelaskan pertanyaan penelitian, karakteristik data, metode, hasil estimasi, keterbatasan, dan rekomendasi pengumpulan data berikutnya, yang dapat menjadi masukan bagi pemilihan variabel pada model pertumbuhan, kandidat prediktor pada proyek AI, dan faktor yang diperhatikan dalam pemetaan spasial.

c. PjBL 3: Pemodelan Matematika Pertumbuhan Kopi

Proyek ketiga memperkenalkan pemodelan dinamis untuk memahami perubahan suatu indikator pertumbuhan dari waktu ke waktu. Berbeda dari analisis statistik yang berfokus pada pola hubungan antarvariabel dalam kumpulan pengamatan, model dinamis menekankan mekanisme perubahan dan perkembangan keadaan sistem menurut waktu. Sebagai contoh konseptual, pertumbuhan indikator biomassa B(t) dapat direpresentasikan dengan persamaan diferensial logistik

$$dB/dt = rB(1 - B/K),$$

dengan r sebagai laju pertumbuhan dan K sebagai kapasitas maksimum. Persamaan ini hanya ilustrasi metode. Penerapannya pada pertumbuhan kopi memerlukan definisi indikator biologis yang tepat, data longitudinal, dan pengujian kesesuaian asumsi logistik dengan kondisi lapangan; model yang lebih kompleks mungkin diperlukan bila pengamatan menunjukkan pengaruh musiman, pemangkasan, pemupukan, kekeringan, atau fase perkembangan tanaman.

Mahasiswa dapat mengestimasi parameter dari data, membandingkan kurva simulasi dengan hasil pengamatan, melakukan analisis sensitivitas, dan mengevaluasi pengaruh perubahan parameter terhadap proyeksi, sehingga kalkulus, persamaan diferensial, komputasi numerik, dan interpretasi biologis terhubung. Luaran yang diharapkan adalah model pertumbuhan beserta dokumentasi asumsi, estimasi parameter, visualisasi, dan batas penggunaan. Model tidak diperlakukan sebagai alat prediksi operasional sebelum divalidasi; bila data longitudinal belum tersedia, proyek dapat dimulai sebagai studi simulasi dan dilanjutkan dengan pengumpulan data pada periode berikutnya.

d. PjBL 4: Pengukuran Mutu Kopi Menggunakan *Many-Facet Rasch Model*

Proyek keempat mengkaji pengukuran mutu ketika penilaian melibatkan beberapa penilai, atribut, atau sampel. Penilaian mutu dapat mengandung variasi yang bersumber dari perbedaan karakteristik sampel, tingkat ketegasan penilai, dan karakteristik aspek yang dinilai, sehingga skor mentah tidak selalu cukup untuk membedakan mutu produk dari perilaku penilai. MFRM dapat dipertimbangkan ketika rancangan penilaian memenuhi asumsi model dan data sesuai untuk analisis. Secara konseptual, model menghubungkan peluang suatu kategori penilaian dengan kualitas objek yang dinilai, ketegasan penilai, tingkat kesulitan aspek penilaian, dan ambang kategori respons; penerapannya memerlukan rancangan instrumen yang jelas, data

penilaian memadai, dan pemeriksaan kecocokan model.
Mahasiswa dapat menyusun rubrik penilaian, mengorganisasikan data penilai dan sampel, mengestimasi parameter dengan perangkat lunak yang sesuai, lalu menginterpretasikan konsistensi dan perbedaan penilaian. MFRM tidak otomatis menghasilkan ukuran mutu yang valid hanya karena data dimasukkan ke perangkat lunak; validitas konstruk, prosedur pengambilan sampel, pelatihan penilai, dan kecocokan model tetap harus diperhatikan. Luaran proyek berupa instrumen penilaian, dokumentasi prosedur, analisis hasil pengukuran, dan rekomendasi perbaikan penilaian, yang berpotensi digunakan dalam proyek optimasi pemilahan dan DSS apabila ukuran mutu terbukti cukup valid dan relevan.

e. PjBL 5: Pemetaan Spasial Kebun Kopi Menggunakan GIS

Proyek kelima memanfaatkan GIS untuk menghubungkan data atribut dengan posisi geografis. Data yang dapat dipetakan meliputi lokasi petak, ketinggian, kondisi tanah, hasil pengamatan, fasilitas pengolahan, dan titik distribusi, sepanjang tersedia dan diperoleh dengan izin yang sesuai. Mahasiswa mempelajari koordinat, sistem referensi spasial, penggabungan data atribut dengan data lokasi, klasifikasi, peta tematik, dan interpretasi pola geografis. Analisis spasial dapat membantu mengidentifikasi variasi antarlokasi dan menyusun pertanyaan lanjutan, misalnya apakah indikator mutu tertentu menunjukkan pola geografis atau apakah jarak ke fasilitas pengolahan berhubungan dengan biaya distribusi.
Peta tidak boleh dianggap membuktikan hubungan sebab-akibat, dan interpretasi harus memperhatikan kepadatan sampel, ketelitian koordinat, skala peta, dan ketidakpastian pengukuran. Bila titik pengamatan terbatas, peta digunakan sebagai visualisasi data yang tersedia, bukan dasar klaim pola spasial yang kuat. Luaran yang direncanakan adalah peta tematik atau prototipe WebGIS yang menghubungkan data lokasi dengan informasi budidaya dan mutu, yang mendukung perencanaan pengumpulan data, penentuan lokasi pengamatan berikutnya, dan strategi distribusi.

f. PjBL 6: Optimasi Pemilahan dan Distribusi Kopi

Proyek keenam mengalihkan hasil analisis menjadi persoalan optimasi. Keputusan tentang pemilahan, alokasi hasil panen, penyimpanan, dan distribusi dapat dibatasi oleh kapasitas tenaga kerja, fasilitas, waktu, permintaan, dan biaya, dan dapat diformulasikan sebagai model optimasi bila variabel keputusan, fungsi tujuan, dan batasannya dapat ditentukan eksplisit. Sebagai ilustrasi, masalah alokasi dapat ditulis sebagai

$$\min \Sigma_{i=1}^{m} \Sigma_{j=1}^{n} c_{ij} x_{ij},$$

dengan x_{ij} sebagai jumlah produk yang dialokasikan dari sumber i ke tujuan j dan c_{ij} sebagai biaya per unit alokasi. Model ini dapat dilengkapi batasan kapasitas sumber, kebutuhan tujuan, dan aturan kelayakan distribusi; bentuk yang tepat bergantung pada persoalan mitra yang benar-benar ditemukan di lapangan.
Mahasiswa membandingkan beberapa skenario, menilai perubahan solusi ketika biaya atau kapasitas berubah, dan menjelaskan kompromi antara biaya, waktu, mutu, dan pemenuhan permintaan. Bila data biaya belum tersedia, data simulasi yang diberi label jelas dapat digunakan, dan hasilnya tidak disajikan sebagai penghematan nyata. Luaran proyek adalah model optimasi, dokumentasi asumsi, skenario alternatif, dan

rekomendasi yang dapat didiskusikan bersama mitra. Hasil pengukuran mutu dari PjBL 4 dan informasi lokasi dari PjBL 5 dapat menjadi masukan tambahan apabila format dan validitas datanya sesuai.

g. PjBL 7: Prediksi Berbasis Kecerdasan Buatan

Proyek ketujuh menggunakan data yang tersedia untuk mengembangkan model prediksi, misalnya memperkirakan indikator mutu atau hasil berdasarkan karakteristik lingkungan dan catatan pengamatan. Metode pembelajaran mesin dipilih sesuai jenis variabel target, jumlah data, struktur pengamatan, dan tujuan penggunaan; model yang lebih kompleks tidak selalu lebih baik, terutama bila data terbatas. Kegiatan mahasiswa meliputi penentuan pertanyaan prediksi, pemilihan variabel, pembersihan data, pembagian data pelatihan dan pengujian, pemilihan model pembanding, pelatihan, dan evaluasi. Untuk prediksi numerik, evaluasi dapat melibatkan MAE atau RMSE; untuk klasifikasi, *precision*, *recall*, *F1-score*, dan matriks kebingungan dapat dipertimbangkan sesuai tujuan analisis.

Pemisahan data perlu menghindari kebocoran informasi. Jika beberapa pengamatan berasal dari kebun atau petak yang sama, pembagian acak dapat membuat hasil evaluasi tampak terlalu baik karena data pengujian menyerupai data pelatihan; pembagian berdasarkan kelompok atau lokasi dapat lebih tepat untuk menguji generalisasi ke kebun yang belum diamati. Luaran proyek berupa model prediksi, laporan performa, perbandingan dengan model dasar, dan penjelasan keterbatasan. Bila ukuran data belum mencukupi, luaran yang layak adalah prototipe metodologis atau studi kelayakan, bukan klaim bahwa sistem siap digunakan untuk keputusan produksi atau pemasaran. Hasil prediksi baru diintegrasikan ke DSS setelah validasi dan pemeriksaan kesesuaiannya dengan kebutuhan pengguna.

h. PjBL 8: Sistem Pendukung Keputusan untuk Ekosistem Kopi

Proyek kedelapan mengintegrasikan hasil proyek sebelumnya menjadi DSS. Tujuannya bukan sekadar menggabungkan semua keluaran digital, melainkan menyajikan informasi yang relevan agar pengguna memahami pilihan tindakan, asumsi yang digunakan, dan konsekuensi setiap alternatif. DSS dapat dirancang dalam modul pengelolaan data, visualisasi kondisi kebun, ringkasan mutu, hasil prediksi, skenario optimasi, dan rekomendasi berdasarkan kriteria yang disepakati bersama mitra. Sistem perlu membedakan data hasil pengamatan, hasil estimasi model, hasil simulasi, dan rekomendasi, agar prediksi atau simulasi tidak dianggap fakta yang telah diamati.

Mahasiswa mengidentifikasi pengguna sasaran, merumuskan kebutuhan fungsional, menyusun alur penggunaan, dan membuat prototipe yang dapat diuji. Evaluasi awal mencakup kelengkapan fungsi, kemudahan penggunaan, keterbacaan visualisasi, konsistensi keluaran, dan relevansi rekomendasi; bila DSS akan dipakai secara operasional, diperlukan pengujian lebih ketat, termasuk keamanan data, keandalan sistem, dan prosedur pembaruan model. Proyek ini menjadi puncak integrasi karena mahasiswa menjelaskan bagaimana hasil basis data, statistika, pemodelan, pengukuran, GIS, optimasi, dan AI digunakan secara proporsional dalam satu alat bantu keputusan. DSS juga dapat mengungkap kekurangan proyek sebelumnya, seperti variabel yang belum tersedia, prediksi yang belum stabil, atau kriteria keputusan yang belum disepakati, sehingga menjadi sumber umpan balik bagi perbaikan proyek awal.

3. Integrasi Antarproyek sebagai Mekanisme Utama Model

Kebaruan konseptual ICM-PjBL terutama terletak pada hubungan antarproyek, bukan pada keberadaan masing-masing metode secara terpisah. Delapan proyek baru membentuk model pembelajaran terintegrasi apabila terdapat hubungan yang jelas antara pertanyaan, data, asumsi, dan luaran (Tabel 2).

Tabel 2. Hubungan Luaran dan Masukan antarproyek

Hubungan	Luaran yang menjadi masukan	Tujuan integrasi
PjBL 1 ke PjBL 2	Data terstruktur dan metadata	Analisis statistik dilakukan dengan definisi variabel yang konsisten
PjBL 1 ke PjBL 3	Data pengamatan berkala jika tersedia	Kalibrasi dan evaluasi model pertumbuhan
PjBL 1 dan PjBL 4	Data sampel, atribut mutu, dan penilaian	Pengembangan analisis pengukuran mutu
PjBL 1 dan PjBL 5	Data atribut dan koordinat	Pemetaan variasi kondisi kebun
PjBL 2, PjBL 4, dan PjBL 5 ke PjBL 6	Informasi faktor terkait, indikator mutu, dan lokasi	Penyusunan parameter dan batasan optimasi
PjBL 1, PjBL 2, dan PjBL 4 ke PjBL 7	Dataset dengan variabel prediktor dan target yang sesuai	Pengembangan dan evaluasi model prediksi
PjBL 3, PjBL 5, PjBL 6, dan PjBL 7 ke PjBL 8	Hasil simulasi, peta, optimasi, dan prediksi yang tervalidasi	Penyajian alternatif tindakan untuk mendukung keputusan
PjBL 8 kembali ke proyek sebelumnya	Kebutuhan informasi yang belum terpenuhi dan umpan balik pengguna	Perbaikan data, model, dan desain sistem

Sumber: hasil perancangan konseptual penulis.

Hubungan dalam tabel tersebut bersifat potensial dan disesuaikan dengan ketersediaan data. Model pertumbuhan, misalnya, tidak dapat dikalibrasi dari basis data yang hanya memuat satu kali pengamatan karena memerlukan data longitudinal, dan MFRM hanya relevan bila terdapat desain penilaian yang memungkinkan variasi objek, penilai, atau aspek penilaian dianalisis. Integrasi dengan demikian bukan memaksakan seluruh metode pada setiap jenis data, melainkan menghubungkan metode yang sesuai dengan kebutuhan dan struktur persoalan.

Dalam pelaksanaannya, hubungan antarproyek dapat diwujudkan melalui kontrak data sederhana. Setiap kelompok mendokumentasikan definisi variabel, satuan, periode pengamatan, metode pembersihan, ketidakpastian, dan batasan penggunaan hasil. Kelompok penerima menilai apakah data tersebut sesuai dengan asumsi metodenya; bila tidak, mahasiswa dapat meminta perbaikan atau melakukan pengumpulan data tambahan dengan persetujuan mitra. Prosedur ini menjadikan ketergantungan antarproyek bagian dari pembelajaran: mahasiswa tidak hanya bertanggung jawab atas produk kelompoknya, tetapi juga memahami bagaimana kualitas produk itu memengaruhi pekerjaan kelompok lain, sehingga berpotensi mengembangkan komunikasi ilmiah, dokumentasi, kolaborasi, dan tanggung jawab terhadap kualitas analisis.

4. Integrasi Model dengan Kurikulum Program Studi Matematika

Agar dapat diterapkan di perguruan tinggi, ICM-PjBL perlu dipetakan terhadap mata

kuliah dan CPL. Integrasi tidak harus melalui satu mata kuliah besar yang menampung seluruh proyek. Alternatif yang lebih realistis adalah menghubungkan beberapa mata kuliah melalui proyek bersama, dengan masing-masing dosen tetap bertanggung jawab pada kedalaman konsep dan capaian akademik mata kuliahnya (Tabel 3).

Tabel 3. Contoh Pemetaan Proyek terhadap Rumpun Mata Kuliah

Rumpun mata kuliah	Proyek terkait	Kompetensi yang dituju
Statistika dan analisis data	PjBL 1, PjBL 2	Mengelola data, menganalisis pola, menginterpretasikan ketidakpastian
Matematika pemodelan dan persamaan diferensial	PjBL 3	Merumuskan model, mengestimasi parameter, mengevaluasi hasil simulasi
Statistika lanjutan dan teori pengukuran	PjBL 4	Memahami pengukuran, memeriksa asumsi model, menafsirkan hasil estimasi
Komputasi dan analisis spasial	PjBL 1, PjBL 5	Mengintegrasikan data atribut dan spasial serta menyajikan informasi
Riset operasi dan optimasi	PjBL 6	Merumuskan fungsi tujuan, batasan, dan membandingkan solusi
Pembelajaran mesin dan analisis prediktif	PjBL 7	Melatih dan mengevaluasi model dengan prosedur validasi yang tepat
Analisis keputusan dan proyek akhir	PjBL 8	Mengintegrasikan hasil analisis dan mengomunikasikan rekomendasi

Sumber: hasil perancangan konseptual penulis.

Pemetaan ini merupakan contoh rancangan dan bukan pengganti kurikulum resmi; penentuan mata kuliah yang sebenarnya mempertimbangkan struktur kurikulum, prasyarat, bobot SKS, ketersediaan dosen, dan CPL program studi. Implementasi dapat dilakukan bertahap: pada semester awal mahasiswa mengerjakan proyek basis data dan analisis statistik; setelah memiliki dasar memadai, mereka mengembangkan model dinamis, pengukuran, dan pemetaan spasial; proyek optimasi dan AI kemudian menggunakan data yang telah tersedia; dan DSS menjadi proyek integratif yang melibatkan mahasiswa dari beberapa mata kuliah atau angkatan. Jika seluruh proyek tidak dapat dilaksanakan dalam satu semester, struktur lintas semester lebih realistis daripada memaksakan delapan proyek sekaligus.

Perlu dibedakan antara integrasi kurikulum dan penyatuan seluruh mata kuliah. Integrasi kurikulum berarti setiap mata kuliah memberikan kontribusi terencana pada proyek bersama, sedangkan penyatuan seluruh mata kuliah ke dalam satu kegiatan dapat mengurangi kedalaman materi dan menyulitkan penilaian capaian individual. Karena itu, model tetap membutuhkan keseimbangan antara penguasaan teori, latihan matematis, praktik komputasi, dan penerapan pada persoalan nyata.

5. Kampus Kopi Tawangmangu sebagai *Living Laboratory*

Konsep *living laboratory* menjadi dasar untuk menghubungkan kegiatan akademik dengan konteks yang melibatkan pengguna dan persoalan nyata. Tercanli dan Jongbloed (2022) menunjukkan bahwa *living lab* di perguruan tinggi berpotensi mendukung kolaborasi dan inovasi, meskipun pelaksanaannya menghadapi kendala. Dalam konteks Kampus Kopi Tawangmangu, konsep ini diterjemahkan menjadi hubungan kerja antara mahasiswa, dosen,

kelompok tani atau pengelola kebun, dan pihak lain yang relevan dalam rantai nilai kopi.

Dalam rancangan ini, kebun kopi bukan sekadar tempat kunjungan mahasiswa, melainkan sumber pertanyaan penelitian, konteks untuk memeriksa asumsi model, dan tempat mendiskusikan apakah hasil analisis bermanfaat bagi calon pengguna. Persoalan mitra sering tidak tersusun dalam format akademik; mitra mungkin menyampaikan kesulitan membedakan mutu produk, ketidakpastian hasil, biaya distribusi, atau kebutuhan informasi produksi. Mahasiswa kemudian menerjemahkan kebutuhan tersebut menjadi pertanyaan yang dapat ditangani secara matematis: menentukan variabel relevan, menjelaskan data yang dibutuhkan, memilih metode, dan menyatakan keterbatasan kesimpulan. Dosen memastikan bahwa masalah yang dipilih memiliki kedalaman matematis dan tidak berhenti pada pembuatan aplikasi digital.

Agar kolaborasi berkelanjutan, pembagian peran perlu disepakati: mitra membantu mengidentifikasi persoalan dan menilai relevansi hasil; dosen memastikan ketepatan konsep, metode, dan etika penelitian; mahasiswa bertanggung jawab atas pengumpulan data sesuai prosedur, analisis, dokumentasi, dan komunikasi hasil. Bila data digunakan untuk penelitian atau dipublikasikan, persetujuan mitra, perlindungan informasi rahasia, dan ketentuan kepemilikan produk dijelaskan sejak awal. Nilai *living laboratory* dengan demikian tidak hanya terletak pada keaslian lokasi, tetapi pada interaksi berulang antara masalah, analisis, pengguna, dan perbaikan solusi, sejalan dengan pembelajaran autentik yang menekankan hubungan antara aktivitas belajar dan praktik nyata. Relevansi bagi mitra tetap harus dinilai langsung; keberadaan produk digital saja tidak menjamin produk tersebut dibutuhkan atau dapat digunakan.

6. Mekanisme Pembelajaran dan Peran Dosen

ICM-PjBL membutuhkan perubahan peran dosen dari penyampai materi menjadi perancang pengalaman belajar, pembimbing metodologis, dan penilai proses ilmiah. Perubahan ini tidak berarti kuliah teoretis dihilangkan; konsep dasar diberikan pada saat mahasiswa membutuhkannya untuk menyelesaikan persoalan proyek, sehingga teori dan penerapan saling menguatkan. Mekanisme pembelajaran disusun dalam enam tahap:

1. **Identifikasi masalah.** Mahasiswa dan dosen berdiskusi dengan mitra untuk memilih persoalan yang relevan, dapat diteliti, dan sesuai dengan kemampuan mahasiswa.
2. **Formulasi matematis.** Persoalan diterjemahkan menjadi variabel, pertanyaan penelitian, hipotesis atau tujuan analisis, dan model yang sesuai.
3. **Perencanaan dan pengumpulan data.** Mahasiswa menetapkan prosedur, sumber data, kebutuhan pengukuran, etika pengumpulan data, dan kontrol kualitas.
4. **Analisis dan pengembangan produk.** Mahasiswa menerapkan konsep matematika, metode statistik, pemodelan, atau komputasi yang relevan.
5. **Validasi dan refleksi.** Hasil diperiksa melalui asumsi model, data pengujian, umpan balik dosen, dan bila memungkinkan penilaian mitra.
6. **Komunikasi hasil dan revisi.** Mahasiswa menyampaikan temuan dalam laporan ilmiah, presentasi, prototipe, atau rekomendasi, kemudian merevisi produk berdasarkan evaluasi.

Tahapan tersebut dapat diulang sesuai kebutuhan proyek. Apabila prediksi menunjukkan performa rendah, mahasiswa memeriksa kembali kualitas data, definisi variabel, pilihan model, dan rancangan validasi; apabila rekomendasi optimasi tidak sesuai

dengan praktik mitra, mahasiswa meninjau apakah fungsi tujuan dan batasan telah merepresentasikan persoalan dengan tepat. Proses berulang ini penting karena pemecahan masalah nyata tidak selalu linear. Mahasiswa belajar bahwa model matematis adalah representasi dari sistem yang memiliki asumsi dan keterbatasan, bukan salinan sempurna dari realitas, sehingga pembelajaran mencakup keterampilan memilih metode dan mengkritisi hasil, selain keterampilan menghitung.

7. Kerangka Evaluasi Keberhasilan Model

Karena ICM-PjBL masih merupakan model yang diusulkan, evaluasi dirancang sebagai bagian dari pengembangan berikutnya. Zhang dan Ma (2023) melaporkan hasil positif PjBL pada berbagai indikator pembelajaran, tetapi hasil umum tersebut tidak dapat langsung digunakan untuk menyimpulkan bahwa ICM-PjBL akan menghasilkan dampak yang sama. Efektivitas model harus diperiksa melalui data implementasi yang sesuai dengan tujuan penelitian. Evaluasi dapat dilakukan melalui empat dimensi (Tabel 4).

Tabel 4. Dimensi Evaluasi ICM-PjBL

Dimensi	Indikator yang dapat digunakan	Sumber data atau instrumen
Kelayakan desain	Kesesuaian proyek dengan CPL, kejelasan instruksi, kecukupan sumber daya, dan kelayakan jadwal	Validasi ahli, dosen pengampu, dan mitra
Kompetensi matematis	Ketepatan formulasi masalah, pemilihan metode, pemeriksaan asumsi, interpretasi, dan penalaran kuantitatif	Rubrik analitik, laporan, ujian individual
Kualitas produk	Kelengkapan data, ketepatan model, kualitas validasi, dokumentasi, dan fungsi prototipe	Audit produk, uji teknis, penilaian pakar
Relevansi bagi mitra	Kesesuaian dengan kebutuhan, keterpahaman hasil, potensi penggunaan, dan kemudahan pemeliharaan	Wawancara, diskusi kelompok, kuesioner pengguna

Sumber: hasil perancangan konseptual penulis.

Evaluasi kompetensi mahasiswa sebaiknya menggabungkan penilaian kelompok dan individu. Produk kelompok menunjukkan kemampuan kolaborasi dan integrasi, tetapi tidak selalu menggambarkan kontribusi atau penguasaan setiap mahasiswa; penilaian individual dapat dilakukan melalui ujian lisan, refleksi tertulis, pembelaan terhadap asumsi model, atau tugas analisis singkat. Apabila penelitian bertujuan menguji peningkatan hasil belajar, desain evaluasi perlu lebih kuat daripada survei kepuasan, misalnya pengukuran sebelum dan sesudah pembelajaran dengan instrumen tervalidasi dan, bila memungkinkan serta etis, perbandingan dengan kelompok pembanding yang sepadan. Analisis memperhatikan perbedaan karakteristik awal, jumlah peserta, data yang hilang, dan keterbatasan generalisasi. Penilaian mitra juga perlu dibedakan dari bukti dampak ekonomi: penilaian bahwa dasbor mudah dipahami merupakan bukti awal kegunaan atau penerimaan pengguna, tetapi belum membuktikan peningkatan produktivitas atau pendapatan, yang membutuhkan indikator, data dasar, periode pengamatan, dan desain evaluasi yang sesuai.

8. Pembahasan: Kontribusi terhadap Pembelajaran Matematika Terapan

Hasil perancangan ICM-PjBL mengarah pada tiga kontribusi konseptual. Pertama, model mengorganisasikan proyek berdasarkan hubungan masalah dan luaran, bukan hanya

berdasarkan daftar mata kuliah. Dalam proyek yang berdiri sendiri, mahasiswa dapat menyelesaikan tugas tanpa memahami bagaimana hasilnya digunakan oleh aktivitas lain. Dalam ICM-PjBL, setiap kelompok mendokumentasikan luaran dan menjelaskan apakah luaran tersebut memenuhi kebutuhan kelompok berikutnya, sehingga alasan akademik di balik setiap tugas menjadi lebih jelas dan perhatian mahasiswa terhadap kualitas data, asumsi, dan dokumentasi dapat meningkat.

Kedua, model mengembangkan cara berpikir matematis lintas metode. Analisis statistik membantu memahami pola data tetapi tidak selalu menjelaskan mekanisme perubahan sistem; model dinamis merepresentasikan perubahan terhadap waktu tetapi memerlukan data dan asumsi yang sesuai; analisis spasial memperlihatkan pola lokasi; optimasi mengevaluasi pilihan tindakan di bawah batasan tertentu; AI menghasilkan prediksi tetapi memerlukan evaluasi generalisasi; dan DSS mengintegrasikan semuanya untuk mendukung pilihan tindakan. Hubungan ini memberi konteks bagi mahasiswa untuk memahami bahwa setiap metode memiliki kekuatan, keterbatasan, dan syarat penerapan yang berbeda.

Ketiga, model memosisikan mitra sebagai bagian dari proses pembelajaran. Mitra tidak hanya menerima hasil pada akhir kegiatan, tetapi berpotensi terlibat sejak identifikasi masalah, penentuan kebutuhan data, interpretasi hasil, dan evaluasi prototipe, sehingga pembelajaran lebih dekat dengan kondisi penggunaan pengetahuan di luar kelas. Hubungan ini memerlukan pengelolaan ekspektasi: tidak semua persoalan mitra dapat diselesaikan dalam satu semester, dan tidak semua produk mahasiswa siap digunakan secara operasional.

a. Integrasi Proyek versus Penambahan Proyek

Penambahan jumlah proyek tidak dengan sendirinya menghasilkan inovasi pembelajaran. Delapan proyek tetap menjadi delapan tugas terpisah apabila tidak ada kesamaan pertanyaan, kesepakatan data, hubungan luaran, atau mekanisme validasi. Integrasi karena itu perlu dibuktikan melalui dokumen desain yang menunjukkan alur data, hubungan antarmetode, keterkaitan dengan CPL, dan penggunaan hasil oleh proyek berikutnya. Dalam ICM-PjBL, integrasi dapat diperiksa melalui pertanyaan berikut: apakah data yang dikumpulkan pada tahap awal benar-benar digunakan proyek berikutnya; apakah indikator mutu yang dianalisis memiliki definisi konsisten; apakah model prediksi menggunakan prosedur validasi yang memadai; apakah hasil optimasi mencerminkan batasan yang relevan; dan apakah DSS membedakan data observasi dari keluaran model. Pertanyaan-pertanyaan ini mengubah integrasi dari klaim konseptual menjadi karakteristik desain yang dapat diperiksa, dan memberi dasar bagi penelitian lanjutan yang menguji apakah integrasi proyek menghasilkan kompetensi yang berbeda dari PjBL yang tidak terintegrasi.

b. Kesesuaian dengan Arah Penelitian PjBL dan *Living Laboratory*

Tinjauan Susanti *et al*. (2023) memberikan konteks mengenai perkembangan penelitian PjBL dalam pendidikan matematika, sedangkan Zhang dan Ma (2023) menyediakan bukti sintesis mengenai dampak PjBL pada hasil pembelajaran. Kedua sumber mendukung relevansi penelitian PjBL, tetapi tidak membuktikan efektivitas rancangan ICM-PjBL; kontribusi artikel ini berada pada tahap pengembangan arsitektur model yang dapat diuji. Tercanli dan Jongbloed (2022) membahas potensi dan kendala *living lab* di perguruan tinggi. Penggunaan ekosistem kopi sebagai konteks pembelajaran konsisten dengan gagasan kolaborasi dan pemecahan masalah bersama,

tetapi keberhasilannya bergantung pada kesiapan mitra, kesinambungan akses data, sumber daya dosen, dan kemampuan mengelola proyek lintas mata kuliah. Konsep *living laboratory* harus diwujudkan melalui mekanisme kolaborasi yang nyata, bukan hanya penamaan lokasi pembelajaran. Perbandingan lebih terperinci dengan model PjBL terintegrasi pada bidang matematika, pertanian, dan rantai nilai komoditas masih diperlukan untuk memperkuat klaim kebaruan; artikel ini tidak menyimpulkan bahwa belum ada model serupa, melainkan mengusulkan struktur khusus yang menghubungkan delapan jenis proyek dalam konteks kopi beserta karakteristik yang dapat digunakan untuk mengujinya.

c. Tantangan Implementasi

Beberapa tantangan perlu diantisipasi sebelum model diterapkan secara luas. Pertama, ketersediaan dan konsistensi data: proyek statistik, model pertumbuhan, pengukuran mutu, dan AI membutuhkan jenis data berbeda, dan data yang memadai untuk visualisasi belum tentu cukup untuk model prediktif, sehingga pengumpulan data direncanakan sejak awal mengikuti jadwal biologis dan operasional kebun. Kedua, beban koordinasi lintas mata kuliah: dosen perlu menyepakati jadwal, format data, standar dokumentasi, rubrik, dan tanggung jawab supervisi agar mahasiswa tidak menerima instruksi yang bertentangan atau mengulang pengumpulan data yang sama. Ketiga, ketepatan metode dan risiko penggunaan model secara berlebihan: tidak semua persoalan memerlukan AI atau model kompleks, dan metode sederhana dapat lebih tepat ketika data terbatas. Keempat, kesesuaian produk dengan kebutuhan pengguna: kualitas visual tidak menggantikan ketepatan matematis, kemudahan pemeliharaan, keamanan data, dan kegunaan praktis. Kelima, keberlanjutan setelah mata kuliah berakhir: basis data memerlukan pembaruan, model perlu dievaluasi ulang ketika kondisi berubah, dan prototipe memerlukan pengelola, sehingga peran mitra, hak akses, dokumentasi, dan rencana pemeliharaan dipertimbangkan sejak tahap desain. Tantangan-tantangan ini tidak membatalkan potensi model, tetapi menunjukkan bahwa integrasi PjBL memerlukan dukungan kelembagaan dan tata kelola yang terencana.

d. Keterkaitan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs)

Model ICM-PjBL berkaitan dengan beberapa tujuan dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs), dengan tingkat kepastian yang berbeda. Keterkaitan paling langsung terdapat pada SDG 4 (pendidikan berkualitas), karena model ini dirancang untuk membangun kompetensi matematis, analisis data, dan pemecahan masalah mahasiswa melalui pembelajaran berbasis masalah nyata. Keterkaitan berikutnya terdapat pada SDG 9 (industri, inovasi, dan infrastruktur), karena proyek-proyek model menghasilkan perangkat berbasis data, seperti basis data, peta, model prediksi, dan prototipe DSS, yang dapat menjadi dasar inovasi bagi mitra. Selain itu, pelibatan mitra, dosen, dan mahasiswa dalam satu *living laboratory* sejalan dengan SDG 17 (kemitraan untuk mencapai tujuan). Kontribusi pada SDG 8 (pekerjaan layak dan pertumbuhan ekonomi) dan SDG 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab) bersifat lebih tidak langsung dan hanya mungkin terwujud apabila produk mahasiswa benar-benar digunakan mitra untuk meningkatkan pengelolaan kebun, mutu, atau distribusi. Pada tahap perancangan ini, seluruh keterkaitan tersebut merupakan kontribusi potensial yang belum dibuktikan oleh data; indikator capaian SDGs perlu ditetapkan dan diukur

pada penelitian lanjutan.

9. Implikasi bagi Penelitian Selanjutnya

Tahap lanjutan yang disarankan adalah pengujian kelayakan model melalui penilaian ahli pendidikan matematika, dosen mata kuliah terkait, ahli bidang kopi, dan calon pengguna dari mitra. Hasil validasi digunakan untuk memperbaiki keterkaitan antarproyek, kejelasan CPL, kebutuhan sumber daya, dan kelayakan jadwal. Setelah revisi, model dapat diujicobakan pada satu atau dua proyek terlebih dahulu sebelum diterapkan pada keseluruhan rangkaian.

Penelitian berikutnya dapat diarahkan pada tiga pertanyaan: (1) apakah model dapat dilaksanakan sesuai rancangan dengan sumber daya yang tersedia; (2) apakah mahasiswa menunjukkan peningkatan pada kompetensi yang ditargetkan, seperti pemodelan matematis, analisis data, pemecahan masalah, dan komunikasi ilmiah; dan (3) apakah produk yang dihasilkan dinilai relevan dan dapat digunakan mitra dalam konteks yang disepakati. Indikator ditetapkan sebelum pengumpulan data, dan data dapat meliputi rubrik penilaian laporan, hasil tugas individual, kualitas prototipe, catatan observasi pembelajaran, wawancara mahasiswa dan mitra, serta dokumentasi revisi proyek. Jika tujuan mencakup pengujian efektivitas, analisis kuantitatif dan kualitatif dapat digunakan secara saling melengkapi. Dengan cara ini klaim kontribusi model dapat diperkuat bertahap: dari kelayakan konseptual, kelayakan implementasi, hingga pengujian hasil pembelajaran dan relevansi produk.

KESIMPULAN DAN SARAN

Artikel ini merumuskan model *Integrated Coffee-Based Mathematical Project-Based Learning* (ICM-PjBL) yang menghubungkan delapan proyek matematika terapan dalam ekosistem kopi Tawangmangu sebagai *living laboratory*. Basis data menjadi fondasi; analisis statistik, pemodelan pertumbuhan, pengukuran mutu, dan GIS menjadi jalur analisis; optimasi dan kecerdasan buatan menjadi jalur evaluasi alternatif dan prediksi; sedangkan DSS menjadi sarana integrasi informasi untuk mendukung keputusan. Artikel ini juga memetakan proyek terhadap konsep matematika, mata kuliah, dan mekanisme pembelajaran, serta menyusun kerangka evaluasi yang mencakup kelayakan desain, kompetensi matematis, kualitas produk, dan relevansi bagi mitra.

Kontribusi utama model terletak pada integrasi vertikal dan horizontal antarproyek, yang menuntut hubungan nyata antara pertanyaan, data, asumsi, dan luaran. Keberhasilan model tidak cukup diukur dari jumlah proyek atau tersedianya prototipe, tetapi dari konsistensi data, ketepatan pemilihan dan validasi metode, ketercapaian kompetensi, dan relevansi produk bagi mitra. Secara konseptual, model ini berpotensi mendukung SDG 4 (pendidikan berkualitas), SDG 9 (industri, inovasi, dan infrastruktur), dan SDG 17 (kemitraan untuk mencapai tujuan), sedangkan kontribusi pada SDG 8 dan SDG 12 bergantung pada pemanfaatan produk mahasiswa oleh mitra dan perlu dibuktikan melalui penelitian lanjutan.

Artikel ini memiliki keterbatasan. Hasil yang dilaporkan merupakan rancangan konseptual tanpa data implementasi, sehingga klaim mengenai peningkatan kompetensi mahasiswa, efektivitas pembelajaran, atau dampak ekonomi bagi kelompok tani belum dapat ditarik. Generalisasi ke institusi lain juga perlu hati-hati karena ketersediaan data, struktur kurikulum, dan kesiapan mitra dapat berbeda. Penelitian lanjutan disarankan melalui siklus *Design-Based Research* yang mencakup validasi ahli, uji coba terbatas pada beberapa proyek,

dan evaluasi dengan indikator yang ditetapkan sebelumnya, termasuk perbandingan dengan PjBL yang tidak terintegrasi.

PENGAKUAN/ACKNOWLEDGEMENTS

Terimakasih kepada Universitas Sebelas Maret (UNS) yang telah mendanai kegiatan ini melalui skema Penelitian HIBAH PENGABDIAN INTERNASIONAL MANDATORY (PIM-UNS) Tahun Anggaran 2026.

DAFTAR PUSTAKA

Asmi, A.W., Rahmat, F. and Adnan, M. (2022). The Effect of Project-Based Learning on Students' Mathematics Learning in Indonesia: A Systematic Literature Review. *International Journal of Education, Information Technology, and Others*, 5(4), pp. 311–333. https://doi.org/10.5281/zenodo.7106324.

Diana, N., Yohannes and Sukma, Y. (2021). The Effectiveness of Implementing Project-Based Learning (PjBL) Model in STEM Education: A Literature Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1882, 012146. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1882/1/012146.

Hagvall Svensson, O., Adawi, T. and Johansson, A. (2022). Authenticity Work in Higher Education Learning Environments: A Double-Edged Sword? *Higher Education*, 84, pp. 67–84. https://doi.org/10.1007/s10734-021-00753-0.

Isaac, G., Romero, M. and Barma, S. (2022). Understanding Co-Creativity in Real-World Problem Solving in Project-Based Learning in Higher Education. *International Review of CRIRES: Innovating in the Tradition of Vygotsky*, 6(3), pp. 86–99. https://doi.org/10.51657/ric.v6i2.51585.

Konstantinidis, E.I., Petsani, D. and Bamidis, P.D. (2021). Teaching University Students Co-Creation and Living Lab Methodologies through Experiential Learning Activities and Preparing Them for RRI. *Health Informatics Journal*. https://doi.org/10.1177/1460458221991204.

Radović, S., Hummel, H.G.K. and Vermeulen, M. (2022). Design-Based Research with mARC ID Model: Designing Experiential Learning Environments. *Learning Environments Research*, 25, pp. 803–822. https://doi.org/10.1007/s10984-021-09394-7.

Susanti, M. *et al.* (2023). Project-Based Learning in Mathematics Education: A Bibliometric Study on 2014–2023 Scopus Database. *Jurnal Riset Pendidikan Matematika*, 10(1), pp. 32–53. https://doi.org/10.21831/jrpm.v10i1.60531.

Tercanli, H. and Jongbloed, B. (2022). A Systematic Review of the Literature on Living Labs in Higher Education Institutions: Potentials and Constraints. *Sustainability*, 14(19), 12234. https://doi.org/10.3390/su141912234.

Tinoca, L. *et al.* (2022). Design-Based Research in the Educational Field: A Systematic Literature Review. *Education Sciences*, 12(6), 410. https://doi.org/10.3390/educsci12060410.

Zhang, L. and Ma, Y. (2023). A Study of the Impact of Project-Based Learning on Student Learning Effects: A Meta-Analysis Study. *Frontiers in Psychology*, 14. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1202728.