

PENGEMBANGAN MODUL BERBASIS IOT DENGAN MODEL PROJECT BASED LEARNING UNTUK MENINGKATKAN KOLABORASI MAHASISWA

Abdul Kholil^{1*}, Wawan Kurniawan², Dian Pertiwi Rasmi³

^{1,2,3} Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jambi, Indonesia
Jl. Jambi - Muara Bulian No.KM. 15, Mendalo Darat, Kec. Jambi Luar Kota, Kabupaten Muaro Jambi, Jambi 36361.

**Corresponding Author: kholilabdul13845@gmail.com*

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) pada materi kualitas udara serta mengkaji potensi modul dalam meningkatkan keterampilan kolaborasi mahasiswa. Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) dengan model ADDIE yang dibatasi pada tahap analisis, desain, dan pengembangan. Subjek penelitian terdiri atas 10 mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jambi. Instrumen penelitian meliputi lembar validasi ahli materi dan ahli media, angket persepsi mahasiswa, serta lembar observasi keterampilan kolaborasi. Keterampilan kolaborasi diukur melalui indikator kontribusi dalam diskusi, tanggung jawab terhadap tugas, kemampuan memecahkan masalah, dan sikap kolaboratif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modul yang dikembangkan berada pada kategori sangat baik berdasarkan validasi ahli materi sebesar 88,5% dan ahli media sebesar 91,2%. Hasil observasi keterampilan kolaborasi menunjukkan rata-rata capaian sebesar 85,50% dengan kategori tinggi. Rata-rata tiap indikator meliputi kontribusi dalam diskusi sebesar 85%, tanggung jawab terhadap tugas sebesar 85%, kemampuan memecahkan masalah sebesar 86,25%, dan sikap kolaboratif sebesar 85,83%. Dengan demikian, modul pembelajaran berbasis IoT yang dikembangkan layak digunakan dalam pembelajaran Fisika Lingkungan dan berpotensi mendukung pengembangan keterampilan kolaborasi mahasiswa melalui pembelajaran berbasis proyek dan pemanfaatan data real-time.

Kata Kunci: *Internet of Things, Project Based Learning, Kolaborasi, Modul, Kualitas Udara*

ABSTRACT

This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based learning module using the Project-Based Learning (PjBL) approach on air quality topics and to examine its potential in improving students' collaboration skills. The study employed a Research and Development (R&D) method using the ADDIE model, limited to the analysis, design, and development stages. The research subjects consisted of 10 students from the Physics Education Study

Program at Jambi University. The research instruments included validation sheets from subject matter experts and media experts, student perception questionnaires, and collaboration skills observation sheets. Collaboration skills were assessed through indicators of contribution to discussions, responsibility for assigned tasks, problem-solving ability, and collaborative attitude. The results showed that the developed module was categorized as excellent, with a material expert validation score of 88.5% and a media expert validation score of 91.2%. The observation results of collaboration skills indicated an average achievement of 85.50%, which falls into the high category. The average score for each indicator was 85% for contribution to discussions, 85% for responsibility for tasks, 86.25% for problem-solving ability, and 85.83% for collaborative attitude. Therefore, the developed IoT-based learning module is suitable for use in Environmental Physics learning and has the potential to support the development of students' collaboration skills through project-based learning and the utilization of real-time data.

Keywords: *Internet of Things, Project Based Learning, Collaboration, Module, Air Quality*

PENDAHULUAN

Pembelajaran Fisika Lingkungan di perguruan tinggi memiliki peran strategis dalam membekali mahasiswa dengan pemahaman konseptual serta kemampuan menganalisis fenomena lingkungan secara ilmiah dan berbasis data (Henukh et al., 2024). Fisika lingkungan tidak hanya membahas aspek teoritis seperti suhu, kelembapan, radiasi, dan kualitas udara, tetapi juga menuntut keterampilan mahasiswa dalam menginterpretasikan data empiris yang berkaitan dengan isu-isu global seperti pencemaran udara dan perubahan iklim. Oleh karena itu, pembelajaran pada bidang ini idealnya dirancang secara kontekstual, interaktif, dan berbasis pengalaman langsung agar mahasiswa mampu mengaitkan konsep dengan realitas lingkungan (Shahid et al., 2025). Namun, pada kenyataannya proses pembelajaran di perguruan tinggi masih didominasi oleh metode konvensional seperti ceramah dan penugasan individu. Kondisi ini menyebabkan mahasiswa cenderung pasif dan kurang terlibat secara aktif dalam proses pembelajaran. Akibatnya, mahasiswa mengalami kesulitan dalam mengaitkan konsep teoritis dengan fenomena nyata di lapangan serta kurang mampu mengembangkan keterampilan abad ke-21, khususnya kemampuan kolaborasi. Hal ini sejalan dengan temuan (Sun et al., 2023) yang menyatakan bahwa pembelajaran tradisional cenderung kurang efektif dalam meningkatkan keterampilan kolaboratif dan pemecahan masalah mahasiswa.

Berdasarkan hasil observasi di Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jambi, ditemukan beberapa permasalahan yang menghambat optimalisasi pembelajaran Fisika Lingkungan. Permasalahan tersebut meliputi keterbatasan alat praktikum, kurangnya media pembelajaran berbasis teknologi, serta rendahnya keterampilan kolaborasi mahasiswa. Keterbatasan alat seperti sensor kualitas udara dan perangkat monitoring lingkungan menyebabkan kegiatan praktikum tidak berjalan secara maksimal. Akibatnya, mahasiswa lebih sering menerima pembelajaran secara teoritis tanpa pengalaman langsung dalam pengambilan data lingkungan. Kondisi ini berdampak pada rendahnya kemampuan mahasiswa dalam melakukan analisis data dan bekerja secara kolaboratif dalam kelompok. Selain itu, mahasiswa cenderung bekerja secara individual dan hanya membagi tugas tanpa melakukan diskusi mendalam dalam kelompok. Kolaborasi yang terjadi belum

mencerminkan proses kerja sama yang sesungguhnya, seperti pertukaran ide, diskusi kritis, dan pengambilan keputusan bersama. Padahal, keterampilan kolaborasi merupakan salah satu kompetensi penting dalam pembelajaran abad ke-21 yang meliputi kemampuan komunikasi, kerja sama tim, tanggung jawab, dan penyelesaian masalah secara kolektif (Nugraha et al., 2023).

Seiring dengan perkembangan teknologi digital, Internet of Things (IoT) menjadi salah satu inovasi yang berpotensi besar dalam mendukung pembelajaran berbasis data nyata (Hermadiana et al., 2025). IoT merupakan konsep jaringan perangkat fisik yang dilengkapi dengan sensor dan konektivitas internet sehingga mampu mengumpulkan dan mentransmisikan data secara real-time (Si-mohammed et al., 2023). Dalam konteks pembelajaran Fisika Lingkungan, Internet of Things (IoT) memungkinkan mahasiswa melakukan pengamatan langsung terhadap berbagai parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kualitas udara menggunakan sensor seperti DHT11 dan MQ-135 (Muttaqin et al., 2024). Data yang diperoleh dari sensor tersebut tidak hanya bersifat statis, tetapi dapat diakses secara real-time melalui platform digital seperti dashboard monitoring berbasis web. Hal ini memberikan pengalaman belajar yang lebih kontekstual, karena mahasiswa dapat mengamati fenomena lingkungan secara langsung dan berkelanjutan. Dengan demikian, pembelajaran tidak lagi terbatas pada konsep teoritis di dalam kelas, melainkan berkembang menjadi proses eksplorasi ilmiah berbasis data nyata yang terjadi di lingkungan sekitar.

Lebih lanjut, pemanfaatan IoT dalam pembelajaran mampu mengubah paradigma belajar dari teacher-centered menjadi student-centered learning (Muhammad Ilham Jaya Kesuma, Ilham Fatoni, 2025). Mahasiswa tidak lagi hanya menerima informasi dari dosen, tetapi aktif dalam mengumpulkan, mengolah, dan menginterpretasikan data lingkungan. Aktivitas ini mendorong mahasiswa untuk berpikir kritis, mengajukan pertanyaan, serta mengembangkan kemampuan analisis terhadap fenomena yang diamati. Selain itu, penggunaan teknologi IoT juga memberikan pengalaman belajar yang lebih interaktif dan menarik, karena mahasiswa dapat melihat hasil pengukuran secara langsung dalam bentuk grafik atau visualisasi data (Adha et al., 2024). Kondisi ini secara tidak langsung meningkatkan motivasi belajar mahasiswa serta memperkuat keterlibatan mereka dalam proses pembelajaran (Mahmubi, 2025).

Pemanfaatan sensor lingkungan dalam pembelajaran juga memberikan dampak positif terhadap peningkatan literasi sains mahasiswa (Riansyah et al., 2025). Mahasiswa tidak hanya memahami konsep secara teoritis, tetapi juga mampu mengaitkannya dengan data empiris yang diperoleh dari hasil pengukuran. Proses ini melatih mahasiswa untuk memahami hubungan antara teori dan praktik, serta mengembangkan keterampilan ilmiah seperti observasi, pengukuran, analisis data, dan penarikan kesimpulan. Dengan demikian, pembelajaran menjadi lebih bermakna karena mahasiswa terlibat langsung dalam proses ilmiah yang sesungguhnya. Namun demikian, penerapan teknologi IoT dalam pembelajaran tidak secara otomatis menjamin peningkatan kualitas pembelajaran jika tidak didukung oleh pendekatan pedagogis yang tepat (Entriza & Puspitasari, 2025). Penggunaan teknologi tanpa strategi pembelajaran yang jelas justru berpotensi menjadikan pembelajaran hanya berfokus pada aspek teknis, tanpa memberikan dampak signifikan terhadap pengembangan keterampilan mahasiswa (Ristiyanto et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan model

pembelajaran yang mampu mengintegrasikan teknologi dengan aktivitas belajar yang terstruktur dan bermakna.

Salah satu model pembelajaran yang relevan untuk mengakomodasi hal tersebut adalah Project Based Learning (PjBL) (Amsal Alhayat, Mukhidin, Tuti Utami, 2023). Model ini menekankan pembelajaran melalui proyek yang berangkat dari permasalahan nyata, sehingga mahasiswa didorong untuk aktif mencari solusi melalui proses investigasi, diskusi, dan kolaborasi. Dalam PjBL, mahasiswa bekerja dalam kelompok untuk merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi proyek yang berkaitan dengan konteks kehidupan nyata. Proses ini tidak hanya meningkatkan pemahaman konsep, tetapi juga mengembangkan keterampilan penting seperti komunikasi, kerja sama tim, manajemen waktu, serta pemecahan masalah (Ramadhan & Hindun, 2023).

Dalam konteks pembelajaran Fisika Lingkungan, integrasi antara IoT dan PjBL memberikan peluang besar untuk menciptakan pembelajaran yang inovatif, kontekstual, dan bermakna (Barokah & Kamal, 2025). Mahasiswa tidak hanya mempelajari konsep pencemaran udara secara teoritis, tetapi juga terlibat langsung dalam proyek monitoring kualitas udara menggunakan perangkat IoT. Melalui kegiatan ini, mahasiswa dapat mengumpulkan data lingkungan secara real-time, menganalisis pola dan tren data, serta mengaitkannya dengan konsep fisika yang telah dipelajari. Selain itu, mahasiswa juga dituntut untuk menyusun laporan ilmiah dan mempresentasikan hasil proyek, sehingga melatih kemampuan komunikasi ilmiah mereka.

Proses pembelajaran berbasis proyek ini secara alami mendorong terjadinya interaksi dan kolaborasi antar mahasiswa (Pratami, 2024). Dalam kelompok, mahasiswa harus berbagi tugas, berdiskusi, bertukar ide, serta mengambil keputusan secara bersama-sama. Interaksi ini tidak hanya meningkatkan kualitas hasil belajar, tetapi juga mengembangkan keterampilan sosial dan kemampuan bekerja dalam tim. Kolaborasi yang terbentuk dalam proses ini menjadi lebih bermakna karena didasarkan pada kebutuhan untuk menyelesaikan proyek secara bersama, bukan sekadar pembagian tugas. Meskipun demikian, berdasarkan kajian terhadap berbagai penelitian sebelumnya, masih terdapat kesenjangan dalam pengembangan perangkat pembelajaran yang mengintegrasikan teknologi IoT dengan model PjBL secara sistematis, khususnya dalam konteks pembelajaran Fisika Lingkungan. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengembangan teknologi IoT sebagai alat atau media pembelajaran, tanpa mengintegrasikannya secara optimal dalam desain pembelajaran yang berbasis proyek. Di sisi lain, penelitian tentang PjBL umumnya belum memanfaatkan teknologi IoT sebagai sumber data nyata yang dapat memperkaya proses pembelajaran. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengkaji peningkatan keterampilan kolaborasi mahasiswa melalui penggunaan modul berbasis IoT juga masih terbatas. Padahal, keterampilan kolaborasi merupakan salah satu kompetensi penting yang harus dimiliki mahasiswa dalam menghadapi tantangan abad ke-21. Kurangnya integrasi antara teknologi, model pembelajaran, dan pengembangan keterampilan kolaborasi menunjukkan adanya kebutuhan untuk mengembangkan perangkat pembelajaran yang mampu mengakomodasi ketiga aspek tersebut secara terpadu.

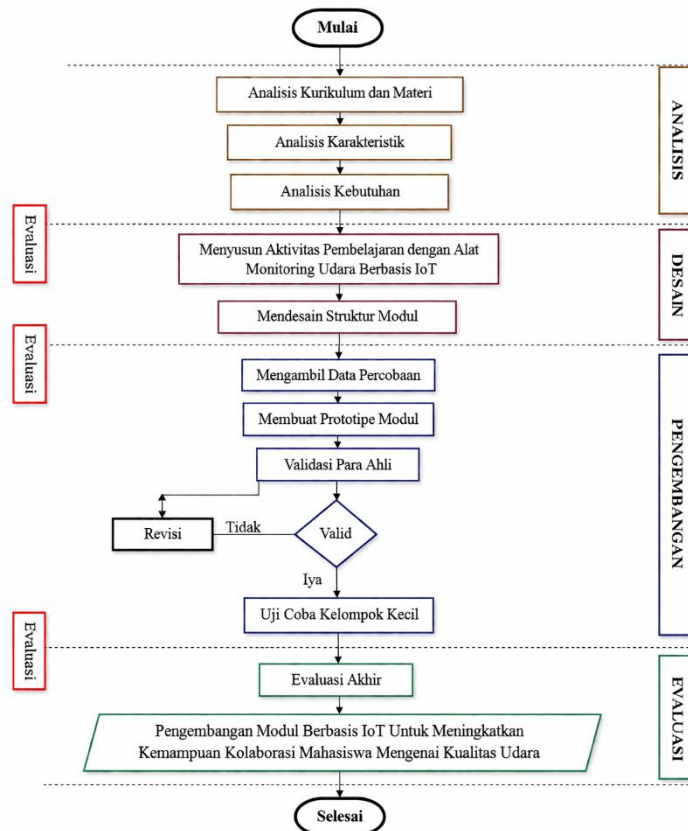
Berdasarkan permasalahan dan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) pada materi kualitas udara dalam mata kuliah

Fisika Lingkungan yang memenuhi kriteria valid dan layak digunakan dalam pembelajaran; serta (2) mengkaji potensi penggunaan modul yang dikembangkan dalam mendukung keterampilan kolaborasi mahasiswa. Modul yang dikembangkan dirancang untuk mengintegrasikan penggunaan sensor IoT dengan aktivitas pembelajaran berbasis proyek sehingga mahasiswa dapat belajar secara aktif, kontekstual, dan kolaboratif. Melalui kegiatan perencanaan proyek, pengumpulan data, analisis hasil pengukuran, diskusi kelompok, dan presentasi hasil proyek, mahasiswa diharapkan dapat mengembangkan keterampilan kolaborasi yang meliputi kemampuan bekerja sama, berkomunikasi, bertanggung jawab terhadap tugas kelompok, dan memecahkan masalah secara bersama. Selain itu, modul ini diharapkan dapat menjadi alternatif media pembelajaran inovatif yang mendukung pembelajaran berbasis teknologi sesuai dengan tuntutan pendidikan abad ke-21.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian pengembangan (Research and Development/R&D) yang bertujuan untuk menghasilkan produk berupa modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) pada materi kualitas udara dalam mata kuliah Fisika Lingkungan. Model pengembangan yang digunakan adalah model ADDIE yang terdiri dari lima tahap, yaitu Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation. Penelitian dilaksanakan di Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jambi. Waktu pelaksanaan penelitian dilakukan pada semester genap tahun akademik 2024/2025. Subjek penelitian terdiri atas 10 mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jambi yang sedang menempuh mata kuliah Fisika Lingkungan dan terlibat dalam uji coba kelompok kecil terhadap modul yang dikembangkan. Objek penelitian adalah modul pembelajaran berbasis IoT yang dikembangkan serta keterampilan kolaborasi mahasiswa. Penelitian ini dilaksanakan hingga tahap Development karena difokuskan pada proses pengembangan serta pengujian kelayakan modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT). Tahap Analysis mencakup kegiatan analisis kebutuhan pembelajaran, karakteristik mahasiswa, serta perumusan tujuan pembelajaran pada mata kuliah Fisika Lingkungan. Tahap Design meliputi perancangan modul pembelajaran berbasis IoT dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL), penyusunan instrumen penelitian, serta penentuan format modul dalam bentuk digital yang terintegrasi dengan sistem monitoring kualitas udara. Selanjutnya, tahap Development mencakup proses pembuatan modul, pengembangan sistem IoT menggunakan sensor DHT11 dan MQ-135, validasi oleh ahli materi dan ahli media, serta revisi produk berdasarkan masukan validator. Selain itu, dilakukan uji coba terbatas kepada mahasiswa untuk mengetahui kelayakan modul serta respon mahasiswa terhadap penggunaan modul dalam meningkatkan keterampilan kolaborasi.

Tahapan pengembangan modul pembelajaran berbasis IoT untuk meningkatkan kemampuan kolaborasi mahasiswa pada materi kualitas udara menggunakan model ADDIE digambarkan sebagai berikut:



Gambar 1. Tahap penelitian pengembangan ADDIE

Pengukuran keterampilan kolaborasi mahasiswa dilakukan melalui lembar observasi keterampilan kolaborasi yang digunakan selama pelaksanaan pembelajaran berbasis proyek. Indikator keterampilan kolaborasi yang diamati meliputi: (1) kontribusi dalam diskusi kelompok, (2) tanggung jawab terhadap tugas kelompok, (3) kemampuan memecahkan masalah secara bersama, dan (4) sikap kolaboratif dalam bekerja sama dengan anggota kelompok. Observasi dilakukan oleh observer selama kegiatan pembelajaran dan proyek berlangsung. Setiap indikator dinilai menggunakan skala penilaian yang telah disusun sesuai dengan kriteria keterampilan kolaborasi. Data hasil observasi kemudian dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan menghitung persentase capaian setiap indikator menggunakan rumus persentase. Selanjutnya, hasil persentase diinterpretasikan berdasarkan kategori penilaian untuk menentukan tingkat keterampilan kolaborasi mahasiswa selama penggunaan modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL). Persentase keterampilan kolaborasi dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Persentase} = \frac{\text{Skor yang diperoleh}}{\text{Skor maksimum}} \times 100\%$$

Hasil persentase kemudian dikategorikan menjadi sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi sesuai dengan kriteria yang telah ditetapkan dalam penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan pengembangan modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) disajikan secara sistematis sesuai dengan tahapan model ADDIE yang meliputi tahap analysis, design, dan development.

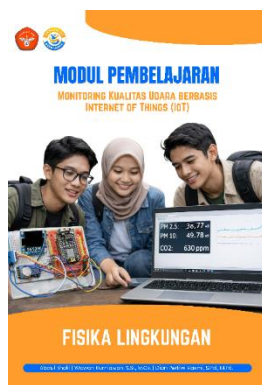
a. Analysis (Analisis)

Tahap analisis menunjukkan bahwa pembelajaran Fisika Lingkungan masih didominasi metode konvensional dan belum memanfaatkan teknologi secara optimal. Keterbatasan alat praktikum menyebabkan mahasiswa kurang terlibat dalam kegiatan eksperimen sehingga kesulitan memahami konsep kualitas udara secara kontekstual.

Selain itu, keterampilan kolaborasi mahasiswa masih rendah karena pembelajaran lebih bersifat individual. Mahasiswa belum terbiasa berdiskusi secara aktif maupun bekerja sama dalam menyelesaikan masalah berbasis data.

b. Design (Perancangan)

Tahap desain bertujuan untuk merancang modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan model Project Based Learning (PjBL) pada materi kualitas udara. Perancangan dilakukan secara sistematis berdasarkan hasil analisis kebutuhan, karakteristik mahasiswa, serta tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan. Pada tahap ini, peneliti menyusun struktur modul yang mencakup identitas modul, capaian pembelajaran, materi fisika lingkungan, panduan penggunaan sistem IoT, serta aktivitas pembelajaran berbasis proyek.



Gambar 1. Cover Modul

Modul dirancang untuk mengintegrasikan kegiatan eksperimen menggunakan sensor DHT11 dan MQ-135 sehingga mahasiswa dapat melakukan pengamatan kualitas udara secara real-time dan menganalisis data secara kolaboratif. Selain itu, disusun instrumen penelitian berupa lembar validasi ahli, angket persepsi mahasiswa, serta instrumen keterampilan kolaborasi. Instrumen ini dikembangkan berdasarkan indikator pembelajaran dan digunakan untuk menilai kelayakan modul serta respon mahasiswa.



Gambar 2. Modul Cetak

Perancangan pembelajaran dalam modul menggunakan model Project Based Learning (PjBL) yang meliputi tahapan orientasi masalah, perumusan ide proyek, perencanaan aktivitas, pelaksanaan proyek, analisis data, presentasi hasil, serta refleksi. Melalui tahapan ini, mahasiswa diarahkan untuk merancang dan melakukan proyek monitoring kualitas udara berbasis IoT secara berkelompok.

Tabel 1. Rancangan Struktur dan Isi Modul

Struktur Modul	Isi Modul
Identitas modul	Memuat informasi mengenai judul modul yaitu <i>Modul Pembelajaran Fisika Lingkungan Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT)</i> , nama penulis, dosen pembimbing, institusi, serta tahun penyusunan modul.
Kata pengantar	Berisi penjelasan singkat mengenai tujuan penyusunan modul, latar belakang pengembangan modul, serta harapan penulis agar modul dapat membantu mahasiswa memahami konsep fisika lingkungan melalui penerapan teknologi IoT.
Daftar isi, daftar gambar, dan daftar tabel	Menyajikan daftar isi yang memuat seluruh bagian modul secara sistematis serta dilengkapi dengan daftar gambar dan daftar tabel untuk memudahkan pembaca dalam menemukan informasi yang diperlukan.
Capaian pembelajaran	Berisi capaian pembelajaran yang diharapkan setelah mahasiswa mempelajari modul, meliputi pemahaman konsep fisika lingkungan, kemampuan analisis data lingkungan, keterampilan penggunaan teknologi IoT, kemampuan kolaborasi ilmiah, serta sikap ilmiah dan kepedulian terhadap lingkungan.
Sistem IoT dalam pemantauan udara	Materi pengantar mengenai teknologi Internet of Things yang digunakan dalam pemantauan kualitas udara. Bagian ini terdiri dari: • Konsep dasar IoT • Pengenalan perangkat utama • Instalasi dan persiapan sistem • Pemrograman dasar NodeMCU V3 menggunakan Arduino IDE • Penggunaan sensor DHT11 dan MQ-135 • Monitoring kualitas udara menggunakan aplikasi Blynk.
Konsep fisika lingkungan	Materi pembelajaran yang mengkaji konsep fisika yang berkaitan dengan fenomena lingkungan. Bagian ini meliputi:

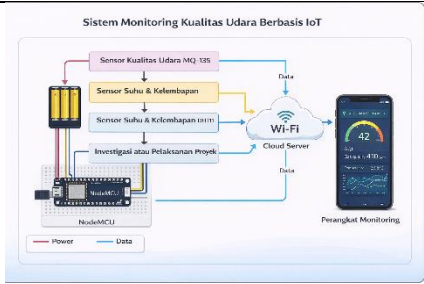
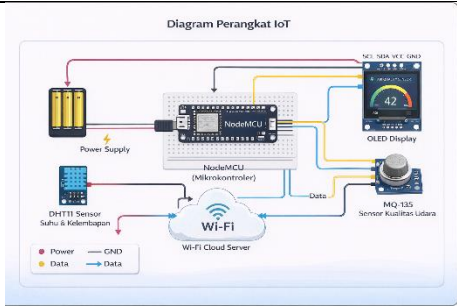
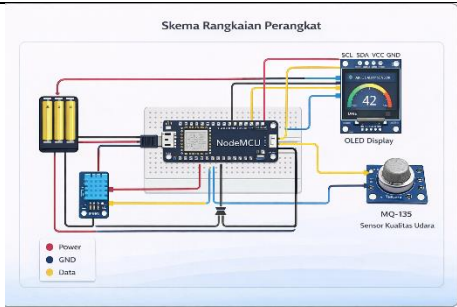
	• Tujuan pembelajaran • Orientasi masalah • Perancangan dan perencanaan percobaan • Pelaksanaan percobaan dan pengumpulan data • Analisis dan interpretasi data • Presentasi hasil percobaan • Refleksi dan evaluasi • Uraian materi pembelajaran • Latihan soal.
Pencemaran udara	Bagian ini membahas konsep pencemaran udara serta penerapan proyek pemantauan kualitas udara berbasis IoT. Struktur pembelajaran pada bagian ini meliputi: • Tujuan pembelajaran • Orientasi masalah • Perumusan ide dan tujuan proyek • Penyusunan rencana aktivitas • Investigasi mandiri • Analisis dan interpretasi data • Presentasi dan evaluasi • Uraian materi pembelajaran • Latihan soal.
Analisis parameter fisika	Bagian ini berfokus pada analisis parameter fisika yang berkaitan dengan kualitas udara berdasarkan data hasil pengukuran sensor. Kegiatan pembelajaran meliputi: • Tujuan pembelajaran • Orientasi masalah • Perumusan ide dan tujuan analisis • Penyusunan rencana aktivitas • Pengumpulan dan analisis data • Interpretasi dan diskusi hasil • Presentasi dan evaluasi • Uraian materi pembelajaran • Latihan soal.
Simpulan	Berisi rangkuman keseluruhan materi dan kegiatan pembelajaran dalam modul serta manfaat penggunaan teknologi IoT dalam pembelajaran fisika lingkungan.
Referensi	Memuat daftar pustaka yang digunakan sebagai sumber dalam penyusunan modul, baik berupa buku, jurnal ilmiah, maupun sumber ilmiah lainnya.

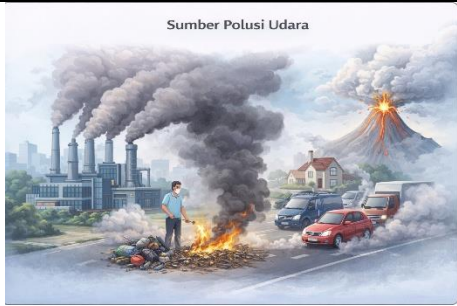
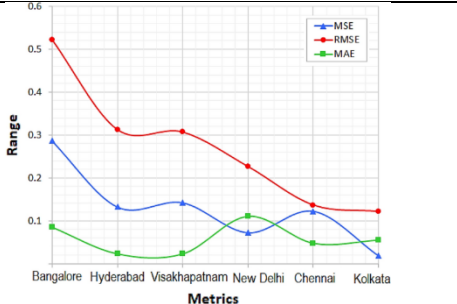
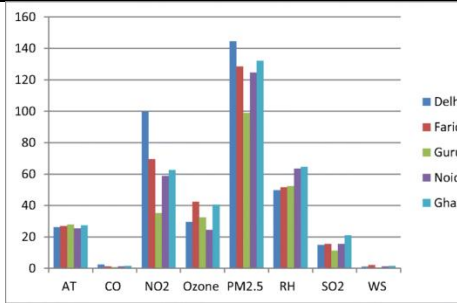
Model pembelajaran yang digunakan dalam pengembangan modul pembelajaran Fisika Lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) adalah *Project Based Learning* (PjBL). Model ini dipilih karena mampu memberikan pengalaman belajar yang lebih kontekstual dan

aplikatif melalui kegiatan proyek yang berkaitan dengan permasalahan nyata di lingkungan. Dalam modul ini, proyek yang dilakukan mahasiswa berkaitan dengan perancangan dan penerapan sistem monitoring kualitas udara berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan perangkat sensor dan mikrokontroler.

Berikut ini merupakan tabel rancangan strategi pembelajaran berbasis *Project Based Learning* pada modul yang dikembangkan :

Tabel 2. Rancangan Strategi Pembelajaran Berbasis *Project Based Learning*

Tujuan Percobaan		
Strategi umum : • Mahasiswa dapat memahami permasalahan kualitas udara di lingkungan sekitar. • Mahasiswa dapat mengidentifikasi parameter fisika yang mempengaruhi kualitas udara. • Mahasiswa dapat merancang sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT. • Mahasiswa dapat melakukan pengumpulan data menggunakan sensor DHT11 dan MQ-135. • Mahasiswa dapat menganalisis data hasil pengukuran kualitas udara. • Mahasiswa dapat menarik kesimpulan mengenai kondisi udara berdasarkan data yang diperoleh		
Tujuan Percobaan	Materi	Gambar Masalah
Sistem IoT dalam Pemantauan Udara		
Mahasiswa dapat memahami konsep dasar <i>Internet of Things</i> dalam pemantau lingkungan	Konsep dasar IoT	
Mahasiswa dapat mengenali perangkat utama yang digunakan dalam sistem IoT.	Pengenalan perangkat utama (NodeMCU, sensor DHT11, sensor MQ-135, OLED)	
Mahasiswa dapat melakukan instalasi dan persiapan sistem monitoring kualitas udara.	Instalasi dan persiapan sistem	
Tujuan Percobaan	Materi	Gambar Masalah

Pencemaran udara		
Mahasiswa dapat memahami konsep pencemaran udara.	Jenis pencemar udara	
Mahasiswa dapat mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi kualitas udara.	Dampak pencemaran udara	
Tujuan Percobaan	Materi	Gambar Masalah
Analisis Parameter Fisika		
Mahasiswa dapat melakukan pengukuran kualitas udara menggunakan sensor.	Pengumpulan data sensor	
Mahasiswa dapat menganalisis hubungan parameter fisika lingkungan dengan kualitas udara.	Analisis data kualitas udara	
Mahasiswa dapat menarik kesimpulan dari hasil analisis data lingkungan.	Interpretasi data lingkungan	

c. Development (Pengembangan)

1. Validasi Ahli

Hasil validasi modul oleh ahli materi dan ahli media disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Validasi Ahli

Aspek	Persentase (%)	Kategori
Ahli Materi	88,5%	Sangat Baik
Ahli Media	91,2%	Sangat Baik

Berdasarkan Tabel 3, modul memperoleh nilai rata-rata di atas 85% yang menunjukkan bahwa modul berada pada kategori sangat layak. Hal ini menunjukkan bahwa modul telah memenuhi aspek kelayakan isi, penyajian, dan tampilan.

2. Respon Mahasiswa

Hasil respon mahasiswa terhadap modul disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Respon Mahasiswa terhadap Modul

Aspek	Persentase (%)	Kategori
Kemudahan Penggunaan	85,0%	Sangat Baik
Kemenarikan Tampilan	87,5%	Sangat Baik
Kejelasan Materi	84,0%	Sangat Baik
Interaktivitas	86,0%	Sangat Baik

Berdasarkan Tabel 4, seluruh aspek memperoleh kategori sangat baik, yang menunjukkan bahwa modul mudah digunakan, menarik, dan mampu meningkatkan interaktivitas pembelajaran.

3. Keterampilan Kolaborasi Mahasiswa

Hasil keterampilan kolaborasi mahasiswa disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Keterampilan Kolaborasi Mahasiswa

Indikator	Persentase (%)	Kategori
Kerja Sama	90,0%	Sangat Baik
Komunikasi	88,0%	Sangat Baik
Komitmen	87,0%	Sangat Baik
Penyelesaian Masalah	89,0%	Sangat Baik

Berdasarkan Tabel 5, indikator kerja sama memiliki nilai tertinggi (90%), sedangkan indikator komitmen memiliki nilai terendah (87%), namun seluruh indikator tetap berada

pada kategori sangat baik. Efektivitas modul pembelajaran berbasis IoT dalam meningkatkan kemampuan kolaborasi mahasiswa diukur melalui observasi terhadap aktivitas kolaborasi mahasiswa selama proses pembelajaran. Observasi dilakukan pada uji coba kelompok kecil yang melibatkan 10 orang mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jambi. Indikator kemampuan kolaborasi yang diamati meliputi kontribusi dalam diskusi, tanggung jawab terhadap tugas, kemampuan memecahkan masalah, dan sikap kolaboratif



Gambar 3. Kegiatan uji coba kelompok kecil

PEMBAHASAN

a. Uji Validasi

Hasil **validasi ahli materi** menunjukkan adanya peningkatan kualitas modul secara bertahap setelah dilakukan revisi berdasarkan masukan validator. Pada tahap pertama, validasi oleh ahli materi pertama memperoleh persentase sebesar 52,86% dengan kategori kurang valid. Rendahnya nilai ini disebabkan oleh beberapa indikator yang masih belum terpenuhi, seperti kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran yang belum sepenuhnya sinkron, kelengkapan penjelasan konsep kualitas udara yang masih kurang, serta penyajian materi yang belum sistematis. Selain itu, penggunaan bahasa dalam modul dinilai masih perlu diperjelas agar lebih komunikatif dan mudah dipahami oleh mahasiswa.

Setelah dilakukan perbaikan, validasi kedua oleh ahli materi pertama menunjukkan peningkatan menjadi 76,43% dengan kategori cukup valid. Meskipun telah terjadi peningkatan signifikan, masih terdapat beberapa indikator yang perlu disempurnakan, seperti kelengkapan contoh penerapan monitoring kualitas udara berbasis IoT serta penyajian ilustrasi pendukung dalam modul. Perbaikan lanjutan kemudian dilakukan hingga diperoleh hasil akhir validasi dengan rata-rata 82,01% yang termasuk dalam kategori sangat valid. Rincian hasil akhir menunjukkan bahwa aspek kelayakan isi memperoleh 79,50% (cukup valid), aspek kelayakan penyajian 82,14% (sangat valid), dan aspek penilaian bahasa 84,38% (sangat valid).

Sementara itu, validasi oleh ahli materi kedua dilakukan dalam tiga tahap. Pada tahap pertama, diperoleh persentase 69,72% dengan kategori cukup valid. Beberapa indikator yang masih perlu diperbaiki meliputi kelengkapan penjelasan konsep monitoring kualitas

udara berbasis IoT, penyajian langkah-langkah penggunaan alat monitoring, serta konsistensi penggunaan istilah ilmiah dalam modul. Setelah dilakukan revisi, validasi kedua menunjukkan peningkatan menjadi 87,46% dengan kategori sangat valid. Hasil akhir validasi oleh ahli materi kedua menunjukkan bahwa aspek kelayakan isi memperoleh 85,71% (sangat valid), aspek kelayakan penyajian 88,46% (sangat valid), dan aspek penilaian bahasa 88,21% (sangat valid).

Peningkatan yang terjadi pada kedua ahli materi menunjukkan bahwa proses revisi berkelanjutan berdasarkan masukan validator sangat efektif dalam meningkatkan kualitas modul. Hal ini didukung oleh penelitian Ardi et al., (2024) yang menyatakan bahwa pengembangan modul pembelajaran yang dilakukan secara bertahap dengan melibatkan validasi ahli dapat menghasilkan produk yang lebih berkualitas dan sesuai dengan kebutuhan pembelajaran. Selain itu, penelitian Sultan et al., (2025) juga menegaskan bahwa modul yang telah melalui proses validasi oleh ahli materi memiliki tingkat kelayakan yang lebih tinggi karena telah disesuaikan dengan standar akademik dan kebutuhan peserta didik.

Penilaian **ahli media** dalam penelitian ini difokuskan pada aspek desain presentasi, kemudahan penggunaan, kemudahan akses, penggunaan berulang, serta pemenuhan standar media pembelajaran. Hasil validasi ahli media menunjukkan adanya peningkatan kualitas modul secara bertahap. Pada tahap pertama, validasi memperoleh persentase sebesar 47,85% dengan kategori kurang valid. Rendahnya nilai ini disebabkan oleh beberapa aspek yang masih memperoleh penilaian rendah, terutama pada aspek desain tampilan modul, konsistensi tata letak, serta kejelasan ilustrasi yang digunakan dalam penyajian materi. Selain itu, beberapa bagian modul dinilai masih kurang menarik secara visual sehingga perlu dilakukan perbaikan pada aspek grafis dan tata letak halaman.

Setelah dilakukan revisi, validasi kedua oleh ahli media menunjukkan peningkatan menjadi 71,42% dengan kategori cukup valid. Meskipun telah mengalami peningkatan, beberapa aspek masih memerlukan penyempurnaan, terutama pada konsistensi desain halaman, penataan gambar, serta kejelasan petunjuk penggunaan modul bagi mahasiswa. Perbaikan lanjutan kemudian dilakukan hingga diperoleh hasil akhir validasi dengan rata-rata 90,58% yang termasuk dalam kategori sangat valid. Rincian hasil akhir menunjukkan bahwa aspek desain presentasi memperoleh 88,21% (sangat valid), kemudahan penggunaan 90,14% (sangat valid), kemudahan akses 93,75% (sangat valid), penggunaan berulang 91,32% (sangat valid), dan memenuhi standar media pembelajaran 89,47% (sangat valid).

Peningkatan yang signifikan dari tahap pertama hingga tahap akhir menunjukkan bahwa modul pembelajaran berbasis IoT yang dikembangkan telah melalui proses perbaikan yang komprehensif, baik dari segi tampilan visual maupun aspek teknis media pembelajaran. Hal ini sejalan dengan penelitian Sari et al., (2024) yang menyatakan bahwa modul pembelajaran yang didesain dengan tampilan menarik dan mudah digunakan dapat meningkatkan keterlibatan dan motivasi belajar siswa. Selain itu, Reinita, (2024) juga menegaskan bahwa modul digital yang dikembangkan dengan memperhatikan aspek visual dan kemudahan akses memiliki tingkat kelayakan yang lebih tinggi dan lebih mudah diterima oleh pengguna.

Secara keseluruhan, hasil validasi ahli materi dan ahli media menunjukkan bahwa modul pembelajaran berbasis IoT pada materi pencemaran udara dalam mata kuliah Fisika Lingkungan telah memenuhi kriteria sangat valid. Hal ini mengindikasikan bahwa modul

layak digunakan sebagai bahan ajar dalam proses pembelajaran. Temuan ini sejalan dengan penelitian Pratama, (2022) yang mengembangkan modul pembelajaran IoT dengan model ADDIE, serta Teresa et al. (2021) yang mengembangkan modul elektronika berbasis PjBL dengan IoT, di mana kedua penelitian tersebut juga melaporkan bahwa modul yang dikembangkan telah memenuhi kriteria kelayakan berdasarkan validasi ahli.

b. Uji Persepsi Dosen dan Persepsi Mahasiswa

Persepsi dosen dilakukan untuk mengetahui tanggapan dosen terhadap kualitas modul pembelajaran berbasis IoT yang dikembangkan. Penilaian ini mencakup aspek kebahasaan, kesesuaian materi, kelengkapan komponen modul, serta kualitas tampilan dan penyajian media pembelajaran. Hasil penilaian menunjukkan rata-rata persentase sebesar 89,86% dengan kategori sangat baik. Pada indikator kemudahan bahasa yang digunakan dalam modul memperoleh nilai 88% dengan kriteria sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa bahasa yang digunakan dalam modul sudah komunikatif, mudah dipahami, dan tidak menimbulkan ambiguitas bagi pengguna. Penggunaan bahasa yang jelas dan sederhana memudahkan mahasiswa dalam memahami isi materi yang disajikan. Indikator kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran dan kesesuaian materi dengan tujuan pembelajaran masing-masing memperoleh nilai 92% dan 90% dengan kriteria sangat baik. Hal ini mengindikasikan bahwa materi dalam modul telah disusun secara sistematis dan mampu mendukung tercapainya tujuan pembelajaran yang telah ditetapkan.

Indikator kesesuaian contoh penerapan monitoring kualitas udara berbasis IoT memperoleh nilai tertinggi sebesar 93% dengan kriteria sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa contoh-contoh yang disajikan dalam modul relevan dengan konteks kehidupan nyata dan mampu membantu mahasiswa dalam memahami penerapan teknologi IoT dalam pemantauan kualitas udara. Secara keseluruhan, hasil penilaian persepsi dosen menunjukkan bahwa modul yang dikembangkan layak digunakan sebagai bahan ajar dalam proses pembelajaran serta mampu mendukung peningkatan pemahaman dan keterampilan kolaboratif mahasiswa. Penilaian persepsi mahasiswa menjadi indikator penting dalam menilai kualitas, kemenarikan, dan kemudahan penggunaan modul pembelajaran yang dikembangkan. Penilaian persepsi mahasiswa dilakukan terhadap dua aspek utama, yaitu aspek kelayakan isi dan aspek kelayakan media. Hasil penilaian menunjukkan rata-rata persentase sebesar 84,0% dengan kategori sangat baik. Aspek kelayakan isi memperoleh rata-rata 85,3% dengan kategori sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa mahasiswa menilai materi yang disajikan dalam modul sudah sesuai dengan kebutuhan pembelajaran, mudah dipahami, serta relevan dengan konteks fenomena lingkungan nyata. Aspek kelayakan media memperoleh rata-rata 82,7% dengan kategori sangat baik. Hal ini menunjukkan bahwa mahasiswa menilai tampilan modul menarik, mudah digunakan, serta memiliki navigasi yang jelas. Penggunaan kombinasi warna biru, putih, dan oranye pada modul memberikan kesan modern dan tidak membosankan. Ilustrasi yang disajikan juga membantu mahasiswa dalam memahami alur sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT. Secara keseluruhan, hasil persepsi mahasiswa menunjukkan bahwa modul pembelajaran yang dikembangkan telah memenuhi kriteria sebagai bahan ajar yang layak, menarik, dan mudah digunakan. Tingginya nilai rata-rata pada setiap aspek penilaian menunjukkan bahwa modul tidak hanya diterima dengan baik oleh mahasiswa, tetapi juga berpotensi mendukung pembelajaran mandiri serta meningkatkan keterlibatan mahasiswa dalam proses pembelajaran.

c. Meningkatkan Kemampuan Kolaborasi Mahasiswa

Efektivitas modul pembelajaran berbasis IoT dalam meningkatkan kemampuan kolaborasi mahasiswa diukur melalui observasi terhadap aktivitas kolaborasi mahasiswa selama proses pembelajaran. Observasi dilakukan pada uji coba kelompok kecil yang melibatkan 10 orang mahasiswa Program Studi Pendidikan Fisika Universitas Jambi. Indikator kemampuan kolaborasi yang diamati meliputi kontribusi dalam diskusi, tanggung jawab terhadap tugas, kemampuan memecahkan masalah, dan sikap kolaboratif. Hasil observasi menunjukkan bahwa rata-rata kemampuan kolaborasi mahasiswa secara keseluruhan mencapai 85,50% dengan kategori tinggi. Rata-rata per aspek menunjukkan bahwa kontribusi dalam diskusi memperoleh 85% (tinggi), tanggung jawab terhadap tugas 85% (tinggi), kemampuan memecahkan masalah 86,25% (tinggi), dan sikap kolaboratif 85,83% (tinggi). Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan modul pembelajaran berbasis IoT dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) efektif dalam meningkatkan kemampuan kolaborasi mahasiswa. Tingginya kemampuan kolaborasi mahasiswa tidak terlepas dari penerapan sintaks PjBL yang terstruktur dalam modul. Tahap orientasi masalah yang diawali dengan fenomena pencemaran udara berbasis data IoT mendorong mahasiswa untuk berdiskusi dan berbagi pemahaman awal tentang permasalahan lingkungan yang akan dipecahkan.

Tahap pelaksanaan proyek yang melibatkan perakitan perangkat IoT (NodeMCU, DHT11, MQ-135) dan pengumpulan data kualitas udara secara langsung menjadi inti kegiatan kolaboratif. Mahasiswa saling membantu dalam menjalankan alat, mengumpulkan data, serta mencatat hasilnya dengan cermat. Kegiatan ini memperkuat keterampilan bekerja sama dan kemampuan memecahkan masalah secara kolektif. Tahap analisis data dan interpretasi hasil dilakukan secara berkelompok, di mana mahasiswa mengolah data hasil pengukuran sensor, menganalisis hubungan antara parameter fisika lingkungan dengan kualitas udara, serta membandingkan hasil pengukuran dengan standar kualitas udara yang berlaku. Kegiatan analisis ini membantu mahasiswa memahami bagaimana konsep fisika lingkungan dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena pencemaran udara secara ilmiah sekaligus melatih kemampuan berpikir kritis dan komunikasi ilmiah. Penelitian Nisrina et al. (2025) menegaskan bahwa model pembelajaran kolaboratif berperan penting dalam meningkatkan pemahaman konsep sains secara bermakna, terutama ketika dikombinasikan dengan teknologi pembelajaran yang inovatif.

Tahap presentasi hasil proyek menjadi wadah bagi mahasiswa untuk menyampaikan ide dan hasil temuan secara jelas, argumentatif, dan ilmiah. Proses ini melatih kemampuan komunikasi ilmiah serta kemampuan mahasiswa dalam menyampaikan hasil penelitian secara sistematis. Pencapaian kemampuan kolaborasi mahasiswa sebesar 85,50% (kategori tinggi) menunjukkan efektivitas modul dalam meningkatkan kemampuan kolaborasi. Keberhasilan ini tidak terlepas dari integrasi teknologi IoT yang memungkinkan mahasiswa memperoleh data real-time, sehingga pembelajaran menjadi lebih kontekstual dan berbasis bukti ilmiah. Dengan demikian, modul pembelajaran berbasis IoT dengan pendekatan PjBL yang dikembangkan terbukti efektif dalam meningkatkan kemampuan kolaborasi mahasiswa pada mata kuliah Fisika Lingkungan. Modul ini menjadi solusi terhadap keterbatasan sarana praktikum dan rendahnya keterampilan kolaboratif mahasiswa di era pembelajaran abad ke-21.

Penelitian ini memiliki beberapa perbedaan mendasar dibandingkan penelitian sebelumnya. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pengembangan perangkat IoT sebagai media pembelajaran atau penerapan model Project Based Learning (PjBL) secara terpisah. Sementara itu, penelitian ini mengintegrasikan teknologi IoT dan model PjBL ke dalam sebuah modul pembelajaran yang secara khusus dirancang untuk mata kuliah Fisika Lingkungan pada materi kualitas udara. Selain menghasilkan bahan ajar yang tervalidasi, penelitian ini juga menekankan pengembangan keterampilan kolaborasi mahasiswa melalui aktivitas proyek berbasis data real-time yang diperoleh dari sensor lingkungan. Dengan demikian, kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi modul pembelajaran, teknologi IoT, model PjBL, dan pengukuran keterampilan kolaborasi dalam satu kesatuan desain pembelajaran yang terstruktur.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pengembangan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa modul pembelajaran berbasis Internet of Things (IoT) dengan pendekatan Project Based Learning (PjBL) pada materi kualitas udara dalam mata kuliah Fisika Lingkungan berhasil dikembangkan melalui tahapan model ADDIE hingga tahap development. Modul yang dikembangkan dirancang untuk mengintegrasikan teknologi IoT sebagai media pembelajaran dengan aktivitas pembelajaran berbasis proyek, sehingga mampu menciptakan pembelajaran yang kontekstual, interaktif, dan berpusat pada mahasiswa. Hasil validasi oleh ahli materi dan ahli media menunjukkan bahwa modul berada pada kategori **sangat baik**, yang menandakan bahwa modul telah memenuhi kriteria kelayakan dari aspek isi, penyajian, bahasa, dan tampilan. Proses revisi yang dilakukan berdasarkan masukan dari validator berkontribusi dalam menyempurnakan kualitas modul sehingga layak digunakan dalam pembelajaran tanpa revisi lanjutan yang signifikan.

Hasil uji coba terbatas menunjukkan bahwa penggunaan modul berbasis IoT memperoleh respon yang positif dari mahasiswa. Mahasiswa menilai bahwa modul mudah digunakan, menarik secara visual, serta membantu dalam memahami konsep kualitas udara secara lebih nyata. Hal ini disebabkan oleh adanya integrasi sistem IoT yang memungkinkan mahasiswa melakukan pengamatan langsung terhadap kondisi lingkungan melalui data real-time, sehingga pembelajaran menjadi lebih bermakna dan berbasis pengalaman langsung. Selain itu, penerapan model Project Based Learning (PjBL) dalam modul terbukti efektif dalam meningkatkan keterampilan kolaborasi mahasiswa. Mahasiswa menunjukkan peningkatan dalam kemampuan bekerja sama, berkomunikasi, serta bertanggung jawab dalam menyelesaikan tugas kelompok. Aktivitas pembelajaran berbasis proyek yang terintegrasi dengan penggunaan teknologi IoT mendorong mahasiswa untuk terlibat aktif dalam diskusi, berbagi peran, serta mengambil keputusan secara bersama dalam menyelesaikan permasalahan berbasis data lingkungan. Dengan demikian, modul pembelajaran berbasis IoT yang dikembangkan tidak hanya efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep kualitas udara, tetapi juga mampu mengembangkan keterampilan kolaborasi mahasiswa sebagai salah satu kompetensi penting abad ke-21. Integrasi antara teknologi IoT dan model PjBL memberikan kontribusi positif dalam menciptakan pembelajaran yang inovatif, kontekstual, dan berorientasi pada pengembangan keterampilan. Namun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain pada tahap

implementasi yang masih berskala terbatas serta ketergantungan pada ketersediaan perangkat IoT dan konektivitas jaringan. Oleh karena itu, disarankan untuk penelitian selanjutnya agar dilakukan uji coba dalam skala yang lebih luas serta pengembangan lebih lanjut terhadap fitur modul agar dapat digunakan secara lebih optimal dalam berbagai kondisi pembelajaran.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan selama proses penyusunan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas Jambi yang telah memberikan fasilitas dan dukungan selama penelitian berlangsung. Ucapan terima kasih turut disampaikan kepada para validator, baik ahli materi maupun ahli media, yang telah memberikan penilaian serta saran yang konstruktif dalam penyempurnaan modul pembelajaran yang dikembangkan. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada mahasiswa yang telah berpartisipasi dalam uji coba penelitian serta memberikan respon yang sangat membantu dalam proses evaluasi produk. Semoga penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan pembelajaran Fisika Lingkungan, khususnya dalam pemanfaatan teknologi IoT untuk meningkatkan keterampilan kolaborasi mahasiswa.

DAFTAR PUSTAKA

- Adha, F., Iknes, Y., & Putri, S. F. (2024). *Augmented Reality : Meningkatkan Minat Mahasiswa dalam Pembelajaran melalui Media Interaktif*.
- Amsal Alhayat, Mukhidin, Tuti Utami, R. Y. (2023). *The Relevance of the Project-Based Learning (PjBL) Learning Model with Kurikulum Merdeka Belajar* Amsal. 7.
- Barokah, N., & Kamal, R. (2025). *Pembelajaran Kontekstual sebagai Inovasi Kreatif dalam Menjadikan Materi Ajar Lebih Bermakna*.
- Entriza, A. N., & Puspitasari, F. F. (2025). Studi Literatur : Integrasi Teknologi Informasi Dalam Pelatihan Guru Sebagai Upaya Meningkatkan Kualitas. 15(01).
- Henukh, A., Rochintaniawati, D., Setiawan, A., Irva, A. I., & Aini, R. Q. (2024). *Universitas Papua Environmental Physics Learning : Implementation and Assessment in Pembelajaran Fisika Lingkungan : Implementasi dan Asesmen di*. 7(2), 269–279.
- Hermadiana, R., Hakim, L. El, & Risanto, R. H. (2025). *Pemanfaatan Internet of Things (IoT) untuk Energi Terbarukan dan Pembelajaran Berkelanjutan*. 5, 306–312.
- Mahmubi, M. (2025). *Analisis Implementasi Pembelajaran Berbasis Gamifikasi Pada Peningkatan Motivasi Belajar Siswa*. 2(1), 1–9.
- Muhammad Ilham Jaya Kesuma, Ilham Fatoni, I. C. A. (2025). *Transformasi pembelajaran pendidikan agama islam berbasis teknologi digital di era*. 10.
- Muttaqin, R., Sakti, W., Prayitno, W., & Erna, N. (2024). *Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Iot (Internet Of Things) dengan Sensor DHT11 dan Sensor MQ135*. 6(2), 102–115.
- Nisrina, N., Nyoman, N., & Putu, S. (2025). *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika*. 13(1), 148–157.
- Nugraha, A. S., Kawamoto, H., Eguchi, M., & Liao, T. (2023). *Mesoporous multimetallic nanospheres with exposed highly entropic alloy sites*. October 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-39157-2>

- Pratama, I. (2022). *Tata Kelola Perusahaan dan Atribut Perusahaan pada Ketepatan Pelaporan Keuangan : Bukti dari Perusahaan yang Terdaftar di Bursa Efek Indonesia Corporate Governance and Company Attributes on the Financial Reporting Timeline : Evidence of Companies Listed on the Indonesia Stock Exchange*. 4(3), 1959–1967. <https://doi.org/10.34007/jehss.v4i3.1012>
- Pratami, R. (2024). *Pendekatan Konstruktivisme dalam Kebijakan Pembelajaran Berbasis Proyek : Transformasi Pendidikan Menuju Kreativitas dan Kolaborasi Constructivism Approach in Project-based Learning Policy : Transforming Education Toward Creativity and Collaboration*. 16(c), 76–87. <https://doi.org/10.20473/jap.v16i2.60539>
- Ramadhan, E. H., & Hindun. (2023). *Penerapan Model Pembelajaran Berbasis Proyek untuk Membantu Siswa Berpikir Kreatif*. 2(2).
- Riansyah, A., Mustafa, & Syakhroni, A. (2025). *Penerapan Teknologi IoT pada Hidroponik di Sekolah Dasar*. 7(2), 321–326.
- Ristiyanto, T. W., Holilah, E., Suswasarosa, A. O., Hakim, L., & Hasani, A. (2025). *Mengevaluasi Efektivitas Teknologi Pembelajaran Jarak Jauh Berdasarkan Kriteria Pedagogis dan Teknis*. 6(4), 2748–2762.
- Shahid, S., Ullah, I., & Munib, F. (2025). *Asian Countries Analysis on Climate Change Impact on Growth of Economy and Food Security*. 2(2), 11–21.
- Si-mohammed, S., Begin, T., & Guérin, I. (2023). *Internet of Things HINTS : A methodology for IoT network technology and configuration decision*. 22(November 2022), 1–21.
- Sun, L., Kangas, M., Ruokamo, H., & Siklander, S. (2023). A systematic literature review of teacher scaffolding in game-based learning in primary education. *Educational Research Review*, 40(July 2022), 100546. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2023.100546>
- Teresa, M., Montero, V., Rowe, K., Kirton, R., & Jr, F. K. (2021). Epidemiology , pathogenesis , clinical presentations , diagnosis and treatment of COVID-19 : a review of current evidence. *Expert Review of Clinical Pharmacology*, 00(00), 1–21. <https://doi.org/10.1080/17512433.2021.1902303>