



Merancang Kit Pemula IoT Berbiaya Rendah untuk Pendidikan Perikanan dan Akuakultur di SMK Pesisir Kabupaten Cirebon

Mohamad Nasir^{1*}, Ade Fitria Fatimah²

Politeknik Siber Cerdika Internasional, Indonesia¹

Universitas Gadjah Mada, Indonesia²

Email: nasirbitink@gmail.com

INFO ARTIKEL

Kata kunci:

kit starter IoT; pendidikan vokasional; akuakultur, teknologi biaya rendah; model ADDIE; perikanan pesisir.

Keywords:

IoT starter kit; vocational education; aquaculture, low-cost technology; ADDIE model; coastal fisheries.

ABSTRAK

Transformasi digital sektor perikanan dan akuakultur menuntut lulusan SMK yang melek teknologi IoT, namun SMK di kawasan pesisir Kabupaten Cirebon menghadapi dua hambatan kritis: ketiadaan kit pembelajaran yang kontekstual dan mahalnya kit komersial yang tersedia. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi efektivitas IoT starter kit berbiaya rendah berbasis konteks budidaya perikanan tambak untuk siswa kelas XI Agribisnis Perikanan SMK Negeri pesisir Kabupaten Cirebon. Penelitian menggunakan pendekatan Design and Development Research (DDR) dengan model ADDIE, melibatkan 60 siswa dari dua kelas, dengan instrumen pre-test/post-test, angket motivasi belajar, lembar observasi guru, dan wawancara semi-terstruktur. Analisis data menggunakan N-gain score, paired samples t-test, dan thematic analysis. Hasil menunjukkan peningkatan rata-rata nilai dari 54,3 (pre-test) menjadi 81,7 (post-test) dengan N-gain 0,67 (kategori sedang-tinggi), serta 83% siswa menyatakan sangat termotivasi karena relevansi konteks tambak lokal. Kit yang terdiri dari ESP8266 NodeMCU, sensor air, dan modul relay diproduksi seharga Rp178.000 per unit, jauh di bawah harga kit komersial sejenis. Guru menilai kit mudah diintegrasikan ke dalam RPP yang ada tanpa perombakan kurikulum besar. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kit IoT berbiaya rendah yang dirancang secara kontekstual terbukti efektif secara pedagogis dan layak secara finansial bagi SMK pesisir, serta berpotensi menjadi model replikasi transformasi digital pendidikan vokasional perikanan di Indonesia.

ABSTRACT

The rapid digitalization of the fisheries and aquaculture sector demands that vocational school graduates possess IoT-based competencies, yet SMK (Vocational High Schools) in coastal areas of Cirebon Regency face critical barriers: the absence of contextually appropriate learning kits and the prohibitive cost of commercial alternatives. This study aims to design and evaluate the effectiveness of a low-cost IoT starter kit tailored to the coastal aquaculture context for Grade XI students majoring in Fisheries Agribusiness at public SMK in Cirebon Regency. Employing a Design and Development Research (DDR) approach with the ADDIE model, the study involved 60 students across two classes and utilized pre-test/post-test instruments, a learning motivation questionnaire, teacher observation sheets, and semi-structured interviews. Data were analyzed using N-gain scores, paired samples t-test, and thematic analysis. Results demonstrated a mean pre-test score of 54.3 rising to 81.7 post-test, yielding an N-gain of 0.67 (medium-high category), with 83% of students reporting high motivation attributed to the local aquaculture context. The kit, comprising an ESP8266 NodeMCU, water sensors, and relay module, was produced at Rp178,000 per unit, significantly below commercial alternatives.

Teachers assessed the kit as highly integrable into existing lesson plans without major curriculum revision. This study concludes that contextually designed, low-cost IoT kits are both pedagogically effective and financially feasible for coastal vocational schools, offering a replicable model for digital transformation in fisheries vocational education across Indonesia.

PENDAHULUAN

Sektor perikanan dan akuakultur merupakan tulang punggung perekonomian masyarakat pesisir di Indonesia, khususnya di wilayah Pantai Utara Jawa yang mencakup Kabupaten Cirebon sebagai salah satu sentra budidaya tambak terbesar di Provinsi Jawa Barat. Dalam konteks global, transformasi digital pada sektor kelautan dan perikanan telah berlangsung pesat, ditandai dengan adopsi teknologi Internet of Things (IoT) untuk pemantauan kualitas air, pengelolaan pakan otomatis, dan monitoring lingkungan tambak secara real-time (Syofyan et al., 2022). Perkembangan ini mendorong kebutuhan mendesak terhadap sumber daya manusia yang melek teknologi di tingkat vocational, yakni lulusan Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) yang mampu mengoperasikan, merancang, dan memelihara sistem IoT dalam konteks akuakultur. Di Indonesia, pemerintah telah mengintegrasikan kompetensi teknologi informasi ke dalam kurikulum SMK melalui berbagai regulasi dan kebijakan pendidikan kejuruan yang menekankan link and match dengan kebutuhan industri lokal (Kemendikbud, 2022). Namun demikian, implementasi teknologi berbasis IoT di SMK kawasan pesisir masih menghadapi berbagai hambatan struktural, mulai dari keterbatasan anggaran, minimnya tenaga pengajar yang kompeten, hingga tidak tersedianya perangkat pembelajaran yang relevan dengan konteks industri setempat. Kabupaten Cirebon, dengan lebih dari 12.000 hektar lahan tambak dan potensi budidaya ikan bandeng, udang, dan nila yang sangat besar, memiliki kebutuhan nyata terhadap tenaga kerja terampil yang memahami penerapan IoT dalam ekosistem budidaya pesisir (BPS Kabupaten Cirebon, 2023). Oleh karena itu, pengembangan media pembelajaran IoT yang kontekstual dan terjangkau untuk SMK di kawasan pesisir Cirebon bukan hanya relevan secara akademik, melainkan juga mendesak secara sosial-ekonomi dan strategis bagi pembangunan daerah.

Pendidikan kejuruan (vocational education) memiliki peran kritis dalam menyiapkan tenaga kerja yang adaptif terhadap perubahan teknologi, terutama di sektor-sektor primer seperti pertanian, perikanan, dan kelautan yang kini tengah mengalami digitalisasi masif. Teori constructivist learning yang dikembangkan oleh Vygotsky dan kemudian dioperasionalkan dalam konteks STEM menekankan bahwa pemelajar memperoleh pemahaman teknologi paling efektif melalui pengalaman langsung dengan artefak nyata yang relevan dengan konteks kehidupannya (Harahap et al., 2023). Dalam kerangka ini, IoT starter kit berfungsi bukan hanya sebagai alat bantu pembelajaran, melainkan sebagai scaffold kognitif yang menghubungkan konsep abstrak elektronika dan pemrograman mikrokontroler dengan praktik nyata di lapangan tambak. Teori pembelajaran berbasis proyek (Project-Based Learning/PBL) juga mendukung pentingnya penggunaan kit fisik dalam pembelajaran teknologi, di mana siswa diajak untuk merancang, mengimplementasikan, dan mengevaluasi solusi nyata terhadap

masalah autentik di lingkungan kerja mereka (Dewi et al., 2021). Secara empiris, penelitian di berbagai negara berkembang menunjukkan bahwa penggunaan perangkat IoT low-cost berbasis mikrokontroler open-source seperti Arduino dan ESP32 mampu meningkatkan motivasi dan kompetensi teknologi siswa secara signifikan tanpa mengorbankan kedalaman materi (Rahman & Putra, 2023). Framework kurikulum SMK di Indonesia, khususnya pada kompetensi keahlian Agribisnis Perikanan (AP) dan Agribisnis Pengolahan Hasil Perikanan (APHP), sebenarnya sudah membuka ruang integrasi teknologi digital, namun implementasinya masih sangat minim karena absennya bahan ajar dan kit yang sesuai. Dengan demikian, pengembangan IoT starter kit yang dirancang secara khusus untuk konteks budidaya perikanan pesisir merupakan langkah yang sangat selaras dengan landasan teoretis dan kebutuhan empiris pendidikan kejuruan di Indonesia.

Meskipun transformasi digital di sektor perikanan telah mendapat perhatian luas dari komunitas riset dan kebijakan, terdapat kesenjangan yang signifikan antara perkembangan teknologi IoT di tingkat industri dengan kapasitas pembelajaran teknologi di SMK kawasan pesisir Indonesia. Salah satu hambatan paling nyata adalah harga kit pembelajaran IoT komersial yang tidak terjangkau oleh sekolah negeri di daerah; misalnya, Arduino Starter Kit resmi dihargai antara Rp800.000 hingga Rp1.500.000 per unit, sementara Raspberry Pi Bundle dapat mencapai Rp2.000.000 ke atas, jauh melebihi kapasitas belanja barang habis pakai sekolah negeri di daerah (Santoso et al., 2022). Permasalahan ini diperburuk oleh kenyataan bahwa kit-kit komersial tersebut dirancang untuk konteks umum (generic context) seperti proyek robotika, rumah pintar, atau otomasi industri, sehingga sama sekali tidak menyentuh skenario penggunaan yang relevan dengan budidaya ikan dan tambak udang yang merupakan realitas kerja lulusan SMK pesisir Cirebon. Dari perspektif kurikulum, SMK jurusan Agribisnis Perikanan membutuhkan media pembelajaran yang mampu mengintegrasikan pengukuran parameter kualitas air (pH, suhu, salinitas, dissolved oxygen) dengan konsep dasar pemrograman mikrokontroler dan komunikasi data berbasis IoT, suatu integrasi yang belum diakomodasi oleh kit komersial manapun yang tersedia di pasaran Indonesia (Pratama et al., 2021). Kajian lapangan yang dilakukan terhadap delapan SMK di kawasan pesisir Kabupaten Cirebon mengungkap bahwa tidak satu pun sekolah tersebut yang memiliki laboratorium IoT fungsional atau bahan ajar berbasis teknologi sensor untuk mata pelajaran perikanan, menunjukkan adanya kekosongan infrastruktur pembelajaran teknologi yang sangat serius (Observasi Lapangan, 2024). Ketiadaan kit yang kontekstual dan terjangkau ini tidak hanya berdampak pada rendahnya kompetensi digital siswa, tetapi juga menciptakan jurang antara ekspektasi industri perikanan berbasis IoT dengan keterampilan yang dibawa lulusan SMK ke dunia kerja. Permasalahan struktural ini menuntut solusi berbasis desain yang mampu menjawab dua tantangan sekaligus: keterjangkauan biaya dan relevansi konteks akuakultur pesisir.

Urgensi penelitian ini semakin menguat mengingat kebijakan nasional Indonesia yang menargetkan transformasi digital sektor kelautan dan perikanan sebagai bagian dari agenda pembangunan ekonomi biru (blue economy) yang tercantum dalam Rencana

Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020–2024 dan berlanjut pada RPJMN 2025–2029. Dalam konteks ini, kesiapan sumber daya manusia tingkat menengah yang melek IoT menjadi prasyarat yang tidak dapat diabaikan; tanpa tenaga terampil dari lulusan SMK, adopsi teknologi di tingkat tambak akan terus menghadapi hambatan kapasitas manusia yang menghambat laju modernisasi perikanan pesisir (Kementerian Kelautan dan Perikanan, 2023). Secara khusus, Kabupaten Cirebon sebagai salah satu daerah dengan produksi perikanan tambak terbesar di Jawa Barat membutuhkan supply lulusan SMK yang mampu mengoperasikan sistem monitoring IoT, menganalisis data sensor, dan melakukan pemeliharaan sistem otomatisasi tambak, kompetensi yang hanya bisa dibangun melalui pengalaman belajar berbasis kit yang tepat (Dinas Perikanan Kabupaten Cirebon, 2023). Penelitian ini juga signifikan dari perspektif keadilan pendidikan (*educational equity*), karena dengan menghadirkan kit berbiaya rendah yang dapat direplikasi secara mandiri oleh sekolah dengan anggaran terbatas, penelitian ini berpotensi mendemokratisasi akses terhadap pembelajaran teknologi IoT bagi siswa SMK di daerah terpencil dan kepebisiran yang selama ini tertinggal dalam arus digitalisasi pendidikan (Lestari et al., 2023). Dari sudut pandang pengembangan kurikulum, penelitian ini menawarkan model integrasi teknologi IoT ke dalam pembelajaran kejuruan perikanan yang dapat dijadikan rujukan oleh Direktorat SMK Kemendikbud dalam menyusun modul ajar dan standar kompetensi teknologi digital untuk program keahlian Agribisnis Perikanan. Lebih dari itu, penelitian ini memiliki nilai replikasi yang tinggi: jika berhasil, model kit yang dikembangkan dapat diadaptasi untuk konteks SMK pesisir di daerah lain di Indonesia seperti Indramayu, Karawang, Demak, atau Gresik yang memiliki karakteristik perikanan tambak serupa. Dengan demikian, dampak penelitian ini berpotensi melampaui batas lokal Cirebon dan berkontribusi pada transformasi pendidikan kejuruan berbasis teknologi secara nasional.

Kajian terhadap literatur lima tahun terakhir menunjukkan tren yang semakin menguat dalam pengembangan dan implementasi perangkat IoT berbiaya rendah untuk konteks pendidikan vokasional di negara-negara berkembang, meskipun mayoritas penelitian masih berfokus pada konteks pertanian umum, rumah pintar, atau lingkungan perkotaan, bukan pada spesifikasi budidaya perikanan pesisir. Penelitian oleh Anggraeni et al. (2022) mengembangkan sistem monitoring tambak berbasis NodeMCU ESP8266 dengan sensor pH, suhu, dan turbiditas yang menunjukkan bahwa perangkat IoT berbiaya rendah mampu memberikan akurasi pengukuran yang memadai untuk kebutuhan budidaya udang vannamei, namun penelitian tersebut tidak menyentuh dimensi pedagogis atau keterlibatan siswa SMK sebagai pengguna sistem. Senada dengan itu, Syofyan et al. (2022) melaporkan implementasi kit Arduino-based untuk pembelajaran sensor lingkungan di SMK pertanian di Jawa Tengah dan menemukan peningkatan signifikan pada skor kompetensi teknologi siswa, tetapi modul yang mereka kembangkan tidak mengandung skenario kontekstual spesifik akuakultur, sehingga relevansinya bagi siswa SMK perikanan masih terbatas. Di tingkat internasional, penelitian Nguyen et al. (2022) dari Vietnam mendemonstrasikan keberhasilan program smart aquaculture education di sekolah menengah kejuruan berbasis IoT dengan biaya total kit per unit di bawah USD

15, memberikan bukti konsep yang kuat bahwa low-cost IoT kit untuk akuakultur adalah sesuatu yang feasible secara teknis dan finansial. Meskipun demikian, penelitian tersebut dilaksanakan dalam konteks budaya, infrastruktur, dan kurikulum Vietnam yang berbeda signifikan dengan kondisi SMK di Indonesia, sehingga tidak dapat langsung diadopsi tanpa adaptasi kontekstual yang menyeluruh. Lebih lanjut, kajian sistematis oleh Fitriani et al. (2023) terhadap 47 penelitian IoT di pendidikan vokasional menemukan bahwa tidak satu pun penelitian yang secara eksplisit mengembangkan starter kit IoT yang dirancang khusus untuk kompetensi keahlian Agribisnis Perikanan di Indonesia, mengonfirmasi adanya celah literatur yang substansial. Kesenjangan ini semakin nyata jika kita mempertimbangkan fakta bahwa sebagian besar penelitian IoT di pendidikan Indonesia hanya berfokus pada pengembangan sistem tanpa disertai evaluasi efektivitas pedagogis yang memadai, menunjukkan kebutuhan akan pendekatan penelitian yang lebih holistik dan berbasis desain. Dengan demikian, tinjauan literatur ini secara tegas mengarahkan perhatian pada kebutuhan mendesak akan penelitian yang mengintegrasikan aspek teknis, pedagogis, dan kontekstual secara terpadu.

Penelitian ini hadir untuk mengisi celah literatur yang telah diidentifikasi melalui pendekatan yang bersifat tripartit: merancang kit IoT berbiaya rendah, mengarahkannya secara eksplisit pada konteks budidaya perikanan pesisir, dan mengevaluasi efektivitasnya dalam konteks pembelajaran SMK di Indonesia, sebuah kombinasi yang belum pernah dilakukan secara komprehensif dalam satu studi penelitian sebelumnya. Kebaruan pertama penelitian ini terletak pada desain kontekstualisasi yang ketat: seluruh modul, skenario praktikum, dan komponen kit dirancang berdasarkan parameter teknis yang relevan dengan tambak ikan dan udang di kawasan pesisir Cirebon, termasuk pengukuran salinitas air payau, monitoring suhu kolam terbuka, dan deteksi kadar dissolved oxygen pada kondisi cuaca tropis pesisir Jawa (Observasi Lapangan, 2024). Kebaruan kedua adalah pada aspek keterjangkauan yang terukur: penelitian ini menetapkan target biaya total kit per unit di bawah Rp200.000, menjadikannya realistis untuk pengadaan dalam jumlah besar oleh sekolah negeri dengan dana BOS (Bantuan Operasional Sekolah), sebuah batasan biaya yang belum pernah dijadikan kriteria desain dalam penelitian serupa di Indonesia (Santoso et al., 2022). Kebaruan ketiga adalah integrasi antara pengembangan kit dan evaluasi efektivitas pembelajaran melalui kerangka design-based research (DBR) yang memungkinkan penyempurnaan iteratif berdasarkan umpan balik dari guru dan siswa SMK pesisir, memastikan bahwa produk akhir benar-benar responsif terhadap kebutuhan lapangan dan bukan sekadar prototipe laboratorium (Lestari et al., 2023; Syofyan et al., 2022). Dengan mengadopsi pendekatan DBR, penelitian ini juga berkontribusi pada metodologi penelitian pendidikan teknologi di Indonesia yang masih didominasi oleh studi eksplorasi dan deskriptif, bukan penelitian pengembangan yang berorientasi pada dampak praktis. Lebih jauh, penelitian ini memposisikan dirinya sebagai jembatan antara domain penelitian smart aquaculture technology dan domain penelitian pendidikan kejuruan vokasional, dua domain yang selama ini berkembang secara paralel tanpa titik temu yang produktif. Dengan demikian, kontribusi penelitian ini bersifat lintas

disiplin: relevan bagi peneliti pendidikan, teknologi perikanan, dan kebijakan kurikulum vokasional secara bersamaan.

Berdasarkan identifikasi masalah, kajian literatur, dan kebaruan penelitian yang telah diuraikan, penelitian ini memiliki tujuan utama merancang dan mengevaluasi efektivitas IoT starter kit berbiaya rendah berbasis konteks budidaya perikanan pesisir Cirebon sebagai media pembelajaran bagi siswa SMK jurusan Agribisnis Perikanan. Secara spesifik, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran IoT yang relevan dengan kompetensi industri perikanan pesisir di SMK Cirebon; (2) merancang IoT starter kit yang mencakup komponen sensor kualitas air, mikrokontroler, modul komunikasi nirkabel, dan modul antarmuka pengguna dengan total biaya di bawah Rp200.000 per unit; (3) mengembangkan modul ajar dan panduan praktikum berbasis skenario tambak pesisir; dan (4) mengevaluasi efektivitas kit tersebut terhadap kompetensi digital dan motivasi belajar siswa melalui pendekatan quasi-experimental dan design-based research (Syofyan et al., 2022). Manfaat teoritis penelitian ini meliputi pengembangan model integrasi IoT dalam pendidikan akuakultur yang dapat memperkaya khazanah teori pembelajaran vokasional berbasis konteks, serta memberikan kontribusi metodologis melalui penerapan DBR dalam konteks pengembangan media pembelajaran teknologi di daerah pesisir. Manfaat praktis penelitian ini mencakup tersedianya prototipe IoT starter kit yang dapat langsung diimplementasikan oleh SMK di kawasan pesisir Cirebon, tersedianya modul ajar yang siap pakai bagi guru Agribisnis Perikanan, dan tersedianya rekomendasi kebijakan bagi Dinas Pendidikan Kabupaten Cirebon untuk mengintegrasikan pembelajaran IoT ke dalam kurikulum lokal SMK pesisir (Fitriani et al., 2023). Implikasi jangka panjang penelitian ini berkaitan erat dengan peningkatan daya saing lulusan SMK perikanan di pasar kerja yang semakin digital, di mana kemampuan mengoperasikan dan memelihara sistem IoT tambak menjadi kompetensi yang sangat dicari oleh industri akuakultur modern. Selain itu, jika terbukti efektif, model kit ini berpotensi direplikasi secara nasional melalui program kemitraan antara Kemendikbud, Kementerian Kelautan dan Perikanan, dan pemerintah daerah, menciptakan dampak sistemik terhadap kualitas pendidikan vokasional berbasis teknologi di seluruh kawasan pesisir Indonesia. Dengan kerangka penelitian yang komprehensif ini, studi ini diharapkan tidak hanya menghasilkan artefak teknologi yang bermanfaat, tetapi juga membuka perspektif baru tentang bagaimana pendidikan kejuruan dapat merespons secara kreatif dan kontekstual terhadap tantangan transformasi digital di sektor perikanan nasional

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan Design and Development Research (DDR) yang dioperasionalkan melalui model ADDIE (Analysis, Design, Development, Implementation, dan Evaluation) sebagai kerangka metodologis utama dalam merancang dan mengevaluasi IoT starter kit berbiaya rendah untuk pembelajaran perikanan dan akuakultur di SMK pesisir Kabupaten Cirebon. Pemilihan DDR dengan model ADDIE didasarkan pada kesesuaiannya yang tinggi terhadap permasalahan penelitian yang

bersifat perancangan artefak pendidikan sekaligus evaluasi efektivitasnya dalam konteks pembelajaran autentik; suatu karakteristik yang tidak dapat dijawab secara memadai oleh pendekatan deskriptif atau eksperimental murni (Richey & Klein, 2014). Menurut Branch (2009), model ADDIE merupakan kerangka pengembangan instruksional yang bersifat sistemik, iteratif, dan fleksibel, di mana setiap fase saling terkait dan memberikan umpan balik terhadap fase sebelumnya, sehingga memungkinkan penyempurnaan produk secara berkelanjutan berdasarkan data empiris dari lapangan. Dalam konteks penelitian ini, fase Analysis mencakup identifikasi kebutuhan pembelajaran IoT di SMK jurusan Agribisnis Perikanan melalui studi dokumen kurikulum, wawancara guru, dan observasi kondisi laboratorium di delapan SMK pesisir Kabupaten Cirebon; fase Design meliputi penyusunan spesifikasi teknis kit, rancangan modul ajar, dan instrumen evaluasi; fase Development mencakup fabrikasi prototipe kit berbasis ESP8266 NodeMCU beserta produksi panduan praktikum cetak dan video tutorial; fase Implementation dilaksanakan melalui uji coba terbatas pada dua kelas siswa kelas XI SMK Negeri jurusan Agribisnis Perikanan ($n=60$); dan fase Evaluation mencakup pengukuran efektivitas pembelajaran menggunakan instrumen yang telah divalidasi. Pendekatan DDR dipilih secara sadar karena memberikan legitimasi epistemologis terhadap penelitian yang menghasilkan pengetahuan melalui proses perancangan, bukan hanya melalui pengujian hipotesis, sejalan dengan tradisi Design Science Research yang kini semakin diakui dalam jurnal-jurnal pendidikan teknologi bereputasi internasional (Plomp & Nieveen, 2013). Dengan demikian, metodologi ini memposisikan peneliti tidak hanya sebagai pengamat fenomena pendidikan, melainkan sebagai agen perubahan yang merancang solusi berbasis bukti untuk masalah nyata di lapangan, sebuah orientasi yang sangat relevan dengan tujuan transformatif penelitian ini.

Partisipan penelitian adalah 60 siswa kelas XI dari dua kelas paralel (masing-masing 30 siswa) pada SMK Negeri yang memiliki kompetensi keahlian Agribisnis Perikanan di Kabupaten Cirebon, dipilih melalui teknik purposive sampling dengan mempertimbangkan kriteria: (1) sekolah berlokasi di kawasan pesisir atau memiliki lahan praktikum tambak; (2) belum pernah mendapatkan pembelajaran berbasis IoT sebelumnya; dan (3) bersedia berpartisipasi penuh dalam seluruh fase implementasi penelitian. Penentuan jumlah sampel sebanyak 60 siswa didasarkan pada kalkulasi power analysis dengan effect size sedang ($d = 0.5$), tingkat kepercayaan 95%, dan power statistik 0.80, yang menghasilkan minimum sampel 52 partisipan untuk desain pre-test dan post-test, sehingga 60 siswa memberikan margin keamanan yang memadai terhadap potensi data hilang atau dropout (Cohen, 1988a; Plano Clark & Ivankova, 2018). Selain siswa, penelitian ini juga melibatkan empat guru produktif perikanan sebagai informan kunci dalam fase analisis kebutuhan dan sebagai observer pada fase implementasi, menggunakan lembar observasi terstruktur yang telah divalidasi oleh dua pakar pendidikan teknologi. Konteks penelitian ditetapkan secara sengaja pada kawasan pesisir Kabupaten Cirebon karena representasinya yang kuat sebagai daerah dengan konsentrasi SMK perikanan terbesar di Jawa Barat, sekaligus menjadi wilayah di mana kesenjangan antara kebutuhan industri perikanan berbasis IoT dan kesiapan lulusan SMK paling terasa

secara empiris (Dinas Pendidikan Kabupaten Cirebon, 2023). Proses penelitian dilaksanakan selama satu semester akademik, memberikan rentang waktu yang cukup untuk melaksanakan seluruh fase ADDIE secara komprehensif dan untuk mengamati perubahan kompetensi serta motivasi belajar siswa secara longitudinal. Pertimbangan etis penelitian mencakup perolehan informed consent dari orang tua/wali siswa yang belum berusia 18 tahun, persetujuan kepala sekolah, serta penjaminan kerahasiaan identitas partisipan dalam setiap publikasi dan pelaporan hasil penelitian, sejalan dengan prinsip-prinsip etika penelitian pendidikan yang digariskan oleh American Educational Research Association (AERA, 2011).

Komponen IoT starter kit yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang secara cermat untuk memenuhi dua kriteria utama yang saling melengkapi: relevansi teknis terhadap parameter monitoring budidaya perikanan pesisir dan keterjangkauan biaya bagi sekolah negeri dengan anggaran terbatas. Kit terdiri dari: (1) ESP8266 NodeMCU sebagai mikrokontroler utama dengan kemampuan konektivitas Wi-Fi terintegrasi; (2) sensor suhu air DS18B20 yang tahan kelembapan untuk monitoring temperatur kolam; (3) sensor pH mini analog untuk pengukuran tingkat keasaman air tambak; (4) modul relay 5V untuk pengaturan pompa aerasi secara otomatis; (5) LCD I2C 16x2 sebagai antarmuka tampilan data lokal; dan (6) breadboard tanpa solder untuk memudahkan perakitan dan modifikasi rangkaian oleh siswa. Total estimasi biaya per unit kit berkisar antara Rp150.000 hingga Rp200.000, jauh di bawah harga kit komersial sejenis seperti Arduino Starter Kit (Rp800.000+) atau Raspberry Pi Bundle (Rp2.000.000+), menjadikannya realistis untuk pengadaan massal melalui mekanisme dana BOS sekolah. Kit dilengkapi dengan panduan praktikum cetak berbahasa Indonesia yang memuat 6 skenario praktikum berbasis konteks tambak pesisir, serta video tutorial yang dapat diakses secara offline melalui kartu microSD, mempertimbangkan keterbatasan koneksi internet di sebagian besar SMK kawasan pesisir. Pengembangan instrumen penelitian mencakup empat jenis alat ukur: (1) soal pre-test dan post-test pemahaman IoT sebanyak 30 butir pilihan ganda yang mencakup konsep dasar sensor, pemrograman Arduino, dan interpretasi data; (2) angket motivasi belajar berbasis skala Likert 5 poin dengan 24 butir pernyataan yang diadaptasi dari Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ) yang dikembangkan oleh Pintrich & others (1993) dan dimodifikasi untuk konteks pembelajaran IoT; (3) lembar observasi guru berstruktur dengan 18 indikator perilaku belajar siswa; dan (4) panduan wawancara semi-terstruktur yang digunakan dalam sesi wawancara individual dan kelompok kecil pasca-implementasi. Seluruh instrumen telah divalidasi melalui expert judgment oleh dua pakar pendidikan teknologi dan satu pakar bidang akuakultur, dengan koefisien validitas isi (Content Validity Index/CVI) minimum 0.80 sebagai ambang batas kelayakan, mengacu pada standar validasi instrumen yang direkomendasikan oleh Polit & Beck (2006) serta dilengkapi dengan uji reliabilitas menggunakan koefisien Cronbach's alpha pada data uji coba dengan 30 responden diluar sampel utama.

Pengumpulan data dilakukan secara terintegrasi selama fase Implementation dan Evaluation model ADDIE menggunakan pendekatan mixed methods yang

menggabungkan data kuantitatif dan kualitatif secara komplementer, sejalan dengan prinsip triangulasi metodologis yang direkomendasikan oleh Cohen (1988b) untuk meningkatkan kedalaman dan kepercayaan temuan penelitian. Data kuantitatif dikumpulkan melalui administrasi pre-test pada pertemuan pertama sebelum penggunaan kit dan post-test pada pertemuan terakhir setelah seluruh skenario praktikum diselesaikan, serta melalui pengisian angket motivasi belajar pada kedua titik pengukuran tersebut. Analisis data kuantitatif mencakup tiga prosedur utama: (1) perhitungan N-gain score menurut formula Hake (1998), yakni $g = (S_{\text{post}} - S_{\text{pre}}) / (S_{\text{maks}} - S_{\text{pre}})$, dengan kategori tinggi ($g > 0.70$), sedang ($0.30 \leq g \leq 0.70$), dan rendah ($g < 0.30$), untuk mengukur efektivitas relatif peningkatan pemahaman IoT; (2) uji paired samples t-test untuk menguji signifikansi perbedaan skor pre-test dan post-test pada taraf kepercayaan 95% ($\alpha = 0.05$), setelah terlebih dahulu memverifikasi asumsi normalitas data menggunakan uji Shapiro-Wilk dan homogenitas varians menggunakan uji Levene; dan (3) analisis deskriptif terhadap data motivasi belajar yang mencakup mean, standar deviasi, dan persentase kategori motivasi per indikator. Seluruh analisis kuantitatif dilaksanakan menggunakan perangkat lunak IBM SPSS Statistics versi 26, dengan pelaporan hasil yang mengacu pada standar APA 7th edition untuk penyajian statistik inferensial. Data kualitatif diperoleh dari wawancara semi-terstruktur yang dilaksanakan terhadap 12 siswa yang dipilih secara purposif berdasarkan variasi skor gain (tinggi, sedang, rendah) dan dari empat guru observer, serta dari catatan lapangan observasi selama implementasi. Analisis data kualitatif dilakukan menggunakan pendekatan thematic analysis enam fase menurut Braun & Clarke (2006), yang mencakup: familiarisasi data, pengkodean awal, pencarian tema, peninjauan tema, pendefinisian dan penamaan tema, serta produksi laporan analitik; dengan bantuan perangkat lunak NVivo versi 12 untuk memfasilitasi pengorganisasian, pengkodean, dan query data teks secara sistematis. Inter-rater reliability dikonfirmasi melalui proses koding independen oleh dua peneliti pada 20% data wawancara, menghasilkan koefisien kesepakatan Cohen's kappa minimum 0.75 sebagai indikator reliabilitas yang dapat diterima (Landis & Koch, 1977), sehingga menjamin objektivitas dan konsistensi proses analisis kualitatif.

Untuk menjamin keterpercayaan (trustworthiness) dan keabsahan temuan penelitian secara menyeluruh, penelitian ini menerapkan serangkaian strategi validitas yang komprehensif yang mencakup dimensi internal, eksternal, dan etis. Validitas internal dijamin melalui triangulasi sumber data (siswa, guru, dokumen), triangulasi metode (tes, angket, observasi, wawancara), dan member checking di mana interpretasi tematik hasil wawancara dikonfirmasi kembali kepada partisipan terpilih sebelum finalisasi laporan, mengacu pada kriteria trustworthiness yang dikemukakan oleh Lincoln & Guba (1985) yang mencakup credibility, transferability, dependability, dan confirmability sebagai padanan kualitatif terhadap konsep validitas dan reliabilitas dalam tradisi positivistik. Validitas konstruk instrumen tes pemahaman IoT dikuatkan melalui analisis butir soal menggunakan Rasch model dengan bantuan perangkat lunak Winsteps, memastikan bahwa setiap butir soal mengukur konstruk yang dimaksud secara proporsional dan bebas dari bias item yang dapat mendistorsi pengukuran (Bond & Fox,

2015). Validitas ekologis penelitian dijaga melalui pelaksanaan implementasi kit dalam konteks pembelajaran reguler di kelas dan laboratorium sekolah, bukan dalam setting eksperimental yang artifisial, sehingga temuan memiliki relevansi langsung terhadap praktik nyata pembelajaran SMK pesisir. Transparansi metodologis dijamin melalui dokumentasi protokol penelitian yang rinci, mencakup panduan wawancara, rubrik observasi, dan matriks ekstraksi data, yang disimpan dalam repositori data penelitian dan tersedia bagi peneliti lain untuk keperluan replikasi atau audit trail, sejalan dengan praktik open science yang semakin diharuskan oleh jurnal-jurnal Scopus bereputasi tinggi (Nosek & others, 2022). Pertimbangan etis penelitian diimplementasikan secara ketat: seluruh instrumen dan protokol penelitian mendapatkan persetujuan dari komite etik penelitian institusi sebelum pengumpulan data dimulai; partisipasi bersifat sukarela dengan hak pengunduran diri tanpa konsekuensi akademis; data yang dikumpulkan disimpan secara aman dan hanya digunakan untuk tujuan penelitian yang telah dinyatakan; dan hasil penelitian dilaporkan secara transparan termasuk keterbatasan yang ditemukan di lapangan, tanpa seleksi laporan yang dapat menyesatkan pembaca atau komunitas ilmiah. Dengan kerangka metodologis yang demikian kokoh dan berlapis ini, penelitian diharapkan dapat menghasilkan temuan yang sah, dapat dipercaya, dan memiliki kontribusi substantif terhadap pengembangan pendidikan teknologi vokasional di kawasan pesisir Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan dan mengevaluasi sebuah IoT starter kit berbiaya rendah yang dirancang khusus untuk konteks budidaya perikanan tambak di SMK pesisir Kabupaten Cirebon melalui pendekatan Design and Development Research (DDR) dengan model ADDIE. Data dikumpulkan dari 60 siswa kelas XI Agribisnis Perikanan pada dua SMK Negeri pesisir selama satu semester akademik penuh, melibatkan pre-test, post-test, angket motivasi, observasi guru, dan wawancara semi-terstruktur. Kajian literatur komparatif yang dilakukan dalam penelitian ini mencakup delapan studi relevan yang diterbitkan antara 2021 hingga 2024, bersumber dari basis data Scopus, ScienceDirect, dan Google Scholar dengan fokus pada IoT dalam pendidikan vokasional dan akuakultur berbasis teknologi. Secara geografis, studi-studi yang dikaji mencakup konteks Indonesia, Vietnam, dan Bangladesh, memberikan perspektif komparatif lintas negara berkembang yang kondisi infrastruktur pendidikannya memiliki kemiripan dengan SMK pesisir Cirebon. Gambaran umum studi-studi yang diulas disajikan secara sistematis dalam Tabel 1, yang merangkum penulis, negara, metode, fokus, dan temuan kunci dari setiap studi rujukan yang digunakan dalam analisis komparatif penelitian ini. Distribusi temporal publikasi yang ditampilkan dalam Grafik 1 menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dalam jumlah riset IoT untuk pendidikan perikanan sejak tahun 2020, mencapai puncaknya pada tahun 2023 dengan 14 publikasi terindeks Scopus, sebuah indikasi bahwa bidang ini tengah memasuki fase pertumbuhan yang signifikan. Temuan inti penelitian ini meliputi N-gain score sebesar 0.67 (kategori sedang-tinggi menurut Hake (1998), peningkatan rata-rata nilai dari 54.3 (pre-test) menjadi 81.7 (post-

test), tingkat motivasi sangat tinggi pada 83% siswa, biaya produksi Rp178.000 per unit, serta penilaian guru yang sangat positif terhadap kemudahan integrasi kit ke dalam Rencana Pelaksanaan Pembelajaran (RPP) yang sudah ada.

Distribusi hasil berdasarkan dimensi pengukuran menunjukkan konsistensi yang kuat: peningkatan kompetensi kognitif, afektif (motivasi), dan psikomotorik siswa semuanya bergerak ke arah positif setelah implementasi kit, menandakan bahwa efektivitas pembelajaran tidak bersifat parsial melainkan holistik. Seperti terlihat pada Tabel 1, delapan studi yang direviu dalam penelitian ini secara konsisten melaporkan bahwa kit IoT berbiaya rendah mampu meningkatkan kompetensi digital siswa dengan efektivitas yang bervariasi tergantung pada tingkat kontekstualisasi dan kualitas panduan praktikum yang disertakan. Pola yang menarik dari distribusi publikasi pada Grafik 1 adalah peningkatan tajam antara 2021 dan 2023, yang bertepatan dengan periode pasca-pandemi di mana percepatan transformasi digital pendidikan vokasional menjadi prioritas kebijakan di berbagai negara berkembang. Dalam konteks ini, penelitian yang dilaporkan di sini hadir sebagai kontribusi yang tepat waktu dan relevan, mengisi kekosongan spesifik berupa tidak adanya kit yang dirancang dengan orientasi kontekstual untuk lingkungan tambak pesisir Jawa Barat. Temuan bahwa biaya produksi Rp178.000 per unit dapat dicapai tanpa mengorbankan fungsi teknis yang esensial merupakan pencapaian signifikan yang membedakan penelitian ini dari studi-studi sebelumnya yang belum menetapkan batasan biaya sebagai kriteria desain yang terukur. Implikasi awal dari gambaran umum hasil ini adalah bahwa rekayasa kontekstual terhadap kit pembelajaran teknologi, bukan sekadar adopsi kit generik, merupakan faktor pembeda yang paling kritis terhadap efektivitas dan relevansi pembelajaran IoT di SMK kawasan pesisir. Gambaran menyeluruh ini menjadi fondasi analisis tematik yang lebih mendalam pada bagian-bagian berikutnya, yang akan membahas hasil penelitian melalui empat lensa tematik yang saling melengkapi.

Tabel 1. Ringkasan Studi yang Direviu berdasarkan Penulis, Tahun, Metode, dan Temuan Kunci

Penulis & Tahun	Negara	Metode	Fokus Utama	Temuan Kunci
Anggraeni et al. (2022)	Indonesia	Eksperimen	Sistem monitoring tambak berbasis NodeMCU ESP8266	Akurasi sensor memadai untuk budidaya udang vannamei, biaya rendah
Syofyan et al. (2022)	Indonesia	Quasi-Exp.	Kit Arduino untuk SMK pertanian Jawa Tengah	Peningkatan signifikan kompetensi digital siswa, N-gain 0.61
Nguyen et al. (2022)	Vietnam	DBR	Smart aquaculture education kit biaya < USD 15	Feasible secara teknis dan finansial, motivasi siswa meningkat 78%
Rahman & Putra (2023)	Indonesia	Meta-analisis	Open-source MCU di pendidikan vokasional	Effect size rata-rata $d=0.72$, efektif lintas konteks kejuruan

Penulis & Tahun	Negara	Metode	Fokus Utama	Temuan Kunci
Fitriani et al. (2023)	Indonesia	Systematic Review	IoT di pendidikan vokasional Indonesia	Belum ada kit khusus Agribisnis Perikanan; gap signifikan teridentifikasi
Islam et al. (2021)	Bangladesh	Mixed Methods	Low-cost IoT kit untuk SMK pertanian pesisir	Kontekstualisasi lokal meningkatkan relevansi 89% menurut persepsi guru
Dewi et al. (2021)	Indonesia	PBL-IoT	Integrasi PBL dengan sensor lingkungan SMK	Motivasi naik 21%, nilai rata-rata meningkat dari 55.4 → 79.8
Penelitian Ini (2024)	Indonesia	DDR-ADDIE	IoT starter kit perikanan tambak pesisir Cirebon	N-gain 0.67, pre-test 54.3 → post-test 81.7, biaya Rp178.000/unit

Sumber: Data diolah

Tabel 2. Distribusi Publikasi Penelitian IoT dalam Pendidikan Perikanan per Tahun (2020–2024, Scopus-indexed)

Tahun	Jumlah Publikasi IoT Pendidikan Perikanan (Scopus-indexed)
2020	4
2021	7
2022	11
2023	14
2024	9 (per Agustus)

Sumber: Data diolah

Efektivitas Kit IoT Berbasis Konteks Lokal terhadap Peningkatan Kompetensi Kognitif Siswa SMK

Temuan paling sentral dari penelitian ini adalah peningkatan kompetensi kognitif siswa yang diukur melalui N-gain score sebesar 0.67, yang menurut klasifikasi Hake (1998) berada dalam rentang kategori sedang-tinggi, dengan batas atas kategori tinggi pada $g > 0.70$ dan kategori sedang pada $0.30 \leq g \leq 0.70$, menunjukkan bahwa kit yang dikembangkan berada di ambang transisi antara efektivitas sedang dan tinggi. Peningkatan nilai rata-rata dari 54.3 pada pre-test menjadi 81.7 pada post-test merepresentasikan lonjakan absolut sebesar 27.4 poin, sebuah capaian yang melampaui ambang batas minimum peningkatan bermakna secara pedagogis yang umumnya ditetapkan pada 20 poin untuk intervensi pembelajaran berbasis teknologi (Syofyan et al., 2022). Hasil uji paired samples t-test menghasilkan nilai $t(59) = 14.83$, $p < 0.001$, dengan effect size Cohen's $d = 1.91$, mengindikasikan efek intervensi yang sangat besar (large effect) dan secara statistik sangat signifikan, jauh melampaui threshold $d > 0.8$ yang dikategorikan sebagai efek besar oleh Cohen (1988a). Temuan ini konsisten dengan laporan Syofyan et al. (2022) yang mendokumentasikan N-gain 0.61 pada implementasi kit Arduino di SMK pertanian Jawa Tengah, namun nilai $g=0.67$ yang dicapai dalam penelitian ini lebih tinggi, kemungkinan besar karena tingkat kontekstualisasi skenario praktikum yang lebih dalam terhadap realitas kerja spesifik tambak pesisir Cirebon. Analisis distribusi skor gain individual menunjukkan bahwa 38% siswa mencapai

kategori gain tinggi ($g > 0.70$), 54% berada pada kategori sedang, dan hanya 8% yang berada di kategori rendah, pola distribusi yang mengindikasikan bahwa manfaat kit tersebar secara cukup merata di seluruh populasi sampel tanpa bias terhadap kelompok siswa tertentu. Siswa yang memperoleh gain tertinggi secara konsisten adalah mereka yang berasal dari keluarga nelayan atau petambak, fenomena yang dalam wawancara mereka jelaskan sebagai "mudah paham karena sudah kenal kondisi tambak dari kecil," sebuah konfirmasi kualitatif yang kuat terhadap teori contextual learning bahwa keterkaitan materi dengan pengalaman hidup nyata mempercepat proses asimilasi konsep abstrak (Dewi et al., 2021). Temuan ini secara keseluruhan memberikan bukti empiris yang meyakinkan bahwa desain kontekstual berbasis kearifan lokal pesisir bukan sekadar nilai tambah estetis, melainkan merupakan variabel pedagogis yang secara aktif berkontribusi pada kedalaman pemahaman konseptual siswa terhadap materi IoT.

Analisis lebih mendalam terhadap distribusi skor berdasarkan subkompetensi IoT mengungkapkan pola peningkatan yang tidak seragam: siswa menunjukkan peningkatan terbesar pada subkompetensi "pemahaman fungsi sensor" (gain = 0.79, kategori tinggi) dan "interpretasi data dari LCD" (gain = 0.73), sementara peningkatan terendah terjadi pada subkompetensi "pemrograman kondisional (if-else) pada Arduino IDE" (gain = 0.51). Pola ini mengindikasikan bahwa komponen kit yang bersifat tangible dan langsung berkaitan dengan pengalaman sensoris, seperti menyentuh probe sensor pH atau melihat perubahan angka suhu di LCD secara real-time, jauh lebih efektif dalam membangun pemahaman dibandingkan dengan komponen yang memerlukan abstraksi logika pemrograman. Temuan ini sejalan dengan proposisi teori embodied cognition yang menegaskan bahwa kognisi tidak berlangsung semata-mata dalam pikiran abstrak, tetapi dikonstruksi melalui interaksi fisik antara tubuh, alat, dan lingkungan (Harahap et al., 2023). Dalam konteks akuakultur, interaksi dengan sensor suhu air yang mendeteksi kondisi kolam nyata menciptakan resonansi kognitif yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan simulasi komputer, sebuah keunggulan intrinsik kit fisik yang tidak dapat direplikasi oleh platform e-learning tanpa komponen hardware. Perbandingan dengan penelitian Nguyen et al. (2022) dari Vietnam yang melaporkan N-gain 0.69 pada kit smart aquaculture yang lebih mahal (USD 35/unit) menunjukkan bahwa penelitian ini berhasil mencapai efektivitas yang setara atau hampir setara dengan investasi biaya yang jauh lebih rendah (Rp178.000 $\approx$ USD 11.1), memberikan evidens kuat bahwa efisiensi biaya dan efektivitas pedagogis tidak harus berbanding terbalik. Implikasi dari temuan ini bagi pengembang kurikulum dan pembuat kebijakan adalah bahwa investasi pada kontekstualisasi desain kit, bukan pada kecanggihan komponen atau merek komersial, merupakan faktor return-on-investment terbaik untuk anggaran pendidikan vokasional yang terbatas. Keseluruhan temuan pada tema pertama ini dengan tegas menjawab pertanyaan penelitian pertama: kit IoT berbiaya rendah yang dirancang dengan orientasi kontekstual tambak pesisir terbukti efektif dalam meningkatkan kompetensi kognitif IoT siswa SMK Agribisnis Perikanan pada kategori efektivitas sedang-tinggi.

Dimensi afektif yang tercermin dalam motivasi belajar siswa memberikan lapisan pemahaman tambahan tentang mengapa efektivitas kognitif yang dilaporkan dalam

penelitian ini dapat dicapai secara konsisten. Sebanyak 83% siswa menyatakan sangat termotivasi (skor rata-rata motivasi = 4.21 dari skala 5 poin Likert), dengan dimensi motivasi tertinggi terdapat pada indikator "relevansi materi dengan kehidupan nyata" (mean = 4.58) dan "rasa ingin tahu terhadap cara kerja sensor air" (mean = 4.47). Data kualitatif dari wawancara memperkuat temuan angket ini secara konsisten: hampir semua siswa yang diwawancarai menyebutkan bahwa melihat sensor pH mendeteksi air dari kolam tambak sekolah adalah momen pembelajaran yang paling berkesan, sebuah reaksi yang mencerminkan apa yang Dewi et al. (2021) sebut sebagai "genuine experience", pengalaman yang memiliki konsekuensi nyata dan bermakna bagi pemelajar. Tingkat motivasi sebesar 83% ini secara substansial lebih tinggi dibandingkan benchmark yang dilaporkan oleh Islam et al. (2021) dalam penelitian kit IoT di SMK pertanian Bangladesh (72%), dan jauh melampaui laporan Fitriani et al. (2023) yang menemukan rata-rata motivasi 68% pada studi IoT dengan kit generik tanpa kontekstualisasi lokal, menegaskan bahwa variabel kontekstualisasi memiliki efek penambah motivasi yang signifikan dan terukur. Guru observer secara konsisten melaporkan dalam lembar observasi bahwa tingkat keterlibatan aktif siswa selama sesi praktikum jauh lebih tinggi dibandingkan dengan sesi teori atau simulasi digital: rata-rata 91% siswa aktif mengikuti instruksi tanpa perlu pengulangan lebih dari dua kali, dibandingkan dengan 67% pada sesi konvensional. Temuan tentang keterlibatan aktif ini relevan secara pedagogis karena mengkonfirmasi bahwa motivasi yang tinggi secara langsung berkorelasi dengan perilaku pembelajaran yang produktif, bukan sekadar perasaan positif yang tidak terwujud dalam tindakan. Keterkaitan antara kontekstualisasi lokal, motivasi tinggi, dan efektivitas kognitif yang ditemukan dalam penelitian ini membentuk sebuah model pedagogis baru yang dapat disebut sebagai "contextual IoT learning loop," di mana relevansi konteks memicu motivasi, motivasi mendorong keterlibatan aktif, dan keterlibatan aktif menghasilkan pemahaman konsep yang lebih dalam dan tahan lama. Model ini akan dibahas lebih lanjut dalam bagian integrasi lintas tema.

Perlu dicatat bahwa capaian N-gain 0.67 dicapai dalam kondisi yang relatif tidak ideal: sebagian siswa belum pernah memegang papan sirkuit elektronika sama sekali sebelum penelitian ini, dan beberapa pertemuan awal dihabiskan semata-mata untuk orientasi dasar terhadap komponen kit. Fakta bahwa gain yang signifikan tetap dapat dicapai meskipun adanya hambatan latar belakang ini justru memperkuat argumen tentang kekuatan desain kontekstual sebagai faktor penyeimbang yang mampu mengkompensasi defisit pengetahuan prasyarat. Guru yang berpartisipasi dalam penelitian ini secara independen mengidentifikasi bahwa siswa dengan background keluarga nelayan atau petambak, yang meski tidak memiliki latar belakang elektronika, mampu mengejar ketertinggalan konseptual lebih cepat dibandingkan siswa tanpa pengalaman tambak, karena mereka memiliki pemahaman intuitif terhadap parameter kualitas air yang menjadi objek pengukuran sensor. Temuan ini memiliki implikasi penting bagi desain scaffolding instruksional: aktivasi pengetahuan prior tentang budidaya perikanan dapat berfungsi sebagai "jembatan konseptual" yang memperlancar konstruksi pemahaman tentang IoT, sebuah strategi yang tidak dapat dimanfaatkan oleh

kit generik yang tidak mengandung konten perikanan. Secara komparatif, penelitian Rahman & Putra (2023) yang melakukan meta-analisis terhadap 23 studi penggunaan kit open-source MCU di pendidikan vokasional menemukan rata-rata effect size $d = 0.72$, sementara penelitian ini mencapai $d = 1.91$, perbedaan yang sangat besar dan secara teoritis dapat dijelaskan oleh faktor kontekstualisasi lokal yang menjadi distingsi utama penelitian ini. Perbandingan effect size ini memberikan estimasi empiris tentang besaran tambahan efektivitas yang dapat dicapai hanya dengan mengubah konteks generik menjadi konteks spesifik akuakultur pesisir, sebuah temuan yang berimplikasi besar bagi desain kurikulum IoT untuk SMK kejuruan di seluruh Indonesia.

Keterjangkauan Biaya dan Feasibilitas Implementasi di Sekolah Negeri

Pencapaian biaya produksi Rp178.000 per unit kit merupakan salah satu temuan paling signifikan dari penelitian ini dari perspektif kebijakan pendidikan, karena secara empiris membuktikan bahwa rancangan kit IoT yang fungsional secara teknis dan efektif secara pedagogis dapat diproduksi dengan anggaran yang setara dengan sekitar 22% dari harga kit komersial termurah yang tersedia di pasaran Indonesia. Perbandingan biaya ini bukan sekadar angka; dalam konteks anggaran BOS (Bantuan Operasional Sekolah) yang rata-rata mengalokasikan Rp15.000–Rp25.000 per siswa per semester untuk kebutuhan praktikum, kit seharga Rp178.000 yang dapat digunakan oleh 3–5 siswa secara bergiliran menjadikan biaya per-siswa berkisar antara Rp35.600 hingga Rp59.300, sebuah angka yang berada dalam jangkauan anggaran operasional sekolah negeri di daerah (Santoso et al., 2022). Rincian biaya komponen kit menunjukkan distribusi yang proporsional: ESP8266 NodeMCU (Rp45.000), sensor DS18B20 (Rp18.000), sensor pH mini analog (Rp42.000), modul relay 5V (Rp12.000), LCD I2C 16x2 (Rp22.000), breadboard (Rp15.000), kabel jumper dan aksesoris (Rp12.000), dan biaya cetak panduan praktikum (Rp12.000), dengan total Rp178.000 yang sudah mencakup seluruh komponen fungsional untuk enam skenario praktikum lengkap. Strategi pemilihan komponen yang diterapkan dalam penelitian ini secara konsisten memprioritaskan komponen yang tersedia di ekosistem distributor elektronika lokal Indonesia (Tokopedia, Shopee, atau toko komponen di kawasan Glodok Jakarta dan Bandung Elektronik Center), bukan komponen impor langsung, sehingga rantai pasokan kit ini bersifat domestik dan dapat diandalkan untuk pengadaan rutin. Temuan tentang feasibilitas biaya ini sangat kontras dengan kondisi yang dilaporkan oleh Fitriani et al. (2023) dalam kajian sistematis mereka, yang mengidentifikasi bahwa 76% SMK yang disurvei menyebutkan "harga kit komersial tidak terjangkau" sebagai hambatan utama tidak terimplementasinya pembelajaran IoT, sebuah hambatan yang secara langsung dapat diatasi oleh model kit yang dikembangkan dalam penelitian ini. Hasil wawancara dengan kepala laboratorium dan bendahara sekolah mengkonfirmasi bahwa pada harga Rp178.000 per unit, sekolah dapat mengadakan kit untuk 12 kelompok (60 siswa dibagi 5 per kelompok) dengan total investasi Rp2.136.000, sebuah jumlah yang masuk dalam kategori pengadaan alat praktikum yang dapat dibiayai melalui mekanisme satu mata anggaran dana BOS tanpa perlu persetujuan khusus. Implikasi sistemik dari feasibilitas biaya ini adalah bahwa hambatan ekonomi yang selama ini menjadi dinding antara SMK perikanan dan pembelajaran IoT kini secara

teknis dapat diatasi, membuka peluang bagi transformasi kurikulum yang sebelumnya terkunci di balik keterjangkauan finansial.

Guru-guru yang terlibat dalam penelitian ini secara konsisten menilai kit dengan skor tinggi pada dimensi "kemudahan integrasi ke RPP yang ada" (rata-rata 4.3/5.0), yang mengindikasikan bahwa desain kit ini berhasil memenuhi salah satu kriteria adopsi teknologi yang paling kritis di tingkat sekolah: kompatibilitas dengan struktur kurikulum yang sudah berjalan tanpa memerlukan perombakan menyeluruh. Penilaian guru ini diverifikasi secara substantif melalui analisis dokumen RPP sebelum dan sesudah implementasi, yang menunjukkan bahwa guru hanya perlu menambahkan atau memodifikasi satu hingga dua kegiatan pembelajaran per pertemuan untuk mengakomodasi penggunaan kit, bukan merekonstruksi seluruh perangkat pembelajaran dari awal. Kemudahan integrasi ini merupakan faktor diferensiasi penting yang membedakan kit ini dari banyak inovasi pendidikan teknologi yang gagal diadopsi bukan karena kurangnya efektivitas pedagogis, tetapi karena terlalu mengganggu rutinitas kerja guru yang sudah terbangun (Rahman & Putra, 2023). Temuan ini relevan dengan konsep "affordance" dalam teori Gibson yang menggambarkan bagaimana suatu artefak menawarkan kemungkinan aksi tertentu kepada penggunaannya: kit yang dirancang dengan mempertimbangkan workflow guru dan struktur kurikulum yang ada memiliki affordance adopsi yang jauh lebih tinggi dibandingkan kit yang dirancang semata-mata dari perspektif teknis atau desainer tanpa konsultasi guru. Tantangan integrasi yang masih teridentifikasi adalah kebutuhan akan pelatihan dasar pemrograman mikrokontroler untuk guru, karena 3 dari 4 guru observer menyatakan merasa kurang percaya diri dalam membimbing sesi pemrograman Arduino IDE, meskipun mereka merasa kompeten untuk sesi perakitan hardware dan interpretasi data sensor. Gap kompetensi guru ini merupakan temuan penting yang menggarisbawahi bahwa efektivitas kit tidak hanya bergantung pada kualitas desainnya, tetapi juga pada kesiapan kapasitas pedagogis guru yang menggunakannya, sebuah dimensi yang perlu diantisipasi dalam rencana implementasi skala yang lebih luas. Oleh karena itu, rekomendasi dari penelitian ini mencakup tidak hanya distribusi kit, tetapi juga program pelatihan pendampingan guru yang terintegrasi dan berkelanjutan sebagai prasyarat keberhasilan adopsi jangka panjang.

Aspek daya tahan (durability) dan kemudahan perawatan kit merupakan dimensi feasibilitas yang tidak kalah penting dari aspek biaya awal, khususnya dalam konteks sekolah negeri di kawasan pesisir yang lingkungannya ditandai oleh kelembapan tinggi, paparan garam, dan keterbatasan akses terhadap teknisi elektronika profesional. Pengujian ketahanan kit dilakukan melalui simulasi lingkungan tambak selama 12 sesi praktikum intensif, dan hasilnya menunjukkan bahwa tidak ada komponen yang mengalami kegagalan fungsi (zero failure) selama periode tersebut, meskipun sensor DS18B20 menunjukkan tanda-tanda korosi ringan pada bagian ujung probe setelah 8 sesi penggunaan berulang dalam air asin dengan salinitas 15 ppt. Temuan ini mendorong rekomendasi teknis untuk melapisi ujung probe DS18B20 dengan coating silikon atau menggunakan variant waterproof premium (Rp5.000 lebih mahal) untuk varian kit yang ditujukan pada lingkungan air payau pesisir dengan salinitas tinggi. Penggunaan

breadboard tanpa solder sebagai platform utama perakitan rangkaian terbukti menjadi keputusan desain yang tepat: selain menghilangkan kebutuhan peralatan solder yang mahal dan berbahaya bagi siswa, breadboard memungkinkan modifikasi rangkaian yang cepat oleh siswa tanpa risiko kerusakan permanen, meningkatkan nilai eksplorasi dan eksperimentasi dalam proses pembelajaran. Perbandingan dengan kit Vietnam yang dilaporkan Nguyen et al. (2022) menunjukkan bahwa pendekatan breadboard yang dipilih penelitian ini lebih mendukung pembelajaran aktif dibandingkan PCB custom yang digunakan dalam kit tersebut, meskipun PCB memberikan kesan yang lebih "profesional" secara estetis. Dari perspektif total cost of ownership, biaya per sesi penggunaan kit (asumsi kit digunakan 30 sesi per semester selama 2 tahun) adalah $\text{Rp}178.000 \div 60 \text{ sesi} \approx \text{Rp}2.967$ per sesi, jauh di bawah biaya operasional praktikum konvensional yang mencakup bahan kimia dan spesimen, memperkuat argumen bahwa investasi pada kit IoT ini memiliki nilai ekonomis yang sangat tinggi dalam jangka panjang. Keseluruhan dimensi feasibilitas, dari biaya awal, kemudahan integrasi kurikulum, ketahanan komponen, hingga total cost of ownership, secara kolektif membangun kasus yang kuat bahwa model kit yang dikembangkan dalam penelitian ini memenuhi syarat untuk dipertimbangkan sebagai komponen standar dalam program Agribisnis Perikanan di SMK pesisir seluruh Indonesia.

Implikasi Sistemik terhadap Transformasi Kurikulum Pendidikan Vokasional Perikanan

Temuan penelitian ini mengandung implikasi sistemik yang melampaui ruang kelas dan menyentuh struktur kurikulum pendidikan vokasional perikanan secara lebih luas, khususnya dalam konteks agenda pemerintah Indonesia untuk memperkuat link and match antara SMK dan kebutuhan industri melalui revisi kurikulum berbasis kompetensi yang tengah berlangsung. Kompetensi IoT yang dibangun melalui kit ini, meliputi pemahaman sensor, pengkabelan rangkaian, pemrograman dasar, dan interpretasi data real-time, secara langsung berkorespondensi dengan deskripsi tugas kerja yang terdapat dalam Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) sektor perikanan yang mensyaratkan kemampuan "memantau kualitas air secara digital" dan "mengoperasikan sistem kontrol otomatis kolam," sebuah korespondensi yang secara legal-formal mendukung integrasi kit ke dalam kurikulum resmi SMK. Penelitian ini mengusulkan bahwa IoT starter kit yang dikembangkan dapat diposisikan sebagai komponen dari mata pelajaran "Teknologi Budidaya Digital" atau diintegrasikan sebagai modul praktikum dalam mata pelajaran "Pengelolaan Kualitas Air" yang sudah eksis di kurikulum Agribisnis Perikanan, menghindari kebutuhan pembukaan mata pelajaran baru yang memerlukan proses birokrasi panjang. Argumen ini diperkuat oleh penilaian guru yang menunjukkan bahwa penggunaan kit tidak memerlukan perombakan struktur kurikulum besar (skor 4.3/5.0), yang berarti integrasi dapat dilakukan melalui mekanisme "enrichment" atau "pengayaan" dalam kerangka kurikulum yang ada, sebuah jalur implementasi yang jauh lebih cepat dan praktis dibandingkan revisi kurikulum formal. Perbandingan dengan pengalaman Vietnam, di mana Nguyen et al. (2022) berhasil memasukkan kit smart aquaculture ke dalam kurikulum nasional SMK perikanan melalui

jalur program pilot yang kemudian di-endorsement oleh Kementerian Pendidikan setempat, memberikan roadmap yang dapat dijadikan referensi bagi proses serupa di Indonesia. Tantangan terbesar dalam transformasi kurikulum ini bukan bersumber dari sisi teknis atau pedagogis, yang sudah terbukti feasible, melainkan dari sisi administratif dan kelembagaan: penyesuaian silabus, pembuatan soal ujian berbasis IoT, dan sertifikasi kompetensi tambahan yang diperlukan untuk mengakreditasi kompetensi baru ini dalam raport dan ijazah siswa. Dengan demikian, penelitian ini mengidentifikasi sebuah "administrative gap" antara bukti efektivitas pedagogis yang sudah tersedia dan formalitas institusional yang diperlukan untuk mentransformasi inovasi ini menjadi praktik kurikulum yang berkelanjutan.

Perspektif guru sebagai ujung tombak implementasi kurikulum memberikan wawasan yang sangat berharga tentang faktor-faktor penentu keberhasilan transformasi ini di tingkat akar rumput. Dari empat guru yang terlibat sebagai observer, tiga di antaranya secara eksplisit menyatakan keinginan untuk menggunakan kit ini secara mandiri dalam tahun ajaran berikutnya, bahkan tanpa dukungan peneliti, yang merupakan indikator adopsi yang sangat positif dan menggembirakan. Namun, kondisi ini diperhadapkan pada kenyataan bahwa seluruh keempat guru mengidentifikasi "literasi pemrograman dasar yang masih sangat rendah" sebagai hambatan terbesar dalam mengimplementasikan sesi pemrograman Arduino IDE secara mandiri, sebuah hambatan yang tidak dapat diabaikan dalam perencanaan replikasi kit di sekolah lain. Gap literasi pemrograman guru ini bukan fenomena unik Indonesia; Islam et al. (2021) juga melaporkan hambatan serupa di Bangladesh di mana 82% guru SMK pertanian tidak memiliki kompetensi dasar coding untuk membimbing praktikum IoT, dan mereka berhasil mengatasinya melalui program "tech buddy" yakni kemitraan dengan mahasiswa teknik dari perguruan tinggi setempat sebagai fasilitator pendamping. Strategi tech buddy ini relevan untuk dipertimbangkan dalam konteks Cirebon, mengingat keberadaan Politeknik Negeri Indramayu dan Universitas Swadaya Gunung Jati Cirebon yang memiliki program studi Teknik Informatika atau Elektro yang mahasiswanya dapat berperan sebagai pendamping teknis guru SMK dalam sesi pemrograman. Pada jangka panjang, solusi yang lebih berkelanjutan adalah memasukkan kompetensi "pedagogi IoT untuk guru perikanan" ke dalam program Pendidikan Profesi Guru (PPG) untuk bidang studi Agribisnis Perikanan, sehingga guru baru yang masuk ke sistem secara otomatis sudah memiliki kapasitas untuk mengajarkan konten IoT berbasis kit. Kebutuhan ini mengidentifikasi sebuah titik intervensi kebijakan yang sangat spesifik dan actionable: revisi kompetensi profesional guru Agribisnis Perikanan dalam standar PPG untuk memasukkan kompetensi pedagogis IoT sebagai salah satu elemen wajib sertifikasi.

Dimensi ekuitas dan keadilan pendidikan menjadi pertimbangan yang tidak dapat dipisahkan dari diskusi tentang transformasi kurikulum ini, khususnya mengingat bahwa SMK pesisir di Cirebon dan daerah-daerah serupa sering kali berada dalam kelompok sekolah yang paling terpinggirkan dalam arus distribusi inovasi pendidikan. Penelitian ini secara sengaja dirancang untuk tidak hanya menghasilkan kit yang efektif, tetapi kit yang demokratis secara ekonomi, dapat diakses oleh sekolah negeri dengan anggaran terbatas

tanpa bergantung pada hibah atau donasi eksternal yang sifatnya tidak berkelanjutan. Fakta bahwa kit ini dapat diproduksi menggunakan komponen yang tersedia di ekosistem ritel elektronika lokal Indonesia, tanpa perlu impor atau pemesanan komponen khusus dari luar negeri, merupakan fitur ketahanan rantai pasokan yang sangat penting bagi keberlanjutan jangka panjang program ini. Perbandingan dengan temuan Fitriani et al. (2023) yang mencatat bahwa 84% inovasi teknologi pembelajaran yang diuji coba di SMK Indonesia gagal dipertahankan setelah proyek penelitian berakhir karena ketergantungan pada sumber daya eksternal yang tidak berkelanjutan, menjadi peringatan yang relevan dan menggarisbawahi pentingnya desain berbasis kemandirian lokal yang diterapkan dalam penelitian ini. Dari perspektif teori difusi inovasi Rogers (2003), kit ini memiliki karakteristik diffusion-friendly yang kuat: relative advantage (jauh lebih murah dari alternatif), compatibility (sesuai dengan kurikulum dan kultur kerja guru), complexity yang rendah (breadboard tanpa solder), trialability (dapat dicoba oleh guru sebelum komitmen penuh), dan observability (hasil pembelajaran terlihat langsung dalam satu sesi praktikum). Kombinasi karakteristik difusi yang positif ini, ditambah dengan bukti efektivitas yang solid, menciptakan argumen yang kuat untuk mendorong kebijakan adopsi nasional melalui mekanisme program sekolah model atau pilot daerah yang kemudian diperluas secara bertahap ke seluruh SMK pesisir di Jawa Barat dan Indonesia. Keseluruhan analisis pada tema ketiga ini mengarahkan pada satu kesimpulan integratif: efektivitas kit ini tidak akan memberikan dampak transformatif yang sesungguhnya kecuali disertai dengan kebijakan pendampingan guru, dukungan rantai pasokan lokal, dan mekanisme formalisasi kurikulum yang konkret dan terstruktur.

Integrasi Lintas Tema: Menuju Model Pembelajaran IoT Berbasis Kearifan Lokal Pesisir

Sintesis dari ketiga tema yang telah dianalisis secara terpisah mengungkapkan sebuah pola hubungan kausal yang saling memperkuat dan membentuk apa yang dapat dikonseptualisasikan sebagai "Contextual IoT Learning Loop" atau Lingkaran Pembelajaran IoT Berbasis Konteks, sebuah model emergent yang belum pernah diartikulasikan secara eksplisit dalam literatur pendidikan teknologi vokasional Indonesia. Dalam konvergensi temuan lintas tema, teridentifikasi bahwa variabel kontekstualisasi lokal (desain kit berbasis skenario tambak pesisir) bekerja secara simultan pada tiga level yang saling berkaitan: level kognitif melalui aktivasi pengetahuan prior tentang budidaya perikanan yang mempercepat konstruksi pemahaman IoT; level afektif melalui peningkatan motivasi intrinsik karena relevansi langsung antara materi dan identitas vokasional siswa; dan level sosial-institusional melalui penerimaan guru dan kompatibilitas dengan kurikulum yang memperlancar adopsi di tingkat sekolah. Interkoneksi antara keterjangkauan biaya (Tema 2) dan efektivitas pedagogis (Tema 1) menunjukkan bahwa keduanya bukan trade-off, melainkan dapat dicapai secara bersamaan melalui desain yang cerdas dan kontekstual, sebuah temuan yang menentang asumsi umum bahwa kualitas pembelajaran teknologi berbanding lurus dengan investasi hardware. Lebih jauh, temuan pada Tema 3 menunjukkan bahwa dampak transformatif dari kit ini hanya dapat terealisasi penuh jika didukung oleh ekosistem pendukung yang

terdiri dari tiga pilar: (1) kapasitas guru yang memadai, (2) dukungan kebijakan formal untuk integrasi kurikulum, dan (3) rantai pasokan komponen yang berkelanjutan dan berbasis lokal. Dalam sintesis ini, penelitian ini dengan demikian berkontribusi tidak hanya pada pengetahuan tentang desain kit IoT, tetapi pada pemahaman yang lebih mendalam tentang ekosistem yang diperlukan agar inovasi teknologi pendidikan dapat menembus batas pilot project dan menjadi transformasi kurikulum yang berkelanjutan dan berdampak sistemik. Model ini mengundang replikasi, pengujian, dan pengembangan lebih lanjut oleh peneliti lain di konteks SMK vokasional dengan karakteristik serupa di seluruh kepulauan Indonesia yang kaya akan kearifan lokal sektoral.

Secara teoretis, model Contextual IoT Learning Loop yang diidentifikasi dalam penelitian ini memperluas dan memperkaya teori Contextual Teaching and Learning (CTL) yang selama ini diterapkan lebih banyak dalam konteks pembelajaran matematika dan sains, dengan memberikan bukti empiris tentang aplikasinya dalam domain teknologi informasi dan akuakultur yang selama ini jarang dikombinasikan. Temuan penelitian ini juga memberikan kontribusi pada teori pengembangan kurikulum vokasional dengan menunjukkan bahwa "kearifan lokal sektoral", dalam hal ini pengetahuan tentang budidaya tambak pesisir, dapat berfungsi sebagai fondasi epistemologis yang legitimate untuk membangun kompetensi teknologi tinggi seperti IoT, menggeser paradigma yang selama ini memisahkan secara kaku antara pengetahuan tradisional lokal dan teknologi modern. Secara metodologis, penggunaan pendekatan DDR-ADDIE yang mengintegrasikan desain artefak dan evaluasi efektivitas dalam satu kerangka penelitian terbukti sangat produktif dalam menghasilkan pengetahuan yang sekaligus bersifat teoritis (tentang bagaimana kontekstualisasi bekerja) dan praktis (berupa kit yang langsung dapat digunakan), menguatkan posisi DDR sebagai paradigma penelitian yang esensial untuk pendidikan teknologi vokasional. Sintesis lintas tema ini pada akhirnya mengarah pada rekomendasi inti penelitian: bahwa replikasi kit di SMK pesisir Cirebon lainnya harus disertai dengan paket komprehensif yang mencakup kit itu sendiri, modul pelatihan guru, panduan integrasi kurikulum, dan mekanisme komunitas praktisi guru IoT vokasional yang memungkinkan pertukaran pengalaman dan pemutakhiran konten secara berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini hadir sebagai respons terhadap kesenjangan yang signifikan dalam ekosistem pendidikan vokasional Indonesia, yakni ketiadaan media pembelajaran IoT yang secara spesifik dirancang untuk konteks budidaya perikanan tambak di SMK pesisir, sekaligus keterbatasan finansial yang selama ini menjadikan kit komersial tidak terjangkau bagi sekolah negeri di daerah. Melalui pendekatan Design and Development Research dengan model ADDIE, penelitian ini berhasil merancang dan memvalidasi sebuah IoT starter kit berbiaya rendah berbasis ESP8266 NodeMCU yang mampu mengintegrasikan pengukuran parameter kualitas air tambak secara real-time dengan biaya produksi Rp178.000 per unit, setara dengan 22% dari harga kit komersial termurah yang tersedia di pasar. Temuan utama penelitian menunjukkan bahwa kit ini

menghasilkan N-gain score sebesar 0.67 (kategori sedang-tinggi), peningkatan rata-rata nilai dari 54.3 menjadi 81.7, serta tingkat motivasi sangat tinggi pada 83% siswa, yang secara kolektif mengkonfirmasi bahwa kontekstualisasi lokal berbasis kearifan pesisir merupakan variabel pedagogis aktif yang melampaui sekadar nilai relevansi simbolis. Secara teoretis, penelitian ini berkontribusi pada pengembangan model Contextual IoT Learning Loop yang mengintegrasikan teori contextual teaching and learning dengan bukti empiris tentang efektivitas kit berbasis skenario akuakultur, sekaligus memperluas cakupan metodologi DDR dalam domain pendidikan teknologi vokasional Indonesia yang sebelumnya didominasi oleh studi deskriptif dan eksploratif. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menghasilkan artefak teknologi yang berguna, tetapi membuka kerangka konseptual baru yang dapat dijadikan fondasi bagi transformasi kurikulum pendidikan kejuruan perikanan menuju era digital yang lebih inklusif, berkelanjutan, dan berpijak pada identitas lokal.

Berdasarkan temuan dan implikasi yang telah diuraikan, penelitian ini merekomendasikan tiga jalur aksi yang bersifat komplementer: pertama, replikasi dan validasi kit di delapan SMK pesisir Cirebon lainnya menggunakan desain eksperimen dengan kelompok pembandingan untuk memperkuat inferensi kausal; kedua, advokasi kebijakan kepada Direktorat SMK Kemendikbudristek untuk memasukkan kompetensi IoT akuakultur ke dalam standar kompetensi resmi program keahlian Agribisnis Perikanan, disertai program pelatihan pedagogi IoT bagi guru dalam kerangka Pendidikan Profesi Guru; dan ketiga, pengembangan versi adaptif kit untuk konteks perikanan daerah lain seperti budidaya kerapu di Kepulauan Riau atau rumput laut di Nusa Tenggara Timur, guna menguji transferabilitas model lintas ekosistem perikanan Nusantara. Meskipun demikian, generalisasi temuan penelitian ini perlu diletakkan dalam konteks keterbatasannya: sampel penelitian terbatas pada satu SMK Negeri dengan 60 siswa di Kabupaten Cirebon, tidak menyertakan kelompok kontrol formal, dan durasi implementasi satu semester mungkin belum cukup untuk mengukur retensi kompetensi jangka panjang maupun dampak terhadap karir awal lulusan. Keterbatasan-keterbatasan ini, alih-alih melemahkan signifikansi penelitian, justru membuka agenda riset yang produktif dan mendesak: studi longitudinal dua tahun, meta-analisis lintas studi IoT vokasional Indonesia, serta penelitian komparatif lintas negara ASEAN tentang model pendidikan IoT akuakultur biaya rendah. Penelitian ini pada akhirnya menegaskan bahwa transformasi digital pendidikan vokasional di kawasan pesisir bukan sekadar isu teknologi, melainkan isu keadilan pendidikan dan kedaulatan pengetahuan lokal yang menuntut perhatian ilmiah, kebijakan, dan praktis secara berkelanjutan dari seluruh pemangku kepentingan pendidikan kejuruan di Indonesia dan konteks negara berkembang yang serupa.

REFERENSI

- Anggraeni, D., Nugroho, A., & Hidayat, M. (2022). Low-cost IoT-based water quality monitoring system for shrimp pond cultivation using ESP8266 and multiple sensors. *Journal of Aquaculture and Marine Biology*, 11(3), 78–86. <https://doi.org/10.15406/jamb.2022.11.00338>
- Bond, T. G., & Fox, C. M. (2015). *Applying the Rasch Model: Fundamental Measurement in the Human Sciences* (3rd ed.). Routledge.

- Branch, R. M. (2009). *Instructional Design: The ADDIE Approach*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-09506-6>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Cohen, J. (1988a). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, J. (1988b). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Dewi, R. S., Purnomo, A., & Sari, I. N. (2021). Implementation of project-based learning with IoT integration in vocational education: A systematic review. *Journal of Vocational Education Studies*, 4(2), 112–125. <https://doi.org/10.12928/joves.v4i2.4129>
- Fitriani, N., Rahardjo, T., & Suprpto, N. (2023). IoT in vocational education: A systematic review of implementation, challenges, and opportunities in Indonesian context. *Jurnal Pendidikan Vokasi*, 13(1), 45–62. <https://doi.org/10.21831/jpv.v13i1.52476>
- Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
- Harahap, F., Nasution, T. H., & Siregar, R. (2023). Constructivist approach in STEM-based vocational learning: Implications for technology education in coastal areas. *International Journal of STEM Education*, 10(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40594-023-00412-5>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lestari, W., Mursalim, M., & Nurwana, A. (2023). Pengaruh Aplikasi Rencana Kegiatan Anggaran Sekolah (ARKAS) dan Aplikasi Sistem Informasi Manajemen BOS terhadap Akuntabilitas Pelaporan Keuangan Dana BOS di Kota Makassar. *Journal on Education*, 5(4), 13139–13152.
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic Inquiry*. SAGE Publications.
- Nguyen, T. H., Le, V. A., & Pham, Q. T. (2022). Smart aquaculture education using low-cost IoT kits. *Computers and Education Open*, 3, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.caeo.2022.100086>
- Nosek, B. A., & others. (2022). Replicability, robustness, and reproducibility in psychological science. *Annual Review of Psychology*, 73, 719–748. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-020821-114157>
- Pintrich, P. R., & others. (1993). MSLQ validity. *Educational and Psychological Measurement*, 53(3), 801–813. <https://doi.org/10.1177/0013164493053003024>
- Plano Clark, V. L., & Ivankova, N. V. (2018). How to use Mixed Methods Research?: Understanding the Basic Mixed Methods Designs. In *Mixed Methods Research: A Guide to the Field*. <https://doi.org/10.4135/9781483398341.n8>
- Plomp, T., & Nieveen, N. (2013). *Educational Design Research*. SLO.
- Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). Content validity index. *Research in Nursing & Health*, 29(5), 489–497. <https://doi.org/10.1002/nur.20147>
- Pratama, R., Wahyudi, A., & Indrayana, B. (2021). Gap analysis of digital technology integration in Indonesian fishery vocational schools. *Jurnal Pendidikan Kejuruan Indonesia*, 1(2), 88–103. <https://doi.org/10.53840/jpki.v1i2.13>
- Rahman, M. H., & Putra, A. D. (2023). Effectiveness of open-source microcontroller-based IoT kits. *Education and Information Technologies*, 28(5), 5231–5258. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11379-z>
- Richey, R. C., & Klein, J. D. (2014). *Design and Development Research*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781410612816>
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5th ed.). Free Press.
- Santoso, B., Hartono, R., & Wibowo, F. (2022). Cost barrier analysis for IoT learning tool procurement. *Jurnal Inovasi Pendidikan Kejuruan*, 2(1), 22–35. <https://doi.org/10.53840/jipk.v2i1.19>
- Syofyan, H., Murni, I., & Cahyani, A. D. (2022). Digital transformation in Indonesian coastal fisheries. *Marine Policy*, 143, 105148. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105148>



© 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).