



JURNAL PADAMU NEGERI

Halaman Jurnal: <https://journal.smartpublisher.id/index.php/jpn>Halaman UTAMA Jurnal : <https://journal.smartpublisher.id/>DOI: <https://doi.org/10.69714/k3ddnt55>

PENERAPAN PROJECT-BASED LEARNING DALAM PENGEMBANGAN MODUL AJAR DAN ASESMEN SISTEM IRIGASI DENGAN PEMILIHAN JALUR ALIRAN AIR YANG OPTIMAL DAN EFISIEN

Adinda Putri Maulidya^{a*}, Nafisania Intan Sutarno^b, Anastasia Eka Budi^c, Elsa Yulisya Febiyanti^d,
Yurizka Melia Sari^e

^a Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam / Pendidikan Matematika; adinda.23102@mhs.unesa.ac.id,
Universitas Negeri Surabaya; Jl. Ketintang, Surabaya, Jawa Timur

^b Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/ Pendidikan Matematika; nafisania.23100@mhs.unesa.ac.id,
Universitas Negeri Surabaya; Jl. Ketintang, Surabaya, Jawa Timur

^c Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam / Pendidikan Matematika; annastasia.23101@mhs.unesa.ac.id,
Universitas Negeri Surabaya; Jl. Ketintang, Surabaya, Jawa Timur

^d Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam / Pendidikan Matematika; elsa.23243@mhs.unesa.ac.id, Universitas
Negeri Surabaya; Jl. Ketintang, Surabaya, Jawa Timur

^e Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam / JPendidikan Matematika; yurizkasari@unesa.ac.id, Universitas
Negeri Surabaya; Jl. Ketintang, Surabaya, Jawa Timur

* Penulis Korespondensi: Adinda Putri Maulidya

ABSTRACT

Mathematics education in the Merdeka Curriculum era is required to develop students' critical thinking and problem solving skills through real world contexts, one of which is water scarcity and irrigation system efficiency a critical challenge in agriculture. This study aims to develop and validate a teaching module and assessment instrument based on Project-Based Learning (PjBL) with a STEM approach. The developed materials integrate mathematical optimization concepts, specifically the shortest path and network flow, to determine water flow routes in irrigation systems through the "Mini Irrigation Path" project. This study employed a Research and Development (R&D) approach using the ADDIE model, limited to the Development phase, targeting 10th-grade high school students studying linear functions. Data were collected using expert validation sheets for subject matter and media across 35 indicators, which were subsequently analyzed using Aiken's V validity index. The results revealed that 33 out of 35 indicators achieved a V value > 0.80, with 16 indicators reaching absolute agreement ($V = 1.0000$). The remaining two indicators fell into the moderate validity category but remained statistically significant and were revised by incorporating visual scaffolding and restructuring project instructions. The overall average Aiken's V index was 0.8952, categorizing the products as highly valid. In conclusion, the developed STEM-PjBL based teaching module and assessment instrument are valid and feasible to support contextual mathematics learning, the implementation of Merdeka Curriculum, and the achievement of SDGs 2, 4, and 6.

Keywords: *Mathematics Education; Merdeka Curriculum; STEM-PjBL; Shortest Path; Network Flow; Irrigation System; Aiken's V Index; ADDIE Model*

Abstrak

Pendidikan matematika di era Kurikulum Merdeka dituntut untuk mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah melalui konteks nyata, salah satunya adalah isu kelangkaan air dan efisiensi sistem irigasi yang menjadi tantangan penting di bidang pertanian. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan memvalidasi modul ajar serta perangkat asesmen berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) dengan pendekatan STEM yang mengintegrasikan konsep optimasi matematika, yaitu *shortest path* dan *network flow*, dalam konteks penentuan jalur aliran air pada sistem irigasi melalui proyek "Jalur Irigasi Mini". Penelitian menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan model ADDIE yang

dibatasi hingga tahap *Development*, dengan sasaran pengguna siswa kelas X SMA pada materi fungsi linier. Data dikumpulkan melalui lembar validasi ahli materi dan ahli media terhadap 35 indikator, kemudian dianalisis menggunakan indeks validitas Aiken's V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 33 dari 35 indikator memperoleh nilai $V > 0,80$ dengan 16 indikator mencapai kesepakatan mutlak ($V = 1,0000$), sedangkan dua indikator lainnya berkategori validitas sedang namun tetap signifikan secara statistik dan telah direvisi melalui penambahan *scaffolding* visual serta restrukturisasi instruksi proyek. Rata-rata indeks Aiken's V yang diperoleh sebesar 0,8952 dengan kategori validitas tinggi. Dapat disimpulkan bahwa modul ajar dan perangkat asesmen berbasis STEM-PjBL yang dikembangkan valid dan layak digunakan untuk mendukung pembelajaran matematika kontekstual, implementasi Kurikulum Merdeka, serta pencapaian SDGs Tujuan 2, 4, dan 6.

Kata Kunci: Kurikulum Merdeka; Pendidikan Matematika; STEM-PjBL; Jalur Terpendek (*Shortest Path*); Aliran Jaringan (*Network Flow*); Sistem Irigasi; Indeks Aiken's V; Model ADDIE

1. PENDAHULUAN

Pendidikan di era Revolusi Industri 4.0 menuntut pembelajaran STEM yang mampu membekali siswa dengan keterampilan menghadapi perkembangan teknologi. Selain itu, pembelajaran juga perlu membekali siswa dalam menghadapi permasalahan lingkungan. Pemanfaatan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT) dan kecerdasan buatan (AI) menjadi salah satu bagian penting dalam mendukung inovasi dan efisiensi berkelanjutan [1]. Dalam pendidikan matematika, pembelajaran tidak hanya berfokus pada penguasaan rumus, tetapi juga perlu mengembangkan kemampuan berpikir kritis dan pemecahan masalah melalui penerapan konsep matematika pada permasalahan nyata [2]. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah *Project-Based Learning* (PjBL), karena dapat menghubungkan teori dengan proyek kontekstual sekaligus mendorong kolaborasi dan kreativitas siswa [3]. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan PBL dengan mengintegrasikan konsep optimasi matematika, seperti algoritma graf dan efisiensi aliran, dalam konteks permasalahan irigasi berkelanjutan sebagai upaya menciptakan pembelajaran matematika yang lebih kontekstual dan bermakna.

Kelangkaan air menjadi isu penting pada abad ke-21 karena sektor pertanian menggunakan sekitar 70% sumber daya air global. Kondisi ini secara langsung memengaruhi ketahanan pangan, mengingat pertanian sangat bergantung pada ketersediaan air. Penggunaan sistem irigasi konvensional yang belum efisien dapat menyebabkan kehilangan air melalui evaporasi dan limpasan, sehingga berdampak pada produktivitas pertanian, terutama di daerah rawan kekeringan [4]. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya inovasi dalam pengelolaan irigasi, salah satunya melalui penerapan konsep matematika seperti *shortest path* dan *network flow* untuk menentukan jalur distribusi air yang lebih optimal [5]. Berdasarkan United Nations 2015, upaya peningkatan efisiensi penggunaan air dalam sektor pertanian juga sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya Tujuan 2 tentang ketahanan pangan dan Tujuan 6 tentang pengelolaan air berkelanjutan.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa konsep *Precision Irrigation* (PI), seperti *drip irrigation* dan *deficit irrigation*, memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dibandingkan dengan sistem irigasi tradisional. Penerapan pendekatan tersebut dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 51% melalui pengaturan pemberian air yang lebih tepat sesuai dengan kebutuhan tanaman [6]. Selain itu, integrasi *Internet of Things* (IoT) dan *machine learning* (ML) memungkinkan kebutuhan air tanaman diprediksi secara *real-time* berdasarkan berbagai parameter lingkungan, seperti kelembapan tanah, suhu, dan curah hujan. Salah satu model yang mengombinasikan *Linear Regression* (LR) dan *Random Forest* (RF) dilaporkan mencapai tingkat akurasi sebesar 96,34% dalam mendukung prediksi kebutuhan irigasi [7]. Pengembangan sistem irigasi cerdas tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan data dan teknologi komputasi dapat mendukung pengelolaan sumber daya air yang lebih presisi dan berkelanjutan. Studi mengenai penerapan teknologi dan pendekatan optimasi dalam pengelolaan irigasi juga menunjukkan adanya peluang peningkatan produktivitas pertanian melalui pengalokasian air yang lebih efisien [8]. Temuan-temuan tersebut memperlihatkan bahwa integrasi teknologi irigasi presisi dan optimasi matematika berpotensi untuk dikontekstualisasikan pada permasalahan pengelolaan air di lahan pertanian Indonesia.

Keberhasilan penerapan *Project-Based Learning* (PjBL) dalam pendidikan STEM sangat bergantung pada desain modul ajar dan sistem asesmen yang mampu mendukung pembelajaran kontekstual. Modul ajar yang mengintegrasikan konsep optimasi matematika dengan permasalahan nyata, seperti pengelolaan sistem

irigasi berkelanjutan, dapat memberikan kesempatan kepada siswa untuk menerapkan pengetahuan matematis dalam penyelesaian masalah autentik. Pendekatan pembelajaran semacam ini berpotensi menciptakan pengalaman belajar yang lebih bermakna sekaligus memperkuat pemahaman konseptual siswa [9]. Namun, penerapan PjBL juga memerlukan sistem penilaian yang mampu mengevaluasi tidak hanya hasil akhir, tetapi juga proses berpikir, kolaborasi, pengambilan keputusan, dan refleksi siswa selama menyelesaikan proyek. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan desain asesmen berbasis teknologi dengan memanfaatkan media interaktif, seperti *game* edukatif, untuk mengukur keterampilan dan motivasi siswa secara lebih komprehensif. Penggunaan lingkungan digital interaktif dalam asesmen berpotensi memberikan informasi yang lebih rinci mengenai proses dan pola pemecahan masalah siswa dibandingkan dengan tes konvensional [10].

Artikel ini berfokus pada pengembangan dan validasi modul ajar serta desain asesmen berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) dalam konteks optimasi jalur aliran air pada sistem irigasi. Perangkat pembelajaran dikembangkan untuk menghubungkan konsep optimasi matematika dengan permasalahan nyata melalui pembelajaran STEM yang kontekstual. Validasi ahli dilakukan untuk menilai kesesuaian isi, kejelasan penyajian, kelayakan asesmen, dan keterpaduan pendekatan PjBL. Hasil penelitian diharapkan menghasilkan perangkat pembelajaran yang valid serta mendukung implementasi Kurikulum Merdeka dan pencapaian SDGs di bidang pendidikan dan keberlanjutan lingkungan

2. METODOLOGI PENELITIAN

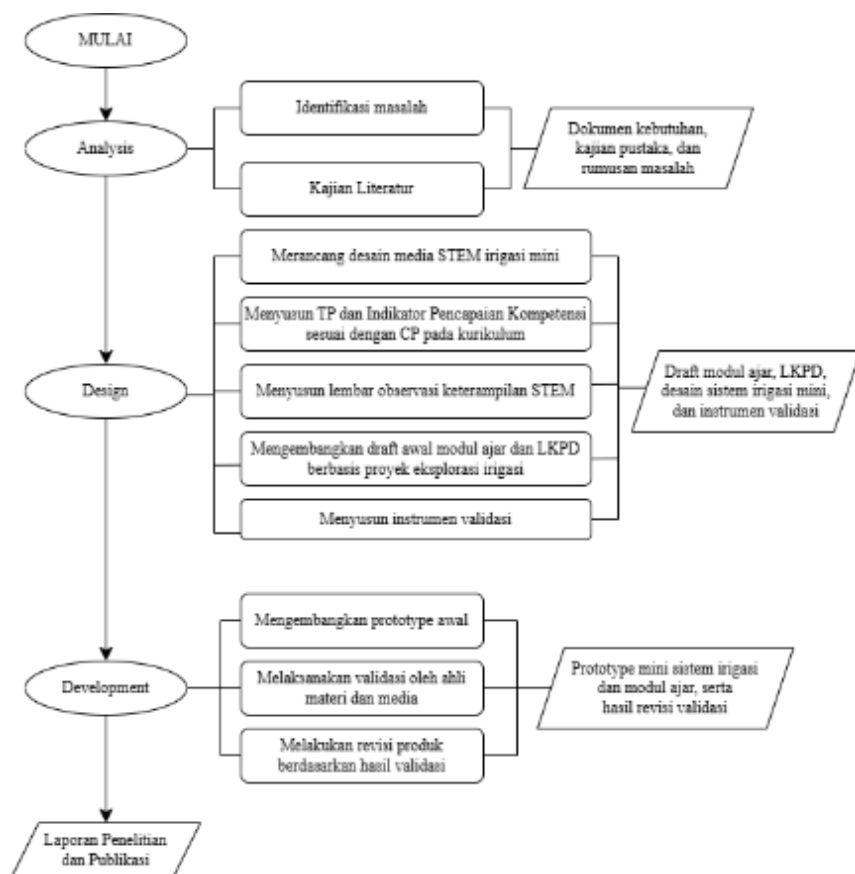
2.1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan ADDIE yang terdiri atas tahap *Analysis*, *Design*, *Development*, *Implementation*, dan *Evaluation*. Namun, penelitian ini dibatasi hingga tahap *Development* karena berfokus pada pengembangan produk awal berupa modul ajar dan perangkat asesmen yang telah melalui proses validasi ahli sebelum diuji coba lebih lanjut. Sasaran pengguna produk adalah siswa kelas X Sekolah Menengah Atas (SMA), yang dipilih berdasarkan kesesuaian materi fungsi linier dengan capaian pembelajaran pada jenjang tersebut.

Produk yang dikembangkan berupa modul ajar dan perangkat asesmen berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) dengan pendekatan STEM dalam konteks sistem irigasi. Modul dirancang melalui proyek “Jalur Irigasi Mini” untuk membantu siswa memahami hubungan antara kemiringan lahan dan arah aliran air. Dalam kegiatan proyek, siswa diarahkan untuk mengidentifikasi masalah, merancang solusi, serta menentukan jalur irigasi yang optimal dan efisien dengan mempertimbangkan faktor seperti ketinggian dan kemiringan lahan. Model ADDIE dipilih karena menyediakan tahapan yang sistematis dan fleksibel dalam mengembangkan perangkat pembelajaran yang kontekstual dan sesuai dengan karakteristik siswa.

Tahap *Analysis* dilakukan melalui kajian literatur dan observasi awal di sekolah mitra untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran serta kesulitan siswa dalam memahami konsep fungsi linier, khususnya kemiringan dan hubungan antarvariabel dalam konteks nyata. Hasil analisis digunakan sebagai dasar untuk menentukan kebutuhan siswa, karakteristik materi, dan konteks sistem irigasi yang digunakan dalam pembelajaran STEM–PjBL. Pada tahap *Design*, disusun rancangan modul yang mencakup tujuan pembelajaran, skenario proyek, Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD), perangkat asesmen autentik, dan instrumen validasi ahli. Proyek “Jalur Irigasi Mini” dirancang sebagai simulasi penentuan jalur aliran air pada lahan dengan kondisi ketinggian dan kemiringan tertentu.

Tahap *Development* dilakukan dengan merealisasikan rancangan menjadi produk awal berupa modul ajar, LKPD, perangkat asesmen, dan prototipe Jalur Irigasi Mini. Selanjutnya, produk divalidasi oleh ahli materi dan ahli media untuk menilai kelayakan isi, penyajian, desain pembelajaran, serta kualitas perangkat asesmen. Hasil validasi digunakan sebagai dasar untuk melakukan revisi dan penyempurnaan produk. Produk akhir pada tahap ini berupa modul ajar dan perangkat asesmen berbasis STEM–PjBL yang telah memenuhi kriteria valid dan siap untuk diuji coba pada penelitian selanjutnya.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2. Teknik Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini menggunakan kuesioner berupa lembar validasi ahli. Data penelitian diperoleh dari hasil penilaian ahli materi dan ahli media pembelajaran terhadap modul ajar dan perangkat asesmen yang dikembangkan. Ahli media terdiri atas beberapa validator yang memiliki pengalaman dalam bidang pengembangan media dan desain pembelajaran. Sementara itu, ahli materi merupakan validator yang memiliki kompetensi di bidang pendidikan matematika, khususnya pada materi fungsi linier dan pembelajaran berbasis STEM–PjBL. Pelibatan lebih dari satu validator bertujuan untuk memperoleh penilaian yang lebih objektif serta masukan yang lebih beragam terhadap kualitas produk yang dikembangkan.

Lembar validasi ahli materi mencakup aspek kesesuaian materi dengan capaian pembelajaran, keakuratan konsep matematika, serta keterpaduan pendekatan STEM–PjBL. Lembar validasi ahli media mencakup aspek desain visual, keterbacaan modul dan LKPD, kejelasan petunjuk kegiatan, serta kelayakan media pembelajaran. Selain memberikan skor penilaian, validator juga memberikan komentar dan saran sebagai data kualitatif untuk perbaikan produk

2.3. Teknik Analisis Data

Data hasil validasi dianalisis menggunakan indeks validitas Aiken's V [11]. Indeks Aiken's V digunakan untuk mengetahui tingkat kesepakatan antarvalidator terhadap setiap aspek penilaian pada instrumen validasi. Rumus Aiken's V dirumuskan sebagai berikut:

$$V = \frac{\sum s}{n(c-1)} \qquad s = r - L_0$$

dengan keterangan:

V = indeks kesepakatan *rater*

s = skor yang diberikan *rater* dikurangi skor terendah dalam kategori

r = skor yang diberikan *rater*

n = jumlah *rater*

c = jumlah kategori penilaian

L_0 = skor terendah dalam kategori

Nilai indeks Aiken's V yang diperoleh kemudian diinterpretasikan berdasarkan kategori validitas yang ditunjukkan pada Tabel 1, yaitu validitas rendah, validitas sedang, dan validitas tinggi [12].

Tabel 1. Kategori Validitas

Skala Aiken's V	Kategori Validitas
$V \leq 0,40$	Validitas rendah
$0,40 < V \leq 0,80$	Validitas sedang
$V > 0,80$	Validitas tinggi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pembahasan

3.1.1. Pengembangan Perangkat Pembelajaran Model ADDIE

Pengembangan modul ajar dan perangkat asesmen berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) dengan pendekatan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) dalam penelitian ini diwujudkan melalui tiga tahap awal dari model ADDIE, yaitu *Analysis*, *Design*, dan *Development*. Justifikasi akademis pembatasan hingga tahap ketiga ini didasarkan pada karakteristik penelitian yang dikategorikan sebagai studi validasi desain (*design validation study*) tipe formatif [13]. Dalam siklus *Research and Development* (R&D), memastikan validitas logis (*logical validity*) dari para pakar pada tahap *development* adalah prasyarat mutlak sebelum produk diuji secara empiris di lapangan. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan bias eksperimen akibat kecacatan struktural perangkat pembelajaran saat tahap *Implementation* dilakukan di masa mendatang. Target sasaran pengguna produk dirancang spesifik untuk siswa kelas X Sekolah Menengah Atas (SMA), disesuaikan dengan Alur Tujuan Pembelajaran (ATP) pada materi fungsi linier dalam Kurikulum Merdeka.

Pada tahap *Analysis*, dilakukan kajian literatur dan observasi awal untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran matematika yang kontekstual. Ditemukan adanya urgensi untuk mereduksi tingkat keabstrakan materi fungsi linier, khususnya konsep kemiringan garis (gradien) dan intersep. Melalui analisis kebutuhan tersebut, konteks sistem irigasi dipilih sebagai laboratorium miniatur bagi siswa untuk mengeksplorasi matematika dalam fenomena nyata. Konteks ini diintegrasikan secara linear dengan komitmen global *Sustainable Development Goals* (SDGs), terutama Tujuan 2 (Ketahanan Pangan) dan Tujuan 6 (Pengelolaan Air Bersih dan Sanitasi).

Tahap *Design* menghasilkan draf awal struktur modul ajar yang memuat Capaian Pembelajaran (CP), Tujuan Pembelajaran (TP), indikator ketercapaian, skenario proyek berbasis "Jalur Irigasi Mini", Lembar Kerja Peserta Didik (LKPD), instrumen asesmen interaktif berbentuk game, dan lembar observasi keterampilan STEM.

Selanjutnya, pada tahap *Development*, draf rancangan tersebut direalisasikan menjadi produk fisik dan digital, yang kemudian diuji melalui uji validitas para ahli (materi dan media) untuk menjamin kualitas konten matematis serta kelayakan keterbacaan instruksionalnya.

3.1.2. Analisis Validitas Perangkat Pembelajaran (Aiken's V)

Untuk mengukur kelayakan akademis dari draf modul ajar dan sistem asesmen yang dikembangkan, dilakukan proses penelaahan berbasis kesepakatan pakar melalui validasi ahli. Data kuantitatif diperoleh dari skor penilaian yang diberikan oleh dua validator (Validator 1 sebagai ahli materi/pembelajaran STEM dan Validator 2 sebagai ahli media/desain instruksional). Evaluasi dilakukan terhadap total 35 butir indikator yang mencakup pemenuhan aspek kelayakan isi, keakuratan konsep fungsi linier, integrasi pendekatan PjBL-STEM, estetika visual, serta kejelasan operasional instrumen asesmen.

Tingkat kesepakatan atau koefisien validitas isi dari kedua *rater* dihitung menggunakan formulasi indeks Aiken's V . Hasil analisis statistik deskriptif dari sebaran nilai indeks ke-35 indikator tersebut disajikan secara mendetail pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Indeks Aiken's V Per Indikator Perangkat Pembelajaran

Indikator	Skor Validator 1	Skor Validator 2	Nilai Aiken's V	Kategori Validitas
1	2	3	0,5000	Validitas Sedang
2	2	4	0,6667	Validitas Sedang
3	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
4	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
5	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
6	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
7	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
8	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
9	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
10	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
11	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
12	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
13	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
14	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
15	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
16	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
17	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
18	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
19	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
20	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
21	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
22	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
23	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
24	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
25	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
26	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
27	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
28	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
29	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
30	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
31	3	4	0,8333	Validitas Tinggi
32	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
33	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
34	4	3	0,8333	Validitas Tinggi
35	4	4	1,0000	Validitas Tinggi
Rata - rata			0,895	Validitas Tinggi

Berdasarkan data pada Tabel 2, visualisasi skor menunjukkan bahwa mayoritas indikator penilaian berada pada rentang indeks tinggi. Dari 35 indikator yang dievaluasi, terdapat 33 indikator yang memperoleh koefisien $V > 0,80$, di mana 16 indikator di antaranya mencapai nilai indeks kesepakatan mutlak ($V = 1,0000$). Hanya terdapat dua indikator awal yang dikategorikan memiliki "Validitas Sedang", yakni Indikator 1 ($V = 0,5000$) dan Indikator 2 ($V = 0,6667$).

Secara statistik, penentuan validitas suatu butir instrumen menggunakan indeks kesepakatan *rater* Aiken's V tidak hanya merujuk pada kategorisasi interval, melainkan harus diverifikasi melalui nilai kritis Tabel Aiken [11]. Untuk jumlah *rater* ($n = 2$) dengan jumlah opsi kategori penilaian skala Likert ($c = 4$), nilai minimum indeks V untuk dinyatakan signifikan pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$ adalah 0,5000. Merujuk pada hasil perhitungan pada Tabel 2, nilai indeks terendah yang diperoleh adalah 0,5000 (pada Indikator 1) dan seluruh indikator lainnya berada jauh di atas ambang batas tersebut. Hal ini secara matematis membuktikan bahwa setiap butir indikator dalam perangkat pembelajaran ini berstatus valid dan signifikan secara statistik, sehingga tidak ada butir instrumen yang harus dieliminasi. Melalui perhitungan agregat di seluruh butir penilaian, diperoleh nilai rata-rata indeks Aiken's V sebesar 0,8952. Sesuai dengan kriteria klasifikasi [12], capaian nilai rata-rata tersebut mengonfirmasi bahwa produk modul ajar dan perangkat asesmen irigasi berbasis PjBL-STEM ini memiliki kriteria Validitas Tinggi dan siap diimplementasikan secara teoritis.

3.1.3. Pembahasan Temuan Validasi dan Rekonstruksi Desain Perangkat

Tingginya koefisien indeks validitas yang diperoleh mencerminkan bahwa penyusunan struktur modul ajar telah memenuhi prinsip keterpaduan desain instruksional STEM yang terstruktur. Penilaian yang tinggi pada aspek substansi matematika membuktikan bahwa pemodelan matematis fungsi linier $y = mx + c$ berhasil terkontekstualisasi secara akurat dalam mengestimasi laju debit air dan kemiringan pipa/saluran pada proyek "Jalur Irigasi Mini". Melalui pengerjaan proyek ini, logika berpikir kritis siswa dilatih untuk tidak sekadar menghitung gradien di atas kertas grafis statis, melainkan memahami bagaimana kemiringan fisik lahan secara kausalitas memengaruhi koefisien arah aliran, efisiensi distribusi air, dan pencegahan limpasan (*runoff*) di lahan pertanian nyata.

Meskipun demikian, adanya dua indikator dengan indeks validitas sedang (Indikator 1 dan Indikator 2) memberikan catatan reflektif krusial dalam riset R&D ini. Indikator 1 ($V = 0,5000$) dan Indikator 2 ($V = 0,6667$).merepresentasikan adanya disparitas penilaian awal antara Validator 1 (ahli materi) yang memberikan skor 2 dan Validator 2 (ahli media) yang memberikan skor 3 dan 4. Hasil telaah kualitatif menunjukkan bahwa draf awal LKPD memiliki kelemahan pada kurangnya penegasan transisi dari identifikasi masalah konvensional menuju visualisasi digital pada tahap *Analysis*, serta perlunya simplifikasi instruksi operasional agar sesuai dengan karakteristik kognitif siswa kelas X SMA. Untuk memberikan transparansi ilmiah mengenai proses modifikasi produk pada tahap *Development*, rekam jejak revisi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekonstruksi Perbaikan Perangkat Pembelajaran Berdasarkan Catatan Ahli

No. Indikator	Nilai V	Keterbatasan Draft Awal Perangkat	Tindak Lanjut & Rekomendasi Solusi Desain
1	0,5000	Pengenalan masalah fungsi linier pada talang irigasi terlalu fokus pada rumus abstrak tanpa disertai jembatan visual (<i>scaffolding</i>).	Menambahkan panduan grafis ilustratif berupa analogi segitiga siku-siku fisik pada awal LKPD untuk menjembatani pemahaman rasio kemiringan (m) sebelum masuk ke rumus formal.
2	0,6667	Petunjuk pengerjaan proyek "Jalur Irigasi Mini" kurang memberikan ruang eksplorasi terbuka dan cenderung kaku/prosedural.	Merestrukturisasi kalimat instruksi sintaks PjBL menjadi berbasis pemecahan masalah (<i>problem solving</i>) yang menuntut siswa berkolaborasi mendesain jalur secara mandiri.

Tindak lanjut revisi pada Tabel 3 memastikan bahwa modul ajar telah direkonstruksi sesuai dengan kebutuhan lapangan. Perbaikan sintaks instruksional pada rubrik penilaian game interaktif juga dilakukan guna memastikan aspek afektif, psikomotorik, dan kolaboratif terekam secara komprehensif dan objektif selama proses pemecahan masalah digital berlangsung, sejalan dengan rekomendasi dari [3].

3.1.4. Sintesis Transdisipliner STEM dan Implikasi SDGs

Integrasi konsep optimasi terapan seperti pemodelan jaringan aliran sederhana (*network flow*) dan penentuan lintasan terpendek (*shortest path*) ke dalam modul SMA ini memfasilitasi jembatan pengetahuan transdisipliner yang kokoh. Dari kacamata literatur global, implementasi manajemen irigasi presisi (*Precision Irrigation*) terbukti secara empiris mampu meningkatkan optimalisasi penggunaan air di sektor pertanian hingga 51% dibandingkan dengan sistem tradisional [6]. Studi mendalam mengenai efisiensi alokasi air melalui pemanfaatan data tingkat kemiringan lahan dan kontrol irigasi mutakhir juga memperlihatkan peluang nyata dalam mendongkrak produktivitas sektor pertanian [1]. Dengan menyajikan replika miniaturisasi irigasi berbasis data kemiringan lahan ini, perangkat pembelajaran yang valid ini berhasil mengoperasionalkan tuntutan Kurikulum Merdeka yang menghendaki esensi pembelajaran yang bermakna dan kontekstual.

Siswa tidak lagi ditempatkan sebagai penerima informasi pasif, melainkan bertindak sebagai *engineer* muda yang ditantang untuk menyelesaikan krisis kelangkaan air riil. Lompatan pedagogis ini secara langsung mendukung ketercapaian target SDGs Tujuan 4 (Pendidikan Berkualitas) serta berkontribusi secara jangka panjang pada Tujuan 2 (Ketahanan Pangan) dan Tujuan 6 (Akses Air Bersih dan Sanitasi) melalui pemanfaatan ilmu matematika terapan.

Meskipun hasil evaluasi menunjukkan tingkat validitas teoretis yang sangat tinggi, penelitian R&D ini memiliki keterbatasan inheren pada jumlah *raters* yang terbatas pada dua pakar. Untuk penelitian dan pengujian selanjutnya, disarankan untuk melibatkan praktisi lapangan (guru matematika SMA) serta kelompok siswa dalam skala kecil melalui uji keterbacaan (*user-experience validation*). Langkah ini penting guna menjamin bahwa modul ajar yang telah valid secara teoretis ini juga memiliki tingkat kepraktisan (*practicality*) dan efektivitas yang tinggi ketika diimplementasikan dalam dinamika pengelolaan kelas yang heterogen. Secara keseluruhan, dengan capaian koefisien rata-rata Aiken's V sebesar 0,8952, perangkat pembelajaran ini dinyatakan layak secara metodologis untuk melangkah ke fase berikutnya, yaitu tahap *Implementation* dan *Evaluation* dalam model ADDIE.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan modul ajar dan perangkat asesmen berbasis *Project-Based Learning* (PjBL) dengan pendekatan STEM. Produk ini mengintegrasikan konsep optimasi matematika ke dalam konteks pengelolaan sistem irigasi berkelanjutan melalui proyek 'Jalur Irigasi Mini'. Pengembangan menggunakan model ADDIE yang dibatasi hingga tahap *Development* dan ditujukan untuk siswa kelas X SMA pada materi fungsi linier. Hasil validasi ahli menunjukkan nilai rata-rata indeks Aiken's V sebesar 0,8952 (kategori validitas tinggi), dengan 33 dari 35 indikator memperoleh $V > 0,80$ dan dua indikator lainnya direvisi melalui penambahan *scaffolding* visual serta restrukturisasi instruksi proyek. Dengan demikian, perangkat pembelajaran ini dinyatakan valid dan layak secara teoretis untuk mendukung pembelajaran matematika kontekstual, implementasi Kurikulum Merdeka, serta pencapaian SDGs Tujuan 2, 4, dan 6.

Berdasarkan hasil penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya melanjutkan pengembangan hingga tahap *Implementation* dan *Evaluation* dalam model ADDIE untuk menguji kepraktisan dan efektivitas produk secara empiris di kelas nyata. Selain itu, pelibatan *rater* yang lebih banyak seperti guru matematika SMA dan praktisi lapangan lainnya perlu dilakukan untuk memperkuat objektivitas hasil validasi, mengingat penelitian ini masih terbatas pada dua validator ahli. Uji keterbacaan pada skala kecil juga perlu dilakukan sebelum implementasi lebih luas. Selain itu, pengembangan dapat diperluas ke materi matematika lain di luar fungsi linier serta integrasi teknologi digital seperti IoT dan *machine learning* agar perangkat pembelajaran semakin relevan dengan tuntutan STEM abad ke-21.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada validator ahli materi dan ahli media yang telah memberikan penilaian, komentar, dan saran yang sangat berharga dalam proses pengembangan perangkat pembelajaran ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada sekolah mitra atas kesempatan dan dukungan yang diberikan selama tahap analisis kebutuhan dan pengembangan produk, serta kepada seluruh pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian ini hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Sujarwanto, Madlazim, and I. G. M. Sanjaya, "A conceptual framework of STEM education based on the Indonesian Curriculum," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1760, no. 1, p. 012022, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1760/1/012022.
- [2] Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, *Capaian Pembelajaran Mata Pelajaran Matematika Fase E untuk SMA/MA/SMK/MAK*. Jakarta, Indonesia: Badan Standar, Kurikulum, dan Asesmen Pendidikan, Kemendikbudristek, 2022.
- [3] C. M. R. Caridade and C. Pimenta, "Project-Based Learning in a Collaborative Environment: A Math Study," 2023, doi: 10.22492/issn.2435-9467.2023.33.
- [4] Badan Pusat Statistik, *Laporan Indeks Penggunaan Air dan Ketahanan Pangan Indonesia 2023*. Jakarta, Indonesia: BPS RI, 2023.
- [5] V. S. Suvarna, "A Review on Optimization Designs in Irrigation Systems," *Int. J. Sci. Res. Eng. Trends*, vol. 9, no. 6, pp. 1876–1879, 2023, doi: 10.61137/ijset.vol.9.issue6.403.
- [6] I. A. Lakhiar, H. Yan, Q. Zhang, and X. Wang, "Precision irrigation technology and its application in modern sustainable agriculture: A comprehensive review," *Agricultural Water Management*, vol. 291, Art. no. 108620, 2024.
- [7] T. Kassanuk and K. Phasinam, "Impact of Internet of Things and Machine Learning in Smart Agriculture," *ECS Trans.*, vol. 107, no. 1, pp. 3215–3222, 2022, doi: 10.1149/10701.3215ecst.

- [8] E. A. Abioye *et al.*, "A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation," *Agriculture*, vol. 14, no. 7, p. 1141, 2024, doi: 10.3390/agriculture14071141.
- [9] L. R. Djurayeva, "The Importance and Advantages of Thinking-Based Learning," *Deleted Journal*, vol. 3, no. 7, pp. 42–48, 2024, doi: 10.51699/ajsld.v3i7.64.
- [10] E. de Schipper *et al.*, "Identifying students' solution strategies in digital mathematics assessment using log data," *Large-Scale Assess. Educ.*, vol. 13, no. 1, 2025, doi: 10.1186/s40536-025-00259-6.
- [11] L. R. Aiken, "Three coefficients for analyzing the reliability and validity of ratings," *Educational and Psychological Measurement*, vol. 45, no. 1, pp. 131–142, 1985.
- [12] L. M. Castro Benavides, O. E. Tamayo, and M. A. Moreno, "Validation of measurement scales in educational research using Aiken's V," *Journal of Educational Measurement and Evaluation*, vol. 15, no. 2, pp. 45–58, 2022.
- [13] M. Tessmer, *Planning and Conducting Formative Evaluations: Improving the Quality of Education and Training*. London, U.K.: Kogan Page, 1993.