

# Eksplorasi Desain TPACK dalam Pengembangan Smart Hydroponic System Berbasis IoT sebagai Media Peningkatan Kemampuan STEM Siswa

Nove Kurniati Sari<sup>1</sup>, Zulhafandi<sup>2</sup>, Banyuriatiga<sup>3</sup>, Syaddam<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup>*Agribisnis, Universitas Borneo Tarakan*

*Jl. Amal Lama, Tarakan*  
novekurniatiasari@borneo.ac.id  
zulhafandi90@borneo.ac.id  
banyuria3@borneo.ac.id

<sup>4</sup>*Sistem Informasi, Politeknik Bisnis Kaltara, Tarakan*  
*Jl. Gajah Mada, Tarakan*  
syaddam@poltekbiskal.ac.id

*Abstract—STEM education is an interdisciplinary approach that integrates various disciplines to equip Students to face the challenges of the digital era and the Industrial Revolution 4.0. The success of this innovative learning implementation depends on how a teacher designs a cohesive instructional scenario. In designing STEM learning that integrates the latest technology, Teachers need specific competencies outlined in the TPACK framework. The purpose of this research is to develop a learning design model based on the TPACK framework that integrates STEM approaches via IoT instruments, using a case study of the Smart Hydroponic System project, to hone Students' computational thinking logic using block code. In the research method employed, qualitative descriptive and experimental technical approaches with exploratory characteristics are used. This study succeeded in formulating seven elements of TPACK to convert complex STEM materials into "Playing Logic" activities that align with the cognitive capacity of elementary school Students. The development of the Arduino- and Tinkercad-based prototypes demonstrated the overall functionality of all components through black-box testing. The integration of IoT with the Project-Based Learning approach, as documented in the literature, has proven effective in transforming abstract concepts into concrete, interactive experiences without requiring mastery of complex textual programming. Overall, this framework provides practical solutions for Teachers/Educators in creating an exploratory STEM learning ecosystem, while significantly improving Students' computational thinking skills.*

**Intisari—**Pendidikan STEM merupakan pendekatan interdisipliner yang mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu untuk membekali siswa dalam menghadapi tantangan era digital dan Revolusi Industri 4.0. Keberhasilan pelaksanaan pembelajaran inovatif ini bergantung pada bagaimana seorang guru mampu merancang skenario instruksional yang kohesif. Dalam merancang pembelajaran STEM yang mengintegrasikan teknologi terkini, guru memerlukan kompetensi khusus yang dikenal dengan kerangka kerja TPACK. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sebuah model desain pembelajaran berbasis kerangka kerja TPACK yang mengintegrasikan pendekatan STEM melalui instrumen IoT melalui studi kasus proyek Sistem Hidroponik

Cerdas untuk mengasah logika berpikir komputasional siswa dengan menggunakan kode blok. Dalam metode penelitian yang dilakukan, digunakan pendekatan kualitatif-deskriptif dan eksperimental teknis dengan sifat eksploratif. Penelitian ini berhasil merumuskan tujuh elemen TPACK untuk mengonversi materi STEM kompleks menjadi aktivitas "Bermain Logika" yang sesuai dengan kapasitas kognitif siswa Sekolah Dasar. Pengembangan prototipe berbasis Arduino dan Tinkercad menunjukkan keberhasilan fungsionalitas secara keseluruhan pada semua komponen melalui pengujian *black-box*. Integrasi IoT dengan pendekatan Project-Based Learning dari literatur yang dilakukan, terbukti efektif mentransformasi konsep abstrak menjadi pengalaman konkret yang interaktif tanpa memerlukan penguasaan pemrograman tekstual yang rumit. Secara keseluruhan, kerangka kerja ini memberikan solusi praktis bagi Guru/Pendidik dalam menciptakan ekosistem pembelajaran STEM yang eksploratif, sekaligus meningkatkan keterampilan berpikir komputasional siswa secara signifikan.

**Kata Kunci—** Kode Blok, IoT, STEM, TPACK

## I. PENDAHULUAN

Pendidikan STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) merupakan pendekatan interdisipliner sains, teknologi, rekayasa/keteknikan, dan matematika yang saling berkaitan. Pendekatan ini mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu untuk membekali siswa dalam menghadapi tantangan era digital dan Revolusi Industri 4.0 [1], [2], [3]. Perkembangan teknologi yang pesat saat ini membuat keterampilan STEM semakin dibutuhkan. Hal ini dikarenakan siswa dituntut memiliki kemampuan berpikir kritis, berinovasi, dan memecahkan masalah kompleks yang relevan dengan penerapan praktis di dunia nyata [4]. Integrasi STEM dalam pembelajaran tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan prestasi akademik, tetapi juga merupakan langkah strategis untuk mengembangkan kreativitas serta kompetensi siswa agar siap menghadapi tantangan masa

depan yang berbasis teknologi dan memiliki daya saing di dunia kerja.

Penerapan pendekatan STEM sejak jenjang sekolah dasar (SD) menjadi fondasi yang sangat penting agar siswa tidak hanya menjadi konsumen teknologi, tetapi juga mampu berkembang menjadi pemikir kritis dan pemecah masalah [3], [1]. Untuk dapat memberikan dampak yang bermakna bagi siswa, pendekatan STEM harus diimplementasikan melalui strategi pembelajaran yang tepat dan berpusat pada siswa (*student-centered*). Pembelajaran berbasis proyek atau *Project-Based Learning* (PjBL) muncul sebagai metode yang sangat relevan. Melalui PjBL terintegrasi STEM, siswa dilibatkan langsung dalam pengalaman belajar yang nyata (*hands-on experience*). Mereka dituntut untuk berkolaborasi, merancang produk, dan menguji solusi atas masalah yang kontekstual dengan lingkungan sekitar mereka, seperti isu pertanian atau ketahanan pangan [4]. Namun, keberhasilan pelaksanaan pembelajaran inovatif ini bergantung pada bagaimana seorang guru mampu merancang skenario instruksional yang kohesif.

Dalam merancang pembelajaran STEM yang mengintegrasikan teknologi terkini, guru memerlukan kompetensi khusus yang dikenal dengan kerangka kerja TPACK (*Technological Pedagogical Content Knowledge*). TPACK merupakan sebuah kerangka kerja konseptual (*framework*) bagi guru atau pendidik untuk merancang dan mengembangkan desain pembelajaran dengan mengintegrasikan pengetahuan teknologi, metode mengajar (pedagogi), dan materi pelajaran (konten) secara efektif [5]. TPACK menuntut pendidik untuk tidak hanya menguasai materi yang diajarkan (Konten) atau metode mengajar (Pedagogi), melainkan bagaimana memadukan keduanya dengan Teknologi secara harmonis [6]. Penguasaan TPACK menjadi kunci utama agar kehadiran instrumen teknologi di dalam kelas tidak menjadi beban kognitif bagi siswa. Dengan adanya desain TPACK yang matang, teknologi dapat difungsikan sebagai perancah (*scaffolding*) yang menerjemahkan konsep-konsep abstrak menjadi wujud yang lebih konkret, visual, dan mudah dipahami oleh kognisi siswa tingkat dasar [7].

Perwujudan komponen *Technological* (T) pada TPACK saat ini, dapat memanfaatkan IoT (*Internet of Things*) atau *Internet of Educational Things* (IoET). IoT dalam bidang pendidikan STEM menurut literatur, memiliki potensi yang sangat besar [8], [9], [10]. Di mana IoT dalam pembelajaran mampu memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan pemahaman konsep matematika dan sains siswa. Keterlibatan siswa pada pembelajaran dengan IoT tidak diarahkan pada penulisan sintaks pemrograman tekstual yang rumit, melainkan menggunakan bermain logika. Melalui penyusunan kode blok visual, pemahaman siswa dalam mendesain sirkuit elektronik dapat meningkat. Kegiatan ini dapat dilakukan secara virtual. Hal ini tidak hanya memudahkan pemahaman konsep-konsep teori, tetapi juga mengurangi

ketergantungan pada alat dan bahan fisik yang terbatas. [11].

Pertanian cerdas berbasis IoT dapat menjadi media belajar yang efektif dalam meningkatkan hasil belajar siswa serta mendukung guru dalam mengajar dan memotivasi siswa. Integrasi pembelajaran pertanian dan IoT dapat menjadi media pembelajaran yang efektif untuk pendidikan pertanian digital [12]. Hal ini mampu menjembatani kesenjangan kompetensi siswa terhadap kebutuhan teknologi pertanian modern [13].

Saat ini masih terdapat kesenjangan (*gap*) terhadap ketersediaan panduan desain instruksional yang secara utuh memadukan TPACK, STEM, dan kemudahan teknologi IoT untuk guru sekolah dasar. Berdasarkan latar belakang tersebut, tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sebuah model desain pembelajaran berbasis kerangka kerja TPACK yang mengintegrasikan pendekatan STEM melalui instrumen IoT. Dengan menggunakan proyek *smart hydroponic system* (sistem hidroponik cerdas) sebagai studi kasus, penelitian ini bertujuan menghasilkan alur pembelajaran yang sistematis, dimulai dari simulasi logika di lingkungan virtual hingga implementasi pada perangkat fisik sebagai bentuk pengalaman nyata.

## II. LITERATURE REVIEW

Untuk memperkuat konsep teoritis serta mengidentifikasi *research gap* dalam penelitian ini, maka dilakukan analisis, evaluasi, dan sintesis terhadap penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. *Literature review* dalam penelitian ini diklasifikasikan ke dalam tiga bagian konseptual yang mendukung pembentukan desain instruksional:

- Framework*: Literatur pada bagian ini membahas TPACK sebagai prasyarat mutlak bagi guru untuk mengintegrasikan teknologi ke dalam kelas secara bermakna [6], [5].
- Pendekatan Pedagogis: Studi mengenai STEM melalui PjBL digunakan sebagai strategi untuk menciptakan pembelajaran yang berpusat pada siswa dan berbasis pada pemecahan masalah nyata [3], [4].
- Instrumen: membahas tren pemanfaatan Internet IoT dan konsep spesifik IoET sebagai alat bantu visualisasi dan pengasah logika komputasional siswa dasar [8], [9].

Terdapat hubungan saling berkaitan antara ketiga bagian literatur tersebut. *Framework* TPACK tidak dapat berdiri sendiri secara teoretis, dibutuhkan konten dan pedagogi yang kuat, yang mana dalam hal ini, dapat dipenuhi melalui pendekatan STEM-PjBL. Pada elemen *T* dalam TPACK tidak sekadar menggunakan alat presentasi seperti proyektor atau presentasi digital, melainkan direalisasikan secara interaktif melalui instrumen IoT. Dengan demikian, penggunaan seperti sensor dan mikrokontroler pada IoT bukan sekadar alat pelengkap, melainkan jembatan konkret yang

menghubungkan konsep matematika-sains abstrak dengan engineering dalam pembelajaran berbasis proyek.

Analisis mendalam terhadap literatur membuktikan efektivitas integrasi ini. Studi empiris yang telah dilakukan [8] menegaskan bahwa model pembelajaran berbasis IoT memiliki pengaruh signifikan terhadap pemahaman konsep matematika dasar siswa SD. Secara kognitif, ditemukan bahwa perangkat IoT melalui lingkungan virtual (diorama interaktif) mendukung *deep learning* (pembelajaran mendalam) melalui pengalaman fisik yang konkret [10]. Lebih jauh, terdapat literatur yang membuktikan bahwa penggunaan instrumen teknologi pada siswa SD efektif merangsang kemampuan HOTS (*Higher Order Thinking Skills*) atau berpikir tingkat tinggi, yang mana hal ini jika diiringi dengan aktivitas inkuiri [14]. Maka, ketika STEM difasilitasi oleh IoT, siswa tidak hanya menghafal teori, tetapi juga dapat membangun penalaran analitis dari data *real-time* melalui pengamatannya secara langsung.

Terdapat penelitian bibliometrik yang menunjukkan adanya peningkatan minat global terhadap penelitian IoT dalam pendidikan STEM; penerapan praktisnya di tingkat SD masih sangat terbatas [2]. Terdapat celah (*gap*) penelitian yang nyata. Ketersediaan literatur sering kali terjebak pada pembahasan teknis pemrograman IoT yang terlampaui rumit bagi guru dan siswa SD, atau sebatas kajian konseptual TPACK yang abstrak. Saat ini, belum banyak panduan desain pembelajaran operasional yang menjembatani kerumitan teknologi (IoT) ke dalam kerangka pedagogi yang ramah anak, seperti melalui pendekatan kode blok visual tanpa menghilangkan esensi kurikulum STEM.

Berdasarkan identifikasi *gap* tersebut, pemetaan penelitian ini difokuskan pada pengembangan solusi praktis. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang sebuah model desain pembelajaran berbasis *framework* TPACK yang mengintegrasikan pendekatan STEM melalui instrumen IoT. Peta jalan penelitian diarahkan pada penggunaan kode blok visual dan implementasi perangkat keras pada proyek smart hydroponic system sebagai wujud nyata dari instrumen IoT. Melalui desain ini, penelitian akan memberikan kontribusi berupa prototipe instruksional di mana siswa SD dapat mengembangkan logika keteknikan dan sains secara menyenangkan, sementara guru mendapatkan panduan TPACK yang terstruktur dan mudah diimplementasikan.

### III. METODE

Penelitian ini bersifat eksploratif dengan pendekatan kualitatif-deskriptif dan eksperimental teknis, di mana peneliti mengeksplorasi perpaduan antara pedagogi dan teknologi untuk menghasilkan arsitektur pembelajaran yang kohesif dan fungsional. Penelitian eksploratif atau biasa disebut dengan penelitian formulatif dimaksudkan untuk mencoba menggali informasi atau permasalahan yang relatif masih baru [15]. Prosedur pada penelitian ini difokuskan pada perancangan instruksional TPACK dan

rekayasa media melalui tahapan yang diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Tahapan penelitian

- Tahap *conceptual analysis* (analisis konseptual): Melakukan studi literatur mendalam untuk memetakan bagaimana mengonversi materi STEM yang kompleks menjadi aktivitas "Bermain Logika". Tahap ini mengidentifikasi kebutuhan ketujuh elemen TPACK untuk menjembatani batasan kognitif siswa SD terhadap teknologi IoT.
- Tahap perancangan arsitektur TPACK: Mensintesis draft instruksional yang menyatukan muatan Sains (CK), pendekatan Project-Based Learning (PK), dan penguasaan kode blok (TK). Output tahap ini adalah skenario pembelajaran terstruktur (sintaks) untuk proyek Smart Hydroponic.
- Tahap pengembangan prototipe IoT (virtual dan fisik): Tahap ini menerjemahkan desain TPACK ke dalam wujud instrumen teknologi melalui dua *phase* (fasa):
  - Virtual: Merangkai sirkuit simulasi dan sensor berdasarkan skema virtual yang telah dibuat.
- Tahap *functional testing* (uji fungsionalitas konsep): verifikasi pada penelitian ini dilakukan melalui uji fungsionalitas teknis (*black-box testing*). Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa logika kode blok yang dirancang di simulator (virtual) dan alat yang dirakit (fisik) berjalan secara akurat sesuai dengan konsep algoritme instruksional.

Adapun alat dan instrumen dalam penelitian ini hanya digunakan untuk proses desain dan pengujian fungsi teknis sistem yang meliputi:

- Instrumen Desain: Matriks pemetaan TPACK, yang digunakan peneliti sebagai pedoman sistematis untuk memastikan keselarasan antara Teknologi (Kode Blok), Pedagogi (PjBL), dan Konten (Siklus Air/Hidroponik).
- Alat Pengembangan Media (Virtual): Laboratorium virtual berbasis web Tinkercad Circuits untuk merancang skema perkabelan interaktif dan menyusun

program logika berbasis visual (*block-based programming*).

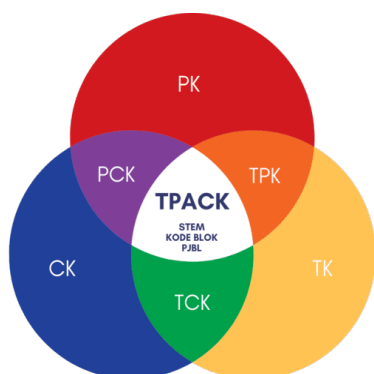
- c. Alat Pengembangan Media (Fisik): Komponen hardware IoT nyata yang meliputi: mikrokontroler Arduino Uno R3, sensor jarak ultrasonik HC-SR04, modul LCD (*Liquid Crystal Display*) 16x2 dengan modul I2C, piezo buzzer, breadboard, dan kabel jumper. dan mudah diimplementasikan.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### A. Hasil

##### 1) Conceptual Analysis

Berdasarkan tinjauan literatur yang telah dilakukan, materi STEM yang kompleks dikonversi menjadi aktivitas yang ramah kognisi anak, yaitu "Bermain Logika". Kerangka dari TPACK pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 2. Tahap ini menghasilkan rumusan kebutuhan tujuh elemen TPACK untuk menjembatani batasan kognitif siswa SD terhadap teknologi IoT:



Gambar. 2. Framework TPACK

- CK (*Content Knowledge*): Kebutuhan air nutrisi tanaman dan pengukuran jarak sentimeter
- PK (*Pedagogical Knowledge*): Pendekatan PjBL terintegrasi STEM.
- TK (*Technological Knowledge*): Penggunaan "Kode Blok" visual dan perangkat keras tegangan rendah.
- PCK (*Pedagogical Content Knowledge*): Menjelaskan fenomena tanaman layu melalui proyek investigasi.
- TCK (*Technological Content Knowledge*): Merepresentasikan volume air bak hidroponik menjadi angka digital menggunakan sensor ultrasonik.
- TPK (*Technological Pedagogical Knowledge*): Menggunakan laboratorium virtual sebagai ruang aman untuk eksperimen logika.
- TPACK: Sinergi utuh di mana guru membimbing siswa merancang algoritme blok visual untuk menyelamatkan tanaman hidroponik melalui proyek kelompok.

##### 2) Instructional Design

Draf instruksional disintesis untuk menyatukan muatan Sains (CK), pendekatan PjBL (PK), dan penguasaan kode blok (TK). Output tahap ini adalah skenario pembelajaran

terstruktur (sintaks) untuk proyek Smart Hydroponic System. Alur dari *instructional design* diperlihatkan pada Gambar 3.

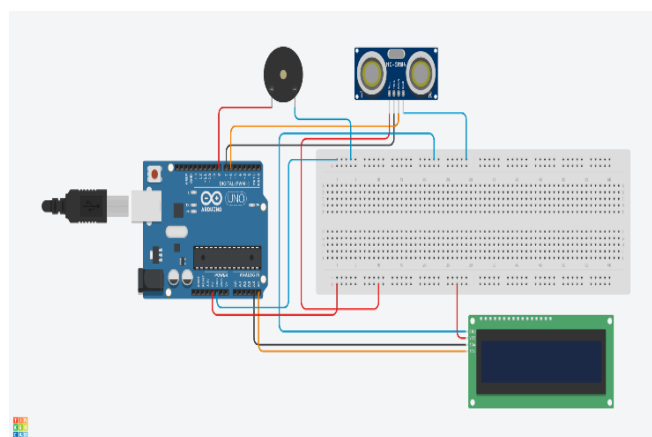


Gambar. 3. Alur *instructional design*

- Orientasi Masalah:** Siswa dihadapkan pada studi kasus, yaitu bagaimana mencegah tanaman kehabisan air tanpa harus diawasi 24 jam?.
  - Desain Solusi Virtual:** Siswa masuk ke ruang virtual menggunakan aplikasi Tinkercad serta menyusun logika blok kondisional: JIKA (IF) jarak air lebih dari 15 cm, MAKA tampilkan teks "ISI AIR" dan bunyikan alarm (buzzer). Apabila kondisi tersebut tidak terpenuhi (ELSE) MAKA tampilkan "AIR AMAN" dan matikan alarm
  - Konstruksi Fisik:** Siswa merakit komponen perangkat keras yang terdiri dari Arduino Uno R3, breadboard, sensor ultrasonik, LCD 16x2 (I2C), dan buzzer secara langsung sesuai dengan skema virtual.
  - Pengujian:** Menguji langsung apakah alat berhasil memantau bak air tanaman.
- ##### 3) Pengembangan Prototipe IoT

Di bagian ini, dihasilkan media IoT dalam bentuk virtual dan fisik sebagai instrumen pembelajaran.

- Virtual:** Skenario logika kondisional dibangun dalam Tinkercad Circuits berbasis blok. Operasi yang dilakukan dalam Tinkercad menggunakan *drag and drop* (seret dan lepas). Rangkaian komponen dan kode blok IoT pada Tinkercad diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar. 4. Rangkaian komponen IoT

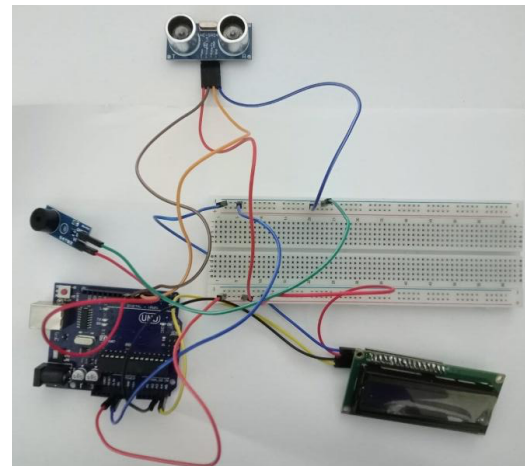
Gambar 4 memperlihatkan sebuah rangkaian sistem pengawas air otomatis yang dirancang sebagai otak dari *smart hydroponic system*. Terdapat papan sirkuit (Arduino) yang terhubung ke sensor ultrasonik yang berfungsi seperti "mata" untuk mengukur ketinggian air tanpa menyentuhnya. Jika sensor mendeteksi air mulai habis, Arduino akan mengirim sinyal untuk menyalakan alarm suara (buzzer) dan menampilkan pesan peringatan pada layar LCD, sehingga diketahui kapan harus mengisi ulang air tanpa perlu mengecek manual setiap saat



Gambar 5. Kode blok

Gambar 5 menunjukkan instruksi logika atau "cara berpikir" sistem tersebut yang disusun menggunakan balok-balok warna-warni layaknya menyusun puzzle. Kode balok tersebut menggunakan struktur IF THEN ELSE, yang mana struktur program ini akan mengatur tindakan yang akan dilakukan, dengan kondisi benar ataupun tindakan yang akan dilakukan jika kondisi salah. Dalam logika yang digunakan, sistem akan terus-menerus bertanya, "Apakah jarak air sudah lebih dari 15 cm?". Jika ya (berarti air surut), maka layar akan memunculkan tulisan "ISI AIR" dan alarm berbunyi; namun jika air masih penuh, layar akan tetap menampilkan tulisan "AIR AMAN". Metode kode blok ini memudahkan siapa pun untuk belajar memprogram alat canggih tanpa harus menghafal bahasa komputer yang rumit

- b. Fisik IoT: Prototipe sirkuit smart hydroponic system dirakit menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Penggunaan modul I2C pada LCD membuat perkabelan menjadi ringkas, dan sistem dipastikan bebas dari arus listrik tinggi. Perakitan ini menggunakan kabel jumper dan breadboard sebagai penghubung antara komponen. Dalam praktik membuat bentuk fisik yang sesuai dengan desain virtual pada Tingkercad, buzzer piezo diganti dengan buzzer module low level trigger. Rangkaian bentuk fisik diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian prototipe dalam bentuk fisik

#### 4) Uji Fungsionalitas

Uji fungsionalitas dengan black-box testing, dilakukan untuk mengonfirmasi kinerja teknis desain perangkat secara menyeluruh. Pengujian ini memastikan bahwa setiap komponen input berupa sensor ultrasonik dan output seperti LCD dan buzzer berfungsi sesuai dengan logika kondisional algoritme yang telah dirancang, baik pada lingkungan simulasi maupun penerapan aslinya. Hasil pengujian dimuat dalam bentuk tabel yang diperlihatkan pada Tabel 1.

TABEL I  
HASIL PENGUJIAN

Lingkungan Uji	Komponen yang Diuji	Skenario & Kondisi Pengujian	Hasil Observasi (Output)	Status
Virtual	Sensor Ultrasonik	Mengubah jarak objek simulasi secara manual (> 15 cm dan ≤ 15 cm).	Simulator sukses membaca dan merespon perubahan jarak objek simulasi secara presisi tanpa hambatan kompilasi.	Berhasil
	Layar LCD	Mengamati perubahan teks berdasarkan pembacaan jarak sensor virtual.	Layar virtual berhasil menampilkan teks "ISI AIR" saat jarak > 15 cm, dan "AIR AMAN" saat jarak ≤ 15 cm.	Berhasil
	Buzzer (Speaker)	Mengamati respons audio berdasarkan pembacaan jarak sensor virtual.	Buzzer virtual membunyikan nada/alarm selama 1 detik saat jarak > 15 cm, dan berhenti	Berhasil

Lingkungan Uji	Komponen yang Diuji	Skenario & Kondisi Pengujian	Hasil Observasi (Output)	Status
			menyala saat jarak $\leq 15$ cm.	
Fisik (Perangkat Nyata)	Sensor Ultrasonik	Mengukur ketinggian air aktual pada bak air hidroponik sungguhan.	Sensor sukses mendeteksi penurunan dan kenaikan level air secara real-time dan akurat.	Berhasil
	Layar LCD	Memantau tampilan layar fisik (hardware) yang terhubung melalui modul I2C.	Layar fisik menampilkan teks peringatan status air ("ISI AIR" atau "AIR AMAN") secara sinkron dengan kondisi air aslinya.	Berhasil
	Buzzer	Memantau respons suara dari hardware buzzer saat air surut/habis.	Mikrokontroler berhasil memicu buzzer secara instan saat air surut (jarak $> 15$ cm) dan mematakannya saat air diisi kembali.	Berhasil

Prototipe IoT yang berhasil dikembangkan, nantinya akan diterapkan pada lingkungan nyata untuk memantau sistem irigasi kesediaan air pada tanaman hidroponik. Adapun hidroponik yang akan digunakan diperlihatkan pada Gambar 7.



Gambar. 7. Hidroponik percontohan

## B. Pembahasan

### 1) Analisis Konseptual

Analisis konseptual membuktikan bahwa introduksi IoT pada siswa, khususnya pada siswa SD, tidak boleh dilakukan secara serampangan. Literatur yang telah ada [16], menegaskan bahwa siswa SD masih berada pada fase kognitif

operasional konkret menuju formal. Pemaksaan bahasa pemrograman tekstual yang sarat sintaks akan memicu beban kognitif berlebih (*cognitive overload*). Konversi instruksional menjadi "Bermain Logika" melalui kerangka TPACK adalah langkah preventif yang krusial. Melalui pemetaan elemen TPACK secara spesifik, teknologi IoT diposisikan bukan sebagai "teori elektronika yang dihafal", melainkan sebagai alat bantu berpikir (*cognitive tool*) yang ramah anak.

### 2) Perancangan Arsitektur TPACK

Sintaks instruksional yang dihasilkan merepresentasikan transformasi radikal dari pembelajaran *teacher-centered* menuju *student-centered*. Dengan memadukan muatan sains hidroponik (CK), kolaborasi PjBL (PK), dan penguasaan kode blok (TK), guru memfasilitasi keterampilan *computational thinking* (berpikir komputasional). Proses di mana siswa merumuskan aturan kondisi algoritme (JIKAMAKA) untuk menyelamatkan tanaman merupakan bentuk nyata dari kemampuan abstraksi dan dekomposisi masalah. Hal ini selaras dengan tuntutan kompetensi abad ke-21 [3], di mana pemecahan masalah (HOTS) dibangun melalui proyek aplikatif

### 3) Pengembangan Prototipe IoT

Pengembangan media pembelajaran dalam dua mode sekaligus, yaitu virtual dan fisik, memberikan justifikasi pedagogis yang kuat. Lingkungan virtual (Tinkercad) berfungsi sebagai *scaffolding* di mana siswa bebas melakukan kesalahan penyusunan algoritma tanpa risiko merusak komponen mahal. Sementara itu, transisi menuju perakitan alat fisik menjawab kebutuhan belajar kinetik anak. Penggunaan media diorama fisik interaktif, sebagaimana didukung oleh kajian Lestari dkk. [10], Terbukti memicu pembelajaran mendalam (*deep learning*) karena siswa dapat melihat, menyentuh, dan mendengar hasil dari rancangan pikiran mereka sendiri di dunia nyata.

### 4) Uji Fungsionalitas Konsep

Keberhasilan uji fungsionalitas teknis memiliki makna yang menentukan bagi kelayakan desain secara keseluruhan. Dalam perancangan teknologi pendidikan untuk tingkat dasar, *reliability* (keandalan alat) adalah mutlak. Kegagalan teknis (*error sistem*) di tengah pelajaran dapat meruntuhkan motivasi siswa seketika. Kesuksesan sensor membaca jarak dan mengeksekusi logika alarm pada proyek smart hydroponic system ini memvalidasi bahwa desain arsitektur TPACK tersebut layak, aplikatif, dan operasional. Temuan ini mengisi *gap* literatur dengan menyajikan instrumen IoT yang benar-benar disesuaikan dengan kapasitas pedagogis guru maupun psikologis peserta didik sekolah dasar dan mudah diimplementasikan.

## V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang desain pembelajaran berbasis kerangka kerja TPACK yang mengintegrasikan teknologi IoT sebagai instrumen pengasah logika di tingkat sekolah dasar. Melalui studi kasus proyek

smart hydroponic system, perancangan ini membuktikan bahwa elemen *Technological Knowledge* dapat dihadirkan secara sederhana melalui kode blok di Tinkercad dan perangkat nyata mikrokontroler Arduino Uno. Fokus utama rancangan ini bukan pada penguasaan pemrograman tekstual, melainkan pada transformasi pedagogis yang mengubah konsep sains dan matematika yang abstrak menjadi pengalaman bermain logika yang konkret dan interaktif.

Secara teoretis, desain ini memperkuat proposisi bahwa TPACK adalah kunci utama dalam efektivitas pembelajaran STEM di era digital. Implikasi praktisnya, guru tidak perlu menjadi ahli pemrograman untuk mengajarkan teknologi cerdas, cukup dengan menguasai logika kode blok, guru dapat menciptakan lingkungan belajar yang eksploratif. Hal ini memberikan dampak positif bagi sekolah dalam mengadopsi kurikulum agrikultur modern secara efisien dan juga meningkatkan retensi pengetahuan siswa melalui *real-time feedback* (umpan balik instan) dari sensor yang dirancang sendiri.

Hal yang unik dalam rancangan ini adalah temuan bahwa simulasi virtual (Tinkercad) sering kali memberikan hasil yang terlalu ideal dibandingkan dengan kondisi di perangkat nyata. Batasan utama penelitian ini terletak pada fase transisi fisik, di mana faktor lingkungan seperti kelembapan udara nyata atau sensitivitas sensor yang beragam dapat menimbulkan hasil data yang berbeda dari simulasi. Efektivitas jangka panjang terhadap motivasi siswa masih memerlukan verifikasi melalui implementasi berkelanjutan di lapangan.

Berdasarkan hasil perancangan ini, direkomendasikan bagi sekolah dasar untuk mulai mengadopsi laboratorium virtual seperti Tinkercad sebagai tahap prapembelajaran sebelum berinvestasi pada perangkat keras IoT yang mahal. Para pendidik didorong untuk terus memperkuat kompetensi TPACK mereka melalui kolaborasi antardisiplin ilmu (Sains dan Teknologi). Sebagai langkah selanjutnya, diperlukan pengembangan kurikulum terstruktur yang menghubungkan proyek hidroponik ini dengan mata pelajaran lain secara lintas kurikulum, guna menciptakan ekosistem pendidikan STEM yang holistik dan berkelanjutan

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. P. Subakti, J. Marzal, and M. H. E. Hsb, "Pengembangan ELKPD Berkarakteristik Budaya Jambi Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kreatif Matematis," *J. Cendekia J. Pendidik. Mat.*, vol. 05, no. 02, pp. 1249–126, 2021, doi: 10.31004/cendekia.v5i2.629.
- [2] A. N. Miladanta, C. Rochman, Y. Sukmawardani, and A. Y. Nuryantini, "Tren Penelitian IoT dalam Pembelajaran Berbasis STEM pada Pendidikan Fisika: Bibliometric Analysis," *Lontar Phys. Today*, vol. 4, no. 2, pp. 065–074, Jun. 2025, doi: 10.26877/lpt.v4i2.23481.
- [3] E. Sujarwanto, "Prinsip Pendidikan STEM dalam Pembelajaran Sains," *Briliant J. Ris. dan Konseptual*, vol. 8, no. 2, p. 408, May 2023, doi: 10.28926/briliant.v8i2.1258.
- [4] N. M. Y. Suranti and B. Y. Wahyuningsih, "Project Based Learning dengan Pendekatan STEM pada Pendidikan Sekolah Dasar," *Indones. J. Elem. Child. Educ.*, vol. 5, no. 3, pp. 98–104, Sep. 2024, [Online]. Available: <https://journal.publicationcenter.com/index.php/ijece/article/view/1586>
- [5] A. R. Ulya, I. Lubis, and S. Sukiman, "Konsep Technological Pedagogical and Content Knowledge dan Analisis Kebutuhan dalam Pengembangan Perangkat Pembelajaran," *Ideguru J. Karya Ilm. Guru*, vol. 8, no. 2, pp. 208–215, Jan. 2023, doi: 10.51169/ideguru.v8i2.501.
- [6] E. F. Janah, "Konsep dan Implementasi TPACK pada Pembelajaran di Sekolah Dasar," *Kalam Cendekia J. Ilm. Kependidikan*, vol. 10, no. 2, p. 348, Oct. 2022, doi: 10.20961/jkc.v10i2.65655.
- [7] E. Oktaviana and C. B. Yudha, "Tecnological Pedagogical Content Knowledge (TPACK) Dalam Pembelajaran Abad Ke-21," *Soc. Humanit. Educ. Stud. Conf. Ser.*, vol. 5, no. 2, p. 57, Jan. 2022, doi: 10.20961/shes.v5i2.58305.
- [8] F. Az-zahra and I. S. Nasution, "Pengaruh Model Pembelajaran Internet Of Things (IOT) terhadap Pemahaman Konsep Matematika pada Materi Penjumlahan terhadap Siswa SD Sanggar Belajar Kepong, Malaysia," *Jiip - J. Ilm. Ilmu Pendidik.*, vol. 8, no. 3, pp. 2470–2475, Mar. 2025, doi: 10.54371/jiip.v8i3.7161.
- [9] Z. Z. A. Thariq, "Internet of Educational Things (IoET): An Overview," *Vokasi Unesa Bull. Eng. Technol. Appl. Sci.*, vol. 1, no. 2, pp. 91–102, Dec. 2024, doi: 10.26740/vubeta.v1i2.35886.
- [10] M. I. Lestari, W. Wanto, and A. Supriyanto, "Efektivitas Diorama Siklus Air Interaktif Berbasis Internet of Things terhadap Hasil Belajar IPAS dalam Pendekatan Pembelajaran Mendalam: Analisis Berdasarkan Gaya Belajar," *Semin. Nas. Pros. Pendidik. Dasar Pros. Pendidik. Dasar*, vol. 2, no. 1, pp. 83–94, Jan. 2026, [Online]. Available: <https://semnaspendas.unpak.ac.id/index.php/SEMNASPENDAS/article/view/50>
- [11] Riskawati, S. Said, and N. M. Herman, "Efektivitas Simulasi Pola LED Menggunakan Tinkercad: Media Pembelajaran Inovatif pada Elektronika Dasar," *J. Pendidik. Fis. Undiksha*, vol. 14, no. 3, pp. 524–531, Dec. 2024, doi: 10.23887/jjpf.v14i3.87201.
- [12] A. T. Junaedi *et al.*, "Learning Smart Farming through IoT Prototypes, Educational Impacts of Smart Goat Housing Systems in Vocational Education," *Reflect. Educ. Pedagog. Insights*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, Jan. 2026, doi: 10.61230/reflection.v3i1.141.
- [13] U. Khaira *et al.*, "Pemberdayaan Siswa SMK melalui Pelatihan IoT untuk Sistem Monitoring Tanaman dalam Mendukung Smart Farming," *J. Masy. Madani Indones.*, vol. 5, no. 1, pp. 434–445, Jan. 2026, doi: 10.59025/9xvxt587.
- [14] M. Mardhatillah, S. M. Sari, and S. Sugiharto, "ANALISIS KETERLAKSANAAN MODEL PEMBELAJARAN TEMATIK TERINTEGRASI HOTS DAN INKLUSI SOSIAL BERBASIS INTERNET OF THINGS," *Visipena*, vol. 15, no. 1, pp. 96–113, Aug. 2024, doi: 10.46244/visipena.v15i1.2274.
- [15] B. Mudjiyanto, "TIPE PENELITIAN EKSPLOLATIF KOMUNIKASI," *J. Stud. Komun. dan Media*, vol. 22, no. 1, p. 65, Jun. 2018, doi: 10.31445/jskm.2018.220105.
- [16] E. Fajriatul Janah, "Kalam Cendekia: Jurnal Ilmiah Kependidikan Konsep dan Implementasi TPACK pada Pembelajaran di Sekolah Dasar," *Kalam Cendekia J. Ilm. Kependidikan*, vol. 10, no. 22, pp. 348–355, 2022.