

Inovasi pembelajaran STEM melalui desain prototipe sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT untuk siswa SMP



Fatimatuz Zahro ^{a*}, Eko Hariyono ^b, Beni Setiawan ^c

^{a, b, c} Department of Science Education (Master's Program), Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Negeri Surabaya, Jl. Ketintang, Surabaya, East Java 60231, Indonesia

* Email penulis korespondensi: fatimatuzzahro732@gmail.com

ABSTRAK

Minat terhadap pendidikan berbasis pembangunan berkelanjutan (*sustainability*) telah meningkat pesat dalam beberapa tahun terakhir. Hal ini selaras dengan panduan internasional yang termaktub dalam tujuan PBB dan UNESCO. Namun, implementasi pendekatan dalam desain pembelajaran STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) di tingkat SMP masih jarang dibahas terutama dalam konteks perancangan proyek tanpa implementasi langsung kepada siswa. Penelitian ini menggunakan metode penelitian *Research and Development* (R&Dz4) dengan model pengembangan 4D (*Define, Design, Develop, Disseminate*) yang dimodifikasi hingga tahap perancangan konsep. Fokus penelitian adalah perancangan proyek sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT yang mengintegrasikan isu keberlanjutan melalui teknologi sensor kelembapan, Arduino, dan kontrol otomatis. Hasil kajian menunjukkan bahwa desain proyek ini memiliki potensi untuk meningkatkan keterampilan berpikir kritis, kreatif, dan kolaboratif siswa. Tahapan *define* dan *design* menghasilkan identifikasi kebutuhan, rancangan konsep, serta integrasi elemen STEM dalam pembelajaran berbasis proyek. Desain ini memberikan panduan strategis bagi guru dan pengembang kurikulum dalam mengintegrasikan isu keberlanjutan ke dalam pembelajaran STEM dengan cara yang relevan dan aplikatif. Artikel ini memberikan kontribusi signifikan dalam menyediakan kerangka desain proyek STEM yang dapat menjadi dasar penelitian lebih lanjut serta implementasi di kelas pada masa mendatang

Kata kunci: *STEM Learning Innovation, IoT-Based Automatic Plant Irrigation System, Science Literacy for Junior High School Students*

PENDAHULUAN

STEM (*Science, Technology, Engineering, and Mathematics*) merupakan pendekatan pembelajaran yang memadukan empat disiplin ilmu utama tersebut untuk memberikan pengalaman belajar yang holistik, relevan, dan aplikatif (Marzuki et al., 2024). Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan siswa dalam berpikir kritis, kreatif, serta kemampuan memecahkan masalah yang kompleks. Pendekatan STEM pada dunia modern saat ini menjadi semakin relevan karena kebutuhan dunia kerja dan masyarakat global cenderung mengarah pada keahlian yang berbasis inovasi, kolaborasi, dan penguasaan teknologi (Wang & Li, 2024; Zhang et al., 2024).

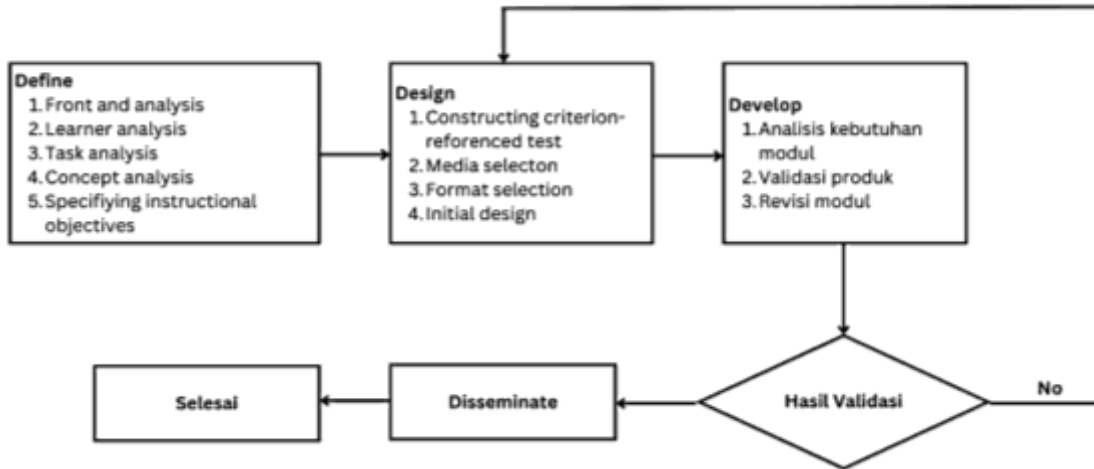
Di era revolusi industri 4.0 dan peralihan menuju masyarakat 5.0, tantangan yang dihadapi generasi muda semakin beragam. Melalui pendekatan STEM, pembelajaran tidak lagi

hanya berfokus pada pencapaian nilai akademik semata, tetapi juga pada pengembangan keterampilan abad ke-21. Pembelajaran dengan pendekatan STEM tidak lagi hanya berfokus pada pencapaian nilai akademik semata, tetapi juga pada pengembangan keterampilan abad ke-21 (Yalçın, 2024). Hasil penelitian oleh Izzah et al pada tahun 2024, pembelajaran sains di tingkat SMP masih banyak berfokus pada pendekatan konvensional yang kurang melibatkan aspek aplikatif dan interdisipliner (Izzah et al., 2024). Akibatnya, siswa sering kesulitan memahami relevansi sains dalam kehidupan sehari-hari. Data menunjukkan bahwa tingkat literasi sains siswa Indonesia, berdasarkan hasil PISA (*Programme for International Student Assessment*), masih berada di bawah rata-rata internasional. Selain itu, minimnya integrasi teknologi modern seperti IoT dalam pembelajaran menjadi hambatan dalam mempersiapkan siswa menghadapi tantangan abad ke-21 (Fitrianti et al., 2024; Khasanah et al., 2024; Supriyanto, 2024).

Pembelajaran sains harus mampu memberikan pengalaman belajar yang kontekstual dan mendorong siswa untuk berpikir kreatif serta mengaplikasikan ilmu pengetahuan dalam kehidupan nyata (Kinasih et al., 2024). Namun, pada kenyataannya, siswa masih jarang dilibatkan dalam aktivitas belajar yang memanfaatkan teknologi modern atau berbasis proyek. Hal ini menciptakan kesenjangan antara kemampuan yang diharapkan dengan kompetensi faktual siswa. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pendekatan STEM berbasis proyek dapat meningkatkan keterampilan berpikir kritis dan kolaborasi siswa (Lestari & Sari, 2024; Sholeh et al., 2024). Hasil penelitian oleh Asad et al pada tahun 2024 menunjukkan bahwa penggunaan IoT dalam pembelajaran mampu meningkatkan minat dan motivasi belajar siswa (Asad et al., 2024). Namun, penelitian yang mengembangkan dan mengimplementasikan prototipe berbasis IoT seperti sistem penyiraman tanaman otomatis untuk siswa SMP masih terbatas, khususnya dalam konteks pembelajaran STEM di Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan inovasi pembelajaran STEM melalui desain prototipe sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT untuk siswa SMP. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan solusi terhadap tantangan pembelajaran abad ke-21 dengan mempersiapkan siswa untuk menghadapi perkembangan teknologi. Berdasarkan latar belakang tersebut, pertanyaan penelitian dalam penelitian ini adalah Bagaimana proses pengembangan prototipe sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT untuk pembelajaran STEM?.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan model pengembangan 4D meliputi tahap *Define, Design, Develop* dan *Disseminate* yang dimodifikasi hingga tahap perancangan konsep. Model 4D ini hanya dimodifikasi hingga tahap perancangan konsep karena keterbatasan waktu dan sumber daya. Implementasi dan uji coba prototipe akan menjadi tahap lanjutan dari penelitian ini yang diharapkan dapat dilakukan di masa depan. Jenis data penelitian ini adalah kualitatif. Fokus penelitian ini adalah perancangan proyek sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis *Internet of Things* (IoT) terintegrasi isu keberlanjutan lingkungan melalui teknologi sensor kelembapan, Arduino dan kontrol otomatis. Berikut ini bagan prosedur pengembangan inovasi pembelajaran STEM.



Gambar 1. prosedur pengembangan inovasi pembelajaran STEM

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tahap Define

Tahap ini bertujuan untuk menetapkan dan mendefinisikan kebutuhan serta syarat pengembangan inovasi pembelajaran STEM. Analisis yang dilakukan meliputi

1. *Front-End Analysis*

Analisis ini dilakukan untuk mengidentifikasi permasalahan utama yang dihadapi siswa SMP. Permasalahan yang terdeteksi adalah rendahnya minat belajar pada mata pelajaran STEM, kurangnya fasilitas, dan minimnya pemahaman siswa terhadap teknologi IoT menjadi dasar pengembangan prototipe sistem penyiraman tanaman otomatis.

2. *Learner Analysis*

Tahapan ini dilakukan untuk mengetahui secara detail keadaan siswa yang akan menggunakan inovasi pembelajaran STEM melalui desain prototipe sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT. Tahapan pada learner analysis adalah melakukan observasi karakteristik siswa untuk mengetahui kemampuan dasar dalam sains, teknologi, matematik serta motivasi belajar siswa. Data yang diperoleh digunakan untuk mengembangkan rancangan proyek/prototipe agar ketika digunakan oleh siswa dapat dengan mudah digunakan dan dipahami.

3. *Task Analysis*

Tahap ini dilakukan untuk mengidentifikasi tugas-tugas yang harus dipahami dan dikuasai oleh siswa agar dapat memenuhi kompetensi yang telah ditentukan. Tugas-tugas yang harus dipahami dan dikuasai siswa adalah merancang prototipe IoT, memahami prinsip kerja sensor kelembapan dan mengintegrasikan Arduino dengan kontrol otomatis.

4. *Concept Analysis*

Tahap ini dilakukan untuk mengidentifikasi konsep-konsep STEM yang diajarkan meliputi pengenalan IoT, prinsip kerja sensor, logika pemrograman, dan prinsip keberlanjutan. Konsep-konsep ini disusun secara sistematis untuk membentuk peta konsep yang relevan dengan tujuan pembelajaran.

5. Specifying Instructional Objectives

Penentuan tujuan pembelajaran dilakukan berdasarkan kompetensi yang ingin dicapai siswa. Dalam hal ini, siswa diharapkan mampu merancang prototipe sistem penyiraman otomatis yang berbasis IoT, memahami aplikasi teknologi dalam keberlanjutan serta dapat meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan kreatif.

Tahap *Design*

Tahap ini bertujuan untuk menyusun rancangan awal pembelajaran yang terstruktur dan sistematis.

1. Constructing Criterion-Referenced Test

Tahap ini dilakukan untuk melakukan penyusunan kriteria penilaian dengan tujuan mengukur keberhasilan siswa dalam memahami konsep STEM dan kemampuan siswa dalam merancang prototipe. Tes ini dilakukan untuk menilai kelayakan rancangan pembelajaran.

2. Media Selection

Pemilihan media pembelajaran dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik siswa SMP. Media yang dipilih berupa modul berbasis proyek, video tutorial, dan panduan penggunaan komponen IoT (sensor kelembapan, Arduino).

3. Format Selection

Penentuan format penyajian dilakukan untuk memastikan pembelajaran lebih menarik dan mudah diikuti. Format yang digunakan adalah panduan langkah-langkah berbasis proyek dengan visualisasi yang menarik dan penugasan praktis.

4. Initial Design

Draft awal modul pembelajaran dirancang untuk mendukung siswa dalam memahami proses merancang prototipe sistem penyiraman tanaman berbasis IoT. Draft ini mencakup tujuan pembelajaran, langkah-langkah kerja, serta evaluasi keberhasilan proyek.

Tahap *Develop*

Tahap pengembangan mencakup validasi produk dan revisi berdasarkan masukan ahli.

1. Validasi Produk

Produk yang telah dirancang divalidasi oleh ahli materi pembelajaran STEM dan ahli teknologi IoT. Validasi ini mencakup kelayakan materi, keakuratan konsep STEM, serta kesesuaian dengan tingkat pemahaman siswa SMP.

2. Revisi Produk

Revisi dilakukan berdasarkan masukan dari validator ahli. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kualitas modul dan memastikan bahwa produk layak digunakan dalam pembelajaran.

Tahap *Disseminate*

Tahap ini bertujuan untuk menyebarluaskan hasil pengembangan kepada pengguna yang membutuhkan.

1. Packaging

Produk pembelajaran meliputi modul, panduan proyek dan video tutorial dikemas dalam bentuk digital untuk mempermudah penyebaran melalui platform online.

2. Difusi dan Adopsi

Produk disebarluaskan melalui workshop untuk guru, pelatihan siswa, serta komunitas pendidikan STEM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis pada tahap define dapat diperoleh data kualitatif. Berikut adalah hasil tahap define yang disajikan dalam bentuk tabel berikut:

Tabel 1. Hasil Analisis Tahap *Define*

Tahap Define	Hasil Analisis
<i>Fornt-End Analysis</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Rendahnya minat siswa terhadap mata pelajaran STEM 2. Kurangnya fasilitas pembelajaran STEM 3. Minimnya pemahaman siswa terhadap teknologi IoT
<i>Learner Analysis</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Kemampuan dasar siswa terbatas dalam sains, teknologi dan maematika 2. Siswa lebih termotivasi dengan pembelajaran berbasis proyek dan visualisasi menarik 3. Motivasi belajr meningkat ketika ada tantangan atau proyek yang relevan dengan kehidupan sehari-hari
<i>Task Analysis</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Siswa perlu memahami cara merancang protoipe IoT 2. Siswa perlu menguasai integrasi Arduino dan kontrol otomatis
<i>Concept Analysis</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Pengenalan IoT dan aplikasinya dalam kehidupan sehari-hari 2. Prinsip kerja sensor kelembapan tanah 3. Logika pemrograman sederhana untuk megintegraskan komponen 4. Prinsip keberlanjutan yang relevan dengan efisiensi penggunaan air
<i>Specifying Instructional Objectives</i>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Siswa mampu merancang prototipe sistem penyiraman otomatis berbasis IoT secara amndiri 2. Siswa memahami teknologi IoT dalam mendukung keberlanjutan lingkungan 3. Siswa meningkatkan kemampuan berpikir kritis dan kreatif melalui proyek STEM

Berdasarkan tabel 1 tersebut, dapat diketahui bahwa rendahnya minat siswa terhadap STEM merupakan isu kritis yang terlihat dari perilaku siswa di kelas. Siwa dikelas rendah dalam berpartisipasi aktif dalam diskusi dan kecenderungan untuk tidak menyelesaikan tugas. Faktor penyebab tersebut diketahui bahwa guru masih mengandalkan metode ceramah tanpa melibatkan teknologi modern, sehingga pembelajaran terasa monoton dan kurang relevan dengan kehidupan sehari-hari. Hal ini menciptakan jarak emosional antara siswa dan materi STEM. Faktor selanjutnya disebabkan karena kurangnya keterkaitan dengan kehidupan nyata. Siswa merasa materi STEM sulit diterapkan dalam kehidupan mereka sehingga menurunkan motivasi intrinsik untuk belajar. Kurangnya Fasilitas Pembelajaran STEM seperti keterbatasan fasilitas laboratorium dan alat pembelajaran modern berdampak pada pembelajaran masih menggunakan alat sederhana yang tidak mendukung eksperimen STEM berbasis teknologi. Hal ini membuat siswa sulit memahami konsep teknologi modern. Keterbatasan sumber daya guru yang tidak memiliki akses yang memadai terhadap materi ajar atau pelatihan untuk memanfaatkan teknologi modern dalam pembelajaran memberikan penekanan bahwa pengembangan media pembelajaran berbasis teknologi yang dapat digunakan secara fleksibel di kelas. Siswa umumnya belum mengenal konsep IoT sebagai teknologi yang relevan dalam kehidupan sehari-hari. Hasil wawancara menunjukkan bahwa siswa tidak terbiasa menggunakan atau memahami teknologi IoT sehingga sulit untuk memahami aplikasinya dalam pembelajaran. Selain itu, siswa belum memiliki keterampilan teknologi dasar menjadi

hambatan dalam pembelajaran berbasis teknologi. Solusi dari adanya kesenjangan ini dapat memperkenalkan konsep IoT secara bertahap melalui aktivitas sederhana seperti pengenalan sensor kelembapan dan penggunaannya dalam sistem penyiraman otomatis.

Berdasarkan observasi pada tahap learner analysis, siswa memiliki motivasi yang lebih tinggi ketika pembelajaran dilakukan secara praktis dan visual. Hal ini menunjukkan kebutuhan pembelajaran berbasis proyek perancangan prototipe IoT dapat meningkatkan keterlibatan siswa karena memberikan pengalaman nyata yang relevan dengan kehidupan mereka. Proyek tersebut memberikan visualisasi menarik sebagai daya tarik. Siswa lebih responsif terhadap pembelajaran berbasis media visual (video tutorial, simulasi, atau diagram interaktif). Hasil karakteristik yang didapatkan akan digunakan untuk membuat rancangan pembelajaran agar dapat berlangsung dengan efektif.

Berdasarkan hasil analisis pada tahapan task analysis, tugas-tugas yang dirancang untuk siswa bertujuan untuk meningkatkan kemampuan teknis dan pemahaman konsep STEM. Tahapan ini dirancang sebagai proses bertahap dan terarah. Dimulai dari pengenalan komponen sederhana (sensor kelembapan, Arduino) hingga integrasi komponen ke dalam sistem otomatis. Siswa dilibatkan untuk menggunakan penguasaan logika pemrograman dasar untuk mendukung integrasi perangkat keras dan perangkat lunak. Siswa diarahkan untuk menyelesaikan proyek yang memberikan manfaat nyata seperti efisiensi penggunaan air untuk menyirami tanaman. Tahapan ini dirancang agar siswa memiliki pengalaman belajar yang terstruktur dan relevan.

Berdasarkan hasil analisis pada tahapan concept analysis, pemetaan konsep berfungsi untuk mengidentifikasi bahwa pembelajaran sesuai dengan kompetensi yang diharapkan. Penekanan pada konsep IoT, logika pemrograman, dan keberlanjutan bertujuan untuk meningkatkan relevansi pembelajaran. Siswa dapat melihat hubungan antara STEM dan kehidupan nyata. Pembelajaran tidak hanya berbasis teknologi, tetapi juga menanamkan kesadaran akan keberlanjutan lingkungan.

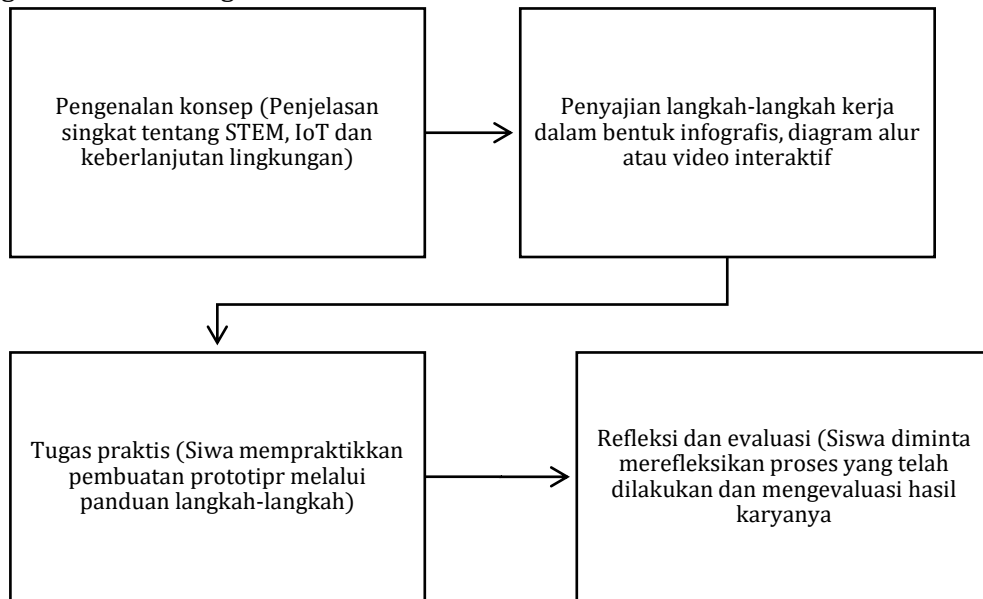
Berdasarkan hasil analisis pada tahap specifying instructional objectives tujuan pembelajaran dirancang untuk mencapai hasil yang terukur dan relevan diantaranya peningkatan keterampilan teknis. Siswa dapat merancang prototipe IoT secara mandiri dan memahami bagaimana teknologi dapat mendukung efisiensi dan keberlanjutan lingkungan. Proyek STEM ini diharapkan dapat mengeksplorasi solusi inovatif dan berpikir secara analitis. Keberhasilan tahap define ini menunjukkan bahwa rancangan konsep pembelajaran yang direncanakan dapat mendukung siswa dalam memahami dan menerapkan konsep-konsep STEM secara aplikatif.

Tahap Design pada pembelajaran dirancang untuk memastikan siswa memahami dan mampu mengimplementasikan konsep STEM melalui pendekatan berbasis proyek. Rancangan ini disusun dengan pendekatan sistematis yang melibatkan beberapa komponen utama, yaitu penyusunan tes berbasis kriteria, pemilihan media, penentuan format penyajian, dan desain awal modul pembelajaran. Langkah awal pada tahap design ini menyusun kriteria penilaian untuk mengukur keberhasilan siswa dalam memahami konsep STEM dan keterampilan mereka dalam merancang prototipe. Tes yang dirancang terdiri dari dua komponen utama yaitu tes konseptual STEM berupa soal pilihan ganda dan esai singkat untuk mengevaluasi pemahaman

siswa terhadap prinsip kerja sensor kelembapan, dasar logika pemrograman, dan konsep keberlanjutan dan penilaian proyek menggunakan rubrik untuk menilai prototipe siswa berdasarkan aspek kesesuaian desain dengan tujuan pembelajaran (fungsi prototipe), kemampuan integrasi komponen IoT dan kreativitas dan efisiensi prototipe yang dirancang.

Langkah kedua pada tahap design adalah pemilihan media. Terdapat 3 jenis media pembelajaran berdasarkan karakteristik siswa SMP yaitu 1) modul berbasis proyek untuk memberikan penjelasan sistematis terkait langkah-langkah pengerjaan proyek, 2) Video tutorial untuk menyediakan visualisasi proses perancangan prototipe IoT sehingga siswa lebih mudah memahami konsep, 3) Panduan penggunaan komponen IoT berupa dokumen yang menjelaskan fungsi dan cara kerja perangkat sensor kelembapan dan arduino.

Format penyajian pembelajaran dirancang agar pembelajaran lebih menarik dan mudah diikuti oleh siswa. Penentuan format penyajian pembelajaran dirancang berbasis proyek dengan struktur sebagai berikut:

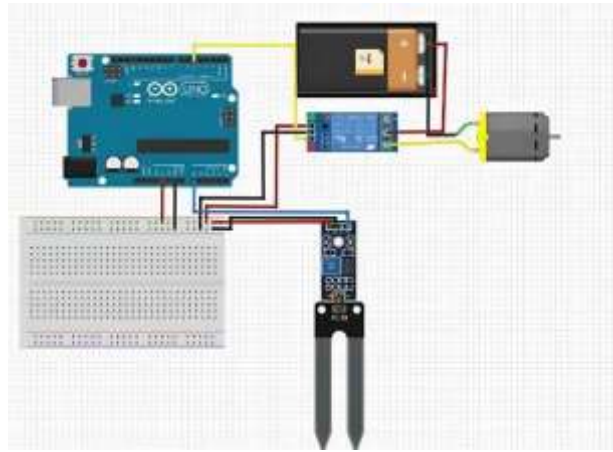


Gambar 2. Struktur Format Penyajian Pembelajaran

Langkah terakhir pada tahap design adalah mendesain awal modul pembelajaran. Modul ini disusun dengan bahasa yang sederhana dan dilengkapi ilustrasi untuk memudahkan siswa dalam memahami. Draft awal modul pembelajaran berisi 1) tujuan pembelajaran yaitu siswa mampu memahami prinsip kerja IoT dan mengaplikasikannya dalam proyek penyiraman otomatis berbasis sensor kelembapan. 2) Langkah-langkah proyek yang mana disetiap langkah dijelaskan secara rinci, mulai dari perakitan komponen, pemrograman Arduino, hingga integrasi sensor dengan sistem penyiraman otomatis. 3) evaluasi proyek dimana pada tahap ini rubrik penilaian proyek disertakan untuk menilai hasil akhir siswa baik dari segi teknis maupun kreativitas.

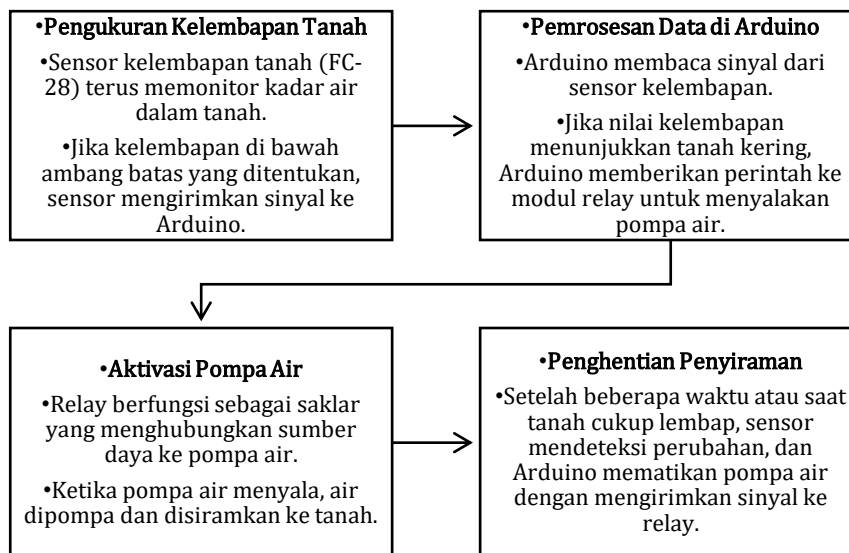
Komponen utama pada inovasi pembelajaran STEM sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT terdiri dari 1) Aduino Uno sebagai microcontroller yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem dan menerima input dari sensor kelembapan tanah dan mengontrol pompa air melalui relay. 2) Sensor kelembapan tanah (FC-28) berfungsi untuk

mendeteksi tingkat kelembapan tanah. Sensor ini dapat mendeteksi kondisi tanah kering kemudian mengirimkan sinyal ke Arduino. 3) Relay modul sebagai komponen perantara yang dapat membuat Arduino mengontrol perangkat dengan daya lebih tinggi seperti pompa air serta sebagai saklar elektronik. 4) Pompa dc 5V berfungsi sebagai pemompa air untuk menyiram tanaman. 5) Eksternal power 5V yang berfungsi untuk menghidupkan pompa air dan modul relay. 6) *Breadboard* dan kabel jumper yang berfungsi untuk menghubungkan semua komponen dengan rapi tanpa memerlukan soldering.



Gambar 3. Skema sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT

Alur kerja sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT dideskripsikan pada alur dibawah ini:



Gambar 4. Alur kerja sistem penyiraman tanaman otomatis berbasis IoT

Keterkaitan Proyek STEM dengan pembelajaran STEM ini terletak pada prinsip kelembapan tanah dan kebutuhan air tanaman yang berkaitan dengan sains, implementasi teknologi berbasis IoT untuk otomasi yang berkaitan dengan teknologi, Desain rangkaian elektronik fungsional yang berkaitan dengan *engineering* dan perhitungan ambang batas kelembapan tanah dan durasi penyiraman yang berkaitan dengan matematika. Inovasi proyek

ini diharapkan dapat mengembangkan keterampilan pemecahan masalah, pemrograman dasar dan pengembangan prototipe. Desain prototipe ini memiliki keuntungan dalam efisiensi waktu dan tenaga dalam penyiraman tanaman serta efisiensi penggunaan air dengan menyesuaikan kebutuhan tanaman sehingga dapat menciptakan pembelajaran aktif berbasis proyek bagi siswa

KESIMPULAN

Inovasi pembelajaran berbasis STEM IoT dirancang untuk mengatasi rendahnya minat siswa terhadap STEM dengan pendekatan berbasis proyek yang relevan dengan kehidupan sehari-hari. Proyek ini melibatkan rancangan sistem penyiraman otomatis berbasis IoT, yang mengintegrasikan sains, teknologi, teknik, dan matematika secara aplikatif. Melalui media pembelajaran seperti modul berbasis proyek, video tutorial, dan panduan penggunaan komponen IoT, siswa diarahkan untuk memahami konsep keberlanjutan, meningkatkan keterampilan teknis, serta berpikir kritis dan kreatif. Proyek ini memberikan pengalaman belajar yang bermakna serta berdampak pada efisiensi penggunaan air dan teknologi modern sehingga dapat memberikan solusi efektif untuk meningkatkan keterlibatan dan kompetensi siswa dalam pembelajaran STEM.

REFERENSI

- Asad, M. M., Naz, A., Shaikh, A., Alrizq, M., Akram, M., & Alghamdi, A. (2024). Investigating the impact of IoT-Based smart laboratories on students' academic performance in higher education. *Universal Access in the Information Society*, 23(3), 1135–1149. <https://doi.org/10.1007/S10209-022-00944-1/TABLES/3>
- Fitrianti, E., Annur, S., & Afriantoni. (2024). Revolusi Industri 4.0: Inovasi dan Tantangan dalam Pendidikan di Indonesia. *Journal of Education and Culture*, 4(1), 28–35. <https://ejournal.indrainstitute.id/index.php/jec/article/view/860>
- Izzah, A. N., Erwandi, A. M., Sanjaya, N. A. A., Marini, A., & Yunus, M. (2024). Efektivitas Penggunaan Model Pembelajaran Inkuiri Dalam Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis Siswa Pada Pembelajaran Ips Di Sekolah Dasar The Use Of Inquiry Models To Improve Students' Critical Thinking Abilities In Social Studies Learning In Element. *Sindoro: Cendikia Pendidikan*, 8(1), 61–70. <https://doi.org/10.9644/SINDORO.V8I1.6826>
- Khasanah, R., Risdayatye, D., Pratiwi, D. S., & Rustini, T. (2024). Peluang Dan Tantangan Teknologi Dalam Pembelajaran Bagi Pendidikan Indonesia. *Sindoro: Cendikia Pendidikan*, 4(9), 1–10. <https://doi.org/10.9644/SINDORO.V4I9.3537>
- Kinasih, D. L., Hariyanto, P. D., Nurjanah, P. W., Sa'diyah, S. N., Sari, Y. P., & Wicaksono, I. (2024). Pengaruh Pembelajaran Berbasis Praktikum Terhadap Pemahaman Siswa Pada Materi Perubahan Wujud Benda. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 9(2). <https://doi.org/10.23969/JP.V9I2.16164>
- Lestari, S., & Sari, R. P. (2024). Implementasi Pembelajaran Berbasis Proyek Dalam Pengembangan Kemampuan Berpikir Kritis Peserta Didik Smp. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran (JRPP)*, 7(1), 2004–2011. <https://doi.org/10.31004/JRPP.V7I1.25615>

- Marzuki, O. F., Lih, E. T. Y., Abdullah, W. N. Z. Z. @, Khairuddin, N., Inai, N. H., Saad, J. B. M., & Aziz, M. H. A. (2024). Innovating Education: A Comprehensive Review of STEM Education Approaches. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, 13(1). <https://ijarped.com/index.php/journal/article/view/597>
- Sholeh, M. I., 'Azah, N., Tasya', D. A., Sokip, Syafi'i, A., Sahri, Rosyidi, H., Arifin, Z., & Rahman, S. F. binti A. (2024). Penerapan Pembelajaran Berbasis Proyek (Pjbl) Dalam Meningkatkan Kemampuan Berpikir Kritis Siswa. *Jurnal Tinta: Jurnal Ilmu Keguruan Dan Pendidikan*, 6(2), 158–176. <https://ejournal.alqolam.ac.id/index.php/jurnaltinta/article/view/1484>
- Supriyanto, D. (2024). Implementasi Teknologi Digital Untuk Peningkatan Keterampilan Digital Guru Di Sekolah Menengah. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran (JRPP)*, 7(4), 16232–16242. <https://doi.org/10.31004/JRPP.V7I4.37469>
- Wang, B., & Li, P. ping. (2024). Digital creativity in STEM education: the impact of digital tools and pedagogical learning models on the students' creative thinking skills development. *Interactive Learning Environments*. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2155839>
- Yalçın, V. (2024). Design-Oriented Thinking in STEM education: Exploring the Impact on Preschool Children's Twenty-First-Century Skills. *Science and Education*, 33(4), 901–922. <https://doi.org/10.1007/S11191-022-00410-7/TABLES/11>
- Zhang, Q., Shi, B., Liu, Y., Liang, Z., & Qi, L. (2024). The impact of educational digitalization on the creativity of students with special needs: the role of study crafting and creative self-efficacy. *Humanities and Social Sciences Communications 2024* 11:1, 11(1), 1–13. <https://doi.org/10.1057/s41599-024-03232-w>