

Mechanical System Design for a Handling System Demonstrator for Simulating Real Production Environments

Ignatius Henry Ismadi^{ID1)}, Tri Hannanto Saputra^{ID2)}, Ratmono Hari Widyatmoko^{ID3)}, Andi Prasetyo^{ID4)}, Dikky Kusuma Wijaya^{ID5)}, Romi Supriyono^{ID6)}, dan Alto Gandhang Praba^{ID7)}

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Perancangan Mekanik dan Mesin, Politeknik ATMI Surakarta

E-mail: hannanto.saputra@atmi.ac.id¹, henry.ismadi@atmi.ac.id², ratmono.hari@atmi.ac.id³, andi.prasetyo@atmi.ac.id⁴, dikky.kusuma@atmi.ac.id⁵, romi.supriyono@atmi.ac.id⁶, alto.20233004@student.atmi.ac.id⁷

ABSTRACT

The paradigm shift in manufacturing towards Industry 4.0 requires the availability of vocational education infrastructure that is capable of representing actual production floor conditions. The material handling system is a vital component in the integration of the industrial supply chain, which involves precise synchronization between mechanical design and control systems. However, the educational tools currently available often fail to simulate the complexity of this integration due to designs that are too simple or not industry standard. This study aims to design and realize a mechanical system in a material handling system simulator by adopting the Learning Factory concept. The research was conducted using the Research and Development (R&D) method with the ADDIE approach. The main focus of the research was the design of a modular mechanical structure using aluminum profiles, conveyor transmission mechanisms, and an integrated electro-pneumatic control system. The design results were validated through the realization of physical prototypes and functional testing. The research results show that the developed mechanical design has high rigidity and is capable of simulating the material transportation process with stability. The designed control system successfully integrated inductive and optical sensors and pneumatic actuators with 100% sorting logic accuracy. This simulator provides a realistic platform for students to learn about the interaction between mechanical and control components in a safe but authentic production environment.

Keywords: ADDIE, Mechanical Design, Handling System, Learning Factory, Mechanical System.

Desain Sistem Mekanik pada Alat Peraga Handling System untuk Simulasi Lingkungan Produksi Nyata

ABSTRAK

Pergeseran paradigma manufaktur menuju Industri 4.0 menuntut ketersediaan infrastruktur pendidikan vokasi yang mampu merepresentasikan kondisi lantai produksi yang sebenarnya. Sistem penanganan material (*Handling System*) merupakan komponen vital dalam integrasi rantai pasok industri, yang melibatkan sinkronisasi presisi antara desain mekanik dan sistem kontrol. Namun, alat peraga pendidikan yang tersedia saat ini seringkali kurang mensimulasikan kompleksitas integrasi tersebut karena desain yang terlalu sederhana atau tidak standar industri. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain dan merealisasikan sistem mekanik pada simulator *Handling System* dengan mengadopsi konsep *Learning Factory*. Penelitian dilakukan menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan ADDIE. Fokus utama penelitian adalah perancangan struktur mekanik modular menggunakan profil aluminium, mekanisme transmisi conveyor, serta sistem kontrol elektro-pneumatik yang terintegrasi. Hasil perancangan divalidasi melalui realisasi prototipe fisik dan pengujian fungsional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa desain mekanik yang dikembangkan memiliki ketelitian tinggi dan mampu mensimulasikan proses transportasi material dengan stabil. Sistem kontrol yang dirancang berhasil mengintegrasikan sensor induktif, optik, dan aktuator pneumatik dengan tingkat akurasi logika penyortiran 100%. Simulator ini memberikan platform realistik bagi mahasiswa untuk mempelajari interaksi antara komponen mekanik dan kontrol dalam lingkungan produksi yang aman namun otentik.

Kata Kunci: ADDIE, Desain Mekanik, Handling System, Learning Factory, Sistem Mekanik.



1. PENDAHULUAN

Dalam ekosistem pendidikan vokasi, mata kuliah Dalam era otomasi industri dan digitalisasi saat ini, kebutuhan akan tenaga kerja yang kompeten dalam mengelola sistem produksi terintegrasi semakin mendesak. Industri manufaktur modern tidak lagi beroperasi dengan mesin-mesin yang berdiri sendiri (*standalone*), melainkan melalui sistem yang saling terhubung di mana aliran material (*material flow*) menjadi kunci efisiensi produksi (Suradi, 2020). Sistem penanganan material atau Handling System memegang peranan sentral dalam proses ini, berfungsi sebagai penghubung fisik antar stasiun kerja, mulai dari bahan baku hingga barang jadi (Kurniawan dkk., 2021).

Pendidikan tinggi vokasi, khususnya politeknik, memiliki mandat untuk menghasilkan lulusan yang "siap kerja" dengan kompetensi yang relevan dengan kebutuhan industri tersebut (Sukmana dkk., 2025). Namun, terdapat tantangan signifikan dalam proses pembelajaran teknik saat ini. Kesenjangan (*gap*) antara teknologi yang diajarkan di kampus dengan teknologi yang digunakan di industri masih cukup lebar. Banyak alat peraga di laboratorium pendidikan masih bersifat konvensional, di mana aspek mekanik dan kontrol diajarkan secara terpisah (Saleh dkk., 2024). Akibatnya, mahasiswa sering kali memahami cara kerja sensor atau motor secara individu, namun gagal memahami bagaimana komponen-komponen tersebut diintegrasikan dalam sebuah sistem produksi yang dinamis (Saleh dkk., 2025).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, konsep Learning Factory (Pabrik Pembelajaran) diperkenalkan sebagai pendekatan didaktis yang efektif. Indarta (2025) mendefinisikan *Learning Factory* sebagai lingkungan pembelajaran yang mereplikasi kondisi industri nyata, mencakup aspek teknis, organisasi, dan didaktis. Penerapan konsep ini terbukti mampu meningkatkan retention skill mahasiswa karena mereka berhadapan langsung dengan masalah-masalah riil yang muncul dalam sistem produksi, seperti gesekan mekanik, delay sensor, hingga manajemen tekanan udara pada pneumatik (Suhara, 2024).

Meskipun konsep Learning Factory sangat ideal, implementasinya sering terhambat oleh biaya investasi yang masif dan kebutuhan ruang yang besar (Sunaryo, 2023). Oleh karena itu, diperlukan inovasi desain alat peraga skala laboratorium (*desktop size*) yang mampu mempertahankan karakteristik "nyata" dari sistem industri tersebut. Penelitian ini berfokus pada pengembangan desain sistem kontrol dan mekanik pada simulator *Handling System*. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi komponen standar industri (seperti profil aluminium ekstrusi, sensor industri 24V, dan pneumatik standar ISO) ke dalam sebuah unit latih kompak yang dirancang menggunakan metode ADDIE. Tujuan utamanya adalah menciptakan alat simulasi yang valid secara teknis untuk mendukung pembelajaran berbasis praktik industri.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan desain sistem kontrol dan mekanik pada simulator *Handling System* sebagai bagian dari upaya menghadirkan miniatur Learning Factory yang fungsional. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi komponen standar industri—mulai dari profil aluminium ekstrusi, sensor industri 24V, aktuator pneumatik berstandar ISO, hingga perangkat kendali programmable—ke dalam satu unit latih kompak. Pendekatan ini memastikan bahwa alat simulasi tidak hanya mereplikasi fungsi secara dasar, tetapi juga memberi pengalaman praktik yang mendekati kondisi industri. Proses pengembangan dilakukan dengan menggunakan metode ADDIE (Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate), yang memungkinkan rancangan alat diuji secara sistematis dari aspek analisis kebutuhan hingga validasi pengguna (Rahayu, 2025).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah menghasilkan alat simulasi yang valid secara teknis dan dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran praktik industri di lingkungan pendidikan vokasi. Dengan adanya simulator ini, mahasiswa diharapkan dapat memahami konsep otomatisasi, sistem kendali, dan operasi handling industri tanpa harus bergantung pada fasilitas skala besar yang memerlukan biaya tinggi. Selain itu, alat ini juga membuka peluang untuk memperkaya kurikulum praktik, meningkatkan keterampilan teknis mahasiswa, serta memperkuat kesiapan mereka untuk masuk ke dunia kerja berbasis teknologi industri (Mumtazati dkk., 2025).

2. RUANG LINGKUP

Ruang lingkup pada penelitian ini membahas mengenai :

2.1. Material Handling System dalam Otomasi

Material Handling adalah seni dan ilmu yang melibatkan pergerakan, pengemasan, dan penyimpanan bahan dalam berbagai bentuk. Dalam konteks otomasi, *handling system* otomatis menggunakan kombinasi elemen deteksi (sensor), elemen pemroses (kontroler), dan elemen penggerak (aktuator) (Atus dkk., 2025). Elemen mekanik seperti *belt conveyor* harus didesain dengan presisi untuk meminimalkan *slip* dan getaran, sementara sistem kontrol harus mampu merespons input sensor dalam hitungan milidetik untuk melakukan aksi penyortiran yang akurat (Pratama, 2024).

2.2. Sensor dan Aktuator Industri

Pemilihan komponen kontrol sangat krusial dalam simulasi industri. Sensor *photoelectric* dan *inductive proximity* adalah standar industri untuk mendeteksi keberadaan dan jenis material (logam/non-logam) (Cahayaning, 2020). Di sisi aktuator, motor DC dan silinder pneumatik mendominasi aplikasi *handling* ringan hingga menengah. Penggunaan komponen yang sama persis dengan yang ada di industri (bukan komponen hobi/mainan) pada alat peraga pendidikan sangat penting untuk memberikan "industrial feel" kepada mahasiswa.

2.3. Pendekatan Desain Learning Factory

Fitur utama dari *Learning Factory* adalah otentisitas. Hal ini berarti alat peraga tidak boleh hanya berupa simulasi komputer, tetapi harus melibatkan proses fisik. *Learning Factory* harus memfasilitasi pengembangan keterampilan teknis (hard skills) dan metodologis (Ridho dkk., 2025). Oleh karena itu, desain alat peraga harus bersifat modular dan transparan, memungkinkan mahasiswa untuk melihat, membongkar, dan memahami interaksi antar subsistem (Pramudika & Nugraha, 2025).

2.4. Metode Pengembangan ADDIE

Metode ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) merupakan kerangka kerja standar dalam desain sistem instruksional dan pengembangan produk pendidikan (Siregar & Rhamayanti, 2025). ADDIE sangat efektif karena sifatnya yang iteratif, di mana hasil evaluasi dari setiap tahap dapat digunakan untuk merevisi tahap sebelumnya (Fitriyah dkk., 2025). Dalam konteks rekayasa (*engineering*), tahap *Design* dan *Develop* dalam ADDIE sangat selaras dengan siklus pengembangan produk teknik, mulai dari CAD hingga *prototyping* (Ammar, 2025)

3. BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menerapkan metode *Research and Development* (R&D) dengan mengadopsi kerangka kerja model ADDIE (*Analyze, Design, Develop, Implement, Evaluate*) (Rindrayani dkk., 2025). Meskipun model ini mencakup lima tahapan komprehensif, artikel ini secara khusus memfokuskan pembahasan pada tahap *Design* dan *Develop*, mengingat kedua tahapan tersebut merepresentasikan inti dari proses rekayasa sistem yang dilakukan dalam pengembangan alat peraga ini.

3.1. Tahap Analisis (*Analyze*)

Tahap analisis difokuskan pada pemetaan kebutuhan teknis (*technical requirements*) melalui observasi mendalam di lingkungan Politeknik ATMI Surakarta. Berdasarkan hasil observasi tersebut, ditetapkan sejumlah spesifikasi teknis utama yang harus dipenuhi oleh alat peraga. Spesifikasi tersebut meliputi kemampuan sistem untuk membedakan minimal dua jenis material (logam dan non-logam), penggunaan mekanisme penggerak berbasis *conveyor belt*, serta integrasi mekanisme penyortiran (*sorting*) otomatis. Selain itu, alat dirancang untuk beroperasi pada tegangan aman industri sebesar 24V DC dengan batasan dimensi fisik maksimal 600mm x 400mm guna memastikan kompatibilitas alat dengan ketersediaan ruang di meja kerja laboratorium.

3.2. Tahap Perancangan (*Design*)

Proses perancangan dilaksanakan secara terintegrasi dalam dua domain utama, yaitu mekanik dan sistem kontrol. Pada domain mekanik, perancangan dilakukan

menggunakan perangkat lunak SolidWorks 2024 yang mencakup pemilihan material rangka, perhitungan transmisi daya dari motor ke *pulley conveyor*, serta desain *mounting sensor* yang bersifat *adjustable* agar posisi deteksi dapat diatur sesuai kebutuhan eksperimen. Secara simultan, perancangan sistem kontrol dilakukan dengan menyusun diagram alir (*flowchart*) untuk mendefinisikan logika kerja alat, pembuatan desain skematik elektrikal (*wiring diagram*), serta penyusunan diagram sirkuit pneumatik untuk mendukung fungsi aktuasi sistem.

3.3. Tahap Pengembangan (*Develop*)

Tahap pengembangan merupakan fase realisasi fisik dari rancangan yang telah dibuat. Proses manufaktur dalam tahap ini melibatkan serangkaian prosedur teknis, dimulai dari proses pemotongan (*cutting*) material profil aluminium dan plat akrilik, dilanjutkan dengan proses pemesinan (*machining*) menggunakan mesin bubut dan *milling* untuk fabrikasi komponen presisi seperti poros *pulley* dan dudukan *bearing*. Tahapan ini diakhiri dengan proses perakitan (*assembly*) seluruh komponen mekanik serta instalasi komponen elektrik (*wiring*) guna membentuk satu kesatuan sistem yang utuh.

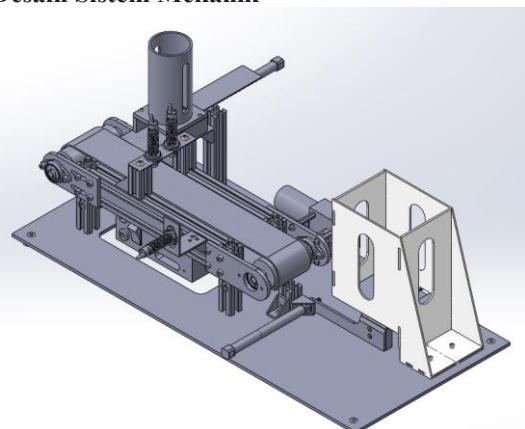
3.4. Tahap Implementasi dan Evaluasi

Pada tahap akhir, alat peraga yang telah selesai diproduksi menjalani serangkaian pengujian fungsional (*functional testing*) (Permata dkk., 2025). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi keandalan desain mekanik dalam beroperasi tanpa hambatan (*jaming*), serta memvalidasi responsivitas sistem kontrol agar berjalan presisi sesuai dengan logika algoritma yang telah dirancang sebelumnya.

4. PEMBAHASAN

Pada pembahasan ini memaparkan hasil detail dari desain mekanik dan sistem kontrol yang telah dikembangkan, serta analisis kinerjanya.

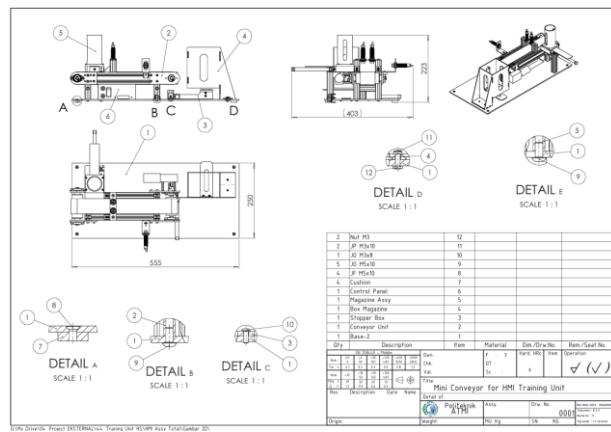
4.1. Desain Sistem Mekanik



Gambar 1. Gambar Sistem Mekanik 3D

Figure 1. 3D Mechanical System Drawings

Desain mekanik pada gambar 1 dirancang dengan prinsip modularitas dan kekokohan (*rigidity*). Rangka utama menggunakan Aluminium Extrusion Profile seri 2020 (20 x 20mm). Pemilihan material ini didasarkan pada kemudahan perakitan menggunakan T-nut dan baut, yang merepresentasikan sistem framing standar di industri.



Gambar 2. Gambar Rakitan Sistem Mekanik
Figure 2. Mechanical System Assembly Drawings

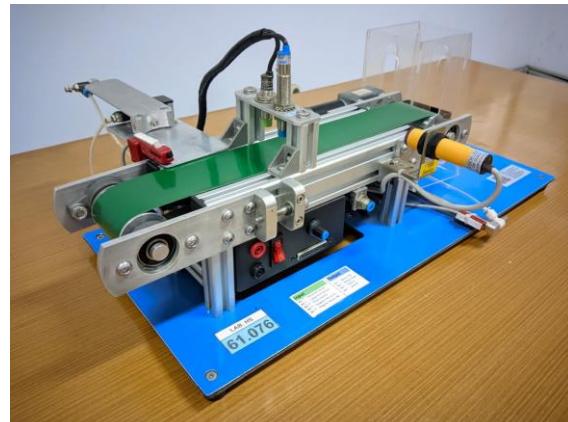
Gambar 1 dan 2 menunjukkan integrasi tiga subsistem mekanik utama:

1. Unit Conveyor
Memiliki panjang efektif 400mm. Menggunakan belt jenis PVC hijau dengan ketebalan 2mm yang umum digunakan di industri *light-duty*. Mekanisme penegang (*tensioner*) didesain pada ujung *driven pulley* untuk memastikan kekencangan belt dapat diatur, mencegah slip saat beban bertambah.
2. Unit Feeder atau *Sorting*
Terletak di bagian tengah lintasan. Menggunakan silinder pneumatik sebagai aktuator linier untuk mendorong benda kerja keluar dari jalur *conveyor* menuju *storage bin*.
3. Unit Penampung (Bin)
Dibuat dari akrilik transparan tebal 5mm yang dipotong menggunakan laser (*laser cutting*) untuk presisi tinggi.

Keunggulan desain mekanik ini dibandingkan alat peraga konvensional adalah fleksibilitas posisi sensor. *Bracket* sensor didesain agar dapat digeser sepanjang rel profil aluminium, memungkinkan mahasiswa bereksperimen dengan *timing* dan posisi deteksi (Rudiyanto dkk., 2023).

4.2. Realisasi Alat

Hasil fabrikasi menunjukkan tingkat presisi yang tinggi sesuai dengan gambar teknik yang dirancang.



Gambar 3. Trainer Unit
Figure 3. Trainer Unit

Gambar 3 memperlihatkan wujud fisik alat peraga. Penggunaan *cable duct* dan terminal blok industri diterapkan untuk memberikan contoh standar instalasi panel yang baik kepada mahasiswa.

4.3. Analisis Pengujian Fungsional

Pengujian dilakukan untuk memvalidasi kinerja mekanik dan kontrol. Parameter yang diuji meliputi kestabilan mekanik dan responsivitas sistem.

Tabel 1. Hasil Pengujian

Table 1. Test Results

No	Test Parameters	Input Conditions	Test Results
1	Mechanical stability	Pusher OFF (Standby)	Successful No vibration or excessive friction
2	Control responsiveness	50 cycles Covers: 25 metal, 25 non metal	100% success rate No mechanical failure or no stuck/slip belts

Berdasarkan Tabel 1, dari 50 kali percobaan siklus kerja (25 logam, 25 non-logam), alat berhasil melakukan penyortiran dengan tingkat keberhasilan 100%. Tidak ditemukan kegagalan mekanik seperti benda tersangkut atau *belt* selip.

4.4. Pembahasan Desain yang dihasilkan

Desain yang dihasilkan dalam penelitian ini berhasil menjawab tantangan simulasi lingkungan produksi nyata. Hal ini terlihat dari beberapa aspek:

Integrasi Fisik berbeda dengan simulasi perangkat lunak, alat ini menghadirkan tantangan fisik nyata. Mahasiswa harus memperhitungkan inersia benda saat *conveyor* berhenti, atau gesekan benda saat didorong silinder. Ini adalah variabel fisik yang selalu ada di lantai produksi (Tekkaya et al., 2017).

Standarisasi Komponen penggunaan sensor industri memberikan pengalaman nyata tentang karakteristik sensitivitas, *wiring* (NPN/PNP), dan *mounting* yang sesuai standar (Widodo, 2019).

Modularitas desain rangka *T-slot* memungkinkan pengembangan lanjutan, seperti penambahan lengan robot atau modul kamera (*computer vision*) di masa depan, mencerminkan sifat *scalable* dari sistem manufaktur modern (Prasetyo & Suryanto, 2019).

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mendesain dan merealisasikan sistem mekanik pada simulator *Handling System*. Proses perancangan menggunakan metode ADDIE memastikan bahwa setiap spesifikasi teknis didasarkan pada kebutuhan pembelajaran industri. Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi antara desain mekanik yang kokoh dan sistem kontrol elektro-pneumatik yang responsif mampu mensimulasikan proses penanganan material industri secara akurat. Simulator ini memiliki validitas fungsional 100% dan layak digunakan sebagai media praktikum untuk menjembatani pemahaman mahasiswa mengenai integrasi sistem otomasi di lingkungan produksi nyata. Pengembangan selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan kontroler berbasis PLC dan sistem IoT untuk pemantauan data produksi secara *real-time*.

6. SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengembangan, dan pengujian fungsional yang telah dilakukan, terdapat beberapa aspek yang direkomendasikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya guna menyempurnakan simulator *Handling System* ini.

Pertama, dari sisi pengembangan sistem kontrol, disarankan untuk mengintegrasikan unit *Programmable Logic Controller* (PLC) dan *Human Machine Interface* (HMI) sebagai pusat kendali utama. Penggunaan PLC akan memungkinkan simulasi logika pemrograman yang lebih kompleks dan variatif dibandingkan sistem kendali dasar, sehingga relevansi dengan standar industri manufaktur modern menjadi semakin kuat.

Kedua, guna mendukung implementasi pilar utama Industri 4.0, pengembangan selanjutnya perlu menambahkan fitur konektivitas berbasis *Internet of Things* (IoT). Integrasi modul IoT memungkinkan data produksi seperti jumlah barang yang disortir, status sensor, dan waktu siklus dapat dipantau secara *real-time* melalui dasbor berbasis web atau aplikasi seluler, memberikan wawasan tentang konsep *Smart Factory* kepada mahasiswa.

Ketiga, disarankan untuk melakukan ekspansi pada aspek mekanik dengan menambahkan modul-modul pelengkap, seperti lengan robot (*robotic arm*) untuk proses *pick and place* atau sistem visi komputer (*computer vision*) untuk inspeksi kualitas visual. Penambahan ini akan mentransformasi alat peraga dari sekadar sistem penanganan material menjadi sebuah lini produksi mini yang komprehensif. Terakhir, dari sisi metodologi pendidikan, penelitian lanjutan perlu melakukan uji coba implementasi secara luas kepada

mahasiswa dalam situasi pembelajaran sebenarnya. Pengambilan data kuantitatif mengenai peningkatan kompetensi mahasiswa melalui *pre-test* dan *post-test* sangat diperlukan untuk memvalidasi efektivitas pedagogis alat peraga ini secara empiris dalam kurikulum pendidikan vokasi.

7. REFERENSI

- Ammar, A. (2025). Pengembangan E-Modul Inventor Dengan Model Addie Pada Mata Pelajaran Gambar Teknik Manufaktur. Universitas PGRI Adi Buana Surabaya.
- Atus, Rantererung, I. C. L., MT, S. T., Siang, J. T., Allu, N., Pasau, K., Kasa, A., Tangaran, B., & Tikupadang, K. (2025). *Sistem Kendali Penggerak*. Arsy Media.
- Cahayuning, A. C. I. (2020). Human Machine Interface (HMI) Pada Simulasi Pemilahan Barang Berdasarkan Sensor Barang yang Distempel dan Jenis Barang Logam Non Logam Berbasis Programable Logic Controller (PLC) SCHNEIDER MODICON TM221CE16R. undip.
- Fitriyah, L., Aisyah, S., Putri, M. N., Sihombing, E., & Gumilar, R. (2025). Penerapan Model Pembelajaran ADDIE dalam Meningkatkan Efektivitas Pembelajaran Matematika di Sekolah Dasar. *Jurnal Ilmiah Pendidikan Matematika (Jipm)*, 3(1), 122–126.
- Indarta, Y. (2025). Model Pembelajaran Pendidikan Vokasi. Pustaka Galeri Mandiri.
- Kurniawan, R. C., Primasanti, Y., & Devi, A. O. T. (2021). Analisis Pengaruh Penggunaan Conveyor Belt Terhadap Proses Bongkar Produk Manufaktur untuk Mengurangi Handling System di PT Samudera Berlian Metalindo Tangerang. Universitas Sahid Surakarta.
- Mumtazati, H., Astutik, S., Silitonga, A., & Basuki, I. (2025). Peran Manajemen Strategis Dalam Meningkatkan Daya Saing Lulusan Pendidikan Kejuruan Di Pasar Kerja Global. *Jurnal Kreasi Ekonomi Nusantara*, 6(2).
- Perdana, Y. K., Mulyono, S., Novrizal, E., Putri, N. E. D., Moelia, D. R., Risvianto, M. M., Setiawan, W. A., Kaini, O. S., & Anhar, R. (2025). *Buku Referensi Mechatronics & Control Systems Otomasi Cerdas Untuk Masa Depan*. PT. Media Penerbit Indonesia.
- Permata, N. N., Royandi, M. A., Giantoyo, Y. F., Komara, A. I., Abdurrahman, M., & Rizki, F. (2025). Analisis Aspek Ergonomi pada Prototipe Alat Peraga Pendidikan Batang Truss untuk Mata Kuliah Kekuatan Material. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 20(1), 88–93.
- Pramudika, G. F., & Nugraha, B. B. (2025). Pengembangan alat peraga dan modul Internet of Things dengan pendekatan define-measure-analyze-design-verify untuk mendukung aktivitas pembelajaran. *Jurnal Teknik Industri Dan*



- Manajemen Rekayasa*, 3(1), 1–16.
- Pratama, R. A. (2024). Rancang Bangun Prototype Sistem Kontrol Carousel Conveyor Berbasis Internet Of Things (Iot) Di Bandara. Politeknik Penerbangan Palembang.
- Rahayu, A. (2025). Metode penelitian dan pengembangan (R&D): Pengertian, jenis dan tahapan. *DIAJAR: Jurnal Pendidikan Dan Pembelajaran*, 4(3), 459–470.
- Ridho, N. A., Shaffiyyah, R., Syaharani Salsabilaa, Z., Putri, T. A., & Arifah, U. N. (2025). Inovasi Kurikulum Teaching Factory Di Sekolah Menengah Kejuruan Program Keahlian Teknik Kendaran Ringan. *Integrative Perspectives of Social and Science Journal*, 2(06 November), 8662–8683.
- Rindrayani, S. R., Rustiyana, R., Judijanto, L., Abdullah, G., & Ardiyanti, A. D. (2025). Metode Penelitian dan Pengembangan: R&D Research and Development. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Rudiyanto, B., Rachmanita, R. E., & Budiprasojo, A. (2023). *Dasar-Dasar Pemasangan Panel Surya*. unisma press.
- Saleh, F. M., Riandi, R., & Surtikanti, H. K. (2024). Laboratorium Konvensional vs Laboratorium Virtual dalam Efektivitas dan Motivasi Pembelajaran Biologi: Studi Literatur. *Jurnal Jeumpa*, 11(1), 13–24.
- Siregar, T., & Rhamayanti, Y. (2025). Implementasi Pengembangan Model ADDIE pada Dunia Pendidikan. *Jurnal Hasil Penelitian Dan Pengembangan (JHP)*, 3(2), 85–100.
- Suhara, A. (2024). *MANAJEMEN SDM* Strategi dan Optimalisasi Desain Pekerjaan dengan Pendekatan Lean, Six Sigma, dan Teknik Industri. Penerbit Widina.
- Sukmana, O., Nasution, S., Triastuti, E., Estede, S., Prihartini, I., Soegiarto, I., Natsir, I., Ningrum, G. D. K., Dewantara, I. W. G. S., & Baskoro, S. E. (2025). *Pendidikan Vokasi: Kompetensi & Solusi Kebutuhan Dunia Kerja*. , Star Digital Publishing.
- Suradi, I. (2020). *SISTEM PRODUKSI*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Direktorat Riset, Teknologi, dan Pengabdian kepada Masyarakat (DRTPM), Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun Anggaran 2025. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik ATMI Surakarta atas dukungan fasilitas laboratorium dan administrasi yang diberikan selama proses pelaksanaan penelitian hingga penyusunan publikasi ini.