

Inovasi Media Pembelajaran Alat Berat: Prototipe Simulator Excavator Hidrolik Air Berbiaya Rendah Menggunakan Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM)

Wibi Pramanda ^{a,*}, Sandi Yudha Barri Zaqy ^a, Satrio Darma Utama ^b

^a Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Politeknik Jambi, Jln Lingkar Barat 2 Kota Jambi 36361, Indonesia

^b Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Jambi, Jln Lingkar Barat 2 Kota Jambi 36361, Indonesia

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 26 November 2025

Diterima setelah direvisi 3 Desember 2025

Disetujui 5 Desember 2025

Kata kunci:

Simulator
Excavator
Hidrolik Air
3D Printing
Media Pembelajaran

Abstract- The limitations of physical teaching aids pose a challenge to the effectiveness of learning in the heavy equipment course at Jambi Polytechnic. This study aims to address the issue by designing and building a low-cost excavator simulator prototype as an interactive learning medium. The research method consists of three main stages: component design using FUSION 360, manufacturing with 3D printing technology Fused Deposition Modeling (FDM) using PLA+ material, and assembly of a manual water-based hidrolik system utilizing syringes as actuators. The result is a functional prototype capable of accurately demonstrating all basic excavator movements, including base rotation, as well as boom, arm, and bucket movements controlled through levers. This simulator has proven to be an effective and practical teaching aid solution to enhance students' practical understanding of mechanical principles and hidrolik systems in heavy equipment.

Intisari- Keterbatasan alat peraga fisik menjadi kendala dalam efektivitas pembelajaran mata kuliah alat berat di Politeknik Jambi. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi masalah tersebut dengan merancang dan membangun sebuah prototipe simulator *excavator* berbiaya rendah sebagai media pembelajaran yang interaktif. Metode penelitian mencakup tiga tahap utama: perancangan komponen menggunakan FUSION 360, manufaktur dengan teknologi cetak 3D *Fused Deposition Modeling* (FDM) berbahan PLA+, dan perakitan sistem hidrolik manual berbasis air yang menggunakan suntikan (*syringe*) sebagai aktuator. Hasilnya adalah sebuah prototipe fungsional yang mampu mendemonstrasikan secara akurat seluruh gerakan dasar *excavator*, termasuk rotasi base, serta pergerakan *boom*, *arm*, dan *bucket* yang dikontrol melalui tuas. Simulator ini terbukti menjadi solusi alat peraga yang efektif dan aplikatif untuk meningkatkan pemahaman praktis mahasiswa mengenai prinsip kerja mekanik dan sistem hidrolik pada alat berat.

1. Pendahuluan

Di tengah pesatnya laju pembangunan infrastruktur dan ekspansi industri pertambangan, peran alat berat seperti excavator menjadi semakin tak tergantikan [1]. Keandalan dan efisiensi operasional alat ini sangat bergantung pada kompetensi operatornya [2]. Oleh karena itu, institusi pendidikan vokasi, seperti Politeknik Jambi, memikul tanggung jawab krusial untuk mencetak tenaga kerja terampil yang siap pakai [3]. Akan tetapi, metode pembelajaran tradisional dalam mata kuliah alat berat menghadapi tantangan mendasar, yakni kesulitan dalam menyajikan pengalaman praktis yang optimal karena keterbatasan akses terhadap mesin asli [4]. Kendala utamanya mencakup biaya akuisisi dan perawatan unit yang prohibitif, konsumsi bahan bakar yang tinggi untuk sesi latihan, serta risiko keselamatan kerja yang tidak dapat diabaikan, terutama bagi mahasiswa pemula [5][6][7]. Keterbatasan ini secara langsung menciptakan kesenjangan antara pengetahuan teoretis yang diajarkan di

kelas dan pemahaman intuitif mengenai dinamika mesin yang hanya bisa diperoleh melalui interaksi langsung [8].

Menjawab tantangan tersebut, dunia akademik dan industri telah beralih ke teknologi simulasi sebagai jembatan antara teori dan praktik. Berbagai penelitian telah menunjukkan potensi besar dari inovasi teknologi dalam bidang ini [9]. Studi yang berfokus pada analisis *Finite Element Method* (FEM) berhasil memvalidasi kekuatan dan ketahanan struktur lengan excavator secara digital, memberikan fondasi rekayasa yang kuat [10]. Di sisi lain, pengembangan simulator yang dikendalikan melalui *Internet of Things* (IoT) telah membuka jalan bagi pelatihan jarak jauh dan pemantauan kinerja secara *real-time* [11]. Tidak ketinggalan, teknologi *Augmented Reality* (AR) juga telah dimanfaatkan untuk menciptakan media pembelajaran yang imersif, di mana pengguna dapat memvisualisasikan komponen internal dan mekanisme kerja silinder hidrolik secara virtual [12][13].

Meskipun kemajuan-kemajuan ini memberikan kontribusi signifikan, solusi yang ada cenderung berfokus pada simulasi digital atau analisis

* Corresponding Author:

E-mail: wibi@politeknikjambi.ac.id (Wibi Pramanda)

rekayasa tingkat lanjut [14]. Platform canggih ini, walau efektif, seringkali masih memerlukan investasi yang cukup besar dan dapat menciptakan bentuk abstraksi baru bagi pembelajar. Pengalaman mengoperasikan *joystick* di layar monitor tidak sepenuhnya dapat menggantikan pemahaman taktik mengenai bagaimana sebuah sistem hidrolik mentransmisikan gaya dan menghasilkan gerakan mekanis. Terdapat sebuah celah pedagogis untuk sebuah alat bantu ajar yang bersifat fisik, interaktif, namun tetap berbiaya rendah dan aman digunakan [15].

Penelitian ini diajukan untuk mengisi celah tersebut dengan mengusulkan sebuah pendekatan yang lebih fundamental dan aplikatif. Fokus utama dari studi ini adalah merancang dan membangun sebuah prototipe simulator excavator fungsional dalam skala mini, yang mengintegrasikan dua teknologi yang mudah diakses: manufaktur aditif (pencetakan 3D) untuk produksi komponen dan sistem hidrolik manual sederhana berbasis air [16][17]. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan sebuah media pembelajaran fisik yang tidak hanya mampu meniru gerakan-gerakan esensial dari sebuah *excavator*, tetapi juga secara transparan mendemonstrasikan prinsip-prinsip dasar fisika di baliknya. Diharapkan prototipe ini dapat menjadi solusi praktis dan efektif untuk meningkatkan kualitas pembelajaran di Politeknik Jambi, memberikan mahasiswa pengalaman belajar (*hands-on*) yang berharga, dan menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik di bidang alat berat.

2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa desain dan manufaktur (*design and manufacturing engineering*) untuk menghasilkan sebuah prototipe fungsional [18]. Tahapan-tahapan tersebut meliputi perancangan konseptual dan pemodelan 3D, seleksi material dan manufaktur, perakitan sistem, serta pengujian fungsional. Alat-alat yang digunakan berfokus pada tahapan perancangan, meliputi perangkat keras dan perangkat lunak untuk proses desain dan pencetakan komponen simulator, yang disajikan secara rinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Alat untuk Pencetakan Simulator Excavator

No	Alat	Spesifikasi / Fungsi Utama
1	Komputer (PC)	Intel Core i5, VGA 2 GB, RAM 16GB. Digunakan untuk pemodelan 3D dan persiapan slicing.
2	3D Printer	Fused Deposition Modeling (FDM) dengan mesin printer 3D Kingroon KP3S V1
3	Aplikasi Pemodelan	Fusion 360 (Education Licensed). Digunakan untuk perancangan konseptual dan pemodelan 3D komponen.
4	Aplikasi Slicer	Orca Slicer. Digunakan untuk mengubah model 3D menjadi G-code untuk proses pencetakan 3D.

Bahan-bahan yang tercantum pada Tabel 2 merupakan material fisik esensial yang digunakan dalam proses perakitan simulator mini *excavator* berbasis teknologi *3D printing* dengan media fluida air. Material tersebut tidak hanya berfungsi sebagai komponen struktural yang membentuk kerangka dan mekanisme utama, tetapi juga sebagai elemen pendukung yang memungkinkan integrasi sistem hidrolik sederhana berbasis fluida air dapat direalisasikan. Pemilihan material yang tepat menjadi faktor penentu dalam menjamin ketahanan, presisi, serta kompatibilitas komponen hasil cetak 3D dengan sistem fluida yang digunakan. Dengan demikian, keberadaan material ini berperan penting dalam menghasilkan prototipe

simulator mini *excavator* yang fungsional, yang tidak hanya relevan sebagai sarana penelitian dan pengembangan teknologi simulasi, tetapi juga sebagai media pembelajaran praktis untuk memahami prinsip kerja excavator dengan pendekatan yang lebih aman, efisien, dan ekonomis.

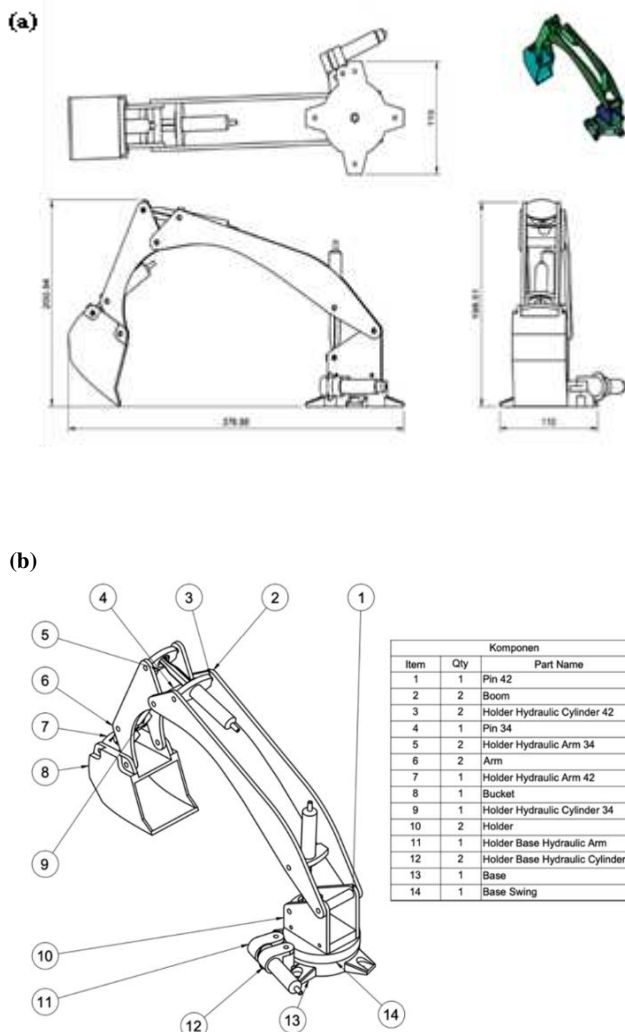
Tabel 2. Daftar Material Fisik untuk Manufaktur dan Perakitan Prototipe

No	Alat	Spesifikasi / Fungsi Utama
1	Filamen Pencetakan	Esun PLA+ABS+Filamen 1.75mm (Beige). Material utama untuk mencetak komponen fisik simulator.
2	Komponen Penggerak	Suntikan (Sringe) 3 ml. Digunakan sebagai aktuator hidrolik mini pada sistem pergerakan arm excavator.
3	Saluran Fluida	Selang Infus. Digunakan sebagai saluran transfer fluida (air) antara joystick dan aktuator suntikan.
4	Penguat Struktur	Baut (M3, M4, M5) dan Sekrup (M5). Digunakan sebagai elemen pengikat untuk menyatukan komponen yang telah dicetak.
5	Fluida Kerja	Air. Digunakan sebagai fluida kerja pada sistem hidrolik.

2.1 Perancangan Konseptual dan Pemodelan 3D

Tahap awal penelitian secara intensif berfokus pada perancangan seluruh komponen simulator. Proses perancangan ini dilaksanakan dengan memanfaatkan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD) canggih, yaitu Autodesk Fusion 360 Education Licensed [19][20]. Pendekatan desain dikembangkan secara fundamental berdasarkan prinsip kerja dan kinematika *excavator* konvensional, namun dengan penyesuaian skala menjadi model miniatur yang dapat dioperasikan. Dalam fase ini, total 14 komponen utama berhasil dimodelkan secara detail, mencakup struktur inti seperti *base*, *base swing* (mekanisme putar), *boom* (lengan utama), arm (lengan kedua), *bucket* (sendok pengeruk), serta berbagai *pin* dan *linkage* penyambung yang vital.

Pertimbangan utama yang dijadikan landasan dalam fase perancangan ini adalah fungsionalitas mekanis yang harus mampu meniru gerakan aktual excavator, kemudahan fabrikasi (*design for manufacturability*) dengan mengoptimalkan bentuk untuk teknologi cetak 3D, dan kemudahan dalam proses perakitan akhir [21]. Oleh karena itu, setiap komponen dirancang dengan dimensi dan toleransi yang sangat presisi. Ketelitian ini krusial untuk memastikan pergerakan yang mulus, minim gesekan, dan sinkron antarbagian, terutama pada titik-titik sendi (*joint*) yang menampung beban. Selain itu, aspek integrasi dengan sistem hidrolik (menggunakan suntikan dan selang) juga diperhitungkan, memastikan adanya ruang yang cukup untuk pemasangan aktuator. Keseluruhan proses perancangan serta pemodelan tiga dimensi (3D) dari komponen lengan *excavator* yang telah dilakukan dapat divisualisasikan secara jelas melalui ilustrasi yang ditampilkan pada Gambar 1a dan 1b, sehingga pembaca dapat memahami bentuk, struktur, dan detail rancangan yang dihasilkan sebelum memasuki tahapan manufaktur fisik.



Gambar 1. (a) Proyeksi Desain Simulator Excavator, (b) Desain Simulator Excavator

2.2 Manufaktur Komponen dengan Pencetakan 3D

Seluruh komponen yang telah dirancang kemudian difabrikasi menggunakan metode manufaktur aditif. Teknologi yang digunakan adalah Fused Deposition Modeling (FDM) dengan mesin printer 3D Kingroon KP3S V1 [22]. Proses manufaktur dengan pencetakan 3D dilakukan di Politeknik Jambi. Material yang dipilih untuk proses pencetakan adalah filamen Polylactic Acid (PLA+) dari merek Esun. Pemilihan material PLA+ didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan PLA standar, tingkat penyusutan (*warping*) yang rendah selama proses pencetakan, serta biaya yang ekonomis, menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi pembuatan prototipe fungsional. Parameter pencetakan seperti suhu *nozzle*, kecepatan cetak, dan ketebalan lapisan diatur untuk mengoptimalkan kualitas dan kekuatan hasil cetakan [23].

2.3 Perakitan Sistem Mekanik dan Hidrolik

Setelah proses fabrikasi selesai, seluruh komponen dirakit menjadi satu unit simulator yang utuh. Proses perakitan mekanis melibatkan

penyambungan komponen-komponen utama menggunakan baut M3, M4, dan M5 sebagai pin pada setiap sendi pergerakan. Untuk sistem penggerak, dirancang sebuah sistem hidrolik manual sirkuit tertutup (*closed-loop*) [24]. Sistem ini terdiri dari delapan unit suntikan (*syringe*) medis berukuran 3 ml yang berfungsi sebagai piston dan silinder hidrolik. Empat suntikan diposisikan sebagai tuas kontrol (*joystick*) bagi operator, dan empat suntikan lainnya dipasang pada struktur simulator sebagai aktuator linier. Setiap tuas kontrol terhubung ke satu aktuator melalui selang infus transparan. Air demineralisasi digunakan sebagai fluida hidrolik karena sifatnya yang inkompresibel, aman, dan mudah diperoleh. Prinsip kerjanya didasarkan pada hukum Pascal, di mana tekanan yang diberikan oleh operator pada tuas kontrol ditransmisikan secara merata melalui fluida untuk menggerakkan aktuator yang terhubung pada *boom*, *arm*, dan *bucket* [25].

2.4 Pengujian Fungsional

Tahap akhir dari penelitian ini adalah pengujian fungsional prototipe simulator untuk memastikan bahwa seluruh sistem dapat beroperasi sesuai rancangan dan layak digunakan sebagai alat peraga pembelajaran pada mata kuliah hidrolik alat berat. Pengujian dilakukan dengan pendekatan kualitatif melalui observasi langsung terhadap kinerja sistem hidrolik dan pergerakan mekanisme simulator. Pengujian dilakukan dengan memberikan input berupa tekanan manual pada tuas kendali hidrolik dan mengamati respon aktuator pada empat jenis pergerakan utama, yaitu:

- Gerakan *boom*: mengangkat dan menurunkan lengan utama
- Gerakan *arm*: menjangkau ke depan dan menarik ke belakang
- Gerakan *bucket*: membuka dan menutup untuk simulasi fungsi pengerukan
- Gerakan *swing*: memutar struktur atas untuk mensimulasikan jangkauan kerja

Setiap fungsi diuji secara terpisah dan simultan untuk memastikan sinkronisasi antara aktuator berjalan dengan baik. Kriteria keberhasilan ditentukan berdasarkan kemampuan sistem dalam menampilkan pergerakan yang halus, responsif, dan sesuai arah gerak yang dirancang. Hasil dari pengujian fungsional ini digunakan sebagai dasar untuk analisis efektivitas dan nilai edukatif prototipe, yang dibahas lebih lanjut pada bagian hasil dan pembahasan.

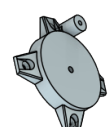
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Prototipe

Prototipe simulator excavator berhasil direalisasikan melalui proses perancangan berbasis *computer aided design* (CAD) dan manufaktur menggunakan teknologi *3D printing* metode fused deposition modeling (FDM). Komponen utama terdiri dari *base*, *base swing*, *boom*, *arm*, *bucket* dan beberapa holder hidrolik, seluruhnya diproduksi menggunakan material PLA+ yang memiliki ketahanan mekanik cukup baik untuk aplikasi prototipe. Detail komponen dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komponen beserta Fungsi dari Simulator Excavator

No	Komponen	Gambar	Fungsi
1	Pin 42		Pin <i>excavator</i> menjadi penghubung dan engsel, sehingga <i>boom</i> , <i>arm</i> , dan <i>bucket</i> dapat bergerak mulus saat bekerja.
2	<i>Boom</i>		Boom pada <i>excavator</i> adalah lengan (<i>arm</i>) yang lebih panjang dari standar, digunakan untuk dapat meningkatkan jangkauan dan fleksibilitas dalam berbagai pekerjaan berat.
3	<i>Holder Hidrolik Cylinder 42</i>		Holder Hidrolik Cylinder pada <i>excavator</i> kemungkinan merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) untuk tabung atau pipa hidrolik yang terletak di bagian tertentu dari sistem hidrolik, seperti di <i>boom</i> , <i>arm</i> atau rangka utama <i>excavator</i> .
4	Pin 34		Pin pada <i>excavator</i> berfungsi sebagai penghubung dan engsel. Pin memungkinkan pergerakan antara boom, arm, dan bucket, sehingga bagian-bagian ini dapat bergerak dengan lancar saat menggali atau mengangkat material.
5	<i>Holder Hidrolik Arm</i>		Holder hidrolik pada <i>excavator</i> kemungkinan merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) pada bagian hidrolik arm <i>excavator</i> , khususnya yang berhubungan dengan pin atau attachment.
6	<i>Arm</i>		Arm (lengan) pada <i>excavator</i> memiliki fungsi utama untuk memberikan kekuatan lebih besar dalam penggalian dan stabilitas saat mengangkat material.
7	<i>Holder Hidrolik Arm 42</i>		Holder hidrolik pada <i>excavator</i> kemungkinan merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) pada bagian hidrolik arm <i>excavator</i> , khususnya yang berhubungan dengan pin atau attachment.
8	<i>Bucket</i>		Bucket pada <i>excavator</i> berfungsi sebagai alat utama untuk menggali, mengangkat, mengangkut, dan membuang material.
9	<i>Holder Hidrolik Cylinder 34</i>		Holder Hydraulic Cylinder pada <i>excavator</i> kemungkinan merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) untuk tabung atau pipa hidrolik yang terletak di bagian tertentu dari sistem hidrolik, seperti di <i>boom</i> , <i>arm</i> atau rangka utama <i>excavator</i> .
10	<i>Holder</i>		Holder memiliki beberapa fungsi penting sebagai pemegang Boom. Holder juga terdapat beberapa fungsi lainnya sebagai penahan komponen hidrolik, <i>bucket</i> , <i>track</i> dan kabel.

11	<i>Holder Base Hidrolik Arm</i>		Holder Hydraulic merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) pada bagian hidrolik arm <i>excavator</i> , khususnya yang berhubungan dengan pin atau attachment.
12	<i>Holder Base Hidrolik Cylinder</i>		Holder Hydraulic Cylinder pada <i>excavator</i> kemungkinan merujuk pada komponen penahan (<i>holder</i>) untuk tabung atau pipa hidrolik yang terletak di bagian tertentu dari sistem hidrolik, seperti di <i>boom</i> , <i>arm</i> atau rangka utama <i>excavator</i> .
13	<i>Base</i>		Base dan Base Rotate pada <i>excavator</i> berfungsi memungkinkan bagian atas berputar 360° di atas undercarriage, sekaligus mendukung pergerakan fleksibel, produktivitas, dan keseimbangan beban
14	<i>Base Swing</i>		Pendukung komponen pendukung berupa <i>swing motor</i> , <i>swing bearing</i> , <i>swing gearbox</i> dan <i>swing brake</i> . Fungsi ini sangat penting dalam meningkatkan efisiensi dan keamanan dalam pengoperasian <i>excavator</i> , terutama dalam pekerjaan konstruksi, pertambangan, dan pekerjaan tanah lainnya.



Gambar 2. Hasil Cetak 3D Simulator Excavator

Setelah proses fabrikasi dan perakitan selesai, sistem diuji dengan menyalurkan tekanan melalui delapan unit *syringe* 3 ml yang saling terhubung dengan selang infus tranparan. Empat *syringe* berfungsi sebagai aktuator linier, dan empat lainnya sebagai joystick kendali. Fluida yang digunakan adalah air demineralisasi sebagai media transmisi tekanan. Hasil uji fungsional dapat dilihat pada Tabel 2. Semua pergerakan komponen seperti utama *boom*, *arm*, *bucket*, dan *swing* dapat berfungsi dengan baik. Setiap aktuator memberikan respon yang proporsional terhadap tekanan yang dihasilkan oleh tuas kendali tanpa terjadi kebocoran fluida atau keterlambatan gerak.

Tabel 4. Pengujian Fungsi Komponen Simulator Excavator

Komponen	Jenis Gerakan	Hasil Pengujian	Keterangan
<i>Boom</i>	Naik-turun	Berfungsi baik	Respons fluida cepat, tanpa kebocoran
<i>Arm</i>	Menjangkau-menarik	Berfungsi baik	Gerakan stabil dan sinkron
<i>Bucket</i>	Membuka-menutup	Berfungsi baik	Simulasi gaya penggalian berhasil
<i>Swing</i>	Rotasi horizontal	Berfungsi baik	Rotasi halus dan terkendali

Hasil tersebut mengindikasikan bahwa sistem hidrolik manual berbasis air dapat mewakili prinsip kerja excavator sebenarnya secara visual dan mekanis, sehingga memenuhi kriteria utama sebagai alat peraga pembelajaran

3.2 Analisa Kinerja Sistem Hidrolik

Dari hasil pengujian diperoleh fakta bahwa tekanan yang dihasilkan pada syringe control mampu menggerakkan aktuator *linier* dengan efisien. Meskipun tekanan fluida relatif kecil dibandingkan sistem hidrolik industri alat berat yang menggunakan oli, respon gaya dan gerak yang dihasilkan tetap sebanding secara prinsip fisika, karena sistem ini bekerja berdasarkan Hukum Pascal “tekanan yang diberikan pada fluida tertutup diteruskan ke segala arah secara merata”.

Fungsi sistem hidrolik tertutup ini menunjukkan bahwa transmisi gaya melalui fluida dapat dijelaskan secara sederhana dan aman, sehingga mahasiswa dapat melihat langsung proses perpindahan energi dari tekanan tangan pada tuas control menjadi gerakan mekanik pada aktuator. Dengan demikian, simulator ini memberikan representasi nyata dari teori sistem hidrolik, menjembatani pembelajaran konseptual dan praktik. Dari sisi efisiensi, pemilihan air demineralisasi terbukti tepat karena:

- Tidak bersifat korosif terhadap material material PLA+
- Memiliki viskositas rendah yang mendukung kelancaran aliran
- Aman dan mudah diganti, sesuai dengan kebutuhan laboratorium Pendidikan

3.3 Efektivitas Sebagai Media Pembelajaran

Sebagai alat peraga pembelajaran, simulator ini memiliki nilai edukatif yang tinggi dan relevansi yang kuat untuk pendidikan vokasi. Berdasarkan observasi dan analisis pada uji coba fungsional yang dilakukan di lingkungan laboratorium, mahasiswa dapat memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai tiga aspek penting dalam sistem alat berat, yaitu:

- Hubungan tekanan dan gaya kerja pada sistem hidrolik.
- Fungsi tiap aktuator dalam mekanisme kerja *excavator* (*boom*, *arm*, *bucket*, *swing*).
- Interaksi antara sistem mekanik dan fluida dalam menghasilkan gerakan yang terkendali.

Penggunaan selang transparan dan syringe memungkinkan mahasiswa mengamati langsung perpindahan fluida serta efek tekanan terhadap gerakan piston. Secara pedagogis, alat ini mendukung pendekatan *tactile learning* (belajar melalui sentuhan dan interaksi fisik) yang menjadi karakteristik utama pembelajaran vokasi. Dibandingkan dengan simulator berbasis digital seperti *Augmented Reality* atau *Virtual Reality*, simulator

fisik ini memberikan umpan balik langsung (*real-time physical feedback*) terhadap gaya yang diterapkan. Hal ini membantu mahasiswa memahami prinsip kerja sistem secara intuitif, terutama pada tahap awal pembelajaran sebelum beralih ke sistem kontrol berbasis elektronik. Keunggulan lain dari alat ini adalah biaya produksi yang rendah dan kemudahan replikasi, alat ini dapat direproduksi oleh institusi pendidikan vokasi lain yang memiliki fasilitas *3D printing* sederhana. Model ini sejalan dengan kebutuhan pendidikan politeknik untuk memiliki alat bantu pembelajaran praktis, efisien, dan kontekstual terhadap dunia kerja.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil merampungkan pengembangan simulator excavator yang memanfaatkan sistem hidrolik air, yang terbukti menjadi media pembelajaran yang sangat fungsional dalam studi teknologi alat berat. Prototipe ini berhasil menirukan empat gerakan utama *excavator* yaitu *boom*, *arm*, *bucket*, dan *swing* dengan baik, menunjukkan respons yang akurat terhadap input kendali hidrolik manual. Dari sisi produksi, penggunaan teknologi cetak 3D (manufaktur aditif) dengan filamen PLA+ merupakan pilihan yang efektif karena menghasilkan komponen yang presisi, serta menawarkan efisiensi baik dari segi waktu maupun biaya. Secara edukatif, simulator ini secara efektif mendemonstrasikan Hukum Pascal; sistem hidrolik tertutup (menggunakan *syringe* dan air) secara visual menampilkan prinsip dasar transmisi tekanan fluida. Dengan desainnya yang sederhana, aman, dan berbiaya rendah, alat ini meningkatkan pemahaman konseptual dan keterampilan operasional mahasiswa, menjadikannya inovasi media yang relevan dan berkontribusi signifikan pada praktik pembelajaran berbasis vokasi di bidang rekayasa alat berat.

Ucapan terima kasih

Judul Ucapan terima kasih dan Referensi harus *left justified*, **bold**, dengan huruf pertama huruf kapital tetapi tanpa angka. Teks dibawahnya berlanjut seperti biasa. Sebutkan asal pendanaan dan arah penelitian yang dilakukan.

Referensi

- [1] A. Febrianto, M. Suef, M. S. Hakim, K. D. Yayat, and I. Hardiatama, “Operational Efficiency and Sustainable Asset Management of Heavy Equipment in Industry: A Data-Driven Framework,” *Results Eng.*, vol. 27, no. June, p. 106476, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106476.
- [2] P. Odeyar, D. B. Apel, R. Hall, B. Zon, and K. Skrzypkowski, “A Review of Reliability and Fault Analysis Methods for Heavy Equipment and Their Components Used in Mining,” *Energies*, vol. 15, no. 17, pp. 1–27, 2022, doi: 10.3390/en15176263.
- [3] J. B. Sukoco, N. I. Kurniawati, R. E. Werdani, and A. Windriya, “Pemahaman Pendidikan Vokasi,” *J. Pengabd. Vokasi*, vol. 01, no. 01, pp. 23–26, 2019.
- [4] R. Putra, W. Purwanto, H. Maksun, D. Irfan, M. Muslim, and H. D. Saputra, “Efektivitas Penggunaan Modul Berbasis Project Based Learning Dalam Pembelajaran Teknologi Alat Berat,” *Rang Tek. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 164–173, 2022, doi: 10.31869/rtj.v5i1.3068.
- [5] K. Kang, R. Y. Zhong, and A. Nassehi, “Integrated disassembly and assembly model for heavy duty equipment maintenance,” *Procedia CIRP*, vol. 93, no. March, pp. 995–1000, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.04.086.
- [6] F. S. Lubis and F. P. Mayuta, “Pengendalian Persediaan Bahan Bakar Solar pada Perusahaan Jasa Penyewaan Alat Berat,” *Semin. Nas. Teknol. Informasi, Komun. dan Ind.*, no. Lv, pp. 238–244, 2023.
- [7] I. Irawansyah, O. Mutmainnah, and E. Nurmala, “Peningkatan Kompetensi Lulusan Melalui Model Sertifikasi Operator Alat Berat pada Mahasiswa Program Studi Teknik Alat Berat AKOM Sumbawa,” *MARAS J. Penelit. Multidisiplin*, vol. 2, no. 2, pp. 935–950, 2024, doi:

- 10.60126/maras.v2i2.305.
- [8] P. Pitriadi, "Pembuatan Alat Peraga Simulasi Air Conditioning Alat Berat," *Semin. Nas. Has. Penelit. & Pengabdian ...*, pp. 73–77, 2024, [Online]. Available: <https://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snp2m/article/view/5295>
 - [9] S. S. Muhammad Arham, Akhsan Hamka, Muhammad Fachruddin Bj, Andi Muhammad Syarif Nasir, Muh. Tawakkal, Mislauddin Mislauddin, *TEKNOLOGI DAN INOVASI DALAM PENDIDIKAN TEKNIK MESIN: Tren dan Aplikasi Terbaru*, vol. 17, 2024.
 - [10] A. Mardalizad, A. Manes, and M. Giglio, "The numerical modelling of a middle strength rock material under Flexural test by Finite Element method-coupled to-SPH," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 3, pp. 395–401, 2017, doi: 10.1016/j.prostr.2017.04.050.
 - [11] M. W. Kasrani, A. F. S. Rahman, and R. Ramadoni, "Monitoring Lokasi Komponen Alat Berat Berbasis Internet Of Things Pada PT. Thiess BSF Batakan," *J. Tek. Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 8, no. 1, pp. 394–398, 2023, doi: 10.36277/jteuniba.v8i1.248.
 - [12] A. R. Sugianto, D. P. Dicki, and M. M. A. Saripudin, "Perkembangan Teknologi Alat Berat di Era Konstruksi 4.0," *J. Forum Mek.*, vol. 12, no. 1, pp. 28–36, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.33322/forummekanika.v12i1.2023>
 - [13] J. Akyeampong, S. J. Udoka, and E. H. Park, "A Hidrolik Excavator Augmented Reality Simulator for Operator Training," *Ind. Eng. Oper. Manag. Istanbul*, pp. 1511–1518, 2012.
 - [14] T. N. Hidayat, F. A. Purnomo, Y. Yudhanto, and E. H. Pratisto, "Pembuatan Aplikasi Media Pembelajaran Simulasi Alat Berat dengan Menggunakan Teknologi Virtual Reality," *Indones. J. Appl. Informatics*, vol. 7, no. 2, p. 119, Aug. 2024, doi: 10.20961/ijai.v7i2.69108.
 - [15] D. Fernando, H. Dwimas, Zulkifli, Arwin, A. M. Marali, and A. S. Adiffa, "Rancang Bangun Wireless Borescope Hidrolik Cylinder Menggunakan 3D Printing," *J. Alat Berat*, vol. 2, no. 2, pp. 81–88, 2025, doi: 10.32487/jab.v2i2.42.
 - [16] Y. A. Alli *et al.*, "Optimization of 4D/3D printing via machine learning: A systematic review," *Hybrid Adv.*, vol. 6, no. June, p. 100242, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.hybadv.2024.100242.
 - [17] S. Purwanto, N. Aisyah, B. D. Prihadianto, R. Krisnaputra, F. E. Wismo, and I. Bahiuddin, "RANCANGAN SISTEM HIDROLIK PADA FRONT ATTACHMENT ALAT PERAGA MINI EXCAVATOR," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 15, no. 2, pp. 1153–1163, Aug. 2024, doi: 10.21776/jrm.v15i2.1729.
 - [18] C. Favi, L. Murgese, N. Villazzi, S. Gallozzi, M. Mandolini, and M. Marconi, "Integrating life cycle engineering into design for additive manufacturing: A review," *J. Manuf. Syst.*, vol. 82, no. May, pp. 599–631, 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.07.010.
 - [19] I. Cad, Q. Zou, Y. Wu, Z. Liu, W. Xu, and S. Gao, "Intelligent CAD 2.0 Qiang," vol. 8, pp. 1–12, 2024, doi: 10.1016/j.visinf.2024.10.001.
 - [20] C. Uwimana *et al.*, "Segmentation of CAD models using hybrid representation," *Virtual Real. Intell. Hardw.*, vol. 7, no. 2, pp. 188–202, 2025, doi: 10.1016/j.vrih.2025.01.001.
 - [21] R. Ayyagari, Q. Chen, and B. Garcia de Soto, "Quantifying the impact of concrete 3D printing on the construction supply chain," *Autom. Constr.*, vol. 155, no. July, p. 105032, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105032.
 - [22] P. Pristiansyah, H. Hasdiansah, and S. Sugiyarto, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filament Eflex," *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 11, no. 01, pp. 33–40, 2019, doi: 10.33504/manutech.v11i01.98.
 - [23] J. Teknologi, T. Jatra, R. Hakim, I. Saputra, G. P. Utama, and Y. Setyoadi, "Pengaruh T Emperatur N Ozzle Dan B Ase P Late P Ada M Aterial Pla T Erhadap N Ilai M Asa J Enis Dan K Ekasaran P Ermukaan," vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2019.
 - [24] M. H. Shahna, P. Mustalahti, and J. Mattila, "Robust torque-observed control with safe input–output constraints for hidrolik in-wheel drive systems in mobile robots," *Control Eng. Pract.*, vol. 164, no. July, p. 106459, 2025, doi: 10.1016/j.conengprac.2025.106459.
 - [25] J. Daehn, A. Wierschem, and E. Ultsch, "Comparison of hidrolik and pneumatic flow in a proportional solenoid valve," *Appl. Eng. Sci.*, vol. 23, no. July, 2025, doi: 10.1016/j.apples.2025.100248.