

Analisis Kinerja Sistem Transmisi Hidrolik pada Prototipe Excavator Model Crawler

Dewi Nursari¹
Sriyono²
Tatang Permana³

^{1,2,3}Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Universitas Pendidikan Indonesia, Jl. Dr. Setiabudi No.229, Kota Bandung

¹Korespondensi penulis: dewinursari@upi.edu

Article Info: Received: May 23, 2026; Accepted: June 02, 2026; Available online: June 05, 2026

DOI: 10.30588/jeemm.v10i1.2732

Abstract: The hydraulic transmission system is a key component of an excavator because it transfers fluid power from the pump to the actuators to produce working movements of the boom, arm, and bucket. This study aims to analyze the performance of the hydraulic transmission system in a crawler-type miniature excavator prototype based on working load, cylinder cross-sectional area, working pressure, cylinder speed, flow rate, and pump requirement. The research used a Research and Development (R&D) method with limited stages of define, design, development, and disseminate. The prototype was designed using CAD software, manufactured through 3D printing with PLA+ material, and equipped with a simple hydraulic system to operate the boom, arm, and bucket cylinders. The analysis was conducted by determining load distribution based on the center of gravity, calculating the force acting on each cylinder, and determining the cylinder area, working pressure, and actuator flow rate. The results showed that the boom cylinder received the highest load of 20 kg, while the arm and bucket cylinders received 10 kg and 5 kg, respectively. The boom cylinder area was 0.000314 m², while the arm and bucket cylinder areas were 0.000491 m². The required working pressures for the boom, arm, and bucket cylinders were 72 bar, 30 bar, and 20 bar, with flow rates of 0.565 lpm, 1.470 lpm, and 2.063 lpm, respectively. These results indicate that the boom cylinder is the most critical component based on pressure requirement, while the bucket cylinder determines the highest flow demand. Therefore, pump selection should consider a maximum pressure of 72 bar and a minimum flow rate of 2.063 lpm, with additional flow capacity when multiple actuators operate simultaneously.

Keywords: demonstration tool, hydraulic, excavator, crawler

Abstrak: Sistem transmisi hidrolik merupakan komponen utama pada excavator karena berfungsi menyalurkan tenaga fluida dari pompa menuju aktuator untuk menghasilkan gerak kerja boom, arm, dan bucket. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja sistem transmisi hidrolik pada miniatur prototipe excavator model crawler berdasarkan parameter beban kerja, luas penampang silinder, tekanan kerja, kecepatan gerak, debit aliran, dan kebutuhan pompa. Metode yang digunakan adalah *Research and Development* (R&D) dengan tahapan *define, design, development, dan disseminate* terbatas. Prototipe dirancang menggunakan perangkat lunak CAD, dibuat melalui proses *3D printing* berbahan PLA+, serta dilengkapi sistem hidrolik sederhana untuk menggerakkan silinder *boom, arm, dan bucket*. Analisis dilakukan dengan menentukan distribusi beban berdasarkan *center of gravity*, menghitung gaya pada masing-masing silinder, luas penampang, tekanan kerja, dan debit aliran aktuator. Hasil analisis menunjukkan bahwa silinder *boom* menerima beban terbesar, yaitu 20 kg, sedangkan silinder *arm* dan *bucket* masing-masing menerima 10 kg dan 5 kg. Luas penampang silinder *boom* sebesar 0,000314 m², sedangkan *arm* dan *bucket* sebesar 0,000491 m². Tekanan kerja *boom, arm, dan bucket* berturut-turut adalah 72 bar, 30 bar, dan 20 bar, dengan debit aliran 0,565 lpm, 1,470 lpm, dan 2,063 lpm. Berdasarkan hasil tersebut, silinder *boom* menjadi komponen paling kritis berdasarkan kebutuhan tekanan tertinggi, sementara bucket menentukan kebutuhan debit terbesar. Dengan demikian, pemilihan pompa hidrolik perlu mempertimbangkan tekanan maksimum 72 bar dan debit minimal 2,063 lpm, serta peningkatan debit apabila beberapa aktuator bekerja bersamaan.

Kata Kunci: alat peraga, hidrolik, excavator, crawler

I. Pendahuluan

Pendidikan teknik tidak hanya menuntut mahasiswa memahami teori, tetapi juga menuntut kemampuan membaca gejala kerja komponen, menafsirkan data teknis, dan menghubungkan prinsip dasar dengan kondisi nyata di lapangan. Pada mata kuliah Sistem Alat Berat, kebutuhan tersebut menjadi semakin penting karena objek yang dipelajari memiliki ukuran besar, sistem kompleks, dan risiko kerja yang tinggi. Karena itu, media pembelajaran berupa alat peraga menjadi jembatan antara penjelasan teoritis di kelas dan cara kerja alat berat yang sesungguhnya.

Media pembelajaran berbasis alat peraga mampu membuat konsep yang abstrak menjadi lebih konkret. Pada pembelajaran hidrolik, misalnya, mahasiswa tidak hanya mendengar penjelasan tentang tekanan fluida, tetapi dapat melihat hubungan antara tekanan, luas penampang, gaya, dan gerak aktuator. Penelitian tentang demonstrasi hidrolik untuk mahasiswa teknik menunjukkan bahwa pengembangan media dengan model 4D dapat menghasilkan validitas media, validitas materi, dan kepraktisan yang baik dalam proses pembelajaran (Siman et al., 2023). Hasil serupa juga dilaporkan pada pengembangan alat peraga pompa hidrolik sederhana yang memperoleh validasi tinggi dari ahli media dan ahli materi (Wahid, 2022).

Pada tingkat sekolah dan perguruan tinggi, media berbasis sistem hidrolik terbukti relevan untuk membantu peserta didik memahami konsep Hukum Pascal, fluida statis, dan aplikasi gaya tekan pada sistem mekanis. Rustiana et al. (2022) menegaskan bahwa alat peraga press hidrolik dapat digunakan sebagai media penerapan konsep Hukum Pascal, sedangkan Lestari dan Muhajir (2024) mengembangkan hydraulic robotic arm sebagai media pembelajaran fisika berbasis STEM dengan tingkat kelayakan yang tinggi. Temuan tersebut memperkuat kebutuhan media pembelajaran yang tidak berhenti pada konsep, tetapi juga memperlihatkan aplikasi teknis yang dekat dengan dunia industri.

Excavator merupakan alat berat yang banyak digunakan pada pekerjaan konstruksi, pertambangan, pembukaan lahan, dan pemindahan material. Gerakan *boom*, *arm*, *bucket*, *swing*, dan *travel* pada excavator sangat bergantung pada sistem tenaga fluida, terutama silinder hidrolik dan pompa. Pada unit sebenarnya, kinerja excavator dipengaruhi oleh tekanan kerja, debit aliran, kondisi komponen, dan efisiensi sistem hidrolik. Jůza dan Heřmánek (2023) menunjukkan bahwa efisiensi sistem hidrolik berpengaruh terhadap produktivitas excavator, sedangkan Halim et al. (2024) menekankan pentingnya evaluasi kinerja sistem hidrolik pada unit excavator 320D2 Caterpillar. Kajian literatur oleh Nugraha et al. (2024) juga menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi hidrolik menjadi salah satu arah penting dalam pengembangan excavator modern.

Meskipun penting, penggunaan excavator asli sebagai media praktikum tidak selalu memungkinkan. Ukurannya besar, biaya operasional dan perawatannya tinggi, serta membutuhkan area kerja yang aman. Kondisi ini membuat pembelajaran sering bergantung pada gambar, video, atau penjelasan lisan. Padahal, mahasiswa membutuhkan media yang bisa diamati secara langsung, dibongkar secara konseptual, dan diuji parameternya. Karena itu, pengembangan miniatur excavator menjadi salah satu solusi yang lebih ekonomis, portabel, dan aman untuk lingkungan kelas maupun laboratorium.

Beberapa penelitian telah mengarah pada pengembangan miniatur atau model excavator sebagai media pembelajaran. Setiyawan et al. (2021) mengembangkan media pembelajaran *hydraulic cylinder* excavator berbasis *augmented reality*, sedangkan Darmawan et al. (2023) merancang model excavator dengan *hydraulic syringe* dan kendali jarak jauh berbasis IoT. Pada pengujian alat peraga mini excavator, Aji et al. (2024) menganalisis hubungan tekanan dan putaran pada komponen swing hidrolik, sementara Esa et al. (2025) menguji performa sistem hidrolik pada alat peraga mini excavator Zhugimada. Selain itu, Nazaruddin et al. (2024) menunjukkan bahwa pengembangan kendali wireless berbasis Bluetooth dan Internet of Things dapat memperluas fleksibilitas pengoperasian model excavator skala laboratorium.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada analisis kinerja sistem transmisi hidrolik pada miniatur prototipe excavator model *crawler*. Fokus utama penelitian meliputi perancangan desain, analisis beban berdasarkan *center of gravity*, perhitungan luas penampang silinder, tekanan kerja, kecepatan, debit aliran, serta pertimbangan penentuan pompa hidrolik. Prototipe ini diharapkan dapat menjadi media pembelajaran yang humanis, mudah dipahami, dan dekat dengan kebutuhan

mahasiswa, karena mahasiswa dapat melihat alur kerja sistem hidrolik secara langsung tanpa harus berhadapan dengan risiko unit alat berat sebenarnya.

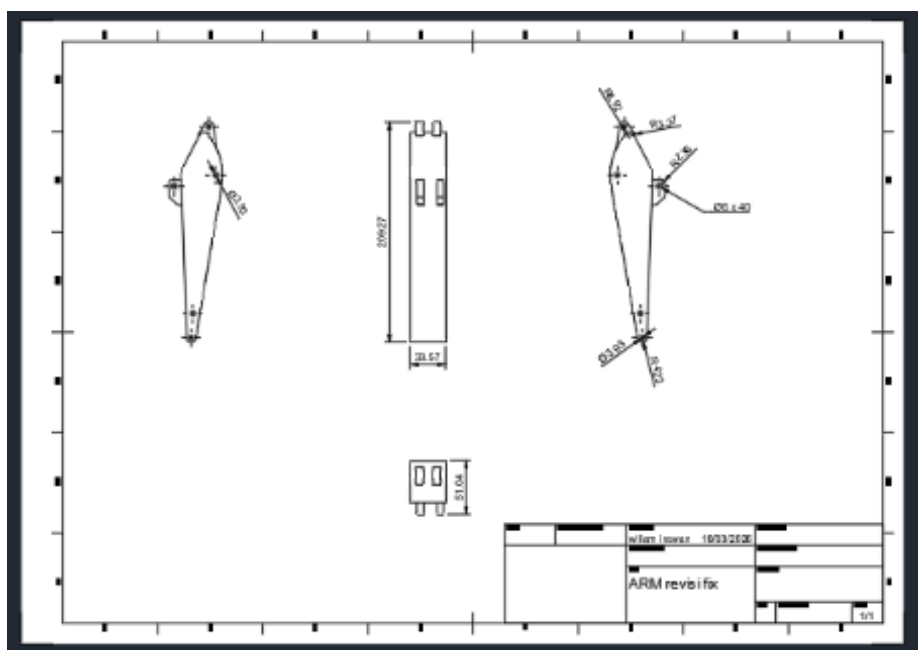
II. Bahan dan Metode

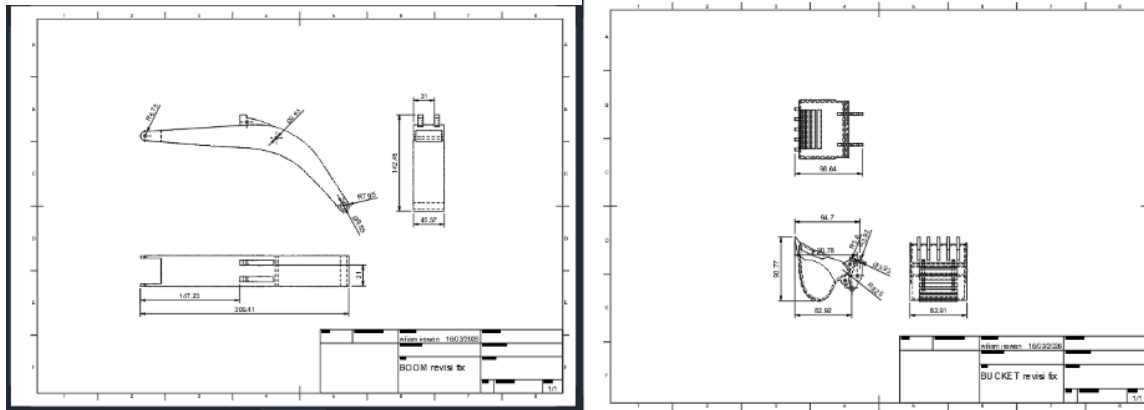
Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian dan pengembangan atau *Research and Development* (R&D). Metode ini dipilih karena penelitian tidak hanya bertujuan memperoleh data, tetapi juga menghasilkan produk berupa miniatur prototipe excavator model *crawler* yang dapat diuji kinerja teknis dan kelayakannya sebagai media pembelajaran. Model pengembangan yang digunakan mengacu pada 4D, yaitu *Define, Design, Development, dan Disseminate*. Pada penelitian ini, tahap disseminate dilakukan secara terbatas melalui uji kelayakan dan penyusunan rekomendasi penggunaan media.

Tahap *define* dilakukan untuk mengidentifikasi kebutuhan pembelajaran pada mata kuliah Sistem Alat Berat. Kegiatan ini meliputi observasi kebutuhan media, telaah materi sistem hidrolik excavator, dan penentuan spesifikasi awal produk. Tahap *design* dilakukan melalui pembuatan gambar teknik dan perancangan bentuk komponen excavator menggunakan perangkat lunak desain. Tahap *development* dilakukan melalui proses pembuatan komponen menggunakan mesin 3D printing dengan bahan filament PLA+, perakitan sistem silinder, serta pengujian parameter kerja. Tahap *disseminate* terbatas dilakukan melalui validasi ahli media dan ahli materi untuk menilai kelayakan alat peraga serta materi pendukungnya.

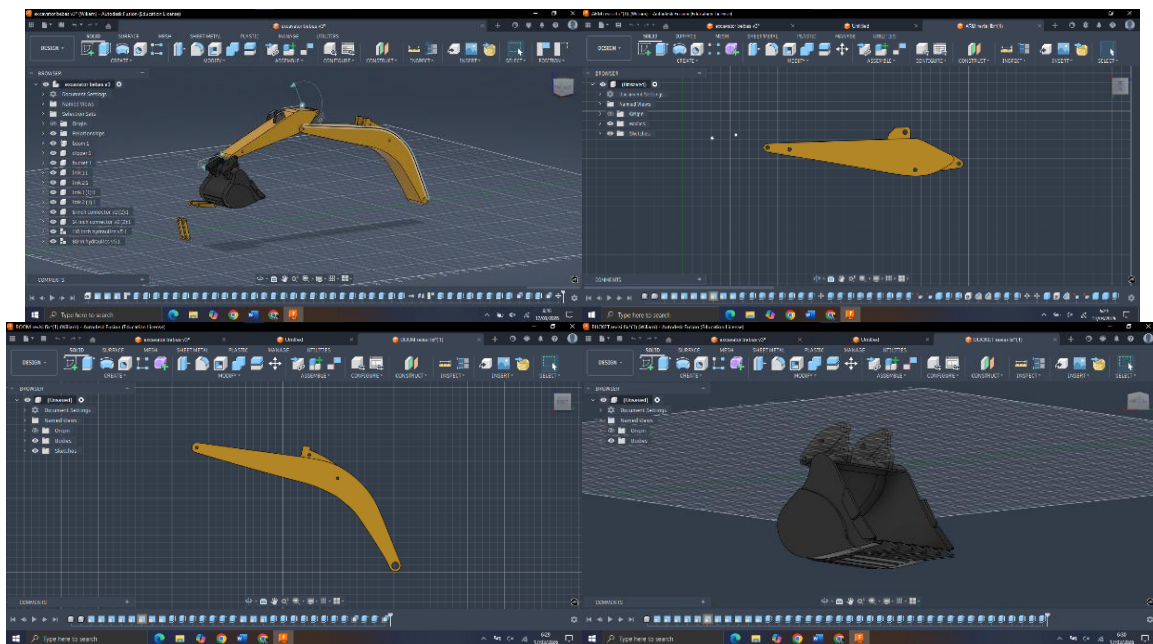
Tabel 1. Tahapan Pengembangan Produk

Tahap	Kegiatan Utama	Output
Define	Identifikasi kebutuhan media, materi hidrolik, dan spesifikasi awal.	Kebutuhan media dan spesifikasi awal prototipe.
Design	Pembuatan gambar teknik dan model 3D boom, arm, bucket, rangka, dan crawler.	Desain 2D dan 3D miniatur excavator.
Development	3D printing PLA+, perakitan, analisis COG, dan perhitungan hidrolik.	Prototipe dan data kinerja hidrolik.
Disseminate terbatas	Validasi ahli media dan ahli materi serta revisi terbatas.	Kategori kelayakan media dan materi.



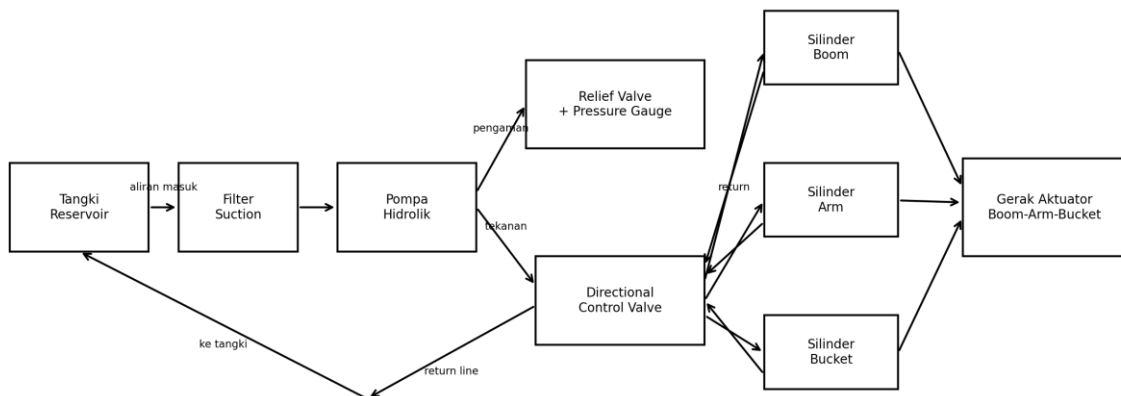


Gambar 1 Desain gambar Teknik miniature excavator



Gambar 2 Perancangan bentuk excavator menggunakan software fusion

Skema transmisi hidrolik prototipe miniatur excavator



Parameter analisis: beban aktuator, luas silinder, tekanan kerja, kecepatan silinder, debit aliran, dan kebutuhan pompa

Gambar 3 Skema transmisi hidrolik prototipe miniatur excavator

Bahan utama pembuatan prototipe adalah *filament* PLA+ karena mudah dicetak, ringan, cukup kuat untuk skala alat peraga, dan sesuai untuk proses iterasi desain. Komponen silinder dibuat dengan memanfaatkan gas spring yang dimodifikasi agar dapat merepresentasikan kerja silinder hidrolik pada skala pembelajaran. Selain itu, digunakan selang, *fitting*, fluida kerja, motor listrik, pompa oli, rangkaian kontrol sederhana, dan komponen pendukung lain yang disesuaikan dengan kebutuhan gerak boom, arm, dan bucket.

Pengumpulan data dilakukan melalui dokumentasi desain, pengukuran dimensi, analisis titik berat menggunakan perangkat lunak desain, perhitungan parameter hidrolik, pengamatan kinerja gerak, dan validasi ahli. Data teknis yang dihitung meliputi beban yang diterima masing-masing silinder, luas penampang silinder, gaya dorong, tekanan kerja, kecepatan gerak silinder, debit aliran, volume fluida, kebutuhan pompa, serta gejala rugi-rugi yang muncul selama pengujian. Data validasi diperoleh melalui lembar penilaian ahli media dan ahli materi, kemudian dikonversi menjadi persentase kelayakan.

Metode analisis kinerja transmisi hidrolik dilakukan secara bertahap. Pertama, model tiga dimensi prototipe dianalisis untuk menentukan *center of gravity* pada bagian *boom*, *arm*, dan *bucket*. Nilai beban yang diperoleh kemudian dikonversi menjadi gaya kerja dengan persamaan $F = m \times g$. Kedua, luas penampang silinder dihitung berdasarkan diameter dalam silinder menggunakan persamaan $A = (\pi \times D^2) / 4$. Ketiga, tekanan kerja setiap aktuator dihitung dengan persamaan $P = F / (A \times n)$, sehingga dapat diketahui aktuator yang menjadi penentu kebutuhan tekanan sistem.

Keempat, kinerja gerak dianalisis dari hubungan antara panjang langkah silinder dan waktu gerak melalui persamaan $V = stroke / time$. Debit aliran dihitung dengan $Q = V \times A \times n$, sedangkan volume fluida dihitung dengan $Volume = A \times stroke$. Kelima, kebutuhan pompa ditentukan dengan membandingkan tekanan terbesar dan debit terbesar pada setiap aktuator. Jika aktuator bekerja satu per satu, pompa dipilih berdasarkan tekanan tertinggi dan debit tertinggi. Jika beberapa aktuator bekerja bersamaan, kebutuhan debit didekati dari penjumlahan debit masing-masing silinder.

Selain perhitungan teoritis, analisis kinerja transmisi hidrolik juga dilakukan melalui pengamatan gejala kerja sistem, yaitu respons gerak silinder, potensi kebocoran oli, penurunan tekanan pada jalur selang dan sambungan, serta hambatan mekanis pada *track*. Indikator tersebut digunakan untuk menilai apakah sistem transmisi hidrolik tidak hanya mampu bergerak, tetapi juga bekerja stabil, aman, dan sesuai kebutuhan pembelajaran.

III. Hasil dan Pembahasan

1. Analisis Desain

Analisis desain dilakukan untuk mengetahui beban yang diterima oleh masing-masing silinder setelah komponen *excavator* dirancang dan dirakit secara virtual. Beban dianalisis berdasarkan *center of gravity* (COG) dari bagian yang digerakkan oleh silinder *boom*, *arm*, dan *bucket*. Analisis COG diperlukan karena kinerja transmisi hidrolik tidak hanya ditentukan oleh massa komponen, tetapi juga oleh posisi titik berat, lengan momen, dan arah gaya terhadap titik tumpu. Dengan pendekatan ini, kebutuhan tekanan dan debit pada sistem dapat ditentukan lebih tepat sebelum pompa dipilih.

Hasil analisis menunjukkan bahwa silinder *boom* menerima beban terbesar, yaitu 20 kg. Silinder *arm* menerima beban 10 kg, sedangkan silinder *bucket* menerima beban 5 kg. Pola ini dapat dipahami karena boom menopang rangkaian komponen di depannya, termasuk arm, bucket, dan sebagian beban akibat posisi kerja. Beban yang lebih besar pada boom membuat silinder boom menjadi komponen kritis dalam penentuan tekanan kerja dan pemilihan pompa. Pada sistem excavator sebenarnya, perhatian terhadap beban silinder juga penting karena kerusakan pada silinder dapat dipengaruhi oleh kondisi kerja, kualitas material, serta kontaminasi fluida (Pratama et al., 2022; Arianda et al., 2022).



Gambar 4 Prototipe miniature excavator dan bagian-bagian silinder hidrolis

2. Perhitungan Komponen Silinder

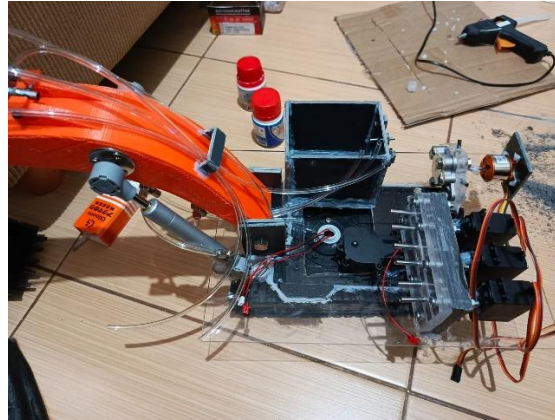
Perhitungan komponen silinder bertujuan memastikan bahwa sistem transmisi hidrolis mampu menghasilkan gaya yang sesuai dengan beban kerja setiap aktuator. Dasar perhitungan menggunakan prinsip Hukum Pascal, yaitu tekanan fluida yang diberikan pada ruang tertutup akan diteruskan ke segala arah dengan besar yang sama. Pada prototipe ini, perhitungan dilakukan terhadap silinder *boom*, *arm*, dan *bucket*.

Luas penampang silinder dihitung menggunakan persamaan $A = (\pi \times D^2) / 4$, dengan A sebagai luas penampang (m^2) dan D sebagai diameter dalam silinder (m). Tekanan kerja dihitung menggunakan persamaan $P = F / (A \times n)$, dengan P sebagai tekanan kerja, F sebagai gaya akibat beban, A sebagai luas penampang, dan n sebagai jumlah silinder. Kecepatan gerak silinder dihitung dengan $V = \text{stroke} / \text{time}$, debit aliran dihitung dengan $Q = V \times A \times n$, dan volume fluida dihitung dengan $\text{Volume} = A \times \text{stroke}$.

Hasil perhitungan memperlihatkan bahwa silinder *boom* membutuhkan tekanan kerja paling tinggi, yaitu 72 bar, karena menanggung beban terbesar. Silinder *arm* membutuhkan tekanan kerja 30 bar, sedangkan silinder *bucket* membutuhkan 20 bar. Debit aliran tertinggi terdapat pada silinder bucket sebesar 2,063 lpm karena kecepatan gerak yang direncanakan lebih tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa penentuan pompa tidak dapat hanya melihat beban, tetapi juga harus memperhatikan kecepatan gerak dan kebutuhan debit pada setiap aktuator. Hal tersebut sejalan dengan kajian Jůza dan Heřmánek (2023) yang menekankan pentingnya hubungan antara aliran oli, efisiensi hidrolis, dan produktivitas excavator.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Parameter Dalam Penentuan Pompa Hidrolis

No	Komponen	Nilai Beban Silinder		
		Boom	Arm	Bucket
1	Luas penampang silinder hidrolis (m^2)	0,000314	0,000491	0,000491
2	Tekanan kerja silinder (bar)	72	30	20
3	Kecepatan aliran silinder (m/s)	0,03	0,05	0,07
4	Flow silinder (lpm)	0,565	1,470	2,063



Gambar 5 Rangkaian power unit dan pengujian parameter hidrolik

3. Penentuan Pompa Hidrolik

Pemilihan pompa hidrolik pada prototipe dilakukan dengan mempertimbangkan tekanan kerja terbesar dan debit aliran yang dibutuhkan oleh silinder. Berdasarkan hasil perhitungan, tekanan kerja terbesar terdapat pada silinder *boom* sebesar 72 bar, sedangkan debit aliran terbesar terdapat pada silinder *bucket* sebesar 2,063 lpm. Jika aktuator digerakkan satu per satu, pompa minimal harus mampu menyediakan tekanan di atas kebutuhan terbesar dan debit yang mendekati kebutuhan aktuator tertinggi. Namun, apabila beberapa gerakan dilakukan secara bersamaan, kebutuhan debit teoritis dapat didekati dari penjumlahan debit boom, arm, dan bucket, yaitu 4,098 lpm.

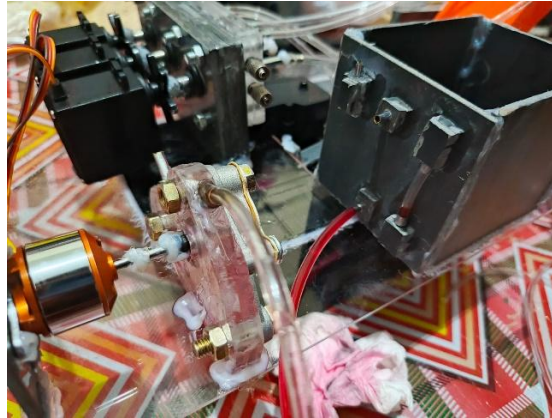
Dalam rancangan pembelajaran, pompa oli motor dapat digunakan sebagai alternatif karena bentuknya ringkas dan lebih mudah diperoleh. Meski demikian, sistem harus tetap dilengkapi pengaman seperti *relief valve*, *pressure gauge*, dan pemeriksaan kebocoran sebelum digunakan. Keberadaan *relief valve* penting untuk mencegah tekanan berlebih ketika silinder mencapai batas langkah. Pada excavator skala industri, perawatan dan penggantian komponen hidrolik juga menjadi faktor penting untuk menekan risiko kegagalan, sebagaimana ditunjukkan oleh Suharsono et al. (2024) dalam optimasi penggantian bucket hydraulic cylinder pada excavator tambang.

Hasil ini sejalan dengan pengujian alat peraga mini excavator yang menempatkan tekanan dan putaran sebagai parameter penting dalam performa sistem. Aji et al. (2024) menunjukkan bahwa perubahan tekanan memengaruhi putaran pada komponen *swing* alat peraga mini excavator. Esa et al. (2025) juga menekankan pentingnya uji performa sistem hidrolik pada mini excavator agar alat peraga tidak hanya berfungsi secara visual, tetapi juga dapat memberikan gambaran teknis tentang hubungan antara tekanan, aliran, dan gerak aktuator.

4. Analisis Kinerja Transmisi Hidrolik

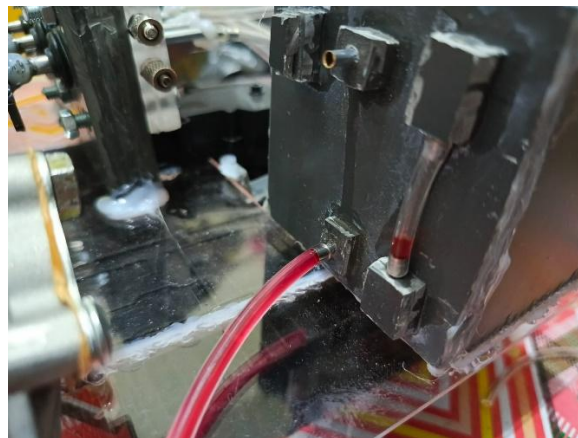
Analisis kinerja transmisi hidrolik pada prototipe menunjukkan bahwa karakteristik kerja sistem ditentukan oleh dua parameter utama, yaitu tekanan dan debit aliran. Berdasarkan hasil perhitungan, tekanan kerja tertinggi terdapat pada silinder *boom* sebesar 72 bar. Nilai ini menunjukkan bahwa *boom* menjadi aktuator kritis karena harus mengangkat rangkaian komponen di depannya. Sementara itu, debit aliran tertinggi terdapat pada silinder bucket sebesar 2,063 lpm karena kecepatan gerak yang dirancang lebih besar dibandingkan *boom* dan *arm*. Dengan demikian, pemilihan pompa harus mempertimbangkan dua kondisi sekaligus: kemampuan menghasilkan tekanan di atas 72 bar dan kemampuan menyediakan debit minimal sesuai kebutuhan aktuator tertinggi.

Jika ketiga aktuator bekerja secara bergantian, kebutuhan pompa dapat mengacu pada tekanan terbesar dan debit terbesar. Namun, apabila *boom*, *arm*, dan *bucket* dioperasikan secara bersamaan, kebutuhan debit teoritis menjadi 4,098 lpm. Nilai tersebut diperoleh dari penjumlahan debit silinder *boom* sebesar 0,565 lpm, silinder *arm* sebesar 1,470 lpm, dan silinder bucket sebesar 2,063 lpm. Hasil ini memperlihatkan bahwa kinerja transmisi hidrolik pada prototipe tidak hanya bergantung pada kemampuan silinder menghasilkan gaya, tetapi juga pada kecukupan debit untuk mempertahankan kecepatan gerak aktuator.



Gambar 6 Kebocoran oli pada pompa

Dalam pengujian, kinerja sistem juga dipengaruhi oleh rugi-rugi hidrolis. Rugi volumetrik dapat terjadi akibat kebocoran internal pompa atau kebocoran eksternal pada sambungan, sehingga sebagian aliran oli tidak berubah menjadi gerak aktuator. Kondisi ini ditandai oleh gerak silinder yang lebih lambat dari perhitungan teoritis, tekanan yang sulit dipertahankan, dan adanya rembesan oli sebagaimana terlihat pada Gambar 6. Pada prototipe kecil, rugi ini dapat menjadi relatif besar karena celah komponen dan toleransi manufaktur tidak selalu sebaik unit industri.



Gambar 7 Diameter selang yang digunakan

Rugi tekanan juga dapat muncul pada *valve*, selang, *fitting*, dan belokan aliran. Rugi tekanan meningkat ketika debit bertambah, diameter selang terlalu kecil, atau sambungan tidak rapat. Diameter selang yang digunakan pada prototipe perlu disesuaikan dengan debit kerja agar aliran tidak terhambat, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Selain rugi hidrolis, terdapat rugi mekanis pada *sprocket*, *bearing*, dan *track*. Rugi mekanis tersebut dapat terlihat dari *slip track*, gerak *crawler* yang tidak seragam, atau respons aktuator yang tertunda ketika beban meningkat.

Berdasarkan hubungan antara beban, tekanan, debit, dan rugi-rugi tersebut, sistem transmisi hidrolis prototipe dapat dinilai bekerja sesuai tujuan pembelajaran karena mampu memperlihatkan perubahan energi dari aliran fluida menjadi gerak mekanis pada *boom*, *arm*, dan *bucket*. Namun, agar kinerjanya lebih stabil, prototipe perlu dilengkapi *pressure gauge* untuk membaca tekanan kerja aktual, *relief valve* untuk membatasi tekanan berlebih, filter untuk menjaga kebersihan oli, serta pengencangan rutin pada *fitting* dan selang untuk mencegah kebocoran. Dengan penambahan komponen tersebut, prototipe tidak hanya berfungsi sebagai alat peraga visual, tetapi juga sebagai media praktikum untuk membaca parameter kinerja transmisi hidrolis secara lebih terukur.

5. Kelayakan Sebagai Media Pembelajaran

Selain diuji secara teknis, prototipe juga dinilai dari sisi kelayakan sebagai media pembelajaran. Penilaian oleh tiga ahli media memperoleh nilai rata-rata 80,83%, sedangkan penilaian oleh dua ahli

materi memperoleh nilai rata-rata 83,75%. Kedua hasil tersebut berada pada kategori layak, sehingga prototipe dapat digunakan sebagai media pendukung pembelajaran sistem hidrolik excavator. Kelayakan ini menunjukkan bahwa media tidak hanya dapat bergerak, tetapi juga cukup komunikatif untuk menjelaskan fungsi komponen kepada mahasiswa.

Penggunaan prototipe memberi ruang bagi mahasiswa untuk belajar secara bertahap. Mahasiswa dapat mengamati komponen, membaca gambar desain, melihat gerak *boom-arm-bucket*, kemudian menghubungkannya dengan perhitungan tekanan dan debit. Dari sisi pedagogis, pendekatan ini sejalan dengan pengembangan media hydraulic cylinder excavator berbasis augmented reality oleh Setiyawan et al. (2021), model excavator *hydraulic syringe* berbasis kendali IoT oleh Darmawan et al. (2023), serta pengembangan media hidrolik berbasis STEM oleh Lestari dan Muhajir (2024). Dengan demikian, miniatur excavator dapat menjadi media konkret yang menghubungkan teori hidrolik, desain mekanik, dan aplikasi alat berat.

Pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan dengan menambahkan sensor tekanan, sensor posisi, pengukur debit, serta modul pembelajaran berbasis lembar kerja praktikum. Integrasi kendali wireless juga dapat menjadi pilihan, karena Nazaruddin et al. (2024) menunjukkan bahwa sistem *Bluetooth* dan *Internet of Things* mampu memperluas jangkauan pengendalian model excavator skala laboratorium. Namun, untuk kebutuhan dasar pembelajaran, prototipe yang dikembangkan dalam penelitian ini sudah memenuhi tujuan utama, yaitu membantu mahasiswa memahami kinerja sistem transmisi hidrolik secara aman, sederhana, dan mudah diamati.

Tabel 3. Hasil Validasi Kelayakan Media dan Materi

Aspek Penilaian	Jumlah Validator	Rata-rata Skor	Kategori
Ahli media	3	80,83%	Layak
Ahli materi	2	83,75%	Layak

IV. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dan analisis, miniatur prototipe *excavator* model *crawler* berhasil dikembangkan sebagai alat peraga sistem transmisi hidrolik untuk pembelajaran Sistem Alat Berat. Prototipe dibuat menggunakan komponen hasil 3D *printing* berbahan *filament* PLA+ dan mekanisme silinder yang dimodifikasi dari *gas spring*, sehingga bentuk dan gerakannya dapat merepresentasikan sistem kerja *boom*, *arm*, dan *bucket* pada excavator dalam skala pembelajaran.

Analisis sistem kinerja transmisi hidrolik menunjukkan bahwa silinder *boom* menjadi komponen penentu tekanan karena menerima beban terbesar, yaitu 20 kg, dan membutuhkan tekanan kerja 72 bar. Silinder *arm* menerima beban 10 kg dengan kebutuhan tekanan 30 bar, sedangkan silinder *bucket* menerima beban 5 kg dengan kebutuhan tekanan 20 bar. Dari sisi debit, silinder *bucket* menjadi komponen penentu aliran karena membutuhkan debit tertinggi sebesar 2,063 lpm. Apabila *boom*, *arm*, dan *bucket* bekerja secara bersamaan, kebutuhan debit teoritis sistem mencapai 4,098 lpm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemilihan pompa harus mempertimbangkan tekanan tertinggi, debit tertinggi, dan potensi rugi-rugi pada pompa, *valve*, selang, *fitting*, serta mekanisme track.

Hasil validasi menunjukkan bahwa prototipe memperoleh nilai 80,83% dari ahli media dan 83,75% dari ahli materi, sehingga masuk kategori layak sebagai media pembelajaran. Dengan demikian, prototipe ini dapat digunakan untuk membantu mahasiswa memahami hubungan antara beban, gaya, tekanan, debit aliran, dan gerak aktuator pada sistem transmisi hidrolik. Pengembangan selanjutnya disarankan menambahkan *pressure gauge*, relief valve, sensor tekanan, sensor posisi, dan pengukur debit agar analisis kinerja transmisi hidrolik dapat dilakukan secara lebih akurat dan terukur.

Daftar Pustaka

- Aji, A. P., Bahari, G., Winarto, F. E. W., & Prihadianto, B. D. (2024). Analisa performa tekanan dan RPM pada komponen swing hidrolik pada alat peraga mini excavator. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Alat Berat*, 1(1), 11-18. <https://doi.org/10.22146/jtrab.v1i1.8929>

- Arianda, R., Masykur, Darsan, H., Al Munawir, & Supardi, J. (2022). Damage analysis of hydraulic bucket cylinder on excavator Komatsu CP-200 at PT. Wiratako Mitra Mulia. *Jurnal Inotera*, 7(2), 133-139. <https://doi.org/10.31572/inotera.Vol7.Iss2.2022.ID191>
- Darmawan, M., Andrew C. J., Filbert, Sebastian M. P., Johanes V. K., Zephaniah I., & Soewono, A. (2023). Perancangan model excavator dengan penggerak hydraulic syringe menggunakan remote control IoT. *Cylinder: Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 9(1), 10-16. <https://doi.org/10.25170/cylinder.v9i1.5007>
- Esa, S. N., Prihadianto, B. D., Hasan, D. A., Prayitno, Y. A. K., Septian, M., & Hidayat, A. N. (2025). Uji performa sistem hidrolik alat peraga mini excavator Zhugimada. *Infotekmesin*, 16(1), 283-288. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v16i1.2532>
- Halim, A., Fadli, M., & Mangkona. (2024). Kinerja sistim hidrolik pada unit excavator 320D2 Caterpillar. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(2), 1165-1174. <https://doi.org/10.21776/jrm.v15i2.1756>
- Jůza, M., & Heřmánek, P. (2023). Influence of the excavator hydraulic system efficiency on the productivity. *Research in Agricultural Engineering*, 69(1), 18-27. <https://doi.org/10.17221/77/2021-RAE>
- Lestari, I. F., & Muhajir, S. N. (2024). The development of hydraulic robotic arm as a STEM-based physics learning media. *Jurnal Ilmu Pendidikan Fisika*, 9(1). <https://doi.org/10.26737/jipf.v9i1.4743>
- Nazaruddin, N., Huda, F., Herisiswanto, H., Afrizal, E., & Bayulesmana, F. (2024). Development of excavator arm movement with wireless control using Bluetooth and the Internet of Things (IoT). *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(1(132)), 21-30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312074>
- Nugraha, G. L., Ajis, M., Adhi, H. S., & Zakaria, D. (2024). Performance improvement of hydraulic excavator efficiency: A literature review. *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence*, 1(1), 27-44. <https://doi.org/10.17509/jmai.v1i1.69947>
- Pratama, F. W., Siradj, E. S., & Rahman, O. H. O. S. (2022). Failure analysis on tube arm cylinder hydraulic excavator. *Jurnal Pendidikan Teknologi Kejuruan*, 5(4), 101-104. <https://doi.org/10.24036/jptk.v5i4.29423>
- Rustiana, V., Rofiqah, S. A., & Effendi, E. (2022). Pengembangan media pembelajaran berupa alat peraga press hidrolik sebagai penerapan konsep Hukum Pascal untuk peserta didik kelas VIII SMP. *U-Teach: Journal Education of Young Physics Teacher*, 3(1), 13-19. <https://doi.org/10.30599/uteach.v3i1.47>
- Setiyawan, A., Manggalasari, L. C., Prasetya, T. A., Towip, & Noviansyah, W. (2021). Development of hydraulic cylinder excavator learning media based on augmented reality with Shapr 3D. *Journal of Physics: Conference Series*, 2111, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2111/1/012008>
- Siman, Riadi, S., Keysar, P., Harto, B., & Agus, N. P. (2023). Development of learning media using hydraulic demonstrations to increase learning outcomes of mechanical engineering students. *Proceedings of the 4th Annual Conference of Engineering and Implementation on Vocational Education (ACEIVE 2022)*. <https://doi.org/10.4108/eai.20-10-2022.2328834>
- Suharsono, A., Maharani, S. P., & Wahyuningsih, R. (2024). Replacement time optimization of bucket hydraulic cylinder components in the mining excavator of “XYZ” company using power law process model. *AIP Conference Proceedings*, 3095(1), 070001. <https://doi.org/10.1063/5.0209427>
- Wahid, M. A. (2022). Pengembangan alat peraga sistem pompa hidrolik sederhana pada materi fluida statis untuk meningkatkan hasil belajar peserta didik. *Jurnal Phi: Jurnal Pendidikan Fisika dan Fisika Terapan*, 8(2). <https://doi.org/10.22373/p-jpft.v8i2.15741>