

Analisis Kinematika Dan Dinamika Mesin Pres Kaleng Berbasis Pneumatik Dengan Mekanisme Gerak Maju–Mundur Untuk Meningkatkan Efisiensi Pengolahan Limbah Logam

Rinaldo Hasudungan Malau¹, Roy Lamrun Sianturi², Tiara Melinda³, Surya Silalahi²

¹Program Studi Rekayasa Sistem Energi, Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Medan Estate, Sumatera Utara 20371, Indonesia.

²Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Medan Estate, Sumatera Utara 20371, Indonesia.

³Program Studi D3 Teknik Mesin, Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Medan Estate, Sumatera Utara 20371, Indonesia.

rinaldomalau@unimed.ac.id

Abstract

The increasing amount of aluminum can waste has encouraged the development of a faster and more efficient processing system. This research focuses on the analysis of kinematic and dynamic performance of a pneumatic-based can pressing machine equipped with a forward–reverse motion mechanism. The study was conducted through machine design, fabrication, assembly, and experimental testing. The developed system used an SC 80 × 175 mm double-acting pneumatic cylinder with a working pressure of 6 bar, operated using a 5/2 solenoid valve. Experimental results showed that the actuator produced a pressing force of 3014.4 N, allowing the machine to perform stable linear movement during the pressing process. Testing on ten aluminum cans showed that the average processing time was reduced from 78 seconds in the manual process to 24 seconds using the pneumatic system. This improvement resulted in a time efficiency increase of 69.23%. These findings indicate that the developed pneumatic can press machine provides better productivity and performance for aluminum waste processing.

Keywords: Pneumatic can press machine; kinematic and dynamic analysis; aluminum waste processing; forward–reverse mechanism; pressing force; automation system.

Abstrak

Meningkatnya jumlah limbah kaleng aluminium mendorong pengembangan sistem pengolahan yang lebih cepat dan efisien. Penelitian ini berfokus pada analisis kinerja kinematika dan dinamika mesin pres kaleng berbasis pneumatik dengan mekanisme gerak maju–mundur. Penelitian dilakukan melalui tahapan perancangan mesin, fabrikasi, perakitan, dan pengujian eksperimen. Sistem yang dikembangkan menggunakan silinder pneumatik kerja ganda SC 80 × 175 mm dengan tekanan kerja 6 bar yang dikendalikan menggunakan katup solenoid 5/2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aktuator pneumatik mampu menghasilkan gaya tekan sebesar 3014,4 N sehingga menghasilkan gerakan linier yang stabil selama proses pengepresan, serta memberikan performa yang memadai untuk mendukung proses kerja. Pengujian terhadap sepuluh kaleng aluminium menunjukkan bahwa waktu rata-rata proses pengepresan berkurang dari 78 detik pada metode manual menjadi 24 detik menggunakan mesin pneumatik. Peningkatan tersebut menghasilkan efisiensi waktu sebesar 69,23%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin pres kaleng pneumatik yang dikembangkan mampu meningkatkan produktivitas dan kinerja dalam proses pengolahan limbah aluminium.

KataKunci : Mesin pres kaleng pneumatic; analisis kinematika dan dinamika; pengolahan limbah aluminium; mekanisme maju-mundur; gaya tekan; sistem otomatisasi.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang teknik mesin telah mendorong lahirnya berbagai inovasi peralatan dan sistem otomasi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kualitas proses kerja pada berbagai sektor industri. Kemajuan teknologi tersebut tidak hanya diterapkan pada industri manufaktur berskala besar, tetapi juga mulai merambah secara masif pada sektor pengolahan limbah yang saat ini menjadi salah satu pilar utama dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Peningkatan jumlah limbah padat yang dihasilkan dari aktivitas rumah tangga, komersial, maupun industri menuntut adanya keberadaan teknologi mekanis yang mampu mendukung proses pengelolaan limbah secara lebih efektif dan efisien. Dalam konteks teknik mesin, pengembangan mesin pengolah limbah menjadi solusi konkret yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kapasitas pengolahan, meminimalkan ketergantungan pada tenaga kerja manual, serta menghasilkan proses kerja yang lebih cepat dan konsisten [1], [2]. Salah satu jenis limbah padat yang kuantitasnya terus meningkat signifikan di masyarakat adalah limbah kaleng aluminium. Kaleng aluminium banyak dipilih sebagai kemasan produk minuman karena memiliki keunggulan material seperti massa yang ringan, ketahanan yang tinggi terhadap korosi, kemudahan dalam proses pembentukan, serta sifatnya yang dapat didaur ulang secara berulang (*infinitely recyclable*) tanpa mengalami penurunan kualitas material yang berarti. Namun, tingginya tingkat konsumsi minuman dalam kemasan ini berbanding lurus dengan timbulan limbah kaleng bekas yang apabila tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan potensi permasalahan lingkungan yang serius. Secara fisik, kaleng aluminium bekas memiliki rasio volume yang jauh lebih besar dibandingkan dengan bobot massanya. Karakteristik ini menyebabkan limbah kaleng memakan ruang penyimpanan (*space-occupying*) yang sangat luas. Akibatnya, alur logistik yang mencakup proses pengumpulan, penyimpanan sementara, hingga transportasi menuju fasilitas daur ulang menjadi sangat tidak efisien dan membengkakkan biaya operasional apabila limbah tersebut tidak melalui proses reduksi volume terlebih dahulu.

Proses reduksi volume limbah kaleng pada umumnya dilakukan melalui pendekatan mekanis, seperti pengepresan atau penghancuran. Tujuan utama dari proses ini adalah memampatkan ukuran fisik kaleng sehingga ruang penyimpanan dapat dimaksimalkan dan beban biaya transportasi dapat ditekan serendah mungkin. Selain itu, kaleng yang telah terdeformasi menjadi bentuk padat (*bale*) jauh lebih mudah ditangani dalam rantai pasok pemilahan material lanjutan. Namun, dalam kenyataannya, sebagian besar pengolahan limbah kaleng pada tingkat rumah tangga, pengepul skala kecil, maupun bengkel daur ulang lokal masih mengandalkan cara-cara manual. Metode konvensional ini memiliki keterbatasan mendasar: membutuhkan beban fisik yang besar dari operator, menghasilkan laju produktivitas yang rendah, serta menghasilkan tingkat pemampatan yang tidak seragam. Ketergantungan pada variabilitas tenaga manusia ini membuat waktu siklus kerja menjadi acak, sehingga efisiensi sistem secara keseluruhan sulit diukur dan ditingkatkan.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, dibutuhkan penerapan sistem mekanis yang mampu bekerja secara kontinu, efisien, dan menghasilkan deformasi produk yang

seragam. Salah satu teknologi penggerak yang sangat ideal untuk kebutuhan ini adalah sistem pneumatik. Sistem pneumatik mengandalkan udara bertekanan sebagai fluida kerja untuk menghasilkan daya dan gerakan mekanis. Dibandingkan dengan sistem penggerak hidrolik maupun elektrik, pneumatik menawarkan keunggulan berupa struktur konstruksi yang relatif sederhana, biaya perawatan yang hemat, kecepatan respon aksi yang tinggi, serta tingkat kebersihan kerja yang sangat baik karena bebas dari risiko kebocoran oli [3], [4]. Di samping itu, integrasi silinder pneumatik memungkinkan konversi energi pneumatik menjadi gerakan linier secara langsung. Karakteristik ini membuat pneumatik sangat andal dalam mengaplikasikan gaya tekan yang konstan pada mekanisme mesin pres, mesin pengemasan, hingga peralatan otomasi industri.

Dalam proses perancangan mesin pres berbasis pneumatik, analisis elemen mesin dan keandalan mekanisme gerak memegang peranan yang sangat vital. Seluruh komponen penopang seperti rangka utama,udukan silinder, poros sambungan, dan pena transmisi harus diperhitungkan dengan cermat agar mampu menahan beban impak maupun beban statis selama proses pengepresan berlangsung. Kesalahan dalam menentukan dimensi atau spesifikasi material dapat mengakibatkan penurunan presisi gerak, deformasi elastis-plastis yang tidak diinginkan pada struktur mesin, hingga kegagalan fatal (*structural failure*) saat beroperasi [5]–[9]. Oleh karena itu, evaluasi terhadap perilaku gerak dan respon gaya yang terjadi pada sistem menjadi tahapan yang tidak boleh terlewatkan.

Dua pendekatan mendasar yang digunakan untuk mengevaluasi perilaku sistem mekanis tersebut adalah analisis kinematika dan dinamika. Analisis kinematika berfokus pada pemetaan karakteristik gerak sistem—seperti lintasan perpindahan, laju kecepatan, dan percepatan elemen—tanpa meninjau gaya luar yang menyebabkannya. Sebaliknya, analisis dinamika mengkaji secara mendalam hubungan kausalitas antara gaya-gaya yang bekerja (baik gaya dorong silinder maupun gaya reaktif material) dengan gerakan yang dihasilkan oleh sistem tersebut [5], [6]. Gabungan kedua analisis ini memberikan pemahaman yang utuh mengenai sejauh mana aktuator mampu menyalurkan gaya tekan dan bagaimana efisiensi siklus gerak dapat dicapai secara optimum.

Tren penelitian mengenai pemanfaatan pneumatik dan pengembangan aktuator telah mengalami eskalasi yang pesat. Berbagai studi terdahulu berfokus pada optimasi dinamika silinder dan efisiensi penggerak pneumatik [10], [11], integrasi mekanisme presisi pada manipulator mekanis [12], [13], hingga pemanfaatan *pneumatic artificial muscle* (PAM) untuk fleksibilitas gerakan [14]. Di samping itu, upaya peningkatan efisiensi energi juga dikaji secara mendalam melalui skema daur ulang udara pembuangan (*exhaust air recycling*) [15], [16], pemisahan limbah berbasis pneumatik [17], serta penerapan strategi kontrol canggih bernalar non-linier dan kecerdasan buatan untuk mengendalikan respon gerakan aktuator [18]–[23].

Meskipun ranah literatur terdahulu telah menyumbangkan kontribusi besar pada aspek perancangan struktur, efisiensi fluida, dan algoritma pengendalian, sebagian besar pengujian masih terpisah antara domain rancang bangun mekanis dan karakteristik gerak aktuatornya. Pembahasan yang secara spesifik mengupas korelasi langsung antara parameter kinematika (seperti waktu siklus gerak maju–mundur dan panjang langkah) dengan respon dinamika (gaya tekan nyata dan teoretis) pada proses kompresi limbah kaleng aluminium masih sangat terbatas.

Berdasarkan research gap tersebut, kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini berfokus pada analisis komprehensif mengenai karakteristik kinematika dan dinamika gerak

maju–mundur silinder pneumatik kerja ganda tipe SC 80 $\times$ 175 mm pada tekanan kerja operasional 6 bar. Evaluasi dilakukan secara kuantitatif melalui pengukuran presisi panjang langkah aktuator, kalkulasi waktu siklus pengepresan, serta pemodelan gaya tekan teoretis berdasarkan luas penampang efektif piston dan tekanan fluida. Pendekatan ini memberikan pemahaman holistik mengenai performa mekanis mesin pres kaleng, yang tidak hanya membuktikan keandalan alat secara fisik tetapi juga menyediakan landasan matematis-analitis untuk pengembangan mesin otomasi daur ulang yang lebih efisien di masa depan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan design and build untuk mengetahui karakteristik kinematika dan dinamika pada mesin pres kaleng berbasis pneumatik dengan mekanisme gerak maju–mundur. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu proses perancangan, pembuatan komponen, perakitan sistem pneumatik, pengujian kinerja mesin, pengolahan data, serta evaluasi hasil pengepresan limbah kaleng aluminium.

Penelitian dilaksanakan di Workshop Program Studi Pendidikan Teknik Mesin Universitas Negeri Medan. Sistem yang dikembangkan dirancang untuk menghasilkan gerakan linier menggunakan aktuator pneumatik sehingga proses pengepresan dapat dilakukan secara lebih cepat dan stabil.

2.1 Perancangan dan Fabrikasi Mesin

Tahap perancangan dilakukan dengan membuat desain mesin menggunakan perangkat lunak Computer Aided Design (CAD) sebagai acuan dalam proses pembuatan alat. Perancangan meliputi rangka mesin,udukan silinder, mekanisme pelat penekan, serta sistem penggerak pneumatik. Sistem penggerak yang digunakan berupa silinder pneumatik tipe double acting cylinder SC 80 $\times$ 175 mm dengan pengaturan arah gerak menggunakan solenoid valve 5/2. Udara bertekanan dari kompresor diatur menggunakan regulator dan sistem penyaring udara (FRL) dengan tekanan kerja sebesar 6 bar. Setelah desain selesai, dilakukan proses fabrikasi rangka, pemasangan komponen mekanis, instalasi sistem pneumatik, dan pengujian awal untuk memastikan seluruh bagian mesin dapat bekerja sesuai rancangan.

2.2 Parameter Penelitian

Parameter penelitian digunakan untuk mengetahui pengaruh sistem pneumatik terhadap karakteristik gerak dan kemampuan pengepresan mesin. Parameter yang diamati meliputi aspek kinematika dan dinamika, seperti perpindahan piston, kecepatan gerak, tekanan udara, gaya tekan, dan waktu siklus pengepresan.

Tabel 1. Parameter Kinematika dan Dinamika Mesin Pres Kaleng Berbasis Pneumatik

No	Parameter	Simbol	Nilai
1.	Diameter piston	D	80 mm
2.	Panjang langkah piston	s	175 mm
3.	Tekanan kerja	P	6 bar
4.	Luas penampang piston	A	0,005024 m ²
5.	Gaya tekan teoritis	F	3014,4 N
	Waktu siklus pengepresan	t	24 s

2.3 Analisis Kinematika

Analisis kinematika dilakukan untuk mengetahui karakteristik pergerakan aktuator

pneumatik selama proses pengepresan. Parameter yang dianalisis meliputi jarak perpindahan piston, kecepatan rata-rata, dan waktu yang diperlukan dalam satu siklus gerakan maju–mundur. Perpindahan piston ditentukan berdasarkan panjang langkah silinder pneumatik sebesar 175 mm. Kecepatan rata-rata aktuator dihitung menggunakan hubungan antara perpindahan dan waktu tempuh sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$s = \frac{v}{t} \quad (1)$$

Kecepatan rata-rata piston dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$v = \frac{s}{t} \quad (2)$$

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh:

- Panjang langkah piston (s) = 0,175 m
- Waktu siklus rata-rata (t) = 24 s

Sehingga kecepatan rata-rata piston adalah:

$$v = 0,175 / 24 = 0,00729 \text{ m/s}$$

Data waktu gerak diperoleh melalui pengamatan langsung menggunakan stopwatch digital selama proses pengujian mesin berlangsung.

2.4 Analisis Dinamika

Analisis dinamika dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan aktuator pneumatik dalam menghasilkan gaya tekan selama proses pengepresan kaleng aluminium. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara tekanan udara kerja, luas penampang piston, dan gaya tekan yang dihasilkan sehingga dapat dievaluasi kemampuan sistem dalam mereduksi dimensi kaleng aluminium secara efektif. Selain itu, analisis dinamika digunakan untuk memastikan bahwa gaya yang dihasilkan aktuator sesuai dengan kebutuhan proses pengepresan tanpa menyebabkan kegagalan pada komponen mekanis mesin.

2.4.1 Prosedur Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan secara eksperimental setelah proses perancangan, fabrikasi, dan perakitan mesin selesai dilaksanakan. Sebelum pengujian dimulai, seluruh komponen sistem pneumatik diperiksa untuk memastikan kondisi mesin siap beroperasi. Pemeriksaan meliputi:

- Kondisi sambungan selang pneumatik (air hose fittings).
- Fungsi katup pengarah (directional control valve).
- Kestabilan tekanan udara pasokan.
- Kelancaran gerakan piston tanpa hambatan mekanis.

Pemeriksaan ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kebocoran udara dan memastikan seluruh komponen bekerja sesuai rancangan. Tekanan kerja sistem diatur sebesar 6 bar menggunakan regulator pada unit Filter–Regulator–Lubricator (FRL). Nilai tekanan kemudian diverifikasi menggunakan manometer hingga menunjukkan

kondisi stabil. Setelah tekanan sistem konstan, dilakukan uji tanpa beban (no-load test) untuk memastikan piston mampu bergerak maju dan mundur secara linier sepanjang langkah silinder tanpa adanya hambatan mekanis. Pengujian dilakukan menggunakan 10 kaleng aluminium bekas yang memiliki ukuran relatif seragam. Setiap kaleng ditempatkan padaudukan pengepres, kemudian mesin dioperasikan hingga silinder pneumatik menyelesaikan satu siklus gerak maju–mundur. Selama proses tersebut, tekanan kerja dijaga tetap konstan sehingga gaya tekan yang dihasilkan hanya dipengaruhi oleh karakteristik aktuator pneumatik. Data yang dikumpulkan meliputi:

1. Diameter piston (D)
2. Tekanan kerja (P)
3. Panjang langkah piston (S)
4. Waktu siklus pengepresan (t)
5. Luas penampang piston hasil perhitungan (A)
6. Gaya tekan teoritis ($F_{teoritis}$)
7. Gaya tekan aktual (Faktual)

2.4.2 Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan dalam analisis dinamika terdiri atas komponen utama sistem pneumatik dan alat ukur pendukung sebagaimana disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Instrumen yang Digunakan pada Analisis Dinamika

No	Instrumen	Spesifikasi	Fungsi
1	Double acting cylinder	SC 80 × 175 mm	Menghasilkan gaya tekan maju dan mundur
2	Kompresor udara	Sumber udara bertekanan	Menyuplai udara bertekanan ke sistem
3	Filter–Regulator–Lubricator (FRL)	Tekanan kerja maks. 6 bar	Menyaring, mengatur, dan melumasi aliran udara
4	Manometer	Rentang 0–10 bar	Mengukur dan memantau tekanan kerja sistem
5	Solenoid valve 5/2	Double solenoid / double acting	Mengatur arah aliran udara untuk gerak piston
6	Stopwatch digital	Resolusi 0,01 s	Mengukur waktu siklus pengepresan

Data diameter piston diperoleh langsung dari spesifikasi pabrikan silinder pneumatik, sedangkan tekanan kerja dibaca langsung pada manometer. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menghitung luas penampang piston, gaya tekan teoritis, dan gaya tekan aktual.

2.4.3 Perhitungan Luas Penampang Piston

Luas penampang piston (A) dihitung menggunakan Persamaan (3):

$$A = (\pi \cdot D^2) / 4 \quad (3)$$

dengan:

A = luas penampang piston (m²)

D = diameter piston (m)

$\pi = 3,1416$

Diameter piston yang digunakan berdasarkan spesifikasi silinder adalah 80 mm, sehingga terlebih dahulu dikonversi ke dalam satuan internasional (m):

$$D = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

Substitusi nilai diameter ke dalam persamaan perhitungan luas penampang piston adalah sebagai berikut:

$$A = (3,1416 \cdot (0,08)^2) / 4$$

$$A = (3,1416 \cdot 0,0064) / 4$$

$$A = 0,00502656 \text{ m}^2$$

Hasil tersebut dibulatkan menjadi 0,00503 m² (atau 5.026,56 mm²).

2.4.4 Perhitungan Gaya Tekan Teoritis

Gaya tekan teoritis (F_{teoritis}) yang dihasilkan oleh silinder pneumatik saat gerak maju dihitung menggunakan Persamaan (4):

$$F_{\text{teoritis}} = P \cdot A \quad (4)$$

Tekanan kerja sistem sebesar 6 bar dikonversi terlebih dahulu menjadi satuan SI (N/m²) sebagai berikut:

$$1 \text{ bar} = 100.000 \text{ N/m}^2$$

$$P = 6 \cdot 100.000 = 600.000 \text{ N/m}^2$$

Selanjutnya dilakukan substitusi nilai tekanan dan luas penampang piston ke dalam persamaan gaya:

$$F_{\text{teoritis}} = 600.000 \cdot 0,00502656$$

$$F_{\text{teoritis}} = 3.015,94 \text{ N}$$

Dengan demikian, gaya tekan teoritis yang dihasilkan oleh silinder pneumatik adalah sebesar 3.015,94 N atau sekitar 3,02 kN. Besarnya gaya tersebut menunjukkan bahwa aktuator memiliki kemampuan yang memadai untuk menghasilkan deformasi permanen pada kaleng aluminium selama proses pengepresan.

2.4.5 Perhitungan Gaya Tekan Aktual

Dalam kondisi operasional aktual, gaya tekan nyata yang dihasilkan oleh silinder pneumatik tidak mencapai 100% dari nilai teoritisnya. Hal ini disebabkan oleh adanya hambatan mekanis seperti kerugian gesekan paking (seal friction), hambatan pada rod bushing, serta rugi tekanan (pressure drop) pada saluran udara dan katup pengarah.

Untuk memperhitungkan rugi-rugi tersebut, diterapkan faktor efisiensi mekanis (η) pada silinder pneumatik. Dalam penelitian ini, efisiensi mekanis diasumsikan sebesar 85% ($\eta = 0,85$), yang merupakan standar batas bawah efisiensi operasional

aktuator pneumatik. Gaya tekan aktual (Faktual) dihitung menggunakan Persamaan (5):

$$F_{aktual} = F_{teoritis} \cdot \eta \quad (5)$$

Perhitungan gaya tekan aktual dilakukan sebagai berikut:

$$F_{aktual} = 3.015,94 \cdot 0,85$$

$$F_{aktual} = 2.563,55 \text{ N}$$

Dengan demikian, gaya tekan aktual yang efektif bekerja mengepres kaleng aluminium adalah sebesar 2.563,55 N atau sekitar 2,56 kN (setara dengan beban $\approx 261,3$ kgf). Penurunan gaya akibat faktor gesekan ini masih tergolong aman dan nilainya tetap berada jauh di atas batas beban elastis aluminium, sehingga proses pengepresan dapat terwujud secara sempurna.

2.4.6 Analisis Data

Data hasil pengujian dan hasil perhitungan dianalisis menggunakan metode deskriptif kuantitatif. Analisis dilakukan dengan membandingkan nilai gaya tekan teoritis (3,02 kN) dan gaya tekan aktual (2,56 kN) terhadap kondisi aktual selama proses pengepresan. Selanjutnya, hubungan antara tekanan kerja, luas penampang piston, gaya tekan, waktu siklus, dan karakteristik gerak aktuator dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem pneumatik.

Hasil analisis digunakan untuk menentukan apakah gaya tekan yang dihasilkan telah memenuhi kebutuhan proses pengepresan kaleng aluminium serta untuk menjelaskan pengaruh parameter dinamika terhadap efektivitas kerja mesin. Data hasil analisis kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik pada Bab 3 sebagai dasar pembahasan karakteristik dinamika mesin pres kaleng berbasis pneumatik.

2.5 Analisis Efisiensi

Efisiensi sistem dihitung berdasarkan perbandingan waktu pengepresan antara metode manual dan metode pneumatik. Persentase efisiensi dihitung menggunakan Persamaan (5).

dengan:

η = efisiensi waktu (%)

t_m = waktu pengepresan manual (detik)

t_p = waktu pengepresan pneumatik (detik)

Hasil analisis efisiensi digunakan untuk mengevaluasi peningkatan produktivitas yang diperoleh melalui penerapan sistem pneumatik pada mesin pres kaleng.

$$\eta = \left(\frac{t_m - t_p}{t_m} \right) \times 100\%$$

dengan:

η = efisiensi waktu (%)

t_m = waktu pengepresan manual (detik)

t_p = waktu pengepresan pneumatik (detik)

Hasil analisis efisiensi digunakan untuk mengevaluasi peningkatan produktivitas yang diperoleh melalui penerapan sistem pneumatik pada mesin pres kaleng.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1 Gambar Kerja dan Karakteristik Kinematika–Dinamika Mesin Pres Kaleng

Gambar kerja merupakan dokumen teknis yang digunakan sebagai acuan utama dalam proses perancangan, fabrikasi, dan perakitan mesin pres kaleng berbasis pneumatik. Selain menampilkan bentuk konstruksi dan dimensi alat, gambar kerja juga digunakan untuk menganalisis karakteristik kinematika dan dinamika sistem yang mempengaruhi kinerja mesin selama proses pengepresan. Penyusunan gambar kerja dilakukan menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD) untuk menghasilkan model tiga dimensi yang mampu menggambarkan hubungan antar komponen serta mekanisme gerak yang terjadi pada sistem.

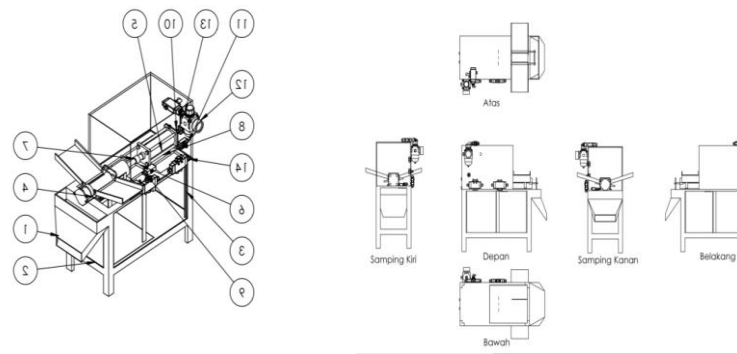
Perancangan mesin mempertimbangkan aspek kinematika berupa perpindahan, arah gerak, dan kestabilan gerak aktuator pneumatik. Sistem gerak utama menggunakan silinder pneumatik tipe SC 80 × 175 mm yang menghasilkan gerakan translasi linier maju–mundur pada pelat penekan. Gerakan maju terjadi ketika udara bertekanan dialirkan menuju ruang kerja silinder sehingga piston bergerak menekan kaleng aluminium, sedangkan gerakan mundur terjadi ketika arah aliran udara diubah melalui directional control valve tipe 5/2. Karakteristik gerak ini menjadi dasar analisis kinematika karena menentukan panjang langkah (stroke), kecepatan gerak, dan waktu siklus pengepresan.

Dari aspek dinamika, gambar kerja digunakan untuk menganalisis distribusi gaya yang bekerja pada struktur mesin selama proses operasi. Rangka utama dirancang menggunakan baja plat dan baja profil untuk menahan beban akibat gaya tekan pneumatik sebesar 3014,4 N. Pelat penekan dan dudukan kaleng dirancang agar mampu mendistribusikan gaya secara merata sehingga deformasi kaleng dapat berlangsung secara efektif dan konsisten. Analisis dinamika diperlukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen mampu menahan gaya kerja tanpa mengalami deformasi permanen maupun kegagalan struktur.

Gambar kerja juga menunjukkan tata letak komponen utama seperti rangka mesin, silinder pneumatik, pelat penekan, meja dudukan kaleng, regulator tekanan, air service unit (FRL), katup kontrol arah, serta jalur instalasi pneumatik. Susunan komponen tersebut dirancang untuk menghasilkan aliran gaya dan gerakan yang efisien selama proses pengepresan berlangsung. Selain sebagai pedoman fabrikasi, gambar kerja berfungsi untuk mempermudah analisis hubungan antara gerak aktuator dan gaya tekan yang dihasilkan sistem pneumatic.

Pada Gambar 1(a) diperlihatkan rancangan keseluruhan mesin pres kaleng berbasis pneumatik yang menunjukkan konfigurasi rangka, mekanisme penekan, dan sistem aktuator. Silinder pneumatik dipasang pada bagian atas rangka dan terhubung langsung dengan pelat penekan sehingga gaya yang dihasilkan aktuator dapat diteruskan secara maksimal ke benda kerja. Konfigurasi tersebut memungkinkan terjadinya gerak linier yang stabil dengan kehilangan energi mekanis yang relatif kecil.

Pada Gambar 1(b) ditampilkan proyeksi ortogonal yang meliputi tampak atas, tampak samping, dan tampak depan beserta dimensi utama alat. Informasi dimensi digunakan untuk mengevaluasi panjang langkah aktuator, posisi komponen, serta kesesuaian konstruksi terhadap kebutuhan analisis kinematika dan dinamika. Kejelasan gambar kerja sangat penting untuk memastikan bahwa mekanisme gerak maju–mundur dan distribusi gaya tekan dapat bekerja secara optimal sesuai dengan tujuan perancangan.



Gambar 1 (a) Tampilan rancangan mesin pres kaleng berbasis pneumatik yang menunjukkan konfigurasi sistem gerak dan distribusi gaya tekan, (b) Tampilan proyeksi ortogonal yang meliputi tampak atas, tampak samping, dan tampak depan beserta dimensi utama alat untuk analisis kinematika dan dinamika sistem.

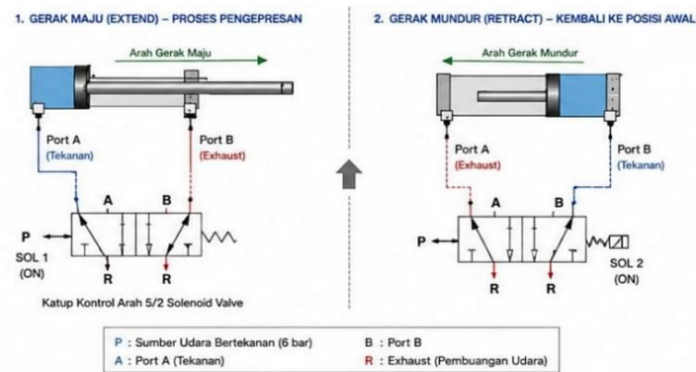


Gambar 2. Mesin Pres Kaleng Berbasis Pneumatik Hasil Fabrikasi

3.2 Analisis Kinematika Gerak Aktuator Pneumatik

Analisis kinematika dilakukan untuk mengetahui karakteristik gerak aktuator pneumatik pada mesin pres kaleng. Sistem menggunakan silinder pneumatik tipe double acting cylinder SC 80 × 175 mm yang menghasilkan gerak translasi linier maju–mundur. Gerakan maju terjadi ketika udara bertekanan masuk ke ruang depan silinder sehingga piston bergerak menuju pelat penekan. Sebaliknya, gerakan mundur terjadi ketika udara bertekanan dialirkan ke ruang belakang silinder melalui katup kontrol arah 5/2 solenoid valve.

Berdasarkan hasil pengukuran, panjang langkah (stroke) piston sebesar 175 mm dengan waktu rata-rata satu siklus pengepresan sebesar 24 detik. Karakteristik gerak yang dihasilkan menunjukkan bahwa aktuator mampu bergerak secara stabil tanpa mengalami penyimpangan lintasan yang signifikan. Stabilitas gerak tersebut dipengaruhi oleh distribusi tekanan udara yang relatif konstan selama proses operasi.

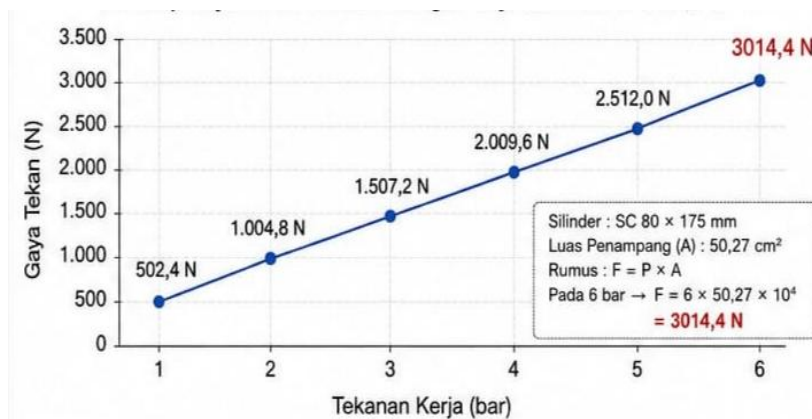


Gambar 3. Diagram Kinematika Gerak Maju–Mundur Aktuator Pneumatik

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan sistem pneumatik mampu menghasilkan gerak linier yang konsisten sehingga proses pengepresan dapat berlangsung secara berulang dengan tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode manual. Karakteristik ini sangat penting dalam meningkatkan produktivitas dan keseragaman hasil deformasi kaleng.

3.3 Analisis Dinamika Gaya Tekan Sistem Pneumatik

Analisis dinamika dilakukan untuk menentukan kemampuan sistem pneumatik dalam menghasilkan gaya tekan selama proses pengepresan kaleng aluminium. Perhitungan dilakukan berdasarkan tekanan kerja sistem sebesar 6 bar dan luas penampang piston sebesar $0,005024 \text{ m}^2$. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh gaya tekan teoritis sebesar 3014,4 N. Besarnya gaya tekan tersebut menunjukkan bahwa sistem pneumatik memiliki kemampuan yang cukup untuk menghasilkan deformasi permanen pada kaleng aluminium bekas. Semakin besar tekanan udara yang diberikan, maka semakin besar pula gaya tekan yang dihasilkan aktuator pneumatik.

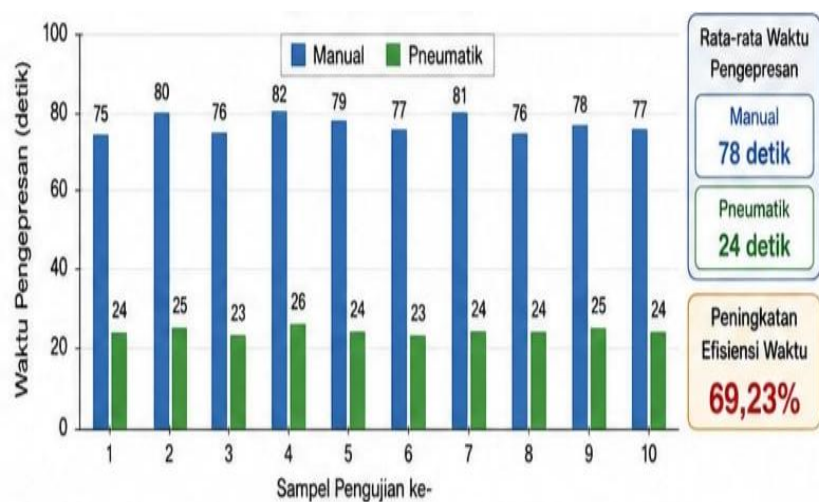


Gambar 4. Grafik Hubungan Tekanan Udara terhadap Gaya Tekan

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan tekanan udara berbanding lurus dengan peningkatan gaya tekan yang dihasilkan oleh aktuator. Dengan tekanan kerja 6 bar, sistem mampu memberikan gaya yang stabil sehingga proses pengepresan berlangsung lebih efektif dan menghasilkan bentuk deformasi yang relatif seragam pada setiap pengujian.

3.4 Analisis Kinerja dan Efisiensi Mesin Pres Kaleng

Pengujian kinerja dilakukan dengan membandingkan proses pengepresan menggunakan metode manual dan metode menggunakan mesin pres pneumatik. Pengujian dilakukan terhadap 10 sampel kaleng aluminium bekas dengan ukuran yang relatif seragam. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode manual membutuhkan waktu rata-rata 78 detik untuk setiap kaleng, sedangkan metode pneumatik hanya membutuhkan waktu rata-rata 24 detik. Selain itu, penggunaan sistem pneumatik menghasilkan bentuk deformasi yang lebih seragam dibandingkan metode manual yang sangat bergantung pada kemampuan operator.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Waktu Pengepresan Manual dan Pneumatik

Berdasarkan hasil perhitungan efisiensi diperoleh peningkatan efisiensi waktu sebesar 69,23%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penerapan sistem pneumatik mampu mempercepat proses pengolahan limbah kaleng secara signifikan. Selain meningkatkan produktivitas, penggunaan mesin juga mengurangi beban kerja operator dan meningkatkan keselamatan kerja karena kontak langsung dengan benda kerja dapat diminimalkan. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin pres kaleng berbasis pneumatik dengan mekanisme gerak maju–mundur memiliki karakteristik kinematika yang stabil, kemampuan dinamika yang memadai, serta mampu meningkatkan efisiensi pengolahan limbah logam dibandingkan metode pengepresan manual.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, mesin pres kaleng berbasis pneumatik dengan mekanisme gerak maju–mundur mampu bekerja dengan baik dalam proses pengolahan limbah logam. Penggunaan silinder pneumatik double acting SC 80 × 175 mm pada tekanan kerja 6 bar menghasilkan gerakan translasi linier yang stabil dengan panjang langkah 175 mm dan waktu siklus pengepresan rata-rata sebesar 24 detik. Hasil analisis dinamika menunjukkan bahwa sistem pneumatik mampu menghasilkan gaya tekan teoritis sebesar 3014,4 N yang dapat digunakan untuk mendeformasi kaleng aluminium secara efektif. Kinerja mesin menunjukkan peningkatan dibandingkan metode manual, dengan penurunan waktu pengepresan dari 78 detik menjadi 24 detik per kaleng atau peningkatan efisiensi waktu sebesar 69,23%. Selain meningkatkan kecepatan proses,

penggunaan mesin ini juga mampu mengurangi beban kerja operator serta mendukung proses pengepresan yang lebih aman dan konsisten. Secara keseluruhan, mesin pres kaleng berbasis pneumatik dengan mekanisme gerak maju–mundur telah memenuhi fungsi kerja yang dirancang dan mampu menjadi solusi dalam meningkatkan efektivitas proses pengepresan limbah kaleng aluminium.

5. REFERENSI

- [1] Yu, Q., Zhai, J., Wang, Q., Zhang, X., & Tan, X. (2021). Experimental Study of a New Pneumatic Actuating System Using Exhaust Recycling. *Sustainability*, 13(4), 1645. <https://doi.org/10.3390/su13041645>
- [2] Nikitin, A. A., Sorokin, E. A., Nikitina, T. N., & Andreychikov, I. V. (2021). Research of Pneumatic Cylinder Actuator's Dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1889, 042075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042075>
- [3] Franco, E., Ayatullah, T., Sugiharto, A., Garriga-Casanovas, A., & Viridyawan, V. (2021). Nonlinear Energy-Based Control of Soft Continuum Pneumatic Manipulators. *Nonlinear Dynamics*, 106, 229–253. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06817-1>
- [4] Khosravi, H. H., Iannucci, S. M., & Li, S. (2021). Pneumatic Soft Actuators with Kirigami Skins. *Frontiers in Robotics and AI*, 8. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.749051>
- [5] Mikami, K., & Tadano, K. (2021). High-Performance Finger Module for Robot Hands with Pneumatic Cylinder and Parallel Link Mechanism. *Advanced Robotics*, 35(24), 1513–1524. <https://doi.org/10.1080/01691864.2021.1993333>
- [6] Zhang, Y., dkk. (2021). Kinematic and Quasi-Static Analysis Model of a Novel Variable Stiffness Pneumatic Artificial Muscle. *Sensors and Actuators A: Physical*, 329, 112815. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112815>
- [7] Lee, S., Lee, D., & Shin, D. (2021). An Air Recirculation System Based on Bioinspired Soft Re-Air Valve for Highly Efficient Pneumatic Actuation. *Soft Robotics*, 8(5). <https://doi.org/10.1089/soro.2020.0007>
- [8] Šešlija, M., Reljić, V., Šešlija, D., Dudić, S., Dakić, N., & Jovanović, Z. (2021). Reuse of Exhausted Air from Multi-Actuator Pneumatic Control Systems. *Actuators*, 10(6), 125. <https://doi.org/10.3390/act10060125>
- [9] Zhu, X., Zhang, C.-Y., Feng, P., Yang, X., & Yang, X.-J. (2021). A Novel Pulsated Pneumatic Separation with Variable-Diameter Structure and Its Application in Recycling Spent Lithium-Ion Batteries. *Waste Management*, 131, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.027>
- [10] Nikitin, A. A., Sorokin, E. A., Nikitina, T. N., & Andreychikov, I. V. (2021). Research of Pneumatic Cylinder Actuator's Dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1889, 042075. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042075>
- [11] Tran, X. B. (2021). Nonlinear Control of a Pneumatic Actuator Based on a Dynamic Friction Model. *Journal of Mechanical Engineering*, 67(9), 458–472. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2021.7236>
- [12] Mikami, K., & Tadano, K. (2021). High-Performance Finger Module for Robot Hands with Pneumatic Cylinder and Parallel Link Mechanism. *Advanced Robotics*, 35(24), 1513–

- 1524.<https://doi.org/10.1080/01691864.2021.1993333>
- [13] Franco, E., Ayatullah, T., Sugiharto, A., Garriga-Casanovas, A., & Viridyawan, V. (2021). Nonlinear Energy-Based Control of Soft Continuum Pneumatic Manipulators. *Nonlinear Dynamics*, 106, 229–253. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06817-1>
 - [14] Zhagiparova, A., Golubev, V., & Kim, D. (2025). Recent Developments in Pneumatic Artificial Muscle Actuators. *Actuators*, 14, 582. <https://doi.org/10.3390/act14120582>
 - [15] Yu, Q., Zhai, J., Wang, Q., Zhang, X., & Tan, X. (2021). Experimental Study of a New Pneumatic Actuating System Using Exhaust Recycling. *Sustainability*, 13(4), 1645. <https://doi.org/10.3390/su13041645>
 - [16] Šešlija, M., Reljić, V., Šešlija, D., Dudić, S., Dakić, N., & Jovanović, Z. (2021). Reuse of Exhausted Air from Multi-Actuator Pneumatic Control Systems. *Actuators*, 10(6), 125. <https://doi.org/10.3390/act10060125>
 - [17] Zhu, X., Zhang, C.-Y., Feng, P., Yang, X., & Yang, X.-J. (2021). A Novel Pulsated Pneumatic Separation with Variable-Diameter Structure and Its Application in Recycling Spent Lithium-Ion Batteries. *Waste Management*, 131, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.027>
 - [18] Li, Y., Cao, Y., & Jia, F. (2021). A Neural Network Based Dynamic Control Method for Soft Pneumatic Actuator with Symmetrical Chambers. *Actuators*, 10(6), 112. <https://doi.org/10.3390/act1006112>
 - [19] Wang, S., Wang, R., Liu, Y., Zhang, Y., & Hao, L. (2025). Dynamic Modeling and Control of Pneumatic Artificial Muscles via Deep Lagrangian Networks and Reinforcement Learning. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 148, 110406. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110406>
 - [20] Xiao, H., Lai, X., Meng, Q., She, J., Fukushima, E. F., & Wu, M. (2025). Comprehensive Dynamic Model of Vertical Pneumatic Bellows Actuator System Considering Bidirectional Asymmetric Hysteresis. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 12(10), 2115–2126. <https://doi.org/10.1109/JAS.2025.125162>
 - [21] Zhao, S. Y., Meng, Q., Lai, X., Xiao, H., Yan, Z., & Wu, M. (2025). An Adaptive Nonsingular Fast Terminal Sliding Mode Control Method With Time-Delay Estimation for Pneumatic Soft Actuator Without Specific Model. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 21(5), 4061–4071. <https://doi.org/10.1109/TII.2025.3538111>
 - [22] Sugimoto, Y., Naniwa, K., Nakanishi, D., & Osuka, K. (2025). Control of Multiple McKibben Pneumatic Actuators Using Small Solenoid Valves and Dynamic Quantizer. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 37(1), 123–134. <https://doi.org/10.20965/jrm.2025.p0123>
 - [23] Tang, D., Zhu, Z., & Zhang, Y. (2025). Pneumatic Soft Actuator: A Review of Design, Modeling and Applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. <https://doi.org/10.1177/09544062251370852>