BAB V
PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

5.1 Prosedur Pengukuran dan Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah alat pres pneumatik dapat bekerja sesuai dengan rancangan dan tujuan tugas akhir. Pengujian meliputi tegangan keluaran *supply*, pembacaan sensor *load cell* dan sensor tekanan, serta fungsi tombol, *relay*, katup *solenoid*, silinder pneumatik, dan LCD. Selain itu, pengujian bertujuan untuk mengetahui hubungan antara tekanan udara dan gaya dorong silinder, menguji penghentian otomatis ketika target gaya tercapai, serta mengetahui konsistensi gaya tekan dan kedalaman pemasangan modul LED AC melalui pengujian berulang

Prosedur pengujian alat pres modul LED AC dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

1. Multimeter, beban acuan, modul LED AC, *housing*, dan tabel pencatatan hasil pengujian disiapkan.
2. *Supply* dipastikan dalam keadaan mati dan aliran udara dari kompresor ditutup. Sambungan kabel, selang pneumatik, serta dudukan komponen diperiksa untuk memastikan seluruh bagian telah terpasang dengan baik.
3. *Supply* dinyalakan, kemudian tampilan LCD diperiksa. *Load cell* dipastikan dalam kondisi tanpa beban dan pembacaannya dipastikan bernilai nol setelah proses *tare* selesai.
4. Tegangan keluaran 5 V DC dan 12 V DC pada *supply* diukur menggunakan multimeter. Hasil pengukuran dicatat saat alat dalam kondisi siap dan selama proses pengepresan.
5. Beban acuan diletakkan pada *load cell*, kemudian hasil pembacaannya dicatat dan dibandingkan dengan nilai beban acuan. Setelah beban dilepas, pembacaan *load cell* diperiksa kembali untuk memastikan nilainya kembali ke nol.

6. Aliran udara dari kompresor dibuka secara bertahap, kemudian tekanan diatur menggunakan *filter regulator*. Nilai yang ditampilkan oleh sensor tekanan dicatat. Tekanan disesuaikan dengan kapasitas komponen dan *load cell*.
7. Tombol *start* dan *stop* diuji, kemudian respons *relay*, *solenoid valve*, gerakan silinder, serta tampilan LCD diamati. Area gerak silinder dipastikan bebas dari tangan dan benda yang dapat menghalangi gerakan.
8. Silinder dipastikan berada pada posisi awal dan siklus pengepresan dipastikan tidak aktif. Selanjutnya, *housing* dan modul LED AC ditempatkan pada dudukan. Posisi benda uji disesuaikan dengan arah gerak bagian penekan.
9. Proses pengepresan dijalankan dengan menekan tombol *start*. Pembacaan *load cell*, tekanan udara, dan gerakan silinder diamati selama pengepresan. Gaya maksimum yang terbaca serta respons alat saat pengepresan dihentikan dicatat.
10. Setelah silinder kembali ke posisi awal, benda uji diambil dan hasil pengepresan diperiksa secara visual. Posisi pemasangan, kemiringan modul, serta ada atau tidaknya kerusakan pada modul dan *housing* dicatat.
11. Pengujian diulang dengan posisi benda uji dan pengaturan alat yang sama agar konsistensi hasil pengepresan dapat diketahui. Pada karakterisasi gaya dorong, gaya teoretis dihitung pada tekanan 1–6 bar. Pengukuran langsung disesuaikan dengan batas kapasitas *load cell*.
12. Data pengujian disusun dalam tabel dan disajikan dalam grafik sesuai kebutuhan. Setelah seluruh pengujian selesai, *supply* dimatikan, aliran udara ditutup, dan sisa tekanan dalam sistem dibuang sebelum pembongkaran atau penyesuaian komponen dilakukan.

5.2 Pengujian *Supply*

Pengujian *supply* dilakukan untuk mengetahui kesesuaian tegangan keluaran dengan kebutuhan rangkaian alat. Pada alat ini, digunakan *supply* dengan dua keluaran, yaitu 5 V DC dan 12 V DC. Kedua keluaran tersebut diukur menggunakan multimeter saat alat dalam kondisi siap dan saat proses pengepresan berlangsung. Melalui pengujian ini, perubahan tegangan akibat perbedaan kondisi kerja alat dapat diketahui.

5.2.1 Pengujian Tegangan Keluaran 5 V DC

Pengujian keluaran 5 V DC dilakukan dengan mengatur multimeter pada pengukuran tegangan DC. *Probe* merah dihubungkan ke terminal keluaran positif 5 V, sedangkan *probe* hitam dihubungkan ke terminal negatif atau COM yang sesuai. Pengukuran dilakukan secara paralel dengan rangkaian tetap terhubung agar tegangan dapat diukur saat *supply* dibebani.

Tegangan terlebih dahulu diukur saat alat dalam kondisi siap. Selanjutnya, proses pengepresan dijalankan dan tegangan keluaran diukur kembali. Kedua hasil pengukuran dicatat, kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan tegangan yang teramati. Tabel hasil pengujian tegangan keluaran 5 V DC disusun sebagai berikut.

Tabel 5-1 Tabel hasil pengujian tegangan keluaran 5 V DC

No.	Kondisi Alat	Tegangan Nominal	Hasil Pengukuran	Dokumentasi Pengukuran
1	Kondisi Siap	5 V DC	5,100 V DC	
2	Proses Pengepresan	5 V DC	5,099 V DC	

5.2.2 Pengujian Tegangan Keluaran 12 V DC

Pengujian keluaran 12 V DC dilakukan menggunakan multimeter dengan pengaturan tegangan DC. *Probe* merah dihubungkan ke terminal keluaran positif 12 V, sedangkan *probe* hitam dihubungkan ke terminal negatif atau COM yang sesuai. Selama pengukuran, sambungan *supply* ke rangkaian dipertahankan agar kondisi pembebanan alat dapat diamati.

Pengukuran dilakukan saat alat dalam kondisi siap dan ketika proses pengepresan berlangsung. Tegangan pada kedua kondisi tersebut dicatat untuk mengetahui apakah terdapat perubahan saat *solenoid valve* diaktifkan.

Tabel 5-2 Tabel Hasil Pengujian Tegangan Keluaran 12 V DC

No.	Kondisi Alat	Tegangan Nominal	Hasil Pengukuran	Dokumentasi Pengukuran
1	Kondisi Siap	12 V DC	11,94 V DC	
2	Proses Pengepresan	12 V DC	11,23 V DC	

5.2.3 Analisis Hasil Pengujian *Supply*

Berdasarkan hasil pengujian, tegangan keluaran 5 V DC diukur sebesar 5,100 V saat alat dalam kondisi siap dan 5,099 V saat proses pengepresan berlangsung. Dari kedua kondisi tersebut, diperoleh selisih tegangan sebesar 0,001 V. Jika dibandingkan dengan tegangan nominal 5 V, diperoleh penyimpangan sebesar 2,02% pada kondisi siap dan 2,00% selama pengepresan. Berdasarkan selisih yang kecil tersebut, tegangan keluaran 5 V DC dapat dinyatakan relatif tetap pada kedua kondisi pengujian.

Pada keluaran 12 V DC, tegangan diukur sebesar 11,94 V saat alat dalam kondisi siap dan 11,23 V selama proses pengepresan. Penurunan tegangan sebesar 0,73 V diperoleh dari perbandingan kedua hasil pengukuran tersebut. Terhadap tegangan nominal 12 V, diperoleh penyimpangan sebesar 0,42% pada kondisi siap dan 6,50% selama pengepresan.

Penurunan tegangan pada saat proses pengepresan dapat terjadi karena beban listrik yang bekerja menjadi lebih besar dibandingkan saat alat dalam kondisi siap. Ketika proses pengepresan berlangsung, *relay* aktif dan *solenoid valve* 12 V mendapat suplai arus. Kondisi tersebut menyebabkan arus yang ditarik dari *power supply* meningkat. Semakin besar arus beban, semakin besar pula kemungkinan terjadi penurunan tegangan akibat resistansi internal *power supply*, kabel, jalur PCB, konektor, dan sambungan pada rangkaian.

5.3 Kalibrasi *Load Cell*

Kalibrasi dilakukan untuk menyesuaikan hasil pembacaan *load cell* dengan beban acuan yang telah diketahui massanya. Sebelum kalibrasi, dudukan sensor diperiksa dan dipastikan terpasang dengan baik. Bagian penimbang dikosongkan, kemudian proses *tare* dilakukan agar pembacaan awal ditetapkan pada nilai nol.

Beban acuan diletakkan pada bagian penimbang dengan posisi yang tetap. Setelah pembacaan stabil, nilai pada LCD dicatat dan dibandingkan dengan massa beban acuan. Faktor kalibrasi pada program disesuaikan hingga selisih pembacaan

terhadap beban acuan diperkecil. Faktor kalibrasi yang diperoleh ialah 104.27 dengan menggunakan lima beban sebagai acuan.

Persentase kesalahan dihitung dengan membandingkan selisih mutlak antara rata-rata pembacaan dan massa beban acuan terhadap massa beban acuan.

$$\text{Selisih} = |\text{Pembacaan Load Cell} - \text{Pembacaan Pembanding}|$$

$$\text{Kesalahan (\%)} = (\text{Selisih} / \text{Beban acuan}) \times 100\%$$

Persamaan tersebut digunakan untuk beban acuan lebih dari nol. Pada kondisi tanpa beban, penyimpangan dicatat langsung dalam satuan gram.

Tabel 5-3 Tabel Hasil Perbandingan *Load Cell* dengan Timbangan Pembanding

No.	**Timbangan pembanding (g)**	**Pembacaan *load cell* (g)**	**Selisih (g)**	**Galat (%)**	**Dokumentasi**
1	82	81,35	0,65	0,79	
2	175	175,18	0,18	0,1	

3	341	341,47	0,47	0,14	
4	469	469,32	0,32	0,07	
5	2025	2028,59	3,59	0,18	
Rata-rata Galat			0,26%		

5.4 Pengujian Sensor *Pressure*

Pengujian sensor *pressure* dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara nilai tekanan yang ditampilkan pada LCD dan nilai yang ditunjukkan oleh indikator tekanan pada AFR2000. Pembacaan pada AFR2000 digunakan sebagai pembanding dalam pengujian.

Pengujian dilakukan dengan mengatur tekanan melalui AFR2000 secara bertahap pada 1, 2, 3, 4, 5. Sensor dan indikator tekanan AFR2000 harus membaca tekanan pada jalur yang sama. Setelah tekanan stabil dan silinder dalam kondisi diam, pembacaan pada AFR2000 dan LCD dicatat. Hasil pengujian disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 5-4 Perbandingan Pembacaan Tekanan AFR2000 dengan Sensor *Pressure*

No.	Pembacaan AFR2000	Pembacaan sensor pada LCD	Selisih absolut	Dokumentasi Perbandingan
1	1 bar	1,02 bar	0,02 bar	
2	2 bar	2 bar	-	
3	3 bar	3,01 bar	0,01 bar	

4	4 bar	4,01 bar	0,01 bar	
5	5 bar	5 bar	-	
Rata-rata Galat			0,52%	

Berdasarkan hasil pengujian, pembacaan sensor *pressure* pada LCD menunjukkan nilai yang mendekati pembacaan indikator tekanan AFR2000. Selisih absolut berada pada rentang 0–0,02 bar. Selisih terbesar terdapat pada pembacaan AFR2000 sebesar 1 bar, dengan pembacaan LCD sebesar 1,02 bar. Pada tekanan 2 bar dan 5 bar, kedua pembacaan menunjukkan nilai yang sama. Sementara itu, pada tekanan 3 bar, 4 bar, dan 5,8 bar, selisih absolut yang diperoleh sebesar 0,01 bar.

Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian pembacaan sensor dengan indikator AFR2000 pada titik tekanan yang diuji. Namun, penilaian selisih perlu mempertimbangkan keterbatasan pembacaan skala indikator AFR2000, sehingga hasil perbandingan ini belum dapat digunakan untuk menyatakan akurasi mutlak sensor.

5.5 Pengujian Sistem Kendali dan Pneumatik

Pada bagian sistem kendali, pengujian difokuskan pada respons Arduino Nano terhadap masukan tombol dan pembacaan *load cell*. Penekanan tombol *start* digunakan untuk mengaktifkan *relay* yang mengendalikan *solenoid valve* sehingga silinder bergerak turun untuk melakukan pengepresan. Penghentian proses diperiksa melalui dua kondisi, yaitu ketika tombol *stop* ditekan dan ketika gaya tekan mencapai *setpoint*. Pada kedua kondisi tersebut, *relay* harus dinonaktifkan sehingga silinder bergerak kembali ke posisi awal.

Pada bagian pneumatik, pengujian dilakukan dengan mengamati kesesuaian arah gerak silinder terhadap kondisi aktif dan tidak aktifnya *solenoid valve*. Pengujian tampilan LCD dilakukan dengan membandingkan informasi yang ditampilkan terhadap kondisi kerja alat. Informasi yang diperiksa meliputi status kesiapan alat, nilai pembacaan *load cell*, dan status selama proses pengepresan berlangsung. Kesesuaian antara masukan tombol, perubahan tampilan, dan respons gerakan silinder menjadi dasar penilaian fungsi sistem secara keseluruhan. Melalui pengujian ini, keterpaduan antara sistem kendali dan pneumatik dapat dievaluasi sebelum dilakukan pengujian hasil pengepresan.

5.5.1 Pengujian Tombol *Start* dan *Stop*

Pengujian tombol dilakukan untuk mengetahui kemampuan tombol dalam memberikan perintah mulai dan berhenti pada sistem. Tombol *start* menggunakan kontak *normally open*, sedangkan tombol *stop* menggunakan kontak *normally closed*. Pengujian dilakukan dengan menekan kedua tombol secara bergantian dan mengamati perubahan kondisi *relay* serta gerakan silinder.

Saat tombol *start* ditekan dalam kondisi tombol *stop* normal, sistem mengaktifkan *relay* untuk memulai pengepresan. Setelah tombol *start* dilepas, proses pengepresan tetap berlangsung sampai mencapai *setpoint*. Tombol *stop* mendapat prioritas sehingga perintah *start* tidak dapat mengaktifkan *relay* selama tombol *stop* masih ditekan.

Keberhasilan pengujian ditentukan berdasarkan kesesuaian respons alat dengan fungsi setiap tombol.

Tabel 5-5 Tabel Hasil Pengujian Tombol Start dan Tombol Stop

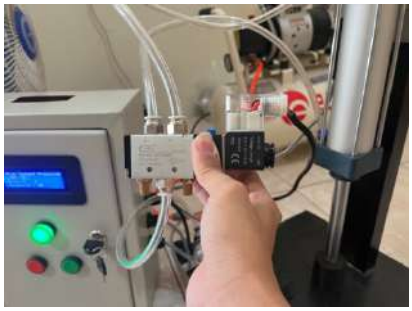
No.	Kondisi Pengujian	Respons	Dokumentasi Respons
1	Tombol *start* ditekan saat alat siap	*Relay* aktif dan silinder bergerak maju	
2	Tombol *start* dilepas setelah proses dimulai	*Relay* tetap aktif dan proses pengepresan berlanjut	
3	Tombol *stop* ditekan saat pengepresan	Relay nonaktif dan silinder bergerak kembali	
4	Tombol *start* ditekan ketika tombol *stop* masih ditekan	*Relay* tetap nonaktif	
5	Tombol *stop* dilepas tanpa penekanan ulang tombol *start*	Proses pengepresan tidak akan dimulai kembali	

5.5.2 Pengujian *Relay* dan *Solenoid Valve*

Pengujian *relay* dan *solenoid valve* dilakukan untuk mengetahui apakah perintah dari Arduino dapat mengendalikan aliran udara menuju silinder. *Relay* berfungsi menghubungkan dan memutus *supply* listrik menuju kumparan *solenoid valve*, sedangkan *solenoid valve* mengatur arah aliran udara pada sistem pneumatik.

Pengujian dilakukan dengan memberikan perintah melalui tombol *start* dan *stop*. Pemeriksaan mencakup perubahan kondisi *relay*, tegangan pada kumparan *solenoid valve*, serta respons gerakan silinder. Pengukuran tegangan menggunakan multimeter diperlukan untuk memastikan perubahan kondisi listrik pada kumparan, sehingga pemeriksaan tidak hanya berdasarkan lampu indikator *relay*.

Tabel 5-6 Tabel Hasil Pengujian Relay dan Solenoid Valve

No.	Kondisi	Respons	Dokumentasi Respons
1	*Relay* aktif	Kumparan *solenoid valve* menerima tegangan kerja dan aliran udara menggerakkan silinder maju	
2	*Relay* nonaktif	Tegangan pada kumparan terputus dan posisi katup mengarahkan silinder kembali	

5.5.3 Pengujian Tampilan LCD

Pengujian LCD dilakukan untuk mengetahui kesesuaian informasi yang ditampilkan dengan kondisi alat. Informasi yang diperiksa meliputi tampilan awal, status kesiapan alat, proses pengepresan, kondisi *solenoid*, pembacaan *load cell*, tekanan udara, serta proses *tare*.

Pengujian dilakukan dengan mengoperasikan alat dari kondisi awal hingga proses pengepresan selesai. Pada kondisi normal, halaman status dan pembacaan *load cell* bergantian dengan halaman tekanan udara sesuai pengaturan program. Pemeriksaan juga mencakup keterbacaan karakter, pergantian halaman, serta adanya kedipan atau sisa karakter dari tampilan sebelumnya.

Tabel 5-7 Tabel Hasil Pengujian Tampilan LCD

No.	Kondisi Pengujian	Tampilan LCD	Dokumentasi LCD
1	Alat pertama kali dinyalakan	"*ALAT PRESS PNEUMATIC*"	
2	Alat pertama kali dinyalakan	"Alat *Press* Siap", satu baris kosong, "*LOAD CELL*", dan nilai pembacaan beban	
3	Proses pengepresan berlangsung dan data beban tersedia	"Alat Sedang *Pressing*", "*LOAD CELL*", nilai pembacaan beban, dan "*Solenoid : ON"*	

4	Pengepresan dihentikan dan proses *tare* berlangsung	"*Pressing* Selesai", satu baris kosong, "*Solenoid : OFF*", dan "TUNGGU BEBAN LEPAS"	
5	Pengepresan dihentikan dan proses *tare* berlangsung	"*TARE* SELESAI"	
6	Halaman tekanan ditampilkan dan sinyal sensor valid	"TEKANAN UDARA", tekanan dalam bar dan MPa, serta tegangan sinyal sensor	

5.6 Karakterisasi Gaya Dorong Silinder Berdasarkan Tekanan Udara

Karakterisasi gaya dorong silinder bertujuan untuk mengetahui hubungan antara tekanan udara yang masuk ke silinder dan gaya yang dihasilkan pada langkah maju. Pembahasan mencakup perhitungan gaya teoretis pada tekanan 1–5 bar serta metode pembandingan dengan gaya aktual. Hasil perhitungan menjadi acuan untuk menilai kemampuan dorong silinder dan menentukan kapasitas alat ukur yang diperlukan.

5.6.1 Parameter dan Batas Pengujian

Silinder yang digunakan adalah AirTAC SC 50 × 150 tipe *double-acting*, dengan diameter piston 50 mm dan panjang langkah 150 mm. Karakterisasi difokuskan pada gerakan maju atau turun karena gerakan tersebut digunakan untuk mengepres modul LED AC ke dalam *housing*. Tekanan yang digunakan dalam perhitungan merupakan tekanan relatif terhadap tekanan atmosfer.

Perhitungan menggunakan tekanan 1, 2, 3, 4, dan 5 bar. Model teoretis menganggap tekanan pada ruang pendorong sudah stabil dan tekanan pada ruang sisi batang mendekati tekanan atmosfer. Pengaruh gesekan, tekanan balik, berat bagian yang bergerak, dan beban dinamis belum diperhitungkan. Panjang langkah tidak masuk ke dalam persamaan gaya statis ideal.

Gaya teoretis pada 1 bar mencapai 196,35 N dan pada 5 bar mencapai 981,75 N. Dengan demikian, *load cell* tersebut tidak memadai untuk mengukur gaya dorong penuh secara langsung pada rentang 1–5 bar. Pengujian aktual memerlukan sensor gaya dan dudukan yang kapasitas kerjanya melebihi gaya maksimum yang diperkirakan, disertai cadangan kapasitas untuk beban dinamis.

Mengacu pada spesifikasi yang tercantum dalam BAB II, tekanan kerja minimum komponen adalah 1,5 bar. Titik 1 bar tetap dimasukkan dalam perhitungan teoretis. Pelaksanaan pengukuran pada titik tersebut perlu disesuaikan dengan spesifikasi komponen yang terpasang dan kestabilan gerak silinder. Jika tidak dapat diuji, kondisi tersebut dicatat tanpa memberikan nilai gaya pengganti.

5.6.2 Perhitungan Gaya Dorong Teoritis pada Tekanan 1-5 Bar

Gaya dorong teoretis dihitung dari perkalian tekanan udara dengan luas penampang piston. Dengan diameter piston 0,05 m, luas penampangnya adalah sebagai berikut.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}" = \frac{\pi \times (0{,}05)^2}{4}" = 1{,}963495 \times 10^{-3}\mathrm{m}^2$$

Tekanan dikonversi menggunakan hubungan 1 bar = 100.000 Pa. Oleh karena itu, persamaan gaya dapat ditulis sebagai berikut.

$$F_{teoretis} = P \times A$$
$$F_{teoretis} = (P_{bar} \times 100.000) \times (1{,}963495 \times 10^{-3})$$
$$F_{teoretis} = 196{,}3495 \times P_{bar}\mathrm{N}$$

Dalam persamaan tersebut, F adalah gaya dalam newton, P adalah tekanan dalam pascal, A adalah luas penampang dalam meter persegi, dan P dengan indeks

bar adalah nilai tekanan dalam satuan bar. Hasil perhitungan pada lima tingkat tekanan ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-8 Tabel Hasil Perhitungan Gaya Dorong Teoritis

Tekanan (bar)	Tekanan (Pa)	Gaya teoretis (N)	Gaya teoretis (kgf)
1	100.000	196,35	20
2	200.000	392,70	40
3	300.000	589,05	60
4	400.000	785,40	80
5	500.000	981,75	100

Konversi kilogram-gaya menggunakan 1 kgf = 9,80665 N. Satuan kgf merupakan satuan gaya, sedangkan kg merupakan satuan massa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa setiap kenaikan tekanan 1 bar meningkatkan gaya teoretis sekitar 196,35 N atau 20,02 kgf.

5.6.3 Hasil Pengukuran Gaya Dorong Aktual

Pengukuran aktual direncanakan menggunakan sensor gaya yang telah dikalibrasi dan memiliki kapasitas sesuai dengan batas pengujian. Sensor dipasang sejajar dengan arah dorongan pada dudukan uji kaku. Pengukuran gaya penuh menggunakan dudukan uji, sehingga karakterisasi tidak dibatasi oleh deformasi atau kerusakan modul LED AC dan *housing*.

Sebelum pengukuran, sensor diatur ke nol melalui proses *tare* tanpa beban. Tekanan diatur melalui *filter regulator*, kemudian nilai tekanan dan gaya dicatat secara bersamaan ketika penekan telah berkontak dengan dudukan dan pembacaan stabil. Posisi ukur, pengaturan *speed controller*, serta kondisi awal alat dibuat sama pada setiap pengulangan. Lonjakan gaya saat kontak awal dicatat terpisah dari gaya stabil.

Pengujian direncanakan sebanyak tiga kali pada setiap tekanan. Tekanan aktual di sisi masuk silinder perlu dicatat; jika sensor tekanan berada di sisi *supply*, perbedaan lokasi tersebut dicantumkan sebagai batas pengukuran. Apabila penghentian berdasarkan *setpoint* terjadi sebelum gaya stabil terbentuk, hasilnya merupakan gaya saat penghentian dan tidak mewakili gaya dorong penuh silinder.

Tabel 5-9 Tabel Hasil Pengukuran Gaya Dorong Aktual

Tekanan nominal (bar)	Percobaan 1	Percobaan 2	Percobaan 3	Rata-rata (N)
1	190,80	190,80	190,80	190,80
2	384,55	384,55	382,10	382,73
3	554,76	554,76	554,76	554,76
4	758,31	758,31	758,31	758,31
5	883,39	883,39	883,39	883,39

Jika pembacaan sensor masih ditampilkan dalam gram, nilainya dikonversi menjadi newton sebelum dibandingkan dengan hasil teoretis. Untuk pembacaan yang dikalibrasi sebagai massa ekuivalen, konversinya adalah sebagai berikut.

$$\mathrm{F_{aktual}(N)} = \frac{\mathrm{m(g)}}{1.000} \times 9{,}80665$$

5.6.4 Grafik Hubungan Tekanan Udara dengan Gaya Dorong

Grafik hubungan tekanan udara dengan gaya dorong disusun pada tekanan nominal 1, 2, 3, 4, dan 5 bar. Gaya teoretis dihitung berdasarkan hubungan antara tekanan udara dan luas penampang piston dengan diameter 50 mm, sedangkan gaya aktual diperoleh dari rata-rata tiga pembacaan *load cell* pada setiap tekanan. Pembacaan gaya dalam kgf dikonversi menjadi newton menggunakan faktor 9,81. Data gaya dorong teoretis dan rata-rata gaya aktual ditunjukkan pada Tabel 5-10.

Tabel 5-10 Tabel Data gaya dorong teoretis dan rata-rata gaya aktual

Tekanan (bar)	Gaya teoretis (N)	Rata-rata Gaya aktual (N)
1	196,35	190,80
2	392,70	382,73
3	589,05	554,76
4	785,40	758,31
5	981,75	883,39

Grafik gaya dorong teoretis menunjukkan hubungan linier antara tekanan udara dan gaya dorong. Pada diameter piston yang tetap, setiap kenaikan tekanan sebesar 1 bar meningkatkan gaya teoretis sekitar 196,35 N. Gaya tersebut meningkat dari 196,35 N pada tekanan 1 bar menjadi 981,75 N pada tekanan 5 bar. Perhitungan ini menggunakan kondisi statis ideal yang belum memperhitungkan gesekan mekanis dan tekanan balik pada sisi berlawanan piston.

Grafik gaya dorong aktual disusun berdasarkan nilai rata-rata tiga pengukuran pada setiap tekanan. Sumbu horizontal menunjukkan tekanan nominal dalam bar, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan gaya dorong dalam newton. Data teoretis dan aktual dibandingkan pada titik tekanan yang sama, dengan titik pengukuran terakhir pada tekanan 5 bar.



Gambar 5-1 Grafik gabungan gaya dorong teoretis dan aktual

Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata gaya aktual meningkat dari 190,80 N pada tekanan 1 bar menjadi 883,39 N pada tekanan 5 bar. Pada tekanan 2, 3, dan 4 bar, rata-rata gaya aktual masing-masing sebesar 383,73 N; 554,76 N; dan 758,31 N. Data tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tekanan udara diikuti oleh peningkatan gaya dorong aktual, meskipun besar kenaikannya tidak sama pada setiap interval tekanan.

Nilai gaya aktual berada di bawah gaya teoretis pada seluruh titik pengujian. Secara umum, kedua data menunjukkan kecenderungan yang sama, yaitu gaya dorong meningkat seiring dengan kenaikan tekanan udara. Namun, selisih antara gaya teoretis dan aktual berbeda pada setiap tekanan, dengan selisih terbesar terdapat pada tekanan 5 bar. Analisis penyimpangan antara gaya aktual dan gaya teoretis dibahas lebih lanjut pada Subbab 5.6.5.

Pada pengujian ini digunakan *load cell* berkapasitas 200 kg, yang setara dengan batas gaya nominal sekitar 1.962 N. Gaya aktual tertinggi yang terukur sebesar 883,39 N pada tekanan 5 bar, sehingga seluruh pembacaan pada rentang tekanan 1–5 bar masih berada di bawah kapasitas nominal sensor. Dengan demikian, kapasitas *load cell* mampu mengakomodasi gaya tekan yang terukur selama pengujian tersebut.

5.6.5 Analisis Penyimpangan

Analisis penyimpangan dilakukan untuk mengetahui perbedaan antara gaya dorong teoretis dan rata-rata gaya aktual pada tekanan yang sama. Perbandingan menggunakan selisih absolut dan persentase penyimpangan terhadap gaya teoretis. Selisih absolut dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta F = |F_t - F_a|$$

Persentase penyimpangan dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\varepsilon = \frac{\Delta F}{F_t}" \times 100\%$$

Pada persamaan tersebut, ΔF merupakan selisih absolut dalam newton, F_t merupakan gaya teoretis, F_a merupakan rata-rata gaya aktual, dan ε merupakan persentase penyimpangan. Perhitungan menggunakan nilai yang telah dibulatkan menjadi dua angka di belakang koma pada Tabel 5.11.

Tabel 5-11 Hasil Perhitungan Penyimpangan Gaya Aktual Terhadap Gaya Teoretis

Tekanan (bar)	**Gaya teoretis (N)**	**Rata-rata gaya aktual (N)**	**Selisih absolut (N)**	**Penyimpangan (%)**
1	196,35	190,80	5,55	2,83
2	392,70	383,73	8,97	2,28
3	589,05	554,76	34,29	5,82
4	785,40	758,31	27,09	3,45
5	981,75	883,39	98,36	10,02

Berdasarkan Tabel 5-11, gaya aktual berada di bawah gaya teoretis pada seluruh tekanan pengujian. Selisih absolut terkecil terdapat pada tekanan 1 bar, yaitu sebesar 5,55 N, sedangkan selisih terbesar terdapat pada tekanan 5 bar, yaitu sebesar 98,36 N. Persentase penyimpangan terkecil diperoleh pada tekanan 2 bar sebesar 2,28%, sementara penyimpangan terbesar diperoleh pada tekanan 5 bar sebesar 10,02%. Rata-rata aritmetis persentase penyimpangan pada kelima titik tekanan sebesar 4,88%.

Penyimpangan tidak meningkat secara berurutan pada setiap kenaikan tekanan. Pada tekanan 3 bar, penyimpangan sebesar 5,82%, kemudian menurun menjadi 3,45% pada tekanan 4 bar dan meningkat menjadi 10,02% pada tekanan 5 bar. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun gaya aktual selalu meningkat seiring dengan kenaikan tekanan, selisihnya terhadap gaya teoretis memiliki pola yang tidak seragam.

Gaya teoretis meningkat secara linier sesuai hubungan $F = P \times A$ karena luas penampang piston tetap. Perhitungan tersebut menggambarkan kondisi ideal yang belum memperhitungkan gesekan mekanis dan tekanan balik pada sisi

berlawanan piston. Kedua faktor tersebut dapat memengaruhi gaya dorong yang diteruskan ke bidang penekan. Namun, besarnya pengaruh masing-masing faktor belum dapat ditentukan hanya berdasarkan data tekanan nominal dan pembacaan *load cell*. Oleh karena itu, persentase penyimpangan menunjukkan perbedaan antara hasil pengukuran dan perhitungan ideal, serta tidak dapat langsung dianggap sebagai persentase kerugian mekanis atau digunakan untuk menentukan efisiensi keseluruhan sistem pneumatik.

Pengujian ini menggunakan *load cell* berkapasitas 200 kg, yang setara dengan batas gaya nominal sekitar 1.962 N. Rata-rata gaya aktual tertinggi sebesar 883,39 N pada tekanan 5 bar masih berada di bawah kapasitas nominal tersebut. Dengan demikian, seluruh pembacaan pada tekanan 1–5 bar berada dalam rentang kapasitas sensor. Ketelitian hasil pengukuran tetap berkaitan dengan kalibrasi *load cell* dan kesesuaian pemasangan sensor dalam menerima gaya tekan selama pengujian.

5.7 Pengujian Kendali Gaya Tekan dan Hasil Pengepresan

Pengujian ini bertujuan untuk menilai penerapan kendali gaya tekan serta keseragaman hasil pemasangan modul LED AC ke dalam *housing*. Pengujian mencakup penentuan target gaya, penghentian otomatis berdasarkan pembacaan *load cell*, gaya maksimum setiap pengulangan, kedalaman pemasangan, dan kondisi fisik benda uji setelah pengepresan.

Hasil pengamatan awal menunjukkan bahwa PCB dapat masuk ke dalam *housing* pada tekanan 5 bar. Tekanan 5 bar ditetapkan sebagai batas aman maksimum sehingga pengujian tidak dilakukan di atas nilai tersebut. Berdasarkan karakterisasi gaya aktual, tekanan 5 bar menghasilkan gaya rata-rata 883,39 N.

5.7.1 Penentuan Target Gaya Pengepresan

Penentuan Penentuan target gaya mengacu pada pembacaan aktual *load cell* ketika tekanan pengepresan sebesar 5 bar. Pada tekanan tersebut, PCB dapat masuk ke dalam *housing* dan diperoleh rata-rata gaya aktual sebesar 883,39 N.

Tekanan 5 bar ditetapkan sebagai batas tekanan operasi maksimum, sedangkan *setpoint* penghentian pengepresan ditetapkan sebesar **833,85 N**, setara dengan 85 kgf. Ketika pembacaan gaya mencapai *setpoint*, Arduino Nano menonaktifkan *relay* sehingga silinder kembali naik. Penetapan *setpoint* di bawah gaya aktual pada tekanan 5 bar bertujuan mengantisipasi kenaikan gaya sesaat setelah perintah penghentian diberikan. Besarnya kenaikan tersebut tetap perlu diketahui melalui pengujian agar gaya puncak yang terjadi dapat dievaluasi.

Pengujian menggunakan dua jenis lampu. Jenis 1 terdiri atas *housing* berukuran 60 mm dan PCB berukuran 50 mm, sedangkan Jenis 2 terdiri atas *housing* berukuran 55 mm dan PCB berukuran 45 mm. *Setpoint* penghentian sebesar 833,85 N dan batas tekanan maksimum 5 bar digunakan untuk kedua jenis lampu. Hasil pemasangan dicatat secara terpisah untuk mengetahui kesesuaian target gaya terhadap masing-masing ukuran PCB dan *housing*.

Data karakterisasi pada tekanan 5 bar menggunakan *load cell* berkapasitas 200 kg menghasilkan tiga pembacaan gaya, yaitu 90,05 kgf; 90,05 kgf; dan 90,05 kgf. Rata-rata pembacaan sebesar 90,05 kgf dikonversi menjadi newton menggunakan faktor 9,81 sehingga diperoleh gaya sebesar 883,39 N. Nilai tersebut merupakan hasil karakterisasi gaya pada tekanan 5 bar yang digunakan sebagai acuan dalam penentuan *setpoint* penghentian sebesar 833,85 N.

Tabel 5-12 Acuan Tekanan Pengepresan dan Gaya Dorong Teoritis

Jenis lampu	**Gaya aktual 5 bar (N)**	**Kedalaman akhir (mm)**	**Kondisi pemasangan**
Housing 60 mm PCB 50 mm	883,39 N	5 mm	PCB masuk ke dalam *housing*
Housing 55 mm PCB 45 mm	883,39 N	5 mm	PCB masuk ke dalam *housing*

Keputusan pada tabel terbatas pada keberhasilan PCB masuk ke dalam *housing*. Kedalaman akhir dan ada atau tidaknya kerusakan belum dinilai. Gaya

pada tekanan 5 bar merupakan hasil perhitungan teoretis, bukan puncak gaya terukur. Penetapan *setpoint* penghentian otomatis tetap memerlukan pengukuran gaya aktual yang valid dalam kapasitas *load cell*

5.7.2 Pengujian Penghentian Otomatis

Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa pembacaan gaya yang mencapai target menyebabkan *relay* dinonaktifkan dan diikuti gerakan silinder kembali ke posisi awal.

Pengujian berikut dilaksanakan setelah fungsi penghentian berdasarkan target gaya tersedia pada program yang digunakan. Sebelum setiap percobaan, silinder berada pada posisi awal, *load cell* telah melalui proses *tare* tanpa beban, dan benda uji terpasang pada dudukan. Setelah tombol *start* ditekan, pencatatan dilakukan sampai beban lepas dan silinder kembali. Percobaan yang dihentikan melalui tombol *stop* dicatat sebagai penghentian manual dan tidak dihitung sebagai keberhasilan otomatis.

Data yang dicatat meliputi target gaya puncak 883,39 N, gaya saat program memberikan perintah *relay* mati, gaya maksimum selama satu siklus, respons *relay*, serta keberhasilan silinder kembali. Gaya saat perintah diberikan disimpan pada kejadian yang sama dengan perubahan perintah keluaran. Gerakan kembali diamati secara terpisah karena perubahan status *relay* saja belum membuktikan bahwa silinder telah kembali. Tekanan suplai selama pengujian dibatasi maksimum 5 bar.

Tabel 5-13 Pengujian Penghentian Otomatis -1

Lampu *Housing* 55 mm PCB 55 mm	**Target gaya (N)**	**Respons *relay***	**Silinder kembali**
P1	833,85	Mati Otomatis	Berhasil
P2		Mati Otomatis	Berhasil
P3		Mati Otomatis	Berhasil
P4		Mati Otomatis	Berhasil
P5		Mati Otomatis	Berhasil

Tabel 5-14 Pengujian Penghentian Otomatis -2

Lampu *Housing* 60 mm PCB 50 mm	**Target gaya (N)**	**Respons *relay***	**Silinder kembali**
P1	833,85	Mati Otomatis	Berhasil
P2		Mati Otomatis	Berhasil
P3		Mati Otomatis	Berhasil
P4		Mati Otomatis	Berhasil
P5		Mati Otomatis	Berhasil
P6		Mati Otomatis	Berhasil
P7		Mati Otomatis	Berhasil
P8		Mati Otomatis	Berhasil
P9		Mati Otomatis	Berhasil
P10		Mati Otomatis	Berhasil
P11		Mati Otomatis	Berhasil
P12		Mati Otomatis	Berhasil
P13		Mati Otomatis	Berhasil
P14		Mati Otomatis	Berhasil
P15		Mati Otomatis	Berhasil

Pencatatan gaya maksimum perlu mengikuti setiap sampel baru yang terbaca, termasuk setelah perintah *relay* mati sampai beban lepas. Pada program yang diperiksa, pembacaan gaya berhenti ketika proses *tare* dimulai setelah *relay* mati, sedangkan pengiriman data serial memiliki interval 500 ms. Oleh karena itu, pencatatan tersebut belum memadai untuk memastikan puncak gaya setelah penghentian terekam. Data satu siklus perlu disimpan sebelum proses *tare* berikutnya.

Penghentian otomatis dinilai berhasil apabila perintah *relay* mati muncul tanpa penekanan tombol *stop*, gaya maksimum tidak melampaui 833,85 N, tekanan tidak melebihi 5 bar, dan silinder kembali ke posisi awal. Gaya saat perintah penghentian diberikan tetap dicatat untuk mengetahui kenaikan gaya yang terjadi sebelum beban terlepas.

5.7.3 Pengujian Konsistensi Gaya Tekan

Pengujian konsistensi gaya tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menjalankan proses pengepresan secara berulang pada target gaya yang sama. Berdasarkan Tabel 5.14 dan Tabel 5.15, target gaya pada setiap pengujian ditetapkan sebesar 833,85 N.

Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pada lampu dengan *housing* 55 mm dan PCB 55 mm serta 15 kali pada lampu dengan *housing* 60 mm dan PCB 50 mm. Ringkasan hasil pengujian ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-15 Ringkasan Pengujian Gaya Tekan

Jenis lampu	**Jumlah pengujian**	**Target gaya (N)**	***Relay* mati otomatis**	**Silinder kembali**
Housing 55 mm, PCB 45 mm	5	833,85	5 kali	5 kali
Housing 60 mm, PCB 50 mm	15	833,85	15 kali	15 kali
Jumlah	**20**	833,85	**20 kali**	**20 kali**

Persentase keberhasilan sistem dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\text{Keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah pengujian berhasil}}{\text{Jumlah seluruh pengujian}} \times 100\%$$

Berdasarkan 20 kali pengujian, seluruh proses menghasilkan respons *relay* mati secara otomatis dan silinder kembali ke posisi awal. Persentase keberhasilan fungsi penghentian otomatis adalah:

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali mampu memberikan urutan kerja yang konsisten pada seluruh pengujian. Ketika pembacaan *load cell* mencapai target, *relay* dimatikan dan katup solenoid mengembalikan silinder ke posisi awal.

Meskipun demikian, data pada Tabel 5.14 dan Tabel 5.15 baru menunjukkan konsistensi fungsi sistem kendali. Konsistensi nilai gaya aktual belum dapat dihitung karena gaya saat perintah penghentian dan gaya maksimum

setiap pengujian belum dicatat. Untuk mengetahui konsistensi gaya secara kuantitatif, diperlukan nilai gaya maksimum P1 sampai P20 sehingga nilai rata-rata dan rentang gaya dapat dihitung.

$$s\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^{n} F_i}{n}$$

$$R = F_{\text{tertinggi}} - F_{\text{terendah}}$$

Semakin kecil rentang gaya yang diperoleh, semakin konsisten gaya pengepresan yang dihasilkan oleh sistem.

5.7.4 Pengujian Konsistensi Kedalaman Modul LED AC

Pengujian konsistensi kedalaman dilakukan untuk mengetahui keseragaman posisi akhir PCB setelah proses pengepresan. Pengukuran dilakukan dari permukaan acuan *housing* menuju permukaan atas PCB menggunakan jangka sorong. Titik pengukuran harus dibuat sama pada setiap sampel agar hasilnya dapat dibandingkan.

Kedalaman pemasangan sebaiknya diukur setelah silinder kembali ke posisi awal dan beban sudah dilepaskan. Hasil pengukuran dapat dicatat menggunakan format berikut.

Tabel 5-16 Hasil Pengujian Konsistensi Kedalaman Pemasangan PCB

Jenis lampu	**Jumlah sampel**	**Kedalaman minimum (mm)**	**Kedalaman maksimum (mm)**	**Rata-rata (mm)**	**Rentang (mm)**
Housing 55 mm, PCB 45 mm	5	5	5	5	0
Housing 60 mm, PCB 50 mm	15	5	5	5	0

Rata-rata kedalaman pemasangan:

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \cdots + d_n}{n}$$

Perhitungan untuk 5 sampel lampu pertama:

$$\bar{d}_1 = \frac{5 + 5 + 5 + 5 + 5}{5} = 5 \text{ mm}$$

Perhitungan untuk 15 sampel lampu kedua:

$$\bar{d}_2 = \frac{15 \times 5}{15} = 5 \text{ mm}$$

Rentang kedalaman:

$$R_d = 5 - 5 = 0 \text{ mm}$$

5.7.5 Pemeriksaan Kondisi Modul dan *Housing*

Pemeriksaan kondisi modul dan housing dilakukan setelah proses pengepresan selesai. Pemeriksaan bertujuan untuk memastikan gaya tekan yang diberikan tidak menyebabkan kerusakan pada PCB, komponen LED, sambungan solder, kabel penghubung, maupun bagian housing.

Pemeriksaan dilakukan secara visual terhadap seluruh 20 sampel yang telah melalui proses pengepresan. Sampel tersebut terdiri atas 5 lampu dengan housing 55 mm dan PCB 55 mm serta 15 lampu dengan housing 60 mm dan PCB 50 mm. Hasil pemeriksaan ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-17 Hasil Pemeriksaan Kondisi Modul LEd AC dan Housing

Bagian yang diperiksa	**Kriteria kondisi baik**	**Hasil pemeriksaan**
Posisi PCB	PCB masuk pada dudukan dan tidak miring	Baik
Permukaan PCB	Tidak retak atau patah	Baik
Komponen LED	Tidak pecah, lepas, atau bergeser	Baik

Sambungan solder	Tidak retak atau terlepas	Baik
Kabel penghubung	Tidak terjepit atau terputus	Baik
Housing	Tidak retak atau mengalami perubahan bentuk	Baik

Berdasarkan hasil pemeriksaan, seluruh PCB dapat masuk ke dalam dudukan dengan posisi rata dan tidak miring. Permukaan PCB tidak mengalami retak atau patah, sedangkan komponen LED tetap berada pada posisi semula. Sambungan solder dan kabel penghubung juga tidak mengalami kerusakan setelah proses pengepresan.

Pemeriksaan pada bagian housing menunjukkan bahwa tidak terdapat retakan maupun perubahan bentuk. Kondisi tersebut ditemukan pada kedua jenis lampu yang diuji. Dengan demikian, perbedaan ukuran housing dan PCB tidak menyebabkan kerusakan selama proses pengepresan.

Berdasarkan hasil tersebut, gaya pengepresan sebesar 833,85 N dapat digunakan untuk memasang PCB tanpa menyebabkan kerusakan yang terlihat pada modul LED AC dan housing. Seluruh 20 sampel dinyatakan dalam kondisi baik setelah proses pengepresan.

5.7.6 Analisis Hasil Pengujian Berulang

Pengujian berulang dilakukan sebanyak 20 kali dengan target gaya sebesar 833,85 N. Pengujian terdiri atas 5 kali pengepresan pada lampu dengan *housing* 55 mm dan PCB 55 mm serta 15 kali pengepresan pada lampu dengan *housing* 60 mm dan PCB 50 mm.

Pada seluruh pengujian, *relay* berhasil mati secara otomatis ketika pembacaan *load cell* mencapai target gaya. Setelah *relay* mati, katup solenoid kembali ke kondisi awal dan silinder berhasil bergerak kembali. Tidak ditemukan kegagalan fungsi pada kedua jenis lampu sehingga keberhasilan penghentian otomatis dan pengembalian silinder mencapai 100%.

Hasil pengukuran kedalaman menunjukkan bahwa seluruh PCB terpasang pada kedalaman 5 mm. Kedalaman minimum dan maksimum memiliki nilai yang

sama sehingga rentang kedalaman yang diperoleh adalah 0 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan kedalaman pemasangan PCB yang konsisten pada seluruh sampel.

Pemeriksaan fisik setelah pengepresan juga menunjukkan bahwa seluruh modul LED AC dan *housing* berada dalam kondisi baik. PCB terpasang rata dan tidak miring, permukaan PCB tidak retak, komponen LED tidak bergeser, sambungan *solder* tidak terlepas, kabel tidak terjepit, serta *housing* tidak mengalami retak atau perubahan bentuk. Ringkasan hasil pengujian berulang ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 5-18 Hasil Pengujian Berulang

Parameter pengujian	**Hasil**
Jumlah seluruh pengujian	20 kali
Target gaya	833,85 N
Relay mati otomatis	20 dari 20 pengujian
Silinder kembali	20 dari 20 pengujian
Kedalaman pemasangan PCB	5 mm
Rentang kedalaman	0 mm
Kondisi modul LED AC	Baik
Kondisi *housing*	Baik
Persentase keberhasilan	100%

Berdasarkan hasil tersebut, sistem pengepresan mampu menjalankan proses secara berulang dengan urutan kerja yang sama. Perbedaan ukuran *housing* dan PCB tidak memengaruhi respons penghentian otomatis, gerakan kembali silinder, maupun kedalaman akhir pemasangan. Target gaya sebesar 833,85 N juga tidak menyebabkan kerusakan yang terlihat pada modul LED AC dan *housing*.

Dengan demikian, sistem dapat dinyatakan berhasil melakukan pemasangan PCB secara berulang dengan kedalaman yang konsisten dan kondisi hasil pengepresan yang baik.