

BAB V

PENGUJIAN ALAT DAN ANALISA

5.1 Metode Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem monitoring tekanan udara berbasis mikrokontroler ESP32 yang telah dirancang dan diterapkan pada kompresor D25WZ1 untuk mendukung mesin stempel pneumatik skala kecil. Pengujian dilakukan setelah seluruh perangkat keras dan perangkat lunak selesai dirakit dan diintegrasikan. Parameter utama yang diuji adalah kinerja sensor *pressure transducer* G1/4 dalam membaca tekanan udara, kemampuan sistem dalam menampilkan data pada LCD, serta kemampuan sistem dalam mengirimkan data hasil pengukuran ke Google Spreadsheet.

Metode pengujian dilakukan dengan mengoperasikan kompresor secara manual untuk menghasilkan tekanan udara pada sistem pneumatik. Perubahan tekanan yang terjadi selama proses pengisian udara dibaca oleh sensor *pressure transducer* G1/4 dan kemudian diolah oleh mikrokontroler ESP32. Nilai hasil pembacaan sensor selanjutnya ditampilkan pada LCD 20×4 dan dikirimkan secara berkala melalui jaringan WiFi ke Google Spreadsheet dengan interval pengiriman data setiap 5 detik.

Pengujian dilakukan secara bertahap dengan membandingkan hasil pembacaan sensor *pressure transducer* terhadap alat ukur pembanding berupa *pressure gauge* atau manometer yang digunakan pada sistem pneumatik. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi nilai tekanan untuk mengetahui tingkat kesesuaian antara nilai tekanan yang terbaca oleh sensor dengan nilai tekanan aktual yang ditunjukkan oleh alat ukur pembanding.

Selain pengujian akurasi, dilakukan pula pengujian terhadap respons dan kestabilan sistem. Pengujian respons dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca perubahan tekanan selama proses pengisian udara. Sementara itu, pengujian kestabilan dilakukan dengan mengamati perubahan nilai tekanan yang ditampilkan dan dikirimkan oleh sistem selama periode

pengujian tertentu. Data hasil pengujian selanjutnya dicatat dan disimpan secara otomatis pada Google Spreadsheet untuk mempermudah proses pengolahan dan analisis data.

5.2 Prosedur Pengujian

Pengujian sistem tekanan dilakukan pada mesin stempel pneumatik skala kecil untuk mengetahui kemampuan sistem monitoring dalam membaca perubahan tekanan udara selama proses pengisian dan pengosongan. Pengujian dilakukan dengan memberikan suplai udara bertekanan dari kompresor D25WZ1 ke sistem pneumatik, kemudian mengamati perubahan tekanan yang dibaca oleh sensor tekanan G1/4 melalui mikrokontroler ESP32. Nilai tekanan yang diperoleh dikonversikan ke dalam satuan bar dan dicatat secara berkala menggunakan sistem pencatatan data pada Google Spreadsheet.

Pengujian dilakukan sebanyak tiga siklus, dimana setiap siklus terdiri dari proses pengisian tekanan hingga mencapai tekanan maksimum yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pengosongan hingga tekanan berada pada kondisi minimum pembacaan sensor. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik perubahan tekanan, nilai tekanan minimum dan maksimum, serta kestabilan pembacaan tekanan pada setiap siklus.

1. Kompresor D25WZ1 sebagai sumber suplai udara untuk sistem pneumatic
2. Sensor Tekanan G1/4 sebagai sensor untuk membaca tekanan udara pada sistem pneumatic
3. ESP32 sebagai mikrokontroler untuk mengolah data hasil pembacaan pada sensor tekanan
4. Solenoid Valve 5/2 sebagai pengatur arah aliran udara menuju pneumatik
5. Silinder Pneumatik sebagai aktuaktor pada mekanisme mesin stempel
6. Modul Relay sebagai pengendali coil pada solenoid valve
7. Catu daya sebagai sumber tegangan untuk ESP32 dan komponen lainnya didalam PCB

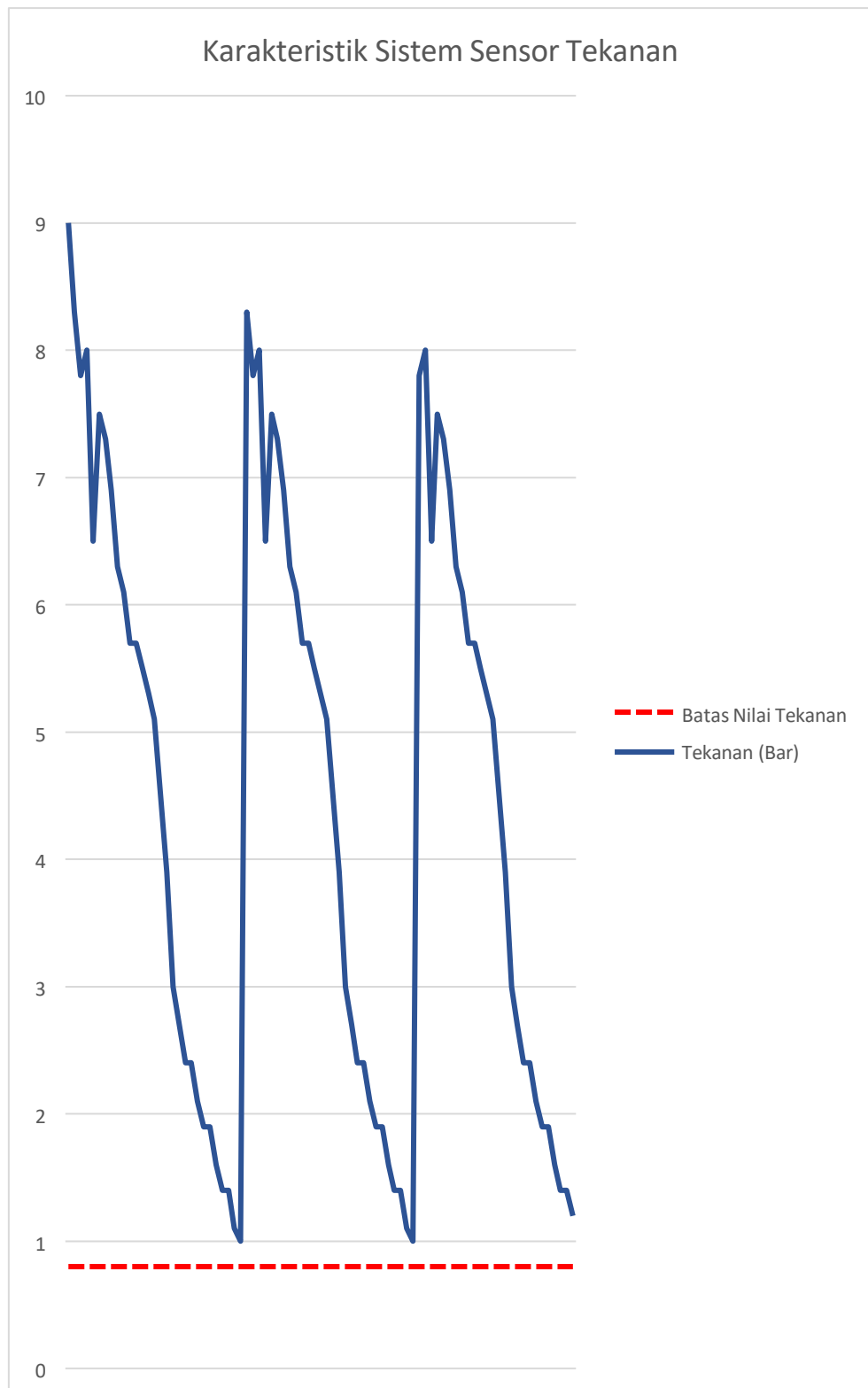
5.3 Pengujian Sistem Tekanan

Pengujian sistem tekanan dilakukan untuk mengetahui karakteristik pembacaan sensor tekanan selama proses pengisian dan pengosongan udara pada sistem pneumatik. Pada pengujian ini, hasil pembacaan sensor dikonversikan dan ditampilkan dalam satuan bar sehingga lebih mudah dibandingkan dengan tekanan kerja pada sistem pneumatik. Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga siklus, dimana setiap siklus terdiri dari proses pengisian tekanan hingga mencapai batas tekanan yang ditentukan, kemudian dilanjutkan dengan proses pengosongan tekanan hingga mencapai kondisi tekanan minimum yang masih dapat terbaca oleh sensor.

Prosedur pengujian diawali dengan memastikan seluruh rangkaian sistem monitoring telah terhubung dengan baik, terutama sensor tekanan G1/4 dengan mikrokontroler ESP32. Sensor tekanan dipasang pada jalur udara sistem pneumatik sehingga perubahan tekanan udara dapat dideteksi oleh sensor. Selanjutnya, ESP32 diaktifkan dan sistem monitoring mulai melakukan pembacaan nilai tekanan. Hasil pembacaan sensor kemudian dikonversikan ke dalam satuan bar dan digunakan sebagai data pengujian.

Pada proses pengisian, kompresor digunakan untuk mengisi udara ke dalam sistem hingga tekanan meningkat. Sensor tekanan membaca perubahan tekanan tersebut secara berkala dan data hasil pembacaan direkam oleh sistem. Setelah tekanan mencapai batas yang telah ditentukan, proses pengisian dihentikan dan sistem dilanjutkan ke proses pengosongan. Pada penelitian ini, tekanan maksimum yang digunakan sebagai acuan adalah 8 bar. Nilai tersebut merupakan hasil konversi dari set point 0,8 MPa menjadi satuan bar, dengan hubungan $1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$.

5.3.1 Data Pengujian Sistem Tekanan



Gambar 5- 1 Data Pengujian

Berdasarkan pada Gambar 5-1, dapat dilihat karakteristik pembacaan sistem sensor tekanan selama tiga siklus pengujian. Grafik menunjukkan perubahan tekanan yang terjadi secara berulang pada setiap siklus, dimana tekanan mengalami peningkatan pada awal proses, mencapai nilai maksimum, kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga mendekati kondisi tekanan awal sebelum memasuki siklus berikutnya. Pada grafik juga ditampilkan set point sebagai tekanan acuan sebesar 8 bar.

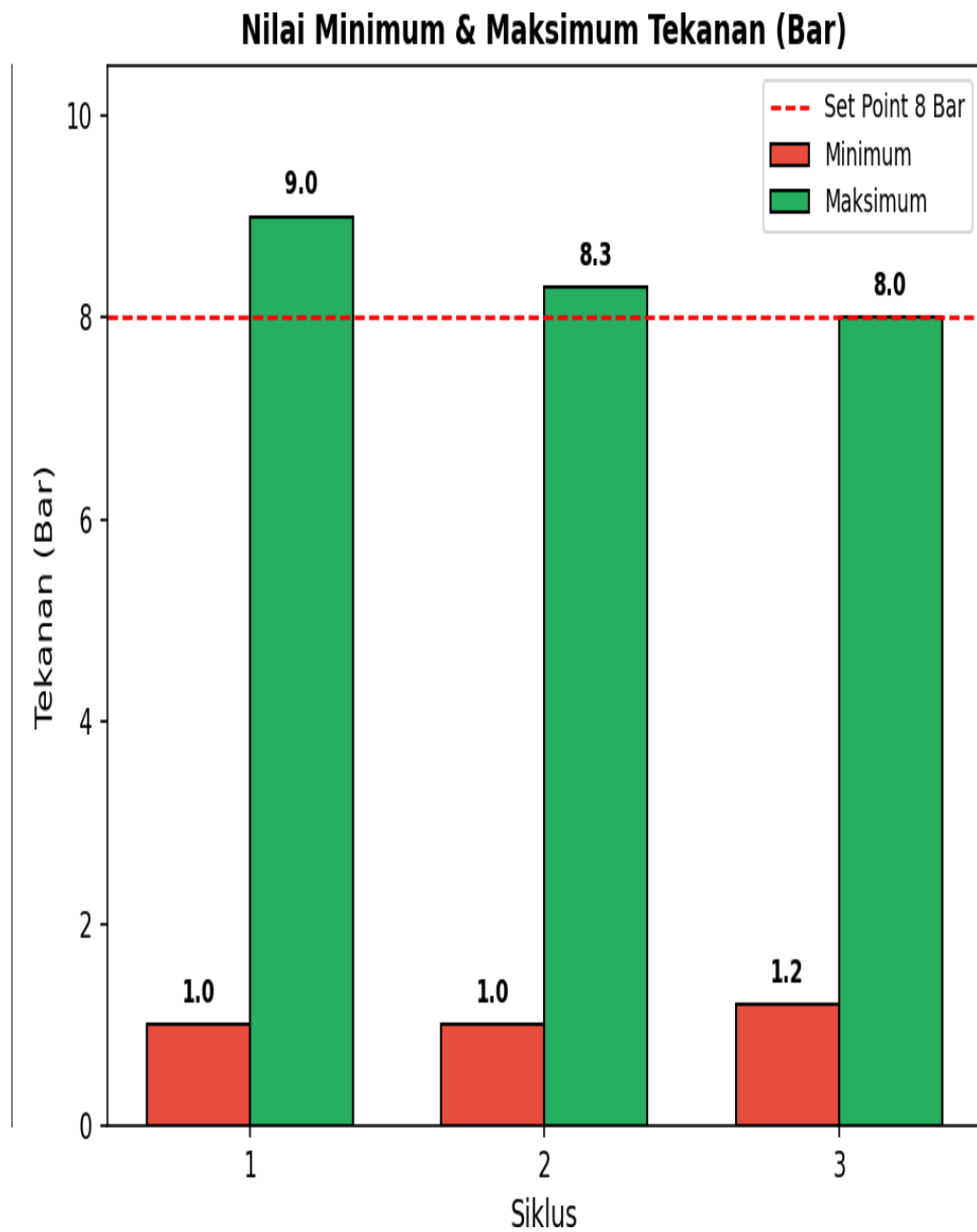
Pada Siklus 1, tekanan awal sistem berada pada sekitar 1 Bar dan mengalami peningkatan hingga mencapai tekanan maksimum sekitar 9 Bar. Setelah mencapai tekanan maksimum, tekanan kemudian mengalami penurunan secara bertahap hingga kembali mendekati 1 Bar. Pola yang sama kembali terlihat pada Siklus 2, dengan tekanan maksimum sekitar 8,3 Bar, kemudian mengalami penurunan hingga mendekati tekanan awal. Pada Siklus 3, tekanan maksimum yang dicapai berada pada sekitar 8 Bar, sesuai dengan nilai set point yang ditentukan.

Berdasarkan pola tersebut, sensor tekanan mampu menunjukkan perubahan tekanan selama proses pengujian dengan pola yang mengikuti proses kerja sistem pneumatik. Perubahan tekanan yang terlihat pada grafik menunjukkan bahwa pembacaan sensor dapat digunakan untuk memantau kondisi tekanan selama siklus berlangsung. Perbedaan nilai tekanan maksimum pada ketiga siklus juga menunjukkan adanya variasi tekanan yang terjadi selama pengoperasian sistem.

Garis nilai batas tekanan pada Gambar 5-1 digunakan sebagai nilai acuan untuk melihat apakah tekanan maksimum yang dicapai sistem telah sesuai dengan tekanan yang ditentukan. Pada Siklus 1, tekanan maksimum berada di atas set point dengan selisih sekitar 1 Bar, sedangkan pada Siklus 2 selisihnya berkurang menjadi sekitar 3 Bar. Pada Siklus 3, tekanan maksimum telah mencapai nilai set point sebesar 8 Bar. Dengan demikian, dari ketiga siklus pengujian terlihat adanya perbedaan pencapaian tekanan maksimum terhadap nilai acuan.

5.3.2 Analisis Pengujian Sistem

5.3.2.1 Analisis Nilai Minimum dan Maksimum Tekanan



Gambar 5- 2 Nilai Maksimum dan Minimum

Berdasarkan pada Gambar 5-2, dapat dilihat perbandingan nilai tekanan minimum dan maksimum yang diperoleh selama tiga siklus pengujian. Grafik juga menunjukkan garis set point sebesar 8 bar sebagai acuan tekanan maksimum yang diharapkan selama proses pengujian. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa masing-masing siklus memiliki nilai tekanan minimum dan maksimum yang berbeda.

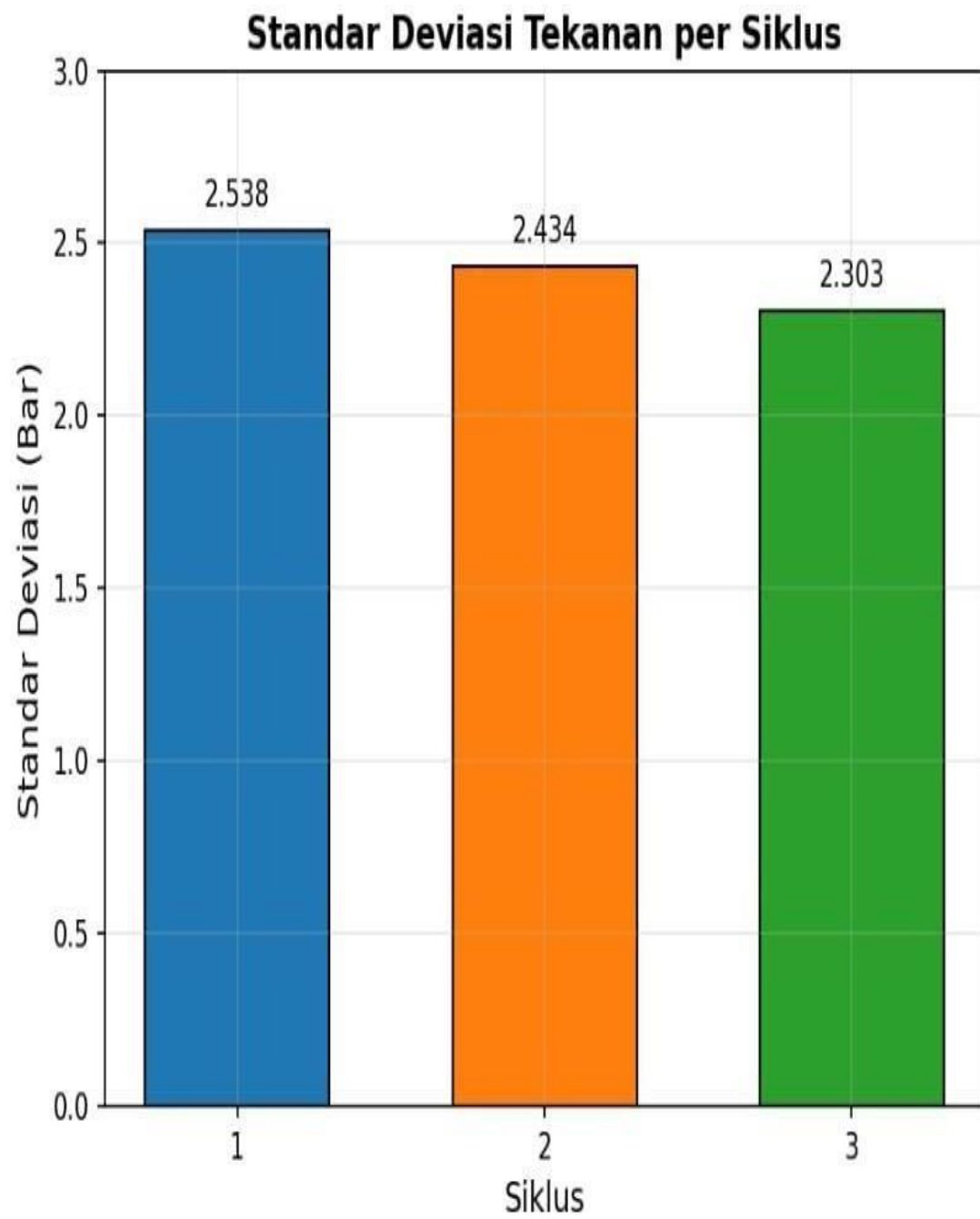
Pada Siklus 1, tekanan minimum yang tercatat sebesar 1,0 bar, sedangkan tekanan maksimum mencapai 9,0 bar. Nilai maksimum tersebut berada 1,0 bar di atas set point 8 bar. Hal ini menunjukkan bahwa pada siklus pertama terjadi kenaikan tekanan hingga melewati nilai set point yang telah ditentukan. Rentang tekanan pada siklus pertama cukup besar, yaitu dari 1,0 bar hingga 9,0 bar.

Pada Siklus 2, tekanan minimum kembali berada pada 1,0 bar, sedangkan tekanan maksimum yang tercatat sebesar 8,3 bar. Nilai maksimum tersebut lebih dekat dengan set point 8 bar dibandingkan dengan Siklus 1, dengan selisih sebesar 0,3 bar. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan maksimum pada siklus kedua lebih mendekati nilai tekanan yang ditetapkan.

Sementara itu, pada Siklus 3, tekanan minimum tercatat sebesar 1,2 bar dan tekanan maksimum mencapai 8,0 bar. Nilai maksimum pada siklus ketiga tepat berada pada set point 8 bar. Dibandingkan dengan dua siklus sebelumnya, nilai maksimum pada siklus ketiga menunjukkan bahwa tekanan sistem mencapai nilai set point tanpa melebihi nilai tersebut.

Jika dibandingkan dari ketiga siklus, terdapat kecenderungan penurunan tekanan maksimum, yaitu dari 9,0 bar pada Siklus 1, menjadi 8,3 bar pada Siklus 2, dan 8,0 bar pada Siklus 3. Sementara itu, tekanan minimum relatif berada pada kisaran 1,0–1,2 bar. Perbedaan antara tekanan minimum dan maksimum menunjukkan bahwa selama proses pengujian terjadi perubahan tekanan yang cukup besar antara kondisi tekanan rendah dan tekanan maksimum.

5.3.2.2 Analisis Standar Deviasi



Gambar 5- 3 Standar Deviasi

Berdasarkan pada Gambar 5-3, dapat dilihat perbandingan nilai standar deviasi tekanan dan nilai rata-rata tekanan (mean) pada tiga siklus pengujian. Grafik sebelah kiri menunjukkan standar deviasi masing-masing siklus, sedangkan grafik sebelah kanan memperlihatkan perbandingan antara nilai mean dan standar deviasi tekanan pada setiap siklus.

Pada Siklus 1, nilai standar deviasi tekanan sebesar 2,5 Bar, sedangkan nilai rata-rata tekanan sebesar 4,5 Bar. Nilai standar deviasi yang cukup besar dibandingkan dengan nilai rata-ratanya menunjukkan bahwa data tekanan pada siklus pertama memiliki penyebaran yang cukup besar terhadap nilai rata-rata. Hal ini menunjukkan adanya perubahan tekanan yang cukup signifikan selama proses pengujian pada siklus pertama.

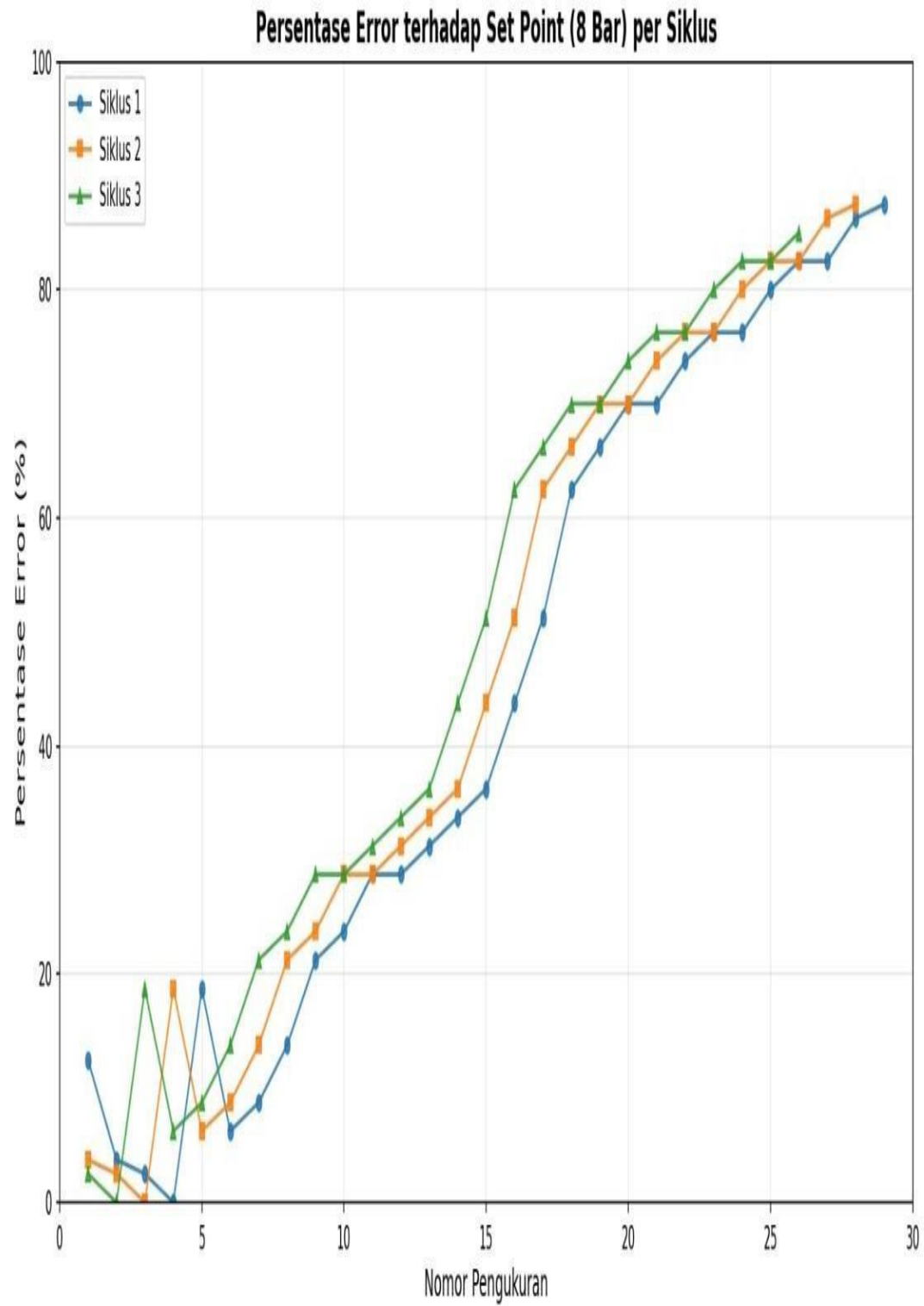
Pada Siklus 2, nilai standar deviasi mengalami penurunan menjadi 2,4 Bar, dengan nilai rata-rata tekanan sebesar 4,4 Bar. Penurunan standar deviasi dibandingkan dengan siklus pertama menunjukkan bahwa penyebaran data tekanan pada siklus kedua sedikit lebih kecil. Meskipun demikian, nilai standar deviasi masih cukup besar jika dibandingkan dengan nilai rata-rata tekanan, sehingga tekanan yang terbaca selama siklus kedua masih menunjukkan variasi.

Selanjutnya, pada Siklus 3, nilai standar deviasi kembali mengalami penurunan menjadi 2,3 Bar, sedangkan nilai rata-rata tekanan sebesar 4,2 Bar. Nilai tersebut merupakan standar deviasi paling rendah dari ketiga siklus. Hal ini menunjukkan bahwa data tekanan pada siklus ketiga memiliki penyebaran yang lebih kecil dibandingkan dua siklus sebelumnya.

Berdasarkan perbandingan ketiga siklus, terlihat adanya kecenderungan penurunan nilai mean dan standar deviasi dari Siklus 1 hingga Siklus 3. Nilai mean menurun dari 4,5 Bar pada Siklus 1 menjadi 4,4 Bar pada Siklus 2 dan 4,2 Bar pada Siklus 3. Sementara itu, standar deviasi menurun dari 2,5 Bar, menjadi 2,4 Bar, kemudian 2,3 Bar. Penurunan standar deviasi menunjukkan bahwa penyebaran data tekanan cenderung semakin kecil pada siklus berikutnya.

Dengan demikian, berdasarkan Gambar 5-4, Siklus 3 memiliki nilai standar deviasi paling rendah dibandingkan Siklus 1 dan Siklus 2. Hal tersebut menunjukkan bahwa variasi pembacaan tekanan pada Siklus 3 lebih kecil. Namun, nilai standar deviasi yang masih cukup besar dibandingkan nilai mean menunjukkan bahwa selama proses pengujian masih terdapat perubahan tekanan yang cukup besar. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh proses pengisian dan pengosongan udara pada sistem pneumatik, sehingga tekanan tidak berada pada satu nilai yang konstan selama seluruh proses pengujian.

5.3.2.3 Analisis Persentase Error



Gambar 5- 4 Persentase Error

Berdasarkan pada Gambar 5-4, dapat dilihat persentase error pembacaan tekanan terhadap set point 8 Bar pada tiga siklus pengujian. Grafik menunjukkan bahwa persentase error pada masing-masing siklus mengalami perubahan seiring bertambahnya nomor pengukuran. Pada bagian awal pengujian, persentase error masih relatif rendah, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai sekitar 88% pada akhir pengukuran.

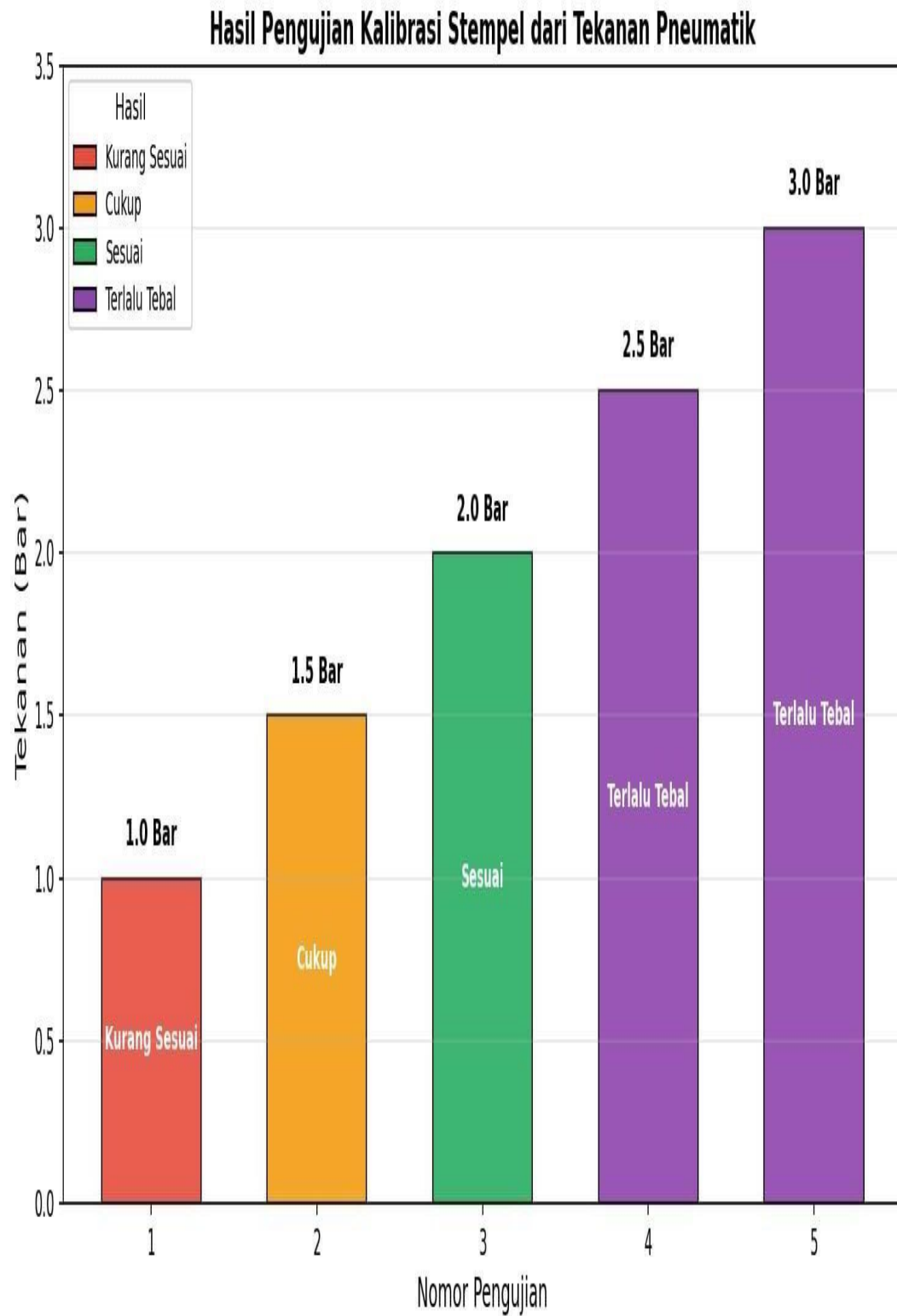
Pada Siklus 1, persentase error pada awal pengukuran berada pada kisaran 0–13%. Setelah itu, nilai error mengalami peningkatan secara bertahap hingga sekitar 36% pada pengukuran ke-15. Peningkatan yang lebih besar terlihat pada pengukuran ke-16 hingga ke-18, kemudian nilai error kembali meningkat secara bertahap sampai mencapai sekitar 88% pada pengukuran terakhir. Pola tersebut menunjukkan adanya perubahan pembacaan tekanan selama proses pengujian, terutama ketika tekanan mengalami penurunan dari kondisi awal menuju tekanan yang lebih rendah.

Pada Siklus 2, pola perubahan persentase error relatif serupa dengan Siklus 1. Pada pengukuran awal, nilai error berada pada kisaran rendah, kemudian meningkat secara bertahap. Pada sekitar pengukuran ke-15 sampai ke-18 terlihat peningkatan yang cukup signifikan hingga mencapai lebih dari 60%. Selanjutnya, nilai error terus meningkat sampai berada pada kisaran 88% pada pengukuran terakhir. Perbedaan posisi kurva terhadap Siklus 1 menunjukkan adanya variasi pembacaan tekanan antar-siklus selama proses pengujian.

Sementara itu, Siklus 3 menunjukkan pola yang juga mengalami peningkatan persentase error, tetapi pada beberapa titik pengukuran nilainya berada lebih tinggi dibandingkan Siklus 1 dan Siklus 2. Peningkatan yang cukup terlihat terjadi pada pengukuran sekitar ke-14 sampai ke-17, kemudian nilai error berada pada kisaran 60–80% dan meningkat hingga sekitar 87% pada pengukuran terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik perubahan tekanan pada setiap siklus tidak sepenuhnya sama.

Secara keseluruhan, persentase error yang semakin besar pada grafik tidak menunjukkan bahwa sensor semakin tidak akurat, karena pada grafik ini error dihitung terhadap set point tetap sebesar 8 Bar, sedangkan tekanan yang dibaca selama proses pengujian berubah. Ketika tekanan aktual semakin jauh dari nilai set point, persentase selisih terhadap set point juga akan semakin besar. Oleh karena itu, grafik pada Gambar 5-3 lebih tepat digunakan untuk menunjukkan perubahan tekanan terhadap set point selama proses pengujian, bukan sebagai grafik akurasi sensor.

5.4 Pengujian Stempel



Gambar 5- 5 Pengujian Stempel

Berdasarkan pada Gambar 5-5, dapat dilihat hasil pengujian kalibrasi stempel berdasarkan variasi tekanan pneumatik yang diberikan pada piston silinder. Pengujian dilakukan pada lima variasi tekanan, yaitu 1,0 bar, 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar, dan 3,0 bar. Hasil pengujian dikelompokkan menjadi empat kategori, yaitu kurang sesuai, cukup, sesuai, dan terlalu tebal, berdasarkan karakteristik hasil stempel yang diperoleh pada masing-masing tekanan.

Pada tekanan 1,0 bar, hasil stempel dikategorikan kurang sesuai. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tekanan yang diberikan pada piston belum menghasilkan tekanan kontak yang cukup untuk menghasilkan cetakan tinta yang sesuai. Pada tekanan yang relatif rendah, tinta belum dapat tertransfer secara optimal ke permukaan benda kerja sehingga hasil stempel dapat terlihat kurang jelas atau tidak merata.

Pada tekanan 1,5 bar, hasil stempel mengalami peningkatan dan dikategorikan cukup. Peningkatan tekanan menyebabkan gaya tekan piston terhadap permukaan stempel menjadi lebih besar sehingga proses transfer tinta menjadi lebih baik dibandingkan pada tekanan 1,0 bar. Namun, berdasarkan hasil pengujian, kondisi tersebut masih belum menghasilkan hasil stempel yang dianggap paling sesuai.

Selanjutnya, pada tekanan 2,0 bar, hasil pengujian menunjukkan kategori sesuai. Pada kondisi ini, tekanan pneumatik menghasilkan gaya tekan yang dapat memberikan kontak antara stempel dan permukaan benda kerja secara lebih merata. Hasil stempel pada tekanan tersebut menjadi acuan dalam menentukan tekanan kerja yang sesuai untuk proses stamping pada penelitian ini.

Ketika tekanan dinaikkan menjadi 2,5 bar, hasil stempel dikategorikan terlalu tebal. Peningkatan tekanan menyebabkan gaya tekan piston menjadi lebih besar sehingga transfer tinta ke permukaan benda kerja juga meningkat. Kondisi tersebut dapat menyebabkan lapisan tinta menjadi lebih tebal dibandingkan kondisi yang diharapkan.

Pada tekanan 3,0 bar, hasil stempel juga dikategorikan terlalu tebal. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan tekanan di atas 2,0 bar tidak selalu menghasilkan

kualitas stempel yang lebih baik. Tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan transfer tinta yang berlebihan sehingga hasil cetakan menjadi terlalu tebal.

5.5 Pembahasan Hasil Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian sistem monitoring tekanan yang telah dilakukan pada tiga siklus pengujian, sistem mampu melakukan pembacaan tekanan selama proses pengisian dan pengosongan udara pada sistem pneumatik. Data hasil pengujian menunjukkan adanya perubahan tekanan dari kondisi minimum hingga mencapai tekanan maksimum pada setiap siklus. Pada Siklus 1 diperoleh tekanan minimum sebesar 1,0 bar dan maksimum 9,0 bar, Siklus 2 sebesar 1,0–8,3 bar, sedangkan Siklus 3 sebesar 1,2–8,0 bar. Perbedaan nilai maksimum tersebut menunjukkan adanya variasi tekanan yang terjadi pada setiap siklus pengujian.

Berdasarkan Gambar 5-2, tekanan maksimum pada Siklus 1 mencapai 9,0 bar sehingga berada 1,0 bar di atas set point 8 bar. Pada Siklus 2 tekanan maksimum mencapai 8,3 bar atau 0,3 bar di atas set point, sedangkan Siklus 3 mencapai 8,0 bar dan sesuai dengan set point. Hasil tersebut menunjukkan bahwa tekanan maksimum yang terbaca oleh sensor mengalami kecenderungan mendekati nilai set point pada siklus berikutnya. Sementara itu, tekanan minimum berada pada kisaran 1,0–1,2 bar yang menunjukkan kondisi tekanan rendah setelah proses pengosongan.

Selanjutnya, berdasarkan Gambar 5-4, nilai rata-rata tekanan pada Siklus 1 sebesar 4 Bar, Siklus 2 sebesar 4,4 Bar, dan Siklus 3 sebesar 4,2 Bar. Nilai tersebut menunjukkan adanya penurunan rata-rata tekanan dari siklus pertama hingga siklus ketiga. Standar deviasi yang diperoleh juga mengalami penurunan, yaitu 2,5 Bar pada Siklus 1, 2,4 Bar pada Siklus 2, dan 2,3 Bar pada Siklus 3. Penurunan standar deviasi menunjukkan bahwa penyebaran data tekanan pada Siklus 3 lebih kecil dibandingkan dengan dua siklus sebelumnya.

Hasil pengujian persentase error terhadap set point 8 Bar yang ditampilkan pada Gambar 5-3 menunjukkan bahwa nilai error berubah mengikuti perubahan tekanan yang terbaca selama pengujian. Persentase error pada awal pengukuran relatif

rendah, kemudian meningkat ketika nilai tekanan semakin jauh dari set point. Oleh karena itu, peningkatan persentase error pada grafik tidak secara langsung menunjukkan penurunan akurasi sensor, tetapi menunjukkan semakin besarnya perbedaan antara tekanan yang terbaca dengan nilai set point tetap sebesar 8 Bar. Untuk mengetahui akurasi sensor secara lebih tepat, diperlukan perbandingan dengan alat ukur referensi seperti pressure gauge.

Selain pengujian karakteristik tekanan, dilakukan pula pengujian terhadap hasil stamping pada beberapa variasi tekanan pneumatik. Berdasarkan Gambar 5-5, pengujian dilakukan pada tekanan 1,0 bar, 1,5 bar, 2,0 bar, 2,5 bar, dan 3,0 bar. Pada tekanan 1,0 bar, hasil stempel dikategorikan kurang sesuai karena tekanan yang diberikan belum menghasilkan proses transfer tinta yang optimal. Pada tekanan 1,5 bar, hasil stempel berada pada kategori cukup, sedangkan pada tekanan 2,0 bar diperoleh hasil yang dikategorikan sesuai.

Ketika tekanan dinaikkan menjadi 2,5 bar dan 3,0 bar, hasil stempel dikategorikan terlalu tebal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tekanan tidak selalu menghasilkan hasil stamping yang lebih baik. Tekanan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan gaya tekan antara piston, stempel, dan permukaan benda kerja sehingga transfer tinta menjadi lebih banyak. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, tekanan 2,0 bar digunakan sebagai titik tekanan yang sesuai pada pengujian stamping karena menghasilkan kondisi stempel yang dikategorikan sesuai.

Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa sistem pneumatik memiliki karakteristik tekanan yang berubah selama proses pengisian dan pengosongan, sedangkan tekanan kerja pada proses stamping perlu disesuaikan dengan karakteristik hasil cetakan. Dengan demikian, pengujian tekanan tidak hanya digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca tekanan, tetapi juga digunakan sebagai dasar dalam menentukan kondisi tekanan yang digunakan pada proses stamping.