

**PEMODELAN SISTEM POSISI MENGGUNAKAN *STEPPER MOTOR* YANG
TERINTEGRASI SENSOR *LOAD CELL* DAN *ENCODER***

***MODELING OF A POSITION SYSTEM USING A STEPPER MOTOR INTEGRATED
WITH A LOAD CELL SENSOR AND ENCODER***

Bahar Gendhiawan*, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Agus Purwanto, Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

*e-mail: bahargendhiawan.2021@student.uny.ac.id (corresponding author)

Abstrak. Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian posisi presisi tinggi menggunakan *stepper motor hybrid NEMA 23*, terintegrasi dengan sensor *load cell* tipe *strain gauge C3* dan *incremental encoder 4000 PPR*. Sistem ini dikendalikan oleh *microcontroller ESP32* dengan algoritma *PID* untuk akurasi dan stabilitas tinggi. Fokus utamanya adalah integrasi umpan balik gaya dan posisi, menjadikan sistem adaptif terhadap variasi massa. Metodologi meliputi pemodelan matematis, simulasi *MATLAB/Simulink*, dan pengujian eksperimental. Sistem diuji dengan variasi massa (50-1000 gram) dan tiga skenario yaitu tanpa beban, beban bertahap, dan kondisi stabil. Teknik *quadrature encoding* digunakan untuk meningkatkan resolusi *encoder*. Hasil menunjukkan akurasi tinggi dengan rata-rata *error* posisi 0,003–0,008 mm. *RMSE* tanpa beban 0,0055 mm, dan *error* maksimum dengan beban stabil 0,03 mm (standar deviasi 0,006382 mm). Koefisien determinasi (R^2) mencapai 1 pada kondisi stabil, menunjukkan hubungan linier sempurna. Waktu stabilisasi kurang dari 3 detik pada beban rendah-sedang, namun 10,4 detik pada beban maksimum (1140 gram). Sistem ini terbukti presisi dan andal, cocok untuk aplikasi pengendalian posisi adaptif di berbagai bidang.

Kata Kunci: *Otomasi, Sensor, Load Cell, Stepper Motor, PID*

Abstract. This research successfully designed and implemented a high-precision position control system utilizing a *NEMA 23 hybrid stepper motor*, integrated with a *C3 strain gauge load cell* and a *4000 PPR incremental encoder*. The system is controlled by an *ESP32 microcontroller* employing a *PID algorithm* to achieve high accuracy and stability. The primary focus is on the integration of force and position feedback, rendering the system adaptive to variations in mass. The methodology encompassed mathematical modelling, *MATLAB/Simulink* simulations, and experimental testing. The system was evaluated with varying masses (50-1000 grams) across three scenarios: no-load, gradual loading, and stable-load conditions. *Quadrature encoding* was employed to enhance encoder resolution. Results demonstrate high accuracy with an average position error of 0.003–0.008 mm. The Root Mean Square Error (*RMSE*) for the no-load condition was 0.0055 mm, and the maximum error under a stable load was 0.03 mm (standard deviation of 0.006382 mm). The coefficient of determination (R^2) reached 1 under stable conditions, indicating a perfect linear relationship. Stabilization time was less than 3 seconds for low-to-medium loads but extended to 10.4 seconds at the maximum load (1140 grams). This system proves to be precise and reliable, making it suitable for adaptive position control applications in various fields.

Keyword: *Otomation, Sensor, Load Cell, Stepper Motor, PID*

PENDAHULUAN

Dalam teknologi modern, sistem pengendalian posisi presisi tinggi menjadi kebutuhan esensial di berbagai sektor, seperti manufaktur, robotika, otomasi, dan penelitian ilmiah. Sistem ini memungkinkan pengaturan posisi yang sangat akurat, yang menjadi fondasi untuk aplikasi seperti pembuatan semikonduktor, mesin *Computer Numerical Control* (CNC), printer 3D, dan peralatan medis seperti robot bedah. Menurut Considine (1986), akurasi dalam pengendalian posisi dapat meningkatkan efisiensi operasional dan keselamatan, terutama dalam lingkungan yang menuntut toleransi sangat kecil, seperti produksi mikroelektronika atau eksperimen ilmiah. Namun, tantangan seperti variasi massa, getaran mekanis, dan potensi kesalahan posisi menuntut solusi teknologi yang canggih untuk memastikan performa optimal. Oleh karena itu, pengembangan sistem pengendalian posisi yang handal dan adaptif menjadi prioritas strategis untuk mendukung kemajuan teknologi di berbagai bidang.

Stepper motor telah menjadi komponen utama dalam sistem pengendalian posisi karena kemampuannya untuk bergerak dalam langkah-langkah diskrit yang terukur, memungkinkan kontrol posisi yang stabil tanpa umpan balik dalam konfigurasi open-loop. Karakteristik ini menjadikan *stepper motor* ideal untuk aplikasi yang membutuhkan torsi tinggi pada kecepatan rendah, seperti dalam sistem otomasi, printer 3D, dan tahap rotasi presisi pada peralatan laboratorium (Oriental Motor, 2023). Namun, dalam aplikasi presisi tinggi yang beroperasi di bawah kondisi massa yang bervariasi, *motor stepper* rentan terhadap kehilangan langkah (*step loss*) dan getaran mekanis, yang dapat mengurangi akurasi posisi. Penelitian oleh Bendjedja *et al.* (2012) menunjukkan bahwa penggunaan sistem *closed-loop* pada *motor stepper* dapat meningkatkan akurasi posisi dengan memanfaatkan umpan balik, mendekati performa *motor servo* dalam banyak kasus. Meskipun demikian, tantangan seperti degradasi mekanis akibat penggunaan jangka panjang tetap memerlukan strategi kontrol yang lebih canggih.

Untuk mencapai presisi maksimal, sistem open-loop sering kali tidak memadai karena tidak dapat mengoreksi kesalahan akibat faktor seperti gesekan, *backlash*, atau massa eksternal yang tidak terduga. Umpan balik posisi, yang diperoleh melalui sensor seperti *incremental encoder*, memungkinkan operasi *closed-loop* yang meningkatkan akurasi dan pengulangan gerakan (Stevens, 2021). Namun, dalam aplikasi tertentu, informasi posisi saja tidak cukup, gaya atau massa yang diterapkan selama pergerakan juga menjadi parameter kritis. Sensor *load cell*, yang mengukur gaya atau berat secara langsung, dapat memberikan umpan balik gaya yang memungkinkan sistem menyesuaikan diri dengan kondisi aktual. Menurut Al-Dahiree *et al.* (2022), integrasi sensor *load cell* dalam sistem pengukuran gaya meningkatkan keandalan dan presisi, terutama dalam aplikasi seperti pengujian material atau perakitan halus, di mana kontrol gaya dan posisi harus seimbang.

Penggunaan sensor *load cell* bersama *motor stepper* membuka peluang baru untuk meningkatkan performa sistem pengendalian posisi. Sensor *load cell* tipe *strain gauge*, seperti yang digunakan dalam penelitian ini dengan kapasitas 10 kg, memberikan umpan balik gaya yang melengkapi informasi posisi dari *incremental encoder*. Dalam konteks industri, sensor ini sering digunakan untuk memantau gaya dalam sistem seperti kontrol tegangan material atau pemantauan massa *motor*, memastikan operasi dalam batas aman (Antech Converting, 2017). Dalam penelitian ini, integrasi sensor *load cell* dengan *motor stepper* tipe bipolar yang dikendalikan oleh *driver* DM860H memungkinkan sistem menyesuaikan posisi berdasarkan massa aktual, menjadikannya relevan untuk aplikasi seperti perakitan mikro atau pengujian material.

Penelitian ini berfokus pada pemodelan dan pengendalian sistem posisi presisi tinggi menggunakan *motor stepper* yang terintegrasi dengan sensor *load cell* dan *incremental encoder*. Dengan mengembangkan model matematis yang akurat dan strategi kontrol berbasis

microcontroller ESP32 serta simulasi MATLAB/*Simulink*, penelitian ini bertujuan meningkatkan performa dan keandalan sistem dalam aplikasi yang memerlukan umpan balik gaya dan posisi secara simultan. Pengujian dilakukan dalam skala laboratorium dengan massa dan kondisi lingkungan terkontrol, menawarkan kontribusi baru dalam sistem pengendalian gerak presisi untuk aplikasi industri dan ilmiah. Temuan ini diharapkan menjadi dasar bagi pengembangan sistem kendali adaptif yang lebih tangguh, relevan untuk manufaktur presisi, robotika medis, dan instrumentasi ilmiah.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang disusun secara sistematis untuk merancang, merealisasikan, dan mengevaluasi kinerja sistem pengendalian posisi presisi tinggi. Sistem yang dikembangkan mengintegrasikan *motor stepper hybrid NEMA 23* sebagai aktuator utama, sensor *load cell* tipe *strain gauge* kelas C3 dengan kapasitas maksimum 10 kg untuk mendeteksi gaya, serta *incremental encoder* beresolusi 4000 pulsa per putaran sebagai umpan balik posisi. Semua komponen ini dikendalikan secara terpusat oleh *microcontroller* ESP32 yang berfungsi sebagai unit kendali utama.

Langkah awal penelitian dimulai dengan menyusun pemodelan matematis dari dinamika sistem. Pemodelan ini bertujuan untuk memetakan hubungan antara *input* kendali, gerakan motor, gaya yang terdeteksi oleh *load cell*, serta pembacaan posisi dari *encoder*. Hasil pemodelan kemudian diimplementasikan dalam bentuk simulasi menggunakan MATLAB/*Simulink*. Tahap simulasi ini penting untuk memprediksi performa sistem, membantu menyesuaikan parameter pengendalian, serta mengidentifikasi potensi masalah sebelum sistem fisik dibangun, sehingga mengurangi risiko kesalahan desain pada tahap realisasi.

Selanjutnya, berdasarkan hasil pemodelan dan simulasi, disusun desain detail yang mencakup aspek mekanik dan elektronik. Proses desain ini diawali dengan identifikasi kebutuhan sistem, penetapan tujuan, dan perancangan struktur mekanik yang dapat menopang beban dan menjamin kestabilan gerak. Secara paralel, dilakukan perancangan rangkaian elektronik yang mengatur integrasi antara *driver motor* DM860H, modul HX711 sebagai penguat dan *converter* sinyal *load cell*, serta *incremental encoder* sebagai sensor posisi. Semua rancangan ini disusun agar dapat diintegrasikan dengan ESP32 sebagai otak pengendali.

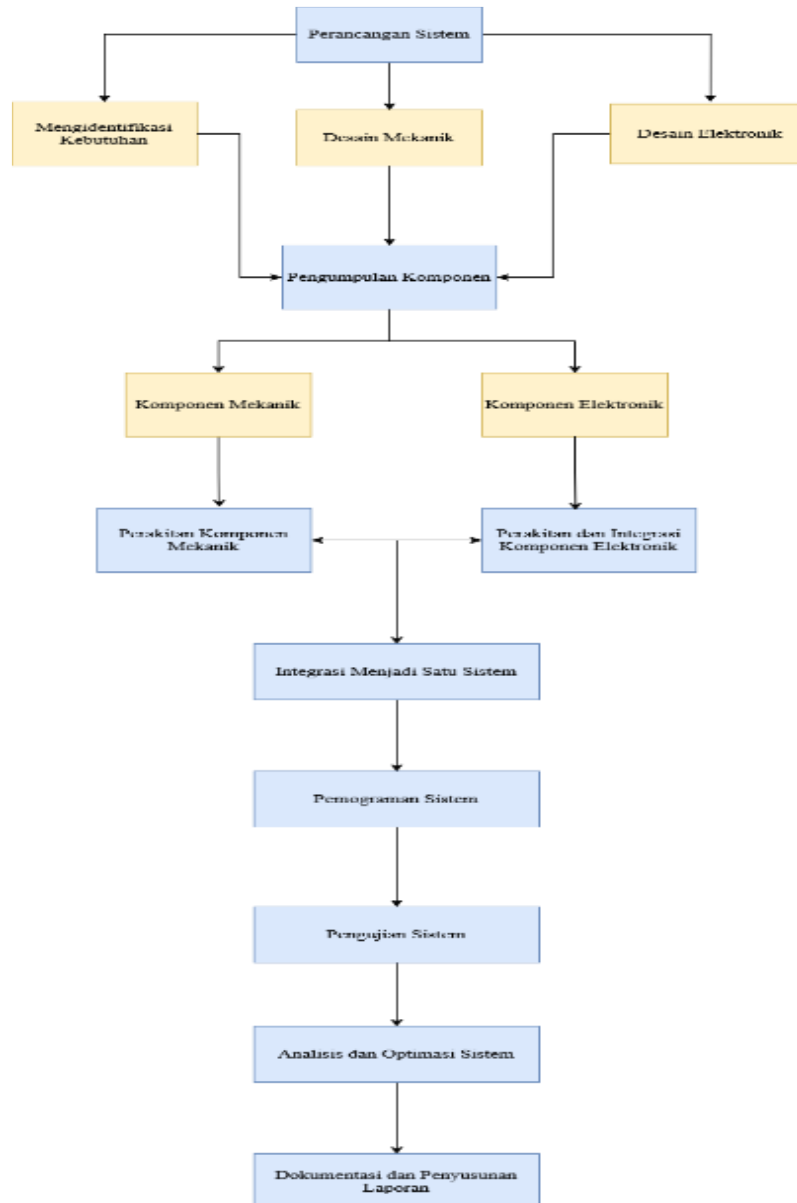
Setelah tahap desain selesai, dilakukan pengadaan dan pemilihan komponen yang sesuai spesifikasi, lalu dilanjutkan dengan proses perakitan menjadi satu kesatuan sistem. Perakitan dilakukan secara hati-hati untuk memastikan tidak ada gangguan mekanis maupun kesalahan sambungan elektronik yang dapat memengaruhi kinerja sistem. Spesifikasi komponen utama tercantum dalam tabel berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Komponen

Instrumen	Spesifikasi
<i>Motor Stepper</i>	NEMA 23, <i>hybrid</i> , <i>driver</i> DM860H
<i>Load Cell</i>	<i>Strain gauge</i> , kelas C3, 10 kg, HX711
<i>Incremental Encoder</i>	4000 PPR (<i>post-quadrature</i>)

Tahap penting berikutnya adalah kalibrasi sensor untuk memastikan ketepatan dan akurasi data yang dihasilkan. *Load cell* dikalibrasi menggunakan massa standar mulai dari 0 hingga 1000 gram untuk menentukan faktor konversi dari satuan digital (ADC) menjadi gaya aktual dalam satuan gram atau Newton. Sementara itu, *incremental encoder* dikalibrasi dengan memutar poros motor ke sudut-sudut tertentu, seperti 0°, 90°, 180°, 270°, dan 360°, untuk memverifikasi jumlah pulsa yang terbaca sesuai spesifikasi teknis.

Algoritma kendali PID kemudian dikembangkan dan diimplementasikan pada *microcontroller* ESP32. Algoritma ini berfungsi untuk memproses data *real-time* dari sensor dan menghasilkan sinyal kendali yang mengatur pergerakan *stepper motor* agar mencapai dan mempertahankan posisi target dengan presisi tinggi. Implementasi ini menjadi inti dari penelitian, karena secara langsung memengaruhi respons sistem terhadap perubahan beban maupun gangguan.



Gambar 1. Diagram Alir Perancangan Alat

Pengujian eksperimental dilaksanakan dalam tiga skenario untuk mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh. Skenario pertama adalah pengujian tanpa beban untuk melihat performa dasar sistem. Skenario kedua dilakukan dengan beban bertahap (50, 100, 200, 500, hingga 1000 gram) untuk mengevaluasi pengaruh variasi massa terhadap akurasi dan kestabilan kendali. Sedangkan skenario ketiga adalah pengujian kondisi stabil, yang mengamati kemampuan sistem dalam mempertahankan posisi target dalam jangka waktu tertentu tanpa mengalami *drift* atau fluktuasi berlebih.

Selama proses pengujian, data dikumpulkan secara *real time* menggunakan komunikasi serial dari ESP32 dan direkam ke dalam *Microsoft Excel* melalui *data streamer*. Data yang

dikumpulkan meliputi parameter seperti waktu, massa beban, posisi target, posisi aktual, kecepatan motor, dan *error* yang muncul. Data mentah tersebut kemudian diolah dan dianalisis menggunakan metode statistik, seperti perhitungan rata-rata *error*, standar deviasi, *Root Mean Square Error* (RMSE), serta identifikasi error maksimum yang terjadi.

Selain itu, dilakukan analisis regresi linier untuk mengevaluasi kekuatan hubungan antara posisi target dan posisi aktual, sebagai indikator akurasi kendali sistem. Hasil pengujian eksperimental ini juga dibandingkan dengan hasil simulasi MATLAB/*Simulink* untuk memvalidasi model matematis yang telah disusun pada tahap awal penelitian.

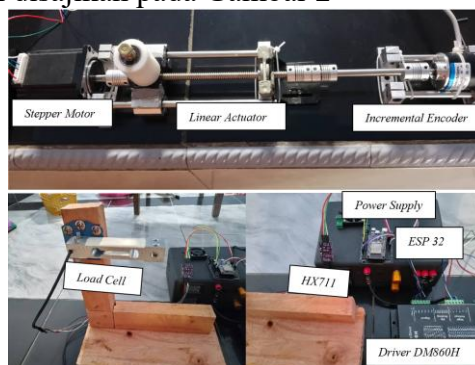
Keseluruhan tahapan sistem yang di tunjukkan Gambar 1 mulai dari pemodelan, simulasi, desain, perakitan, kalibrasi, implementasi algoritma kendali, hingga pengujian dan analisis data disusun secara berkesinambungan untuk memastikan bahwa sistem yang dirancang dapat memenuhi tujuan utama penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Tahap pemodelan sistem merupakan tahap penting untuk dapat memahami cara kerja sistem secara menyeluruh dan bagaimana merancang pengendalian sistem yang efektif. Pada sistem ini mengintegrasikan komponen utama berupa *stepper motor*, sensor *load cell*, dan *incremental encoder*, yang masing-masing komponen di integrasikan menjadi satu sistem untuk mengatur posisi dengan presisi tinggi.

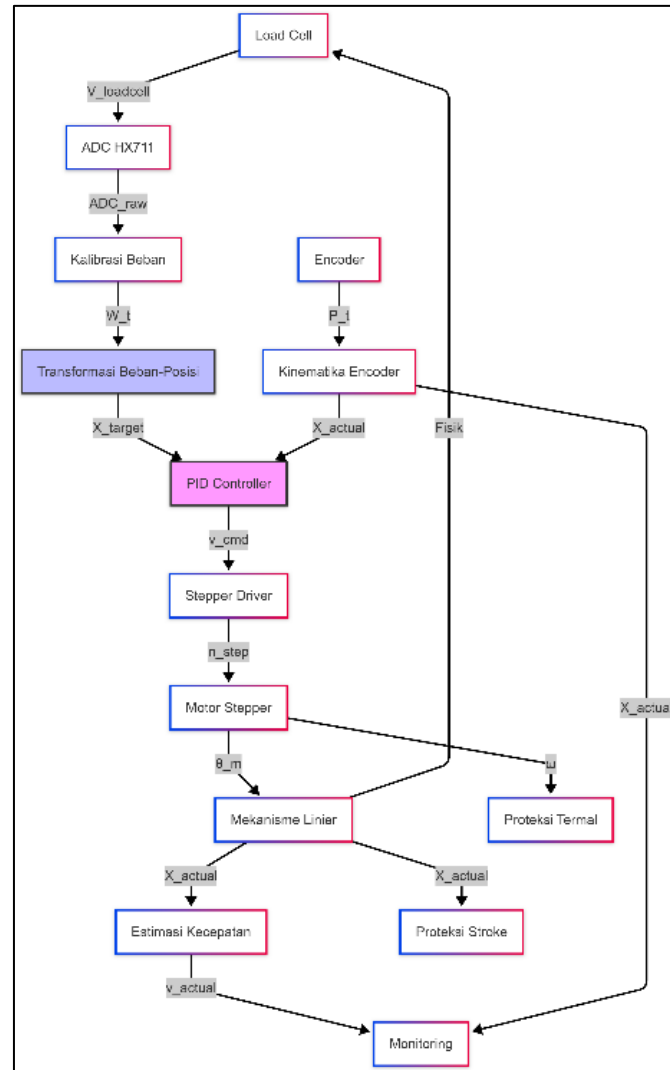
Sistem dirancang menggunakan *stepper motor hybrid* NEMA 23 sebagai *actuator* utama, yang dikendalikan oleh *driver* DM860H. *Driver* ini mendukung kontrol *microstepping* hingga 1/256 langkah, memungkinkan resolusi gerakan yang sangat halus. Sensor *load cell* kelas C3 tipe *strain gauge* berkapasitas 10 kg dihubungkan ke modul HX711, yang mengkonversi sinyal analog ke digital dengan resolusi 24-bit. *Incremental encoder* dengan resolusi 4000 pulsa per putaran menyediakan umpan balik posisi untuk sistem kendali *closed-loop*. Mikrokontroler ESP32 berfungsi sebagai pusat pengendalian, mengimplementasikan algoritma PID untuk mengatur posisi *motor* berdasarkan data sensor. Berikut adalah skema dan diagram alir keseluruhan sistem disajikan pada Gambar 2



Gambar 2. Alat

Diagram alir pada Gambar 3 menggambarkan sistem kontrol posisi presisi tinggi berbasis *motor stepper* yang terintegrasi dengan *load cell* dan *incremental encoder*. Proses dimulai dari pembacaan sinyal tegangan ($V_{loadcell}$) oleh ADC HX711, yang kemudian dikalibrasi menjadi data beban (W_t). Nilai beban ini diubah melalui *Transformasi Beban-Posisi* menjadi target posisi (X_{target}). Secara paralel, *encoder* mendeteksi posisi sebenarnya (P_t), yang dikonversi melalui *Kinematika Encoder* menjadi X_{actual} . Kedua data posisi ini dimasukkan ke dalam *PID Controller* yang menghasilkan perintah kecepatan (v_{cmd}) ke *Stepper Driver*, yang kemudian menggerakkan *Motor Stepper* berdasarkan jumlah langkah (n_{step}). Putaran *motor* (θ_m) diteruskan ke *Mekanisme Linier* untuk menghasilkan gerakan linier (X_{actual}),

yang kemudian digunakan untuk estimasi kecepatan, proteksi stroke, dan *monitoring* sistem secara keseluruhan. Diagram ini juga menampilkan jalur umpan balik posisi aktual untuk memastikan kestabilan dan ketepatan pengendalian posisi yang responsif terhadap perubahan beban.

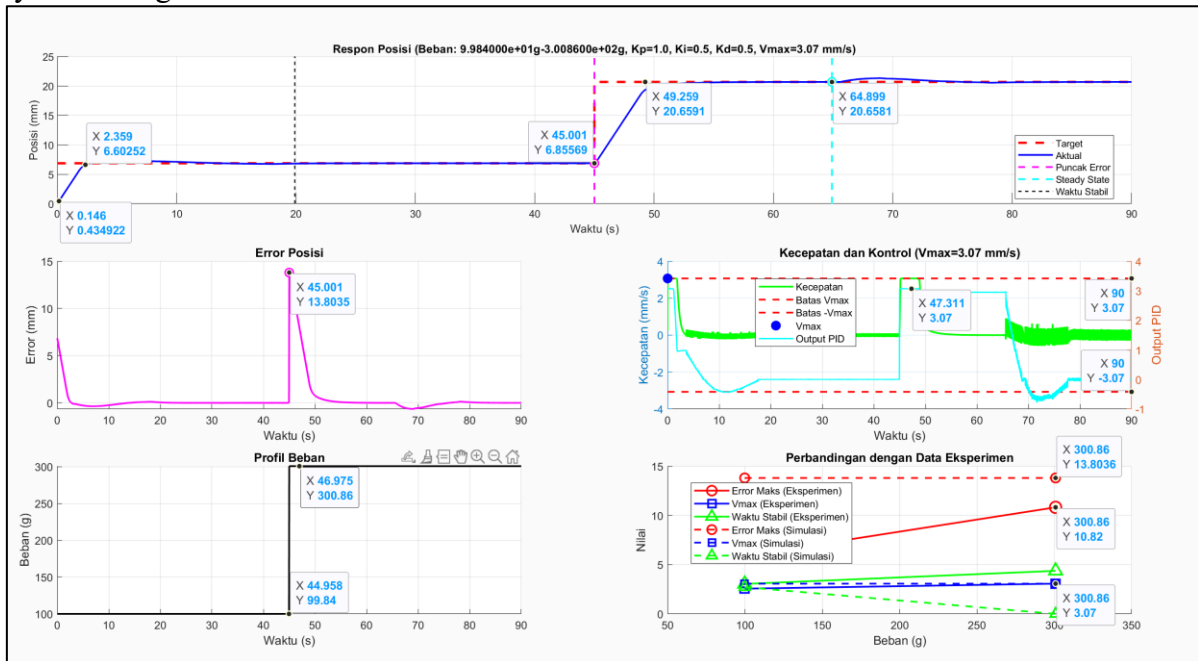


Gambar 3. Diagram Alir Sistem

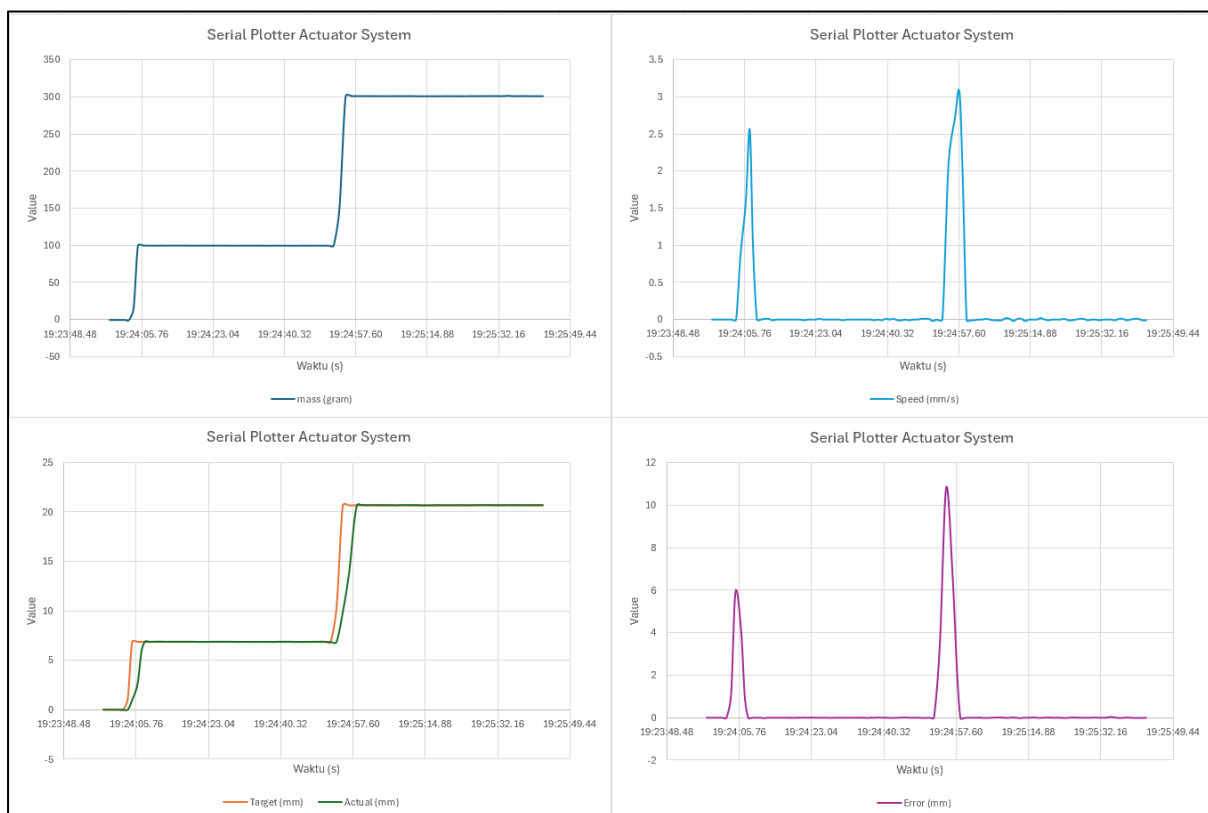
Pembahasan dimaksudkan untuk menginterpretasikan dan memaknai hasil penelitian sesuai dengan teori yang digunakan dan tidak sekadar menjelaskan temuan. Pembahasan harus diperkaya dengan merujuk atau membandingkan hasil-hasil penelitian sebelumnya yang telah diterbitkan dalam jurnal ilmiah bereputasi dan tidak berasal dari jurnal abal-abal (*predatory journal*). Dalam pembahasan disarankan juga berisi pengintegrasian hasil penelitian ke dalam kumpulan teori atau pengetahuan yang telah mapan, penyusunan teori baru, modifikasi teori yang telah ada, serta implikasi hasil penelitian.

Simulasi sistem kontrol posisi presisi tinggi berbasis *motor stepper* yang terintegrasi dengan *load cell* dan *incremental encoder* pada MATLAB dirancang untuk merepresentasikan dinamika *actuator* secara realistis menggunakan kontrol umpan balik PID adaptif yang menyesuaikan parameter (K_p, K_i, K_d) berdasarkan perubahan beban. Dengan domain waktu diskrit dan langkah waktu kecil, simulasi ini menghitung posisi, kecepatan, dan percepatan secara halus, serta mempertimbangkan faktor nyata seperti inersia, gesekan, redaman, dan batas

fisik sistem. Pendekatan ini memungkinkan pengujian performa, tuning kontrol, serta validasi desain tanpa eksperimen langsung, sehingga memberikan gambaran akurat tentang respons *actuator* terhadap kondisi dinamis. Dengan simulasi MATLAB tersebut diperoleh kinerja system sebagai berikut:



Gambar 4 Kinerja Sistem Simulasi MATLAB



Gambar 5 Kinerja Sistem Eksperimental

Gambar 4.2 menampilkan hasil simulasi sistem posisi presisi tinggi yang dikendalikan menggunakan algoritma PID ($K_p = 1.0, K_i = 0.5, K_d = 0.5$). Meskipun terjadi perubahan beban cukup besar hingga 301 gram, sistem tetap mampu menjaga akurasi posisi dengan baik, terbukti dari *error* maksimum sebesar 13.80 mm dan *steady-state error* yang sangat kecil hanya 0.0014 mm. Selain itu, kecepatan rotor juga tetap terjaga di batas maksimum V_{max} sebesar 3.07 mm/s, menunjukkan bahwa kendali PID dapat merespons perubahan beban dengan cepat dan stabil.

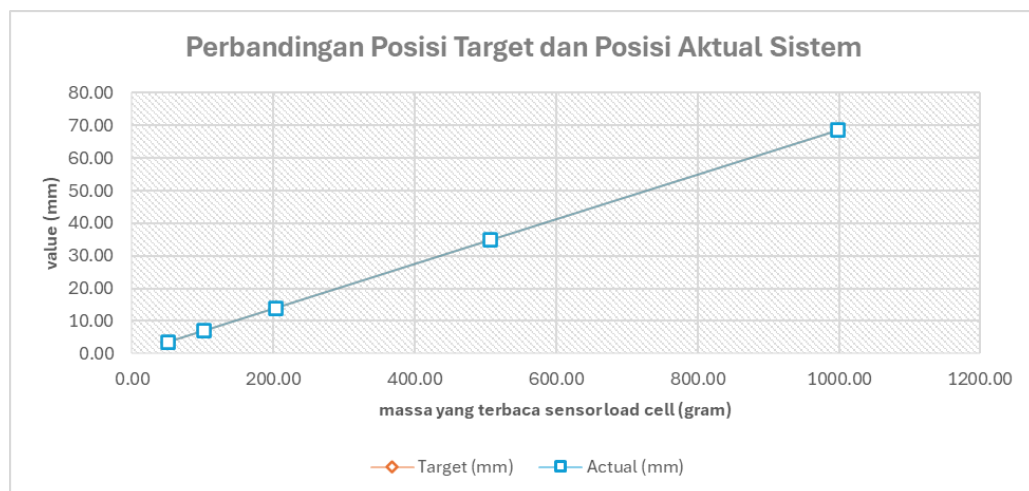
Pada Gambar 4.3, hasil eksperimen aktual yang direkam menggunakan *serial plotter* menunjukkan pola perubahan *error*, kecepatan, dan posisi yang mirip dengan hasil simulasi. *Error* maksimum pada eksperimen lebih kecil yaitu hanya 10.82 mm, sementara kecepatan maksimum tetap sama di 3.07 mm/s. Kesamaan pola dan tren ini membuktikan bahwa rancangan sistem kendali PID yang dipadukan dengan sensor *load cell* dan *incremental encoder* dapat bekerja secara efektif dan stabil, meskipun harus menghadapi variasi beban yang berubah-ubah dan kondisi nyata yang lebih kompleks daripada simulasi.

Analisis Akurasi dan Stabilitas Sistem

Untuk mengevaluasi akurasi dan stabilitas sistem, dilakukan pengujian dengan memberikan variasi massa (50, 100, 200, 500, dan 1000 gram) pada sensor *load cell*. Data kinerja sistem direkam menggunakan data streamer Microsoft Excel, meliputi nilai target posisi yang dihitung dari pembacaan massa, posisi aktual yang terdeteksi oleh *incremental encoder*, serta nilai *error* sebagai selisih antara keduanya. Untuk setiap variasi massa, dicatat 32 data pengukuran, kemudian dihitung rata-rata pembacaan massa, target posisi, posisi aktual, dan *error*-nya.

Tabel 2. Kinerja Sistem pada Variasi Massa (50, 100, 200, 500, 1000) gram

<i>AVG Load Cell Mass (gr)</i>	<i>AVG Target (mm)</i>	<i>AVG Actual (mm)</i>	<i>AVG Error (mm)</i>
51.07	3.53	3.53	0.004
101.45	6.96	6.96	0.003
202.86	13.93	13.93	0.006
506.40	34.83	34.83	0.007
998.19	68.54	68.55	0.008



Gambar 6 Grafik Perbandingan Posisi Target dan Posisi Aktual Sistem

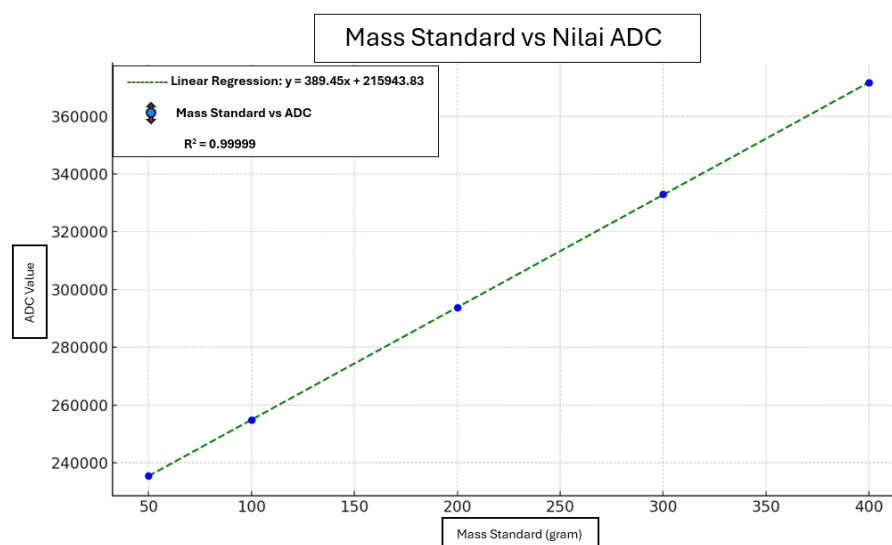
Berdasarkan Tabel 1, sistem menunjukkan akurasi yang sangat tinggi dengan rata-rata *error* hanya sekitar 0.003–0.008 mm. Hal ini membuktikan bahwa posisi aktual hampir sama dengan posisi target yang dihitung dari massa yang terdeteksi oleh *load cell*, sehingga sistem mampu mengubah data massa menjadi gerakan *actuator* dengan ketelitian tinggi. Stabilitas sistem terlihat dari konsistensi nilai target dan aktual yang selalu proporsional meskipun massa bervariasi, serta *error* yang tetap kecil dan stabil.

Kinerja Incremental Encoder

Incremental encoder dengan spesifikasi awal 1000 pulsa per putaran (PPR) menunjukkan peningkatan kinerja signifikan setelah dikalibrasi dengan sistem *quadrature encoding*. Teknologi ini memanfaatkan dua sinyal (A dan B) yang saling bergeser 90 derajat, memungkinkan *encoder* menghasilkan empat kali lebih banyak pulsa per putaran. Hasilnya, setelah kalibrasi, resolusi efektif *encoder* mencapai 4000 PPR. Ini berarti setiap pergerakan sudut kecil (0.09 derajat) dapat terdeteksi dengan akurat. Pengujian menunjukkan konsistensi jumlah pulsa pada berbagai sudut pengujian (0°, 90°, 180°, 270°, 360°) baik saat berputar searah maupun berlawanan arah jarum jam. Akurasi ini menjadi dasar penting untuk sistem kontrol yang membutuhkan presisi tinggi, seperti *actuator* berbasis *motor stepper*. Dengan resolusi 4000 PPR, *encoder* mampu mendeteksi perubahan posisi yang sangat halus, sehingga memungkinkan sistem kontrol meminimalkan kesalahan antara posisi target dan aktual hingga 0.00 mm. Integrasi *encoder* dengan *motor stepper* memungkinkan umpan balik langsung (*feedback*) untuk menyesuaikan gerakan *motor* secara *real-time*. Misalnya, jika ada perbedaan kecil antara target dan posisi aktual, sistem akan segera memperbaikinya melalui pengaturan *microstepping* pada *motor*. *Encoder* ini terbukti menjadi komponen kritis yang menjaga keakuratan dan stabilitas sistem.

Kinerja Sensor Load Cell

Hubungan antara massa dan nilai ADC (*Analog to Digital Converter*) merupakan inti cara kerja sistem pengukuran menggunakan *load cell*. Ketika massa benda diletakkan di atas *load cell*, *strain gauge* di dalamnya mengalami regangan sehingga resistansi listrik berubah, menghasilkan tegangan analog yang sangat kecil (beberapa milivolt). Karena sinyal ini terlalu lemah untuk langsung diproses, diperlukan modul seperti HX711 yang memiliki dua fungsi utama: memperkuat sinyal menggunakan *Programmable Gain Amplifier* (PGA) hingga 128 kali lipat, lalu mengonversinya menjadi data digital 24-bit melalui ADC internal. Nilai digital inilah yang dibaca oleh *microcontroller* sebagai representasi massa, sehingga memungkinkan sistem untuk menampilkan atau memproses data berat secara akurat.



Gambar 7 Grafik Regresi Linear antara Massa Standar dengan Nilai ADC

Data dan grafik pada Gambar 7 menunjukkan adanya hubungan yang sangat linier antara massa standar (*input*) dan nilai ADC (*output*), yang ditunjukkan oleh persamaan regresi $y = 389.45x + 215944$ dengan koefisien determinasi $R^2 = 1$. Linieritas sempurna ini penting untuk memastikan akurasi sistem pengukuran berat. Gradien sebesar **389.45** menggambarkan sensitivitas sistem, di mana kenaikan massa sebesar 1 gram menghasilkan kenaikan sekitar 389.45 satuan pada nilai ADC. Sementara itu, nilai *intercept* **215944** merepresentasikan *offset* atau zero reading, yaitu nilai ADC saat *load cell* tidak diberi beban, dan menjadi titik awal dalam proses kalibrasi. Selain linieritas, performa sensor *load cell* juga dianalisis melalui nilai standar deviasi. Sensor *load cell* berkapasitas 10 kg dengan kelas C3 ini menunjukkan standar deviasi pembacaan tidak lebih dari 0.04%, yang berarti data pembacaan sangat konsisten dan presisi. Hasil ini membuktikan bahwa sistem pengukuran mampu membaca massa standar dengan tingkat akurasi dan kestabilan yang tinggi, sehingga dapat diandalkan untuk aplikasi yang membutuhkan pengukuran berat yang presisi.

Pengujian Performa Sistem dalam Berbagai Skenario Operasional

Pengujian performa sistem dilakukan dalam tiga skenario operasional utama yaitu tanpa beban, dengan beban bertahap, dan dalam keadaan stabil (*steady state*).

Kinerja Sistem dalam Keadaan Tanpa Beban

Evaluasi performa pada kondisi tanpa massa sangat penting untuk menilai akurasi dan presisi dasar sistem tanpa gangguan eksternal. Data yang direkam melalui sistem *logging* mencakup waktu, berat, posisi target, posisi aktual, kecepatan, dan *error*. Analisis statistik menunjukkan bahwa sistem *actuator* ini memiliki tingkat presisi dan akurasi yang sangat baik. Nilai standar deviasi (STDEV) sebesar 0.0055 mm menunjukkan bahwa penyimpangan data terhadap rata-rata *error* sangat kecil, sehingga sistem mampu mempertahankan posisi dengan stabil tanpa banyak fluktuasi. Nilai RMSE yang rendah, yaitu hanya 0.0055 mm, menunjukkan bahwa distribusi *error* cukup merata dan tidak ada kesalahan besar yang mempengaruhi hasil, sehingga sistem dapat mencapai posisi target dengan akurat dan konsisten. Deviasi maksimum yang terekam oleh sistem hanya sebesar 0.02 mm, menggambarkan selisih terbesar antara posisi aktual dengan target saat sistem tidak diberi beban.

Column1	Column2	
STDEV	0.005536312	
RSME	0.005522681	
Max Deviation	0.02	
LINEST	0.904936975	0.001328782
	0.039585534	0.000648043
	0.725226337	0.005983573
	522.5930805	198
	0.018710477	0.007089023
R ²	0.725226337	

Gambar 8 Statistik Data Sistem Tanpa Massa

Meskipun dalam kondisi ini sistem tetap beresilasi dan tidak sepenuhnya mencapai *steady state*, nilai deviasi tersebut tetap tergolong sangat kecil, menunjukkan bahwa sistem masih bekerja dengan tingkat presisi yang baik. Ketika sistem tidak diberi massa, hasil analisis menunjukkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.725, artinya sekitar 72.5% variasi posisi aktual dapat dijelaskan oleh posisi target. Ini menandakan adanya hubungan linier yang cukup kuat antara perintah yang

diberikan dan hasil yang dicapai oleh *actuator*. Nilai R^2 yang belum mencapai 1 ini kemungkinan disebabkan oleh faktor seperti *noise*, desain mekanis alat, atau gangguan lingkungan seperti getaran, sehingga mempengaruhi akurasi sistem saat tidak ada beban. Kemiringan garis regresi sebesar 0.9049 menunjukkan bahwa setiap perubahan target 1 mm hanya menghasilkan perubahan posisi aktual sekitar 0.9049 mm, menandakan sistem masih sedikit kurang responsif. Selisih ini kemungkinan disebabkan oleh parameter kendali (seperti PID) yang belum sepenuhnya optimal, sehingga masih bisa diperbaiki agar *actuator* lebih tepat mengikuti target. Nilai *intersep* sebesar 0.0013 mm berarti saat target posisi 0 mm, posisi aktual hanya bergeser sedikit sebesar 0.0013 mm. *Offset* yang sangat kecil ini menunjukkan kalibrasi awal dari sensor *load cell* pada sistem sudah sangat baik. Secara keseluruhan, analisis statistik membuktikan sistem sudah cukup akurat dan stabil, meskipun masih ada potensi peningkatan untuk mencapai performa yang lebih baik.

Kinerja Sistem ketika diberi Massa secara Bertahap

Penelitian ini menganalisis kinerja sistem saat diberi massa bertahap, yaitu 50g, 150g, 250g, 450g, 650g, dan 1140g, dengan penambahan bertahap sebesar 50g, 100g, 100g, 200g, 200g, dan 500g. Data yang direkam mencakup waktu, berat, posisi target, posisi aktual, kecepatan, dan *error*. Respons Sistem terhadap Variasi Massa: Sistem *actuator* posisi ini mengintegrasikan *stepper motor* dengan sensor *load cell*, di mana sinyal *load cell* menentukan posisi target dari linear actuator, secara proporsional dengan massa terukur (rasio ~ 0.07 mm/g). Untuk massa rendah hingga sedang (0g-650g), sistem menunjukkan kinerja yang baik. Sebagai contoh, pada massa 50 g, *load cell* mendeteksi 50.37g, menetapkan target 3.47 mm. *Stepper motor* menggerakkan actuator dari 0.31 mm ke 3.47 mm dalam 1.50 detik, mengurangi *error* dari 3.15 mm menjadi 0 mm. Respons ini konsisten untuk massa 150g, 250g, 450g, dan 650g, dengan waktu stabilisasi di bawah 3 detik. Pada massa tinggi (1140g), kinerja sistem menurun drastis. *Load cell* mendeteksi 1141.28g, menetapkan target 78.37 mm, tetapi posisi aktual awal hanya 49.71 mm, menghasilkan *error* awal 28.66 mm. *Stepper motor* secara bertahap mencapai 78.14 mm, dengan *error* akhir -0.04 mm setelah 10.4 detik. Penundaan ini kemungkinan disebabkan oleh torsi *stepper motor* yang terbatas atau parameter kontrol yang kurang optimal untuk massa ekstrem, menunjukkan perlunya peningkatan untuk aplikasi massa berat.

Column1	Column2	
STDEV	8.862451388	
RSME	9.005839245	
Max Deviation	70.72	
LINEST	0.917749538	2.886488693
	0.016731753	0.594597942
	0.883168209	8.616003082
	3008.607015	398
	223345.4735	29545.73263
R^2	0.883168209	

Gambar 9 Statistik Data Sistem Pemberian Massa Bertahap

Akurasi dan Stabilitas Sistem pada kondisi stabil, sistem mencapai akurasi tinggi untuk massa rendah hingga sedang, dengan *error* mendekati nol. Pada massa 50 g, posisi aktual stabil di 3.47 mm (tepat sesuai target), dan kecepatan turun ke 0 mm/s, menunjukkan stabilitas luar biasa. Sebaliknya, pada 1140g, meskipun sistem akhirnya stabil dengan *error* -0.04 mm, prosesnya memakan waktu lebih dari 10 detik, dan kecepatan berfluktuasi (misalnya, dari 3.12 mm/s ke 0.44 mm/s) selama transisi. Ini menunjukkan bahwa *stepper motor* kesulitan menyesuaikan posisi dengan cepat berdasarkan sinyal *load cell* pada massa berat. Variabilitas *error* keseluruhan, dengan

standar deviasi (STDEV) 8.86 mm dan Root Mean Square Error (RMSE) 9.01 mm, menunjukkan penurunan akurasi pada massa tinggi, terutama selama fase settling time. Deviasi maksimum 70.72 mm pada 1140g menegaskan tantangan awal dalam mencapai target. Namun, ketika sistem mencapai kestabilan, nilai *error* menjadi sangat kecil, hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik setelah mencapai kesetimbangan, terutama pada pemberian massa yang ringan.

Respon dinamis sistem bergantung pada seberapa cepat *stepper motor* bereaksi terhadap sinyal *load cell*. Pada massa 50 g, kecepatan awal 0.31 mm/s meningkat ke 1.25 mm/s, dan target tercapai kurang dari 3 detik. Pada 1140g, kecepatan awal 2.67 mm/s naik hingga 3.12 mm/s, tetapi waktu settling time memakan waktu 10.4 detik. Kecepatan yang lebih tinggi pada massa berat mencerminkan upaya sistem untuk mengoreksi *error* besar, tetapi waktu stabilisasi yang lama menunjukkan keterbatasan dinamik. Tidak adanya overshoot menunjukkan kontrol yang stabil, tetapi respons lambat pada 1140g menyoroti perlunya optimalisasi pada kecepatan *stepper motor*. Analisis Regresi dan Hubungan Linier: Regresi linier ($R^2=0.883$) menunjukkan hubungan kuat antara posisi target (berdasarkan sinyal *load cell*) dan posisi aktual. Kemiringan 0.9177 mengindikasikan respons di bawah target, dengan posisi aktual rata-rata 91.77% dari target, terutama pada fase *settling time* untuk massa yang lebih tinggi. Intersep 2.886 mm menunjukkan offset sistemik kecil, mungkin akibat kalibrasi *load cell* atau mekanika *actuator*. Dalam kondisi stabil, *error* mendekati nol, menegaskan bahwa masalah utama terletak pada fase settling time.

Kinerja Sistem dalam Keadaan Stabil (System on Steady State)

Analisis ini merekam kinerja sistem setelah mencapai target dan stabil, pada variasi massa 50g, 100g, 200g, 500g, dan 1000g. Analisis ini bertujuan mengevaluasi akurasi, presisi, dan faktor yang mempengaruhi performa sistem pada kondisi stabil, dengan mempertimbangkan data yang telah difilter untuk mengecualikan periode *settling time* atau saat linear *actuator* menyesuaikan posisi ke target yang ingin dituju. Dalam kondisi stabil (*steady state*), sistem *actuator* posisi dengan sensor *load cell* bekerja pada performa terbaiknya karena fluktuasi gerakan dan kesalahan kendali menjadi sangat kecil. Analisis pada fase ini penting untuk memastikan sejauh mana sistem dapat mempertahankan akurasi dan konsistensi setelah mencapai keseimbangan. Pada tahap ini, digunakan indikator seperti simpangan baku (STDEV), RMSE, dan deviasi maksimum untuk menilai kestabilan, serta regresi linier untuk melihat seberapa erat hubungan antara posisi target dan posisi aktual. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 menunjukkan respon sistem yang sangat linier dan presisi.

Column1	Column2		
STDEV	0.006382719		
RSME	0.008420754		
Max Deviation	0.03		
LINEST	1.000061193	-0.000775356	
	2.68466E-05	0.000942468	
	0.999999883	0.008303791	
	1387632974	163	
	95681.38043	0.01123933	
R^2	0.999999883		

Gambar 10 Statistik Data Sistem dalam Keadaan Stabil

Hasil analisis pada kondisi *steady state* menunjukkan *error* maksimum hanya 0.03 mm, yang berarti kesalahan penempatan posisi aktual terhadap target sangat kecil dan sistem bekerja

dengan presisi tinggi. Hal ini juga diperkuat oleh nilai standar deviasi *error* sebesar 0.006382 mm, yang mencerminkan variabilitas data sangat rendah. Meski demikian, masih terdeteksi overshoot kecil kurang dari 0.6%, kemungkinan disebabkan oleh faktor lingkungan seperti getaran atau perubahan suhu, karena pengujian tidak dilakukan di ruang laboratorium yang benar-benar terkontrol. Secara keseluruhan, data ini membuktikan bahwa sistem mampu beroperasi stabil dengan tingkat akurasi dan presisi yang sangat baik meskipun ada gangguan kecil dari lingkungan sekitar.

Besarnya target yang ingin dituju sistem *actuator* posisi meningkat secara proporsional berdasarkan perubahan massa pada sensor *load cell*, dengan rasio sekitar 0.0687 mm/g, dilihat dari nilai kemiringan atau slope. Dengan nilai rasio tersebut berarti ketika sensor *load cell* mendeteksi massa pada 51.14 g, maka target pergerakan linear *actuator* sejauh 3.51 mm (massa yang terdeteksi dikalikan dengan rasio). Pada kondisi *steady state*, analisis menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 1. Nilai ini berarti 100% variasi pada posisi aktual sepenuhnya dijelaskan oleh posisi target, yang menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara perintah dan hasil. Dengan R^2 bernilai 1, dapat disimpulkan bahwa *actuator* linear mampu menempatkan posisi aktual sesuai dengan posisi target, mencerminkan akurasi dan presisi sistem yang sangat tinggi.

Analisis data secara keseluruhan menunjukkan sistem mencapai presisi tinggi pada kondisi stabil untuk massa 50g hingga 1000g, dengan *error* maksimum 0.03 mm dan standar deviasi *error* adalah 0.006382 mm. Hubungan linear kuat antar variabel seperti posisi target dan massa (rasio 0.0687 mm/g) menunjukkan desain sistem yang baik. Nilai koefisien determinasi antara perintah (target) dan hasil atau output (aktual) menunjukkan nilai 1, mencerminkan bahwa hasil penempatan posisi aktual oleh *actuator* linear pada sistem hasilnya 100% sama posisi yang ditargetkan. Sehingga secara garis besar kinerja sistem sudah sangat baik dan sangat akurat dan presisi, dalam aplikasi pengendalian posisi yang memerlukan akurasi dan presisi tinggi.¹

PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil merancang sistem pengendali posisi presisi tinggi berbasis *stepper motor* yang terintegrasi dengan sensor *load cell* dan *incremental encoder*. Algoritma kontrol PID dimodelkan dan diverifikasi melalui simulasi MATLAB/Simulink serta pengujian eksperimental. Perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan kesamaan pola yang kuat dalam respons sistem terhadap perubahan beban, meskipun terdapat *error* maksimum yang sedikit berbeda (13.80 mm pada simulasi dan 10.82 mm pada eksperimen untuk massa 301 g). Kesamaan ini mengkonfirmasi validitas model yang dikembangkan dan efektivitas strategi kontrol PID dalam menjaga akurasi posisi.

Salah satu kekuatan utama sistem ini adalah integrasi simultan antara *load cell* dan *incremental encoder*. Fitur ini memungkinkan umpan balik ganda, yaitu informasi gaya/massa dari *load cell* dan informasi posisi dari *encoder*, yang secara signifikan meningkatkan stabilitas sistem hingga beban 1140 g. Kemampuan sistem untuk menyesuaikan posisi berdasarkan massa aktual merupakan kemajuan penting, terutama untuk aplikasi yang memerlukan adaptasi terhadap variasi beban dinamis, seperti perakitan mikro atau pengujian material.

Peningkatan resolusi *encoder* hingga 4 kali lipat tanpa modifikasi fisik, melalui teknik quadrature encoding, merupakan demonstrasi cerdas dalam optimasi kinerja sensor. Dengan resolusi efektif 4000 PPR, sistem mampu mendeteksi perubahan posisi sudut sekecil 0.09 derajat, yang sangat krusial untuk aplikasi presisi tinggi seperti mikro elektronik dan robotika medis.¹ Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja dapat dicapai melalui pemrosesan sinyal yang canggih, bukan hanya melalui peningkatan presisi manufaktur perangkat keras.

Meskipun performa sistem secara keseluruhan tinggi, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu dipertimbangkan. Pengaruh lingkungan yang tidak sepenuhnya terkontrol selama pengujian dapat menyebabkan fluktuasi kecil pada data, seperti yang terlihat dari overshoot minor dan standar deviasi pada kondisi *steady state*. Ketergantungan pada proses kalibrasi sensor yang teliti juga

merupakan faktor penting; kalibrasi *load cell* menunjukkan sensitivitas terhadap gangguan, meskipun standar deviasi ADC pada massa 300 g sebesar 128.9 masih dalam batas yang dapat diterima. Selain itu, pengujian masih terbatas pada massa statis dan perubahan beban bertahap, belum mencakup variasi dinamis acak atau operasi pada kecepatan sangat tinggi, yang mungkin mengungkap tantangan baru terkait torsi *motor stepper* yang terbatas pada beban ekstrim.

Jika dibandingkan dengan studi sebelumnya, seperti yang diindikasikan oleh Haydon Kerk (2013) yang fokus pada linear actuator berbasis *stepper motor* tanpa umpan balik gaya, penelitian ini memberikan kontribusi signifikan melalui integrasi simultan *load cell* dan *encoder*. Pendekatan closed-loop yang menggabungkan umpan balik posisi dan gaya ini memungkinkan sistem untuk mempertahankan akurasi yang sangat tinggi (rata-rata *error* posisi 0.003–0.008 mm) dan stabilitas yang terjaga di berbagai skenario operasional. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut dapat meningkatkan adaptabilitas sistem terhadap perubahan beban secara mendadak dengan *error* minimal, serta membuka peluang pengembangan sistem kendali adaptif yang lebih tangguh untuk aplikasi industri kompleks.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan menunjukkan kemampuan luar biasa dalam pengendalian posisi presisi tinggi. Akurasi dan stabilitas yang terbukti melalui pengujian ekstensif, ditambah dengan validasi model melalui simulasi, menegaskan potensi besar sistem ini untuk aplikasi di berbagai bidang yang membutuhkan ketelitian tinggi. Meskipun ada ruang untuk optimasi lebih lanjut, terutama pada kondisi beban sangat tinggi dan dinamika acak, fondasi yang kuat telah diletakkan untuk pengembangan sistem kendali adaptif masa depan.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan memodelkan sistem pengendalian posisi presisi tinggi yang mengintegrasikan *stepper motor hybrid* NEMA 23 sebagai *actuator* utama, sensor *load cell* tipe *strain gauge* berkapasitas 10 kg, serta *incremental encoder* beresolusi 4000 pulsa per putaran. Sistem dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 yang menjalankan algoritma PID, dan telah divalidasi melalui simulasi MATLAB/Simulink serta pengujian langsung.

Dari hasil pengujian, sistem menunjukkan akurasi yang sangat tinggi, dengan rata-rata *error* posisi hanya 0.003–0.008 mm pada variasi massa antara 50–1000 gram. Grafik perbandingan target dan posisi aktual pun hampir tumpang tindih, menandakan sistem mampu menjaga stabilitas dan presisi. Dalam kondisi tanpa beban, sistem mencatat RMSE sebesar 0.0055 mm, sedangkan pada kondisi stabil dengan beban, *error* maksimum hanya mencapai 0.03 mm dengan standar deviasi 0.006382 mm.

Pengujian performa dilakukan dalam tiga skenario: tanpa beban, dengan beban bertahap, dan pada keadaan stabil. Sistem mampu mencapai stabilitas dalam waktu kurang dari 3 detik untuk beban rendah hingga sedang, serta tetap akurat meskipun waktu stabilisasi lebih lama saat beban maksimum (1140 gram). Koefisien determinasi (R^2) sebesar 1 menunjukkan hubungan linier sempurna antara posisi target dan posisi aktual.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pengendalian posisi presisi tinggi yang efektif, stabil, dan andal. Sistem ini tidak hanya memenuhi tujuan penelitian dari sisi perancangan, akurasi, dan performa, tetapi juga menghadirkan kontribusi melalui pendekatan closed-loop yang memanfaatkan umpan balik posisi dan gaya. Dengan akurasi hingga 0.003 mm, sistem ini berpotensi diterapkan dalam bidang manufaktur presisi, robotika, serta instrumentasi ilmiah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian dan penulisan ini. Penghargaan khusus disampaikan kepada Bapak Agus Purwanto, M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas ilmu, arahan, dan motivasi yang diberikan selama proses ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada berbagai pihak lainnya yang turut

berkontribusi namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Dahiree, O. S., Tokhi, M. O., Hadi, N. H., Hmoad, N. R., Ghazilla, R. A. R., Yap, H. J., & Albaadani, E. A. (2022). Design and Shape Optimization of Strain Gauge *Load Cell* for Axial Force Measurement for Test Benches. *Sensors*, 22(19), 1–19. <https://doi.org/10.3390/s22197508>
- AL-Naib, A. T. I. (2019). *Stepper Motor Stepper Motor Stepper Motor*. May.
- Alhinqari, A., & Alhengari, A. (2021). Simulation of *Stepper Motor* Motion and Control. 2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering, MI-STA 2021 - Proceedings, May, 573–578. <https://doi.org/10.1109/MI-STA52233.2021.9464460>
- AVIA SEMICONDUCTOR. (2020). Datasheet: HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. 9530(592), 1–9.
- Bendjedia, M., Ait-Amirat, Y., Walther, B., & Berthon, A. (2012). Position control of a sensorless *stepper motor*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2), 578–587. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161774>
- Dong, D., Leng, J., Li, Z., & Lei, B. (2025). A fully integrated *stepper motor driver* with a novel integrated current sensing technology. *IEICE Electronics Express*, 22(10). <https://doi.org/10.1587/elex.22.20250071>
- Futhupal, B. P., Deri, A. N., & Safaruddin. (2022). Sistem Pengantongan Semen Di PT. Semen Baturaja (Persero) Tbk. *Jurnal Vokasi*, 1(1).
- Haydon Kerk. (2013). *Stepper Motor* Linear Actuators 101.
- Hojati, M., & Baktash, A. (2021). Design and fabrication of a new hybrid *stepper motor* with significant improvements in torque density. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24(5), 1116–1122. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.016>
- Lydell, E. (2023). Sensorless Hybrid Field-Oriented Control Two-Phase *Stepper Motor Driver*. <http://oa.upm.es/62733/>
- Mahn, C. (2010). Optimize the life and performance of rotary *encoders* through correct mounting. IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference. <https://doi.org/10.1109/PAPCON.2010.5556509>
- Muller, I., Machado De Brito, R., Pereira, C. E., & Brusamarello, V. (2021). Title Byline *Load Cells* in Force Sensing Analysis-Theory and a Novel Application A Ring-type *Load Cell*. February.
- Peter Luong. (2022). Interfacing with Quadrature *Encoders* TI Precision Labs – Timers and Control.
- Serrano Galvez, P. (2019). Modelling and Control of Piezoactuators for High Precision Positioning Systems Used in Radioactive Environments.
- Sutikno, T. (2019). Diktat IV Kuliah Kendali *Motor: Motor Stepper, Motor Sinkron* dan Pengendalinya.
- Wen, Z., Chen, W., Xu, Z., & Wang, J. (2006). Analysis of two-phase *stepper motor driver* based on FPGA. 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'06, 00, 821–826. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2006.275668>
- Widharma, I. G. (2020). Sensor Magnet Pada Sistem Instrumentasi. Research Gate, December.
- Yadamale, P. (2002). *Stepper Motor Microstepping* with PIC18C452. *Technology*, 1–58.
- Yamamoto, T., & Yoshimoto, M. (1985). Optical *Encoder*. National Technical Report, 31(4), 566–574