

Optimalisasi Kendali Posisi dan Kecepatan Clamping Konektor Baterai dengan Dual-Loop P-PI Controller pada Mesin Press Welding

Kurniawan Dwi Yuliyanto¹, Lutfir Rahman Aliffianto^{*2}, Imam Wahyudi Farid³, Muhammad Yanuar⁴, Arif Musthofa⁵, Moh. Ismarintan Zazuli⁶

^{1,*2,3,4,5,6}Departemen Teknik Elektro Otomasi, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya, 60111, Indonesia

Email: ¹dwiuliyanto312@gmail.com, ^{*2}lrahman@its.ac.id, ³iwf@its.ac.id, ⁴muhammadyanuar2314@gmail.com, ⁵arif.musthofa@its.ac.id, ⁶ismarintan@its.ac.id.

Abstrak

Variasi diameter kontak konektor baterai pada penyambungan mesin press welding menyebabkan perubahan resistansi yang tidak terkendali, menghasilkan fluktuasi kalor dan cacat penyambungan seperti splash timah. Salah satu penyebab utamanya adalah tidak stabilnya sistem clamping akibat tidak adanya umpan balik posisi pada sistem hidrolik konvensional. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan kendali posisi dan kecepatan proses clamping dengan metode kontrol dual-loop P-PI berbasis servo pada mesin press welding. Arsitektur kontrol terdiri dari loop luar dengan kontroler P untuk kendali posisi dan loop dalam dengan kontroler PI untuk kendali kecepatan. Proses tuning awal menggunakan metode Ziegler-Nichols 1, diikuti fine tuning berdasarkan analisis respons transien sistem. Untuk memastikan kontroler dirancang pada model yang representatif, dilakukan identifikasi sistem menggunakan metode tfest pada data eksperimen aktual. Model hasil estimasi menunjukkan kesesuaian dinamika sistem dengan nilai fit sebesar 88% untuk loop kecepatan dan 84% untuk loop posisi—cukup akurat digunakan sebagai referensi perancangan kontrol. Hasil menunjukkan penurunan waktu clamping dari 4,5 detik menjadi 2,3 detik, dan kestabilan diameter konektor dalam rentang $6 \pm 0,1$ mm, tingkat keberhasilan produk mencapai 100%. Efisiensi proses meningkat hingga 49,1%, dan rasio kegagalan akibat splash menurun dari 0,14% menjadi 0,01%. Metode ini efektif untuk meningkatkan presisi dan kecepatan proses clamping konektor baterai pada sistem press welding industri.

Kata kunci: Kontrol Dual P-PI, Motor Servo, Pengelasan Tekan, Pengendalian Kecepatan, Pengendalian Posisi.

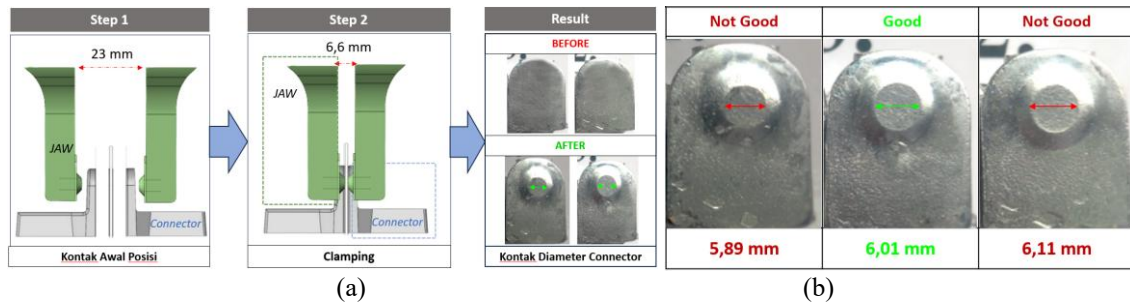
Abstract

Variations in the contact diameter of battery connectors during the press welding process cause uncontrolled changes in electrical resistance, resulting in inconsistent heat generation and welding defects such as lead splash. One of the main contributors to this issue is the instability of the clamping mechanism due to the absence of position feedback in conventional hydraulic systems. This study aims to optimize the position and speed control of the clamping process by implementing a servo-based dual-loop P-PI control method on a press welding machine. The control architecture consists of an outer P controller for position regulation and an inner PI controller for speed control. The initial tuning was carried out using the Ziegler-Nichols type 1 method, followed by iterative fine-tuning based on transient response analysis. To ensure the controller design is based on a reliable system model, system identification was performed using the tfest method on actual experimental data. The identified models showed high accuracy, with 88% fit for the speed loop and 84% fit for the position loop—indicating strong dynamic representation suitable for control design purposes. Experimental results demonstrate a reduction in clamping time from 4.5 seconds to 2.3 seconds, and consistent connector diameter within the 6 ± 0.1 mm tolerance range, achieving 100% product conformity. Process efficiency improved by 49.1%, and lead splash defects decreased from 0.14% to 0.01%. The proposed P-PI control approach effectively enhances precision and speed in the battery connector clamping process of industrial press welding systems.

Keywords: Dual-Loop P-PI Controller, Position Control, Press Welding, Servo Motor, Speed Control.

I. PENDAHULUAN

Proses penyambungan konektor pada baterai otomotif tipe AMB (*Automotive Maintenance-Free Battery*) memerlukan tahapan clamping yang presisi. Kesalahan pada posisi atau kecepatan penjepitan dapat menyebabkan deviasi diameter konektor, peningkatan resistansi sambungan, serta cacat produksi seperti splash timah dan no weld. Oleh karena itu, kestabilan dan akurasi proses clamping merupakan faktor penentu kualitas akhir produk. Berikut ini adalah visualisasi proses penyambungan connector dan juga target yang diharapkan



Gambar 1. Proses penyambungan connector dan target diameter connector (a) Tahapan (JAW) dalam proses penyambungan connector. (b) Diameter optimum hasil press welding

Di lini produksi yang menjadi objek penelitian, mesin press welding masih menggunakan aktuator hidrolik konvensional tanpa umpan balik posisi. Akibatnya, sistem tidak mampu menjamin kestabilan gerak penjepitan. Berdasarkan pengujian lapangan, rata-rata waktu clamping mencapai 4,5 detik—melebihi standar industri sebesar 3 detik—dan diameter konektor sering kali menyimpang dari toleransi $6,00 \pm 0,10$ mm. Hal ini menyebabkan meningkatnya rasio produk cacat (NG) dan tingginya angka splash timah pada konektor.

Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan penggantian sistem clamping hidrolik dengan servo motor yang dikendalikan oleh dual-loop P-PI controller, yaitu kontrol PI pada loop kecepatan (inner loop) dan kontrol P pada loop posisi (outer loop). Struktur kontrol hierarkis ini terbukti mampu memperbaiki performa sistem dinamis pada motor servo industri [1], [2], khususnya dalam hal respons waktu dan akurasi posisi. Tuning awal parameter dilakukan menggunakan metode Ziegler-Nichols 1 berbasis kurva reaksi, yang banyak digunakan dalam tuning PI pada sistem servo. Setelahnya, dilakukan fine tuning manual untuk menyesuaikan karakteristik sistem terhadap dinamika beban nyata.

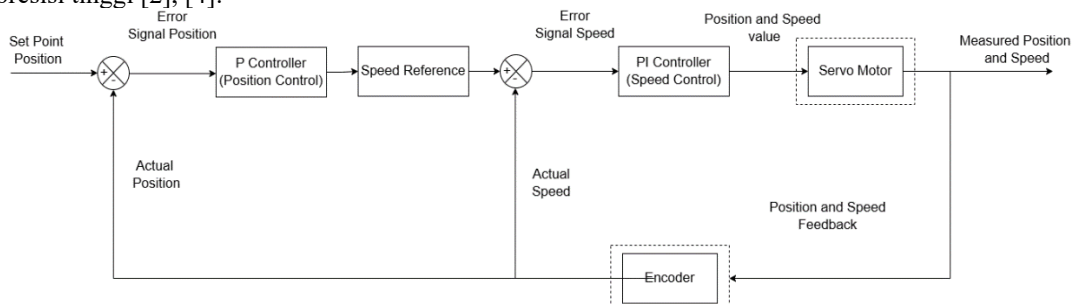
Sebagai bagian dari validasi sistem, dilakukan identifikasi model matematis menggunakan metode tftest pada MATLAB. Metode ini digunakan untuk membangun fungsi transfer sistem berdasarkan data input-output aktual dari loop kecepatan dan posisi. Proses ini menghasilkan model yang akurat dengan nilai fit sebesar 88,49% untuk loop kecepatan dan 83,95% untuk loop posisi, serta validasi kestabilan sistem secara struktural. Model hasil identifikasi digunakan sebagai dasar evaluasi performa tuning dan simulasi lanjutan berbasis model.

Penelitian ini bertujuan membuktikan bahwa implementasi kontrol servo dual-loop P-PI dapat meningkatkan efisiensi waktu, akurasi penjepitan, dan kualitas produksi pada mesin press welding industri. Sistem yang dirancang diuji langsung pada mesin aktual untuk memastikan efektivitasnya dalam kondisi operasional nyata [3].

II. METODE PENELITIAN

2.1 Arsitektur Sistem Kendali

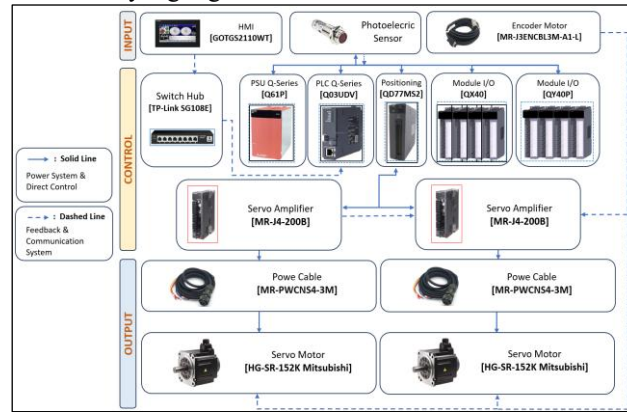
Penelitian ini mengimplementasikan kontrol dual-loop P-PI untuk sistem penjepitan konektor berbasis servo motor. Arsitektur kontrol terdiri dari dua lapisan umpan balik: loop dalam (inner loop) untuk pengendalian kecepatan dengan kontrol PI, dan loop luar (outer loop) untuk pengendalian posisi dengan kontrol P. Pemisahan ini memungkinkan tuning yang lebih terfokus untuk tiap dinamika: kestabilan kecepatan dan akurasi posisi. Pendekatan seperti ini lazim digunakan pada sistem kontrol motor industri berpresisi tinggi [2], [4].



Gambar 2. Arsitektur Sistem Kendali Dual-Loop P-PI

2.2 Perangkat Keras Sistem

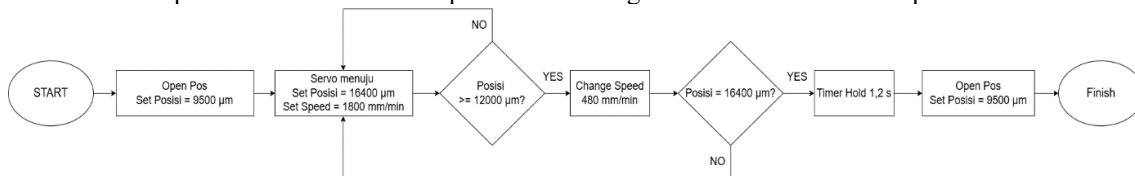
Sistem digerakkan oleh servo motor Mitsubishi HG-SR152K (1,5 kW, 2000 rpm) dan dikendalikan melalui driver MR-J4-200B. Komunikasi kontrol dijalankan oleh PLC Mitsubishi Q-Series yang juga terhubung dengan HMI GOT2000 sebagai antarmuka pengguna [5]. Gerak linier JAW clamp dihasilkan melalui gearbox rasio 25:1 dan mekanisme ballscrew berpitch 0,032 m/rev. Berikut ini adalah visualisasi Perangkat keras sistem yang digunakan



Gambar 3. Diagram Perangkat Keras Sistem

2.3 Urutan Operasi Sistem

Sistem dikendalikan secara otomatis oleh PLC, dengan strategi pergerakan bertingkat untuk menggabungkan efisiensi dan presisi. Diagram alur lengkap ditampilkan pada Gambar 4, menggambarkan logika urutan kerja mulai dari deteksi konektor hingga penjepitan dan pelepasan. Strategi ini juga mencerminkan pemanfaatan kontrol kecepatan untuk menghindari overshoot di area presisi.



Gambar 4. Flowchart Urutan Operasi Sistem Clamping Otomatis

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Proses Tuning Dual Loop P-PI Control Dengan Metode Ziegler-Nichols 1

Sistem kontrol yang digunakan merupakan struktur dual loop, dengan konfigurasi kontrol PI untuk loop kecepatan (inner loop) dan kontrol P untuk loop posisi (outer loop). Arsitektur ini dipilih karena memberikan fleksibilitas dalam pengendalian kecepatan transien secara cepat dan posisi akhir secara presisi. Untuk memperoleh parameter awal, digunakan metode Ziegler-Nichols Metode 1 (kurva reaksi) [6], [7], yang mengestimasi parameter tuning dari data respon sistem terhadap input tangga. Proses tuning dilakukan secara berurutan dimulai dari inner loop (kecepatan) untuk memastikan kestabilan dasar sistem sebelum tuning outer loop (posisi) dilakukan.

3.1.1 Perhitungan Loop Kecepatan (PI Controller)

Dari Grafik Respon Kecepatan saat P-PI Off, menunjukkan nilai Waktu tunda (L) = 10 ms dan Konstanta waktu (T) = 1010 ms. Mengacu pada formula Ziegler-Nichols 1 untuk kontrol PI, Maka diperoleh:

$$K_p \text{ Speed} = 0.9 \cdot \frac{T}{L} \quad [1]$$

$$K_p \text{ Speed} = 0.9 \cdot \frac{1010}{10} \quad [2]$$

$$K_p \text{ Speed} = 90,9 \quad [3]$$

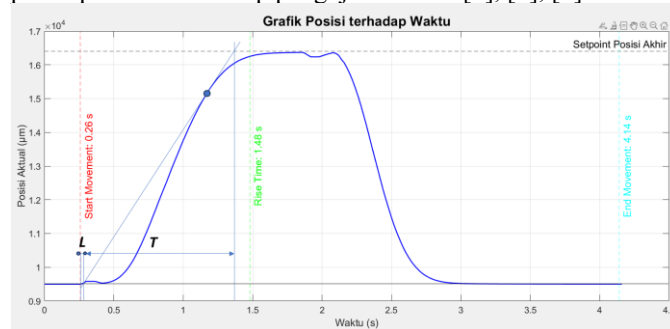
Kemudian perhitungan untuk menemukan nilai T_i dengan rumus tipe controller PI

$$T_i \text{ Speed} = \frac{L}{0.3} \quad [4]$$

$$T_{i\text{ Speed}} = \frac{10}{0.3} \quad [5]$$

$$T_{i\text{ Speed}} = 33,3 \quad [6]$$

Parameter Kp speed = 90,9 dan Ti Speed 33,3 ini selanjutnya akan dimasukkan sebagai konfigurasi awal pada kontrol loop kecepatan untuk tahap pengujian sistem [2], [8], [9].



Gambar 5. Grafik Respon Kecepatan Setelah Tuning Awal Ziegler–Nichols

3.1.2 Perhitungan Loop Posisi (P Controller)

Dengan loop kecepatan yang telah dituning dan menunjukkan kestabilan awal, proses selanjutnya adalah tuning loop posisi sebagai outer loop. Respon posisi servo terhadap gerakan servo digunakan untuk menentukan parameter kontrol awal. Respon menunjukkan nilai Waktu tunda (L) = 10 ms dan Konstanta waktu (T) = 1010 ms. Mengacu pada formula Ziegler–Nichols 1 untuk kontrol P, diperoleh:

$$K_p \text{ Position} = \frac{T}{L} \quad [7]$$

$$K_p \text{ Position} = \frac{1070}{30} \quad [8]$$

$$K_p \text{ Position} = 35,67 \quad [9]$$

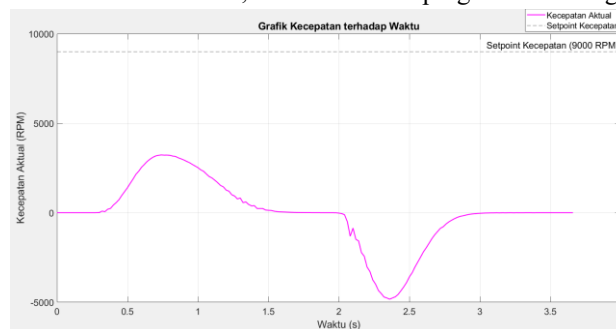
Dari perhitungan Kontrol P diatas, Maka diperoleh nilai Kp Posisi = 35,67. Maka diperoleh parameter tuning P-PI untuk Loop Posisi dan Kecepatan dengan Kp speed = 90,9, Ti Speed 33,3 dan Kp Posisi = 35,67. Parameter ini diterapkan sebagai konfigurasi kontrol awal untuk loop posisi guna mengatur target akurasi pergerakan JAW clamp.

3.1.3 Evaluasi Respon Sistem terhadap Parameter Tuning Awal

Setelah parameter kontrol awal hasil metode Ziegler–Nichols diterapkan, dilakukan pengujian untuk mengevaluasi performa dari kedua loop: loop kecepatan (inner) dan loop posisi (outer). Evaluasi dilakukan berdasarkan grafik respon sistem, pengukuran waktu clamping, dan hasil pengukuran diameter konektor.

A. Evaluasi Loop Kecepatan

Pengamatan dilakukan terhadap grafik kecepatan terhadap waktu dan setpoint. Hasil menunjukkan respon sistem mengalami undershoot besar, dan waktu clamping melebihi target.



Gambar 6. Grafik Respon Kecepatan (Z-N)

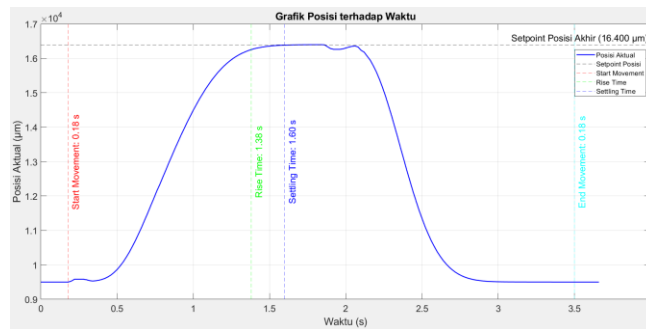
Berikut ini adalah rincian dari Grafik Loop Kecepatan diatas

Tabel 1. Respon Loop Kecepatan (Tuning ZN)

Aspek Evaluasi	Target	Hasil	Keterangan
Waktu Clamping	≤ 3 detik	3,62 detik	Di Atas Batas Target
Overshoot	0 r/min	-5770 r/min	Undershoot Besar
Rise Time	<1 detik	1,22 detik	Rise Time Terlalu Lama

B. Evaluasi Loop Posisi

Loop posisi diuji dengan kondisi inner loop tetap. Parameter posisi diuji untuk mencapai akurasi diameter konektor target ($6,00 \pm 0,1$ mm). Hasil menunjukkan nilai aktual berada di bawah batas bawah toleransi.



Gambar 7. Grafik Respon Posisi (Z-N)

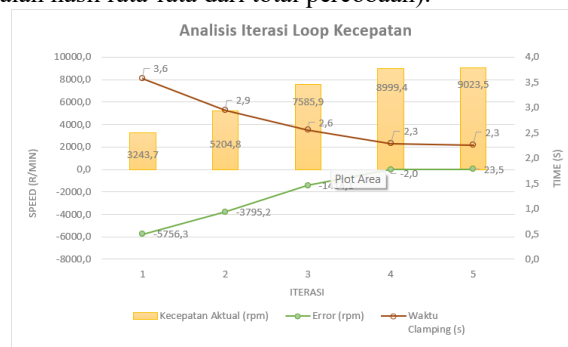
Berikut ini adalah rincian dari Grafik Loop Posisi diatas

Tabel 2. Respon Loop Posisi (Tuning ZN)

Aspek Evaluasi	Target	Hasil	Keterangan
Diameter Konektor	$6,00 \pm 0,1$ mm	5,3 mm	Di Bawah Standar
Overshoot	0 μm	-29,6 μm	Undershoot Posisi Servo
Torque	150%	30%	Torsi Jauh Dibawah Setpoint

3.2 Fine Tunning Manual Loop Kecepatan

Proses fine tuning loop kecepatan dilakukan dengan mempertahankan nilai konstanta waktu integral ($T_i = 35$), dan memvariasikan nilai K_p secara signifikan karena perubahan kecil tidak memberikan efek linier terhadap respon sistem. Tuning dilakukan dalam 5 iterasi (Setiap iterasi dilakukan 10 percobaan, nilai yang ditampilkan adalah hasil rata-rata dari total percobaan).



Gambar 8. Grafik Respon Kecepatan Servo per Iterasi Fine Tunning

Pada tabel berikut ditampilkan respon iterasi fine tuning loop kecepatan, didapatkan data pada iterasi keempat ($K_p = 280$, $T_i = 35$), sistem menunjukkan performa terbaik. Overshoot/undershoot minimal, waktu clamping berada di bawah 2,5 detik, dan tidak terdapat error steady-state. Konfigurasi ini ditetapkan sebagai parameter final loop kecepatan.

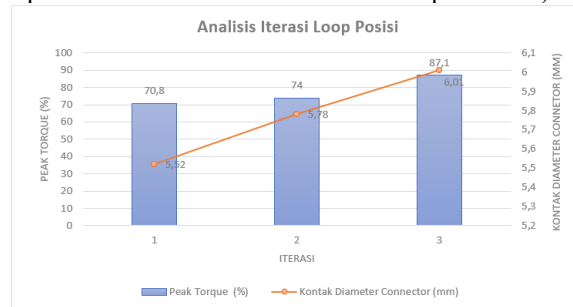
Tabel 3. Respon Iterasi Fine Tunning Loop Kecepatan

Iterasi	K_p	T_i	Waktu Clamping (s) (Target 3 s)	Overshoot / Undershoot (r/min) (Target 0 r/min)	Rise Time (s) Target (<1s)	Catatan
1	120	33	3,6	-5756	1,2	Jauh Dari Target
2	170	34	3,02	-3795	0,8	Clamping Lebih Cepat
3	230	34	2,6	-1414	0,7	Hampir Optimal

4	280	35	2,3	-1,6	0,6	Optimal
5	281	35	2,3	23,5	0,6	Overshoot

3.3 Fine Tunning Manual Loop Posisi

Setelah loop kecepatan distabilkan, tuning loop posisi dilakukan dengan variasi nilai Kp (kontrol P-only). Tujuannya adalah untuk memperoleh akurasi diameter konektor yang sesuai dengan toleransi spesifikasi produksi ($6,00 \pm 0,1$ mm). Tuning dilakukan dalam 3 iterasi (Setiap iterasi dilakukan 10 percobaan, nilai yang ditampilkan adalah hasil rata-rata dari total percobaan)



Gambar 9. Grafik Diameter Konektor vs Iterasi Fine Tunning

Pada tabel berikut ditampilkan iterasi fine tuning untuk loop posisi, didapatkan data hasil terbaik diperoleh pada iterasi ketiga dengan Kp = 80, menghasilkan diameter konektor 6,01 mm yang berada tepat di tengah rentang toleransi. Nilai ini ditetapkan sebagai parameter akhir loop posisi.

Tabel 4. Respon Iterasi Fine Tuning Loop Posisi

Iterasi	Kp	Torque (%) (Target 150%)	Rata-rata Diameter Hasil (mm) (Target $6,00 \pm 0,1$ mm)	Catatan
1	36	70,8	5,94	Diameter terlalu kecil
2	60	74	6,05	Melewati batas atas
3	80	87,1	6,01	Parameter optimal

3.4 Rekapitulasi Hasil Pengujian

Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian Ziegler Nichols dan Fine Tuning.

3.4.1 Optimasi Loop Kecepatan

Setelah dilakukan proses tuning awal dengan metode Ziegler–Nichols dan dilanjutkan dengan fine tuning manual, diperoleh peningkatan performa sistem yang signifikan pada loop kecepatan. Parameter optimal ($K_p = 280$, $T_i = 35$) menghasilkan waktu clamping tercepat sekaligus kestabilan respon servo tanpa overshoot atau osilasi. Perbandingan hasil sebelum dan sesudah fine tuning disajikan pada tabel berikut.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Loop Kecepatan

Metode Tuning	Kp	Ti	Rise Time (s) Target (<1s)	Overshoot / Undershoot (r/min) (Target 0 r/min)	Waktu Clamping (s) (Target 3 s)	OK/ NG
Ziegler–Nichols 1	90,9	33,3	1,22	-5770	3,62	NG
Fine Tuning Manual	280	35	0,6	-1,6	2,30	OK

3.4.2 Optimasi Loop Posisi

Evaluasi dilakukan terhadap output sistem berupa diameter konektor setelah penjepitan. Parameter awal dari metode Ziegler–Nichols belum menghasilkan posisi akhir yang presisi. Setelah dilakukan fine tuning, diperoleh parameter optimal ($K_p = 80$) yang mampu menjaga akurasi diameter konektor di tengah rentang toleransi produksi.

Tabel 6. Rekapitulasi Hasil Loop Posisi

Metode Tuning	Kp	Torque (%) (Target 150%)	Diameter Konektor (mm) (Target $6,00 \pm 0,1$ mm)	OK/ NG
Ziegler–Nichols 1	35,67	30	5,30	NG
Fine Tuning Manual	80	87	6,01	OK

Dengan kombinasi loop kecepatan dan posisi yang telah dioptimalkan, sistem kontrol dual-loop menghasilkan performa penjepitan yang presisi dalam waktu cepat, sesuai dengan spesifikasi industri.

3.4.3 Kesimpulan Rekapitulasi Tuning

Berdasarkan hasil pengujian dan fine tuning terhadap kedua loop, diperoleh parameter yang mampu menghasilkan performa optimal dari sisi waktu clamping dan akurasi posisi. Konfigurasi parameter akhir yang digunakan pada sistem adalah sebagai berikut:

Tabel 7. Rekapitulasi Tuning

Loop	Jenis Kontrol	Kp	Ti	Hasil Akhir Utama
Kecepatan	PI	280	35	Waktu Clamping: 2,30 detik
Posisi	P	80	—	Diameter Konektor: 6,01 mm

3.5 Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem dilakukan sebagai bentuk validasi terhadap performa kontrol serta untuk mendapatkan model matematis orde transfer function yang merepresentasikan dinamika aktual dari sistem clamping servo. Metode yang digunakan adalah tfest (transfer function estimation) pada MATLAB, dengan input berupa data respon aktual dari sistem hasil tuning final (loop kecepatan dan loop posisi). Model diidentifikasi secara terpisah untuk:

- Identifikasi Sistem Loop kecepatan (inner loop PI Control),
- Identifikasi Sistem Loop posisi (outer loop P Control).

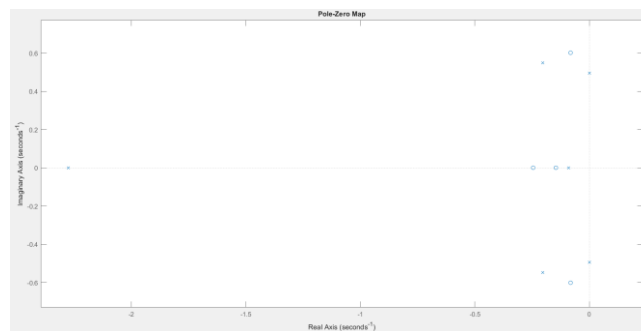
3.5.1 Identifikasi Sistem Loop Kecepatan

Identifikasi dilakukan dengan mengambil data referensi kecepatan dan kecepatan aktual servo pada sistem kontrol kecepatan yang telah dituning optimal ($K_p = 280$, $T_i = 35$). Estimasi transfer function dilakukan dengan variasi jumlah pole dan zero. Hasilnya ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 8. Hasil Identifikasi Loop Kecepatan

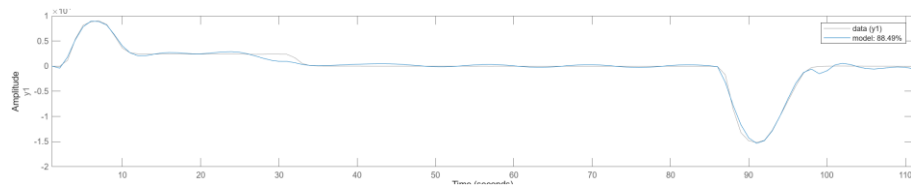
Iterasi	Poles	Zeros	Fit (%)	FPE	Stabilitas
1	4	4	78,34%	9,00978	Optimal
2	5	4	87,52%	3,25824	Optimal
3	6	4	88,49%	2,82917	Paling Optimal

Model dengan 6 poles dan 4 zeros memberikan fit terbaik sebesar 88,49%, dengan FPE paling kecil. Sistem tersebut sudah stabil dikarenakan semua *poles* (x) berada di sebelah kiri sumbu imajiner ($\text{Re}(s) < 0$), dan Tidak terdapat *zero* (o) dominan di sebelah kanan, artinya tidak ada karakteristik non-minimum phase.



Gambar 10. Pole Zero Map Identifikasi Loop Kecepatan

Overlay respon menunjukkan bahwa bentuk kurva model sangat dekat dengan respon sistem sebenarnya, terutama pada fase akselerasi dan pencapaian steady-state. Bisa dilihat pada gambar berikut



Gambar 11. Overlay Respon Model dan Data Aktual (Kecepatan)

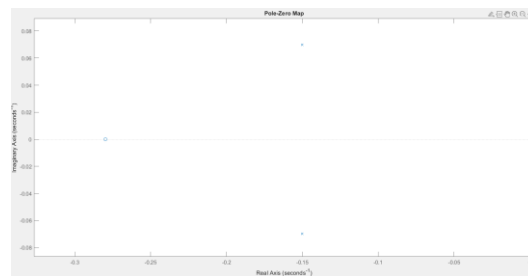
3.5.2 Identifikasi Sistem Loop Posisi

Data referensi posisi dan posisi aktual servo digunakan sebagai dasar identifikasi loop posisi. Data yang digunakan untuk identifikasi berasal dari pengujian aktual sistem dengan parameter kontrol posisi hasil fine tuning akhir (K_p posisi=80, K_p Speed=280, T_i Speed=35). Estimasi dilakukan dengan kombinasi pole dan zero berbeda, dan hasilnya dirangkum pada tabel berikut

Tabel 9. Hasil Iterasi Loop Posisi

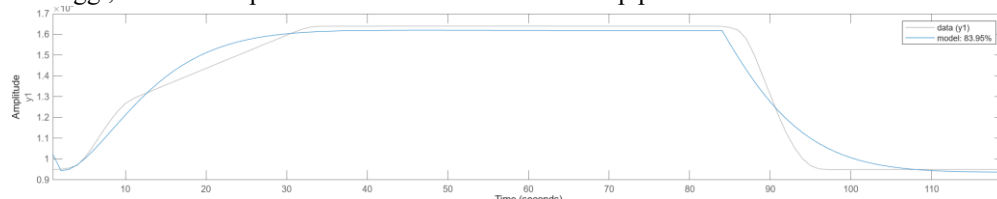
Iterasi	Poles	Zeros	Fit (%)	FPE	Stabilitas
1	1	1	79.93	3,65465e+07	Optimal
2	2	0	82.04	2,97733e+07	Optimal
3	2	1	83.95	2,41746e+07	Paling Optimal

Model terbaik diperoleh pada konfigurasi 2 pole dan 1 zero, dengan nilai fit sebesar 83,95% dan FPE terendah. Sistem tersebut sudah stabil dikarenakan semua *poles* (x) berada di sebelah kiri sumbu imajiner ($\text{Re}(s) < 0$), dan Tidak terdapat *zero* (o) dominan di sebelah kanan, artinya tidak ada karakteristik non-minimum phase. Dapat dibuktikan pada gambar Poles dan Zeros Map berikut.



Gambar 12. Pole Zero Map Identifikasi Loop Posisi

Overlay respon model menunjukkan kesesuaian bentuk dengan data aktual, terutama dalam hal kecepatan pergerakan awal dan kestabilan posisi akhir. Dengan kompleksitas model yang sederhana dan performa tinggi, model ini dipilih untuk mewakili dinamika loop posisi servo.



Gambar 13. Overlay Respon Model dan Data Aktual (Posisi)

3.6 Perbandingan Kinerja Sistem Press Welding Lama vs Baru

Untuk menilai efektivitas sistem kontrol baru berbasis dual-loop P-PI yang telah diimplementasikan pada mesin press welding, dilakukan perbandingan kinerja terhadap sistem sebelumnya yang menggunakan aktuator hidrolik konvensional. Perbandingan dilakukan berdasarkan tiga indikator utama:

1. Waktu proses clamping,
2. Konsistensi hasil penjepitan (diameter konektor),
3. Produktivitas mesin (output produksi per jam).

Pengujian dilakukan dalam kondisi operasional aktual di jalur produksi dengan objek dan siklus kerja yang identik.

3.6.1 Perbandingan Waktu Clamping

Waktu clamping didefinisikan sebagai durasi dari awal pergerakan penjepit hingga kembali ke posisi awal. Sistem lama memiliki waktu clamping relatif tetap karena berbasis aliran fluida, sedangkan sistem servo memiliki waktu clamping lebih fleksibel dan dapat dipercepat melalui tuning.

Tabel 10. Perbandingan Waktu Clamping

Sistem Press Welding	Rata-rata Waktu Clamping (s)	Peningkatan (%)
Sistem Lama (Hidrolik)	4,50	–
Sistem Baru (Dual-Loop Servo)	2,29	49,1%

Dengan waktu clamping yang hampir setengah lebih cepat, sistem baru menunjukkan efisiensi waktu yang signifikan, sehingga berdampak langsung pada output produksi.

3.6.2 Perbandingan Hasil Penjepitan (Diameter Konektor)

Sistem servo dengan kontrol posisi memungkinkan penyesuaian parameter secara presisi. Hal ini memengaruhi akurasi penjepitan dan konsistensi diameter konektor setelah proses clamping.

Tabel 11. Perbandingan Diameter Hasil Clamping

Sistem Press Welding	Diameter Rata-rata (mm)	Toleransi Target ($6,00 \pm 0,10$ mm)	Status Evaluasi
Sistem Lama	5,00	Di luar batas atas	Tidak memenuhi
Sistem Baru	6,01	Dalam batas toleransi	Memenuhi

Sistem lama memiliki variasi tinggi akibat respon aktuator hidrolik yang kurang presisi. Sistem baru menunjukkan kontrol presisi tinggi, dengan hasil penjepitan berada tepat di tengah rentang toleransi.

3.6.3 Perbandingan Output Produksi Mesin

Dampak dari perbaikan waktu dan akurasi menghasilkan peningkatan output. Dengan siklus clamping yang lebih cepat, sistem baru memungkinkan lebih banyak produk diproses dalam waktu yang sama.

Tabel 12. Perbandingan Output Produksi Mesin

Sistem Press Welding	Output Produksi per Jam (pcs)	Peningkatan (%)
Sistem Lama	660	–
Sistem Baru	900	+36,4%

IV. KESIMPULAN

Sistem kontrol penjepitan konektor berbasis servo dengan arsitektur dual-loop P–PI telah berhasil diimplementasikan pada mesin press welding. Proses tuning awal dilakukan menggunakan metode Ziegler–Nichols 1 berdasarkan data respons tanpa kontrol, yang kemudian dilanjutkan dengan fine tuning manual secara bertahap pada loop kecepatan dan posisi untuk memastikan stabilitas serta performa optimal. Parameter akhir yang digunakan adalah $K_p = 280$ dan $T_i = 35$ untuk loop kecepatan (kontrol PI), serta $K_p = 80$ untuk loop posisi (kontrol P-only). Nilai ini diperoleh melalui iterasi tuning berbasis respons aktual dan memberikan hasil yang sesuai terhadap kriteria waktu, akurasi, dan kestabilan. Identifikasi sistem menggunakan metode tfest menghasilkan model loop kecepatan dengan 6 pole, 4 zero, dan tingkat kecocokan (fit) sebesar 88,49%, serta model loop posisi dengan 2 pole, 1 zero, dan tingkat kecocokan sebesar 83,95%. Analisis pole-zero map menunjukkan bahwa kedua model stabil dan valid berdasarkan overlay respons terhadap data aktual. Model ini dapat digunakan sebagai representasi matematis sistem untuk validasi, simulasi lanjutan, atau pengembangan kontrol berbasis model di masa depan.

Hasil implementasi menunjukkan peningkatan performa yang signifikan. Waktu clamping berhasil dipangkas menjadi 2,30 detik, lebih cepat 49,1% dibandingkan sistem sebelumnya. Diameter konektor mencapai 6,01 mm, tepat di tengah toleransi $6,00 \pm 0,10$ mm, sementara output produksi meningkat menjadi 900 pcs per jam, naik 36,4% dari sistem lama. Peningkatan ini mencerminkan keberhasilan sistem kontrol dalam mengoptimalkan proses penyambungan konektor baterai.

REFERENSI

- [1] S. M. Yang and K. W. Lin, "Automatic Control Loop Tuning for Permanent-Magnet AC Servo Motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 3, pp. 1499–1506, 2016, doi: 10.1109/TIE.2015.2495300.
- [2] M. Yang, K. Liu, C. Shang, Y. Chen, and D. Xu, "A Dual-Loop Position Servo System Based on Position and Speed Parallel Control Structure," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 45931–45942, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3168293.
- [3] S. Autso, K. Kudelina, T. Vaimann, A. Rassõlkin, and A. Kallaste, "Principles and Methods of Servomotor Control: Comparative Analysis and Applications," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 6, 2024, doi: 10.3390/app14062579.
- [4] A. W. Abdul Ali, F. A. Abdul Razak, and N. Hayima, "A Review on The AC Servo Motor Control Systems," *Elektr. J. Electr. Eng.*, vol. 19, no. 2, pp. 22–39, 2020, doi: 10.11113/elektrika.v19n2.214.
- [5] S. Sadi, "Implementasi Human Machine Interface pada Mesin Heel Lasting Chin Ei Berbasis Programmable Logic Controller (Implementation of Human Machine Interface on Chin Ei's Heel Lasting Machine Based on Programmable Logic Controller)," *J. Tek.*, vol. 9, no. 1, 2020, doi: 10.31000/jt.v9i1.2561.
- [6] A. A. Azman, M. H. F. Rahiman, N. N. Mohammad, M. H. Marzaki, M. N. Taib, and M. F. Ali, "Modeling and comparative study of PID Ziegler Nichols (ZN) and Cohen-Coon (CC) tuning method for Multi-tube aluminum sulphate water filter (MTAS)," *Proc. - 2017 IEEE 2nd Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst. I2CACIS 2017*, vol. 2017-Decem, no. October, pp. 25–30, 2017, doi: 10.1109/I2CACIS.2017.8239027.
- [7] R. F. Nugroho, "Sistem Pengendalian Motor Dc Menggunakan Pid Dengan Metode Ziegler – Nichols (Implementasi Palang Pintu Parkir)," *Foreign Aff.*, 2019.
- [8] Y. Zuo, S. Zhu, Y. Cui, C. Liu, and X. Lin, "Adaptive PI Controller for Speed Control of Electric Drives Based on Model Reference Adaptive Identification," *Electron.*, vol. 13, no. 6, pp. 1–15, 2024, doi: 10.3390/electronics13061067.
- [9] Y. Chen, M. Yang, K. Liu, J. Long, D. Xu, and F. Blaabjerg, "Reversed Structure Based PI-Lead Controller Antiwindup Design and Self-Commissioning Strategy for Servo Drive Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 7, pp. 6586–6599, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3097602.
- [10] M. T. Ngo, H. N. Van, T. X. Hoang, H. P. Van, and M. P. Van, "Position Control of Servo Motor on a Practical Model," *Conf. Proc. - 2023 IEEE Asia Meet. Environ. Electr. Eng. EEE-AM 2023*, pp. 1–6, 2023, doi: 10.1109/EEE-AM58328.2023.10395368.
- [11] A. A. Yufrida, L. P. Rahayu, and D. F. Syahbana, "Implementasi Kontrol Torsi Motor Servo Menggunakan Metode PI pada Sistem Automatic Pallet Dispenser," *J. Tek. ITS*, vol. 10, no. 2, 2021, doi: 10.12962/j23373539.v10i2.72970.