

Implementasi Kontrol Torsi Motor Servo Menggunakan Metode PI pada Sistem *Automatic Pallet Dispenser*

Aulia Alfiana Yufrida, Lucky Putri Rahayu, dan Dwiky Fajri Syahbana
Departemen Teknik Elektro Otomasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: lucky@eea.its.ac.id

Abstrak—Teknologi pada sistem paletisasi menggunakan robot telah berkembang pesat untuk meningkatkan fleksibilitas dan kecepatan produktifitas. Salah satu yang sedang dikembangkan di sebuah industri yaitu *Robotic Palletizer*. Terdapat beberapa varian ukuran palet yang digunakan, oleh karena itu pada subsistem *Automatic Pallet Dispenser* diperlukan otomatisasi untuk menyesuaikan ukuran palet. Untuk memenuhi hal tersebut, diperlukan motor servo AC dengan menggunakan metode Proporsional Integral (PI) dengan *Auto Tuning*. Proses *tuning* dilakukan untuk mengontrol kecepatan motor dan berhubungan dengan torsi. Selanjutnya torsi dikontrol untuk membatasi kinerja motor untuk menghimpit palet. Hasil *Auto Tuning* PI pada motor servo didapatkan nilai parameter yang sesuai adalah $K_p=63,8$ dan $K_i=14,9$. Kecepatan pada motor servo berhasil sesuai dengan *set point* dengan *overshoot* sebesar 1.6% dan mempercepat *settling time* selama 94 ms. Hasil kontrol torsi didapatkan dengan nilai limit torsi maksimum adalah 70% mampu menghimpit seluruh varian palet dan diperlukan *roller limit switch* sebagai sensor tambahan.

Kata Kunci—*Automatic Pallet Dispenser*, *Auto Tuning*, Kontrol Torsi, Motor Servo, *Proporsional Integral*.

I. PENDAHULUAN

TEKNOLOGI pada proses produksi sebuah industri terus dikembangkan. Hal ini disebabkan kebutuhan untuk meningkatkan produksi maupun perhatian khusus tentang keamanan dan kesehatan pekerjanya. Salah satu penggunaan robot yang dapat meningkatkan fleksibilitas dan kecepatan produktifitasnya yaitu *Robotic Palletizer*. Sistem ini memiliki beberapa subsistem, Salah satunya adalah *Automatic Pallet Dispenser*. Fungsinya adalah menampung tumpukan palet dan mendistribusikan satu per satu palet ke sub-sistem selanjutnya.

Pada umumnya, industri menggunakan satu ukuran palet pada sistem *Robotic Palletizer*-nya, sehingga *Automatic Pallet Dispenser* dirancang hanya menyesuaikan ukuran palet tersebut. Pada mesin sebelumnya, sistem ini dapat digerakkan menggunakan sistem pneumatik. Hal ini didukung oleh penelitian yang membahas desain mesin palet dispenser dengan penggerak sistem pneumatik yang mampu menampung palet ukuran 1,33x1,13mx 0,01m sebanyak 10 palet [1]. Namun, terdapat perusahaan lainnya menggunakan beberapa variasi ukuran palet sebagai tempat penataan produknya.

Sebagai solusi masalah tersebut diperlukan otomatisasi mesin yaitu menggunakan motor servo AC pada *Servo Adjuster* untuk menghimpit palet sehingga *Automatic Pallet Dispenser* dapat digunakan beberapa varian ukuran palet. Untuk meningkatkan kinerja motor servo diperlukan proses *tuning* menggunakan *Auto Tuning* proporsional-integral (PI) untuk mencegah kesalahan pada *tuning* manual. Hasil *tuning*

selanjutnya digunakan untuk kontrol torsi menggunakan kecepatan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Palet

Palet merupakan platform yang membantu produk lebih mudah ditransportasikan dan dapat dipindahkan menggunakan *forklift* atau alat pengangkat lainnya dalam sistem otomatis [2]. Berbagai jenis desain dan ukuran diproduksi secara komersial untuk memenuhi berbagai persyaratan pengiriman. Seperti palet dengan pelacak, palet blok, palet dua arah (*two-way pallets*), palet empat arah (*four-way pallets*), dan lainnya [3]. Bentuk dari tipe-tipe palet tersebut ditunjukkan pada Gambar 1. Bahan pembuat palet dapat dibuat dari berbagai bahan seperti kayu lunak, kayu keras, plastic, karton, aluminium, dan komposit [4].

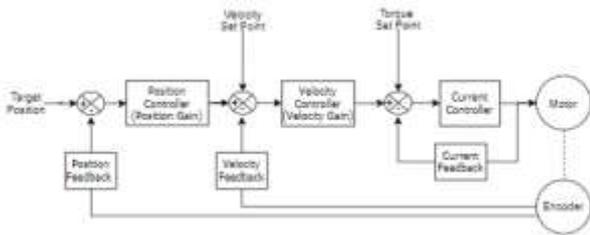
B. Driver Servo

Kontroler dari servo motor atau yang dikenal dengan nama driver servo adalah sistem untuk mengontrol sebuah servo motor, karena dirancang untuk mengontrol dengan tingkat presisi yang tinggi pada motor (*high precision positioning*), seperti kontrol vektor, *direct torque control* (DTC), kontrol preditif, dan menawarkan kontrol posisi yang tepat dengan respon dinamis yang sangat cepat mengikuti perintah dari pengontrol [5]. Pada driver servo secara umum terdiri atas kontrol loop tertutup arus (torsi), kontrol loop kecepatan, dan kontrol loop posisi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kontrol loop tersebut dikendalikan sesuai dengan masukan dari pengontrol gerak (*motion controller*) selanjutnya encoder akan memberikan umpan balik untuk mengoreksi kesalahan dan mencapai kinerja yang dibutuhkan agar keluaran objek yang dikontrol sesuai dengan masukannya.

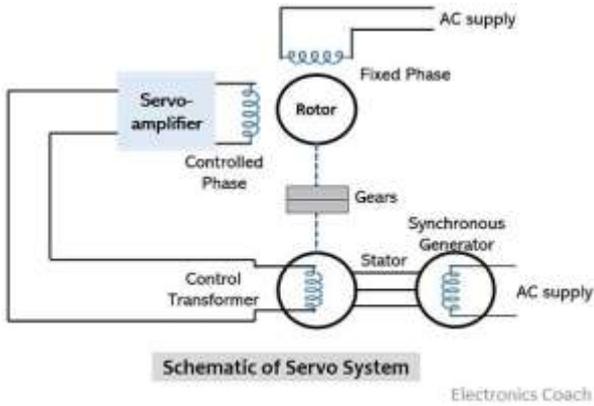
C. Motor Servo AC

Motor servo adalah perangkat listrik yang digunakan pada mesin-mesin industri yang berfungsi untuk mendorong atau memutar objek yang membutuhkan kontrol dengan presisi tinggi dalam hal posisi sudut, akselerasi, dan kecepatan. Kemampuan kontrol tersebut tidak dimiliki oleh motor AC. Hal ini dikarenakan motor servo menggunakan sistem *closed loop* yaitu berupa encoder untuk umpan balik posisi untuk mengontrol target posisi motor, keluaran torsi, kecepatan rotasi.

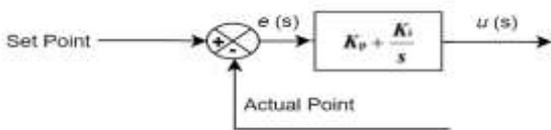
Jenis motor servo yang digunakan adalah motor *brushless* karena rotor memiliki daya magnet permanen yang kuat. Selain itu, stator terdiri dari beberapa kumparan konduktor, dan rotor berputar saat kumparan berada dalam urutan yang ditentukan. Pergerakan rotornya ditentukan oleh frekuensi



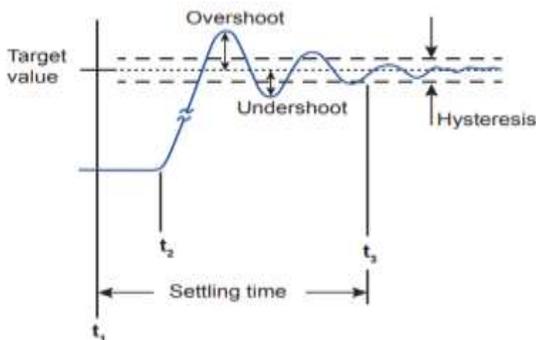
Gambar 1. Diagram kontrol driver servo.



Gambar 2. Prinsip kerja motor servo AC.



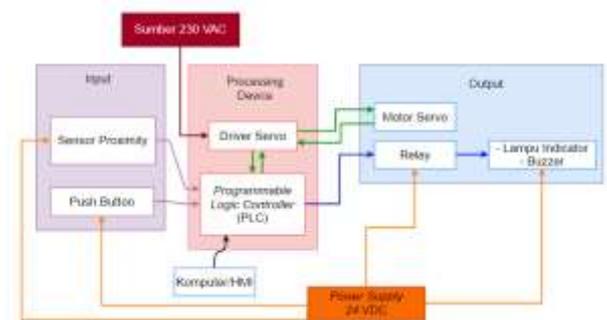
Gambar 3. Blok diagram kontrol PI.



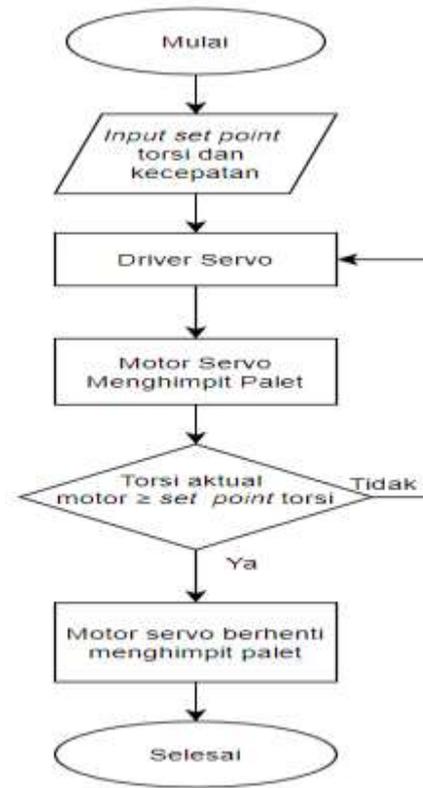
Gambar 4. Graik respon overshoot, undershoot, dan settling time.

stator, fase, polaritas, dan arus ketika arus yang benar disuplai ke kumparan stator pada waktu yang tepat. Jenis encoder pada motor ini adalah tipe *absolute* yang mana dapat menjaga jalur dari posisi shaft motor jika sistem *power* mati sehingga jika dibandingkan dengan tipe *incremental*.

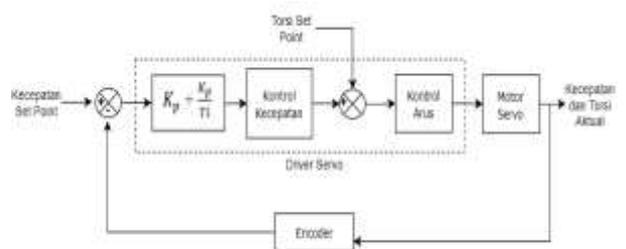
Prinsip kerja dari motor servo AC menggunakan prinsip motor induksi dua fasa AC ditunjukkan pada Gambar 2. Belitan utama stator atau referensi dieksitasi oleh sumber tegangan AC konstan. Terminal stator lainnya dari servomotor terhubung ke transformator kontrol melalui belitan kontrol. Akibat dari tegangan referensi yang diberikan, generator sinkron berputar dengan kecepatan tertentu dan mencapai spesifik posisi sudut tertentu yang dibandingkan dengan posisi sudut poros generator sinkron. Selanjutnya, perbandingan dua posisi sudut memberikan sinyal kesalahan. Lebih detail, tingkat tegangan dari posisi poros yang sesuai dibandingkan dengan sinyal kesalahan.



Gambar 5. Blok diagram sistem.



Gambar 6. Flowchart sistem.



Gambar 7. Blok diagram servo adjuster.

Sinyal kesalahan ini sesuai dengan tingkat tegangan pada transformator kontrol dan kemudian dipasang pada penguat servo yang menghasilkan tegangan kontrol variabel. Tegangan yang diberikan inilah, rotor kembali mencapai kecepatan tertentu dan mulai berputar. Selanjutnya kecepatan tersebut pertahan sampai sinyal kesalahan menjadi nol sehingga mencapai posisi motor yang diinginkan dalam servomotor AC [6].

Persamaan tegangan masukan berupa tegangan dalam rotor motor yang dapat dinyatakan dengan persamaan [7]:

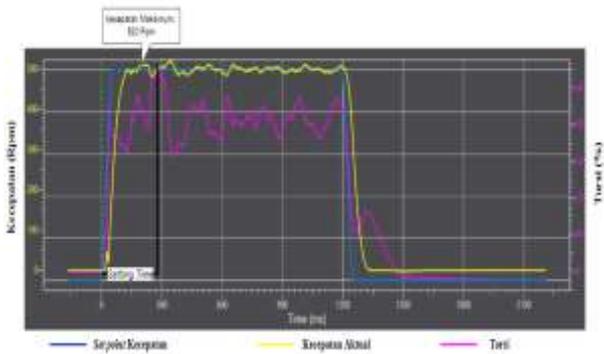
$$v_{qs}^r = (r_s + L_{qs}s) i_{qs}^r + \omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \omega_r \lambda_m \quad (1)$$



Gambar 8. Profil gerakan saat *auto tuning*.



Gambar 9. Kriteria *auto tuning*.



Gambar 10. Grafik respon motor sebelum *auto tuning*.

$$v_{ds}^r = (r_s + L_{ds}s) i_{qs}^r + \omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (2)$$

dimana $v_{qs}^r, v_{ds}^r, i_{qs}^r, i_{ds}^r$ adalah tegangan dan sumbu q - dan d -; r_s adalah resistansi; L_{qs} dan L_{ds} masing-masing adalah induktansi sumbu q - dan d -; λ_m adalah hubungan fluks yang ditetapkan oleh rotor magnet permanen; ω_r adalah kecepatan elektrikal rotor; dan “ s ” mewakili operator Laplace.

Torsi elektromekanik motor yang dihasilkan adalah

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_m i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs}^r i_{ds}^r] \quad (3)$$

Dari Persamaan 3 arus motor dapat diatur mengikuti lintasan untuk mencapai torsi maksimum per ampere. Dikarenakan T_e diasumsikan sebanding dengan arus sumbu q atau konstan, konstanta torsi motor dinyatakan sebagai berikut:

$$K_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_m = \frac{3}{2} K_e \quad (4)$$

Karena motor menggunakan magnet permanen. Nilai fluks adalah konstan. Sehingga persamaan torsi dapat ditulis sebagai

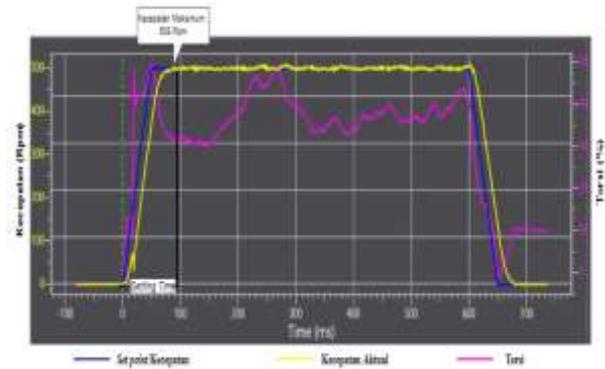
$$T_e = K_t I \quad (5)$$

Persamaan mekanikal dapat ditulis sebagai

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m + T_L \quad (6)$$

Dimana J adalah kombinasi rotor dan inersia beban, B adalah koefisien gesekan, ω_m adalah kecepatan mekanik, dan T_L adalah torsi beban.

Kecepatan putaran motor merupakan fungsi dari torsi elektronik dan torsi beban. Adapun persamaan kecepatan motor dengan torsi dinyatakan sebagai berikut:



Gambar 11. Grafik respon motor sesudah *auto tuning*.



Gambar 12. Grafik hasil pengujian kecepatan terhadap torsi.

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (7)$$

D. Kontrol Proposional Integral

Kontrol PI merupakan penggabungan antara kontrol proposional dan kontrol integral. Kelebihan dari kontrol proposional adalah memiliki output yang sebanding dengan besar sinyal kesalahan (eror), namun kontrol ini akan selalu menunjukkan offset (steady state error) pada output proses yang dikontrolnya. Semakin besar K_p yang digunakan, maka error steady akan semakin mengecil juga mempercepat respon output proses [8]. Sedangkan kelebihan kontrol integral adalah dapat menghilangkan *steady state error* menjadi nol. Sehingga, Diagram kontrol PI ditunjukkan pada Gambar 3 dan aksi kontrol dari kontroler ini dapat didefinisikan pada Persamaan 8.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (8)$$

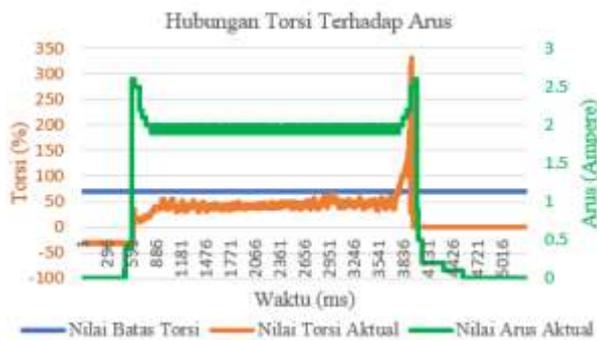
Sehingga fungsi transfer dari kontroler adalah sebagai

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i} = K_p + (1 + \frac{1}{T_i s}) \quad (9)$$

Dimana $u(t)$ = keluaran terhadap waktu; e = eror; K_p = konstanta *propotional gain*; K_i = konstanta *integral gain*; T_i = waktu integral.

E. Auto Tuning

Teknologi pada driver servo telah dilengkapi pendukung kemampuan tambahan dalam sebuah kontrol PI, yaitu *Auto Tuning*. Driver servo mampu mengatur parameter *gain* (nilai penguatan) secara otomatis [8]. Nilai *gain* diatur secara *realtime* serta dapat menurunkan resonansi dan getaran jika filter adaptif diaktifkan [7]. *Auto tuning* merupakan cara mudah untuk meningkatkan kinerja mesin, mengurangi



Gambar 13. Grafik hubungan torsi terhadap arus.



Gambar 14. Hasil pengujian palet ukuran 1200 mm x 1200 mm.



Gambar 15. Hasil pengujian palet CF dengan nilai batas torsi 70%.

waktu pengaturan *gain*, dan mencegah kesalahan dalam *tuning* manual [7].

Tuning dilakukan beberapa kali siklus kecepatan trapesium hingga menemukan *gain* yang tepat. Selain itu, *settling time* dan *overshoot* digunakan sebagai pembobotan untuk penyetelan *gain loop* [7]. Penjelasan pembobotan dijelaskan sebagai berikut:

- a. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam kisaran nilai akhir ukuran yang ditentukan oleh presentase absolut dari nilai akhir (biasanya 2% atau 5%) [9].
- b. *Overshoot* maksimum adalah nilai puncak atau lonjakan dari kurva respon [9]. Jika kondisi nilai *steady state* berbeda-beda dari kurva respon dapat menggunakan maksimum persen *overshoot* yang didefinisikan oleh Persamaan 10.

$$\% \text{ overshoot} = \frac{\text{Nilai tertinggi} - \text{Nilai target}}{\text{Nilai target}} \times 100\% \quad (10)$$

Jumlah persentase maksimum *overshoot* secara langsung menunjukkan stabilitas relative sistem.

Auto tuning memiliki tujuan adalah sebagai berikut [10]:

- a. Mengurangi *settling time* untuk mengurangi waktu siklus.
- b. Mengurangi getaran mekanik untuk meningkatkan masa pemakaian mesin.

Tabel 1.
Pengujian *auto tuning*

Pengujian ke-	1	2	3	4	5
Set Point					
Kecepatan (Rpm)	500				
Kecepatan Aktual (Rpm)	531	518	510	510	508
Gain Proporsional	16	32	40,8	53,7	63,8
Gain Integral	3	6,2	8,7	11,7	14,9
Overshoot (%)	6,2	3,6	2	2	1,6
Settling Time (ms)	1000	293	171	155	95

Tabel 2.

Perbandingan konstanta *gain* PI sebelum dan sesudah *auto tuning*

Parameter	Parameter Bawaan (<i>default</i>)	Parameter <i>Auto Tuning</i>
Gain Proporsional	21,9	63,8
Gain Integral	5,5	14,9

Tabel 3.

Data pengujian parameter kontrol torsi

Nilai Batas Torsi Maksimum (%)	Nilai Torsi Output (Nm)	Parameter Bawaan (<i>default</i>)	Kondisi <i>Servo Adjuster</i>
50	95,6	8,45	Tidak menghimpit palet
60	114,72	10,14	Menghimpit palet
70	133,84	11,83	Menghimpit palet
80	152,96	13,52	Sangat menghimpit palet

- c. Mengurangi *overshoot* dan *undershoot* untuk mencapai posisi target dalam histerisis yang diperbolehkan.
- d. Mengurangi waktu respon untuk mencapai posisi target lebih cepat.

Grafik dari respon *overshoot*, *undershoot*, dan *settling time* ditunjukkan pada Gambar 4.

III. URAIAN PENELITIAN

Perancangan kontrol torsi pada *Automatic Pallet Dispenser* terdiri atas perancangan sistem, pembuatan *flowchart*, dan proses *auto tuning*.

A. Blok Diagram Sistem

Blok diagram pada *Automatic Pallet Dispenser* secara umum ditunjukkan pada Gambar 5, dimana PLC (*Programmable Logic Controller*) sebagai controller utamanya. Sinyal dari *input* untuk menjalankan perintah didapatkan dari sensor, *push button*, dan *feedback* dari inverter. *Output* dari PLC selanjutnya akan memerintahkan relay, solenoid valve, kontaktor untuk menyalakan lampu indikator dan *buzzer* apabila terdapat eror pada sistem. Selain itu PLC memerintahkan driver servo untuk menggerakkan motor servo dan mengirimkan sinyal kembali ke PLC. Driver servo mendapatkan sumber tegangan 230VAC.

B. Flowchart Sistem

Flowchart sistem guna menghimpit palet ditunjukkan pada Gambar 6, dimana *input set point* torsi dan kecepatan dimasukkan. *Set point* kecepatan dimasukkan pula untuk membatasi kerja dari motor servo sebagai loop terluar dari kontrol torsi. Perintah *set point* dikirimkan ke driver servo, selanjutnya motor servo akan menghimpit palet. Setelah nilai torsi aktual dari motor servo dibandingkan dengan *set point*

Tabel 4.
Data pengujian batas torsi maksimum 60%

Varian Palet	Nilai Batas Torsi Maks. (%)	Nilai Torsi Saat Menghimpit (%)	Kondisi <i>Servo Adjuster</i>	Error (%)
CF (1100mm x 1100mm)	60	58,7	Menghimpit palet	2,2
	60	60,4	Berhenti sebelum menghimpit palet	0,7
	60	58,2	Menghimpit palet	3,0
	60	60,2	Berhenti sebelum menghimpit palet	0,3
	60	60,6	Berhenti sebelum menghimpit palet	1,0
Chemea (1100mm x 1200mm)	60	60,5	Menghimpit palet	0,8
	60	61,5	Menghimpit palet	2,5
	60	60,1	Berhenti sebelum menghimpit palet	0,2
	60	60,3	Menghimpit palet	0,5
Kayu (1140mm x 1140mm)	60	61,4	Menghimpit palet	2,3
	60	62,4	Menghimpit palet	4,0
	60	60,5	Menghimpit palet	0,8
Inhouse (1140mm x 1140mm)	60	59,8	Menghimpit palet	0,3
	60	59,1	Menghimpit palet	1,5
	60	60,1	Berhenti sebelum menghimpit palet	0,2
	60	60,2	Menghimpit palet	0,3
Inhouse (1140mm x 1140mm)	60	60,2	Menghimpit palet	0,3
	60	60,6	Menghimpit palet	1,0
	60	60,2	Menghimpit palet	0,3
Inhouse (1140mm x 1140mm)	60	59,9	Menghimpit palet	0,2
	60	60,9	Menghimpit palet	1,5
	Rata-rata Error (%)			

Tabel 5.
Data pengujian batas torsi maksimum 60%

Varian Palet	Nilai Limit Torsi Maks. (%)	Nilai Aktual Torsi Saat Menghimpit (%)	Kondisi Motor	Error (%)
CF (1100mm x 1100mm)	70	70,1	Menghimpit palet	0,14
	70	70,9	Menghimpit palet	1,29
	70	72,1	Menghimpit palet	3
	70	71,7	Menghimpit palet	2,43
	70	70,9	Menghimpit palet	1,29
Chemea (1100mm x 1200mm)	70	71	Menghimpit palet	1,43
	70	70	Menghimpit palet	0
	70	70,5	Menghimpit palet	0,71
	70	71,1	Menghimpit palet	1,57
Kayu (1140mm x 1140mm)	70	70,1	Menghimpit palet	0,14
	70	69,2	Menghimpit palet	1,14
	70	72,5	Menghimpit palet	3,57
Inhouse (1140mm x 1140mm)	70	71,4	Menghimpit palet	2
	70	69	Menghimpit palet	1,43
	70	69,4	Menghimpit palet	0,86
	70	70,3	Menghimpit palet	0,43
Inhouse (1140mm x 1140mm)	70	69,6	Menghimpit palet	0,57
	70	70	Menghimpit palet	0
	70	70,1	Menghimpit palet	0,14
Inhouse (1140mm x 1140mm)	70	70,5	Menghimpit palet	0,71
	Rata-rata Error (%)			

torsi. Jika memenuhi maka motor servo akan berhenti menghimpit palet. Jika tidak, maka nilai torsi aktual akan dibanding terus oleh driver servo hingga memenuhi *set point*.

C. Auto Tuning PI

Tuning dilakukan menggunakan fitur *online auto tuning* pada *software* Sysmac [7]. *Tuning* dilakukan untuk meningkatkan performa dari motor servo pada *servo adjuster* yang dilakukan secara otomatis dan *real-time* mengukur respon dari motor servo. Kontroller PI digunakan untuk mengatur kecepatan motor servo yang ditunjukkan pada Gambar 7. Parameter PI akan otomatis disesuaikan dengan menggerakkan motor sesuai dengan profil gerakan yang ditunjukkan pada Gambar 8. Kriteria respon motor yang ingin dicapai pada *Auto Tuning* ditunjukkan pada Gambar 9. Waktu yang ingin dicapai mencapai *settling time* selama 100 ms dan *overshoot* dari kecepatan yang ingin dicapai yaitu 2%. Selanjutnya *software* mengirimkan perintah ke driver servo dan secara otomatis akan menyesuaikan parameter proposional dan integral berdasarkan respon motor yang terdeteksi.

IV. HASIL DAN DISKUSI

Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon kinerja motor servo yang telah dirancang dan dibuat. Spesifikasi motor yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. *Output Power* (Daya keluaran) : 750 W
- b. *Rated Torque* (Torsi Terukur) : 2,39 Nm
- c. *Peak Torque* (Torsi Puncak) : 8,4 Nm
- d. *Rated Current* (Arus Terukur) : 4,6 A
- e. *Rated speed* (Kecepatan Terukur) : 3000 Rpm
- f. *Max Speed* (Kecepatan Maksimum) : 6000 Rpm
- g. *Gear Box* : 1:80

A. Pengujian Auto Tuning

Data hasil pengujian didapatkan langsung yang ditunjukkan pada Tabel 1 melalui jendela *monitoring*. Parameter dari hasil *auto tuning* otomatis disesuaikan dari hasil lima kali uji coba hingga mencapai *stabilization time* paling cepat dan *overshoot* paling rendah dengan menaikkan nilai *gain* PI. Berdasarkan Tabel 1, saat driver servo dengan menaikkan nilai *gain* proposional dan integral pada kontrol kecepatan sebesar 63.8 mampu mempercepat *stabilization time* sebesar 14ms dengan nilai *overshoot* kecepataannya sebesar 1.6%. Jika dibandingkan dengan percobaan 1 hingga 4 dimana nilai *overshootnya* cukup tinggi serta nilai *settling time (stabilization time)* lebih lama. Hal ini dikarenakan dengan memperbesar nilai *gain* proposional respon sistem menunjukkan semakin cepat mencapai *set point* dan keadaan stabil. Sedangkan dengan memperbesar nilai *gain integral* mampu mengurangi *overshoot*.

Perbandingan nilai konstanta *gain* PI sebelum *tuning* menggunakan *default* parameter dari *software* dan parameter sesudah *auto tuning* pada kontrol kecepatan ditunjukkan pada Tabel 2. Selanjutnya hasil respon motor diperiksa dengan fungsi *data trace* untuk memeriksa respon dari motor.

Pembobotan *tuning gain loop* yang dianalisa adalah *settling time* dan *overshoot* berdasarkan jurnal [7]. Grafik respon motor sebelum *tuning* dengan nilai parameter $K_p = 21,9$ dan $K_i = 5,5$ ditunjukkan pada Gambar 10. Berdasarkan Gambar 10 tersebut, nilai kecepatan aktual tertinggi dari motor 520 Rpm, yang mana kecepatan perintahnya yaitu 500 Rpm serta *settling time* selama 293ms. Sehingga untuk mengetahui nilai maksimum *overshoot* dilakukan perhitungan Persamaan (11).

$$Overshoot = \frac{\text{Kecepatan tertinggi} - \text{Kecepatan Perintah}}{\text{Kecepatan Perintah}} \times 100\% \quad (11)$$

Sehingga,

$$\text{Overshoot} = \frac{520-500}{500} \times 100\% = 4\% \quad (12)$$

Grafik torsi masih sangat berosilasi dikarenakan masih terdapat getaran pada motor. Hal ini dapat berakibat motor cepat panas dan dapat mengurangi masa pemakaian motor servo.

Grafik respon motor hasil *auto tuning* dengan nilai parameter $K_p = 63,8$ dan $K_i = 14,9$ yang ditunjukkan pada Gambar 11. Dari grafik tersebut nilai kecepatan aktual tertinggi dari motor 508 rpm, yang mana kecepatan perintahnya yaitu 500 rpm serta *settling time* selama 94ms. Sehingga untuk mengetahui nilai *overshoot* dilakukan perhitungan Persamaan (11).

$$\text{Overshoot} = \frac{508-500}{500} \times 100\% = 1,6\% \quad (13)$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan nilai maksimum *overshoot* sebesar 1.6% dan *settling time* dengan memperbesar nilai *gain* PI didapatkan sebesar 95ms. Grafik torsi saat motor sedang melakukan akselerasi pada Gambar 11, grafik menunjukkan nilai puncak torsi sebesar 49.5%. Hal ini karena gesekan mekanis yang cukup besar untuk mempercepat pergerakan motor dari keadaan diam. Setelah kecepatan aktual motor mencapai kecepatan perintah, torsi akan bernilai stabil dengan rata-rata sebesar 28.7%. Namun, masih terdapat getaran pada motor yang dapat dilihat pada grafik torsi antara waktu 220ms hingga 270ms yang mana nilai torsi meningkat dari 30% hingga 48.8% saat kecepatan motor aktual sudah *steady state*. Hal ini disebabkan oleh terdapat masalah mekanik. Namun respon torsi ini masih dapat diterima karena getaran pada motor telah berkurang jauh dibandingkan sebelum melakukan *tuning*.

B. Pengujian Kontrol Kecepatan Terhadap Kontrol Torsi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui akibat kontrol kecepatan terhadap torsi. Kecepatan diatur dengan *set point* sebesar 700 Rpm dan pergerakan motor dibatasi oleh torsi sebesar 70%. Torsi yang ditampilkan pada merupakan nilai torsi efektif dalam satuan persen. *Software* sysmac menggunakan satuan % untuk memasukkan nilai batas torsi. Pada motor servo menggunakan *gear box* dengan rasio 1:80. Untuk mengetahui nilai torsi motor setelah diberi *gear box* dilakukan perhitungan (4).

$$\text{Torsi output} = \text{rasio gear} \times \text{torsi input motor} \quad (13)$$

$$\text{Torsi output} = 80 \times 2,39 = 191,2 \text{ N.m} \quad (14)$$

Sehingga, torsi *output* pada *servo adjuster* setelah diberi *gear box* adalah 191,2 N.m.

Hasil pengujian kecepatan dengan torsi ditunjukkan pada Gambar 12. Pada grafik kecepatan, nilai *settling time* mencapai *steady state* adalah 940 ms. Nilai *overshoot* dihitung menggunakan (1), sehingga nilai *overshoot* dihitung sebagai berikut:

$$\text{Overshoot} = \frac{701.83-700}{700} \times 100\% = 0,26\% \quad (14)$$

Hasil maksimum *overshoot* menunjukkan bahwa motor servo menerapkan kontrol kecepatan dengan presisi yang sangat baik, dibuktikan dengan maksimum *overshoot*nya sebesar 0,26%.

Hubungan respon torsi akan berbanding terbalik dengan respon kecepatan. Apabila kecepatan yang diinginkan bertambah, maka nilai torsi yang dihasilkan semakin turun. Begitu pula sebaliknya, apabila kecepatan yang diinginkan menurun, maka torsi yang dihasilkan akan semakin tinggi. Hal ini diperkuat persamaan (15), dimana saat beban mekanik meningkat, kecepatan motor menurun sampai torsi maksimum sama dengan torsi beban. Oleh karena itu diperlukan batas nilai kerja maksimum torsi agar tidak merusak palet. Saat nilai kerja maksimum torsi terpenuhi, maka motor akan berhenti menghimpit.

$$P = \omega \times T \quad (15)$$

C. Pengujian Arus Terhadap Kontrol Torsi

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui akibat arus terdapa terhadap torsi. Untuk membangkitkan torsi pada motor, diperlukan arus yang mengalir pada motor. Pengujian dilakukan menggunakan parameter yang sama seperti pengujian kontrol kecepatan dengan kontrol torsi yaitu dengan kecepatan 700 Rpm dan pergerakan motor dibatasi oleh torsi sebesar 70%.

Respon torsi dengan arus ditunjukkan pada Gambar 13. Saat awal bergerak, nilai arus membesar hingga 2,6 A untuk meningkatkan torsi elektromagnetik agar motor dapat mempercepat Bergerakannya. Saat kecepatan yang diinginkan tercapai, maka nilai torsi akan konstan yang disebabkan oleh arus yang konstan pula. Nilai Arus akan kembali membesar saat nilai motor akan berhenti. Hubungan arus dan torsi adalah sebanding diperkuat dengan Persamaan (16).

$$T = K_t \times I \quad (16)$$

Dimana, K_t adalah konstanta torsi dan I adalah arus yang mengalir pada motor.

D. Pengujian Nilai Parameter Kontrol Torsi

Pengujian pertama dilakukan pada salah satu palet ukuran 1200 mm x 1200 mm dengan masukkan beberapa nilai torsi maksimum ditunjukkan pada Tabel 3. Hal ini untuk menemukan acuan parameter torsi guna menghimpit palet. Nilai torsi yang dikeluarkan oleh motor servo setelah diberi *gear box* diketahui dengan cara perhitungan Persamaan (17).

$$\text{Torsi output} = \text{rasio gear} \times \text{torsi input} \times \% \text{efisiensi} \quad (17)$$

$$\text{Torsi output} = 80 \times 2,39 \times 50\% = 95,6 \text{ Nm} \quad (18)$$

Dari hasil pengujian yang dilakukan, didapatkan semakin besar nilai batas torsi maksimum yang dimasukkan, semakin besar nilai torsi *output* untuk menghimpit palet. Hal ini juga sebanding dengan nilai arus yang dikeluarkan oleh motor akan semakin besar apabila nilai torsi dinaikkan.

Nilai yang sesuai berdasarkan hasil pengujian yaitu pada parameter nilai batas torsi 60% dan 70% mampu menghimpit palet tanpa merusak palet yang ditunjukkan pada Gambar 14. Selanjutnya, nilai parameter ini akan diujikan keseluruhan varian ukuran palet.

E. Pengujian Parameter Torsi pada Seluruh Ukuran Varian Palet

Hasil pengujian sebelumnya didapatkan nilai batas torsi 60% dan 70% mampu menghimpit palet. Selanjutnya

parameter tersebut diujikan ke seluruh varian ukuran palet dengan menggunakan kecepatan yang sama yaitu 700 Rpm.

Pada Tabel 4 merupakan data pengujian menggunakan batas torsi maksimum sebesar 60%. Pengujian dilakukan menggunakan seluruh varian ukuran palet. Berdasarkan Tabel 4 tersebut, hasil pengujian *Servo Adjuster* menggunakan batas torsi maksimum sebesar 60% mampu menghimpit palet sebanyak 15 kali dari 20 kali pengujian. Sehingga kinerja *Servo Adjuster* berhasil menghimpit palet. Sehingga keberhasilan kinerja dari *Servo Adjuster* dihitung menggunakan rumus presentase eror dari pengujian (10).

$$\% \text{ Keberhasilan} = \frac{\text{Jumlah pengujian yang berhasil}}{\text{Banyak pengujian yang dicoba}} \times 100\% \quad (19)$$

$$\% \text{ Keberhasilan} = \frac{15}{20} \times 100\% = 75\% \quad (20)$$

Kegagalan menghimpit palet dikarenakan nilai aktual torsi telah memenuhi batas torsi maksimumnya, sehingga motor akan berhenti meskipun belum menghimpit palet. Hal ini dikarenakan terdapat *noise* sehingga menyebabkan torsi membesar dalam waktu yang cepat [11]. Namun, pengontrolan torsi ini mampu menghasilkan nilai rata-rata eror sebesar 1,8%. Hal ini menunjukkan kepresisian motor servo dalam kontrol torsi.

Terdapat kelemahan nilai torsi ini yaitu *Servo Adjuster* terlalu menghimpit palet varian CF seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15. Hal ini dikarenakan varian palet ini memiliki kontruksi bahan yang tidak terlalu kokoh dibandingkan dengan varian palet lainnya. Oleh karena itu, diperlukan tambahan pengaman pada *servo adjuster* berupa *roller limit switch* agar tidak merusak varian palet CF. Sehingga apabila *roller limit switch* aktif akibat telah menyentuh palet, motor servo pada *servo adjuster* langsung berhenti.

Kontrol torsi ini mampu menghasilkan nilai rata-rata eror sebesar 1,4% saat menghimpit palet seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Hal ini menunjukkan kepresisian motor servo dalam kontrol torsi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa data, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Pada penelitian ini penggunaan *auto tuning*

memudahkan pengguna dalam menentukan parameter *gain* untuk meningkat kinerja dari sistem servo. Pada sistem ini, parameter PI yang menghasilkan respon yang lebih baik dengan nilai $K_p = 63.8$ dan $K_i = 14.9$. Nilai *gain* tersebut mampu menurunkan *overshoot* sebesar 1.6% dan mempercepat *settling time* hingga 94 ms. (2) Implementasi kontrol torsi pada motor servo AC berhasil diterapkan pada penelitian ini menggunakan 4 varian ukuran palet ang berbeda. Didapatkan dengan nilai batas torsi maksimum sebesar 70% mampu meningkatkan kinerja *servo adjuster* hingga 100% untuk menghimpit palet dengan rata-rata eror sebesar 1,4%. Namun perlu menggunakan *roller limit switch* sebagai pengaman mekanik untuk memberhentikan motor. (3) Dalam penelitian ini masih perlu dilakukan pengembangan untuk memaksimalkan kinerja dari motor servo. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat menggunakan kontrol posisi untuk menyesuaikan ukuran palet lebih presisi berdasarkan posisi atau ukuran palet.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. M. Noor, R. Winarso dan R. Wibowo, "Desain Mesin Dispenser Pallet Dengan Penggerak Sistem Pneumatik," dalam *Prosiding SNATIF Ke -4*, Kudus, 2017.
- [2] R. A. Popple, *The Science of Palletizing Volume 3*, Vancouver: Columbia Machine, Inc., 2009.
- [3] A. Behraves, E. R. Eshafani, E. Soury dan A. Zolfaghari, "Design, optimization and manufacturing of wood-plastic composite pallet," *Material dan Desain*, vol. 30, no. 10, pp. 4183-4191, 2009.
- [4] I. Deviatkin, M. Khan, E. Ernst dan M. Horttanainen, "Wooden and plastic pallets: A review of life cycle," *Sustainability*, vol. 11, no. 20, p. 5750, 2019.
- [5] H. Abu-Rub, J. Guzinski dan A. Iqbal, *High Performance Control of AC Drives with Matlab / Simulink Models*, John Wiley & Sons., 2012
- [6] D. Polka, *Motor and Drives : A Practical Technology Guide*, North Calorina: ISA--The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2003.
- [7] K.-W. Lin dan S.-M. Yang, "Automatic Control Loop Tuning for Permanent-Magnet AC Servo Motor Drives," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 63, no. 03, pp. 1499-1506, 2016.
- [8] I. Setiawan, *Kontrol PID untuk Proses Industri*. Jakarta: PT Elex Media Komputindo, 2008.
- [9] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. New York: Prentice Hall, 2010.
- [10] Panasonic, "Servo Drive Quick Start Guide PANATERM Real-time Auto-Gain Tuning (QS5001_V1.0_EN)," Panasonic, 2019.
- [11] A. W. A. Ali, N. Hayima and F. A. A. Razak, "A review on the AC servomotor control systems," *Elektrika*, vol. 19, no. 2, pp. 22-39, 2020.