

Optimasi Perancangan Sistem Kontrol Mesin CNC Pengebor PCB berbasis Ant Colony Optimization

Hidayatul Nurohmah^{1*}, Elfizar Novrianto², Machrus Ali³

Teknik Elektro, Universitas Darul 'ulum, Jombang

¹hidayatul.nurohmah,mt@gmail.com, ²ijarnovrianto@gmail.com, ³machrus7@gmail.com

Article Info

Article history:

Received Oktober 9th, 2023

Revised Oktober 18th, 2023

Accepted November 27th, 2023

Keyword:

CNC

PC

PID

Ant Colony Optimization

ABSTRACT

A Print Circuit Board (PCB) is a micro (small) sized board that contains various electronic components that are used in an automatic circuit. PCB drilling is usually done manually with human power, which takes a lot of time when there are more and more holes in the PCB. And precision is required when the drill bit touches the PCB board which creates frictional forces and can cause drilling errors. This research uses data collection after carrying out several simulation methods using Matlab 13a. With optimal division methods including without control, Conventional PID, auto PID and PID - ACO. The aim of this research is to determine the advantages of the Ant Colony Optimization (ACO) method in controlling Computer Numerical Control (CNC) machines. The simulation results show that the best optimization method is produced by the PID - Ant Colony Optimization method which produces overshoot: 0.1199, undershoot: 0.0544, and settling time at 2.532 seconds which is the smallest value, while the design without control never reaches stable steady with the largest undershoot: 0.523. so PID - Ant Colony Optimization was chosen as the best method and is suitable for use in controlling PCB Drilling CNC Machines. By applying the PID - Ant Colony Optimization method to the CNC PCB Drilling Machine, it will be able to produce more precise drilling results

Copyright © 2023 Nucleus Journal

All rights reserved.

DOI: <https://doi.org/10.32492/nucleus.v2i2.2202>

Corresponding Author:

Hidayatul Nurohmah

Teknik Elektro, Universitas Darul 'ulum, Jombang

Jl. Gus Dur No.29A, Mojongapit, Kec. Jombang, Kabupaten Jombang, Jawa Timur 61419

Abstrak— Printed Circuit Board (PCB) merupakan sebuah papan berukuran mikro (kecil) yang berisi berbagai komponen elektronika yang digunakan dalam suatu rangkaian yang bersifat otomatis. Pada pengeboran PCB ini biasanya dilakukan secara manual dengan tenaga manusia, yang membutuhkan banyak waktu ketika lubang pada PCB tersebut semakin banyak. Serta dibutuhkan kepresisian ketika mata bor menyentuh papan PCB yang menimbulkan gaya gesek dan dapat menyebabkan salah pengeboran. Pada penelitian ini menggunakan tahapan pengumpulan data setelah dilakukan beberapa metode simulasi menggunakan matlab 13a. Dengan pembagian metode

yang optimal meliputi yaitu tanpa kontrol, PID Konvensional, auto PID dan PID - ACO. Tujuan dari penelitian ini mengetahui kelebihan metode Ant Colony Optimization (ACO) dalam mengontrol mesin Computer Numerical Control (CNC). Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa metode optimasi terbaik dihasilkan oleh metode PID - Ant Colony Optimization dengan menghasilkan overshoot : 0.1199, undershoot : 0.0544, dan settling time pada 2.532 detik yang merupakan nilai terkecil, Sedangkan Desain tanpa kontrol tidak pernah mencapai steady state dengan undershoot paling besar : 0.523. sehingga dipilih PID - Ant Colony Optimization sebagai metode terbaik dan cocok digunakan dalam kontrol Mesin CNC Pengebor PCB. Dengan diterapkan metode PID - Ant Colony Optimization terhadap Mesin CNC Pengebor PCB, maka akan dapat menghasilkan hasil bor yang lebih presisi

I. Pendahuluan

Di era modern saat ini, rangkaian elektronika dapat bekerja hanya dengan *chip* yang ukurannya semakin kecil yang dapat disebut sebagai mikrokontroler. *Chip* mikrokontroler ini dibuat pada suatu wadah yang bernama PCB, PCB atau (*Printed Circuit Board*) adalah suatu papan kecil (mikro) yang penuh dengan sirkuit dengan bahan yang terbuat dari logam yang mampu menghubungkan berbagai komponen elektronik satu sama lain tanpa menggunakan kabel, Tahapan dalam pembuatan PCB sebelum dapat digunakan harus melewati proses pencetakan jalur yang sesuai dengan rangkaian yang diinginkan.

Kemudian dilakukan proses penghilangan bagian PCB yang tidak terkena jalur atau proses etching, dan dilanjutkan proses pelubangan pada titik-titik dimana kaki-kaki komponen elektronika akan diletakkan Pada proses pengeboran PCB dirasa cukup sulit jika dilakukan oleh manusia karena dibutuhkan ketelitian karena ukuran lubang yang kecil.

Selain itu, pengeboran juga tidak membutuhkan waktu yang sedikit apalagi dalam sebuah rangkaian yang terdapat banyak jalur kaki untuk masing-masing komponen. Dengan banyaknya teknologi yang berkembang pada saat ini, komputer telah di aplikasikan pada alat-alat mesin perkakas, salah satunya yaitu mesin bor. Hasil dari perpaduan teknologi komputer dan teknologi mekanik inilah yang kemudian dinamakan dengan (*Computer Numerically Controlled*). Disebut sebagai CNC, karena proses pergerakan pada mesin mekanik tersebut digerakkan melalui komputer. Komputer membutuhkan bahasa pemrograman G-code agar hardware pada CNC tersebut agar dapat mengetahui instruksi yang diberikan oleh komputer melalui kode-kode tertentu.

Pengelolaan kode dari bentuk gambar ke bentuk G-code memerlukan sebuah converter dalam bentuk format .gcd yang kemudian dapat terbaca dengan baik oleh komputer maupun hardware dari CNC tersebut. Oleh karena itu, untuk menambah tingkat kepresisian dan kemudahan dalam melakukan proses pengeboran pada PCB, maka dirancanglah mesin pengebor otomatis pada PCB menggunakan CNC[1][2].

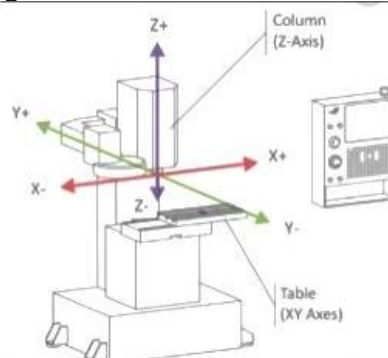
Penelitian ini dikembangkan dengan menggunakan beberapa referensi yang berhubungan dengan obyek pembahasan. Penggunaan referensi ditujukan untuk memberikan batasan-batasan sistem yang nantinya dapat dikembangkan lebih lanjut dalam tugas akhir. Paper yang berhubungan dengan penelitian ini adalah Jurnal Eka Satrio, Koko Joni, dan Kunto Aji Wibisono, Dalam paper ini membahas dan meneliti tentang Perancangan Sistem Kontrol CNC Pengebor PCB Otomatis Berbasis *Raspberry* PI.[3] Dan Jurnal Alinier, Hidayatul Nurohmah, Machrus Ali*, Rukslin, Dwi Ajiatmo, M. Teguh Optimasi pemrograman system pengendali mesin CNC pengebor PCB berdasar metode Firefly Algorithm[2].

Optimalisasi diperlukan untuk menghasilkan hasil kontrol yang baik dan canggih, karena hasil yang lebih stabil dan efisien dibandingkan dengan kontrol konvensional. Kontrol cerdas berbasis Artificial Intelligence telah banyak berkembang diantaranya menggunakan

metode kontrol PID[4], kontrol Fuzzy[5], Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)[6][7], dan jenis kontroler lainnya. ACO (*Ant Colony Optimization*)[8] sudah banyak berhasil mengoptimasi system control dengan baik[9][10]. Dengan latar belakang tersebut diatas penulis terdorong untuk melakukan penelitian dengan judul; “Optimasi perancangan sistem kontrol mesin CNC pengebor pcb berbasis *Ant Colony Optimization* (ACO)”

A. Computer Numerical Control (CNC)

CNC (*Computer Numerical Control*) merupakan suatu mesin yang tergolong dalam mesin perkakas, dikontrol oleh komputer dengan menggunakan bahasa numerik (data perintah dengan kode angka, huruf dan simbol) sesuai dengan standar yang telah disepakati. Numerical Control (NC) adalah suatu format berupa program otomatisasi dimana pergerakan mekanik yang terjadi pada suatu alat permesinan atau peralatan lain dikendalikan oleh suatu program berupa kode angka, angka tersebut berupa data alphanumerical yang menghadirkan suatu instruksi pekerjaan untuk mengoperasikan mesin tersebut. CNC bermanfaat untuk produksi suatu item, dimana bentuk, dimensi, rute proses, dan pengerjaan dari suatu mesin, itu bervariasi. Mesin CNC yang digunakan adalah Mesin CNC jenis Milling. Pada *spindle* Mesin CNC Milling terdapat pisau pemotong dengan berbagai jenis sesuai dengan kebutuhan saat beroperasi. Mesin CNC Milling digunakan untuk memotong, melubangi, atau membentuk benda kerja. Dalam membentuk sebuah benda, Mesin CNC Milling harus dapat beroperasi dan menghasilkan benda kerja sesuai dengan bentuk yang diinginkan. Oleh karena itu, Mesin CNC memiliki tiga aksis gerak. Ketiga aksis tersebut adalah X, Y, dan Z. Aksis X menunjukkan arah gerak ke kanan atau ke kiri. Aksis Y menunjukkan arah gerak ke depan atau ke belakang. Aksis Z menunjukkan arah gerak secara vertikal, ke atas atau ke bawah. Pergerakan aksis ini dilakukan oleh motor servo ac yang terhubung pada mekanik tiap aksis dari Mesin CNC Milling. Oleh karena itu, pada Mesin CNC Milling dilakukan perbaikan posisi dan kontur dilakukan dengan mengatur pergerakan motor servo tersebut.[11]



Gambar 1 Mesin CNC Milling 3 Axis

B. PCB

Printed Circuit Board (PCB) adalah papan yang berfungsi sebagai wadah untuk menghubungkan komponen-komponen elektronika melalui lapisan jalur konduktor.[12]



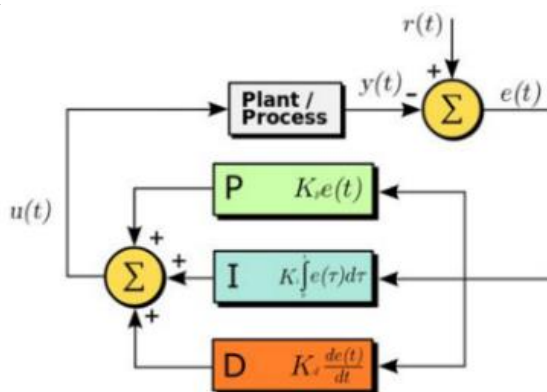
Gambar 2 Printed Circuit Board PCB

C. Pemrograman Mesin CNC

Memprogram Mesin CNC merupakan suatu proses memasukan data kekomputer mesin dengan bahasa yang dapat dipahami dan dimengerti oleh CNC. Bahasa pemrograman tersebut berupa bahasa numerik, yaitu bahasa gabungan huruf dan angka. Untuk itu harus dimasukan suatu program ke komputer Mesin CNC agar dapat memproses informasi data dan mengubahnya dalam bentuk data dan perintah-perintah gerakan pada Mesin CNC, Untuk dapat menggerakkan Mesin CNC diperlukan bahasa pemrograman, berupa kode – kode dalam bentuk huruf dan angka serta metode pemrograman[13]

D. *Proportional, Integral, Derivative* (PID)

Pengendali PID (Proportional, Integral, Derivative) merupakan suatu pengendali yang mampu memperbaiki tingkat akurasi dari suatu sistem plant yang memiliki karakteristik umpan balik/feedback pada sistem terse-but. Pengendali PID menghitung dan meminimalisasi nilai error/selisih antara output dari proses terhadap input/setpoint yang diberikan ke sistem. Gabungan antara Proportional, Integral, dan De-rivative maka disebutlah kontroler PID. Kontrol pada error yang terjadi (Proportional), jumlah error (Inte-gral), dan perubahan error (Derivative) setiap aksi kontrol ini memberikan kontribusi. Steady state dapat dipercepat dengan kombinasi dari 3 kontroler tersebut serta juga mengurangi setting time osilasi sistem itu sendiri. Perbaikan secara signifikan stabilitas yang dinamis dapat diberikan dengan penggunaan self tuning PID pada sistem kontrol. Secara adaptif self tuning merupa-kan parame ter penguat PID. Kontrol PID dapat dipakai secara bersamaan atau sendiri – sendiri tergantung dengan respon yang akan kita inginkan dalam suatu perencanaan.



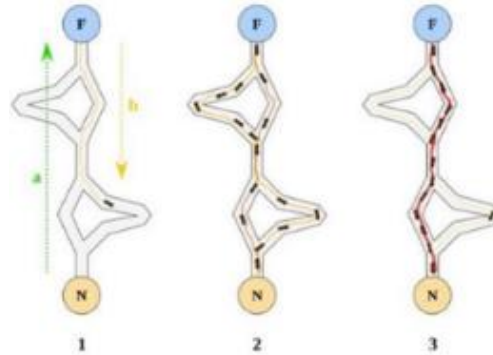
Gambar 3 Blok Diagram Pengendali PID

Nilai output dari pengendali PID didapatkan berdasarkan penjumlahan dari masing-masing[14]

E. *Ant Colony Optimization (ACO)*

Ant Colony Optimization (ACO) atau dikenal dengan algoritma Koloni Semut adalah sebuah metodologi yang dihasilkan melalui pengamatan terhadap semut. Pada algoritma ini, semut berfungsi sebagai agen yang ditugaskan untuk mencari solusi terhadap suatu masalah optimisasi. Secara informal, ACO bekerja sebagai berikut: pertama kali, sejumlah x semut ditempatkan pada sejumlah y titik berdasarkan beberapa aturan inialisasi (misalkan secara acak). Setiap semut membuat sebuah tur dengan menerapkan sebuah aturan transisi status secara berulang kali. Selagi membangun turnya, seekor semut juga memodifikasi jumlah pheromone (feromon, sejumlah informasi yang ditinggalkan oleh semut di tempat yang dilalui dan menandai jalur tersebut) pada ruas-ruas yang dikunjunginya dengan menerapkan aturan pembaruan pheromone lokal. Setelah semua semut mengakhiri tur mereka, jumlah pheromone yang ada pada ruas-ruas dimodifikasi kembali (dengan menerapkan aturan pembaruan pheromone global). Dalam membuat tur, semut

‘dipandu’ oleh informasi heuristik (mereka lebih memilih ruas-ruas yang pendek) dan oleh informasi pheromone. Sebuah ruas dengan jumlah pheromone yang tinggi merupakan pilihan yang sangat diinginkan. Kedua aturan pembaruan pheromone itu dirancang agar semut cenderung untuk memberi lebih banyak pheromone pada ruas-ruas yang harus mereka lewati. ACO dimanfaatkan untuk menyelesaikan masalah penjadwalan, protein folding, data mining dan lain-lain.



Gambar 4 Simulasi Koloni Semut

Dalam mencari jalur optimal yang digunakan semut untuk menemukan tujuan, diperlukan beberapa langkah:

1. Tentukan terlebih dahulu banyaknya semut dalam proses tersebut, lalu tentukan titik awal masing-masing semut. Selanjutnya menentukan pheromone awal masing-masing semut.
2. Tentukan titik selanjutnya yang akan dituju, ulangi proses sampai semua titik terlewati. Jika titik yang dimaksud bukanlah titik yang akan dilalui, maka kembali ke titik sebelumnya.
3. Apabila telah mendapatkan titik yang dituju, pheromone masing-masing pada titik tersebut diubah. Perubahan pheromone tersebut dinamakan perubahan pheromone lokal.

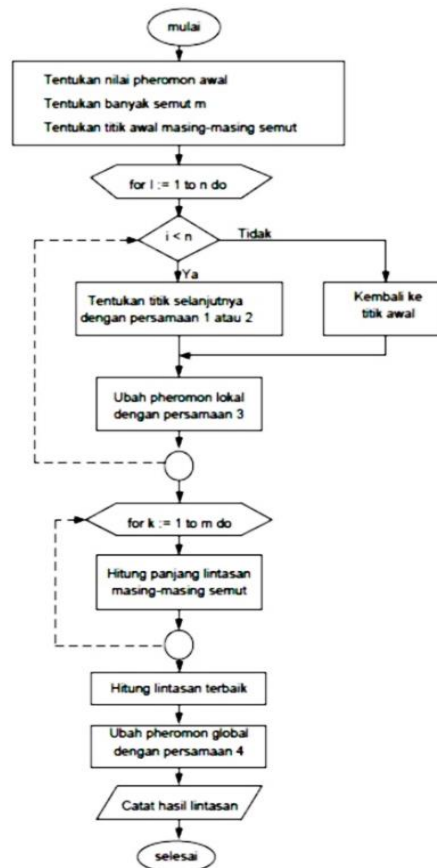
$$cL_{vt,nn.l} = \Delta\tau$$

L_{nn} = panjang tur yang diperoleh

c = jumlah lokasi

$\Delta\tau(t,v)$ = perubahan pheromone

Hitung panjang lintasan masing-masing semut. Kemudian didapatkan panjang lintasan yang minimal. Ubah pheromone pada titik-titik yang termuat dalam lintasan tersebut. Setelah semua proses telah dilalui, maka akan didapatkan lintasan dengan panjang lintasan yang minimal. Flowchart Algoritma Koloni Semut[15]



Gambar 5 Diagram Alur Algoritma Koloni Semut

II. Metode Penelitian

A. Metode

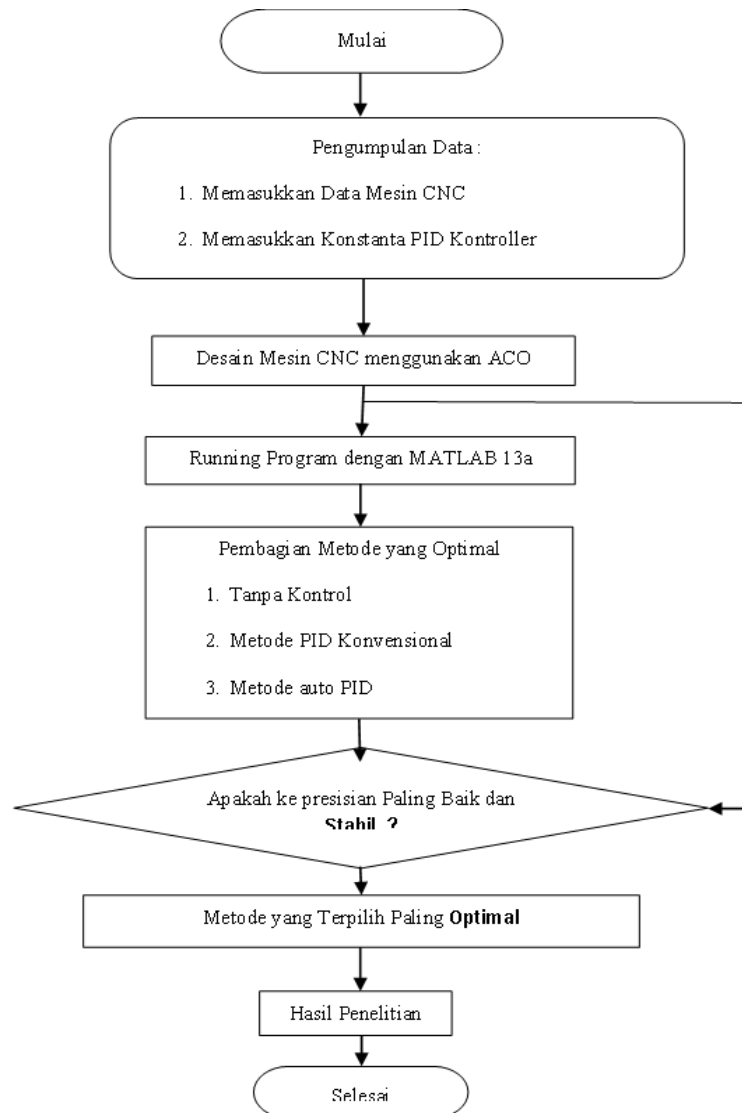
Pelaksanaan penelitian dimulai dengan tahapan pengumpulan data Mesin CNC dan Ant Colony Optimization (ACO). Setelah memperoleh data-data yang dibutuhkan, maka selanjutnya dilakukan pemodelan Mesin CNC untuk pengebor PCB menggunakan Ant Colony Optimization (ACO).

Kemudian, dirancanglah simulasi sistem untuk menilai benar tidaknya literatur yang telah diambil. Dapat terlihat saat simulasi bagaimana ketepatan, kecepatan dan detail dari program mesin cnc saat melakukan pengeboran pada PCB. Pada tahapan ini pula dilakukan koordinasi nilai parameter Mesin CNC yang ingin diketahui hingga mencapai kondisi sistem yang di inginkan pada program mesin CNC.

Setelah sistem stabil dilakukan penalaan Ant Colony Optimization (ACO) dengan harapan untuk mendapatkan respon yang lebih baik. Sistem tanpa kontrol, dengan PID konvensional, sistem dengan PID auto tuning, sistem dengan PID tuning Ant Colony Optimization (ACO).

Kemudian akan melihat respon pada program dan juga ketelitian pada PCB dengan design yang diinginkan. Setelah melihat hasil parameter yang disimulasikan dan meperoleh data penelitian kemudian dibandingkan satu sama lain Gambar dan Tabel

B. Diagram alur



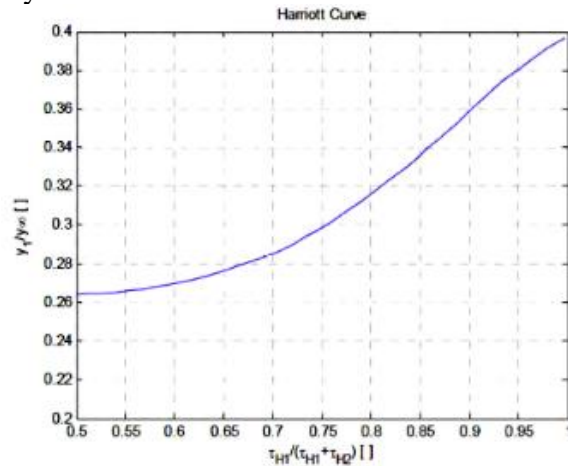
Gambar 6 Diagram Alur Penelitian

III. Hasil dan Pembahasan

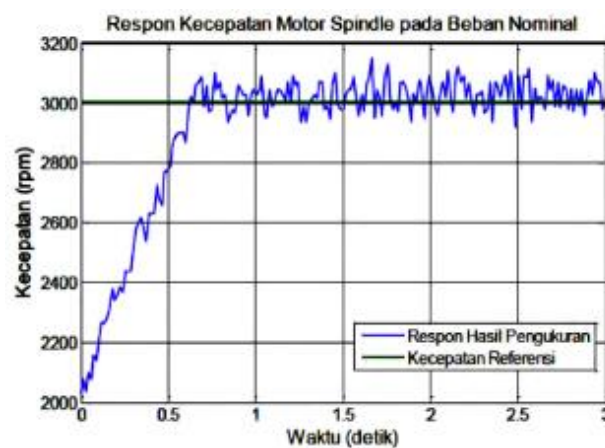
A. Fungsi alih

Pada bagian ini, penulis harus memasukkan hasil-hasil Pengenalan sistem dibutuhkan buat memperoleh bentuk matematika dari motor stepper. Pengenalan yang dicoba merupakan pengenalan statis dengan memandang reaksi dari kecekatan rujukan yang dibberikan. Reaksi sistem yang diidentifikasi merupakan pada dikala situasi bobot minimum, nominal serta maksimum. Reaksi sistem hendak berubah- ganti cocok dengan kecekatan serta situasi pembeban yang berubah- ubah pula. Pengumpulan informasi dicoba pada dikala CNC melaksanakan cara feeding(pemakanan) buat barang kegiatan berbahan plastik tipe polietilen. Cara feeding dengan aksi arah mendatar diserahkan kecekatan rujukan sebesar 2000 rpm. Reaksi didapat dikala kecekatan berganti dari 2000 rpm jadi 3000rpm. Pada kondisi feedrate yang berlainan hendak menciptakan reaksi sistem yang berlainan pula. Situasi pembebanan diserahkan semacam selanjutnya: Bobot minimum: dikala tidak memegang barang kegiatan Bobot nominal: dikala feedrate 250 milimeter atau min; Bobot maksimum: dikala feedrate 500 milimeter atau min. Buat memperoleh guna ganti sistem, reaksi yang dipakai merupakan reaksi dikala bobot nominal. reaksi kecekatan motor stepper pada lukisan

3.1 dan 3.2 Pada reaksi itu, didapat angka keluaran steady state pada kecepatan 3044 rpm. Angka itu didapat dari pada umumnya semua informasi keluaran sistem dikala steady state.



Gambar 7 Kurfa Harioth



Gambar 8. Respon Kecepatan Motor Pada Beban Nominal

$$Y_{ss} = 3044$$

$$X_{ss} = 3000$$

Berdasarkan respon pada metode harriot diperoleh:

$$t_{33} = 0,212 \text{ detik}$$

$$t_{70} = 0,486 \text{ detik}$$

$$t_{73} = 0,503 \text{ detik}$$

Sehingga diperoleh parameter:

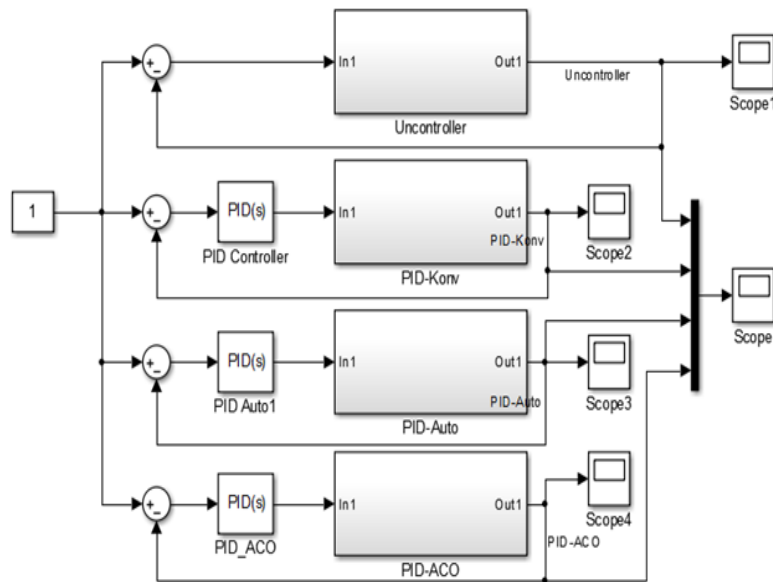
$$TdH = (1,937 \times 0,212) - (0,937 \times 0,486) = -0,045$$

Sehingga didapatkan Fungsi alih:

$$G_H(s) = \frac{1.014}{0.0276s^2 + 0.3869s + 1}$$

B. Desain Kontrol

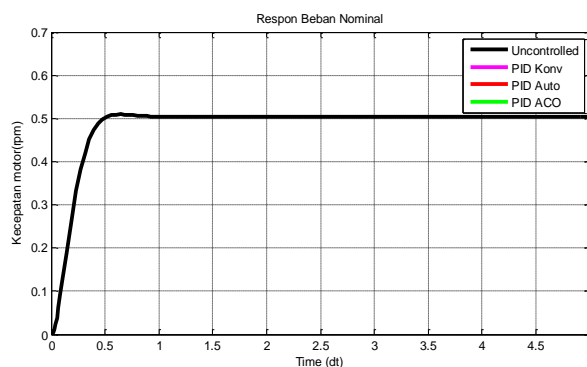
Desain yang digunakan merupakan desain yang dibuat menggunakan aplikasi simulink matlab 2013a. Desain yang disusun sudah mencakup berbagai kondisi controller tersebut, yaitu PID tanpa kontrol, PID standar/konvensional, PID auto tuning, dan PID dengan metode Ant Colony Optimization (ACO). Berikut adalah gambar desain controller:



Gambar 9 Desain Kontroler Berbagai Metode

C. *Respon system*

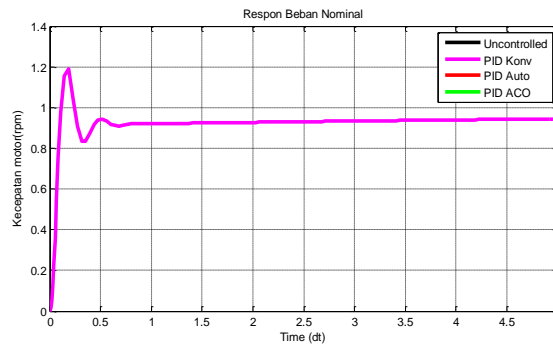
1. Design PID tanpa kontroler



Gambar 10 Respon Tanpa Kontroler

Hasil dari simulasi PID tanpa kontroler. menunjukkan bahwa model tanpa kontroler tidak memiliki nilai k_p , k_i , dan k_d dengan nilai overshoot nol (0), undershoot 0.523 , dan tidak memiliki settling time karena tidak pernah mencapai titik atau setpoint yang diinginkan sampai pada detik ke 100.

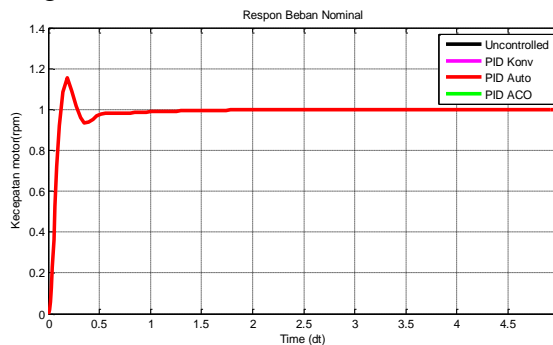
2. Design PID konvensional



Gambar 11 Respon PID Konveksional

Hasil dari Metode PID-Konv (konvensional) dengan nilai $k_p=1$, $k_i=1$, dan $k_d=0$, dengan hasil overshoot = 0.199, undershoot = 0.173, dan settling time pada 10.223 detik.

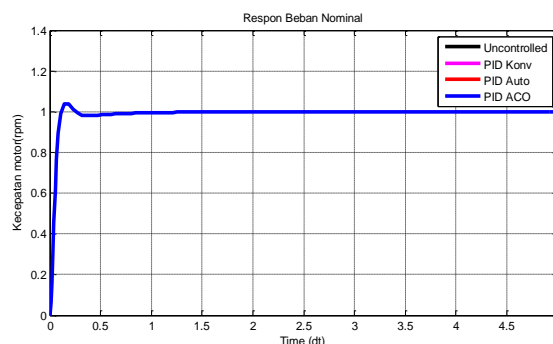
3. Desain PID Autotuning



Gambar 12 Respon PID Autotuning

Hasil dari Metode PID-Auto (tuning matlab 2013a) dengan $k_p = 7.590$, $k_i = 13.014$, $k_d = 0.199$, dengan hasil overshoot = 0.155, undershoot = 0.067, dan settling time pada 2.541 detik.

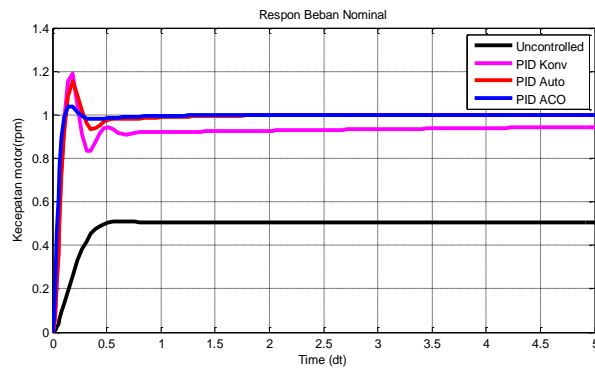
4. Design PID ACO



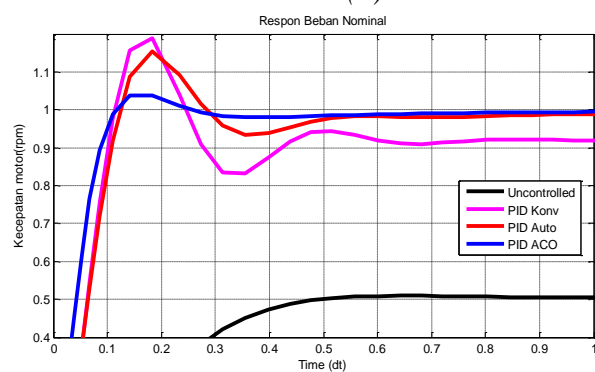
Gambar 13 Respon Pid Aco

Hasil dari metode PID-ACO dengan nilai konstanta $k_p = 15.5784$, $k_i = 11.2719$, $k_d = 0.3903$ menghasilkan overshoot = 0.1199, undershoot = 0.0544, dan settling time pada 2.622 detik.

5. Hasil untuk semua kontroler



(a)



(b)

Gambar 13 (A) Dan (B) Respon Berbagai Kontroler

Tabel 1 Respon Masing-Masing Controller

	Uncontrol	PID-Konvensional	PID-Auto	PID-ACO
Kp	-	1	7.590	15.5784
Ki	-	1	13.014	11.2719
Kd	-	0	0.119	0.3903
Overshot	-	0.199	0.115	0.1199
Undershot	0.523	0.173	0.067	0.0544
Settling time	~	10.223	2.541	2.622

Dari Gambar 13 sampai dengan gambar 3.9 dan dari table 3.1. menunjukkan bahwa, Desain tanpa kontrol tidak pernah mencapai steady state dengan undershot paling besar : 0.523, desain PID-konvensional pada $k_p : 1$, $k_i : 1$, $k_d : 0$ mendapatkan overshoot terbesar : 0.199 dan undershot : 0.173 dengan sttling time : 10.223 detik; pada respon PID Auto tuning matlab pada $k_p : 7.590$, $k_i : 11,2719$, $k_d : 0.119$ mendapatkan nilai overshoot : 0.115, undershot : 0.067, settling time pada saat 2.541 detik; respon pada PID-ACO dengan $k_p : 15,5784$, $k_i : 18.2572$, $k_d : 0,3903$ mendapatkan nilai overshoot sebesar : 0.1199, undershot : 0.0544, pada settling time 2.532 detik.

IV. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang ditunjukkan oleh gambar 13 dan table.1 menunjukkan bahwa metode optimasi terbaik dihasilkan oleh metode PID - *Ant Colony Optimization* dengan menghasilkan

overshoot : 0.1199, *undershoot* : 0.0544, dan *settling time* pada 2.532 detik yang merupakan nilai terkecil, Sedangkan Desain tanpa kontrol tidak pernah mencapai steady state dengan undershoot paling besar : 0.523. sehingga dipilih PID - *Ant Colony Optimization* sebagai metode terbaik dan cocok digunakan dalam kontrol Mesin CNC Pengebor PCB . Dengan ditrapkan metode PID - *Ant Colony Optimization* terhadap Mesin CNC Pengebor PCB, maka akan dapat menghasilkan hasil bor yg lebih presisi

V. Daftar Pustaka

- [1] M. Fatriyana, “Cnc Program And Programming Of Cnc Machine,” *J. Mech. Sci. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 019–023, Oct. 2020, doi: 10.36706/jmse.v7i1.37.
- [2] M. Ali, “Optimasi Pemograman Sistem Pengendalian Mesin CNC Pengebor PCB Berdasar Metode Firefly Algorithm,” *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 3, no. 2, pp. 28–37, Dec. 2022, doi: 10.36040/aliner.v3i2.5840.
- [3] E. Satrio *et al.*, “Perancangan Sistem Kontrol CNC Pengebor PCB Otomatis Berbasis Raspberry PI.”
- [4] M. Ali, A. Siswanto, and M. Baehaqi, “Flower Polination Algorithm Sebagai Optimalisasi LFC Pada Hybrid Pembangkit Wind-Diesel,” *J. FORTECH*, vol. 5, no. 1, pp. 41–47, May 2024, doi: 10.56795/fortech.v5i1.5106.
- [5] Hidayatul Nurohmah, M. Ali, Rukslin, Dwi Ajiatmo, and Muhammad Agil Haikal, “Komparasi PID, FLC, dan ANFIS sebagai Kontroller Dual Axis Tracking Photovoltaic berbasis Bat Algorithm,” *J. JEETech*, vol. 3, no. 2, pp. 71–77, Sep. 2022, doi: 10.48056/jeetech.v3i2.197.
- [6] N. Kanagaraj, “An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System to Improve Fractional Order Controller Performance,” *Intell. Autom. Soft Comput.*, vol. 35, no. 3, pp. 3213–3226, 2023, doi: 10.32604/iasc.2023.029901.
- [7] Machrus Ali, Ruslan Hidayat, and Iwan Cahyono, “Penggunaan ANFIS pada Pengaturan Debit Air Berdasarkan Volume Air Dalam Tangki,” *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 24–32, 2020, doi: 10.36040/aliner.v1i1.2519.
- [8] M. Arrohman, R. Fajardika, M. Muhlasin, and M. Ali, “Optimasi Frekuensi Kontrol pada Sistem Hybrid Wind-Diesel Menggunakan PID Kontroler Berbasis ACO dan MFA,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 9, no. 1, pp. 65–68, May 2018, doi: 10.21776/ub.jrm.2018.009.01.10.
- [9] C. Blum, “Ant colony optimization: Introduction and recent trends,” 2005. doi: 10.1016/j.plrev.2005.10.001.
- [10] A. Sharma, S. Sharma, and D. Gupta, “Ant Colony Optimization Based Routing Strategies for Internet of Things,” *Evergreen*, vol. 10, no. 2, pp. 998–1009, 2023, doi: 10.5109/6793654.
- [11] A. Hwas and R. Katebi, “Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller,” *IFAC Conf. Adv. PID Control*, 2012.
- [12] H. Shamkhalichenar, C. J. Bueche, and J. W. Choi, “Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms,” 2020. doi: 10.3390/bios10110159.
- [13] E. Prianto and H. S. Pramono, “Eko Prianto: Proses Permesinan CNC Dalam Pembelajaran Simulasi CNC Proses Permesinan Cnc Dalam Pembelajaran Simulasi CNC.”
- [14] M. R. Djalal *et al.*, “Aplikasi Metode Cerdas Untuk Optimasi Controller Pid Motor Dc Berbasis Firefly Algorithm,” vol. 6, no. 2, 2017, doi: 10.20449/jnte.v6i2.393.

- [15]D. Udjulawa and S. Oktarina, “Penerapan Algoritma Ant Colony Optimization Untuk Pencarian Rute Terpendek Lokasi Wisata,” *Klik - J. Ilmu Komput.*, vol. 3, no. 1, pp. 26–33, 2022, doi: 10.56869/klik.v3i1.326.