

Simulasi Kontrol PID Ziegler-Nichols pada Sistem Penghancuran Batu dengan Motor Induksi 3 Fasa 20HP

Novalliansyah Ramadhan¹, Ryan Yudha Adhitya², Mat Syai'in³, Purwidi Asri⁴, Agus Khumaidi⁵, Afif Zuhri Arfianto⁶, Muhammad Khoirul Hasin⁷, Isa Rachman⁸, Rizal Indrawan⁹

e-mail: novalliansyahramadhan07@studen.ppns.ac.id, ryanyudhaadhitya@ppns.ac.id, matsyai'in@ppns.ac.id, purwidiasri@ppns.ac.id, aguskhumaidi@ppns.ac.id, afifzuhriarfianto@ppns.ac.id, muhamadkhorulhasin@ppns.ac.id, isarachman@ppns.ac.id, rizalindrawan@ppns.ac.id

^{1,2,3,4,5,6,7,8}Jurusan Teknik Otomasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Indonesia

⁹Jurusan Teknik Desain dan Manufaktur, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 5 Januari 2020
Direvisi 20 Februari 2020
Diterbitkan 15 Maret 2020

Kata kunci:

Kontrol PID
Transfer function
Motor Induksi 3 Fasa
Simulink

Keywords:

PID Control
Transfer function
3-Phase Induction Motor
Simulink

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan pengendalian otomatis pada mesin crusher batu koral menggunakan metode PID Ziegler-Nichols. Dengan parameter PID yang dihasilkan dari metode Ziegler-Nichols ($K_p=0.0957$, $K_i=0.9643$, dan $K_d=0.0024$), mesin crusher dapat merespons secara stabil setiap 1 detik setelah terjadi osilasi. Meskipun terjadi osilasi pada awalnya, sistem menunjukkan overshoot sebesar sekitar 50% dan undershoot sekitar 30%. Metode PID dipilih karena kemampuannya mengontrol sistem secara otomatis dengan mengkombinasikan proporsional, integral, dan derivatif dari kesalahan sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian mesin crusher dengan metode PID Ziegler-Nichols memberikan kinerja yang efisien dan stabil, meningkatkan keandalan proses penghancuran batu koral secara keseluruhan, serta memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem pengendalian otomatis untuk industri pemecahan batu koral yang membutuhkan tingkat presisi dan efisiensi yang tinggi.

ABSTRACT

This study develops automatic control on a coral stone crusher machine using the Ziegler-Nichols PID method. With PID parameters derived from the Ziegler-Nichols method ($K_p=0.0957$, $K_i=0.9643$, and $K_d=0.0024$), the crusher machine can respond stably every 1 second after oscillation occurs. Despite initial oscillation, the system exhibits approximately 50% overshoot and 30% undershoot. The PID method is chosen for its ability to automatically control the system by combining proportional, integral, and derivative components of the system error. The research findings indicate that controlling the crusher machine with the Ziegler-Nichols PID method provides efficient and stable performance, enhancing the overall reliability of coral stone crushing processes, and making a significant contribution to the development of automatic control systems for the coral stone crushing industry that require high levels of precision and efficiency.



Penulis Korespondensi:

Novalliansyah Ramadhan,
Jurusan Teknik Otomasi,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111.
Email: novalliansyahramadhan07@student.ppns.ac.id
No HP/WA aktif : +62 81 2311 74143

1. PENDAHULUAN

Industri besar seringkali mengandalkan batu koral sebagai bahan produksi yang dapat digunakan untuk konstruksi bangunan, bahan pemecah ombak, tanggul laut atau pantai, pembuatan batu hias, dan produksi semen. Pada perusahaan pemecah batu koral, pengguna harus secara berkala memantau alat yang digunakan untuk memecah batu koral yang sebelumnya berukuran besar menjadi lebih kecil. [1] Proses pemecahan bahan produksi batu koral sebelumnya dilakukan dengan menggunakan mesin crusher yang dioperasikan oleh operator. [2] Namun, mekanisme kerja mesin tersebut tidak efektif karena mesin tetap beroperasi saat tidak ada material yang diproses, mengakibatkan pemborosan daya listrik dan menimbulkan risiko bagi para pekerjanya.

Mesin crusher konvensional merupakan alat yang umum digunakan dalam industri pertambangan dan pengolahan material untuk mengurangi ukuran bahan galian menjadi ukuran yang lebih kecil dan seragam. Mesin ini terdiri dari berbagai jenis yang masing-masing memiliki fungsi dan mekanisme kerja yang berbeda [3]. Salah satu upaya pemberdayaan masyarakat di Kabupaten Kediri, Kecamatan Pare dilakukan melalui kerjasama dengan UD. Mitra Bonafid dalam sistem pemecah batu menggunakan mesin crusher. Saat ini, UD. Mitra Bonafid telah berhasil melibatkan 12 orang masyarakat sekitar dalam kegiatan ini. Meskipun demikian, beberapa kekurangan, seperti kurangnya sistem keselamatan, penggunaan energi yang kurang efisien, dan rendahnya efisiensi produksi, perlu mendapat perhatian serius. Kekurangan-kekurangan tersebut dapat menghambat potensi pemberdayaan masyarakat yang lebih luas dan berkelanjutan. [4] Oleh karena itu, diperlukan langkah-langkah perbaikan dan peningkatan dalam implementasi sistem keselamatan yang memadai, penggunaan energi yang lebih efisien, serta peningkatan efisiensi dalam proses produksi [5]. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa pemberdayaan masyarakat berjalan secara optimal dan berkelanjutan di masa mendatang. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kesejahteraan dan pemberdayaan masyarakat sekitar dengan menyediakan solusi konkret bagi perbaikan sistem kerja dan efisiensi dalam operasional UD. Mitra Bonafid.

Mesin crusher konvensional dapat ditingkatkan efisiensinya dengan menggunakan Programmable Logic Controller (PLC) sebagai otak sistem, yang merupakan state of the art dalam otomatisasi industri. PLC memungkinkan otomatisasi dan kontrol presisi pada proses penghancuran batu, termasuk pengelolaan pengumpanan, penghancuran, dan pemisahan material [6]. Untuk efisiensi energi, teknologi variable frequency drive (VFD) dapat diintegrasikan dengan PLC untuk menyesuaikan kecepatan motor sesuai dengan beban kerja, mengurangi konsumsi energi saat beban rendah. Selain itu, pengoptimalan proses penghancuran batu dapat dicapai dengan metode kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative), yang merupakan pendekatan state of the art dalam pengendalian proses, memungkinkan penyesuaian real-time terhadap variabel operasional, memastikan efisiensi dan kestabilan proses yang lebih baik [7]. Dengan implementasi ini, sistem crusher tidak hanya lebih efisien dan aman tetapi juga mampu meningkatkan produktivitas dan pemberdayaan masyarakat sekitar secara berkelanjutan.

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) sebagai politeknik vokasi menunjukkan keunggulannya di bidang otomasi dan mesin melalui inovasi seperti mesin pengisian produk otomatis (E-FILL) dan Aplikasi Rekonstruksi 3D dengan Lidar, dan juga telah membuktikan komitmen luar biasa di berbagai aspek. Sebagai institusi teaching factory yang berpengalaman, PPNS telah berhasil menghasilkan produk unggulan seperti ROV, AIS, Sistem pengapuran otomatis (*Auto Liming Unit*) dan Sistem monitoring lingkungan, mencerminkan kehandalan dan



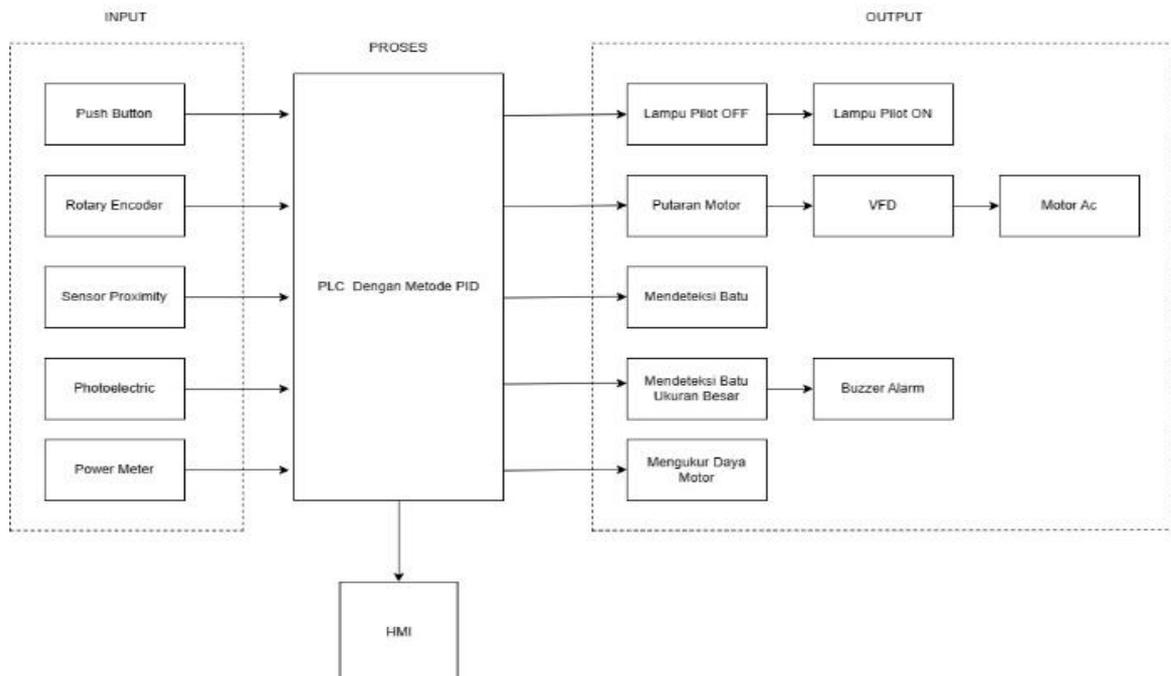
keahlian dalam menerapkan konsep-konsep teknologi terkini [8]. Dalam penelitian mesin pemecah batu, PPNS memperkaya pengalaman dengan mengintegrasikan teknologi terkini melalui penambahan monitoring energi untuk pemantauan efisiensi energi [9]. Penerapan metode kontrol menjadi langkah progresif untuk meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi pemborosan energi. Fitur keamanan yang diperkuat melalui integrated SCADA dengan konsep ASC (Automation SCADA Stone Crusher) memastikan kontrol dan pemantauan sistem yang canggih, membawa pengalaman operasional ke tingkat yang lebih tinggi. Melalui komitmen pada keberlanjutan, langkah-langkah inovatif ini diarahkan tidak hanya pada peningkatan efisiensi, tetapi juga pada dukungan terhadap solusi ramah lingkungan. PPNS tidak hanya menjadi pelopor dalam menerapkan teknologi terdepan, tetapi juga bertindak sebagai agen perubahan yang memprioritaskan keberlanjutan dan keselamatan dalam setiap inovasinya.

Dalam konteks peningkatan efisiensi operasional mesin pemecah batu, PPNS telah memperkaya pengalaman dengan mengintegrasikan teknologi terkini, salah satunya adalah penggunaan metode kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative). PID berperan penting dalam mengoptimalkan kinerja mesin dengan mengatur variabel proses secara tepat.[10] Dengan menggunakan PID, sistem pemecah batu koral dapat memberikan respons kontrol yang proporsional terhadap error antara setpoint dan output aktual, sehingga memungkinkan penyesuaian yang cepat dan akurat dalam operasi pemecahan batu. Selain metode kontrol PID konvensional, PPNS juga memperkenalkan metode kontrol PID Ziegler-Nichols (ZN) 1.[11] Metode ini menawarkan pendekatan yang lebih cepat dalam menentukan parameter PID yang optimal melalui proses tuning yang efisien. Dengan menerapkan PID ZN 1, sistem pemecah batu koral dapat menghasilkan respons kontrol yang lebih responsif dan akurat, mempercepat penyesuaian operasional, dan secara signifikan meningkatkan efisiensi energi. [12] Ini merupakan bagian integral dari upaya PPNS untuk terus mengembangkan solusi inovatif demi meningkatkan kinerja dan keberlanjutan industri.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Blok Diagram Sistem

Gambar 1 menunjukkan bagaimana sistem penelitian bekerja. Ada bagian untuk masukan, bagian yang mengolahnya, dan bagian untuk keluaran. Ini membantu kita melihat cara kerja sistem dengan lebih mudah.



Gambar 1 Blok Diagram



Sistem ini menerima input melalui tombol tekan yang digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan sistem. Selain itu, sistem ini menggunakan berbagai sensor, seperti rotary encoder untuk mengukur kecepatan motor AC, proximity sensor untuk mendeteksi keberadaan benda, dan photoelectric sensor untuk mendeteksi batu berukuran besar. Prosesnya mencakup langkah-langkah seperti mengoptimalkan kecepatan mesin crusher melalui VFD dengan metode metode, dan mengukur kecepatan motor AC dengan rotary encoder. Di antara outputnya adalah lampu indikator yang menunjukkan status sistem, bunyi alarm yang dibuat oleh sensor photoelectric saat menemukan batu berukuran besar, dan tampilan pada layar HMI yang menunjukkan informasi tentang operasi sistem secara keseluruhan dan kondisi penggunaan energi.

2.2 Perancangan Transfer Function Motor Induksi 3 Fasa

Pada tahap awal perancangan pengendalian motor induksi ini, dilakukan pemodelan sistem fisik dari motor induksi. Model rangkaian ini adalah model yang paling umum digunakan dalam menganalisis motor induksi. Motor Induksi yang akan digunakan dalam rancangan ini adalah jenis sangkar tupai (squirrel cage). [13] Persamaan tegangan stator-rotor dalam motor induksi merupakan hasil dari fungsi arus pada stator dan rotor, serta dampak fluks yang melingkupi kumparan. Pemodelan matematika motor induksi ini diperoleh melalui proses analisis dinamis dari perangkat tersebut.[14] Persamaan tegangan acuan :

$$Vsd(t) = Rs \cdot isd(t) - np \cdot \omega m \cdot \lambda sq + \frac{d}{dt} \lambda sd \dots\dots\dots(1.1)$$

$$Vs q(t) = Rs \cdot is q(t) - np \cdot \omega m \cdot \lambda sd + \frac{d}{dt} \lambda sq \dots\dots\dots(1.2)$$

$$Vrd(t) = 0 = Rr \cdot ird(t) - np \cdot \omega m \cdot \lambda rq + \frac{d}{dt} \lambda rd \dots\dots\dots(1.3)$$

$$Vr q(t) = 0 = Rr \cdot ir q(t) - np \cdot \omega m \cdot \lambda sq + \frac{d}{dt} \lambda rq \dots\dots\dots(1.4)$$

$$Vrd(t), Vr q(t) = 0$$

Motor induksi yang digunakan adalah jenis motor squirrel cage (sangkar tupai). Persamaan medan putarnya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\lambda sd = Ls \cdot isd(t) + Lm \cdot ird(t) \dots\dots\dots(1.5)$$

$$\lambda sq = Ls \cdot isq(t) + Lm \cdot irq(t) \dots\dots\dots(1.6)$$

$$\lambda rd = Lr \cdot ird(t) + Lm \cdot isd(t) \dots\dots\dots(1.7)$$

$$\lambda rq = Lr \cdot irq(t) + Lm \cdot isq(t) \dots\dots\dots(1.8)$$

Persamaan yang harus diuraikan adalah persamaan tegangan acuan masukan (1.1) dan (1.4) yaitu:

$$\frac{d}{dt} isd(t) = \beta np \cdot \omega m(t) \lambda rq + \eta \beta \lambda rd + \gamma isd + \frac{1}{\sigma Ls} Vsd(t) \dots\dots\dots(1.9)$$

$$\frac{d}{dt} isq(t) = -\beta np \cdot \omega m(t) \lambda rd + \eta \beta \lambda rq + \gamma isq + \frac{1}{\sigma Ls} Vs q(t) \dots\dots\dots(1.10)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda sd(t) = -np \cdot \omega m(t) \lambda rd - \eta \lambda rd + \eta Lm ird(t) \dots\dots\dots(1.11)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda rq(t) = np \cdot \omega m(t) \lambda rq - \eta \lambda rq + \eta Lm irq(t) \dots\dots\dots(1.12)$$

Dimana :

$$\eta = \frac{Rr}{Lr}; \sigma = 1 - \frac{Lm^2}{Ls \cdot Lr}; \beta = \frac{Lm^2}{\sigma \cdot Ls \cdot Lr};$$

$$\gamma = \frac{Lm}{\sigma \cdot Lr^2} + \frac{Rs}{\sigma \cdot Ls}; \mu = np \frac{Lm}{Jeq \cdot Lr}$$

Torsi Elektromagnetiknya adalah:

$$Tem = np \cdot Lm \cdot Lr (\lambda rd \cdot isq(t) - \lambda rq \cdot isd(t)) \dots\dots\dots(1.13)$$

Sementara persamaan elektrodinamikanya adalah :

$$Jeq \frac{d}{dt} \omega m(t) = Tem(t) - Tb(t) - TL(t) \dots\dots\dots(1.14)$$

$$Tb(t) = Bm \omega m(t) \dots\dots\dots(1.15)$$

$$\frac{d}{dt} \theta m(t) = \omega m(t) \dots\dots\dots(1.16)$$

Untuk memperoleh fungsi transfer, minimal salah satu antara tegangan acuan masukan atau TL (t) harus menjadi nol. Dari persamaan tersebut :

$$(Jeqs + Bm) \omega m(t) = Tem(t) - TL(t) \dots\dots\dots(1.17)$$



$$\omega_m(s) = \frac{T_{em}(s)}{J_{eq}s + B_m} = \frac{n_p \cdot L_m (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t))}{L_r (J_{eq}s + B_m)} \dots\dots\dots(1.18)$$

Dimana:

- T_{em} = Torsi Elektromagnetik (Nm)
- J_{eq} = Momen Inersia (kg.m²)
- ω_m = Kecepatan putar mekanik rotor (rad/detik)
- θ_m = Posisi sudut (rad)

Dari model matematika di atas, persamaan-persamaan tersebut disederhanakan untuk mencapai keadaan, yang akan membantu dalam pembentukan diagram keadaan untuk kemudian menentukan diagram blok sistem. [15] Untuk merancang pemodelan motor induksi tiga fasa, langkah pertama adalah mengetahui nilai parameter-parameter yang dimiliki oleh motor tersebut. [16] Berikut adalah spesifikasi motor induksi seperti yang tercantum dalam Tabel 1.

V	400 v
RPM	1460
F	50 Hz
R _s	0.6837 Ω
R _r	0.451 Ω
L _s	0.004125 H
L _r	0.004125 H
J _{eq}	0.05 Kg/m ²
P	2
L _m	0.06419 H

Untuk mendapatkan fungsi transfer, kita membandingkan $\omega_m(t)$ sebagai keluaran $V_{sd}(t)$ dan $V_{sq}(t)$ sebagai masukan dalam dua koordinat orthogonal dan polar, yaitu direct-quadrature (d-q). Untuk mendapatkan fungsi transfer tersebut, tegangan acuan $T_L(t)$ harus sama dengan nol. Pemodelan motor induksi melibatkan penempatan nilai parameter ke dalam bentuk sebuah fungsi transfer pada persamaan berikut :

$$V_{sd}(t) = n_p \cdot \beta \cdot \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \cdot \beta \cdot \lambda_{rd} + \gamma \cdot i_{sd}(t) \cdot \frac{d}{dt} \cdot i_{sd}(t) \cdot \sigma \cdot L_s \dots\dots\dots(1.19)$$

Jika β , η , dan γ disubstitusikan :

$$V_{sd}(s) = n_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega_m(s) \cdot \lambda_{rq} + \frac{R_r \cdot L_m}{L_r^2} \cdot \lambda_{rd} + \left(\frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma \cdot L_s \cdot s \right) i_{sd}(s) \dots\dots\dots(1.20)$$

Maka diperoleh fungsi alih :

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p \cdot L_m (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t))}{L_r (J_{eq}s + B_m)} \dots\dots\dots(1.21)$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{4157.63}{s^2 + 15.312s + 2.300}$$

2.3 Perancangan PID Ziegler-Nichols 1

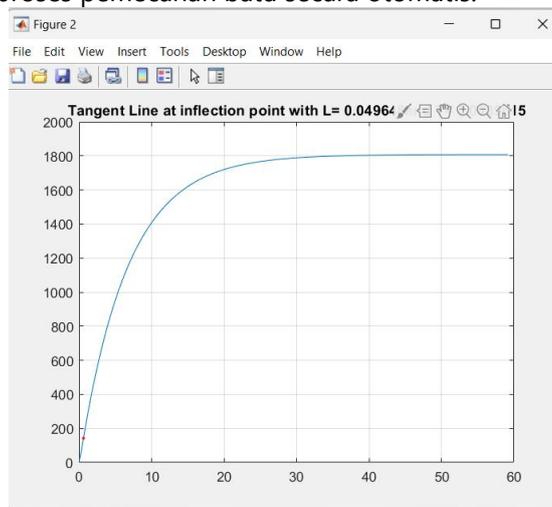
Penelitian ini berfokus pada penggunaan kontroler PID Ziegler-Nichols tipe 1, atau kurva reaksi, untuk mengoptimalkan kinerja sistem penghancur batu otomatis. Pendekatan ini memungkinkan penyesuaian parameter PID sesuai dengan respons sistem terhadap perubahan input, dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan kinerja secara keseluruhan.



Tabel 2 Ziegler-Nichols type 1 tuning rule

Type Of Controller	Kp	Ti	Td
P	T/L	∞	0
PI	0.9T/L	L/0.3	0
PID	1.2T/L	2L	0.5L

Tabel 2 menampilkan parameter Ziegler-Nichols untuk loop terbuka tipe 1 yang digunakan dalam penelitian ini. Metode ini diterapkan pada pengaturan PID untuk mengoptimalkan respons sistem terhadap perubahan input. Penggunaan kurva reaksi Ziegler-Nichols memberikan dasar yang kuat untuk menentukan nilai tuning yang sesuai dengan karakteristik dinamis dari mesin crusher. Dengan pendekatan ini, penelitian ini bertujuan meningkatkan efisiensi dan kinerja mesin dalam proses pemecahan batu secara otomatis.



Gambar 2 Grafik Respon tanpa PID

Setelah memperoleh grafik tanggapan sistem tanpa pengendali seperti yang terlihat pada Gambar 3, langkah selanjutnya adalah mencari nilai L dan T sebagai berikut:

$$L = 0.049648$$

$$T = 0.0039615$$

Setelah menentukan nilai L dan T, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai Kp, Ki, dan Kd sesuai dengan rumus yang tercantum dalam Tabel 2, seperti berikut ini:

- Proportional Gain (P)

$$K_p = \frac{T}{L} = \frac{0.0039615}{0.049648} = 0.0798$$

- Proportional and Integral Gain (PI)

$$K_p = 0.9 \frac{T}{L} = 0.9 \frac{0.0039615}{0.049648} = 0.0718$$

$$T_i = \frac{L}{0.3} = \frac{0.049648}{0.3} = 0.1655$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0.0718}{0.1655} = 0.4339$$



- Proportional, Integral and Derivative (PID)

$$K_p = 1.2 \frac{T}{L} = 1.2 \frac{0.0039615}{0.049648} = 0.0957$$

$$T_i = 2L = 2 \times 0.049648 = 0.0993$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{0.0957}{0.0993} = 0.9643$$

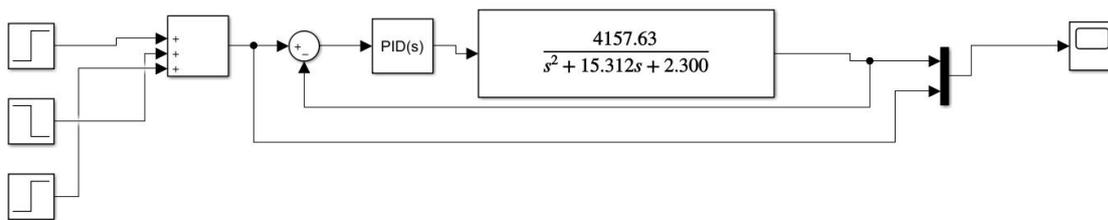
$$T_d = 0.5L = 0.5 \times 0.049648 = 0.0248$$

$$K_d = K_p T_d = 0.0024$$

Hasil dari perhitungan nilai K_p , K_i , dan K_d menggunakan metode Ziegler-Nichols¹ adalah sebagai berikut: $K_p = 0.0957$, $K_i = 0.9643$, dan $K_d = 0.0024$. Nilai-nilai parameter ini akan dimasukkan ke dalam blok PID pada Simulink untuk melihat respons langkah grafik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Simulink



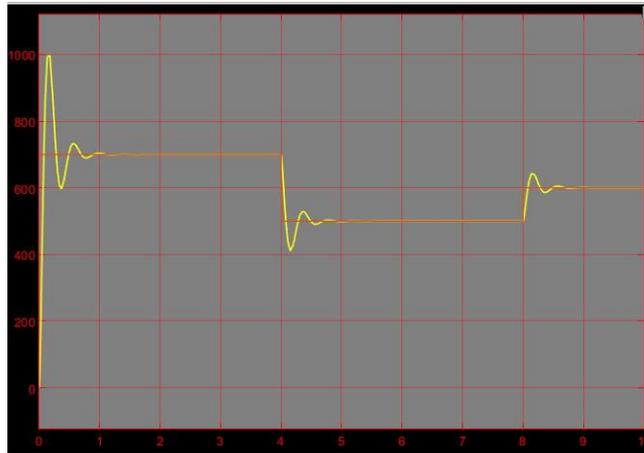
Gambar 3 Model simulink pengujian sistem

Pada Gambar 3, ditampilkan model sistem Simulink yang digunakan untuk pengujian. Model ini menggunakan beberapa blok fungsi. Pertama, blok "Step Response" digunakan untuk memodelkan respons sistem terhadap sinyal masukan berbentuk langkah. Selanjutnya, blok "Sum" digunakan untuk melakukan operasi penambahan atau pengurangan terhadap beberapa sinyal masukan. Blok "PID" digunakan untuk menerapkan kontrol PID dalam model Simulink dengan mengatur parameter seperti K_p , K_i , dan K_d . Selain itu, terdapat blok "Transfer Function" yang digunakan untuk merepresentasikan fungsi transfer sistem dalam domain Laplace. Blok "Mux" digunakan untuk menggabungkan beberapa sinyal masukan menjadi satu keluaran. Terakhir, blok "Scope" digunakan untuk menampilkan hasil simulasi dalam bentuk grafik.

3.2 Pengujian kontrol Proportional, Integral and Derivative (PID)

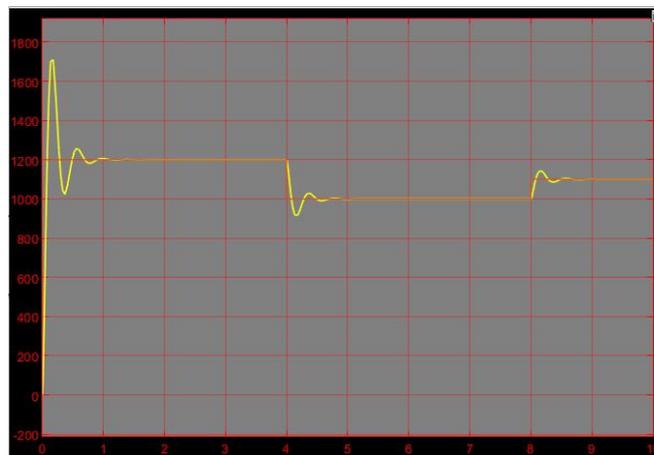
Pada Gambar 3 ditampilkan grafik respons sistem dengan set point 500. Pada awal pengujian, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 68.8991% dan undershoot sebesar 30.65%, dengan rise time 0.0481 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.447 dan tetap stabil meskipun terdapat osilasi pada variasi input.





Gambar 3 Grafik Simulink PID dengan set point 500

Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik, karena mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.



Gambar 4 Grafik simulink PID dengan set point 1000

Pada Gambar 4 ditampilkan grafik respons sistem dengan set point 500. Terlihat bahwa pada awalnya, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 55.3934% dan undershoot sebesar 30.25%, dengan rise time 0.0515 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.388 dan tetap stabil meskipun terdapat osilasi pada variasi input. Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik, karena mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.





Gambar 5 Grafik simulink PID dengan set point 1500

Pada Gambar 5 ditampilkan grafik respons sistem dengan set point 500. Terlihat bahwa pada awalnya, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 53.3711% dan undershoot sebesar 30.125%, dengan rise time 0.0530 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.711 dan tetap stabil meskipun terdapat osilasi pada variasi input. Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik, karena mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.

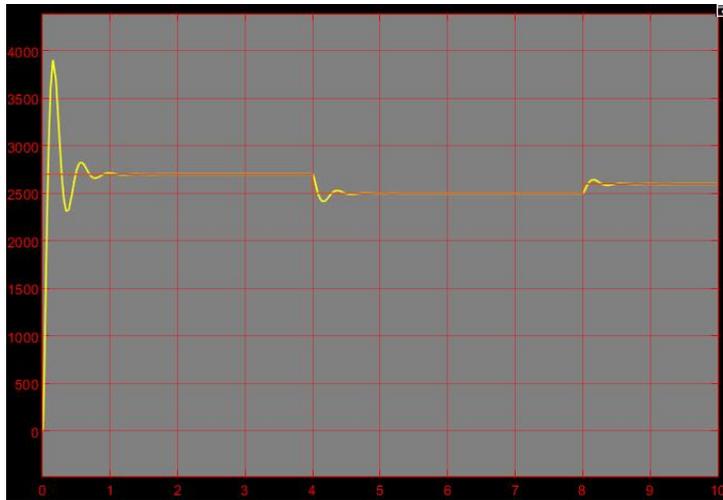


Gambar 6 Grafik simulink PID dengan set point 2000

Pada Gambar 6 ditampilkan grafik respons sistem dengan set point 500. Terlihat bahwa pada awalnya, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 51.6680% dan undershoot sebesar 29.958%, dengan rise time 0.0539 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.506 dan tetap stabil meskipun terdapat osilasi pada variasi input. Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik, karena mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter



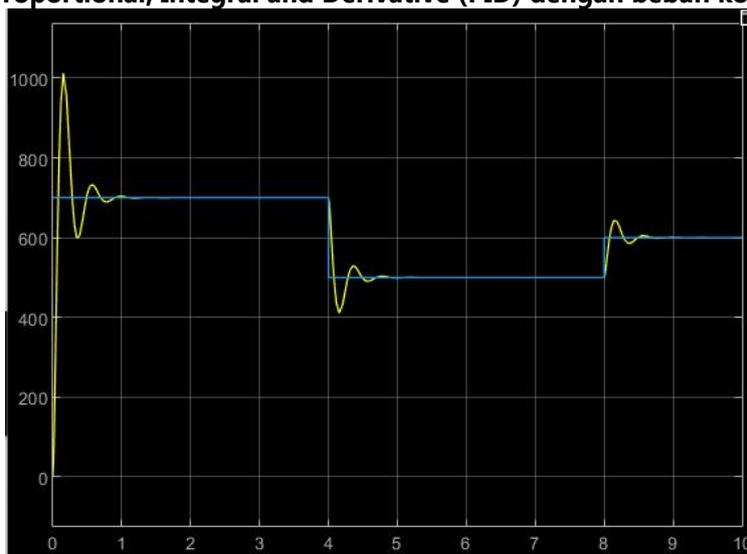
PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.



Gambar 7 Grafik simulink PID dengan set point 2500

Pada Gambar 7 ditampilkan grafik respons sistem dengan set point 500. Terlihat bahwa pada awalnya, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 50.1568% dan undershoot sebesar 30.56%, dengan rise time 0.0543 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.599 dan tetap stabil meskipun terdapat osilasi pada variasi input. Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik karena mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.

3.2 Pengujian kontrol Proportional, Integral and Derivative (PID) dengan beban konstan



Gambar 8 Grafik simulink PID dengan beban konstan



Pada Gambar 8, terlihat grafik respons sistem PID dengan beban konstan. Pada awalnya, sistem mengalami osilasi dengan overshoot sebesar 68.6951% dan undershoot sebesar 30.72%, dengan rise time 0.0482 detik. Sistem mencapai keadaan tunak (steady state) pada detik ke-1.15 dan diperkirakan akan tetap stabil meskipun ada variasi input. Analisis grafik ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kinerja yang baik dan mampu mencapai set point yang diinginkan dengan cepat dan stabil. Meskipun ada overshoot dan undershoot awal, sistem berhasil menstabilkan diri dalam waktu yang relatif singkat. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan parameter PID telah dioptimalkan dengan baik, memungkinkan sistem untuk merespons perubahan input secara efektif dan mempertahankan performa yang diinginkan. Kestabilan sistem meskipun ada osilasi menunjukkan bahwa kontrol PID berhasil menjaga sistem pada nilai set point tanpa mengalami fluktuasi yang signifikan dalam jangka waktu yang panjang.

3.3 ANALISA HASIL

Analisis hasil penelitian menunjukkan bahwa metode PID Ziegler-Nichols menghasilkan parameter ($K_p=0.0957$, $K_i=0.9643$, dan $K_d=0.0024$) yang memungkinkan respons stabil setiap 1 detik setelah osilasi pada mesin crusher batu koral. Meskipun pada awalnya terjadi osilasi dengan overshoot sekitar 50% dan undershoot sekitar 30%, pengendalian otomatis mampu menstabilkan mesin dengan settling time sekitar 1.30 detik. Perbandingan dengan PID tanpa beban pada set point 2500 menunjukkan bahwa meskipun terjadi osilasi dengan overshoot sekitar 50.1568% dan undershoot sekitar 30.56%, respons sistem terhadap perubahan set point relatif stabil. Namun, pada PID dengan beban konstan, terlihat overshoot lebih tinggi sekitar 68.6951% dan undershoot sekitar 30.72%, menunjukkan respons yang kurang stabil. Ini menyoroti pentingnya penyesuaian parameter PID sesuai karakteristik sistem. Meskipun keduanya mencapai set point, PID tanpa beban memiliki respons yang lebih stabil dibandingkan dengan PID dengan beban konstan, yang penting untuk efisiensi dan keandalan proses secara keseluruhan.

4. KESIMPULAN

PID Ziegler-Nichols menghasilkan parameter ($K_p=0.0957$, $K_i=0.9643$, dan $K_d=0.0024$) yang memastikan respons stabil pada mesin crusher batu koral, dengan settling time 1.30 detik. Meskipun awalnya terjadi osilasi (overshoot 50% dan undershoot 30%), pengendalian otomatis menstabilkan mesin. Diambil contoh perbandingan dengan PID tanpa beban (overshoot 50.1568% dan undershoot 30.56%) menunjukkan respons relatif stabil meskipun terjadi osilasi. Namun, PID dengan beban konstan (overshoot 68.6951% dan undershoot 30.72%) menunjukkan respons yang kurang stabil. Ini menyoroti pentingnya penyesuaian parameter PID sesuai karakteristik sistem. Meskipun keduanya mencapai set point, PID tanpa beban menunjukkan respons yang lebih stabil, mendukung efisiensi dan keandalan proses secara keseluruhan.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih yang tak terhingga kepada kedua orang tua saya serta Pak Mat atas dukungan dan dorongan mereka dalam melakukan pengujian ini. Tanpa bantuan dan dorongan mereka, pencapaian ini tidak akan terwujud. Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada Pak Ryan atas bimbingannya yang tanpa henti dalam proses pembuatan jurnal dan simulasi. Kontribusinya sangat berarti dalam menjaga kualitas dan kesinambungan proyek ini. Semoga kebaikan dan kerja keras mereka selalu dibalas dengan kesuksesan dan kebahagiaan. Terima kasih.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. O. Terefe, G. A. Tefera, T. O. Terefe, and G. A. Tefera, "Design of Impact stone crusher machine," *Int J Sci Eng Res*, vol. 10, no. 5, 2019, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [2] R. Bangun Pemecah Batu Berbasis PLC Ariya Arsyad, R. Listiana, and A. Arsyad, "RANCANG BANGUN PEMECAH BATU BERBASIS PLC," 2023.
- [3] G. Antarfallah, S. Widayati, and Sriyanti, "Rancangan Crushing Plant Tambang Sirtu di CV Barokah Laksana Jaya, Desa Margaluyu, Kecamatan Leles, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat," *Bandung Conference Series: Mining Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 203–210, 2023, doi: 10.29313/bcsme.v3i1.6285.



- [4] Omiyale B. O, "Safety Consideration in the Development of Improved Stone Jaw Crusher for Quarry Operations," *International Journal of Engineering Research and*, vol. V7, no. 06, pp. 306–312, 2018, doi: 10.17577/ijertv7is060145.
- [5] M. Iqbal, "Pengaruh Preventive Maintenance dan Breakdown Maintenance terhadap Kelancaran Proses Produksi di PT. Quarryndo Bukit Barokah," *Jurnal Manajemen dan Bisnis (ALMANA)*, vol. 1, no. 3, pp. 33–46, 2017.
- [6] E. O. Elgendi and K. Shawki, "Automated process control system of Jaw crusher production," *J Phys Conf Ser*, vol. 2128, no. 1, pp. 0–10, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2128/1/012034.
- [7] R. Rasyid, M. Muhammad, and R. R. Rasyid, "PROtek: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Spwm Inverter dan Kontrol Pid dengan Metode Hibrid Volt/Herzt Konstan-Sensor Arus," 2022.
- [8] P. O. Hanggara *et al.*, "Prototype control and monitoring system safety device from leakage ammonia at marine loading arm with comparison of Neural Network (NN) and Extreme Learning Machine (ELM) method," *2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices, ISESD 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 85–89, 2017, doi: 10.1109/ISESD.2017.8253310.
- [9] S. R. Arrachman, M. F. Adiatmoko, A. Soeprijanto, M. Syai'in, M. S. A. Sidik, and N. H. Rohiem, "Smart meter based on time series modify and extreme learning machine," *Proceedings of the 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology, ICACOMIT 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 86–92, 2017, doi: 10.1109/ICACOMIT.2017.8253392.
- [10] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar, and S. N. Pawar, "A review of PID control, tuning methods and applications," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 9, no. 2. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 818–827, Jun. 01, 2021. doi: 10.1007/s40435-020-00665-4.
- [11] R. Sulistiyadi and O. Yuliani, "Metode Penalaan Kontroler Pid," *Jmte*, vol. 01, no. 01, pp. 67–79, 2020.
- [12] V. V. Patel, "Ziegler-Nichols Tuning Method: Understanding the PID Controller," *Resonance*, vol. 25, no. 10, pp. 1385–1397, Oct. 2020, doi: 10.1007/s12045-020-1058-z.
- [13] H. Haryanto, R. Munarto, I. Fatmawati, K. Kunci, K. Motor Induksi Tiga Fasa, and S. Nema, "Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Fasa XYZ Standar NEMA," vol. 3, no. 1, 2014.
- [14] P. Sukabumi *et al.*, "Prosiding SEMNASTERA (Seminar Nasional Teknologi dan Riset Terapan) Pemodelan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metode Proportional Integral Anti Wind Up (Pi-Aw)," 2020.
- [15] E. Purwanto *et al.*, "DESAIN KONTROL KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN FUZZY PID BERBASIS IDIRECT FIELD ORIENTED CONTROL," *Jurnal Integrasi*, vol. 146, no. 2, pp. 148–158, 2019.
- [16] W. NUROHMANSAH, "SKRIPSI SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI 3 FASA DENGAN INVERTER TOPOLOGI DIODA CLAMPED 5 LEVEL BERBASIS PID," 2021.

