

## RANCANG BANGUN SISTEM LEVITASI MAGNET MENGGUNAKAN KONTROL PID

**Bonfilio Wahyu Tri Winarto**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : bonfiliowinarto@mhs.unesa.ac.id

**Puput Wanarti Rusimamto**

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail : puputwanarti@unesa.ac.id

### Abstrak

Penelitian ini fokus pada pengendalian medan elektromagnetik agar magnet *neodymium* dapat melayang dengan kontroler PID. Metode pengontrolan PID dirancang dengan mengidentifikasi *plant* menggunakan karakteristik respon sistem dengan aturan Ziegler-Nicols metode kedua untuk mendapatkan nilai konstanta PID. Perancangan *hardware* untuk sistem levitasi magnetik ini menggunakan Arduino Uno sebagai pusat kontroler dengan memasukkan *source* PID dan PWM untuk menjaga kestabilan medan magnet *plant* yang terintegrasi dengan aktuator elektromagnet serta sensor efek *hall* sebagai pembaca medan magnet *plant*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem levitasi magnetik dengan kontroler PID berhasil dibuat. Implementasi kontroler PID pada sistem levitasi magnetik pada setpoint 300 *gauss* dengan nilai  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 1$  dan  $K_d = 0.025$  didapat respon sistem dengan  $E_{ss} = 0,667\%$   $t_d = 0.351$  s,  $t_r(5\%-95\%)=1.492$  s,  $t_r(10\%-90\%)=1.113$  s dan  $t_s(5\%)=1.521$  s,  $t_s(2\%)=2.028$  s,  $t_s(0,5\%)=2.535$  s.

**Kata Kunci:** Levitasi magnetik, Medan magnet, Kontroler PID, metode Ziegler-Nicols, Arduino

### Abstract

This study focuses on magnetic field control to obtain neodymium magnet can fly with the PID controller. The PID control method is designed by identifying the plant using system response characteristics with the Ziegler-Nicols law of the second method to obtain PID constants. The hardware design for this magnetic levitation system uses Arduino Uno as a central controller by inputting PID and PWM sources to keep the plant's stability of the magnetic field that integrated with electromagnet actuator, also hall effect sensor as a detector of magnetic field on the plant. The results showed that the magnetic field control system with PID was successfully made. Implementation of PID controller on magnetic levitation system at setpoint 300 gauss with value  $K_p = 2.5$   $K_i = 1$  and  $K_d = 0.025$ , obtained system response with  $E_{ss} = 0,667\%$   $t_d = 0.351$  s,  $t_r(5\%-95\%)=1.492$  s,  $t_r(10\%-90\%)=1.113$  s dan  $t_s(5\%)=1.521$  s,  $t_s(2\%)=2.028$  s,  $t_s(0,5\%)=2.535$  s.

**Keywords:** Magnetic Levitation, Magnetic Field, PID Controller, Ziegler-Nicols method, Arduino

### PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan zaman dan perkembangan teknologi yang semakin pesat. Saat ini banyak perangkat dengan teknologi yang begitu inovatif sebagai penunjang kebutuhan masyarakat itu sendiri.

Sudah sejak lama studi dan penelitian tentang magnet telah menghasilkan berbagai produk yang bermanfaat bagi umat manusia. Metode pelayangan magnet adalah termasuk hal baru yang hasil penelitiannya banyak diterapkan di sektor industri dan transportasi karena dapat mengurangi gesekan mekanis secara berarti (Fransiskus, 2011).

Levitasi magnetik adalah proses melayang objek dengan memanfaatkan medan magnet. Hal ini menolak gaya gravitasi pada suatu benda dengan menggunakan medan magnet sebagai penangkal. Baik gaya magnet

tolakan atau tarik dapat digunakan untuk membuat levitasi (Dwi Basuki dkk, 2011). Alat-alat di dunia industri dan transportasi sudah banyak yang mengaplikasikan teori magnetik levitation.

Untuk meneliti dan memahami lebih dalam mengenai teori levitasi magnetik ini dibutuhkan perangkat keras dari sistem levitasi magnetik. Perangkat keras sistem levitasi magnetik adalah sebuah perangkat keras pengontrolan pelayangan magnet *neodymium* dengan menggunakan metode levitasi magnet.

Berdasarkan latar belakang masalah tersebut penelitian ini bertujuan merancang sebuah perangkat keras sistem levitasi magnetik menggunakan sensor efek *hall* merah untuk mengontrol magnet *neodymium* secara vertikal dengan mengimplementasikan kontroler proporsional-integral-derivatif (PID).

## KAJIAN PUSTAKA

### Pengendali PID

Kontroler PID merupakan kontroler mekanisme umpan balik yang biasanya dipakai pada sistem kontrol industri. Sebuah kontroler PID secara kontinu menghitung nilai kesalahan sebagai beda antara setpoint yang diinginkan dan variabel proses terukur (Astrom, 1995). Persamaan output dari pengendali PID adalah,

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

dengan,

$e(t)$  : Sinyal galat

$u(t)$  : Sinyal output

$K_i$  : Gain Integral, parameter *tuning*

$K_d$  : Gain Derivatif, parameter *tuning*

$K_p$  : Gain proporsional, parameter *tuning*

$\frac{de(t)}{dt}$  : Turunan pertama  $T_d$

### Tuning Parameter Nilai PID Ziegler-Nichols Metode Kedua

Aturan Ziegler-Nichols bertujuan untuk menentukan nilai gain proporsional  $K_p$ , waktu integral  $T_i$ , dan waktu turunan  $T_d$  berdasarkan karakteristik respon transient pada *plant*. Ada dua metode pada aturan *tuning* Ziegler-Nichols yaitu metode pertama dan metode kedua (Ogata, 2010:578). Pada penelitian ini menggunakan metode kedua dengan dengan meningkatkan nilai  $K_p$  dari 0 hingga pada nilai kritis  $K_{cr}$  hingga didapatkan *output* pertama dalam bentuk osilasi secara terus menerus. Jika *output* tidak menunjukkan osilasi secara terus menerus meskipun dicoba menggunakan berbagai nilai  $K_p$  maka cara ini tidak dapat digunakan. Sehingga *gain* kritis  $K_{cr}$  dan periode  $P_{cr}$  yang berhubungan ditentukan secara eksperimen (Ogata, 2010:581). Berikut contoh grafik dan tabel aturan *tuning* Ziegler-Nichols metode kedua (Ogata, 2010:581):



Gambar 1. Respon kurva step *tuning*  
(Sumber: Ogata, 2010)

Tabel 1. *Tuning* Ziegler-Nichols Berdasarkan Gain dan Periode Kritis (Ogata, 2010)

| Typ<br>Kontroler | $K_p$        | $T_i$                              | $T_d$         |
|------------------|--------------|------------------------------------|---------------|
| P                | $0.5K_{cr}$  | $\infty$                           | 0             |
| PI               | $0.45K_{cr}$ | $\left(\frac{1}{1.2}\right)P_{cr}$ | 0             |
| PID              | $0.6K_{cr}$  | $0.5P_{cr}$                        | $0.125P_{cr}$ |

Sesuai dengan rumus Tabel 1 Ziegler dan Nichols untuk menentukan parameter  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$  *tuning* kontrol PID dengan metode pertama dengan ketentuan sebagai berikut

$$G_c(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

$$= 0.6K_{cr} \left( 1 + \frac{1}{0.5P_{cr}} + 0.125P_{cr} \right) \quad (3)$$

$$= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}}\right)^2}{s} \quad (4)$$

Dengan,

$K_{cr}$  : Gain kritis

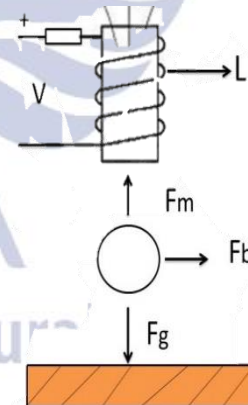
$P_{cr}$  : Periode ketika  $K_{cr}$

$T_i s$  : Waktu Integral

$T_d s$  : Waktu derivatif

### Model Matematika Sistem

Model levitasi magnetik ditunjukkan pada Gambar 2 terdiri dari *solenoid* dan benda magnetik yang melayang.



Gambar 2. Skema dari model levitasi magnetik  
(Sumber: Data primer, 2018)

dengan,

$V$  = tegangan (V)

$R$  = hambatan ( $\Omega$ )

$L$  = induktansi pada *solenoid* (H)

$F_m$  = gaya elektromagnetik (N)

$F_b$  = gaya yang dialami benda magnetik (N)

$F_g$  = gaya gravitasi (N)

Sistem magnetik levitasi dibuat menjadi kedalam 2 komponen yaitu sistem elektrikal dan sistem mekanik.

## Rancang Bangun Sistem Levitasi Magnet Menggunakan Kontrol PID

### a. Sistem elektrikal

Dengan menggunakan KVL (*Kirchhoff's Voltage Law*) pada elektromagnet didapat

$$V = V_R + V_L \quad (5)$$

Dari persamaan (5) dapat diuraikan menjadi

$$V = IR + L \frac{di}{dt} \quad (6)$$

dengan,

$V$  : tegangan masukan

$V_R$  : tegangan yang melewati hambatan

$V_L$  : tegangan yang melewati induktor (*solenoid*)

$I$  : arus pada *solenoid*

$R$  : hambatan pada *solenoid*

$L$  : induktansi pada *solenoid*

$\frac{di}{dt}$  : turunan arus terhadap waktu

### b. Sistem Mekanik

Berdasarkan gambar 2, dengan menggunakan hukum *Newton* yang kedua jumlah dari gaya antara elektromagnet dan magnet yang dilayangkan adalah :

$$F_b = F_g - F_m \quad (7)$$

Persamaan 7 dapat diuraikan sebagai berikut

$$m \frac{dv}{dt} = mg - C \left( \frac{i^2}{x^2} \right) \quad (8)$$

dengan,

$m$  : massa benda yang dilayangkan

$\frac{dv}{dt}$  : turunan kecepatan benda pelayangan terhadap waktu

$C$  : konstanta gaya elektromagnet.

$g$  : percepatan gravitasi

$i$  : arus pada *solenoid* ketika benda melayang

$x$  : jarak benda pelayangan

Dengan menganalisa mekanisme levitasi magnetik, maka model matematika dapat ditetapkan

Persamaan kinetik :

$$m \left( \frac{d^2x}{dt^2} \right) = mg - F(i, x) \quad (9)$$

Persamaan mekanik elektromagnetik :

$$F(i, x) = c \left( \frac{i^2}{x^2} \right) \quad (10)$$

Persamaan elektrik :

$$U(t) = IR + L \frac{di}{dt} \quad (11)$$

Ketika magnet *neodymium* melayang stabil maka  $x = x_0$  dan arus pada elektromagnet  $I = i_0$ , persamaan magnet *neodymium* pada titik keseimbangan yaitu

$$F(i_0, x_0) = mg \quad (12)$$

Untuk membuat kontroler, sistem dilinearisasi pada posisi kesetimbangan ( $i_0, x_0$ ).  $F(i, x)$  pada persamaan 9 menggunakan pendekatan deret *taylor* dan transformasi *laplace* didapatkan

$$\frac{X(s)}{I(s)} = \frac{1}{\left( \frac{i_0}{2g} \right) s^2 - i_0/x_0} \quad (13)$$

Dalam kondisi yang sebenarnya variabel yang dikendalikan adalah tegangan *input* pada elektromagnet. Hubungan antara *output* dari sensor dan tegangan input pada elektromagnet ( $u$ ) yaitu

$$G(s) = \frac{U_x(s)}{U(s)} = \frac{K_x/K_a}{(i_0/2g)s^2 - i_0/x_0} \quad (14)$$

dengan,

$F(i, x)$  : gaya ketika benda tertarik elektromagnetik

$F(i_0, x_0)$  : gaya ketika benda dalam keadaan seimbang

$G(s)$  : Fungsi alih dari model matematika *plant*

$U_x$  : kontrol tegangan pada *solenoid*

$U$  : *Output* tegangan dari sensor

$K_x$  : sensor *gain*

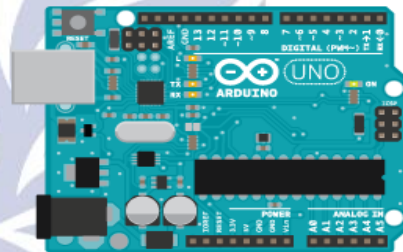
$K_a$  : tegangan yang terkontrol pada elektromagnet.

$x_0$  : posisi saat keseimbangan

$i_0$  : arus ketika  $x_0$

### Arduino Uno

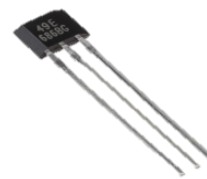
Arduino adalah pengendali mikro *single-board* yang bersifat *opensource*, diturunkan dari *wiring platform*, dirancang untuk memudahkan penggunaan elektronik dalam berbagai bidang. Arduino mega ini menggunakan chip ATmega328, memiliki Pin I/O digital, pin *input* Analog.



Gambar 3. Arduino Mega  
(Sumber : Arduino, 2018)

### Sensor hall efek

Sensor efek *hall* merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. Sensor tersebut akan menghasilkan tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut. Sensor ini terdiri dari sebuah lapisan silikon yang berfungsi untuk mengalirkan arus listrik dan dua buah elektroda pada masing-masing sisi silikon (Fransiskus, 2011).



Gambar 4 Sensor Efek Hall  
( Sumber: Honeywell, 2015)

## Elektromagnetik

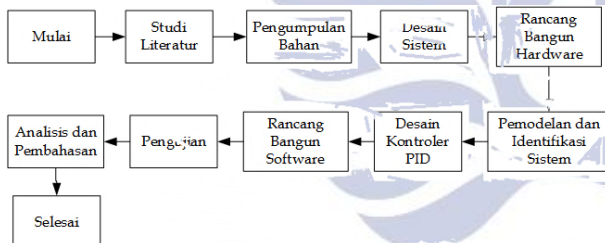
Elektromagnet didefinisikan sebagai prinsip pembangkitan medan magnet menggunakan arus listrik. Aktuator yang digunakan pada magnetik levitation system berupa magnet kumparan. Kumparan sendiri adalah sekumpulan kawat yang digulung menjadi heliks lilitan rapat (Sumber : Fransiskus, 2012).



Gambar 5. Elektromagnet  
(Sumber : SG Transmission, 2014)

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif. Pendekatan kuantitatif yaitu berpijak pada apa yang disebut dengan *fungsiionalisme structural, realisme, potivisme, behaviourisme* dan *empirisme* yang intinya menekankan pada hal-hal yang bersifat kongkrit, uji empiris dan fakta-fakta yang nyata (Sarwono, 2006)

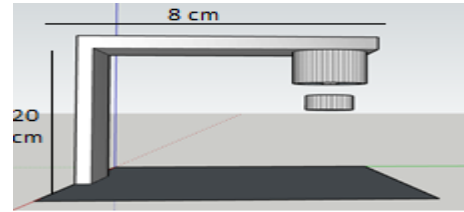


Gambar 6. Diagram rancangan penelitian.  
(Sumber: Data primer, 2018)

Diagram alur rancangan penelitian ini terdapat pada Gambar 6. Penelitian akan dilakukan dengan studi literatur yaitu menggunakan teori-teori yang telah didapatkan dan penelitian akan dilanjutkan ke prosedur perancangan dan rekayasa teknik.

## Perancangan Sistem

Perancangan sistem terdiri dari dua bagian awal, yaitu perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak. Rancangan perangkat keras terdiri dari bagian kerangka sistem levitasi magnet dan bagian elektris di tunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7 :

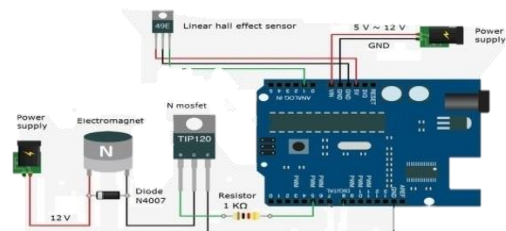


Gambar 6. Diagram arsitektur rancangan sistem  
(Sumber: Data primer, 2018)

Tabel 2. Spesifikasi *hardware* sistem levitasi magnet

| Data Alat     | Nilai          |
|---------------|----------------|
| Tiang         | Panjang        |
|               | 3 cm           |
|               | Lebar          |
|               | 0.5 cm         |
|               | Tinggi         |
|               | 20 m           |
| Horizontal    | Panjang        |
|               | 8 cm           |
|               | Lebar          |
| Elektromagnet | Lebar          |
|               | 3 cm           |
|               | Tinggi         |
| Magnet        | Tinggi         |
|               | 0.5 cm         |
|               | Holding Force  |
| Neodymium     | 5 kg           |
|               | Tegangan input |
|               | 12 V           |
| Magnet        | Arus input     |
|               | 0,3 A          |
|               | Diameter       |
| Neodymium     | 2.5 cm         |
|               | Diameter       |
|               | 1.2 cm         |
| Magnet        | Tinggi         |
|               | 0.3 cm         |
|               | Pull force     |
| Neodymium     | 2.1 kg         |

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

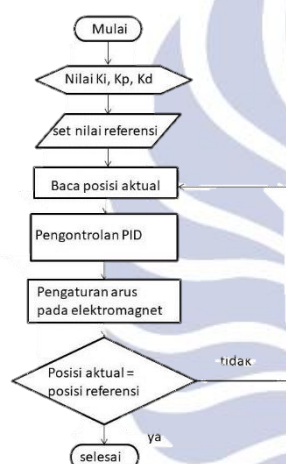


Gambar 7. Hubungan antar komponen elektris  
(Sumber: Data primer, 2018)

## Rancang Bangun Sistem Levitasi Magnet Menggunakan Kontrol PID

Perancangan perangkat keras merupakan proses desain bagian-bagian penyusun dan desain mekanik serta perangkat elektronik. Dalam sistem ini menggunakan komponen penyusun dasar meliputi *power supply*, elektromagnet, dan Arduino yang terhubung pada sensor *hall* efek.

Selanjutnya perancangan perangkat lunak terdiri dari komputer, LabView dan tampilan *monitoring*. Komputer sebagai pemroses data, penerima, pengirim program melalui kabel USB ke Arduino, menampilkan GUI (*Graphical User Interface*) dari LabView. *Software* LabView yang digunakan adalah jenis LabView 2014 yang sudah terintegrasi dengan Arduino untuk memonitoring respon sistem dari sistem levitasi magnet menggunakan kontroler PID. Tampilan monitoring berasal dari LabView yang didapat dari pembacaan sensor *hall* efek yang ditunjukkan pada Gambar 8 :



Gambar 8. Flowchart rancangan Software  
(Sumber: Data primer, 2018)

Berdasarkan Gambar 8 mula-mula sistem menginisialisasi nilai  $K_i$ ,  $K_p$ , dan  $K_d$  yang akan digunakan kemudian set nilai referensi *setpoint* berupa nilai pembacaan sensor efek *hall*, selanjutnya sensor mulai membaca adakah medan magnet terdeteksi. Jika ada Arduino akan mengirimkan nilai berupa PWM dan kemudian dikonversikan dalam tegangan dan arus yang dialirkan ke elektromagnet. magnet *neodymium* mulai terangkat dan sensor mendeteksi apakah magnet *neodymium* sudah sesuai dengan *setpoint* atau belum, jika belum maka sistem akan kembali *looping* kembali.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Perancangan Sistem Levitasi Magnetik

Hasil perancangan alat sistem levitasi magnet terbuat dari akrilik yang dibentuk seperti huruf L terbalik. Pada tiang L terbalik tersebut dipasang elektromagnet dan sensor *hall* efek berada di bawah elektromagnet.

Bagian elektris diletakkan dibagian bawah sebagai penyangga dari tiang dengan menambahkan *box* dari akrilik yang didalamnya terdapat kontroler utama berupa Arduino uno dan juga komponen-komponen pendukung lainnya antara lain *power supply* dan mosfet IRZ44N, yang berfungsi mengatur medan magnet yang dihasilkan elektromagnet. Hasil perancangan secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 9 :

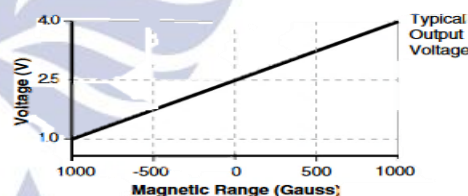


Gambar 9. Hasil perancangan sistem levitasi magnetik  
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

### Kalibrasi Sensor Hall Efek

Proses kalibrasi menggunakan pendekatan teoritis yaitu berdasarkan kurva/grafik yang diperoleh dari datasheet sensor yang digunakan.

Pengujian dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor efek *hall* yang digunakan dengan kurva/grafik dari *datasheet* sensor yang digunakan, Gambar 10 merupakan grafik hubungan antara tegangan dan *range magnetic* (gauss) :



Gambar 10. Kurva hubungan tegangan dan *range magnetic*  
(Sumber: Data primer, 2018)

Tabel 3 Kalibrasi sensor *hall* efek SS49E

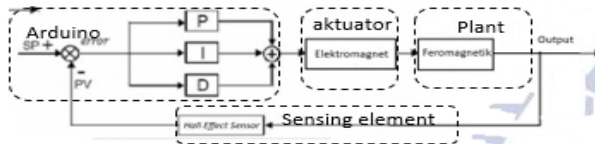
| No | Tegangan | Data dari datasheet | SS49E |
|----|----------|---------------------|-------|
|    | Volt     | Gauss               | Gauss |
| 1. | 1        | -1000               | -997  |
| 2. | 1.75     | -500                | -508  |
| 3. | 2.5      | 0                   | 1     |
| 4. | 3.25     | 500                 | 498   |
| 5. | 4        | 1000                | 995   |

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

### Pemodelan, Validasi Model dan Perancangan Kontroler PID

Pada penelitian ini, fungsi alih didapatkan dengan menggunakan model matematika dari plant sistem.

Gambar 11 menunjukkan diagram blok kontrol sistem levitasi magnetik menggunakan PID. Medan magnet dikendalikan dengan kendali PID sehingga sinyal *error* selisih antara acuan dan *output* yang di proses diproses secara proporsional, integral dan diferensial untuk menentukan sinyal kontrol yang akan diberikan ke *plant*.



Gambar 11. Diagram blok sistem levitasi magnetik dengan PID

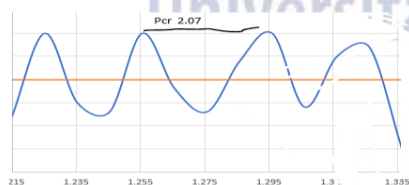
(Sumber : Data Primer, 2018)

Beberapa bagian dari diagram blok sistem diatas dapat dijelaskan sebagai berikut :

- Arduino berfungsi sebagai pusat kendali PID.
- Elektromagnet sebagai aktuator
- Magnet *neodymium* sebagai plant dalam sistem.
- Sensor efek hall digunakan sebagai feedback pembacaan medan elektromagnet yang dihasilkan oleh elektromagnet.

Selanjutnya sistem levitasi magnetik digunakan metode *Ziegler Nichlos* tipe 2 untuk mencari nilai  $K_p$ ,  $T_i$ ,  $T_d$ . Untuk melakukan pemodelan *Ziegler Nichlos* tipe 2 dengan cara menaikka

n nilai  $K_p$  dari 0 hingga mencapai *critical value*  $K_{cr}$  hingga output pertama mencapai osilasi berkelanjutan. Osilasi pada respon sistem akan digunakan untuk mencari nilai dari  $K_{cr}$  dan  $P_{cr}$ . Setelah melakukan eksperimen didapatkan nilai  $K_p = 4.1$  yang respon sistemnya ditunjukkan pada Gambar 12



Gambar 12. Respon sistem  
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

Dari Gambar 12 menunjukkan bahwa *plant* model dapat ditentukan dua buah konstanta yaitu *critical gain* ( $K_{cr}$ ) dan *corresponding period* ( $P_{cr}$ ) sesuai didapatkan data-data berikut :

- $K_{cr} = 4,2$
- $P_{cr} = 2$

Dari hasil data grafik respon sistem maka dapat dirancang kontroler PID yang sesuai dengan aturan tabel parameter Ziegler-Nicols metode pertama maka dihitung parameter  $K_p$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$  lebih jelasnya perhitungan untuk mendapatkan parameter kontroler PID pada Tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Parameter hasil penalaan dengan aturan Ziegler-Nicols metode pertama

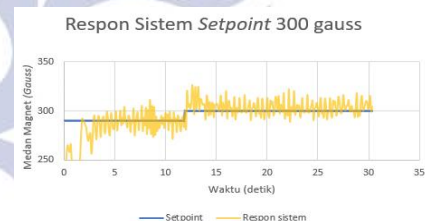
| $K_p$            | $\tau_i$       | $\tau_d$         |
|------------------|----------------|------------------|
| $0.6K_{cr}$      | $0.5P_{cr}$    | $0.125P_{cr}$    |
| $0.6 \times 4.1$ | $0.5 \times 4$ | $0,125 \times 4$ |
| 2.5              | 2              | 0.025            |

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

### Implementasi dan Pengujian Kontroler PID

Setelah mendapatkan nilai  $K_p$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_d$  selanjutnya adalah mengimplementasikan kontroler PID maka terlebih dahulu program di *upload* ke *microcontroller* arduino uno dan memasukkan nilai-nilai parameter PID yang sudah didapatkan dari perhitungan Ziegler-Nicols metode pertama. Pengujian pada respon sistem ril dengan beberapa metode yaitu menguji respon kontroler PID

- Respon Sistem Menggunakan Kontroler PID



Gambar 13. Respon sistem dengan *setpoint* 300 gauss  
(Sumber : Data Primer, 2018)

Berdasarkan Gambar 13, dapat dihitung parameter respon  $\tau_d$  (*Time Delay*),  $\tau_r$  (*Rise Time*),  $\tau_s$  (*Settling Time*),  $E_{ss}$  (*Error Steady State*) dengan nilai  $\tau = 42,04$  detik.

Tabel 5. Parameter respon sistem menggunakan kontroler PID

| Parameter Respon               | Nilai       |
|--------------------------------|-------------|
| Waktu Tunda ( $\tau_d$ )       | 0,351 detik |
| Waktu Naik ( $\tau_r$ 5%-95%)  | 1,492 detik |
| Waktu Naik ( $\tau_r$ 10%-90%) | 1,113 detik |
| Waktu Tunak ( $\tau_s$ 2%)     | 2,028 detik |

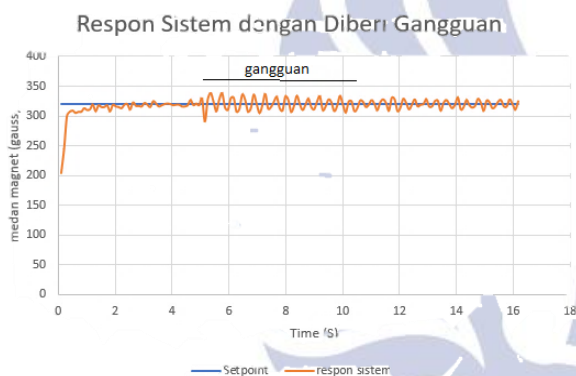
## Rancang Bangun Sistem Levitasi Magnet Menggunakan Kontrol PID

| Parameter Respon             | Nilai       |
|------------------------------|-------------|
| Waktu Tunak ( $\tau_s$ 5%)   | 1,521 detik |
| Waktu Tunak ( $\tau_s$ 0,5%) | 2,535 detik |
| Error SteadyState (Ess)      | 0,667 %     |

(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

### b. Pengujian Respon Sistem dengan Gangguan

Pada Gambar 15 sistem levitasi magnetik diberi gangguan pada 5,052 detik. Ketika diberi gangguan dengan cara digoyangkan sedikit magnet *neodymium* grafik respon mengalami ketidakstabilan yaitu magnet *neodymium* menjadi bergoyang-goyang sehingga pembacaan pada sensor hall efek menjadi kurang stabil. dibutuhkan waktu tunak sebanyak 5,255 detik untuk kembali ke *setpoint* dan efek selanjutnya membuat overshoot sebesar 339 gauss lebih tepatnya 19 gauss.



Gambar 15. Respon sistem dengan gangguan  
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

### Hasil Percobaan Sistem Levitasi Magnetik

Berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan bahwa kontrol medan magnet pada sistem levitasi magnetik berhasil dilakukan terbukti dengan melayangnya magnet *neodymium* dengan stabil. Gambar 16 menunjukkan pelayangan magnet *neodymium*.



Gambar 16. Pelayangan magnet *neodymium* silinder  
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2018)

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan data hasil yang telah diperoleh dan analisa hasil percobaan yang dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa rancang bangun sistem levitasi magnetik menggunakan kontroler PID berhasil dibuat dan sistem dapat mengikuti *setpoint* yang telah ditentukan.

Implementasi kontroler PID pada sistem levitasi magnetik menghasilkan nilai konstanta  $K_p = 2.5$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 0.025$  mampu melayangkan magnet *neodymium* dengan stabil. Berdasarkan Tabel 5 pada *setpoint* 300 gauss di dapatkan Error SteadyState (Ess) : 0.667 %,  $t_d = 0.351$  s,  $t_r(5\%-95\%) = 1.492$  s,  $t_r(10\%-90\%) = 1.1131$  s,  $t_s(5\%) = 1.521$  s,  $t_s(2\%) = 2.208$  s, dan  $t_s(0,5\%) = 2.535$  s..

### Saran

Berdasarkan simpulan diatas ada beberapa saran yang dapat dilakukan untuk pengembangan sistem agar hasil lebih maksimal yaitu menggunakan elektromagnet yang lebih kuat agar air gap saat pelayangan jaraknya lebih jauh, menggunakan jenis sensor yang berbeda seperti sensor IR, plant pengontrolan levitasi magnetik masih dapat dikembangkan dengan mengubah kontroler jenis kontrol adaptif, *fuzzy logic*, dan jaringan saraf tiruan (JST) agar dapat mengurangi nilai eror *steady state*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arduino. 2018. "Tech Specs Arduino UNO R3".(Online), (<https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>, diunduh 29 April 2018).
- Astrom, Karl. 1995. PID Controllers: "Theory, Designing, and Tuning Second edition". United State of America.
- Dwi Basuki Wibowo, Sindu Sutomo. 2011. "Pemodelan dan Simulasi Sistem Control Magnetic Levitation Ball". Semarang : Universitas Diponegoro.
- Fransiskus Bazoka. 2012. "Sistem Kendali Posisi Berbasis Levitasi Magnetik". Depok : UI
- Honeywell, 2015. "SS39ET/SS49E/SS59ET Series Linear Hall-effect sensor ICs. Honeywell International Inc.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. "Modern Control Engineering Fifth edition". New Jersey : Pearson.
- Sarwono, Jonathan. 2006. "Metode Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif". Yogyakarta : Graha Ilmu.
- SG Transmission, 2014. "Electromagnet Type 58. SG Transmission.

Stonewall Hickman. "Modeling and Designing A PID Controlled Magnetic Levitation System".

Xue-juan Shao. 2016. "Fuzzy PID Control of the Magnetic Levitation Ball System. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology.

