

Kontrol Motor *Brushless* DC Menggunakan *Six Step Comutation* dengan Kontrol PID (*Proportional Integral Derivative*)

Rafli Fajar Anugrah

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas
Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas
Hang Tuah, Surabaya, Jawa Timur,
Indonesia, 60111
Raflifajar25@gmail.com

Iradiratu Diah P.K.

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas
Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas
Hang Tuah, Surabaya, Jawa Timur,
Indonesia, 60111
iradiratu@hangtuah.ac.id

Belly Yan Dewantara

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas
Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas
Hang Tuah, Surabaya, Jawa Timur,
Indonesia, 60111
Bellyyandewantara@gmail.com

Abstrak - Di Indonesia sudah banyak penggunaan sepeda listrik yang menggunakan motor listrik *Brushless DC* (BLDC), dikarenakan motor BLDC kecepatan nya yang stabil. Namun motor *Brushless DC* jika diberi pembebanan maka kecepatan akan menurun sehingga membutuhkan kontroler. Pada penelitian ini kontrol kecepatan Motor BLDC menggunakan *six step comutation* dengan kontrol PID. Motor BLDC termasuk dalam motor sinkron dengan permanen magnet, sehingga motor jenis ini dilengkapi dengan sensor *hall-effect* untuk mendeteksi posisi rotor. Dengan data posisi rotor dari *hall-effect*, maka dibutuhkan rangkaian inverter yang dapat mensuplai energi listrik kedalam motor pada kondisi sinkron. Rangkaian *Six Step Comutation* atau 6 model pensaklaran ini untuk mengubah tegangan sumber DC ke AC 3 fasa. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh kontrol menggunakan PID menghasilkan respon sistem yang stabil dengan nilai dengan *rise time* lebih kecil dari 0.1 s dan *settling time* lebih kecil dari 0.2 s dengan rasio kesalahan *steady state* dan *overshoot* yang tidak lebih besar dari 1%. Dari hasil tersebut menggambarkan bahwa kontrol kecepatan BLDC menghasilkan respon kecepatan yang *smooth*, stabil dan dapat meminimalisir kesalahan *steady state* saat pembebanan terjadi.

Kata Kunci— Motor BLDC, *Six Step Comutation*, Kontrol PID, Software PSIM

I. PENDAHULUAN

Pada zaman modern ini penggunaan motor listrik banyak digunakan dalam aplikasi sehari-hari. Hanya saja motor listrik yang sering digunakan yaitu motor DC dan motor induksi. Keunggulan motor DC sendiri memiliki efisiensi yang tinggi, namun motor DC mempunyai kerugian yaitu masih menggunakan *brush* dalam komutasi yang mengakibatkan biaya perawatan yang mahal. *Brush* pada motor DC juga dapat mengalami kerusakan karena *brush* akan menimbulkan *arching* dalam proses komutasinya. Untuk memenuhi kebutuhan performa yang baik, torsi tinggi, kecepatan tinggi, dan biaya perawatan yang lebih murah maka mesin listrik yang cocok digunakan adalah motor *Brushless Direct Current* (BLDC).

Menurut penelitian sebelumnya, motor *Brushless Direct Current* (BLDC) banyak digunakan karena motor listrik ini mempunyai performa yang baik, kecepatan tinggi, dan handal. Motor BLDC merupakan motor dalam klasifikasi motor *synchronous* AC tiga fasa. Untuk melihat performa motor BLDC dapat dilakukan dengan cara pembacaan karakteristik motor dari nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *eror steady state*. Kelemahan dari motor BLDC adalah tidak memiliki kecepatan dan torsi yang konstan saat diberi beban sehingga putaran kecepatan pada motor BLDC ini akan menurun. Oleh karena itu diperlukan pengendalian kecepatan yang mampu menstabilkan kecepatan motor BLDC saat diberi beban. (Maher Zakharia O.P., 2018). Sistem kendali cerdas dapat diaplikasikan

untuk menstabilkan kecepatan motor BLDC, salah satunya adalah controller PID (*Proportional Integral Derivative*).

Proportional Integral Derivative atau yang biasanya disingkat PID yaitu sebuah kontrol mekanisme umpan balik yang sering digunakan pada sistem kontrol industri. Controller PID ini secara kontinu menghitung kesalahan sebagai pembeda antara pada setpoint yang diinginkan. Sehingga sistem tersebut mempunyai kemampuan untuk meminimalkan kesalahan disetiap waktu dengan penyetelan variabel kontrol yang digunakan dari sistem yang ditentukan (M. Ruswandi Djalal dkk, 2015). Dalam penelitian tersebut telah membuktikan bahwa kontrol PID ini dapat memperbaiki respon motor induksi dengan menghasilkan respon yang cepat dan *smooth* serta *overshoot* yang kecil. Namun aplikasi PID pada penelitian tersebut digunakan sebagai pengendali kecepatan motor DC dan masih berupa simulasi melalui MATLAB. Berdasarkan penelitian yang disampaikan diatas maka pada penelitian ini akan penerapakan pengendali PID sebagai penyelesaian masalah pengendali motor BLDC.

Penelitian ini menggunakan motor *Brushless Direct Current* dengan inverter nya menggunakan *Six Step Comutation* dan untuk sistem kontrol kecepatan PID sendiri akan di simulasikan di dalam sebuah software PSIM. Nilai *setpoint* yang akan digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor menggunakan perhitungan matematik kontrol *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative*. Hasil penelitian ini mampu menyelesaikan masalah yang ada yaitu menjaga kecepatan BLDC tetap stabil meskipun dalam keadaan berbeban. Nilai respon dari pengendali kecepatan PID dengan *rise time* lebih kecil dari 0.1 s dan *settling time* lebih kecil dari 0.2 s dengan rasio kesalahan *steady state* dan *overshoot* yang tidak lebih besar dari 1%. Sehingga mampu mengontrol kecepatan nya lebih baik ketika pembebanan.

Masalah yang didapat pada penelitian ini adalah bagaimana respon BLDC jika mendapat pembebanan yang berbeda, bagaimana mendesain kontrol kecepatan dengan PID sehingga kecepatan BLDC tetap konstan dan *smooth*, bagaimana performa BLDC saat pengendali PID diterapkan pada PSIM, bagaimana mengetahui perbandingan respon antara kontrol PID dan kontrol PI dalam kecepatan motor BLDC.

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan membangun alat kendali kecepatan motor *Brushless DC* menggunakan inverter *Six Step Comutation* dan pengendalian kecepatan nya menggunakan kontrol PID yang sudah di rangkai simulasi nya pada software PSIM sehingga performance BLDC dapat diperbaiki melalui nilai *rise time*, *settling time*, *overshoot*, hingga *eror steady state* BLDC.

Mengingat luas dan banyaknya hal – hal yang perlu diperhatikan dalam penelitian ini, maka penulis membatasi

permasalahan yang di bahas dalam penelitian ini yaitu menggunakan motor brushless DC, menggunakan rangkaian inverter *six step comutation*, tidak membahas kontruksi motor, tidak membahas mekanik motor, menganalisa kecepatan motor saat tanpa beban dan ketika beban torsi 0,1 NM, 0,05 NM, dan 0,07 NM.

Penelitian ini akan menggunakan rangkaian inverter *Six Step Comutation* dan rangkaian PID untuk pengendali kecepatan motor *Brushless DC sebagai speed controller*. Penelitian yang dilakukan yaitu dengan membuat rangkaian pada PSIM dengan menggunakan motor BLDC. Sumber dari motor BLDC menggunakan tegangan DC kemudian dihubungkan ke rangkaian inverter *six step comutation* yang sudah terhubung oleh rangkain sistem PID, sehingga tegangan DC akan berubah AC pada keluaran Driver control yang kemudian sebagai input pada motor BLDC. Rangkain motor BLDC akan diberi beban torsi yang berbeda untuk mengetahui perubahan kecepatan pada motor BLDC. Saat pembebanan tersebut rangkaian PID sudah terhubung oleh sensor kecepatan yang akan mendeteksi perubahan kecepatan pada motor BLDC yang kemudian akan menambah tegangan DC untuk menyesuaikan kecepatan motor sesuai setpoint.

II. BAHAN DAN METODE

A. Motor Brushless DC

Motor brushless DC atau biasa disebut BLDC, merupakan motor synchronous AC tiga fasa yang membutuhkan tegangan DC sebagai sumbernya. Rotor pada motor BLDC tersusun dari magnet permanen sehingga kutubnya tetap sedangkan stator terbuat dari belitan sehingga kutub magnet tersebut dapat berubah tergantung polaritas arus belitan stator yang diberikan.

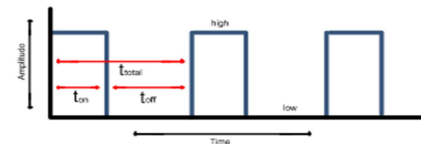


Gbr. 1 Motor Brushless DC

Motor Brushless DC memiliki 2 tipe kontruksi yang berbeda yaitu tipe *outer rotor* yang bentuk nya sesuai pada gambar 1. dimana tipe ini rotornya berada mengelilingi stator. Sedangkan jenis *inner rotor* yaitu rotor nya berada di dalam stator.

B. Inverter Six Step Comutation

Motor brushless DC merupakan motor *Synchronous AC* 3 fasa maka membutuhkan sebuah desain inverter yang mampu mengubah tegangan DC ke AC 3 fasa sebagai input pada motor BLDC. Inverter drive sendiri memiliki banyak metode untuk mengontrol nya, namun yang lebih efektif yaitu dengan menggunakan metode *six step* atau yang biasa disebut dengan metode 6 pensaklaran.



Gbr. 2 Sinyal Duty Cycle PWM

Gambar 2 diatas merupakan gambar sinyal *duty cycle* pwm dengan keluaran sinyal persegi (square). Pada lebar sinyal high merupakan lama nya waktu posisi sinyal on, sedangkan low merupakan sinyal lama nya waktu posisi off. Dengan gambar tersebut mampu diatur dengan mengatur *duty cycle* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$d = \left(\frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \right) \times 100\%$$

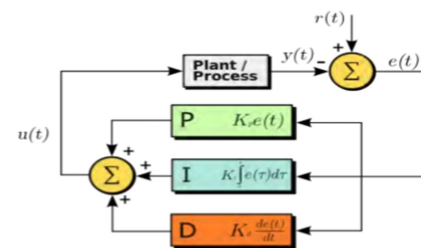
Keterangan :

- d = Duty Cycle
- t_{on} = Waktu On
- t_{off} = Waktu Off

Suatu kombinasi sensor hall menunjukkan nilai 101, maka sinyal PWM A dan B akan menyala, sedangkan sinyal C akan *floating*, ketika kombinasi 001, maka sinyal PWM A dan C akan menyala sedangkan sinyal B akan *floating* dan seterusnya. Kombinasi ini hanya terdapat pada pengaturan PWM *six-step*. Namun tidak bisa di implementasikan pada pengaturan PWM sinusoidal, karena kondisi ini *floating* dimana sinyal sinusoidal berubah dari positif ke negatif atau sebaliknya melewati nilai nol (0).

C. Kontrol PID

Kontroller PID merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Pengontrol PID adalah pengontrol konvensional yang banyak dipakai dalam dunia industri.

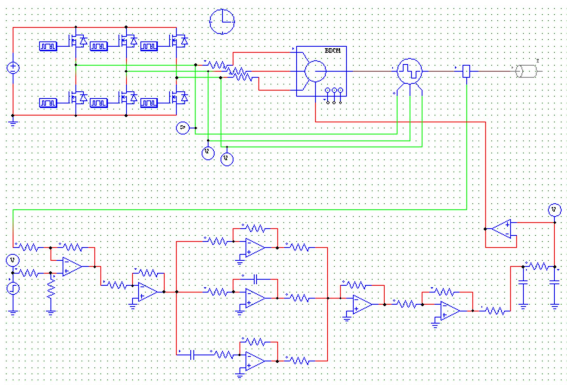


Gbr. 3 Diagram blok kontrol PID

Sebuah kontroler PID secara kontinyu menghitung nilai kesalahan sebagai beda antara setpoint yang diinginkan dan variabel proses terukur. Kontroler mencoba untuk meminimalkan nilai kesalahan dengan penyetelan variabel kontrol.

D. Konfigurasi Sistem

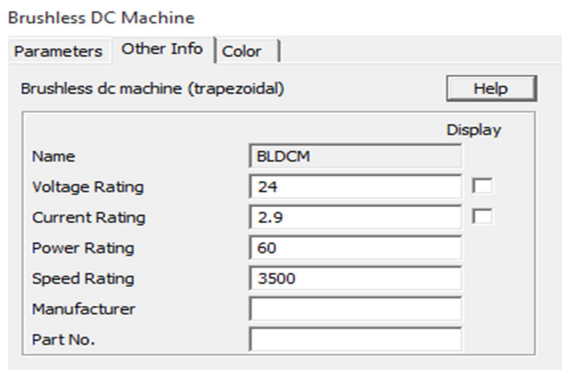
Pada penelitian ini menggunakan metode penelitian yang berupa simulasi. Tujuan dari penelitian ini yaitu suatu alat yang dapat mengontrol kecepatan motor *brushless DC* dengan menggunakan kendali PID ketika terjadi pembebanan. Penelitian dilakukan dengan perancangan sistem yang di rangkai melalui rangkaian *Simulink* pada *software* PSIM.



Gbr. 4 Rangkaian sistem keseluruhan

Secara garis besar pemodelan konfigurasi sistem pada penelitian direpresentasikan oleh gambar 4. Sistem tersebut terdiri dari sumber tegangan DC, rangkaian inverter pengubah tegangan DC ke AC tiga fasa menggunakan rangkaian *Six Step Comutation* yang dimana komponennya terdiri dari 6 mosfet yang dihubungkan secara parallel dengan komponen *Gating Block Switch*, kemudian menambahkan rangkaian pengontrol kecepatan menggunakan PID, dan menggunakan motor BLDC. Pemasangan *speed reference* pada rangkaian kendali kecepatan PID bertujuan untuk mengontrol kecepatan pada motor Brushless DC sesuai dengan *speed reference* yang sudah ditentukan. Konfigurasi sistem dari sistem pengaturan kecepatan motor *brushless DC* yang awal dan masih belum dikontrol dengan rangkaian PID. Kontroller PID diletakkan antara output dan sensor kecepatan motor BLDC dan *inverter* yang berfungsi sebagai regulator tegangan agar kecepatan motor BLDC konstan dengan mempertahankan kecepatan sesuai *setpoint*.

E. Permodelan BLDC

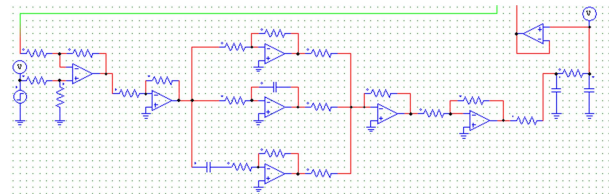


Gbr. 5 Parameter motor BLDC

Pada gambar 5. merupakan parameter spesifikasi pada motor *Brushless DC* yang akan digunakan. Motor BLDC yang digunakan yaitu dengan tegangan *rating* sebesar 24 volt DC, dan Arus *rating* nya yaitu 2,9 Ampere, dengan daya *rating* nya sebesar 60 Watt, dan kecepatan pada motor BLDC sendiri yaitu 3500 RPM.

F. Konfigurasi Kontrol PID

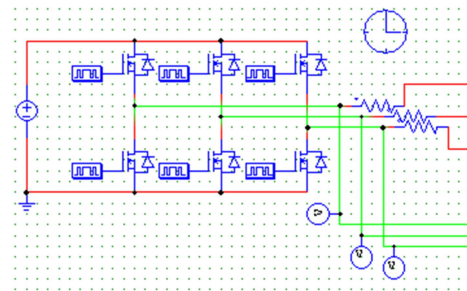
Untuk melakukan pengontrolan diperlukan sebuah rangkaian kecepatan motor BLDC agar nilai kecepatan yang di inginkan sesuai. Maka dari itu pada penelitian ini menggunakan kontroller kecepatan PID.



Gbr. 6 Rangkaian kontrol PID sistem

Tahap pertama yaitu membentuk sebuah rangkaian PID pada *Simulink PSIM* yang sesuai pada gambar 6. Kemudian hitung harga persamaan nilai K_p , K_i , dan K_d nya agar dapat di implementasikan pada sistem rangkaian. Hasil dari nilai persamaan parameter K_p , K_i , dan K_d akan dimasukan pada "Gain" komponen yang ada pada rangkaian PID tersebut dan sensor kecepatan output motor BLDC. Hingga dapat direalisasikan pada sistem PID Konvensional kedalam bahasa pemrograman *controller* di simulasi PSIM tersebut.

G. Inverter Six Step Comutation



Gbr. 7 Rangkaian inverter six step comutation

Rangkaian *six step comutation* dapat dilihat pada gambar 7. diatas. Sumber tegangan awalnya yaitu tegangan DC. Kemudian terhubung dengan 6 MOSFET dan untuk menentukan MOSFET nya menggunakan perumusan sebagai berikut :

$$I_{motor} = \frac{P_{motor}}{V_{motor}}$$

Keterangan :

I_{motor} = Arus yang dibutuhkan pada motor

P_{motor} = Daya yang dibutuhkan pada motor

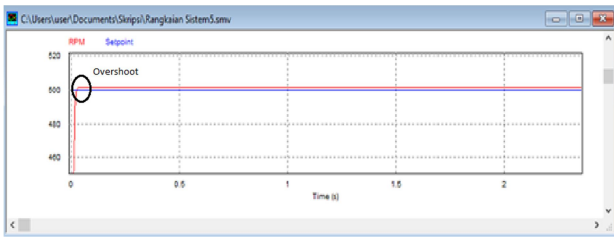
V_{motor} =Tegangan yang dibutuhkan pada motor

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem ini bertujuan untuk memastikan agar sistem yang dibuat berfungsi dengan baik dan sesuai tujuan dan teori yang telah dipelajari sebelumnya. pengujian ini terdiri dari pengujian respon kontroller pid dan pengujian respon kontroller pi dengan tanpa beban, beban 0.01 nm, beban 0.05 nm, dan beban 0.07 nm. setelah melakukan beberapa pengujian perbandingan sistem yang telah dibuat, data yang diperoleh akan dianalisa untuk mengetahui proses kerja dari seluruh sistem yang dibuat.

J. Analisa Kontrol PID Tanpa Beban

Respon kurva pada penelitian kontrol *Six Step Comutation* dengan PID Controller tanpa beban dengan *setpoint* 500 RPM ini sebagai berikut:



Gbr. 8 Grafik respon kontrol PID tanpa beban

Dari hasil simulasi tanpa beban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) *Time settling pada kecepatan 500 rpm tanpa beban didapatkan* $T_s = 0.004s$

2) *Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :*

$$ess = \frac{(501,1 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0022\%$$

3) *Maximum Overshoot (Mp) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 500,2 maka :*

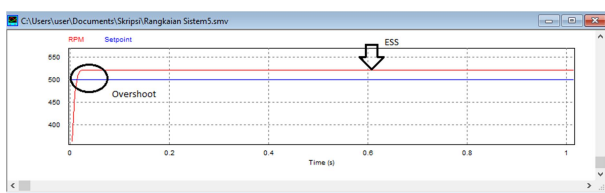
$$M_p = \frac{(500,1 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0002\%$$

4) *Rise time pada kecepatan 500 rpm tanpa beban ini mendapatkan nilai yaitu* $Tr = 0.003s$

Dari gambar 8 diatas dari setpoint 500 RPM itu menunjukkan *error steady stage* menunjukkan hasil 0.0022% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.003 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.004 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0002%.

K. Analisa Kontrol PI Tanpa Beban

Respon kurva pada penelitian kontrol PI tanpa beban dengan *setpoint* 500 RPM ini sebagai berikut:



Gbr. 9 Grafik respon kontrol PI tanpa beban

Dari hasil simulasi tanpa beban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) *Time settling pada kecepatan 500 rpm tanpa beban didapatkan* $T_s = 0.005s$

2) *Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :*

$$ess = \frac{(515,2 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0406\%$$

3) *Maximum Overshoot (Mp) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 520,3 maka :*

$$M_p = \frac{(520,3 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0406\%$$

4) *Rise time pada kecepatan 500 rpm tanpa beban ini mendapatkan nilai yaitu* $Tr = 0.0045s$

Dari gambar 9 diatas dari *setpoint* 500 RPM itu menunjukkan *error steady stage* menunjukkan hasil 0.0304% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.0045 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.005 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0406%.

L. Perbandingan Hasil Tanpa Beban

Dari hasil grafik kedua di atas maka dapat disimpulkan pada tabel 1. dibawah ini :

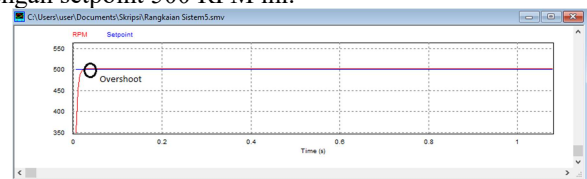
TABEL I
HASIL PERBANDINGAN TANPA BEBAN

| Kontrol | Settling Time | Rise Time | Overshoot | Error Steady State |
|---------|---------------|-----------|-----------|--------------------|
| PID | 0,004 | 0,003 | 0,0002% | 0,0022% |
| PI | 0,005 | 0,0045 | 0,0406% | 0,0304% |

Menurut kesimpulan tabel diatas bahwa kontrol PID mampu memperbaiki respon motor *Brushless DC* tanpa beban dari segi *error steady state* nya, *overshoot*, *rise time* bahkan *settling time* dibandingkan dengan kontrol PI

M. Analisa Kontrol PID Beban 0,01 NM

Respon kurva pada penelitian dengan beban 0.01 Nm dengan *setpoint* 500 RPM ini.



Gbr. 10. Grafik Respon Kontrol PID Beban 0.01 NM

Dari hasil simulasi berbeban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) *Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.01 Nm didapatkan* $T_s = 0.004s$

2) *Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :*

$$ess = \frac{(501,4 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0028\%$$

3) *Maximum Overshoot (Mp) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 500,3 maka :*

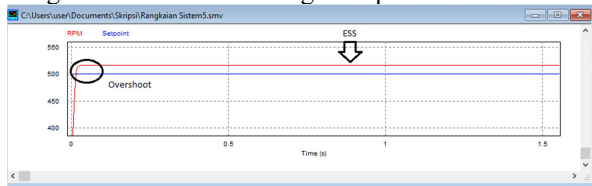
$$M_p = \frac{(500,2 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0006\%$$

4) *Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.01 Nm ini mendapatkan nilai yaitu* $Tr = 0.0035s$

Dari gambar 10, diatas dari *setpoint* 500 RPM itu menunjukkan *error steady stage* menunjukkan hasil 0.0028% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.0035 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.004 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0006%.

N. Analisa Kontrol PI Beban 0,01 NM

Respon kurva pada penelitian menggunakan kontrol PI dengan beban 0.01 Nm dengan setpoint 500 RPM ini



Gbr 11. Grafik Respon Kontrol PI Beban 0.01 NM

Dari hasil simulasi berbeban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.01 Nm didapatkan $T_s = 0.0055s$

2) Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :

$$ess = \frac{(518,3 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0276\%$$

3) Maximum Overshoot (M_p) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 518,3 maka :

$$M_p = \frac{(518,3 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0366\%$$

4) Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.01 Nm ini mendapatkan nilai yaitu $Tr = 0.005s$

Dari gambar 11 diatas dari setpoint 500 RPM itu menunjukkan *error stady stage* menunjukkan hasil 0.0276% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.005 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.0055 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0366%.

O. Perbandingan Hasil Beban 0,01 NM

Dari hasil grafik kedua di atas maka dapat disimpulkan pada tabel 2. dibawah ini:

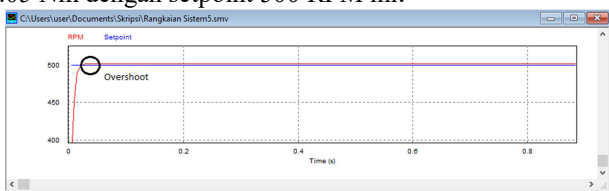
TABEL II
HASIL PERBANDINGAN BERBEBAN 0,01 NM

| Kontrol | Settling Time | Rise Time | Overshoot | Error Steady State |
|---------|---------------|-----------|-----------|--------------------|
| PID | 0,004 | 0,0035 | 0,0006% | 0,0028% |
| PI | 0,0055 | 0,005 | 0,0366% | 0,0276% |

Menurut kesimpulan tabel diatas bahwa kontrol PID mampu memperbaiki respon motor *Brushless DC* berbeban 0.01 NM dari segi *error steady state* nya, *overshoot*, *rise time* bahkan *settling time* dibandingkan dengan kontrol PI.

P. Analisa Kontrol PID Beban 0,05 NM

Respon kurva pada penelitian kontrol PID dengan beban 0.05 Nm dengan setpoint 500 RPM ini.



Gambar 12. Grafik respon kontrol PID beban 0.05 NM

Dari hasil simulasi berbeban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.05 Nm didapatkan $T_s = 0.004s$

2) Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :

$$ess = \frac{(501,6 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0032\%$$

3) Maximum Overshoot (M_p) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 500,5 maka :

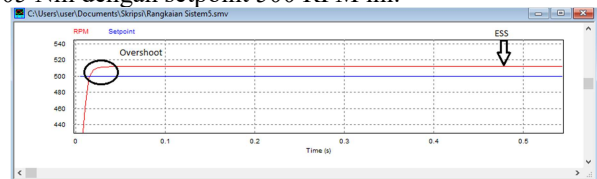
$$M_p = \frac{(500,5 - 500)}{500} \times 100\% = 0,001\%$$

4) Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.05 Nm ini mendapatkan nilai yaitu $Tr = 0.0035s$

Dari gambar 12 diatas dari setpoint 500 RPM itu menunjukkan *error stady stage* menunjukkan hasil 0.0032% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.0035 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.004 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.001%.

Q. Analisa Kontrol PI Beban 0,05 NM

Respon kurva pada penelitian kontrol PID dengan beban 0.05 Nm dengan setpoint 500 RPM ini.



Gambar 13. Grafik respon kontrol PI beban 0.05 NM

Dari hasil simulasi berbeban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.05 Nm didapatkan $T_s = 0.0055s$

2) Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :

$$ess = \frac{(510,7 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0214\%$$

3) Maximum Overshoot (M_p) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 515 maka :

$$M_p = \frac{(515 - 500)}{500} \times 100\% = 0,03\%$$

4) Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.05 Nm ini mendapatkan nilai yaitu $Tr = 0.005s$

Dari gambar 13 diatas dari setpoint 500 RPM itu menunjukkan *error stady stage* menunjukkan hasil 0.0214% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.005 second, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.0055 second, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.03%.

R. Perbandingan Hasil Beban 0,05 NM

Dari hasil grafik kedua di atas maka dapat disimpulkan pada tabel 3. dibawah ini:

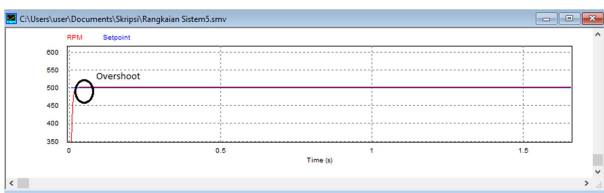
TABEL III
HASIL PERBANDINGAN BERBEBAN 0,05 NM

| Kontrol | Settling Time | Rise Time | Overshoot | Error Steady State |
|---------|---------------|-----------|-----------|--------------------|
| PID | 0,004 | 0,0035 | 0,001% | 0,0032% |
| PI | 0,0055 | 0,005 | 0,03% | 0,0214% |

Menurut kesimpulan tabel diatas bahwa kontrol PID mampu memperbaiki respon motor *Brushless DC* berbeban 0.05 NM dari segi *error steady state* nya, *overshoot*, *rise time* bahkan *settling time* dibandingkan dengan kontrol PI.

S. Analisa Kontrol PID Beban 0,07 NM

Respon kurva pada penelitian kontrol PID dengan beban 0.07 Nm dengan *setpoint* 500 RPM ini



Gbr 14. Grafik respon kontrol PID beban 0.07 NM

Dari hasil simulasi tanpa beban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.07 Nm didapatkan $T_s = 0.004s$

2) Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :

$$ess = \frac{(510,8 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0036\%$$

3) Maximum Overshoot (M_p) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 500,9 maka :

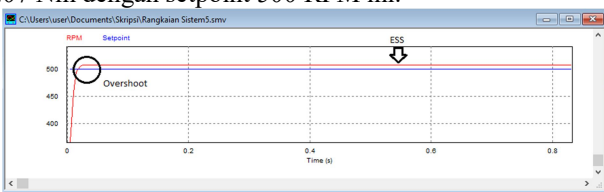
$$M_p = \frac{(500,9 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0018\%$$

4) Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.07 Nm ini mendapatkan nilai yaitu $T_r = 0.0035s$

Dari gambar 14 diatas dari *setpoint* 500 RPM itu menunjukkan *error stady stage* menunjukkan hasil 0.0036% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.0035 *second*, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.004 *second*, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0018%.

T. Analisa Kontrol PI Beban 0,07 NM

Respon kurva pada penelitian kontrol PI dengan beban 0.07 Nm dengan *setpoint* 500 RPM ini.



Gambar 15. Grafik respon kontrol PI beban 0.07 NM

Dari hasil simulasi tanpa beban tersebut maka kita dapat menghitung *time respon speed* nya sesuai dengan persamaan sebagai berikut :

1) Time settling pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.07 Nm didapatkan $T_s = 0.006s$

2) Error steady state yang didapatkan dari pengujian dengan set adalah :

$$ess = \frac{(506,3 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0126\%$$

3) Maximum Overshoot (M_p) merupakan Nilai tertinggi dari grafik adalah 509,7 maka :

$$M_p = \frac{(509,7 - 500)}{500} \times 100\% = 0,0194\%$$

4) Rise time pada kecepatan 500 rpm dengan beban 0.07 Nm ini mendapatkan nilai yaitu $T_r = 0.0055s$

Dari gambar 15 diatas dari *setpoint* 500 RPM itu menunjukkan *error stady stage* menunjukkan hasil 0.0126% yang terjadi, sedangkan untuk *rise time* (waktu naik) memperoleh 0.0055 *second*, kemudian *settling time* nya menunjukkan hasil yaitu 0.006 *second*, dan *overshoot* nya menunjukkan 0.0194%.

U. Perbandingan Hasil Beban 0,07 NM

Dari hasil grafik kedua di atas maka dapat disimpulkan pada tabel 4. dibawah ini :

TABEL IV
HASIL PERBANDINGAN BERBEBAN 0,07 NM

| Kontrol | Settling Time | Rise Time | Overshoot | Error Steady State |
|---------|---------------|-----------|-----------|--------------------|
| PID | 0,004 | 0,0035 | 0,0018% | 0,0036% |
| PI | 0,006 | 0,0055 | 0,0194% | 0,0126% |

Menurut kesimpulan tabel diatas bahwa kontrol PID mampu memperbaiki respon motor *Brushless DC* berbeban 0.07 NM dari segi *error steady state* nya, *overshoot*, *rise time* bahkan *settling time* dibandingkan dengan kontrol PI.

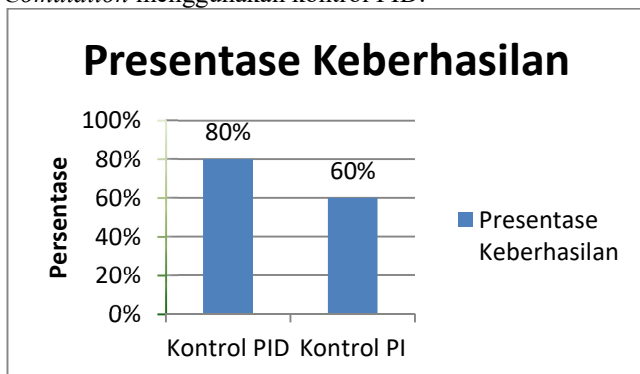
V. Presentasi Keberhasilan Kontrol PID dengan Hasil Data Rata-Rata Respon Kecepatan Motor BLDC Berdasarkan Variasi Pembebasan

Berdasarkan hasil pengujian dan grafik respon kecepatan diatas didapatkan bahwa pengambilan data menggunakan sistem kontrol kecepatan motor BLDC *Six Step Comutation* menggunakan kontrol PID terbukti mampu tetap stabil dengan variasi beban yang diberikan sehingga memperkecil *error steady state*, *overshoot* dan mempercepat waktu *rise time* dan *settling time* nya dibandingkan dengan menggunakan kontrol PI. Presentase keberhasilan dapat dilihat pada tabel 5.

TABEL V
PERBANDINGAN RESPON KECEPATAN

| Beban | Kontrol | Error Steady State (%) | Overshoot (%) | Rise Time | Settling Time |
|---------------|---------|------------------------|---------------|-----------|---------------|
| Tanpa beban | PID | 0,0022 | 0,0002 | 0,003 | 0,004 |
| | PI | 0,0304 | 0,0406 | 0,0045 | 0,005 |
| Beban 0,01 NM | PID | 0,0028 | 0,0006 | 0,0035 | 0,004 |
| | PI | 0,0276 | 0,0366 | 0,005 | 0,0055 |
| Beban 0,05 NM | PID | 0,0032 | 0,001 | 0,0035 | 0,004 |
| | PI | 0,0214 | 0,03 | 0,005 | 0,0055 |
| Beban 0,07 NM | PID | 0,0036 | 0,0018 | 0,0035 | 0,004 |
| | PI | 0,0126 | 0,0194 | 0,0055 | 0,006 |

Dari tabel 5 didapatkan hasil dari nilai *error steady state*, *overshoot*, *rise time* dan *settling time* nya dengan pemberian beban yang berbeda – beda. Pada kondisi tanpa beban, kontrol PID mampu menekan lebih kecil *error steady state* dan *overshoot* yang berlebih pada motor *Brushless DC* hanya 0.0022 % dibandingkan dengan kontrol PI yang sampai 0.0304 %. Dan control PID juga mampu mempercepat respon *rise time* dan *settling time* hingga kecepatan nya stabil sesuai dengan setpoint yang ditentukan hanya membutuhkan waktu yang lebih singkat dibandingkan dengan kontrol PI. Pada tabel 4.6. adalah hasil dari tingkat keberhasilan respon kecepatan motor BLDC *Six Step Comutation* menggunakan kontrol PID.



Dari Tabel 6 terlihat grafik presentase keberhasilan sistem untuk kestabilan motor BLDC *Six Step Comutation* menggunakan kontrol PID sebesar 80%. Sedangkan untuk sistem motor BLDC *Six Step Comutation* menggunakan kontrol PI hanya sebesar 60%. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa respon kontrol PID pada motor BLDC dapat memperbaiki *error steady state*, *overshoot*, *rise time*, dan *settling time* yang sangat baik. Namun kontrol PI hanya mendapatkan presentase rendah dikarenakan masih belum mampu untuk mengurangi perbaikan kecepatan pada motor BLDC secara baik.

Pada penelitian ini telah dibuat sebuah sistem kontrol kecepatan motor *Brushless DC Six Step Comutation* dengan menggunakan kontrol PID yang dapat digunakan untuk kecepatan motor BLDC agar tetap stabil dan lebih *smooth* walaupun diberi pembeban. Sistem ini menggunakan *Six Step Comutation* sebagai rangkaian inverter pengubah sumber tegangan DC 24 volt ke AC 3 fasa dengan sistem 6 pensaklaran dan kontroler PID sebagai kontrol sistem kecepatan nya. Pada sistem ini digunakan pengujian dengan variasi pembebanan dan perbandingan respon kecepatan kontrol menggunakan PI.

Ketika kontroler diterapkan pada sistem, pengujian dimulai dengan menggunakan tanpa beban, kemudian pengujian kedua menggunakan beban 0.01 NM, pengujian ketiga menggunakan beban 0.05 NM, dan pengujian terakhir menggunakan beban 0.07 NM.

Pengaturan PID telah menghasilkan respon sistem yang stabil dengan nilai dengan *rise time* lebih kecil dari 0.1 s dan *settling time* lebih kecil dari 0.2 s dengan rasio kesalahan *steady state* dan *overshoot* yang tidak lebih besar dari 1%. Sehingga kontrol PID lebih baik dari pada kontrol PI untuk respon kecepatan motor BLDC agar stabil walaupun diberi pembebanan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Akbar, D., Riyadi, S. *Pengaturan kecepatan pada motor brushless menggunakan PWM*. Seminar nasional instrumentasi, control dan otomasi. 2018.
- [2] D.A.Ratna.W. *Sistem kendali cerdas*. Yogyakarta: Graha Ilmu. 2011.
- [3] D.P.K, Iradiratu., Z.O.P. Maher. *Pengaturan Kecepatan Motor Six Step BLDC Dengan Menggunakan Kontrol Fuzzy Logic*. Seminar nasional kelautan XIII jurnal. 2018.
- [4] Ibrahim,H.E.A., Hassan, F.N., Shomer, O.Anas. *Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques*. IEEE Journal. 2014.
- [5] Nasrul. *Pengendalian Kecepatan Motor DC Dengan Metoda Fuzzy Logic Berbasis Mikrokontroler*. 2009. Elektron : Vol. 1 No. 2.
- [6] Robert L. Moot. *Elemen-elemen mesin dalam perancangan mekanisme*. yogyakarta: ANDI. 2017.
- [7] K. Roedy, W. Oyas, N. Prpto. *Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Algoritma Hybrid Pid Fuzzy*. University Research Colloquium. 2015.
- [8] S.P. Guntur. *Perancangan Kontrol Kecepatan Motor Arus Searah Tanpa Sikat Menggunakan Sliding Mode Berbasis Pid*. Tugas Akhir TE Institut Teknologi Surabaya. 2016.
- [9] Sutedjo, A.Q. Ony, Suharningsih, Y. S. Diah. *Desain Dan Implementasi Six-Step Comutation Pada Sistem Kontrol Motor Bldc 1,5 Kw*. Prosiding Sentrinov. 2017. Volume 3-ISSN-2477-2097.
- [10] S. Iwan. *Kontrol PID Untuk Proses Industri*. Elex media Komputindo", Halaman 5-10. 2008.
- [11] A.S.M. Naufal, M. Defa, A.Y. Ilham. *Pengaturan Kecepatan Motor Brushless DC(Direct Current) Menggunakan Cuk Converter*. Jurnal Teknik Elektro Dan Komputer Triac. 2019. Vol. 6 No. 2.
- [12] A.P. Gita, R.A.M. Krisna, W.S.B. Rio, Y.D. Belly, D.P.K. Iradiratu. *Desain Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Double Boost Converter Berbasis PI*. Seminar Nasional Fortei 7-2. 2019.