

Perancangan Penggerak Elektrik dan Kontroler *Fuzzy*-PI Untuk Pengaturan Kecepatan Motor DC *Brushless*

Marika Ayu Putri Ramadhani, Ir. Rusdhianto Effendie A K, M.T.

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: ditto@ee.its.ac.id

Abstrak—Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) membutuhkan suatu alat untuk menggerakkan dan mengendalikan putaran motor BLDC yang biasa disebut dengan penggerak daya atau *driver* motor BLDC agar motor BLDC dapat dikendalikan secara akurat. Sistem kontroler *fuzzy*-PI digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC *brushless* dan menjaga kestabilan putarannya. Kontroler ini memiliki parameter-parameter pengontrol yaitu *gain integral error*, *gain error*, *control offset*, dan *gain control*. Pada metode ini nilai parameter tersebut ditentukan berdasarkan *tuning* sesuai dengan hasil yang diperlukan. Hasil simulasi pada motor BLDC menunjukkan bahwa kontroler *fuzzy*-PI kurang cepat dalam mencapai *steady state*. Pada kondisi dengan model *plant* motor BLDC, respon kontroler mencapai nilai kecepatan referensi = 675 rpm saat $t = 1.122$ detik. Sedangkan pada kondisi dengan model parameter variasi minimal, respon kontroler dapat mencapai nilai kecepatan = 673.2 rpm saat $t = 0.7837$ detik dan pada kondisi dengan model parameter variasi maksimal, respon kontroler dapat mencapai nilai kecepatan = 675 rpm saat $t = 1.473$ detik.

Kata Kunci—*Driver*, Kontroler *fuzzy*-PI, Motor BLDC.

I. PENDAHULUAN

Pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Motor ini dipilih karena efisiensi yang tinggi, suaranya halus, ukuran kompak, keandalan yang tinggi dan biaya perawatan yang rendah. Motor BLDC telah mendominasi banyak aplikasi seperti peralatan rumah, peralatan teknologi informasi, industri, transportasi, *aerospace*, peralatan pertahanan, alat listrik, dan peralatan medis laboratorium berbagai bidang. Keuntungan yang motor BLDC berikan kepada setiap aplikasi yang digunakan, terutama pada industri sangat besar. Penggunaan motor ini dapat menghemat biaya dan waktu pada hampir semua industri.

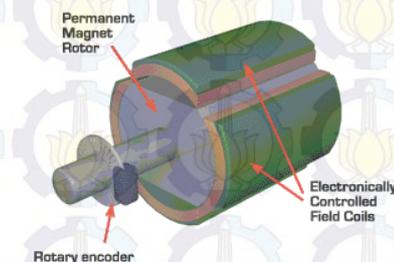
Perubahan motor DC *Brushed* oleh motor BLDC menjadi penyebab diperlukannya cara kontrol yang berbeda untuk komutasi fase arus dari motor BLDC. Rangkaian kontrol pengganti kumutator pada motor BLDC ini disebut dengan *power electronic* untuk mencatu daya ke kumparan stator. Rangkaian kontrol terdiri atas 6 buah MOSFET yang digunakan untuk *switching* tegangan. Pada penerapannya motor BLDC masih terdapat banyak kesalahan antara kecepatan referensi dan kecepatan *feedback*. Berdasarkan hal itu maka diperlukan suatu kontroler untuk memperbaiki

kinerja dari motor BLDC. [1]

Pada *paper* ini, penjelasan tentang deskripsi permasalahan dibahas pada bagian kedua. Perancangan sistem dibahas pada bagian ketiga. Hasil simulasi dari sistem dibahas pada bagian keempat. Dan pada bagian kelima membahas tentang kesimpulan dan saran dari penelitian yang telah dilakukan.

II. DESKRIPSI PERMASALAHAN

Motor BLDC merupakan motor listrik sinkron AC tiga fasa. Motor ini dapat dikendalikan dengan metode *six-step* maupun metode PWM sinusoidal. Motor BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya sikat. Selain itu, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Namun pengendalian motor BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya sikat yang menunjang proses komutasi dan harga motor BLDC jauh lebih mahal.



Gambar. 1. Konstruksi motor BLDC

Stator motor BLDC memiliki kumparan tiga fasa dan menggunakan satu penguat arus PWM untuk mensuplai satu arus sinusoidal tiga fasa pada ketiga kumparan stator. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Motor BLDC memiliki rotor berupa suatu magnet permanen, kumparan kawat yang terletak pada stator, dan satu rangkaian elektronik pengganti komutator atau sikat arang. Motor BLDC dengan jenis *rare earth permanen magnet* (terbuat dari *samarium cobalt* dan *neodymium iron boron*) memiliki inersia rotor yang paling rendah dan ukuran terkecil pada suatu rating torsi tertentu.

Motor BLDC yang memiliki magnet permanen pada rotornya dan menggunakan *rotary encoder* untuk membalik fasa rotor secara elektrik. Oleh karena tidak adanya sikat pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang

tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor *Hall* dan atau *encoder*. Pada sensor *Hall*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet *rotor* dengan menggunakan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda, sedangkan pada *encoder*, *timing* ditentukan dengan cara menghitung jumlah *pole* (kutub) yang ada pada *encoder*.

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet (B):

$$B = \frac{\mu N I}{l} \tag{1}$$

Dimana N merupakan jumlah lilitan, i merupakan arus, l merupakan panjang lilitan, dan μ adalah permeabilitas bahan. Karena arus yang diberikan berupa arus AC fasa, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi tersebut dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terjadinya medan putar magnet dengan kecepatan N_s :

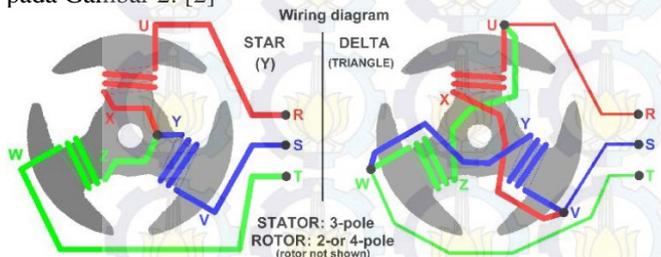
$$N_s = \frac{120f}{p} \tag{2}$$

Dimana f merupakan frekuensi tegangan input dinyatakan dalam Hz per satuan detik, p merupakan jumlah kutub (*pole*) pada rotor dan 120° didapat dalam 1 putaran (360°) per 3 fasa motor. Ketika motor berputar permanent magnet pada rotor bergerak melewati kumparan stator dan menginduksi potensial listrik dalam kumparan tersebut, maka terjadinya GGL balik. GGL balik berbanding lurus dengan kecepatan motor dan ditentukan dalam KV.

$$RPM = K_v \cdot \text{Volts} \tag{3}$$

$$\text{GGL balik} = \text{RPM} \tag{4}$$

Dimana RPM (*Revolutions per Minute*) dan KV menyatakan kecepatan motor konstan diukur dalam RPM per volt. *Wiring diagram* dari motor BLDC dapat dilihat pada Gambar 2. [2]

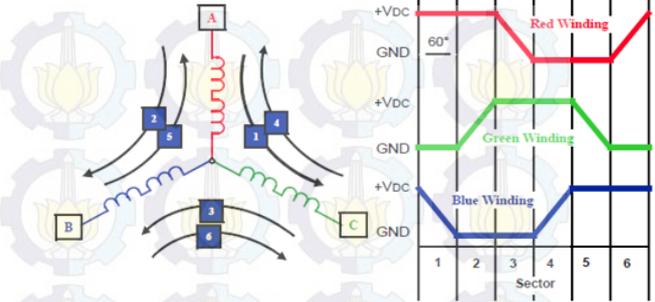


Gambar. 2. *Wiring Diagram* Motor BLDC

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan dalam pengendalian motor BLDC, diantaranya adalah metode *six-step* dan metode sinyal PWM.

Metode Six-Step adalah metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC. Hal ini disebabkan karena metode ini sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Hanya saja metode ini memiliki kelemahan yaitu arus RMS (*Root Mean Square*) yang tinggi. Ini dapat terjadi karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM square dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk square atau trapezoid adalah timbulnya gelombang harmonik. Gelombang harmonik inilah yang mengakibatkan motor berputar.

Setiap langkah atau sector adalah ekuivalen dengan 60 derajat elektrik. 6 sektor menjadi 360 derajat elektrik atau satu putaran elektrik.



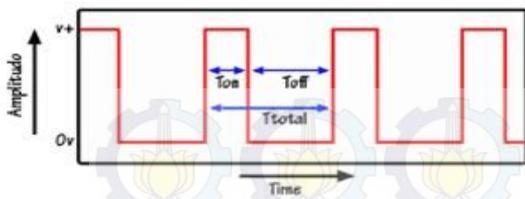
Gambar. 3. Komutasi *Six-Step*

Tanda panah pada kumparan menunjukkan arah di mana arus mengalir melalui kumparan-kumparan motor setiap langkah pada Six-Step. Sedangkan untuk urutan langkah komutasi adalah sebagai berikut:

1. Kumparan A diberi tegangan positif, kumparan B tidak diberi tegangan dan kumparan C diberi tegangan negatif.
2. Kumparan A diberi tegangan positif, kumparan B diberi tegangan negatif dan kumparan C tidak diberi tegangan.
3. Kumparan A tidak diberi tegangan, kumparan B diberi tegangan negatif dan kumparan C diberi tegangan positif.
4. Kumparan A diberi tegangan negatif, kumparan B tidak diberi tegangan, dan kumparan C diberi tegangan positif.
5. Kumparan A diberi tegangan negatif, kumparan B diberi tegangan positif, dan kumparan C tidak diberi tegangan.
6. Kumparan A tidak diberi tegangan, kumparan B diberi tegangan positif, dan kumparan C diberi tegangan negatif.

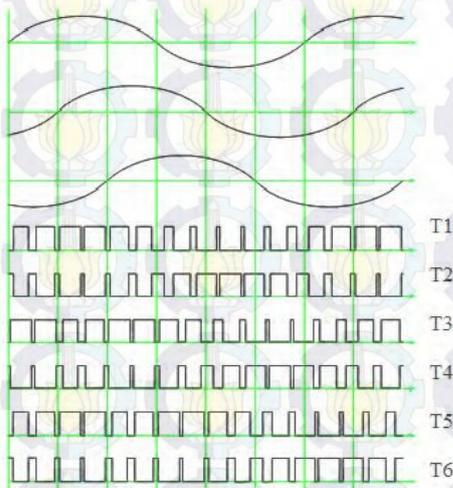
Metode ini disebut *six-step* karena mampu menciptakan gelombang *trapezoidal* atau *square* yang menyerupai gelombang sinusoidal, digunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian yaitu 2 bagian positif dan 2 bagian negatif, dan 2 bagian *floating*. Masing-masing bagian besarnya 60 derajat gelombang sinusoidal. Kondisi *floating* pada algoritma ini adalah kondisi ketika gelombang sinusoidal bepotongan pada titik 0.

Pulse width modulation (PWM) secara umum adalah sebuah manipulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan pulsa dalam satu periode, untuk mendapatkan tegangan rata-rata yang berbeda. Beberapa contoh aplikasi PWM adalah pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, audio effect dan penguatan serta aplikasi lainnya.



Gambar. 4. Sinyal PWM

Dalam implementasi agar dapat mengendalikan keenam transistor pada driver, sinyal PWM sinusoidal yang didapatkan dibagi menjadi 6 bagian atau step. Masing-masing bagian atau step besarnya 60 derajat. Ini disebabkan karena perbedaan tiap fasa dari sinyal 3 fasa adalah 120 derajat dan tiap 60 derajat terdapat gelombang sinusoidal yang bepotongan dengan nilai 0. Oleh karena itu sinyal PWM harus dibagi menjadi 6 bagian untuk menunjang proses komutasi pada BLDC. Berikut ini implementasi dari algoritma PWM sinusoidal.



Gambar. 5. Algoritma PWM Sinusoidal

Kecepatan motor BLDC tergantung dari tegangan yang diaplikasikan pada kumparan. Metode PWM digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor, sinyal PWM diaplikasikan kesaklar S1 –S6 untuk menentukan rata-rata tegangan pada kumparan. [3]

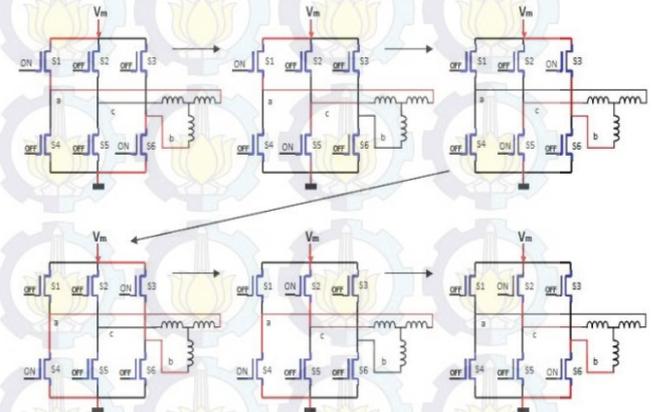
III. PERANCANGAN SISTEM

A. Perancangan Penggerak Elektrik

Sistem yang dirancang adalah sistem penggerak elektronik dan pengendalian kecepatan dari motor BLDC. Sistem ini bertujuan untuk membuat rangkaian *power electronic* sebagai pengganti komutator untuk menggerakkan motor BLDC dan menghasilkan kecepatan motor yang sesuai dengan kecepatan referensi. Rangkaian *power electronic* berfungsi untuk menyuplai tegangan tiga fasa ke motor BLDC agar mampu berputar dari input berupa tegangan DC dan motor BLDC akan dioperasikan pada kecepatan tertentu sesuai dengan *setpoint* yang telah ditentukan. Sistem kontroler digunakan untuk mengatur kecepatan motor BLDC agar sesuai dengan kecepatan referensi. [4]

Motor BLDC membutuhkan enam langkah komutasi yang dilakukan secara kontinyu untuk berputar. *Driver* 3 fasa terdiri dari 6 buah saklar yang akan memberikan

tegangan positif (sinyal *high*) dan tegangan 0V (sinyal *low*) secara bergantian. Dimana MOSFET (*The metal-oxide-semiconductor field-effect transistor*) akan digunakan sebagai saklar dengan IC pembagi fasa 74HC175 yang akan mengendalikan fase yang masuk *gate* MOSFET tersebut.



Gambar. 6. Urutan Pensaklaran pada Stator

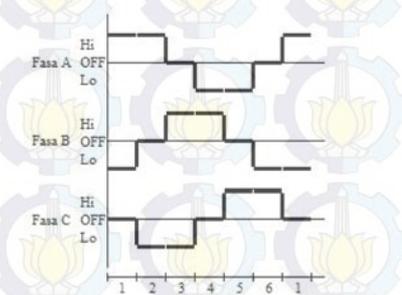
Sesuai gambar diatas, maka terdapat urutan penyaklaran pada *stator* yang dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 1.

Urutan Pengaturan Saklar motor BLDC

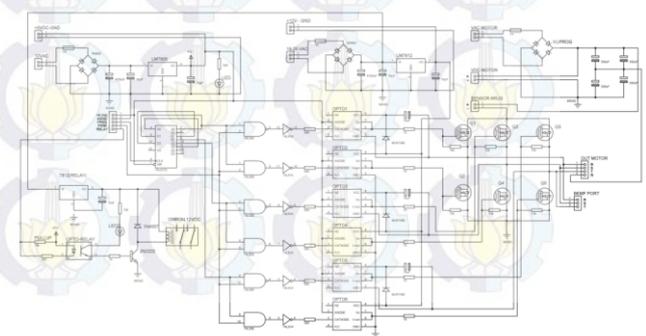
Urutan ke-	Saklar Aktif	Fasa A	Fasa B	Fasa C
1	S1 S6	High	Low	Off
2	S1 S5	High	Off	Low
3	S3 S5	Off	High	Low
4	S3 S4	Low	High	Off
5	S2 S4	Low	Off	High
6	S2 S6	Off	Low	High

Kemudian berikut merupakan gambar hasil bentuk gelombang dari penyaklaran pada stator motor BLDC :



Gambar. 7. Bentuk Gelombang Hasil Penyaklaran pada Stator

Berikut merupakan skema dari rangkaian *power electronic* :



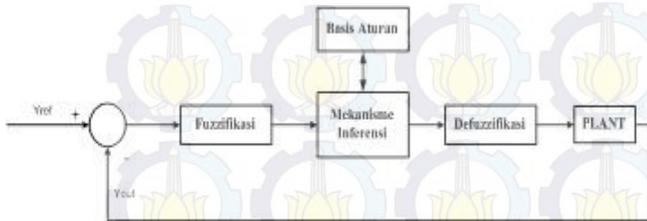
Gambar. 8. Skema Rangkaian Power Electronic

Pada rangkaian *power electronic* terdapat beberapa bagian yang saling melengkapi agar secara keseluruhan rangkaian *power electronic* dapat bekerja dengan baik diantaranya adalah rangkaian *power supply*, pengolah sinyal fasa dan PWM, rangkaian *optocoupler*, dan bagian *switching*.

B. Perancangan Kontroler Fuzzy-PI

Konsep logika *fuzzy* berawal dari teori *fuzzy set* sebagai salah satu pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan yang tidak memiliki ketentuan yang pasti. Teori tersebut dikembangkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965 di University of California – Barkeley. Dalam jurnalnya, Zadeh memperkenalkan konsep teori himpunan baru yang dinamakan *fuzzy set*. Konsep logika *fuzzy* menggantikan konsep “benar-salah” dari logika *boolean* menjadi derajat tingkat kebenaran. Teori *fuzzy* menyatakan keanggotaan suatu objek ke dalam fungsi derajat keanggotaan (*membership function*). Hal tersebut memungkinkan keanggotaan suatu objek dapat dinyatakan pada semua bilangan riil antara 0 sampai 1. Oleh karena itu, konsep *fuzzy* tersebut sesuai dengan pola pikir manusia yang cenderung menilai suatu objek secara samar.

Kontroler logika *fuzzy* merupakan suatu kontroler yang proses perhitungan sinyal kontrolnya melalui operasi himpunan *fuzzy* meliputi proses *fuzzifikasi*, relasi *fuzzy*, inferensi *fuzzy* serta *defuzzifikasi* seperti terlihat pada Gambar 4.

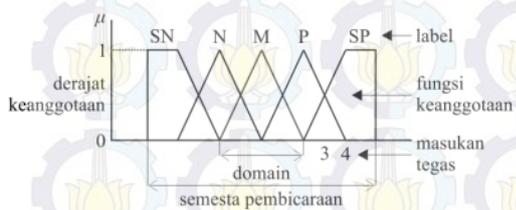


Gambar. 9. Struktur Kontroler Fuzzy

Proses di dalam himpunan *fuzzy* pada kontroler *fuzzy* antara lain sebagai berikut :

1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses transformasi nilai real (nilai bukan *fuzzy*) menjadi nilai suatu himpunan *fuzzy* yang dinyatakan dalam derajat keanggotaan yang didefinisikan. Struktur fungsi keanggotaan *fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 5. Derajat keanggotaan adalah derajat dari masukkan tegas pada sebuah fungsi keanggotaan, memiliki nilai 0 s/d 1. Fungsi keanggotaan mendefinisikan nilai *fuzzy* dengan melakukan pemetaan nilai tegas berdasarkan daerahnya untuk diasosiasikan dengan derajat keanggotaan.



Gambar. 10. Struktur Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Masukkan tegas pada umumnya merupakan hasil pengukuran parameter eksternal dari sistem kontrol. Label

merupakan deskripsi nama untuk menunjukkan suatu fungsi keanggotaan *fuzzy* yang memiliki domain (lebar fungsi keanggotaan *fuzzy*) tertentu. Semesta pembicaraan memiliki jarak yang mencakup seluruh masukkan tegas yang mungkin ada. Bentuk fungsi keanggotaan harus mewaliki variabel masukkan tegas, namun bentuk yang digunakan dibatasi oleh kemampuan *tool* dalam melakukan perhitungan. Bentuk fungsi yang rumit membutuhkan persamaan fungsi yang lebih kompleks.

2. Basis Aturan

Basis aturan merupakan deskripsi linguistik terhadap variabel input dan output. Penentuan basis aturan yang dipakai dalam mengontrol suatu *plant* dapat melalui metode heuristik maupun deterministik. Metode heuristik didasarkan pada pengetahuan terhadap *plant* dan perilaku dari *plant* yang akan dikontrol. Sedangkan metode deterministik diperoleh melalui identifikasi struktur dan parameter dari aturan kontrol. Pemetaan input dan output pada sistem *fuzzy* direpresentasikan dalam Persamaan 5.

$$\text{If premis Then konsekuen} \tag{5}$$

Pada kontroler *fuzzy*, input kontroler direpresentasikan dalam premis dan output kontroler direpresentasikan dalam konsekuen. Jumlah basis aturan dari suatu sistem *fuzzy* ditentukan dari jumlah variabel pada input dan jumlah *membership function* pada variabel masukkan, dirumuskan dalam Persamaan 6.

$$\prod_{i=1}^n N_i = N_1 \times N_2 \times \dots \times N_n \tag{6}$$

Dimana N_i merupakan jumlah *membership function* pada variabel input i . Sebagai contoh apabila variabel input pertama memiliki tiga *membership function* dan variabel input kedua memiliki tiga *membership function*, maka jumlah basis aturan adalah $3 \times 3 = 9$ aturan.

3. Mekanisme inferensi

Mekanisme inferensi pada kontroler *fuzzy* merupakan mekanisme operasi matematika yang dilakukan sesuai dengan premis yang diberikan. Pada basis aturan terdapat dua operasi matematika yang dapat dilakukan yaitu *AND* dan *OR*.

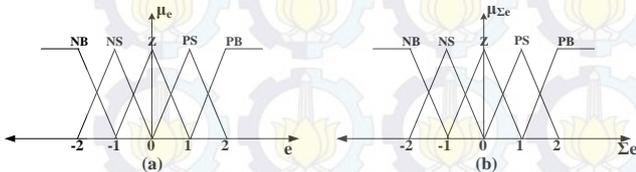
4. Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah suatu proses mentransformasikan harga *fuzzy* hasil dari inferensi *fuzzy* ke dalam harga bukan *fuzzy* atau harga aktual. [5], [6]

Dalam tugas akhir ini digunakan kontroler *fuzzy-PI* dikarenakan motor BLDC memiliki multi-variabel, sistem non-linear dan dengan mudah dapat dipengaruhi oleh variasi parameter serta gangguan. Untuk mengatasi masalah ini kontroler *fuzzy-PI* digunakan untuk mengontrol kecepatan dari motor BLDC. Penerapan teknik kecerdasan buatan seperti *Fuzzy Logic Control* (FLC) telah ditemukan sebagai kontroler yang cocok untuk sebagian besar sistem nonlinear yang kompleks dimana sistem tersebut memiliki

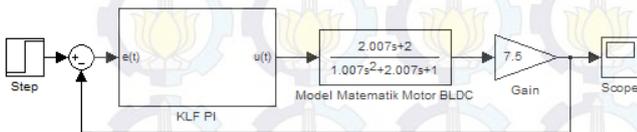
pemodelan matematika yang tidak pasti. Kelebihan FLC adalah karena kontroler untuk sistem apapun dapat dikembangkan tanpa persyaratan untuk model matematika dari suatu sistem. Dengan cara ini, efisiensi dan keandalan drive akan meningkat.

Untuk fungsi keanggotaan yang digunakan pada proses fuzzifikasi dari error dan integral error yaitu fungsi segitiga dengan 5 himpunan pendukung untuk error dan integral error. Gambar 3.20 menunjukkan fungsi keanggotaan dari error dan integral error.

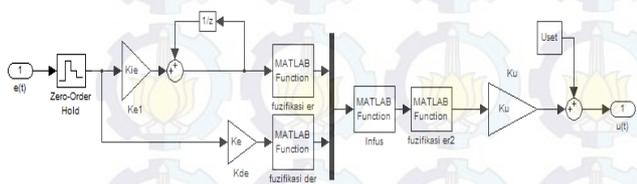


Gambar. 11. Fungsi Keanggotaan : (a) error ; (b) integral error

Pada diagram blok kontroler fuzzy-PI terdapat beberapa parameter sistem yang harus ditentukan untuk mendapatkan hasil yang paling maksimal dari kontroler fuzzy-PI. Parameter – parameter tersebut adalah gain integral error (Kie), gain error (Ke), control offset (Uset), dan gain control (Ku). Dari pengaturan parameter – parameter tersebut dengan cara tuning sesuai hasil yang dibutuhkan dari sistem maka akan didapatkan parameter kontrol yang sesuai untuk model matematik dari motor BLDC.



Gambar. 12. Diagram Blok Kontroler Fuzzy-PI



Gambar. 13. Diagram Blok Subsystem Kontroler Fuzzy-PI

Karena kontroler yang digunakan fuzzy-PI adalah dengan rule base PI maka tabel rule base terlihat pada tabel berikut ini :

Tabel 2.
Tabel Basis Aturan Mack Vicar Wheelan

	$u_{\Sigma e1}$	$u_{\Sigma e2}$	$u_{\Sigma e3}$	$u_{\Sigma e4}$	$u_{\Sigma e5}$
ue1	1	1	2	2	3
ue2	1	2	2	3	4
ue3	2	2	3	4	4
ue4	2	3	4	4	5
ue5	3	4	4	5	5

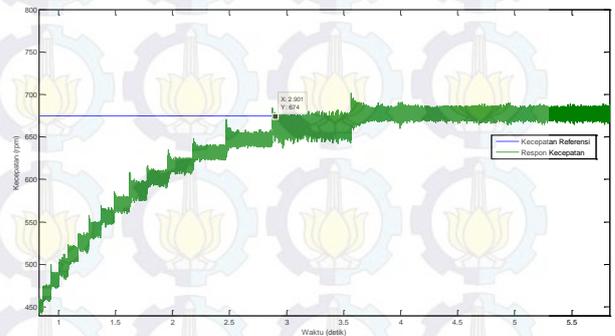
IV. HASIL SIMULASI SISTEM

Simulasi pada tugas akhir ini menggunakan perangkat lunak MATLAB. Dalam simulasi akan diketahui bagaimana

hasil respon dari plant motor BLDC. Lalu saat model matematik motor BLDC yang didapatkan dari hasil identifikasi diberi kontroler fuzzy-PI serta pada saat model matematik motor BLDC diberi model plant dengan parameter bervariasi.

A. Hasil Respon Motor BLDC

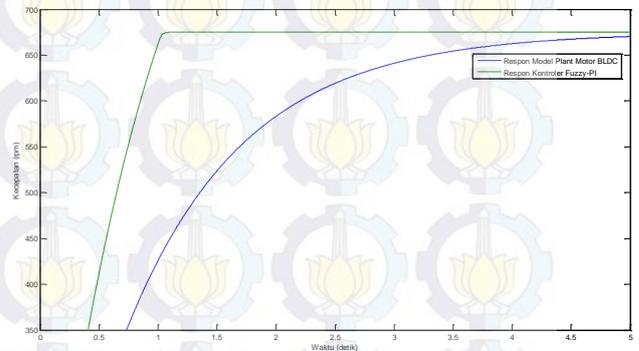
Dengan pembacaan data dari rangkaian power electronic melalui arduino menuju MATLAB maka didapatkan sejumlah data untuk mengukur keluaran dari motor BLDC.



Gambar. 14. Grafik Hasil Respon Motor BLDC

Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa kecepatan referensi yang digunakan adalah 675 rpm. Kemudian dari grafik ini dilakukan identifikasi untuk mengetahui model matematik motor BLDC.

B. Hasil Respon Motor BLDC Menggunakan Kontroler Fuzzy-PI

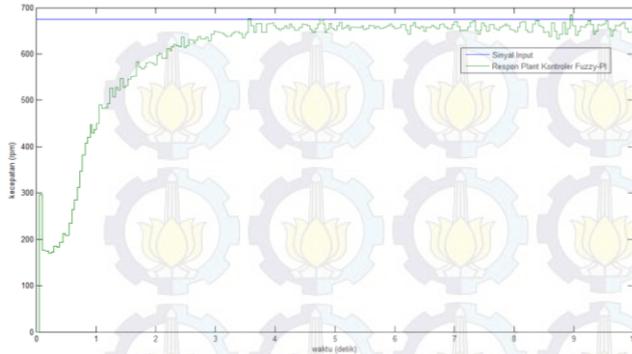


Gambar. 15. Grafik Hasil Respon Motor BLDC Menggunakan Kontroler Fuzzy-PI

Nilai parameter kontroler fuzzy-PI diperoleh dari hasil tuning dengan nilai gain integral error (Kie) = 0.001, gain error (Ke) = 0.1, control offset (Uset) = 20 dan gain control (Ku) = 25.

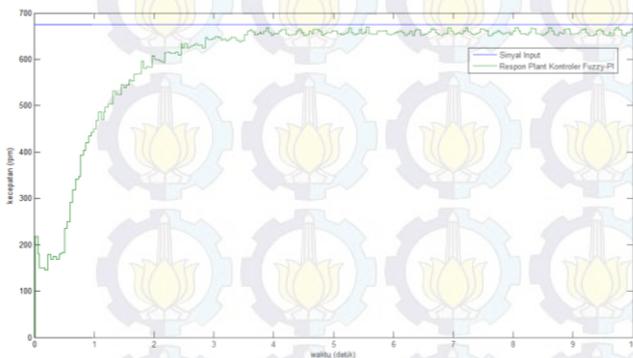
Dengan spesifikasi respon sebagai berikut $\tau = 0.707$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 2.121$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 2.081$ detik, $t_d = 0.49$ detik dan $e_{ss} = -0.03\%$.

C. Hasil Respon Motor BLDC Menggunakan Beban Rem Magnetik



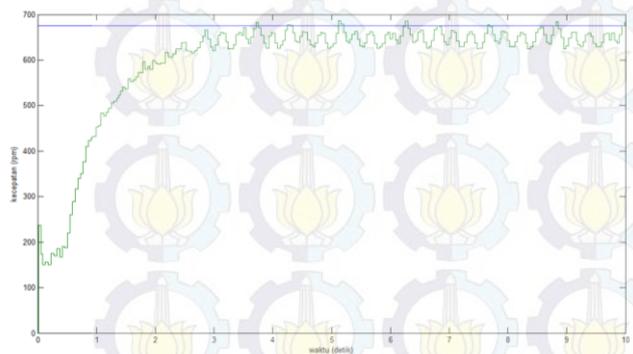
Gambar. 16. Grafik Hasil Respon Kontroler Fuzzy-PI dengan Beban Minimal

Dari hasil respon tersebut terlihat bahwa kecepatan motor BLDC sedikit menurun dari kecepatan referensi tetapi tetap dapat mengikuti kecepatan referensi. Spesifikasi respon tersebut diantaranya $\tau = 2.248$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 6.744$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 6.619$ detik, $t_d = 1.558$ detik dan $e_{ss} = 0.001\%$.



Gambar. 17. Grafik Hasil Respon Kontroler Fuzzy-PI dengan Beban Nominal

Dari hasil respon tersebut terlihat bahwa kecepatan motor BLDC tetap dapat mengikuti kecepatan referensi. Spesifikasi respon tersebut diantaranya $\tau = 2.455$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 7.367$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 7.228$ detik, $t_d = 1.701$ detik dan $e_{ss} = -0.08\%$.



Gambar. 18. Grafik Hasil Respon Kontroler Fuzzy-PI dengan Beban Maksimal

Dari hasil respon tersebut terlihat bahwa kecepatan motor BLDC tetap dapat mengikuti kecepatan referensi meskipun kecepatan motor BLDC menurun. Spesifikasi respon tersebut diantaranya $\tau = 2.226$ detik,

$t_s(\pm 5\%) = 6.679$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 6.554$ detik, $t_d = 1.542$ detik dan $e_{ss} = -0.09\%$.

V. KESIMPULAN

Dari hasil desain diperoleh bahwa dengan menggunakan kontroler fuzzy-PI pada pengaturan kecepatan motor BLDC, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Pada kondisi beban minimal, simulasi kontroler fuzzy-PI mampu mendekati nilai kecepatan referensi dengan nilai $\tau = 2.248$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 6.744$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 6.619$ detik, $t_d = 1.558$ detik dan $e_{ss} = 0.001\%$.
- b. Pada kondisi beban nominal, simulasi kontroler fuzzy-PI mampu mendekati nilai kecepatan referensi dengan nilai $\tau = 2.455$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 7.367$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 7.228$ detik, $t_d = 1.701$ detik dan $e_{ss} = -0.08\%$.
- c. Pada kondisi beban maksimal, implementasi kontroler fuzzy-PI mampu mendekati nilai kecepatan referensi dan hasil respon mendekati respon beban nominal dengan nilai $\tau = 2.226$ detik, $t_s(\pm 5\%) = 6.679$ detik, $t_r(5\% - 95\%) = 6.554$ detik, $t_d = 1.542$ detik dan $e_{ss} = -0.09\%$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Parhizkar, M. Shafiei, and M. Bahrami Kouhshahi "Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives with Reduced Starting Current Using Fuzzy Logic Controller", *IEEE Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE), 2011 International Conference on*, Vol. 1, No.2 August 2011.
- [2] M. V. Ramesh, J. Amarnath, and S. Kamakshaiah "Speed Control of Brushless DC Motor by Using Fuzzy Logic Pi Controller", *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol.6, No.9, September 2011.
- [3] Loe, Yohan. *Kontroler Motor BLDC Menggunakan Microchip*. Skripsi Sistem Komputer – Universitas Binus. 2014.
- [4] Muhammad H. Rashid, Ph.D., "POWER ELECTRONICS HANDBOOK DEVICES, CIRCUITS, AND APPLICATIONS Third Edition", University of West Florida, U.S.A, Ch. 34, 2011.
- [5] Hidayat, Alfin. *Cascade Fuzzy Sliding Mode Control-PID untuk Pengaturan Posisi Pada Brushless DC Motor*. Thesis Elektro –ITS. 2012.
- [6] Fitria Fauzy, Rizky. *Desain Kontroler Pid Fuzzy Untuk Pengendalian Tekanan dan Level Oksigen Gas Buang Pada Boiler*. Tugas Akhir Elektro-ITS. 2012.