

# ARTIKEL

---

## REALISASI KONTROLER BERBASIS LOGIKA *FUZZY* PADA PENGENDALIAN EKSITASI GENERATOR INDUKSI PENGUATAN SENDIRI BAGI PEMBANGKIT LISTRIK NON KONVENSIONAL

### 1. Latar Belakang

Generator induksi merupakan salah satu jenis peralatan konversi elektro-mekanikal yang dengan berbagai kelebihannya banyak digunakan untuk mengkonversikan sumber energi primer menjadi energi listrik pada sistem pembangkitan non konvensional (Kuperman et al., 2003). Ciri khas sumber energi bagi pembangkitan non konvensional adalah besarnya yang relatif kecil namun tersebar secara luas diberbagai tempat dan kerapatan daya yang bervariasi dari waktu ke waktu.

Dalam memanfaatkan sumber-sumber energi non konvensional melalui pembangkit tenaga listrik, pada umumnya sistem pembangkitan dioperasikan secara terisolasi. Jika dalam sistem tersebut digunakan generator induksi, maka sumber daya reaktif sebagai eksitasi generator harus disediakan tersendiri. Sumber eksitasi yang umum dipergunakan berupa bank kapasitor yang dihubungkan ke rangkaian generator melalui saklar-saklar magnetis. Dengan eksitasi yang mencukupi, akan diperoleh kondisi optimal pengoperasian pembangkit dalam bentuk faktor daya dan efisiensi yang tinggi, regulasi tegangan yang rendah dan pada gilirannya akan memperbaiki keseluruhan performansi sistem. Sebaliknya kekurangan eksitasi akan mengakibatkan generator induksi dapat kehilangan tegangan (*voltage collapse*) dan ketidakstabilan sistem.

Sehubungan dengan eksitasi, permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan generator induksi yang dioperasikan secara terisolasi adalah menyangkut (1) penentuan dan pengendalian tingkat eksitasi (besar kapasitor) yang memberikan tingkat regulasi tegangan

terminal serendah mungkin dalam kondisi beban yang berubah (berbeda) pada suatu tingkat kecepatan penggerak mula generator; (2) penentuan dan pengendalian tingkat eksitasi yang memberikan regulasi tegangan terminal serendah mungkin pada suatu tingkat pembebanan dalam kondisi putaran penggerak mula yang berbeda.

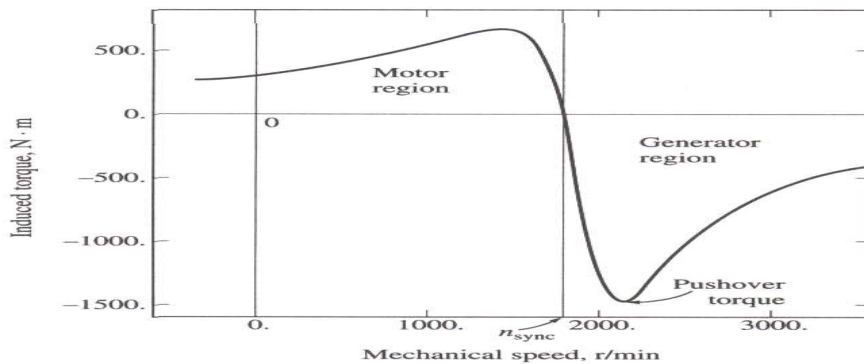
Sejauh ini, penentuan tingkat eksitasi generator induksi dilakukan dengan cara terlebih dahulu memodelkan sistem kelistrikan pembangkitan dalam suatu model matematis pada tingkat pembebanan dan kecepatan putaran tertentu yang kemudian diselesaikan secara analitis ataupun iterasi, hal yang sama dilakukan untuk tingkat pembebanan dan kecepatan yang lain, (Muljadi dan Butterfield, 2005). Sedangkan pengendaliannya menggunakan sistem pengendalian klasik yang perancangannya berbasiskan pemodelan matematis sistem tersebut. Cara ini sering mengalami kesulitan khususnya dalam langkah pemodelan seiring dengan semakin kompleksnya sistem dan adanya ketidak-linearitas komponen yang membangun sistem tersebut (Sousa dan Bose, 1994). Seperti diketahui, dalam menyelesaikan persamaan model matematis secara analitis ataupun iteratif, parameter-parameter sistem dianggap linear. Penerapan metode ini akan memberikan hasil yang kurang akurat dan menghasilkan sistem pengendalian yang tidak optimal.

Penelitian yang dilakukan menentang suatu metode untuk mengatasi permasalahan diatas, yaitu dengan implementasi kontroler sistem kendali yang bekerja berdasarkan logika *fuzzy*. Untuk merealisasikan metode ini, dibangun suatu prototipe sistem pembangkitan skala laboratorium yang selanjutnya diuji untuk menunjukkan performa sistem.

## **2. Mesin Induksi sebagai Generator**

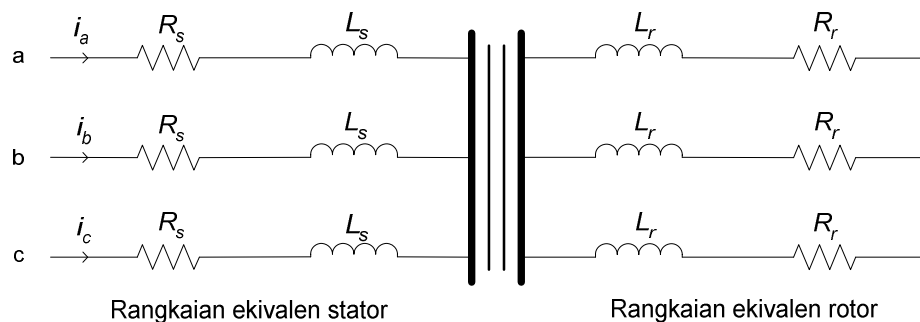
Gambar 1 memperlihatkan kurva karakteristik torka–kecepatan sebuah mesin induksi yang menunjukkan bahwa apabila mesin induksi dikemudikan pada kecepatan lebih besar dari kecepatan sinkron ( $n_{sync}$ ) oleh suatu penggerak mula eksternal, arah dari torka yang terinduksi akan membalik (*reverse*), dan secara teoritis mesin akan bertindak sebagai generator. Dalam kondisi ini, daya aktif yang dihasilkan diperoleh dari konversi daya mekanik sementara daya reaktif yang berperan dalam membangkitkan tegangan pada terminal generator diperoleh dari

magnetisasi sisa yang terdapat dalam inti rotor. Magnetisasi ini akan semakin berkurang seiring dengan waktu sehingga untuk mempertahankan tegangan pada terminal generator dibutuhkan sumber daya reaktif eksternal.



**Gambar 1.** Kurva karakteristik torka–kecepatan mesin induksi (sumber: Chapman, 1999)

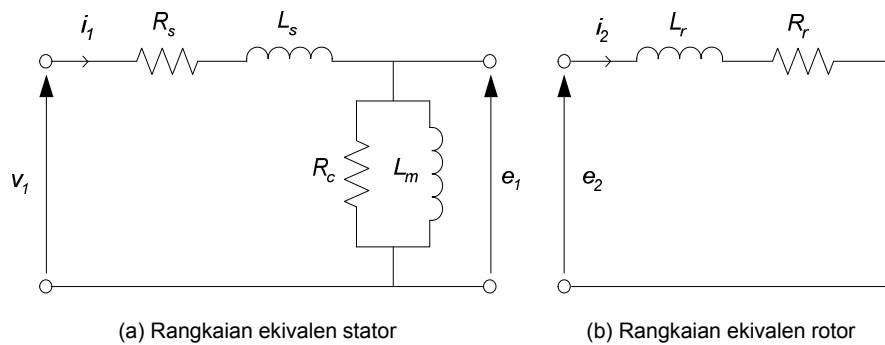
Pada operasinya mesin induksi identik dengan sebuah transformator karena keduanya sama-sama bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, sehingga mesin induksi dapat dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Rangkaian ekuivalen mesin induksi digambarkan sebagai berikut ;



**Gambar 2.** Rangkaian ekuivalen mesin induksi

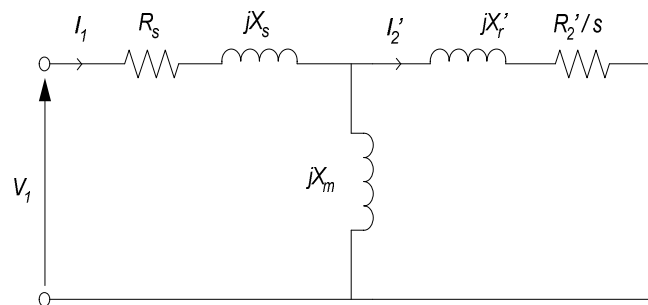
R dan L masing-masing menyatakan besarnya parameter tahanan dan induktans mesin dengan subskrip s dan r menyatakan parameter tersebut berada pada stator atau rotor, sementara a,b

dan  $c$  menyatakan fasa listrik. Rangkaian ekivalen 3-fasa dapat diwakili oleh rangkaian ekivalen satu fasa bila kumparan setiap fasa simetris dan sumber yang menyuplai mesin. Selanjutnya, Rangkaian kopling antara kumparan stator dan rotor dapat diekivalenkan dengan induktansi magnetisasi ( $L_m$ ) dan resistansi pengganti dari kerugian inti besi ( $R_c$ ). Rangkaian pengganti ini digabungkan dengan rangkaian pengganti kumparan stator yang merupakan rangkaian penghasil medan magnet. Rangkaian ekivalen satu fasa mesin induksi dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3.** Rangkaian ekivalen mesin induksi

Pada gambar diatas,  $e_1$  adalah gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan stator dan  $e_2$  adalah gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan rotor. Selanjutnya dengan berbagai penyederhanaan dan asumsi, rangkaian ekivalen mesin induksi digambarkan berikut ini:



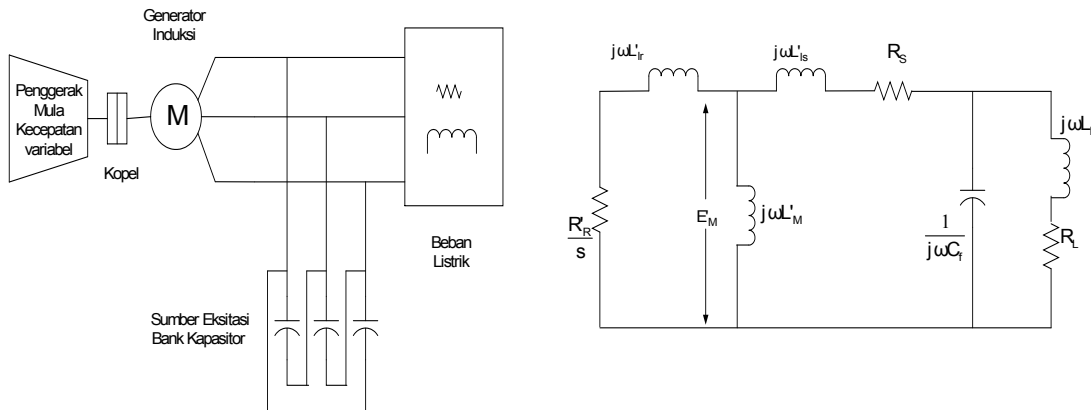
**Gambar 4.** Penyederhanaan rangkaian ekivalen mesin induksi

Suatu sistem pembangkit yang bekerja secara terisolasi dan menggunakan generator induksi sebagai komponen konversi elektro-mekanicalnya dapat digambarkan sebagai berikut ;

### 3. Generator Induksi pada Sistem Pembangkitan Non-Konvensional Terisolasi

Gambar 5 menunjukkan suatu skema sistem pembangkitan menggunakan generator induksi pada sistem pembangkitan non konvensional seperti pada PLTMH atau sistem konversi tenaga angin (SKEA).

Sistem terdiri dari penggerak mula dengan karakteristik kecepatan yang konstan ataupun tidak konstan, generator induksi dinyatakan dengan tahanan dan induktansi bocor ekivalen rotor  $R'_r$ ,  $L'_{lr}$ , induktansi magnetisasi  $L'_m$ , Tahanan dan induktansi bocor stator  $R_s$ ,  $L_{ls}$ , bank kapasitor sebagai sumber eksitasi bagi generator direpresentasikan dengan kapasitansi  $C_f$  dan beban kelistrikan yang dinyatakan dengan  $L_L$  dan  $R_L$ .  $s$  dan  $\omega$  masing-masing adalah slip dan kecepatan sudut listrik sistem.



**Gambar 5.** Sistem pembangkitan terisolasi (a) Sistem secara fisik (b) Rangkaian ekivalen satu fasa dimana kapasitor eksitasi dan beban telah ditambahkan

Pada kasus kecepatan tidak konstan, penggerak mula yang dapat berupa turbin air ataupun turbin angin memberikan daya mekanik dalam bentuk putaran dan torka mekanik pada poros yang dipasang sesumbu dengan poros generator, jika diperlukan, transmisi mekanik ini dapat menggunakan peralatan transmisi seperti sabuk, rantai ataupun gearbox. Selanjutnya generator mengubah daya mekanik ini menjadi daya listrik dengan eksitasi daya reaktif yang diperoleh dari bank kapasitor. Daya listrik yang dihasilkan selanjutnya disalurkan menuju beban. Dalam bekerja secara terisolasi, kesetimbangan daya haruslah dipertahankan konstan, yaitu

daya aktif dan daya reaktif yang diperoleh dari penggerak mekanik dan kapasitor kompensasi haruslah diserap oleh beban secara simultan, (Muljadi dan Butterfield, 2005).

Rangkaian ekivalen satu phasa sebagaimana gambar 5 dapat dimodifikasi untuk memperlihatkan keterkaitan parameter sistem terhadap kecepatan penggerak mula. Dengan membagi semua parameter dengan  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  adalah frekwensi listrik sistem) akan diperoleh rangkaian ekivalen sebagaimana gambar 6. Dari gambar tersebut, untuk mempertahankan kesetimbangan daya, maka pada sebarang titik pada rangkaian -anggaplah titik A- nilai arus haruslah 0, selanjutnya dengan hukum rangkaian listrik, pada titik A berlaku :

$$Y_S + Y'_M + Y'_R = 0 \quad (1)$$

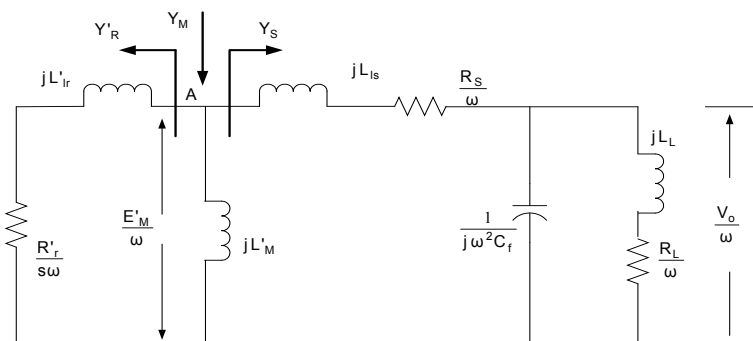
atau ;

$$\left( \frac{1}{L'_M} + \frac{L_1}{\left(\frac{R_1}{\omega}\right)^2 + (L_1)^2} + \frac{L_{lr'}}{\left(\frac{R'_r}{s\omega}\right)^2 + (L'_{lr})^2} \right) + j \left( \frac{\left(\frac{R_1}{\omega}\right)}{\left(\frac{R_1}{\omega}\right)^2 + (L_1)^2} + \frac{\left(\frac{R'_r}{s\omega}\right)}{\left(\frac{R'_r}{s\omega}\right)^2 + (L'_{lr})^2} \right) = 0 \quad (2)$$

dimana :

$$R_1 = R_S + \frac{R_L}{(\omega C R_L)^2 + 1} \text{ dan}$$

$$L_1 = L_{ls} - \frac{C R_L^2}{(\omega C R_L)^2 + 1}$$

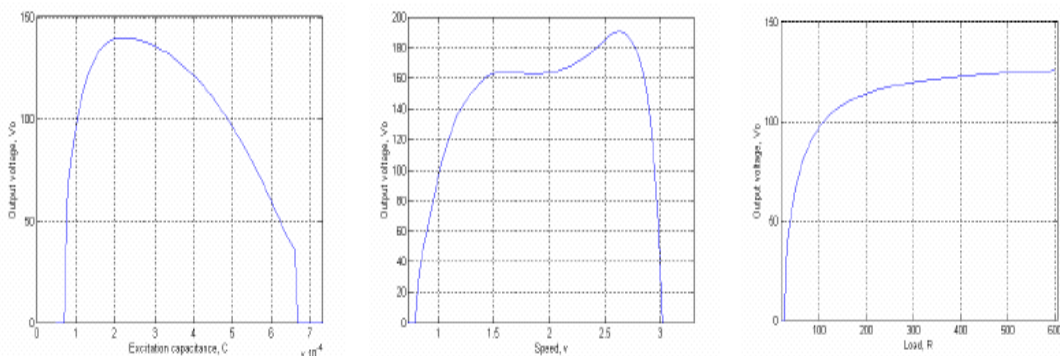


**Gambar 6.** Modifikasi rangkaian ekivalen

Selanjutnya dengan operasi matematis, akan diperoleh bentuk persamaan tegangan output generator  $V_o$  dengan tiga variabel bebas eksternal ; kecepatan, kapasitansi dan impedans beban.

$$V_o = f(\omega, C, Z_L) \quad \text{dimana } Z_L = R_L + j X_L \quad (3)$$

Hubungan masing-masing variabel tersebut terhadap tegangan keluaran generator berbeda satu sama lain dan bersifat tidak linear. Grafik hubungan variabel kecepatan, kapasitansi dan impedans beban pada sebuah generator induksi 0.18 kW, 64/110 V, 2,9/1.7 A dan 1360 RPM serta  $\text{Cos } \theta = 0,62$ . ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Grafik hubungan variabel pengubah eksternal terhadap tegangan  
Sumber ; A. Kuperman dan R.Rabinovici, 2003

Dari persamaan (3) dan grafik hubungan variabel pengubah eksternal sebagaimana gambar 7, terlihat bahwa untuk suatu tingkat tegangan keluaran generator, terdapat nilai tertentu dari masing-masing variabel eksternal (kecepatan, kapasitansi dan pembebanan) yang bersesuaian. Dalam kasus generator induksi dioperasikan pada kecepatan yang tidak dikendalikan, tegangan keluaran generator dapat diatur melalui pengendalian dua variabel yaitu :

1. besaran impedansi beban, hal ini dapat direalisasikan dengan menambahkan peralatan dan mekanisme penyimpanan energi yang dapat berupa battere pada terminal keluaran generator. Dengan cara ini besarnya daya aktif yang dirasakan oleh

generator dapat dipertahankan konstan pada nilai yang memberikan tingkat tegangan yang diinginkan ;

2. besaran kapasitansi eksitasi, hal ini dapat direalisasikan dengan menginputkan sejumlah kapasitansi untuk menambahkan daya reaktif bagi sistem .

Selanjutnya jika mekanisme penyimpanan energi tidak diterapkan, maka besaran tegangan keluaran generator induksi dapat disederhanakan menjadi fungsi dengan hanya satu variabel bebas eksternal yaitu besaran kapasitor eksitasi,

$$V_o = f ( C ) \quad (4)$$

### 3. Kontroler Fuzzy dalam Kendali Eksitasi Generator Induksi

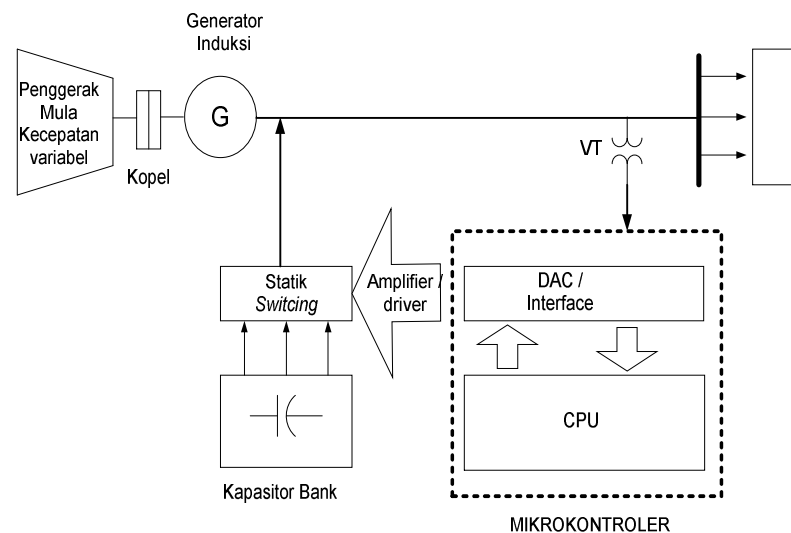
Persamaan (3) dan (4) menunjukkan kebergantungan tegangan keluaran generator ( $V_o$ ) pada variabel kecepatan penggerak mula ( $\omega$ ), besar kapasitor ( $C$ ) dan tingkat pembebanan ( $Z_L$ ). Untuk suatu tingkat tegangan tertentu terdapat nilai yang bersesuaian yang diperoleh dengan menyelesaikan bentuk persamaan (4) diatas dengan asumsi bahwa komponen-komponen penyusun model adalah linear.

Dalam sistem kendali klasik, untuk menghasilkan tegangan keluaran tertentu mengacu pada persamaan (3) dan (4), terlebih dahulu diselesaikan kemudian diumpankan pada kontroler untuk menentukan besaran  $C$  yang sesuai. Metode ini kurang memuaskan mengingat pada kondisi real, nilai kecepatan dan pembebanan senantiasa berubah. Penggunaan kontroler fuzzy dalam kondisi ini dapat mengatasi masalah tersebut. Sistem kendali berbasis *fuzzy* merupakan teknik kendali yang dikembangkan untuk mengatasi kerumitan dalam penyusunan model matematik suatu sistem sebagaimana langkah yang harus dilakukan dalam disain sistem kendali klasik. Dengan metode ini, tidak diperlukan model matematis relasi antar variabel-variabel yang ada dalam sistem tersebut Sistem *fuzzy* disusun sedemikian sehingga dimungkinkan untuk dapat secara langsung mengkodekan struktur pengetahuan / pengalaman unjuk kerja peralatan atau *plant* (dalam hal ini sistem eksitasi generator induksi) yang



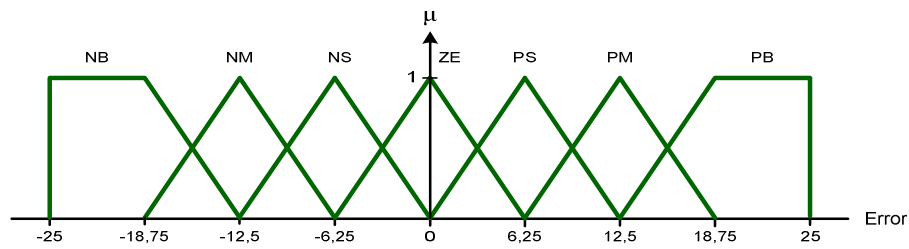
dikendalikan dalam format numerik. Struktur tersebut ditempatkan dalam matriks hubungan yang disebut *Fuzzy Associative Memory* (FAM). Setiap entri dalam matriks tersebut mendefinisikan transformasi input-output sistem.

Keseluruhan tahapan proses yang menyusun mekanisme kerja kontroler logika fuzzy diimplementasikan dalam bentuk perangkat lunak (program komputer) yang dapat dituliskan dalam berbagai bahasa pemrograman. Perangkat lunak tersebut selanjutnya didownload dan dieksekusi pada suatu platform yang dapat berupa komputer ataupun mikrokontroler. Gambar 8 menunjukkan prototype system pembangkitan generator induksi pada pembangkit non konvensional. Gambar 9 menunjukkan diagram alir perangkat lunak fuzzy kontroler bagi pengaturan tegangan keluaran generator induksi yang bekerja secara terisolasi.

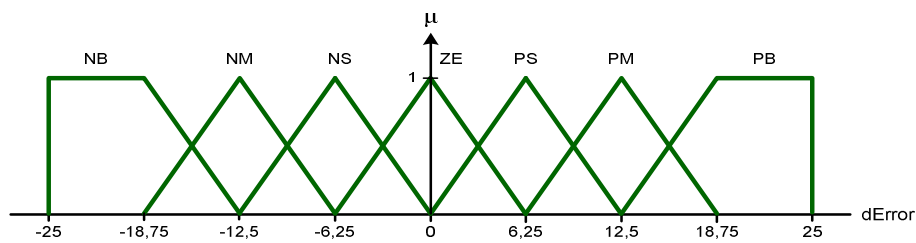


**Gambar 8.** Prototipe sistem pembangkitan

Sebagai variable input bagi kontroler fuzzy adalah deviasi tegangan setting terhadap nilai tegangan sesaat generator yang dibaca pada selang tertentu (error) dan perubahan error tersebut dari kondisi sebelumnya (delta error). Fungsi keanggotaan kedua variable fuzzy ditunjukkan pada gambar 9 dan 10 dimana label yang digunakan untuk tiap fungsi keanggotaan Error dan delta error yaitu NB (*Negative Big*), NM (*Negative Medium*), NS (*Negative Small*), ZE (*Zero*), PS (*Positive Small*), PM (*Positive Medium*), PB (*Positive Big*).



**Gambar 9.** Fungsi Keanggotaan input *Error*



**Gambar 10.** Fungsi Keanggotaan Input *Delta Error*

Besarnya nilai derajat keanggotaan suatu *input* dapat ditentukan dengan rumus persamaan garis atau menggunakan persamaan fungsi keanggotaan untuk masing-masing tipe keanggotaan tersebut.

Setelah dilakukan fuzifikasi terhadap input, maka proses selanjutnya adalah *inference*. *Inference* merupakan proses menghubungkan input *fuzzy* dengan *output fuzzy*. Output pada sistem *fuzzy* ini adalah berupa besaran kapasitor eksitasi yang dibutuhkan. Input dan output *fuzzy* dihubungkan berdasarkan aturan-aturan yang disebut *if-then rules*. Aturan-aturan ini dibuat ke dalam suatu tabel yang disebut FAM (*Fuzzy Associative Memories*). Adapun Aturan-aturan yang digunakan pada sistem fuzzy ini dapat dilihat pada tabel 1 berikut:

**Tabel 1. Fuzzy Associative Memories (FAM)**

Error dError	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	SB	SB	B	AB	AB	S	AK
NM	SB	B	B	AB	S	AK	K
NS	SB	B	AB	S	S	AK	K
ZE	SB	B	AB	S	AK	K	SK
PS	B	AB	S	S	AK	K	SK
PM	B	AB	S	AK	K	K	SK
PB	AB	S	AK	AK	K	SK	SK

### **Postprocessing**

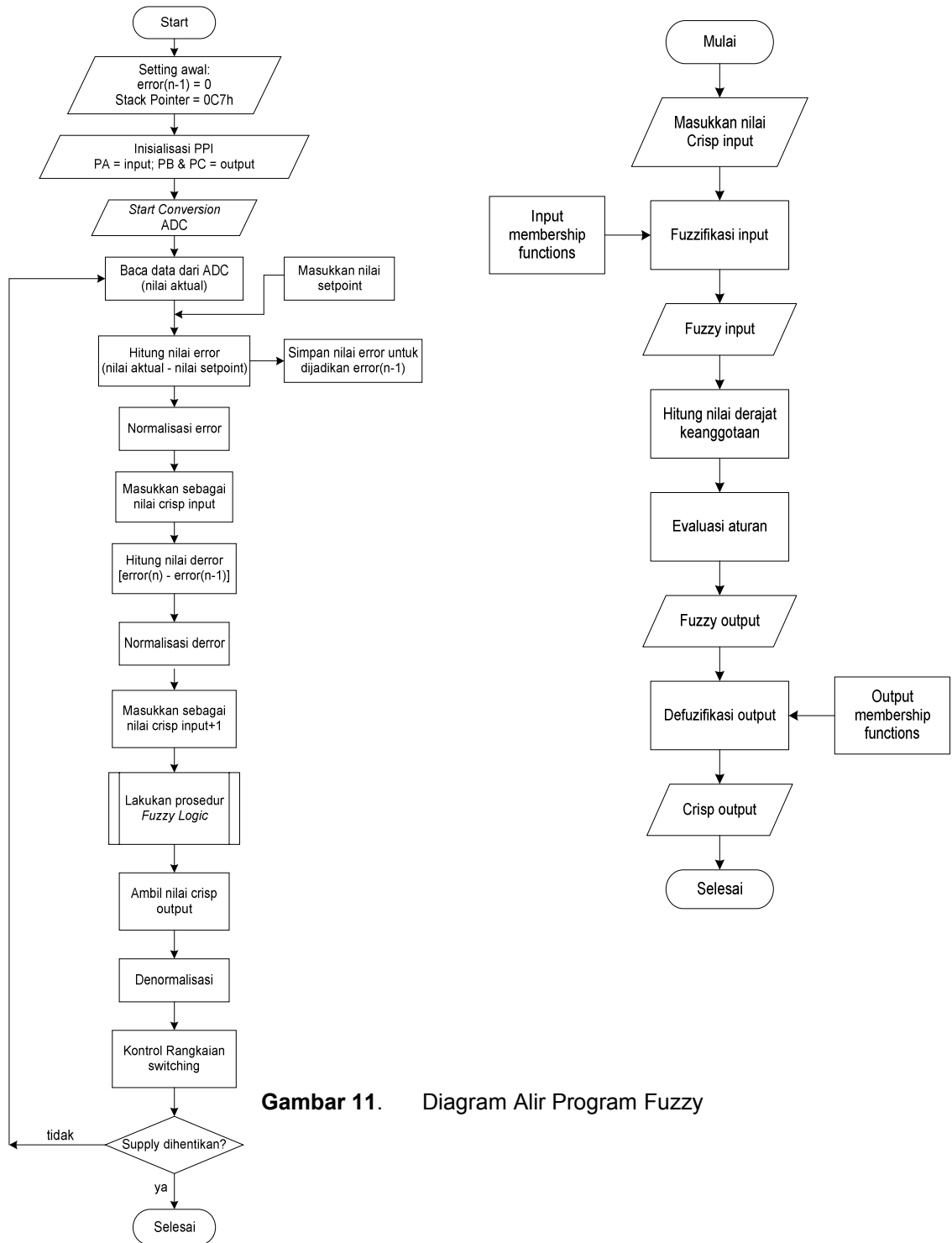
Hasil defuzifikasi belumlah berupa nilai output sesungguhnya yang dibutuhkan oleh peralatan yang dikendalikan. Karena itu nilai tersebut perlu dinormalisasi. Pada perancangan ini hasil proses *defuzzification* yang dihasilkan mikrokontroler adalah berupa nilai antara 0 – 255 desimal atau 0 – FFh. Karena keluaran yang diinginkan dari sistem kendali ini berupa nilai-nilai kapasitor yang dibutuhkan oleh generator induksi dimana ada 10 nilai kapasitor yang digunakan sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, maka rentang nilai 0 – FFh dibagi menjadi 10 daerah yang diterapkan ke fungsi keanggotaan output fuzzy, seperti yang ditunjukkan pada gambar 9 dan gambar 10.

### **Defuzzification**

Proses ini berfungsi untuk menentukan suatu nilai crisp output. Prosesnya adalah sebagai berikut: suatu nilai *fuzzy output* yang berasal dari *inference engine* diambil kemudian dimasukkan ke dalam suatu membership function output. Dalam perancangan ini, bentuk bangun yang digunakan dalam *membership function output* adalah bentuk *singleton* yaitu garis lurus vertikal ke atas, seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.15. Adapun label yang digunakan untuk tiap *membership function output* ini adalah Sangat Kecil (SK), Kecil (K), Agak Kecil (AK), Sedang (S), Agak Besar (AB), Besar (B) dan Sangat Besar (SB).

### Diagram Alir

Adapun Diagram alir program yang dikerjakan oleh mikrokontroler adalah sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 11.

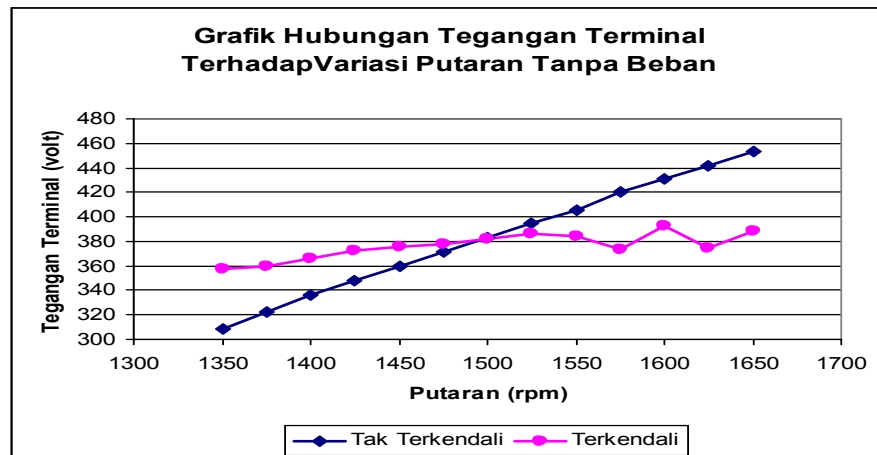


Gambar 11. Diagram Alir Program Fuzzy

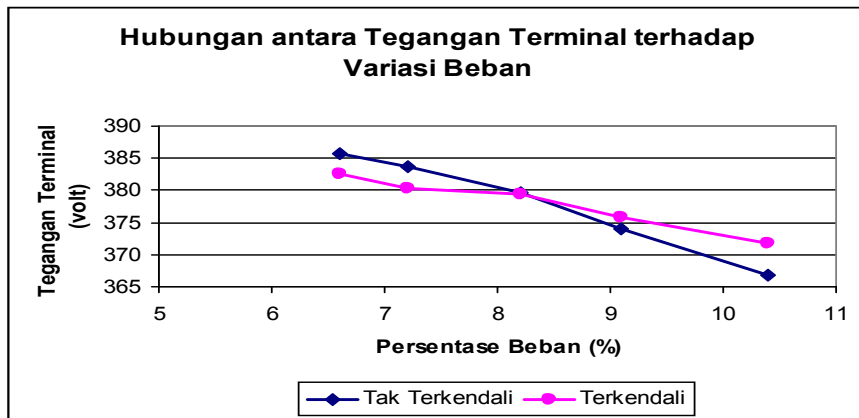
## 6. Hasil Eksperimen

Dari hasil pengujian dan analisa yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

Kontroler Logika Fuzzy yang diimplementasikan pada alat kendali eksitasi generator induksi telah mampu meminimalisir penyimpangan tegangan yang terjadi akibat perubahan putaran penggerak mula dan perubahan beban walaupun kinerjanya belum begitu optimal. Berdasarkan data hasil pengujian pada tegangan set 380 volt (*line-to-line*), untuk variasi putaran penggerak mula 1350-1650 rpm dengan beban konstan, *error* tegangan maksimum yang terjadi adalah -35,2 volt (9,26 %) dibawah nominal dan 13 volt (3,42%) di atas nominal. Sedangkan pada berbagai variasi beban (6,6% - 10,4%) dengan setting awal putaran penggerak mula konstan, *error* tegangan maksimum yang terjadi sebesar -8,3 volt (3,42 %) dibawah nominal dan 2,6 volt (0,68%) di atas nominal.



**Gambar 12.** Grafik Tegangan terminal generator terhadap variasi putaran penggerak mula untuk operasi tak terkendali dan yang terkendali



**Gambar 13.** Grafik Tegangan terminal generator terhadap variasi Beban untuk operasi terkendali dan tak terkendali

### Ungkapan Terimakasih

Terima kasih kepada Direktorat Pembinaan Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional yang telah mendanai kegiatan penelitian ini.

## Referensi

- Abul, R.H., Martis, T.S., Ula, A.H.M.S, 1994, Design and Implementation of a fuzzy controller based automatic voltage regulator for synchronous generator. *IEEE Trans. on Energy Conversion* Vol 9 No.3 Sept 1994, 550-555
- Alolah, A.I., Ali, K.F., 1999, A Simple Iterative Approach for Steady State Analysis of Three Phase Self-Excited Induction Generator. *IEEE Proc. Conference, Seattle, USA*, May 1999.
- Alolah, A.I., Majeed A.A., 2000, Excitation requirements of three phase self-excited induction generator under single phase loading with minimum unbalance, *IEEE 0-7803-5938-0* 2000.
- Al-Jabri, Alolah.A., 1990, Capacitance Requirement for isolated Self-excited Induction Generator, *IEE proc. Part B vol 137(3)*, 1990 155-159
- Afriadi, 2005, Kebijakan pengelolaan energi nasional, *makalah lokakarya energi 2005*, Padang 2005
- Boldea, I., Nasar, S.A, 1998, Electric Drives, *CRC Press* New York 1998
- Bose, B.K., 1986, Power Electronic and AC Drives, *Prentice Hall*, Englewood Cliffs. 1986
- Chen, T., 1997, Performance Analysis of a Three Phase Self Induction Generator Self-Excited with Single Capacitor *IEEE Trans. On Energy Conversion*, paper PE-028-1997
- Hamid, M.I., 2005, Optimizing Harmonics Filter of Static Power Converter as Reactive Power Source For Induction Generator on Non Conventional Power Plant, *Laporan Penelitian Forum HEDS 2005*
- Hamid, M.I, Syukri, 2002, Perancangan Suatu Model Sistem Perbaikan Faktor Daya dengan Pengaturan Pensaklaran Bank Kapasitor, *Tugas Akhir Jurusan Elektro UNAND*, Padang 2002
- Kuperman. A., Rabinovisi, R, 2003, A Capacitor emulating solid-state voltage regulator for autonomous induction generators, *Technical Report*, University of Negev Israel , 2003
- Muljadi, E., Butterfield, C.P., Romanowitz, H., Yinger, R., 2005, Self excitation and harmonics in wind power generation, *proseding. 43<sup>rd</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno Nevada 2005
- Rey, J.P., 2004, Principles of Fuzzy Logic, *Lecture Notes*, NHL Netherland , 2004
- Saneifard, P., Prasad, N.R., Smolleck, H.A, 1997, A fuzzy logic approach to unit commitment, *IEEE Trans. On Power System*, Vol 12 no.2 May 1997, 988-995

Sousa, G.C.D., Bose. B.K., 1994, A fuzzy set teori based control of a phase-controlled converter DC machine drive, *IEEE Trans. On Industri Application*, Vol 30 No.1 Jan / Feb 1994, 34-44

The Math Works Inc, 1999, Power system blockset for use with simulink, *User guide version 1*, Hydro-Quebec TEQSIM International Natick MA 1999.