

**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK**



**PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI EKSTIASI
PWM SINUSOIDAL MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC
CONTROLLER**

SKRIPSI

Disusun Oleh :
ABDUL ZAHID MAWARDIN
NIM. 01.12.088

MARET 2006

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI EKSITASI PWM SINUSOIDAL MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER

SKRIPSI


*Disusun dan Diajukan Untuk Melengkapi dan Memenuhi Syarat-Syarat
Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik*

Disusun Oleh :
ABDUL ZAHID MAWARDIN
NIM 01.12.088

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro


Ir. E. YUDI LIMBRAPTONO, MT
NIP.P. 1039500274

Diperiksa dan disetujui,
Dosen Pembimbing


Ir. WIDODO PUDJI M, MT
NIP. P.1028700171

**KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
2006**

Prolog :

Dalam perjalanan hidup ini seringkali kita merasa kecewa, kecewa sekali, sesuatu yang luput dari genggamannya, keinginan yang tidak tercapai, kenyataan yang tidak sesuai harapan. Akhirnya angan-angan melah berandai-andai. Pffh sungguh semesta itu telah menghadirkan nelangsa yang begitu menggelora dalam jiwa.

Dan sunnah sangat beruntung-andai dalam saat-saat terguncangnya jiwa, masih ada setitik edul, ada kaba untuk merekangi kebenaran, masih ada semangat untuk melangkah kaki menuju majelis-majelis ilmu yang akan mengantarkan pada ketentraman jiwa.

Hidup ini ibarat lintara. Tempat kita berjar berbagai keinginan. Dan lantaran manusia diciptakan mempunyai kehendak, mempunyai keinginan. Tetapi tidak semua yang kita inginkan bias terbulu, tidak semua yang kita inginkan bias tercapai. Dan tidak mudah menyadari bahwa apa yang bukan menjadi hak kita perlu kita tangis. Banyak orang yang tidak sadar bahwa hidup ini tidak punya satu hukum: harus sukses, harus bahagia atau harus-harus yang lain.

Betapa banyak orang yang sukses tetapi lupa bahwa sejatinya itu semua pemberian Allah SWT hingga membuatnya sombong dan bertindak sewenang-wenang. Begitu juga kegagalan sering tidak dihadapi dengan benar. Padahal dimensi tauhid dari kegagalan adalah tidak tercapainya apa yang memang bukan hak kita. Padahal hakekat kegagalan adalah tidak terengkuhnya apa yang memang bukan hak kita. Apa yang memang menjadi jalan kita di dunia, entah itu Rizki, jabatan, kedudukan pasti Allah SWT akan sampaikan. Tetapi apa yang bukan milik kita, ia tidak akan kita bias miliki. Meski ia nyaris menghampiri kita, meski kita mati-matian mengusahakannya.

"Jika lautan menjadi tinta dan pepohonan menjadi kalam untuk mencatat ilmunya, maka tidaklah cukup meskipun ditambah tujuh kali banyaknya."

Spesial Thanks to :

"Segala puji dan syukur kepada sumber dari suara-suara hati yang bersifat mulia, sumber ilmu pengetahuan, sumber segala kebenaran, Sang Maha Cahaya, Penubuh cahaya Ilham pilar nalar, kebeneran dan kebaikan yang terinduli, Sang kokasih tercinta yang tidak terduga penercahayaan. Cinta-Nya bagi umat-Nya Allah Subhanahu Wa Ta'ala.

Dalawat serta salam teruntuk Nabi Muhammad SAW, keluarga dan sahabat nya, yang telah memberikan dan menyempulkan kepada kita semua ajaran Rukun Iman dan Rukun Islam yang telah terbukti kebenarannya dan semakin terus terbukti kebenarannya.

Secara Khusus Yang Amat Daya Teratai dan Dayangi

Ayah dan BundaKis yang tiada hentia henti-hentinya mendasakan dan memberikan support semenjak usanda lahir sampai sekarang. Yang selalu memberikan keteladanan dalam hidup, yang merupakan sumber kehidupan Daya. Pembimbing Utama hidup Daya. Pendidik ku yang telah membacakan dan mendidiku untuk beranti dan berak sana yang memiliki peranan yang sangat penting dan tak terhingga. Bagaimana teratai Terima Kasih ini tidaklah cukup untuk menggambarkan wujud terimakasih Daya. Maafin segala salah dan khilaf Ananda. Hanya dengan perantaraan yang baru dapat Daya persembahkan surat ini. Pa Daya dan BundaKis Yaku

Adik-adikku Terima Kasih Atas to u dan Supportnya selama ini Belajar yang rajin ya... jangan nakal. Mengorin segala nasehat Bapak Ibu ya... Kaka Hari ini sudah jadi Surjana..... Maafin Kaka Ya..

Zahid Want to Say thank u to.....

Dr. Widodo Pudji Muljanto, MT

Makasih atas bimbingannya selama ini, pa maaf kl sy ada salah kekeliruan selama bimbingan... Banyak hal yang dapat saya pelajari dari Bapak.. Saya ingin seperti Bapak Punya banyak pengalaman....

Bimbingan P. Wid lainnya: Kalis, Dini, Rika, Ulum, Guntur, Erent, Surya dan Mas Ardian (Kita sudah Sarjana sekarang prenda).... Terus Berjuang Yaaa.. Perjuangan belum berakhir sampai disini... Klo Dah Berhasil jangan lupa teman yaaa.. Good Luck Semualll

THANX 2:

* Teman2ku yang wisuda april 2006, akhirnya perjuangan kita ada hasilnya fren, arek2 kontrakan PusKopad (bank roma, anam, safak, hendro, jay (kapan Nyusul neh... maafin Zahid Klo ada Salah yaa.. Tetap Semangat friend I Always Support U), mprit, sapi, bremi, yuda, imam, deny, dian, zainul, Edwin, Samsul, ST), Ubet, Krebet, Arif Rifai, Aris (Udah sarjana nih kl dapat kerja bagi2 lowongannya yaa), Hady surya (jangan pacaran terus.. semangat oke.. kapan ikam nyusul maaf selama ini sy selalu ngerepotin kamu.. makasih atas bantuannya), Fahmi (makasih udah nganterin dan mau jemput sy habis kompre walaupun hujan), vian (semangat n' kapan nyusul.), didik, ucok (makasih atas masukan dan dukungannya), EL1 (Bani, Jo, Agung, O2n, kholik, Dani Dimas, Adil, De2n, Arif (pa'De), Ngadiono, Wa2n, Aroma, Ruli, Candra... DeElel yang ngga' bisa sy sebutin satu persatu.. maaf ya namanya ga sy hafal semua.. maafin sy ya makasih atas dukungannya n kuliah yg rajin.. biar cepat nyusul saya. Mada (makasih sepatunya yaa), Tak lupa juga sy mau ngucapin makasih

atas kebersamaannya selama ini untuk sobat2 ku di kelas EL 2(dua)
Hendra Lawang (ko' JARANG kekampus sibuk yaa..cepatan ngurus
skripsi..maaf zahid duluan yaa),Henang,Anang,Chandra Agus'Pa' De',
Ari', Prengky, Ebet (semangat Bet..Desember Yaa), Herman (jadi
instruktur yg baik ya.),Are' E L 3 thanks atas kebaikan kalian maafin kl
ada salah. Lab.Community (Mas Ram (makasih masukannya..sy harus
banyak belajar dari mas, maafin kl sy ada salah),Udin Borneo (rajin
kuliah ya),Kiki,Mas Vendy (kalian kapan nyusul) Are'2 Lab.maaf kl
namanya sy g sebut. Thanks a lot).My Brother Aris (Belajar yg
Rajin..ya),D'Muti yg cantik (ko' malu kl ma ketemu ka2knya),Anak
HIPPMIB Kru 249 B Sumpersari (Dhen's, Ma2t D'Lamata (kuliah yang
rajin Ya...Ingat April 2005), Enti (kuliah yang rajin Bos), Jo "Pa'
Guru"(rajin kekampus Ya),Igonk (terus belajar jangan putus Asa,
Oke?),Dedi (sujudkan impian tuk jadi seorang arsitek yah),Gita & Hari
(The NeeXt Emperror), makasih atas dukungannya yach),Ari "ketua"
(tolong jaga HIPPMIB ya...),Kru 249 E (Joe' (makasih atas bantuan dan
masukannya ya), Isro (Akhirnya Sarjana juga), Jecky (Jgn pecaran terus
ingat Kuliah),Roland (tetap eksist dgn Bandnya ya..I lop U), Kenje
(Jangan terlalu polos Boy..) Glen (Thanks atas supportnya),Iyank (kapan
ajarin AutoCadNYA biar bisa desain rumah sendiri hee hee),Mas
Zaenal,Ance (tetap semangat),Mba' Evi (Jaga K'Joe ya),Pa' Ce Hendra
(makasih Nasihat dan Supportnya, Piye kabare Junior),
Arman Papin"(makasih Jasnya bos),DE' Devy (makasih atas do'anya serta
dukungannya yg taen maafin kaka' ya..I'll try to find my another
heart..jangan sedih terus ya ..keep Smile) , Mas Wiwit makasih atas
programnya, P.jayenk thanx boss atas semuanya (sering2 aja bikin
mahasiswa bingung mas),Ba puji, P. Hamid n P. Cholri Sang majelis
penguji makasih pertanyaan,masukan dan nilainya.

ABSTRAKSI

PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI EKSITASI PWM SINUSOIDAL MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROLLER

(Abdul Zahid Mawardin, 01.12.088, Teknik Energi Listrik (S-1),... Hal)
(Dosen Pembimbing : Ir. Widodo Pudji Muljanto, MT)

Kata kunci: PWM sinusoidal, Fuzzy Logic Controller (FLC),
Proportional Integral Derivative (PID) Controller

Skripsi ini menunjukkan suatu pengaturan kecepatan motor induksi eksitasi PWM sinusoidal menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC). Umumnya pengaturan motor induksi menggunakan proportional integral (PI) atau proportional integral derivative (PID) controller. Dengan menggunakan FLC dan PID controller ini, performansi motor induksi dibandingkan. Simulasi yang dilakukan menggunakan Simulink dari program Matlab 7.0. Hasilnya menunjukkan bahwa dengan menggunakan FLC, motor induksi memiliki performansi yang lebih baik dibanding dengan PID controller.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Eksitasi PWM Sinusoidal Menggunakan Fuzzy Logic Controller”.

Skripsi ini bertujuan untuk memenuhi kurikulum akademik yang harus ditempuh oleh setiap mahasiswa ITN Malang dalam menempuh jenjang pendidikan strata satu pada Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Energi Listrik. Diharapkan dengan penulisan skripsi ini, dapat memperdalam dan sekaligus melatih mahasiswa agar dapat menerapkan ilmu yang didapat pada waktu kuliah dengan kondisi sesungguhnya.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari sempurna, karena itu saran dan kritik yang bersifat membangun penulis sangat harapkan.

Atas tersusunnya skripsi ini tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. **Dr. Ir. Abraham Lomi, MSEE**, selaku Rektor Institut Teknologi Nasional Malang.
 2. **Ir. Mochtar Asroni, MSME**, selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Malang.
 3. **Ir. F Yudi Limpraptono, MT**, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Nasional Malang.
-

4. **Ir. Widodo Pudji M,MT**, selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan ilmu, dorongan semangat dan bantuan.
5. Kedua orang tuaku yang telah membesarkan, mendidik dan selalu mendoakanku sampai terwujud cita-citaku serta adik-adikku *thank's* ya atas doanya
6. Rekan-rekan Elektro angkatan 2001 atas segala kebersamaannya selama ini.

Akhirnya penyusun mohon maaf kepada semua pihak apabila ada kesalahan dan kekurangan selama penyusunan skripsi ini .

Malang, Maret 2006

Penyusun

2.2.1. Stator	6
2.2.2. Rotor	7
2.3. Medan Magnet Putar	7
2.4. Prinsip Kerja Motor Induksi.....	9
2.4.1. Slip dan Frekuensi Arus Rotor.....	11
2.5. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	12
2.5.1. Rangkaian Ekuivalen.....	12
2.5.2. Rangkaian Ekuivalen Stator	12
2.5.3. Rangkaian Ekuivalen Rotor	13
2.5.4. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	15
2.6. Pengujian Motor Induksi Tiga Phasa	17
2.6.1. Pengujian Arus Searah (<i>DC Test</i>)	17
2.6.2. Pengujian Tanpa Beban (<i>No-Load Test</i>).....	18
2.6.3. Pengujian Rotor Tertahan (<i>Blocked Rotor Test</i>)	20
2.6.4. Pengujian Berbeban (<i>Load Test</i>).....	22
2.7. Pengaturan Kecepatan	23

BAB III METODE FUZZY LOGIC

3.1. Umum.....	26
3.1.1. Konsep Dasar Logika Fuzzy	27
3.2. Himpunan Klasik (<i>crisp</i>).....	28
3.3. Himpunan Fuzzy	29

3.4. Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy	31
3.4.1. Operasi Himpunan Fuzzy	34
3.5. Variabel Linguistik.....	34
3.6. Kontroller Dengan Fuzzy Logic.....	36
3.6.1. Fuzzifikasi.....	39
3.6.2. Basis Pengetahuan.....	40
3.6.2.1. Basis Data.....	40
3.6.2.2 Basis Aturan	43
3.7. Logika Pengambilan Keputusan.....	44
3.7.1. Bentuk Aturan Kontrol Fuzzy	44
3.7.2. Fungsi Implikasi.....	45
3.8. Mekanisme Inferensi	46
3.9. Defuzzifikasi	48
3.10. Kontroller Logika Fuzzy Yang Digunakan.....	50
3.11. Kendali PID.....	64
3.12. Penalaan Parameter Kontroller PID	65

BAB IV SIMULASI DAN HASILNYA

4.1. Pemodelan Sistem	68
4.1.1. PID Controller	69
4.1.2. Fuzzy Logic Controller	70
4.2. Simulasi.....	75
4.3. Hasil Simulasi	75

4.3.1. Hasil Simulasi Dengan Menggunakan PID Controller	75
4.3.2. Hasil Simulasi Dengan Menggunakan FLC.....	76

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan.....	78
5.2. Saran.....	79

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1	Konstruksi Motor Induksi	6
Gambar 2-2	Stator Tiga Phasa Motor Induksi.....	6
Gambar 2-3	Motor Induksi Rotor Belitan Dan Rotor Sangkar Bajing.....	7
Gambar 2-4	Medan Putar Pada Motor Induksi.....	8
Gambar 2-5	Rangkaian Ekuivalen Stator	12
Gambar 2-6	Rangkaian Ekuivalen rotor.....	14
Gambar 2-7	Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi.....	15
Gambar 2-8	Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi	16
Gambar 2-9	Rangkaian Pengujian Arus Searah (<i>DC Test</i>)	17
Gambar 2-10	Diagram Rangkaian Pengujian Tanpa Beban.....	18
Gambar 2-11	Rangkaian Ekuivalen Pengujian Rotor Tertahan dan Rangkaian Pengujian Rotor Tertahan.....	20
Gambar 2-12	Diagram Pengujian Berbeban.....	22
Gambar 3-1	Himpunan Fuzzy Dan Istilahnya.....	29
Gambar 3-2	Himpunan Fuzzy Dan Penyokongnya.....	30
Gambar 3-3	Bentuk-bentuk Fungsi Keanggotaan.....	32
Gambar 3-4	Fungsi Keanggotaan Segitiga.....	32
Gambar 3-5	Himpunan Fuzzy Untuk Kecepatan	35
Gambar 3-6	Bagian Pokok Fuzzy Logic Controller.....	37
Gambar 3-7	Diagram Blok Sistem Pengaturan Dengan Fuzzy Logic.....	38

BAB I

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Motor induksi banyak digunakan di industri. Hal ini dikarenakan oleh harganya yang murah, dan mudah dalam perawatannya. Dalam hal ini perlu perawatan yang lebih sedikit ketimbang Motor DC. Untuk pengeksitasian motor induksi ada bermacam-macam caranya. Salah satunya dengan menggunakan PWM sinusoidal.

Di dalam industri sistem pengaturan memegang peranan yang sangat penting untuk menunjang proses berjalannya industri tersebut dan untuk meningkatkan efisiensi dalam proses produksi.

Secara konvensional pengaturan motor induksi dengan menggunakan PID controller. Namun pada sistem pengaturan dengan PID controller ini kita mengalami kendala, yaitu dalam menentukan nilai konstanta proporsional (K_p), integral (K_i) dan konstanta derivative (K_d) dari PID. Hal ini sangat sulit dan memerlukan waktu yang lama.

Dalam makalah ini diajukan suatu cara pengaturan motor induksi eksitasi PWM sinusoidal dengan menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC). Dengan FLC ini, performansi motor induksi diharapkan memperoleh hasil yang lebih baik dibanding dengan PID controller.

2. Perumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang diatas maka permasalahan yang timbul adalah:

1. Bagaimana menganalisa cara kerja dari sistem pengaturan tersebut.
2. Bagaimana mengidentifikasi parameter motor dengan controller logika fuzzy dalam keadaan tanpa beban dan berbeban.
3. Bagaimana membuat simulasi sistem pengaturan kecepatan motor induksi eksitasi PWM sinusoidal menggunakan FLC dengan menggunakan software matlab 7.0
4. Melakukan pengujian.

3. Tujuan Penelitian

Membandingkan sistem pengaturan kecepatan motor induksi eksitasi pwm sinusoidal yang menggunakan fuzzy logic controller dengan sistem pengaturan yang menggunakan PID controller.

4. Batasan Masalah

Agar pembahasan skripsi ini lebih terarah sesuai dengan tujuan, maka permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Motor yang digunakan adalah Motor induksi yang disuplai dengan inverter jenis eksitasi PWM sinusoidal.
 2. Komponen pada rangkaian daya dianggap ideal sehingga walaupun terdapat jatuh tegangan, nilainya diabaikan.
-

3. Komponen harmonisa yang terjadi pada rangkaian secara keseluruhan tidak dibahas.
4. Karakteristik motor induksi dianggap linier dengan mengabaikan pengaruh reaksi jangkar dan kejenuhan inti besi.
5. Simulasi dengan software Simulink MatLab 7.0 secara off-line.

5. Metodologi Penelitian

Metode yang dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah diatas adalah:

1. Studi Literatur
2. Pemodelan sistem pengaturan secara keseluruhan
3. Perancangan simulasi dengan software Simulink Matlab 7.0
4. Simulasi dan analisa data hasil perancangan
5. Penarikan kesimpulan

6. Relevansi

Adalah penting bahwa sistem pengaturan motor induksi mempunyai peranan yang sangat penting dalam menjaga kestabilan variabel proses dan meningkatkan efisiensi energi. Sehingga diharapkan dengan penggunaan Fuzzy logic Controller ini menjadi alternatif sistem pengendalian yang lebih produktif, ekonomis dan bermanfaat lebih bagi industri-industri yang ada.

7. Sistematika Penulisan

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab, yaitu :

BAB I : PENDAHULUAN

Berisikan tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi dan sistematik penulisan serta relevansinya.

BAB II : KONSEP DASAR MOTOR INDUKSI

Membahas tentang teori dasar mengenai motor induksi, konstruksi, prinsip kerja motor induksi, rangkaian ekivalen dan pengujian motor induksi tiga phasa.

BAB III : METODE FUZZY LOGIC

Berisikan tentang teori dasar dan konsep fuzzy logic serta prinsip pengendaliannya pada sistem tenaga listrik.

BAB IV : SIMULASI DAN HASILNYA

Berisi simulasi pengaturan kecepatan motor induksi dengan menggunakan fuzzy logic controller dan yang menggunakan PID kontroler, tampilan program dan hasil simulasinya.

BAB V : PENUTUP

Berisikan kesimpulan dari hasil simulasi dan saran

BAB II

KONSEP DASAR MOTOR INDUKSI TIGA PHASA

2.1. Teori Dasar Motor Induksi.

Motor arus bolak-balik (Motor AC) adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus bolak-balik menjadi tenaga mekanik atau tenaga gerak, dimana tenaga gerak ini berupa perputaran pada motor. Salah satu jenis motor AC ini adalah motor induksi atau motor tak serempak.

Disebut motor tak serempak karena putaran motor tidak sama dengan putaran fluks magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara putaran rotor dan putaran fluks magnet terdapat selisih putaran yang disebut slip.^[6]

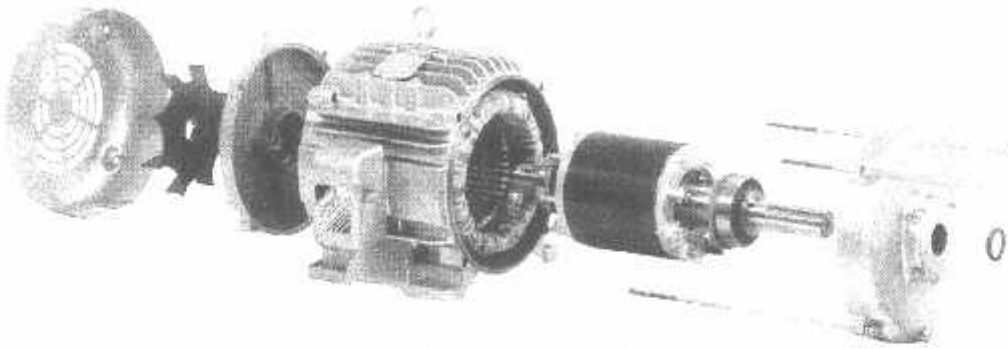
Motor induksi *polyphase* banyak dipakai dikalangan industri. Ini berkaitan dengan beberapa keuntungannya.

Keuntungan :

1. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tak pernah mengalami kerusakan, khususnya tipe rotor sangkar bajing).
2. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
3. Efisiensi tinggi. Pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang ditimbulkan dapat dikurangi (khususnya motor induksi rotor belitan).

2.2. Konstruksi Motor Induksi

Konstruksi motor induksi terdiri dari dua bagian utama yaitu stator dan rotor. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2-1 di bawah ini :



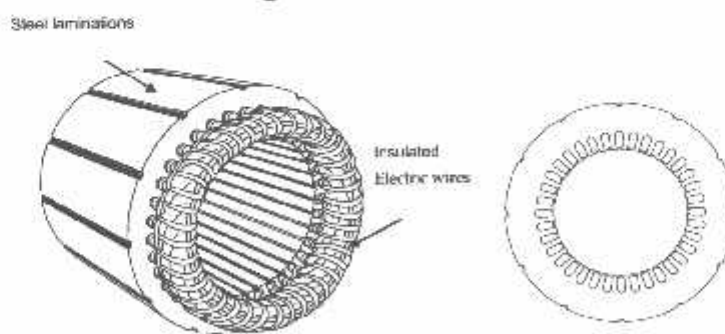
Gambar 2-1 : Konstruksi Motor Induksi

Sumber : <http://www.enm.com>, Dynamics of 3-phase Induction Motors, Part I.

2.2.1. Stator

Pada dasarnya konstruksi stator pada motor induksi mempunyai bentuk fisik yang sama dengan mesin sinkron, yang terdiri dari :

- a. Rumah stator terbuat dari besi tuang.
- b. Inti stator dari besi atau baja silikon.
- c. Alur dan gigi materialnya sama dengan inti, alur tempat meletakkan belitan.
- d. Belitan stator dari tembaga.



Gambar 2-2: Stator Tiga-Phasa Motor Induksi

Sumber : <http://www.enm.com>, Dynamics of 3-phase Induction Motors, Part I.

2.2.2. Rotor

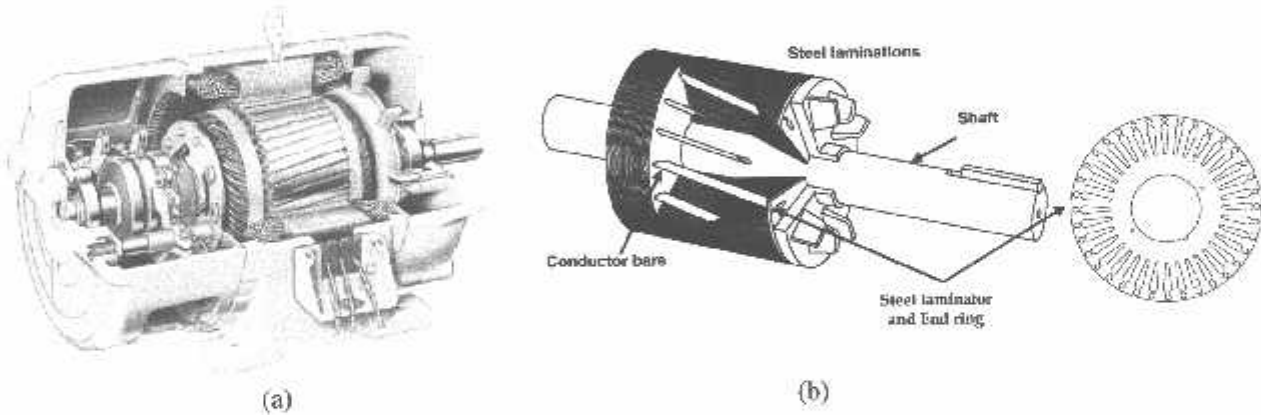
Konstruksi dari rotor motor induksi mempunyai dua bentuk, yaitu :

1. Rotor Belitan (*wound rotor/ rotor slip ring*).

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan belitan kumparan tiga-fasa sama seperti kumparan stator. Kumparan stator dan rotor juga mempunyai jumlah kutub yang sama.

2. Rotor sangkar (*squirrel cage rotor*).

Motor induksi jenis ini mempunyai rotor dengan kumparan yang terdiri atas beberapa batang konduktor yang disusun sedemikian rupa sehingga menyerupai sangkar tupai.



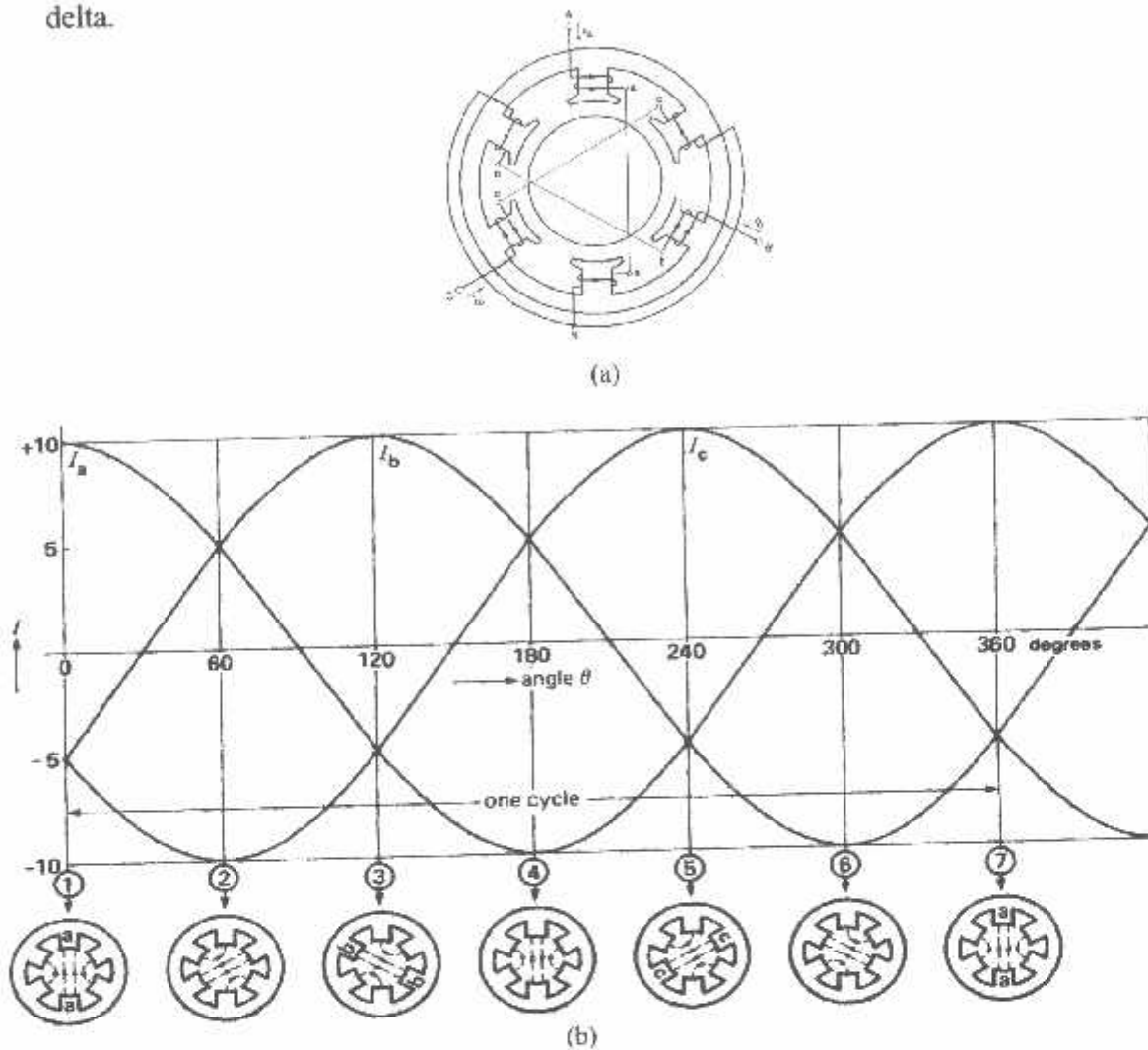
**Gambar 2-3 : a) Motor Induksi Rotor Belitan
b) Rotor Sangkar Bajing**

Sumber : <http://www.enm.com>, Dynamics of 3-phase Induction Motors, Part I.

2.3. Medan Magnet Putar^[2]

Perputaran motor pada mesin arus bolak-balik ditimbulkan oleh adanya medan putar (fluks yang berputar) yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dalam fasa

banyak, umumnya tiga fasa. Hubungan dapat berupa hubungan bintang atau delta.



Gambar 2-4 : Medan Putar Pada Motor Induksi
<http://www.enm.com>, Dynamics of 3-phase Induction Motors, Part I.

Medan putar terjadi apabila kumparan A-a, B-b, C-c dihubungkan tiga fasa dengan beda fasa masing-masing 120° (hubungan bintang, Y) dan dialiri arus sinusoida. Distribusi i_a , i_b , i_c sebagai fungsi waktu adalah seperti gambar 2-4b. Pada keadaan t_1 fluks resultan mempunyai arah yang sama dengan arah yang dihasilkan oleh kumparan A-a, sedangkan pada t_3 , fluks resultannya dihasilkan

oleh kumparan B-b. Untuk t_4 , fluks resultannya berlawanan arah dengan fluks resultan yang dihasilkan pada t_1 . Dari gambar 2-4 b tersebut terlihat bahwa fluks resultan ini akan berputar satu kali.

2.4. Prinsip Kerja Motor Induksi

Motor induksi tiga fasa dapat dibandingkan dengan transformator karena merupakan piranti yang melibatkan perubahan kebocoran fluks pada kumparan stator. Dalam hubungan ini diasumsikan bahwa rotor terdiri atas tipe lilitan dan hubungan bintang. Dengan lilitan rotor dalam keadaan rangkaian terbuka tidak ada torsi yang dibangkitkan. Dengan demikian pemberian tegangan tiga fasa pada kumparan stator tiga fasa menimbulkan medan magnet putar dan memotong kumparan rotor pada frekuensi f_1 . Nilai rata-rata ggl induksi per fasa dari kumparan rotor dinyatakan dengan persamaan :

$$E_2 = 4,44 f_1 N_2 k_{w2} \Phi_m \dots\dots\dots (2.1)$$

Perlu diketahui bahwa frekuensi stator f_1 digunakan disini karena rotor tersebut dalam keadaan diam / berhenti. Dengan demikian E_2 merupakan ggl frekuensi saluran . Fluks (Φ_m) tentu merupakan tiap elektroda (pole) dari kumparan stator dan rotor.

Rumus yang serupa menyatakan nilai rata-rata ggl induksi tiap fasa yang terjadi dari kumparan stator, yaitu :

$$E_1 = 4,44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) dapat dirumuskan rasio :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1 K_{w1}}{N_2 K_{w2}} \dots\dots\dots (2.3)$$

Pada dasarnya, motor induksi pada keadaan diam menyerupai karakteristik transformator dengan kumparan stator sebagai sisi primer dan kumparan rotor sebagai sisi sekundernya.

Untuk menghasilkan torsi mula (dan torsi penggerak berturut-turut) perlu arus yang mengalir dalam kumparan rotor. Mula-mula ggl induksi E_2 mengakibatkan arus rotor I_2 mengalir melalui rangkaian hubung-singkat, menghasilkan distribusi *ampere-conductor* yang berkerja dengan medan fluks untuk menghasilkan torsi mula. Pengaruh torsi ini selalu mengakibatkan rotor berputar dalam arah yang sama sebagaimana medan putar. Anggaplah bahwa medan fluks putar searah jarum jam pada kecepatan tertentu yang bergantung pada frkuensi stator dan banyaknya kutub dari kumparan stator. Kecepatan ini disebut "kecepatan sinkron" dan dinyatakan :

$$n_s = \frac{120f}{p} \text{ rpm} \dots\dots\dots (2.4)$$

karena rotor meningkat kecepatannya, laju yang mengijinkan medan stator memotong kumparan rotor menurun. Hal ini mengurangi ggl induksi resultan per fasa, pada gilirannya menurun magnitudo distribusi *amper-conductor* dan menghasilkan torsi yang lebih kecil. Pada kenyataan proses ini berlanjut hingga kecepatan rotor mampu untuk menghasilkan ggl yang cukup agar arus yang diperlukan untuk membangkitkan torsi yang setara dengan torsi lawan.

2.4.1. Slip dan Frekuensi Arus Rotor

Slip diidentifikasi sebagai bagian Dari kecepatan sinkron n_s dan kecepatan aktual rotor n_r . Slip dirumuskan sebagai berikut :

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \dots\dots\dots (2.5)$$

Pada keadaan diam medan magnet putar yang dihasilkan oleh stator mempunyai kecepatan relatif yang sama dengan kumparan rotor. Pada saat ini frekuensi dari arus rotor sama dengan frekuensi stator ($f_r = f_s$). Frekuensi rotor f_r adalah nol ketika motor berputar pada kecepatan sinkron. Pada saat tersebut tidak terdapat gerakan (putaran) relatif antara medan putar dan rotor. Pada kecepatan yang lain, frekuensi rotor proporsional dengan slip (s). Hubungan antara slip dan frekuensi dapat dilihat dari persamaan berikut ini^[2] :

$$n_s = \frac{120f_s}{p} \text{ atau } f_s = \frac{pn_s}{120} \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana : p = jumlah kutub

f_s = frekuensi stator

Pada rotor berlaku hubungan :

$$f_r = \frac{(n_s - n_r)p}{120} = \frac{(n_s - n_r)n_s p}{n_s 120} \dots\dots\dots (2.8)$$

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \text{ dan } f_s = \frac{pn_s}{120}$$

Maka :

$$f_r = s.f_s \dots\dots\dots (2.9)$$

2.5. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

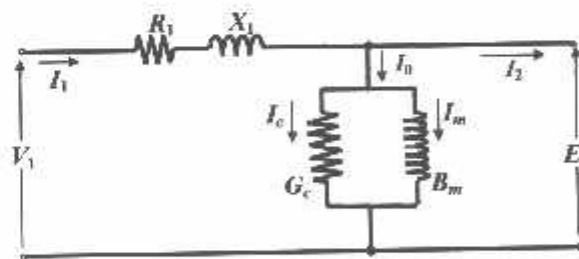
2.5.1. Rangkaian Ekuivalen

Suatu rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa diperlukan untuk membantu analisis operasi dan untuk memudahkan penghitungan kinerja. Rangkaian ekuivalen tersebut mengasumsikan suatu bentuk yang identik rangkaian ekuivalen transformator. Proses penurunannya serupa dengan model dengan modifikasi-modifikasi baru seperlunya untuk menghitung kumparan sekunder (rotor) dalam hal ini berputar dan menghasilkan daya mekanik.

2.5.2. Rangkaian Ekuivalen Stator

Apabila kumparan stator diberikan tegangan catu dari jala-jala sebesar V_L , maka akan mengalir arus putar tiga fasa pada kumparan stator yang membangkitkan medan magnet tiga fasa. Arus stator (I_1) bercabang menjadi dua komponen arus yaitu :

1. Komponen arus beban (I_2)
2. Komponen arus eksitasi (I_0)



Gambar 2-5 : Rangkaian Ekuivalen Stator

Sumber : A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery", McGraw-Hill International, fourth edition.

Dimana :

V_1 – tegangan terminal per-fasa

R_1 = resistansi kumparan stator per-fasa

X_1 = reaktansi bocor kumparan stator per-fasa

E_1 = tegangan induksi (ggl) per-fasa di dalam kumparan stator

G_c = konduktansi rugi-rugi inti stator per-fasa

B_m = suseptansi magnetisasi stator per-fasa

2.5.3. Rangkaian Ekuivalen Rotor

Pada saat rotor diam, medan putar stator akan memotong batang konduktor rotor dengan kecepatan putar sinkron (n_s), sehingga frekuensi arus rotor sama dengan frekuensi arus stator ($f_s = f_r$) dan slip sama dengan satu ($s=1$). Dengan mengetahui bahwa frekuensi arus / tegangan rotor adalah frekuensi slip, maka reaktansi bocor rotor (*leakage reactance*) per fasa adalah :

$$X_2' = sX_2 \dots\dots\dots (2.10)$$

$$X_2 = 2\pi f_s L_2 \dots\dots\dots (2.11)$$

dimana X_2 merupakan reaktansi rotor pada start atau diam.

Tegangan induksi pada rotor :

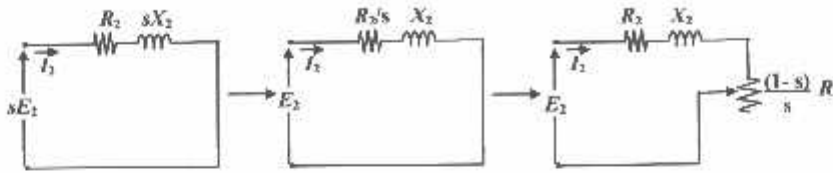
$$E_2 = 4,44f_2 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.12)$$

Pada slip, s , frekuensi rotor menjadi $s f_s$, maka tegangan induksi pada rotor (E_2') pada slip, s , adalah :

$$E_2' = 4,44sf_1 N_2 \Phi_m \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.12) ke (2.13) maka didapat persamaan :

$$E_2' = s E_2 \dots \dots \dots (2.14)$$



Gambar 2-6: Rangkaian Ekuivalen Rotor

Sumber : A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery", McGraw-Hill International, fourth edition.

Dimana :

S = Slip

E₂ = tegangan induksi per-fasa di dalam rotor pada keadaan diam

R₂' = resistansi kumparan rotor per-fasa berpatokan pada stator

X₂' = reaktansi bocor rotor per-fasa berpatokan pada stator

Berdasarkan persamaan (2.10) dan (2.14) maka diperoleh rangkaian ekuivalen rotor seperti pada gambar 2-6.

Besar arus rotor (I₂) saat berputar adalah :

$$I_2 = \frac{sE_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \dots \dots \dots (2.15)$$

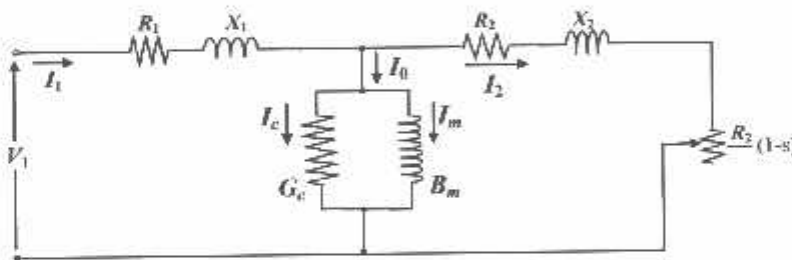
Atau

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_2^2}} \dots \dots \dots (2.16)$$

2.5.4. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Kerja motor induksi seperti juga kerja pada transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu motor induksi dipandang sebagai transformator yang mempunyai ciri-ciri khusus, yaitu :

1. Stator sebagai sisi primer
2. Rotor sebagai sisi sekunder yang penghantar-penghantarnya dihubungkan singkat dan berputar
3. Kopling antara sisi primer dan sisi sekunder dipisahkan oleh celah udara (*air gap*).



Gambar 2-7 : Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Sumber : A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery", McGraw-Hill International, fourth edition.

Rangkaian tersebut memperlihatkan bahwa daya keseluruhan yang dialihkan pada celah udara dari stator (masukan daya ke rotor) adalah :

$$P_2 = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} \dots\dots\dots (2.17)$$

Dengan rugi tembaga rotor :

$$P_{cu2} = 3I_2^2 R_2 \dots\dots\dots (2.18)$$

Maka daya mekanis yang dibangkitkan oleh motor induksi adalah :

$$P_m = P_2 - P_{\text{cu2}} = 3I_2^2 \frac{R_2}{s} - 3I_2^2 R_2 = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$P_m = T \cdot \omega_r = T \cdot \omega_s(1-s) \dots\dots\dots (2.20)$$

dimana :

T = Torsi motor dalam N-m

ω_r = kecepatan rotor dalam rad/det

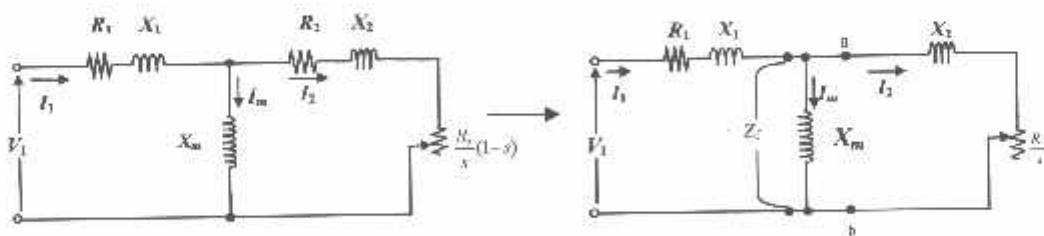
ω_s = kecepatan sinkron stator dalam rad/det

sehingga diperoleh :

$$T = \frac{3}{\omega_s} I_2^2 \frac{R_2}{s} \text{ Nm} \dots\dots\dots (2.21)$$

$$I_2 = \frac{V_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}} \dots\dots\dots (2.22)$$

Dalam analisis rangkaian ekuivalen, sering disederhanakan dengan menghilangkan konduktansi (R_c), sehingga rangkaian ekuivalen pada gambar (2.7) berubah menjadi :

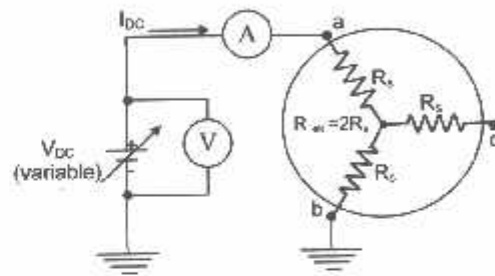


Gambar 2-8 : Penyederhanaan Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi
 Sumber : A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery", McGraw-Hill International, fourth edition.

2.6. Pengujian Motor Induksi Tiga Phasa

2.6.1. Pengujian Arus Searah (*DC Test*)

Tujuan dari pengujian arus searah (*DC Test*) adalah untuk menentukan nilai resistansi stator. Diagram pengukuran ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2-9 : Pengujian Arus Searah (*DC Test*)
 Sumber : Electric Drive, An Integrative Systems Approach, EE 430.

Kumparan stator terhubung bintang (Y) dan bila sumber DC disuplai melalui dua kumparan (kumparan a dan b), dengan kumparan ke tiga (kumparan c) dalam keadaan terbuka (*open circuit*), maka nilai dari resistansi ekuivalen (R_{ck}):

$$R_{ck} = 2R_s \quad \Omega \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

untuk nilai resistansi kumparan a dan b :

$$R_{ab} = R_{ck} = \frac{V_{DC}}{I_{DC}} \quad \Omega \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

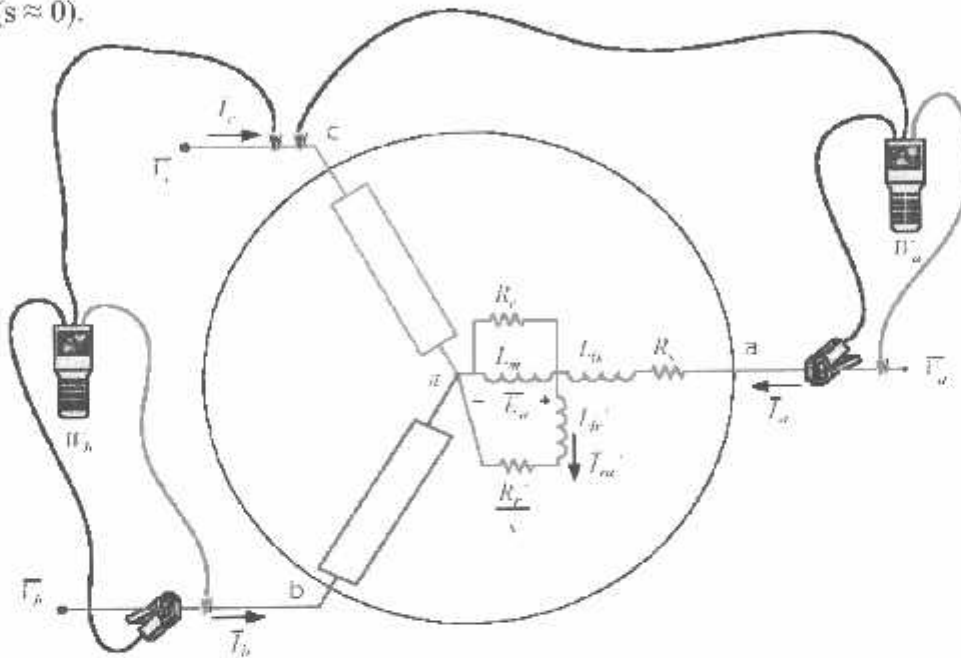
Dan nilai resistansi stator per phasa, R_s :

$$R_s = \frac{R_{ck}}{2} \quad \Omega/\text{phasa} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Dalam pengujian arus searah dijaga agar arus DC (I_{DC}) tidak melampaui nilai dari arus nominal motor induksi.

2.6.2. Pengujian Tanpa Beban (No-Load Test)

Pengujian Tanpa Beban (*No-Load Test*) bertujuan untuk menentukan nilai resistansi rugi-rugi inti (R_c) dan reaktansi pemagnetan (X_m). Pada pengujian ini motor induksi disuplai pada tegangan dan frekuensi nominalnya, serta rotor berputar tanpa terhubung dengan peralatan beban dimana harga slip mendekati nol ($s \approx 0$).



Gambar 2-10 : Diagram Pengujian Tanpa Beban
 Sumber : Electric Drive, An Integrative Systems Approach, EE 430.

$P_{3-\phi}$,daya total yang terukur dari W_a dan W_b :

$$P_{3-\phi} = W_a + W_b \quad \text{watt} \dots\dots\dots (2.26)$$

P_{nt} , daya per fasa : $P_{nt} = \frac{P_{3-\phi}}{3}$ watt/fasa $\dots\dots\dots (2.27)$

Dengan asumsi bahwa tegangan antar fasa stator seimbang, maka tegangan fasa stator :

$$V_{nt} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \text{ Volt/fasa} \dots\dots\dots (2.28)$$

I_{nl} , arus phasa stator :

$$I_{nl} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \text{ Ampere} \dots \dots \dots (2.29)$$

θ_{nl} , Sudut phasa dimana I_{nl} lagging terhadap V_{nl} :

$$\theta_{nl} = \cos^{-1} \left(\frac{P_{nl}}{V_{nl} I_{nl}} \right) \dots \dots \dots (2.30)$$

dari gambar 2-11 dan dengan menerapkan hukum kirchhoff tegangan (KVL) maka tegangan terinduksi, E_a adalah :

$$E_a = V_{nl} \angle 0^\circ - (I_{nl} \angle -\theta_{nl}) (R_s + jX_s) \text{ volt/phase} \dots \dots \dots (2.31)$$

I_{ra} , arus rotor per phasa :

$$I_{ra} = \frac{E_a}{\left(\frac{R_r'}{s_{nl}} \right) + jX_r'} \dots \dots \dots (2.32)$$

$$\text{dimana : } s_{nl} = \frac{n_s - n_{r,nl}}{n_s} \dots \dots \dots (2.33)$$

P_c , rugi-rugi inti per phasa :

$$P_c = P_{nl} - (I_{nl})^2 R_s - (I_{ra}')^2 \frac{R_r'}{s_{nl}} \dots \dots \dots (2.34)$$

R_c , resistansi rugi-rugi inti :

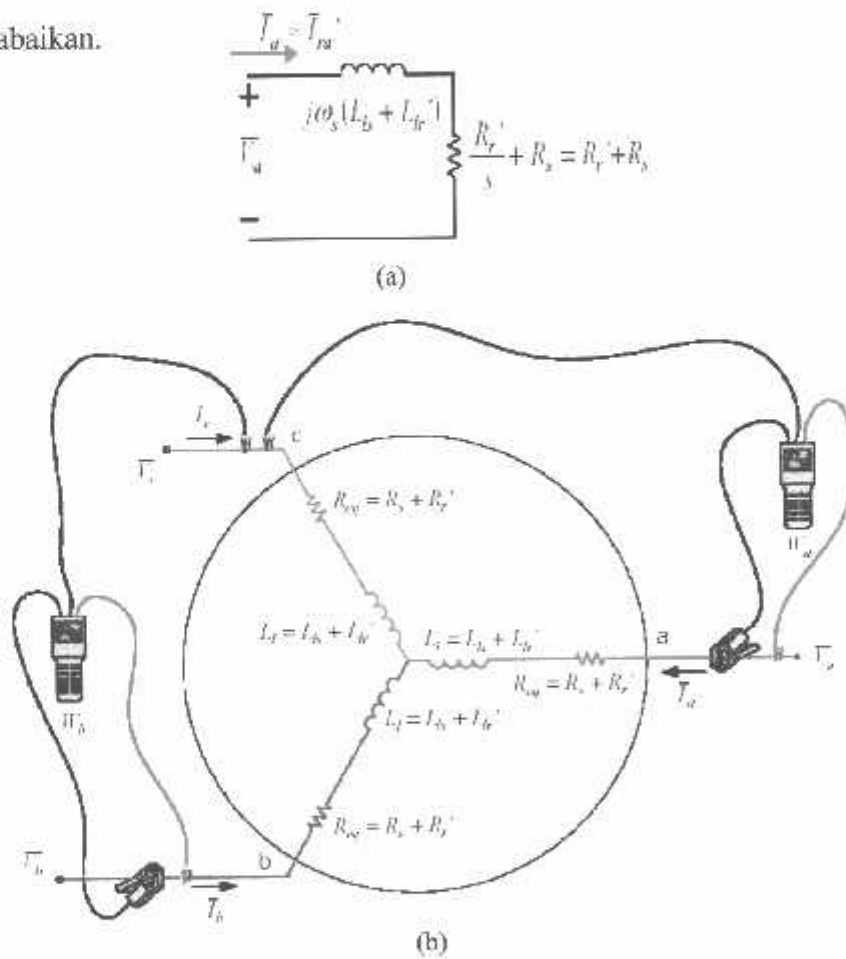
$$R_c = \frac{E_a^2}{P_c} \text{ ohm/phase} \dots \dots \dots (2.35)$$

$$Q_m, \text{ daya reaktif : } Q_m = V_{nl} I_{nl} \sin(\theta_{nl}) - (I_{nl})^2 X_s - (I_{ra}')^2 X_r' \text{ VAR} \dots \dots \dots (2.36)$$

$$X_m, \text{ reaktansi pemagnetan : } X_m = \frac{E_a^2}{Q_m} \text{ ohm/phase} \dots \dots \dots (2.37)$$

2.6.3. Pengujian Rotor Tertahan (*Blocked Rotor Test*)

Tujuan pengujian rotor tertahan adalah untuk menentukan resistansi rotor pada motor induksi. Pada saat pengujian ini perputaran rotor motor induksi dikunci / diblok sehingga slip(s) sama dengan satu. Suplai tegangan tiga fasa motor induksi adalah tegangan yang nilainya di bawah tegangan nominalnya, yakni tegangan yang dapat menghasilkan arus nominalnya. Sebagai pendekatan, diasumsikan bahwa arus pemagnetan (I_m) cukup kecil akibat penurunan suplai tegangan serta motor dalam keadaan tidak berputar ($s=1$) sehingga rugi-rugi inti dapat diabaikan.



**Gambar 2-11 : (a) Ragkaian Ekuivalen Pengujian Rotor Tertahan
(b) Rangkaian Pengujian Rotor Tertahan**

Sumber : Electric Drive, An Integrative Systems Approach, EE 430.

$P_{3\phi}$, daya total yang terukur dari W_a dan W_b :

$$P_{3\phi} = W_a + W_b \quad \text{watt} \dots \dots \dots (2.38)$$

Daya total tiga-fasa merupakan rugi-rugi tembaga stator dan rotor, karena motor tidak berputar maka rugi-rugi inti diabaikan.

P_{br} , rugi-rugi daya per fasa :

$$P_{br} = \frac{P_{3\phi}}{3} \quad \text{watt/fasa} \dots \dots \dots (2.39)$$

Dengan asumsi bahwa tegangan antar fasa stator seimbang, maka tegangan fasa stator :

$$V_{br} = \frac{V_{ab}}{\sqrt{3}} \quad \text{Volt/fasa} \dots \dots \dots (2.40)$$

I_{br} , arus fasa stator :

$$I_{br} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad \text{Ampere} \dots \dots \dots (2.41)$$

R_{ek} , resistansi ekivalen :

$$R_{ek} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2} \quad \text{ohm/fasa} \dots \dots \dots (2.42)$$

Untuk R_r , resistansi rotor berpatokan pada stator :

$$R_r = R_{ek} - R_s \quad \text{ohm/fasa} \dots \dots \dots (2.43)$$

Z_{br} , Impedansi rotor tertahan :

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}} \quad \text{ohm/fasa} \dots \dots \dots (2.44)$$

X_{ek} , reaktansi ekivalen :

$$X_{ek} = \sqrt{(Z_{br}^2 - R_{ek}^2)} \quad \text{ohm/fasa} \dots \dots \dots (2.45)$$

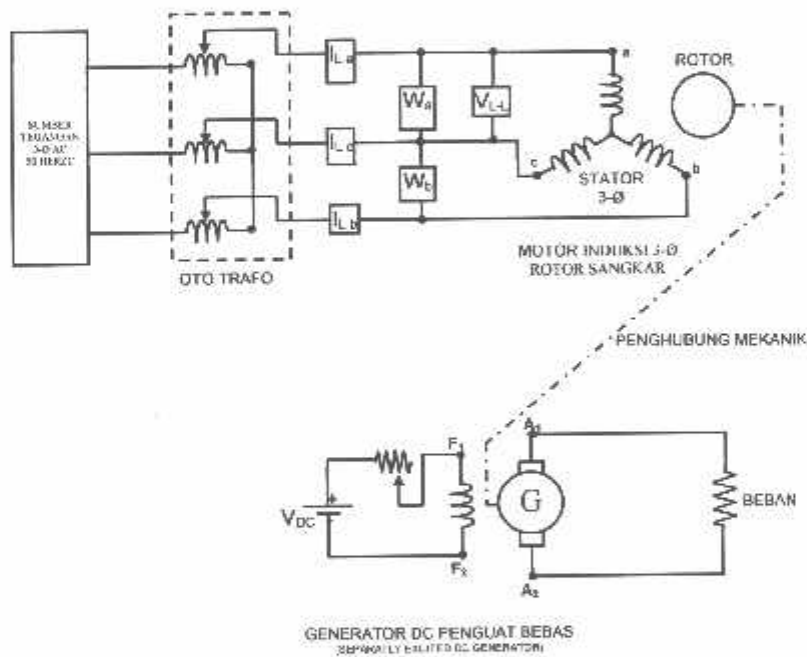
Dimana :

Motor induksi yang dipakai adalah motor induksi dengan rotor sangkar tunggal. Secara umum X_s dan X_r' diasumsikan sama^[5], sehingga ;

$$X_s = X_r' = 0.5 X_{ek} \text{ ohm/phase}$$

2.6.4. Pengujian Berbeban (*Load Test*)

Tujuan dari pengujian berbeban adalah untuk mengetahui daya masukan (P_{in}), Tegangan (V_l), Arus (I_l), Kecepatan rotor (rpm), Torsi (Nm) dari motor induksi pada kondisi-kondisi di bawah pembebanan (*under load*).



Gambar 2-12 : Diagram Pengujian Berbeban

Sumber : Laboratory #8, "Electric Machinery", Electrical Engineering Department, University of Alaska Fairbanks, EE 303.

2.7. Pengaturan Kecepatan

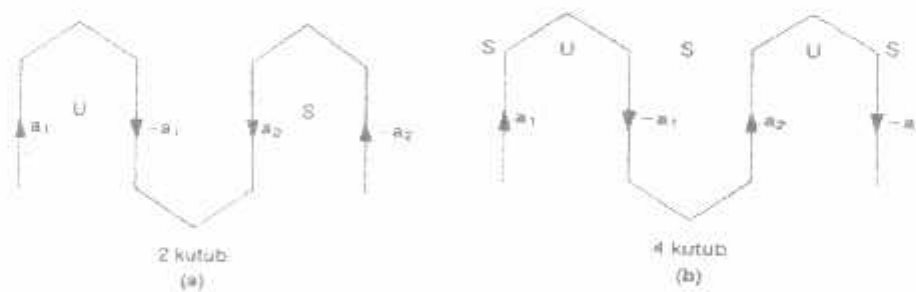
Motor induksi pada umumnya berputar dengan kecepatan konstan, mendekati kecepatan sinkronnya. Meskipun demikian pada penggunaan tertentu dikehendaki juga adanya pengaturan putaran. Pengaturan putaran motor induksi memerlukan biaya yang agak tinggi.

Biasanya pengaturan ini dapat dilakukan dengan beberapa cara:

1. Mengubah jumlah kutub motor

Karena $n_s = \frac{120f}{p}$, perubahan jumlah kutub (p) atau frekuensi akan

mempengaruhi putaran. Jumlah kutub dapat diubah dengan merencanakan kumparan stator sedemikian rupa sehingga dapat menerima tegangan masuk pada posisi kumparan yang berbeda-beda. Biasanya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub dari 2 menjadi 4, seperti pada gambar 2-13 berikut



Gambar 2-13 : Pengaturan Kecepatan Dengan Merubah Jumlah Kutub

Sumber : Zubal, "Dasar Teknik Tenaga Listrik", Penerbit ITB Bandung

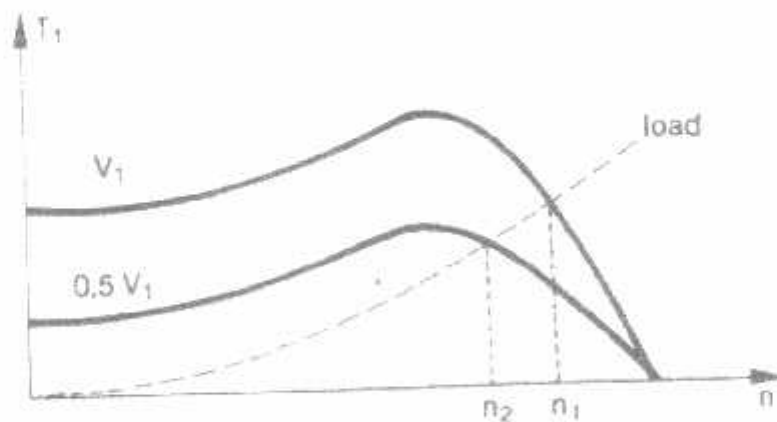
2. Mengubah Frekuensi Jala-jala

Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah-ubah harga frekuensi jala-jala. Hanya saja untuk menjaga kesetimbangan kerapatan fluks, perubahan tegangan harus dilakukan bersamaan dengan perubahan frekuensi. Persoalannya sekarang adalah bagaimana mengatur frekuensi secara efektif dan ekonomis

3. Mengatur Tegangan Jala-jala

$$T = \frac{3}{\omega} (V_1)^2 \frac{S a^2 R_2}{(a^2 R)^2 + S^2 (a^2 X_2)^2}$$

Dari persamaan kopel motor induksi diketahui bahwa kopel sebanding dengan pangkat dua tegangan yang diberikan. Untuk karakteristik beban seperti terlihat pada gambar 2-14 berikut



Gambar 2-14 : Karakteristik Beban Pada Pengaturan Kecepatan Dengan Mengatur Tegangan Jala – Jala

Sumber : Zuhul, "Dasar Teknik Tenaga Listrik", Penerbit ITB Bandung

BAB III

METODE FUZZY LOGIC

3.1 Umum

Dalam bab ini akan dibahas mengenai konsep dasar logika fuzzy, dan prinsip pengendaliannya pada sistem tenaga listrik, khususnya pada pengaturan kecepatan motor induksi. Sistem tenaga listrik merupakan sistem yang kompleks, dan sangat sulit untuk memodelkannya dalam suatu model matematis yang akurat, hal ini menyebabkan sistem tenaga listrik sangat cocok untuk diterapkan dengan menggunakan pengendali berbasis logika fuzzy.

Pada dasarnya orang mengenal obyek dengan memberikan kualifikasi secara kualitatif seperti besar, kecil, tinggi, rendah, agak cukup, sangat dan sebagainya yang kesemuanya itu dikatakan sebagai variabel linguistik. Variabel linguistik inilah yang digunakan dalam konsep himpunan fuzzy.

Suatu dalil dapat dikatakan benar dalam suatu kondisi dan juga bisa salah dalam kondisi lainnya. "Batu kapur berwarna putih" adalah suatu dalil, namun jika kita menemukan batu magnet yang berwarna hitam maka dalil "batu berwarna putih" adalah salah. Sebaliknya jika yang kita jumpai atau kita pegang batu berwarna putih maka dalil tersebut betul. Tetapi bagaimana bila kita menjumpai batu sungai yang berwarna kelabu, maka dalil tersebut tidak salah dan tidak benar. Hal inilah yang melahirkan konsep himpunan fuzzy (fuzzy set).

Konsep himpunan fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh prof. Lotfi A Zadeh dari California Universitas di Berkley dalam makalahnya "fuzzy set" pada

tahun 1965. Teori dan aplikasinya terus dikembangkan oleh para ahli diantaranya adalah Ricard Tong yang mengembangkan teori tentang model dinamis suatu sistem pengaturan dengan fuzzy logic melalui penurunan persamaan waktu deskrit dan konsep kestabilan;serta MM Gupta dan T. Yamakawa yang mengajukan struktur multivariabel untuk menganalisa sistem pengaturan fuzzy.

Secara leksikal fuzzy berarti kabur atau tidak jelas. Fuzzy logic merupakan metodologi untuk menyatakan hukum operasional sistem dengan ungkapan bahasa bukan dengan persamaan matematis.

Logika Fuzzy Logic Controller (FLC) memiliki kelebihan yaitu variabel-variabel yang digunakan adalah variabel linguistik sehingga logika FLC ini mengizinkan adanya unsur ketidakpastian, seperti halnya terdapat pada cara berfikir manusia. Logika FLC ini mampu membuat model matematis untuk melakukan pendekatan terhadap ketidakpastian pada cara berfikirnya manusia sehingga hal yang diinginkan untuk dikerjakan oleh komputer yang menggunakan logika Boolean (ekstrim 0 atau 1) yang akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

3.1.1. Konsep Dasar Logika Fuzzy

Ketidakpastian merupakan dasar pemikiran dari logika fuzzy, dan bagaimana logika fuzzy mampu untuk mempresentasikan ketidakpastian yang ada pada suatu sistem merupakan tujuan digunakannya pengendali berbasis logika fuzzy.

Pada awalnya persamaan matematis dan teori probabilitas masih mampu menjawab tantangan terhadap sistem-sistem yang sederhana maupun yang

kompleks, namun dengan seiring meningkatnya kompleksitas sistem diiringi dengan kebutuhan akan akurasi sistem yang baik, menyebabkan adanya kesulitan dalam memodelkan kerja sistem dalam suatu model matematis dan fungsi alih yang diperlukan dalam sistem pengendalian konvensional. Dalam sistem pengendalian berbasis logika fuzzy tidak diperlukan adanya model matematis maupun fungsi alih tetapi didasarkan pada pengalaman kerja seorang operator dan pembelajaran sendiri dengan kecerdasan buatan / AI (Artificial Intelligence).

3.2 Himpunan Klasik (*crisp*)

Pada himpunan klasik logika yang digunakan adalah logika Boolean (Boolean Logic). Suatu pernyataan yang menggunakan logika boolean dinamakan *crisp* atau pernyataan non fuzzy.

Contoh dari pernyataan *crisp* yaitu :

- Jika kita menyatakan sekarang pasti turun hujan pernyataan tersebut dapat bernilai 0 atau 1. Pernyataan ini dinamakan *crisp*.

Harga kebenaran himpunan A dalam semesta pembicaraan X dapat dinyatakan dengan :

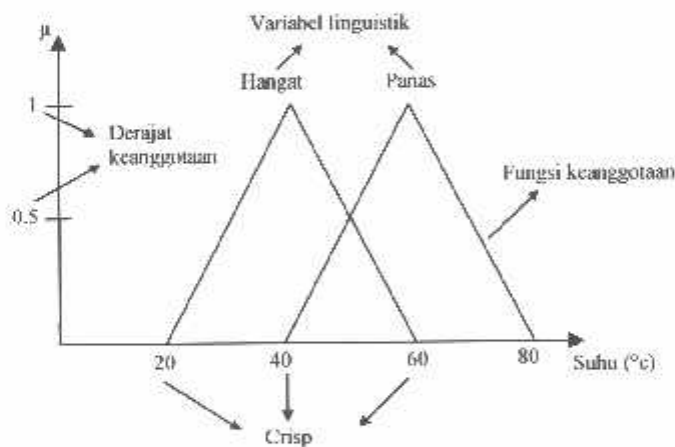
$$\mu_A(X) : \begin{cases} 1 & \text{jika } \in A \\ 0 & \text{jika } \notin A \end{cases} \dots\dots\dots(3.1)$$

dimana \in adalah bagian himpunan.

3.3. Himpunan Fuzzy

Dalam mengontrol sistem atau proses, seorang operator seringkali menggunakan besaran pengukuran yang dinyatakan dengan ungkapan cepat, lambat, cukup, agak dan sebagainya. Untuk mempresentasikan yang tidak eksak ini digunakan suatu pendekatan yaitu dengan himpunan fuzzy.

Pada fuzzy logic harga kebenaran diberikan oleh termonologi linguistik dengan menyatakan derajat kekaburannya (*fuzziness*). Fuzzy logic dikembangkan dari logika boolean atau logika klasik (*crisp*) dimana pada logika fuzzy terdapat level-level diantara 0 sampai dengan 1 atau antara salah dan benar. Agar lebih jelas gambar 3-1 memperlihatkan himpunan fuzzy beserta istilah-istilahnya



Gambar 3-1

Himpunan Fuzzy Dan Istilahnya

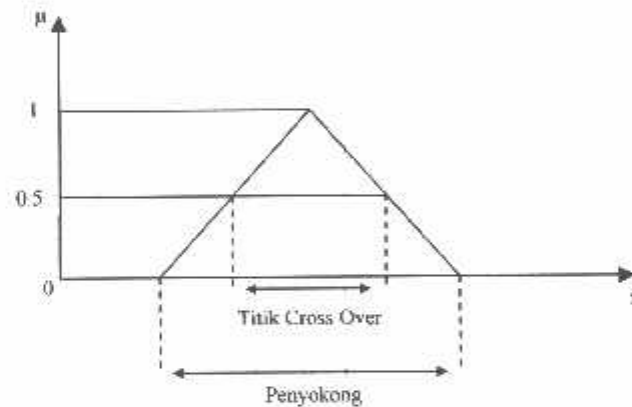
Jika X mempunyai elemen-elemen atau titik-titik yang terdiri dari x maka suatu elemen x dalam himpunan bagian fuzzy A mempunyai derajat keanggotaan $\mu_A(x)$. Jika $\mu_A(x) = 1$ maka x adalah himpunan bagian A , begitu pula sebaliknya

jika $\mu_A(x) = \mu$ dengan $0 < \mu < 1$ maka dikatakan anggota A mempunyai derajat keanggotaan μ . Dalam himpunan fuzzy A, x disebut sebagai penyokong (*support*) A.

Penyokong himpunan bagian fuzzy A adalah kumpulan semua titik mulai dari x_1, x_2, \dots, x_n yang mana $\mu_A(x) > 0$ atau dapat ditulis sebagai :

$$\text{Penyokong} = \{x \mid \mu_A(x) > 0\} \dots\dots\dots(3.2)$$

Jika $\mu_A(x) = 0.5$ dikatakan sebagai titik cross over di A. Gambar 3-2 akan menjelaskan pernyataan tersebut.



Gambar 3-2

Himpunan Fuzzy Dan Penyokongnya

Sumber : J. S. R. Jang, C. T. Sun & E Mizutami, NEURO FUZZY AND SOFT COMPUTING. A COMPUTATIONAL APPROUCH TO LEARNING AND MACHINE INTELEGENCE

Matlab Curriculum Series, Prentice Hall International Inc, 1997, hal 19

Himpunan fuzzy beserta unsur-unsur penyokongnya dapat dinyatakan sebagai berikut :

- $A = \{ \mu_A(x_i), i = 1, 2, 3, \dots, n \text{ dan } x \in X = \text{semesta pembicaraan} \}$ atau dapat pula dinyatakan dalam

- $A = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \dots + \mu_n/x_n$, dimana tanda + menyatakan gabungan

$$= \sum_{i=1}^n \mu_i/x_i$$

$$= \prod_{i=1}^n \mu_i/x_i \dots\dots\dots(3.3)$$

Contoh sederhana agar lebih memahami pernyataan-pernyataan tersebut yaitu :

- Jika $X = \{ \text{lalapan, roti isi, rujak, tahu campur} \}$ adalah himpunan makanan yang harus dipilih untuk dijadikan sarapan dipagi hari.
- Himpunan fuzzy $C = \text{Sarapan yang diinginkan untuk dimakan pada pagi hari.}$

$$C = \{ (\text{lalapan, 0.2}), (\text{rujak, 0.4}), (\text{Roti isi, 0.8}), (\text{Tahu campur, 0.6}) \}$$

Atau

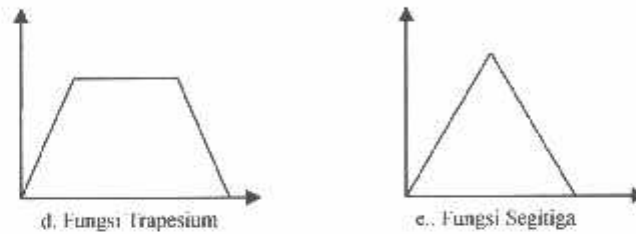
$$C = \text{Lalapan} | 0.2 + \text{Rujak} | 0.4 + \text{Roti isi} | 0.8 + \text{Tahu campur} | 0.6$$

Derajat keanggotaan yang terbesar mempunyai bobot lebih besar untuk menjadi anggota himpunan fuzzy tersebut. Dalam hal ini roti isi lebih diminati untuk dijadikan menu sarapan pagi daripada jenis makanan lainnya yang kurang diminati sebagai menu sarapan pagi.

3.4. Fungsi Keanggotaan Himpunan Fuzzy

Untuk menyatakan tiap keanggotaan dari tiap penyokong dalam himpunan fuzzy digunakan fungsi keanggotaan (membership function). Fungsi keanggotaan ini mengkarakteristikan tiap penyokong dari himpunan fuzzy sedemikian rupa sehingga setiap penyokong mempunyai nilai keanggotaan dalam interval $[0 : 1]$.

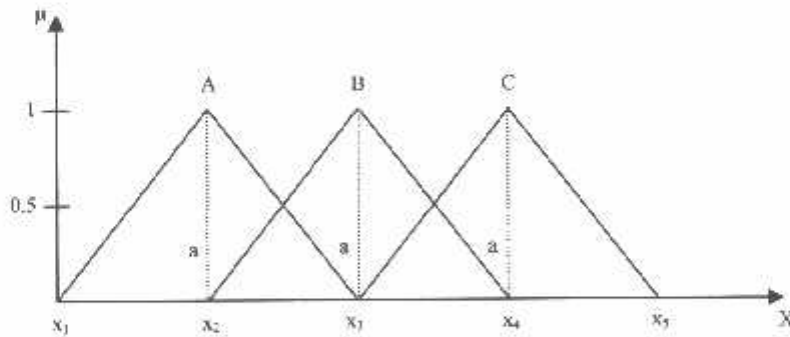
Fungsi keanggotaan dapat berbentuk fungsi segitiga, fungsi eksponen, trapesium, fungsi S atau fungsi Z. Gambar 3-3 memperlihatkan fungsi-fungsi yang dimaksud. Disini dipilih pendekatan dengan fungsi segi tiga karena mempunyai perhitungan yang lebih cepat.



Gambar 3-3

Bentuk – Bentuk Fungsi Keanggotaan

Sumber : Ir. Rusdianto Effendie Abdul Kadier, MT, PERANCANGAN KONTROLLER LOGIKA FUZZY SWA-ATUR TAK LANGSUNG UNTUK MENGATUR KECEPATAN MOTOR DC, Thesis Magister Elektro ITB, 1995, hal 15



Gambara 3-4

Fungsi Keanggotaan Segitiga

Derajat keanggotaan himpunan A adalah :

$$\mu_A(x) = 0 \quad \forall x \leq x_1 \text{ atau } x \geq x_2$$

$$\begin{aligned}\mu_A(x) &= (x-x_1)/x_2 & \forall x_1 \leq x \leq x_2 \\ &= (x_3-x)/x_2 & \forall x_2 \leq x \leq x_3 \dots\dots\dots(3.4)\end{aligned}$$

dimana \forall = "didefinisikan dengan" atau "dimana".

Derajat keanggotaan masing-masing himpunan bagian fuzzy dapat pula ditentukan dengan rumus :

$$\mu_r(x) = 1 - \sqrt{\frac{(x-a)^2}{b}} \dots\dots\dots(3.5)$$

dimana b adalah titik tengah semua himpunan bagian fuzzy. Karena yang digunakan adalah fungsi segitiga simetris (seragam) maka nilai b adalah sama untuk semua himpunan. Dalam hal ini $b = (x_3 - x_1)/2$ untuk himpunan A, $(x_4 - x_2)/2$ untuk himpunan B dan $(x_5 - x_3)/2$ untuk himpunan C. Sedangkan a adalah titik tengah masing-masing himpunan bagian fuzzy, yaitu untuk himpunan A: $a = x_2$ untuk himpunan B: $a = x_3$ dan untuk himpunan C: $a = x_4$.

Pada umumnya fungsi keanggotaan yang digunakan didefinisikan dengan dua cara yaitu :

- 1) Pendefinisian secara numerik, digunakan untuk mendefinisikan fungsi keanggotaan pada himpunan fuzzy dengan bilangan.
- 2) Pendefinisian secara fungsional digunakan untuk mendefinisikan fungsi keanggotaan pada himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan.

3.4.1. Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi himpunan A dan B dari semesta pembicaraan (universe of discourse) X dengan fungsi keanggotaan masing-masing μ_A dan μ_B adalah :

- a. A adalah komplemen B

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_B(x)$$

- b. Gabungan (union) A dengan B atau ($A \cup B$)

$$\begin{aligned} \mu_{A \cup B}(x) &= M_{LX}[\mu_A, \mu_B](x) \\ &= v[\mu_A, \mu_B] \end{aligned}$$

- c. Irisan (Intersection) A dengan B atau ($A \cap B$)

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \text{Min}[\mu_A, \mu_B] \\ &= \wedge[\mu_A, \mu_B] \end{aligned}$$

3.5. Variabel Linguistik

Sistem kontrol dengan pendekatan fuzzy logic merupakan sistem pengaturan yang menirukan cara kerja manusia dalam melakukan proses pengambilan keputusan melalui ungkapan-ungkapan kualitatif yang diindranya sebagai contoh, seorang oprator yang mengatur suatu proses secara manual akan menggunakan ungkapan-ungkapan seperti sangat besar, sedang, mendekati maksimum, sekitar set poin dan sebagainya.

Dalam sistem kontrol variabel linguistik dapat dinyatakan dengan ungkapan linguistik NB (Negatif Besar), NS (Negatif Sedang), NK (Negatif Kecil), SN (Sekitar Nol), PK (Positif Kecil), PS (Positif Sedang), dan PB (Positif Besar) untuk variabel masukan dan keluaran.

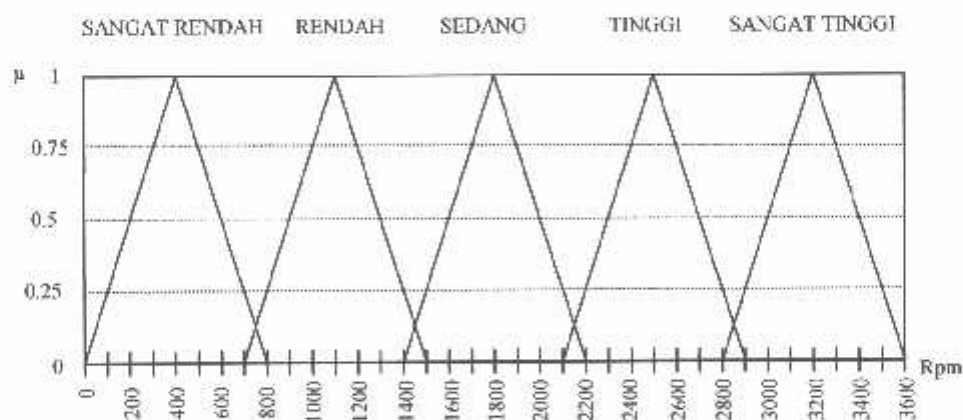
Secara sederhana variabel linguistik dapat dinyatakan dengan pasangan $(\mu, T(\mu, X))$. μ menyatakan nama variabel dan $T(\mu)$ adalah istilah yang menyatakan seperangkat nama dari besaran linguistik untuk himpunan bagian fuzzy pada semesta pembicaraan X . Sebagai contoh variabel kecepatan dipakai sebagai variabel linguistik, maka seperangkat istilah $T(\text{kecepatan})$ pada semesta pembicaraan X (kecepatan putaran generator) dapat dituliskan :

- $T(\text{kecepatan}) = \{ \text{sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, sangat tinggi} \}$

Jika jelajah dari semesta pembicaraan X dimisalkan dengan nilai $[0:3600]$ rpm maka berlaku ketentuan seperti :

Kecepatan putaran sangat rendah $[0:800]$, rendah $[700:1500]$, sedang $\{1400:2200\}$, tinggi $[2100:2900]$, dan sangat tinggi $[2800:3600]$.

Derajat keanggotaan dan fungsi keanggotaan untuk data diatas dapat digambarkan dalam gambar 3-5



Gambar 3-5

Himpunan Fuzzy Untuk Kecepatan

Perhitungan derajat keanggotaan dapat dicari sebagai berikut (untuk fungsi segitiga) :

- $\mu_{(0)} = (0-0)/400 = 0$ (untuk himpunan rendah)
- $\mu_{(720)} = (800-720)/400 = 0.2$ (untuk himpunan sangat rendah)
 $= (720-700)/400 = 0.05$ (untuk himpunan rendah)

Atau dapat dinyatakan dengan

- $\mu_{(0)} = 1 - \sqrt{\frac{(0 - 400)^2}{400}} = 0$ (untuk himpunan rendah)
- $\mu_{(720)} = 1 - \sqrt{\frac{(720 - 400)^2}{400}} = 0.2$ (untuk himpunan sangat rendah) dan
- $\mu_{(720)} = 1 - \sqrt{\frac{(720 - 1100)^2}{400}} = 0.05$ (untuk himpunan rendah)

Tinjau himpunan sangat rendah dan rendah, untuk kecepatan 720 rpm mempunyai derajat keanggotaan masing-masing 0.2 dan 0.05 masing-masing pada himpunan sangat rendah dan himpunan rendah, sehingga mempunyai nilai kebenaran yang sama kuat untuk menjadi anggota himpunan sangat rendah dan himpunan rendah, dengan derajat keanggotaan = 0.05.

3.6. Kontroller Dengan Fuzzy Logic

Perancangan fuzzy logic controller menggabungkan aspek pendefinisian himpunan fuzzy dengan aspek fuzzy logic untuk memperoleh suatu sistem kontrol yang dapat beroperasi layaknya seorang operator ahli, sehingga dikenal dengan sistem pengaturan cerdas. Sistem pengaturan cerdas ini dapat dirancang berdasarkan empat pendekatan yaitu :

1. Pendekatan berdasarkan basis pengetahuan (knowledge Base) seorang operator ahli.

2. Pendekatan fuzzy logic dengan variabel linguistik.
3. Pendekatan dengan jaringan syaraf tiruan (artificial neural network).
4. Gabungan antara artificial neural network dan fuzzy logic yang dikenal sebagai Neuro fuzzy.

Kesemuanya ini dikenal sebagai pendekatan yang berorientasi manusia (human oriented). Disini hanya digunakan suatu sistem kontrol dengan pendekatan fuzzy logic. Fuzzy logic controller membuat keputusan dengan menggunakan aturan if-then (jika-maka) berdasarkan masukan dan keluaran.

“ jika $e = NB$ dan $\Delta e = PK$ maka $u = NS$ “

Dimana e = error output dengan variabel linguistik NB, Δe = perubahan error dengan variabel linguistik PK, dan u = sinyal atur dengan variabel linguistik NS.

Secara umum fuzzy logic controller mempunyai empat bagian pokok yang dipresentasikan dalam gambar 3-6.



GAMBAR 3-6

Bagian Pokok Fuzzy Logic Controller

- 3) Logika pengambilan keputusan, adalah inti dari fuzzy logic controller yang mempunyai kemampuan seperti manusia dalam mengambil keputusan dan kesimpulan.
- 4) Defuzzifikasi, berfungsi untuk mentransformasikan kesimpulan tentang aksi kontrol yang bersifat fuzzy menjadi sinyal yang bersifat crisp melalui operator defuzzier.

3.6.1. Fuzzifikasi

Dalam aplikasi suatu pengaturan, besaran masukan yang diperoleh dari sistem melalui sensor akan selalu berupa crisp yang bersifat pasti dan kualitatif. Pemetaan dari masukan crisp kedalam himpunan fuzzy yang memakai variabel linguistik dinamakan pengkaburan atau fuzzyfikasi (fuzzyfication).

Fuzzifikasi merupakan proses awal untuk mengubah masukan yang berupa non fuzzy menjadi himpunan fuzzy menjadi himpunan fuzzy sehingga dalam tahap ini, mula-mula dikembangkan fungsi keanggotaan dan derajat keanggotaan. Suatu masukan crisp mempunyai derajat keanggotaan dalam beberapa fungsi keanggotaan sekaligus dalam suatu saat. Hal ini dapat ditunjukkan dalam gambar 3-5. 720 rpm dimiliki oleh himpunan sangat rendah dengan $\mu = 0.2$ dan himpunan rendah dengan $\mu = 0.05$.

Fuzzifikasi dinyatakan oleh pernyataan $x = \text{Fuzzifier}$ dimana X adalah masukan crisp (non fuzzy), x adalah himpunan fuzzy yang disertai dengan derajat keanggotaan dan fuzzifier adalah operator fuzzifikasi. Sebagai contoh, fuzzifier

(720 rpm) = himpunan sangat rendah dengan derajat keanggotaan 0.2 dan fuzzifier (720 rpm) = himpunan rendah dengan derajat keanggotaan 0.05.

3.6.2. Basis Pengetahuan

Basis pengetahuan (knowledge base) dalam fuzzy logic controller adalah bagian yang berisi basis data dan basis aturan. Basis pengetahuan harus dipersiapkan terlebih dahulu sebelum proses yang lain dimulai, sehingga pada saat melakukan proses mekanisme inferensi basis pengetahuan langsung dapat dipergunakan.

3.6.2.1. Basis Data

Basis data mendefinisikan himpunan fuzzy atas himpunan input-output dalam bentuk variabel linguistik. Pembuatan basis data harus memperhatikan hal-hal sebagai berikut :

1) Kuantisasi.

Dalam aplikasi industri harga terukur adalah analog. Harga ini harus diubah menjadi harga digital dengan ADC (Analog to Digital Converter) agar dapat diproses oleh komputer. Selanjutnya oleh komponen elektronik dirangkaian controller (biasanya dengan IC khusus fuzzy logic yaitu AL 220 atau NLX 220) dilakukan proses kuantisasi yaitu pembagian semesta pembicaraan dalam segmen-segmen tertentu yang disebut dengan level kuantisasi. Prosedur ini biasanya dinyatakan dalam bentuk tabulasi penerapannya dalam bentuk look up table (tabel pandang).

Himpunan fuzzy untuk setiap variabel dinyatakan dengan ungkapan linguistik NB (Negatif Besar), NS (Negatif Sedang), NK (Negatif Kecil), SN (Sekitar Nol), PK (Positif Kecil), PS (Positif Sedang), dan PB (Positif Besar) atau ungkapan lainnya seperti tinggi, sedang, kecil, panas, hangat, dingin dan sebagainya. Tabel 3-1 menunjukkan contoh data kuantisasi dengan lima variabel linguistik dan gambar 3-8 merupakan himpunan fuzzy yang terkuantisasi.

Tabel 3-1

Data Kuantisasi Himpunan Fuzzy

RANGE SEGMENT	JANGKAUAN	a	b	HIMPUNAN FUZZY
$(-R, R)$	$(-R, -R/3)$	$-2R/3$	$R/3$	NS
$(-R, R)$	$(-2R/3, 0)$	$-R/3$	$R/3$	NK
$(-R, R)$	$(-R/3, -R/3)$	0	$R/3$	SN
$(-R, R)$	$(0, -2R/3)$	$R/3$	$R/3$	PK
$(-R, R)$	$(R/3, R)$	$2R/3$	$R/3$	PS

3.6.2.2 Basis Aturan

Basis aturan adalah bagian yang menggambarkan dinamika suatu sistem terhadap masukan yang dikarakteristikan oleh sekumpulan variabel-variabel linguistik dan berbasis pengetahuan seorang operator ahli. Pernyataan tersebut umumnya dinyatakan oleh suatu pernyataan bersyarat. Dalam pembentukan basis aturan perlu diperhatikan aspek :

1. Variabel masukan dan keluaran error (e) dan perubahan error (Δe) tetap menjadi acuan utama bagi aturan kontrol suatu sistem kontrol yang berbasis fuzzy logic ini sehingga akan menghasilkan aksi kontrol (u) yang sesuai.
2. Penurunan aturan kontrol fuzzy

Salah satu cara menurunkan aturan kontrol fuzzy adalah dengan mengumpulkan aturan-aturan kontrol fuzzy yang dibentuk dari analisa perilaku obyek atur. Aturan kontrol diturunkan dengan jalan mengkoreksi simpangan keluaran sistem menuju keadaan yang diinginkan.

Agar diperoleh kinerja sistem kontrol yang lebih baik digunakan tujuh variabel linguistik yaitu NB, NS, NK, SN, PK, PS dan PB yang masing-masing berarti negatif besar, negatif sedang, negatif kecil, sekitar nol, positif kecil, positif sedang, positif besar untuk variabel e , Δe dan u . Penyempurnaan aturan kontrol terus menerus dilakukan oleh para ahli. Mac Vicar Whelan yang meneliti masalah penyempurnaan basis aturan menemukan pola hubungan antara e , Δe dan u . Penurunan lengkap dari aturan kontrol ini ditunjukkan dalam tabel 3-2 yang

disebut sebagai tabel Mac Vicar Whelan. Hasil penyempurnaan ini sangat dianjurkan oleh operator ahli.

Tabel 3-2

Aturan Kontrol Fuzzy Macvicar-Whelan

		Δe						
		NB	NS	NK	SN	PK	PS	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	SN
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	SN	PK
	NK	NB	NB	NS	NK	SN	PK	PS
	SN	NB	NS	NK	SN	NK	PS	PB
	PK	NS	NK	SN	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	SN	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	SN	PK	PS	PB	PB	PB	PB

3.7. Logika Pengambilan Keputusan

Persoalan dari fuzzy logic controller terletak pada logika pengambilan keputusannya yang meniru pengambilan keputusan pada manusia. Untuk memahami proses pengambilankesimpulandalam fuzzy logic, hal-hal berikut ini harus diperhatikan.

3.7.1. Bentuk Aturan Kontrol Fuzzy

Seorang operator ahli yang berpengalaman akan menggunakan aturan kontrol yang berbentuk if-then. Untuk sistem dengan satu masukan-satu keluaran (Single Input Single Output = SISO) aturan kontrolnya adalah :

- Aturan ke-1: Jika A adalah x_1 maka B adalah y_1 .
-
-
- Aturan ke-n : Jika A adalah x_n maka B adalah y_n

Dimana A adalah variabel masukan dan B adalah variabel keluaran serta x dan y adalah variabel linguistiknya. Sedangkan untuk sistem banyak masukan satu keluaran (Multi Input Single Output) aturan kontrolnya adalah :

- Aturan ke-1 : Jika A adalah x_1 dan B adalah y_1 maka C adalah z_1
-
-
- Aturan ke-n : Jika A adalah x_n dan B adalah y_n maka C adalah z_n

Dimana A dan B adalah variabel masukan (misalnya e dan Δe), x dan y adalah himpunan fuzzy dengan variabel linguistik yaitu, NB, NS, NK, SN, PK, PS, PB, C adalah variabel keluaran, z adalah himpunan fuzzy untuk z yaitu, NB, NS, NK, SN, PK, PS, PB.

3.7.2. Fungsi Implikasi

Aturan kontrol pada dasarnya adalah relasi fuzzy yang dinyatakan sebagai suatu hubungan sebab akibat yang disebut sebagai implikasi fuzzy (fuzzy implication). Pada suatu sistem kontrol dengan logika fuzzy hubungan ini menyatakan suatu pemetaan antara variabel fuzzy melalui pernyataan kondisional yaitu :

- Jika A adalah x maka B adalah y atau $A \rightarrow B$ dimana $x \in X$ dan $y \in Y$
atau

$$\mu_R = \mu (A \rightarrow B) (x,y) \dots\dots\dots(3.5)$$

Tanda (\rightarrow) menyatakan fungsi implikasi yang menghubungkan suatu input (antecedent) dari himpunan A dengan output B (consequent). Implikasi linguistik ini dinamakan relasi fuzzy.

Persamaan (3.5) diatas digunakan untuk sistem satu input-satu output (SISO). Untuk sistem MISO berlaku :

- Jika A adalah X dan B adalah y maka C adalah z atau $A \times B \rightarrow C$ atau

$$\begin{aligned} \mu_R &= \mu (A \text{ dan } B \rightarrow C) (x,y,z) \text{ dimana } x \in X, y \in Y \text{ dan } z \in Z \\ &= [\mu_A (x) \text{ dan } \mu_B (y)] \rightarrow \mu_C (z) \dots\dots\dots(3.6) \end{aligned}$$

3.8. Mekanisme Inferensi

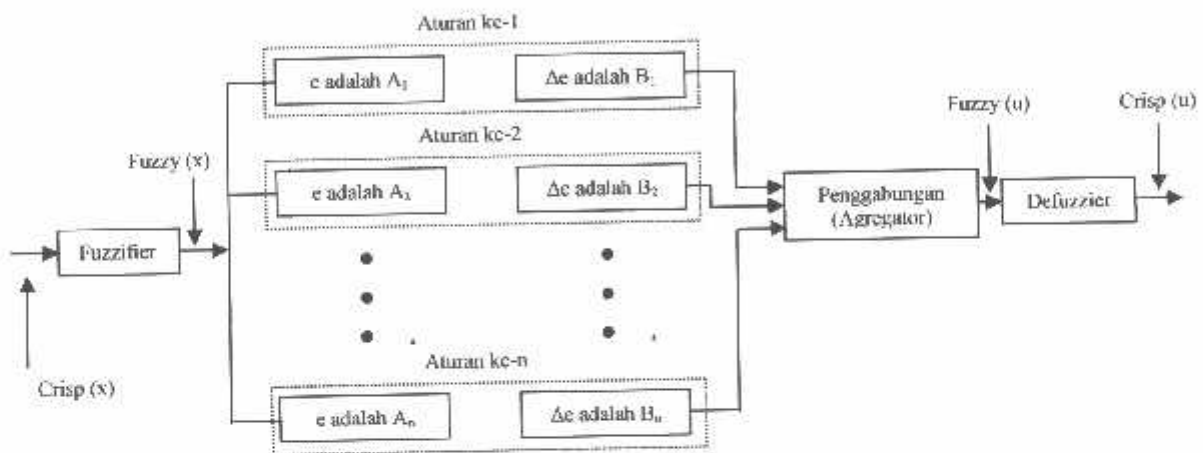
Untuk mengkombinasikan aturan-aturan kontrol yang digunakan kata hubung yang secara umum dinyatakan dengan :

- Rule 1 : Jika e adalah A_1 dan Δe adalah B_1 maka u adalah C_1
- Rule 2 : Jika e adalah A_2 dan Δe adalah B_2 maka u adalah C_2
-
-
- Rule n : Jika e adalah A_n dan Δe adalah B_n maka u adalah C_n
- Kesimpulan : u adalah C.

Maksud dari pernyataan diatas adalah variabel masukan e dan Δe masing-masing mempunyai linguistik A (A_1, \dots, A_n) dan B (B_1, \dots, B_n) dan variabel keluaran u mempunyai variabel linguistik C (C_1, \dots, C_n). Keseluruhan aturan

kontrol ini harus dapat menghasilkan satu keluaran berupa kesimpulan. Proses pengambilan kesimpulan ini dinyatakan sebagai mekanisme inferensi.

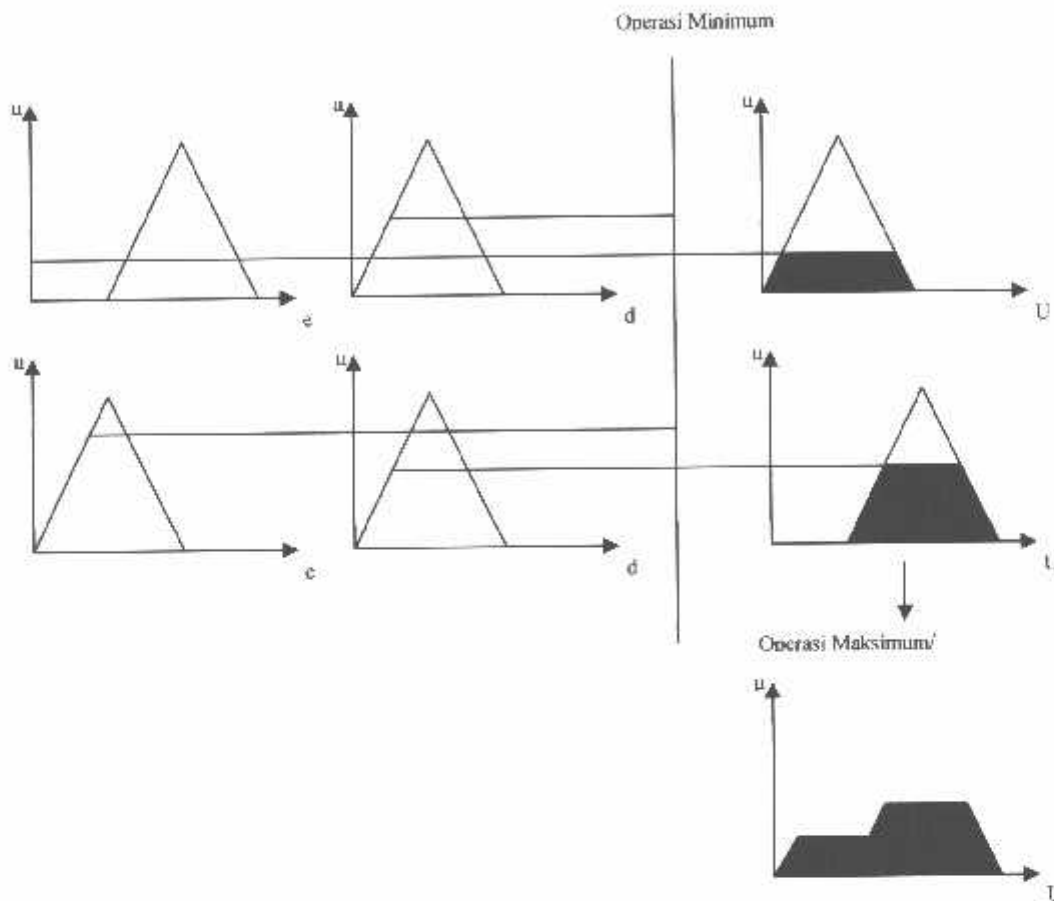
Dari uraian diatas, mekanisme inferensi yang terdiri dari beberapa aturan (rule) dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3-9

Blok Diagram Mekanisme Inferensi

Metode inferensi yang banyak digunakan adalah metode inferensi Mamdani, seorang pakar sistem kontrol dari Queen Mary Colledge di London yang mempunyai nama lengkap Ebrahim H. Mamdani. Metode inferensi Mamdani ini pertama kali dipakai untuk mengontrol kombinasi ketel dan mesin uap dengan menggunakan aturan kontrol dan variabel linguistik yang didapat dari operator yang berpengalaman. Metode inferensi untuk MISO dari Mamdani yang digunakan adalah metode maksimum-minimum (max-min method). Prinsip dasar operasi max-min terlihat dalam gambar 3-10.



Gambar 3-10

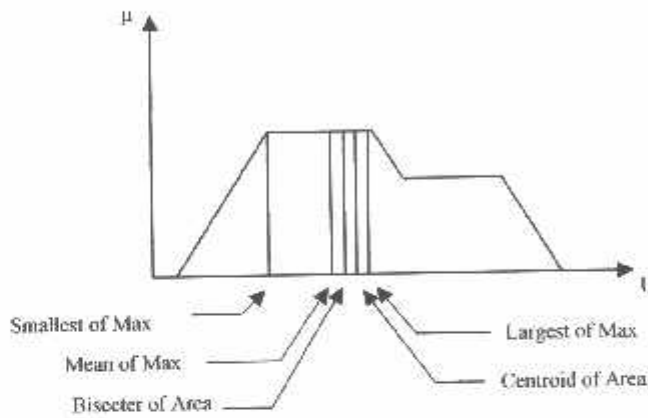
Mekanisme Inferensi MISO Dengan Operasi Max-Min

3.9. Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi merupakan kebalikan dari proses fuzzifikasi, yaitu mentransformasikan harga fuzzy ke harga bukan fuzzy (crisp) atau pemetaan dari ruang aksi kontrol fuzzy ke ruang aksi kontrol crisp. Secara garis besar strategi defuzzifikasi bertujuan menghasilkan aksi kontrol yang nyata yang dapat mempresentasikan aksi kontrol masing-masing basis aturan. Defuzzifikasi ini dinyatakan sebagai :

$$U = \text{Defuzzifier}(U) \dots\dots\dots(3.7)$$

Ada beberapa metode defuzzifikasi yang terdapat dalam literatur, yaitu centroid of area, mean of max membership, bisector of area, smallest of max dan largest of max. Gambar 3-11 mempresentasikan metode-metode defuzzifikasi yang dimaksud.



Gambar 3-11

Metode-Metode Defuzzifikasi

Dari lima metode defuzzifikasi tersebut, yang paling banyak digunakan adalah *centroid of area method* atau yang disebut juga sebagai *center of area* dan *center of gravity*. Metode ini didefinisikan sebagai nilai yang terletak dalam jangkauan variabel sinyal atur u dengan daerah yang terletak dibawah fungsi keanggotaan dibagi dua sub daerah yang sama.

Metode defuzzifikasi dengan centroid of area method mempunyai persamaan sederhana :

$$U = \frac{\sum U \cdot \mu}{\sum \mu} \text{ untuk SISO(3.8)}$$

Sedangkan untuk MISO berlaku :

$$U = \frac{\sum U_i \mu_i}{\sum \mu_i} \dots\dots\dots(3.9)$$

Diman :

$i = 1, \dots\dots\dots, 49$ menyatakan jumlah aturan kontrol MISO (7 x 7)

U_i , adalah titik pusat masing-masing himpunan variabel keluaran ke- i

μ_i , adalah variabel minimum untuk tiap variabel linguistik.

3.10. Kontroller Logika Fuzzy yang digunakan

A. Pengoperasian kontrol logika fuzzy

Dalam pengoperasian, kontroller jenis ini digunakan tiga buah variabel input dengan sebuah variabel output, dimana setiap variabel didefinisikan sebagai variabel fuzzy dengan himpunan terpisah. Jenis variabel yang digunakan adalah : error E sebagai variabel input yang pertama, merupakan selisih antara set-point R dengan output dari plant C ; delta error ΔE sebagai variabel input yang kedua, menyatakan kecepatan perubahan error, sigma error ΣE sebagai variabel input yang ketiga, menyatakan jumlah atau integral error dan U merupakan output dari kontroller.

Untuk mengimplementasikan kontroller fuzzy dalam bentuk pemrograman, lebih efisien jika bentuk integrasi yang menyatakan akumulasi error dihindari, atau dengan kata lain output kontroller semula dinyatakan sebagai U diganti menjadi perubahan U (ΔU), demikian pula pada variabel input dari kontroller berubah menjadi variabel tanpa unsur integrasi, yaitu E menyatakan error, ΔE menyatakan kecepatan perubahan error dan $\Delta^2 U$ menyatakan

percepatan erubahan error. Karena tiap-tiap variabel input/output tersebut menyatakan suatu variabel fuzzy, maka perlu didefinisikan pula himpunan fuzzy tersebut. Himpunan fuzzy tersebut adalah $\{E^i\}$, $\{\Delta E^j\}$, $\{\Delta^2 E^k\}$, $\{U^l\}$, dengan i, j, k, l masing-masing menyatakan dimensi yang didefinisikan pada semesta pembicaraan $E, \Delta E, \Delta^2 E$ dan U .

Dengan menggunakan himpunan fuzzy diatas, pernyataan dasar atau basis aturan dituliskan dalam bentuk :

$$R_r : \text{if } E \text{ is } E^r \text{ AND } de \text{ is } \Delta E^r \text{ AND } d^2e \text{ is } \Delta^2 E^r \text{ then } U^r \dots\dots\dots (3.10)$$

Dengan $r = 1, 2, 3, \dots, N$; $e \in E$; $de \in \Delta E$ dan $d^2e \in \Delta^2 E$.

Untuk N buah baris aturan, maka relasi tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk gabungan atau kombinasi relasi seperti berikut :

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_N = \bigcup_{r=1}^N (E^r \times \Delta E^r \times \Delta^2 E^r \times U^r) \dots\dots\dots (3.11)$$

Diasumsikan bahwa fungsi keanggotaan dari relasi R didapatkan melalui komposisi sub-t, yaitu :

$$\mu_R(e_i, de_j, d^2e_k, e_l) = \sup[\mu_{E^r}(e_i) \wedge \mu_{\Delta E^r}(de_j) \wedge \mu_{\Delta^2 E^r}(d^2e_k) \wedge \mu_{U^r}(U_l)] \dots\dots\dots (3.12)$$

untuk setiap $1 \leq r \leq N$

Dengan menggunakan aturan komposisi dari mekanisme inferensi maka, error, kecepatan error dan percepatan error sebagai input dari controller dapat ditransformasikan menjadi output controller u , yaitu :

$$U = (E \times \Delta^2 E \times \Delta^2 E) \cdot R \dots\dots\dots (3.13)$$

Dengan fungsi keanggotaan

$$\mu_U(U_R) = \vee [\mu_E(e_i) \wedge \mu_{\Delta E}(de_j) \wedge \mu_{\Delta^2 E}(d^2e_k) \wedge \mu_R(e_i, de_j, d^2e_k, e_l, \mu_U)] \dots\dots\dots (3.14)$$

untuk setiap $e \in E$; $de \in \Delta E$ dan $d^2e \in \Delta^2 E$

Selanjutnya, aksi kontrol atau output dari controller dapat ditentukan melalui defuzzifikasi dari hasil diatas yaitu dengan method defuzzifikasi MOM atau COA.

B. Kontrol secara verbal

Kontrol secara verbal atau berdasarkan pengetahuan operator ahli, biasanya dengan melihat nilai-nilai, perpotongan dari kurva output lingkaran terbuka dari plant dengan sinyal referensi urut step, yaitu pada titik-titik seperti pada gambar 3-19. Melalui cara ini, diharapkan bahwa aksi kontrol yang dihasilkan pada sistem lingkaran tertutup mempunyai respon dengan harga lewatan minimum dan waktu naik yang cepat. Sebagai contoh, dalam desain suatu controller type PI, dimisalkan output controller U tergantung hanya pada error E dan kecepatan error ΔE . Untuk tiap semesta didefinisikan tujuh himpunan bagian dengan ungkapan positif besar (PB), positif sedang(PS), positif kecil(PK), sekitar nol(SN), negatif kecil(NK), negatif sedang(NS), negatif besar(NB). Dengan melihat kurva respon dari plant dapatlah disusun suatu basis aturan dengan pemikiran sebagai berikut :

- Pada titik $a_1(1)$, $E = \text{"PB"}$ dan $\Delta E = \text{"SN"}$, maka diperlukan sinyal kontrol yang besar $U = \text{"PB"}$, agar respon dari lingkaran tertutupnya segera menuju set point
- Pada titik $b_1(2)$, $E = \text{"SN"}$ dan $\Delta E = \text{"NB"}$, maka agar lewatan yang terjadi minimum , diperlukan sinyal kontrol $u = \text{"NB"}$.
- Demikian seterusnya untuk titik maksimum, minimum dan titik potong yang lainnya, dapatlah diturunkan kaidah seperti diatas.

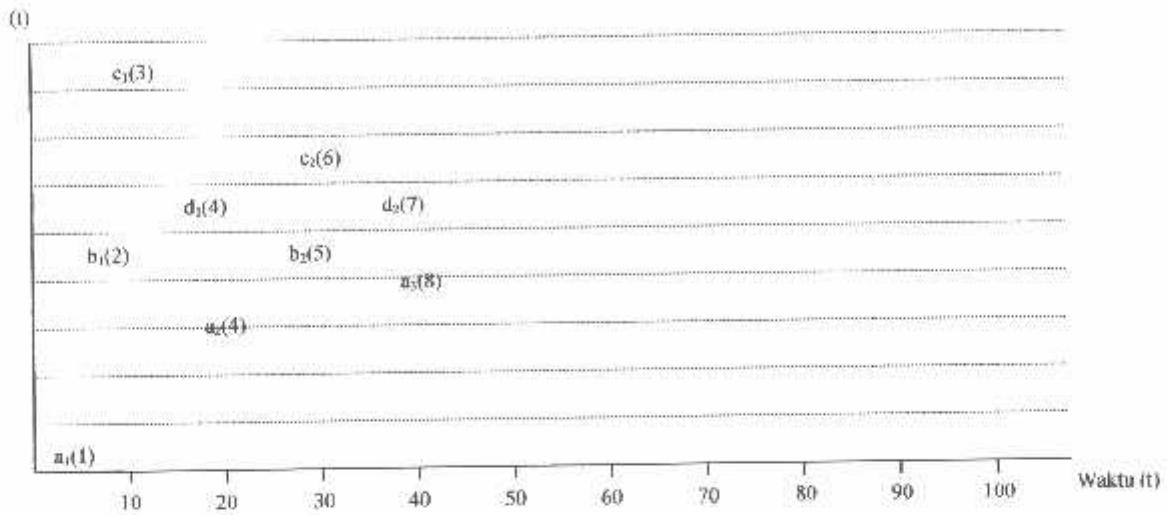
Dengan menggunakan kaidah diatas, dapatlah dibuat tabel aksi kontrol melalui verbalisasi respons lingkak terbuka dari plant, yaitu tabel 3-4.

Tabel 3-3
Verbalisasi Basis Aturan Pada Kontroller Fuzzy
Yang Digunakan

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	NK	SN	PK	PS	PB
NB				NB(3)			
NS				NS(7)			
NK				NK(11)			
SN	NB(2)	NS(6)	NK(10)	SN(313)	NK(3)	PS(3)	PB(3)
PK				PK(9)			
PS				PS(5)			
PB				PB(1)			

Catatan :

- Isi tabel adalah aksi kontrol yang dianjurkan oleh operator.
- Angka didalam tanda kurung menyatakan urutan kaidah kontrol yang diturunkan dari interpretasi titik kritis kurva respons plant terhadap input unit step, seperti pada gambar 3-20. Sebagai contoh pada titik maksimum C_2 (6) adalah aksi kontrol ke 6 NS (6) yang dianjurkan.



Gambar 3-12
Kurva Output Terhadap Input Unit Step

C. Pemilihan struktur controller (Fuzzy PI) Untuk Sistem yang Digunakan

Kontroller fuzzy type PI merupakan sistem fuzzy empat dimensi yang berasal dari tiga dimensi input dan satu dimensi output, output dari kontroller ini merupakan pemetaan fuzzy nonlinier $F; E \times \Delta E \times \Delta^2 E \Rightarrow U$; atau dalam formulasi variabel fuzzy e, de, d^2e dan dapat dituliskan sebagai fungsi nonlinier, yaitu :

$$u = f(e, de, d^2e) \dots\dots\dots(3.10)$$

Dalam keadaan tertentu, hubungan ini dapat pula dituliskan dalam bentuk dekomposisi :

$$U = f(e, de, d^2e). e + f(e, de, d^2e).de + f(e, de, d^2e). d^2e \dots\dots\dots(3.11)$$

Bentuk yang terakhir ini merupakan penyajian umum dari kontroller PI dengan gain nonlinier dan biasanya berubah terhadap waktu.

Aksi controller fuzzy type PI agar dapat dengan mudah dibaca dari matrik kaidah dua dimensi, atau tabel kaidah atur. Dalam hal ini digunakan dekomposisi controller Pideterministik, dimana gain integrasi K_i dianggap sebagai variabel fuzzy. Output dari controller fuzzy PI ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$U_{PI} = U_p + \text{FUZZY} + (K_i) \cdot \Sigma E \dots\dots\dots(3.12)$$



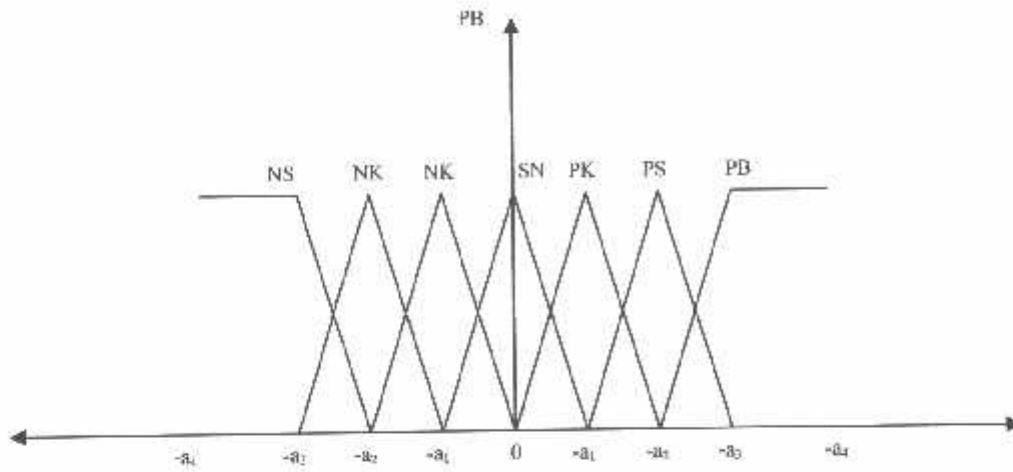
Gambar 3-13

Kontroller Fuzzy Type Ke-3

D. Pendefinisian Fungsi Keanggotaan Penyokong Fuzzy yang Digunakan

- Basis Data

Untuk memperoleh proses defuzzifikasi, diperlukan pendefinisian fungsional pada mutu keanggotaan merupakan fungsi keanggotaan. Dalam hal ini dipilih fungsi keanggotaan dalam bentuk segitiga sama kaki. Secara umum fungsi keanggotaan untuk tujuh buah penyokong tersebut dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3-14

Bentuk Umum Dari Anggota Penyokong

Bentuk umum dari fungsi keanggotaan pada tiap penyokong fuzzy dapat dituliskan sebagai berikut :

$x_1 = \{NB\} \mu_x = 1$	untuk $x \leq -a_3$
$\mu_x = (x + a_2)/(a_2 - a_3)$	untuk $x - a_3 \leq x \leq -a_2$
$\mu_x = 0$	untuk $x \geq -a_2$
$x_2 = \{NS\} \mu_x = (x + a_3)/(a_3 - a_2)$	untuk $-a_3 \leq x \leq -a_2$
$\mu_x = (x + a_1)/(a_1 - a_2)$	untuk $-a_2 \leq x \leq -a_1$
$\mu_x = 0$	untuk $x \leq -a_2$ atau $x \geq -a_1$
$x_3 = \{NK\} \mu_x = (x + a_2)/(a_2 - a_1)$	untuk $-a_2 \leq x \leq -a_1$
$\mu_x = (x)/(a_1)$	untuk $-a_1 \leq x \leq 0$
$\mu_x = 0$	untuk $x \leq -a_2$ atau $x \geq 0$
$x_4 = \{SN\} \mu_x = (x + a_1)/(a_1)$	untuk $-a_1 \leq x \leq 0$
$\mu_x = (x - a_1)/(-a_1)$	untuk $0 \leq x \leq a_1$
$\mu_x = 0$	untuk $x \leq -a_1$ atau $x \geq a_1$

$$\begin{aligned}
 x_5 = \{PK\} \mu_x &= (x) / (a_1) && \text{untuk } 0 \leq x \leq a_1 \\
 \mu_x &= (x-a_2)/(-a_1-a_2) && \text{untuk } a_1 \leq x \leq a_2 \\
 \mu_x &= 0 && \text{untuk } x \leq 0 \text{ atau } x \geq a_2 \\
 x_6 = \{PS\} \mu_x &= (x - a_1) / (a_2 - a_1) && \text{untuk } a_1 \leq x \leq a_2 \\
 \mu_x &= (x-a_3)/(a_2-a_3) && \text{untuk } a_2 \leq x \leq a_3 \\
 \mu_x &= 0 && \text{untuk } x \leq a_1 \text{ atau } x \geq a_3 \\
 x_7 = \{PB\} \mu_x &= (x - a_2) / (a_3 - a_2) && \text{untuk } a_1 \leq x \leq a_2 \\
 \mu_x &= 1 && \text{untuk } x \geq a_3 \\
 \mu_x &= 0 && \text{untuk } x \leq a_2
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan bentuk umum tersebut, dapatlah didefinisikan fungsi keanggotaan tiap penyokong fuzzy, menurut jelajah dari tiap himpunan semestanya, yaitu melalui pendefinisian nilai a_1, a_2, a_3, a_4 . Dan untuk tiap semesta pembicaraan diatas harga a_1, a_2, a_3, a_4 dapat didefinisikan sebagai berikut :

- ❖ Error merupakan selisih antara acuan dengan output dari sistem yang didefinisikan sebagai variabel fuzzy yang pertama merupakan himpunan semesta error $E = \{E_i \text{ dengan } i = 1 \dots 7\}$ dengan jelajah -10 sampai dengan $+10$ dan mempunyai tujuh buah penyokong masing-masing $E_1 = NK$ (Negatif Kecil), $E_4 = SN$ (Sekitar Nol), $E_5 = PK$ (Positif Kecil), $E_6 = PS$ (Positif Sedang), $E_7 = PB$ (Positif Besar) yang didefinisikan bahwa semua fungsi keanggotaan sama lebar dan simetris dengan nilai a_1, a_2, a_3, a_4 masing-masing adalah $a_1 = 2,5, a_2 = 5, a_3 = 7,5, a_4 = 10$.
- ❖ Delta error merupakan selisih antara error sekarang dengan error sebelumnya didefinisikan sebagai variabel fuzzy yang kedua, merupakan

himpunan semesta $\Delta E = \{\Delta E_i, \text{ dengan } i = 1 \dots 7\}$ dengan jelajah -20 sampai dengan $+20$ dan mempunyai tujuh buah penyokong masing $\Delta E_2 = \text{NS}$ (Negatif Sedang), $\Delta E_3 = \text{NK}$ (Negatif Kecil), $\Delta E_4 = \text{SN}$ (Sekitar Nol), $\Delta E_5 = \text{PK}$ (Positif Kecil), $\Delta E_6 = \text{PS}$ (Positif Sedang), $\Delta E_7 = \text{PB}$ (Positif Besar) didefinisikan bahwa fungsi keanggotaan mempunyai lebar yang tak sama (tak simetris), hal ini dilakukan dengan pertimbangan bahwa dinamika perubahan error sering terjadi pada harga sekitar nol. Nilai a_1, a_2, a_3, a_4 masing-masing adalah $a_1 = 5, a_2 = 10, a_3 = 15, a_4 = 20$.

- ❖ Gain fuzzy merupakan pembangkit aksi integral, didefinisikan dengan variabel fuzzy ketiga, merupakan himpunan semesta $K = \{K_i, \text{ dengan } i = 1 \dots 7\}$ dengan jelajah -1 sampai dengan $+1$ dan mempunyai tujuh buah penyokong masing-masing $K_1 = \text{NB}, K_2 = \text{NS}, K_3 = \text{NK}, K_4 = \text{SN}, K_5 = \text{PK}, K_6 = \text{PS}, K_7 = \text{PB}$ yang didefinisikan bahwa semua fungsi keanggotaan sama lebar dan simetris dengan nilai $a_1 = 0.25, a_2 = 0.5, a_3 = 0.75, a_4 = 1.0$.
- ❖ Output controller merupakan aksi kontrol yang dihasilkan oleh kontroler didefinisikan sebagai variabel fuzzy yang keempat berupa himpunan semesta $U = \{U_i, \text{ dengan } i = 1 \dots 7\}$ dengan jelajah -30 sampai dengan $+30$ dan mempunyai tujuh buah penyokong masing-masing $U_1 = \text{NB}, U_2 = \text{NS}, U_3 = \text{NK}, U_4 = \text{SN}, U_5 = \text{PK}, U_6 = \text{PS}, U_7 = \text{PB}$ yang didefinisikan bahwa semua fungsi keanggotaan sama lebar dan simetris dengan nilai $a_1 = 7.5, a_2 = 15, a_3 = 22.5, a_4 = 30$.

➤ Penyusunan Basis Aturan

Penyusunan basis aturan menghasilkan tabel pandang (look up table) yang disebut dengan tabel Mac Vicar Whelan dengan kaidah atur 7 variabel error dan 7 variabel perubahan error sehingga dihasilkan 49 basis aturan. Tabel Mac Vicar Whelan dapat dijabarkan dengan pernyataan linguistik sebagai berikut :

- R_1 : Jika e adalah NB dan Δe adalah NB maka U adalah NB
- R_2 : Jika e adalah NB dan Δe adalah NS maka U adalah NB
- R_3 : Jika e adalah NB dan Δe adalah NK maka U adalah NB
- R_4 : Jika e adalah NB dan Δe adalah SN maka U adalah NB
- R_5 : Jika e adalah NB dan Δe adalah PK maka U adalah NS
- R_6 : Jika e adalah NB dan Δe adalah PS maka U adalah NK
- R_7 : Jika e adalah NB dan Δe adalah PB maka U adalah SN
- R_8 : Jika e adalah NS dan Δe adalah NB maka U adalah NB
- R_9 : Jika e adalah NS dan Δe adalah NS maka U adalah NB
- R_{10} : Jika e adalah NS dan Δe adalah NK maka U adalah NB
- R_{11} : Jika e adalah NS dan Δe adalah SN maka U adalah NS
- R_{12} : Jika e adalah NS dan Δe adalah PK maka U adalah NK
- R_{13} : Jika e adalah NS dan Δe adalah PS maka U adalah SN
- R_{14} : Jika e adalah NS dan Δe adalah PB maka U adalah PK
- R_{15} : Jika e adalah NK dan Δe adalah NB maka U adalah NB
- R_{16} : Jika e adalah NK dan Δe adalah NS maka U adalah NB
- R_{17} : Jika e adalah NK dan Δe adalah NK maka U adalah NS
- R_{18} : Jika e adalah NK dan Δe adalah SN maka U adalah NK

- R_{19} : Jika e adalah NK dan Δe adalah PK maka U adalah SN
- R_{20} : Jika e adalah NK dan Δe adalah PS maka U adalah PK
- R_{21} : Jika e adalah NK dan Δe adalah PB maka U adalah PS
- R_{22} : Jika e adalah SN dan Δe adalah NB maka U adalah NB
- R_{23} : Jika e adalah SN dan Δe adalah NS maka U adalah NS
- R_{24} : Jika e adalah SN dan Δe adalah NK maka U adalah NK
- R_{25} : Jika e adalah SN dan Δe adalah SN maka U adalah SN
- R_{26} : Jika e adalah SN dan Δe adalah PK maka U adalah NK
- R_{27} : Jika e adalah SN dan Δe adalah PS maka U adalah PS
- R_{28} : Jika e adalah SN dan Δe adalah PB maka U adalah PB
- R_{29} : Jika e adalah PK dan Δe adalah NB maka U adalah NS
- R_{30} : Jika e adalah PK dan Δe adalah NS maka U adalah NK
- R_{31} : Jika e adalah PK dan Δe adalah NK maka U adalah SN
- R_{32} : Jika e adalah PK dan Δe adalah SN maka U adalah PK
- R_{33} : Jika e adalah PK dan Δe adalah PK maka U adalah PS
- R_{34} : Jika e adalah PK dan Δe adalah PS maka U adalah PB
- R_{35} : Jika e adalah PK dan Δe adalah PB maka U adalah PB
- R_{36} : Jika e adalah PS dan Δe adalah NB maka U adalah NK
- R_{37} : Jika e adalah PS dan Δe adalah NS maka U adalah SN
- R_{38} : Jika e adalah PS dan Δe adalah NK maka U adalah PK
- R_{39} : Jika e adalah PS dan Δe adalah SN maka U adalah PS
- R_{40} : Jika e adalah PS dan Δe adalah PK maka U adalah PB
- R_{41} : Jika e adalah PS dan Δe adalah PS maka U adalah PB
-

R₄₂ : Jika e adalah PS dan Δe adalah PB maka U adalah PB

R₄₃ : Jika e adalah PB dan Δe adalah NB maka U adalah SN

R₄₄ : Jika e adalah PB dan Δe adalah NS maka U adalah PK

R₄₅ : Jika e adalah PB dan Δe adalah NK maka U adalah PS

R₄₆ : Jika e adalah PB dan Δe adalah SN maka U adalah PB

R₄₇ : Jika e adalah PB dan Δe adalah PK maka U adalah PB

R₄₈ : Jika e adalah PB dan Δe adalah PS maka U adalah PB

R₄₉ : Jika e adalah PB dan Δe adalah PB maka U adalah PB

➤ Cara Kerja Fuzzy Logic Controller

Dalam hal ini akan diberikan contoh bagaimana fuzzy logic mengolah variabel masukan dan menghasilkan variabel keluaran yang sesuai, misalnya :

Variabel masukan adalah :

- Error yang berada dalam himpunan Pk dan PS
- Perubahan error berada dalam himpunan SN dan PK

Maka prosedur pengolahan masukan hingga menghasilkan aksi kontrol crisp, yaitu :

1. Tahap fuzzifikasi

- Dipakai fungsi keanggotaan bentuk segitiga beserta variabel linguistik dan jangkauannya. Kemudian menghitung derajat keanggotaannya.
- Perhitungan derajat keanggotaan didasarkan pada persamaan (3.8),

yaitu :

$$\mu_{PK}(e[k]) = 1 - \frac{\sqrt{(e[k] - (R1/3))^2}}{b_1}$$

$$\mu_{PS}(e[k]) = 1 - \sqrt{\frac{(e[k] - (2R1/3)^2)}{b_1}}$$

$$\mu_{SN}(de[k]) = 1 - \sqrt{\frac{(de[k]^2)}{b_2}}$$

$$\mu_{PK}(de[k]) = 1 - \sqrt{\frac{(de[k] - (R2/3)^2)}{b_2}}$$

2. Mekanisme Inferensi

- Tahap pertama adalah melakukan operasi minimum dilakukan dengan menentukan nilai minimum antara $\mu_{PK}(e[k])$, $\mu_{PS}(e[k])$, $\mu_{SN}(de[k])$, $\mu_{PK}(de[k])$ dan menyesuaikannya dengan basis aturan dari tabel Mac Vicar Whelan, yaitu
 - $\mu_{R32} = \min[\mu_{PK}(e[k]), \mu_{SN}(de[k])] > \mu_{R33} = \min[\mu_{PK}(e[k]), \mu_{PK}(de[k])]$
 - $\mu_{R39} = \min[\mu_{PS}(e[k]), \mu_{SN}(de[k])] > \mu_{R40} = \min[\mu_{PS}(e[k]), \mu_{PK}(de[k])]$
 - Tahap kedua adalah melakukan operasi maksimum atau gabungan.

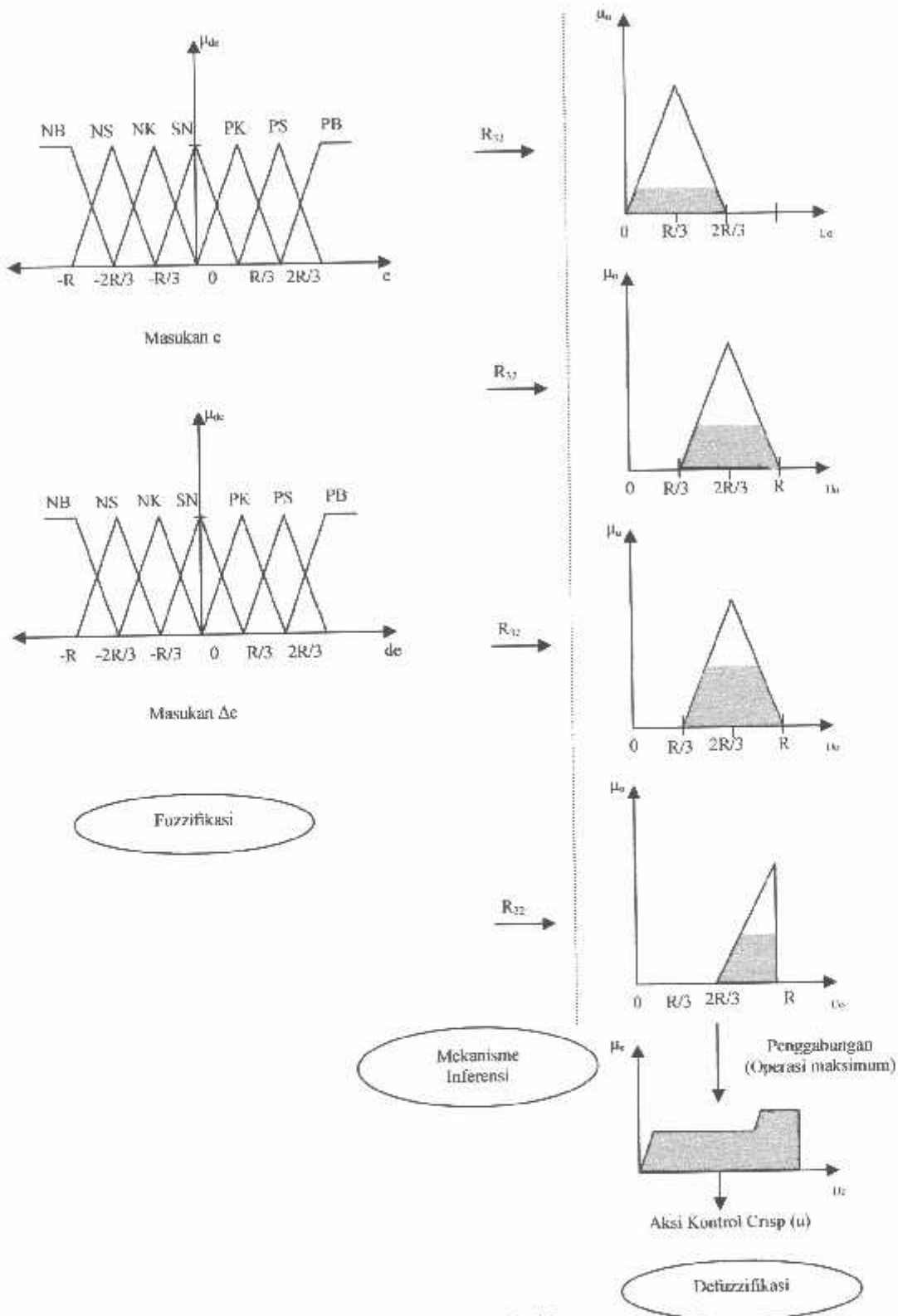
3. Tahap defuzzifikasi dengan metode center of area atau center of gravity yang didasarkan oleh persamaan (3.9), yaitu:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{49} U_i \cdot \mu^i}{\sum_{i=1}^{49} \mu^i}$$

dengan i adalah sesuai dengan aturan kontrollnya.

Rumus diatas menjadi :

$$U = \frac{U_{32} \cdot \mu_{R32} + U_{33} \cdot \mu_{R33} + U_{39} \cdot \mu_{R39} + U_{40} \cdot \mu_{R40}}{\mu_{R32} + \mu_{R33} + \mu_{R39} + \mu_{R40}}$$



Gambar 3-15

Langkah Kerja Fuzzy Logic Controller

proporsional dengan penjumlahan waktu dan lamanya waktu sinyal kesalahan timbul. Bagian derivatif menghasilkan sinyal keluaran yang sebanding dengan laju perubahan sinyal kesalahan. Kontroler PID tepat digunakan pada situasi dimana kontroler harus mampu merespon perubahan sinyal analog yang sangat cepat, dan pada kasus yang terdapat kelambanan waktu yang panjang antara pemakaian aksi koreksi, munculnya perubahan yang nyata sebagai akibat dari pemberian aksi kendali.

Pengaturan dan penalaan PID untuk mendapatkan performansi yang optimal dilakukan dengan mencari kombinasi dari ketiga mode tersebut, ini dilakukan saat proses benar-benar berjalan. Penetapan awal sistem kendali diperkirakan, dan tiga mode ditata dengan baik untuk akhirnya dicapai penetapan kendali yang optimal.

3.12. Penalaan Parameter Kontroler PID

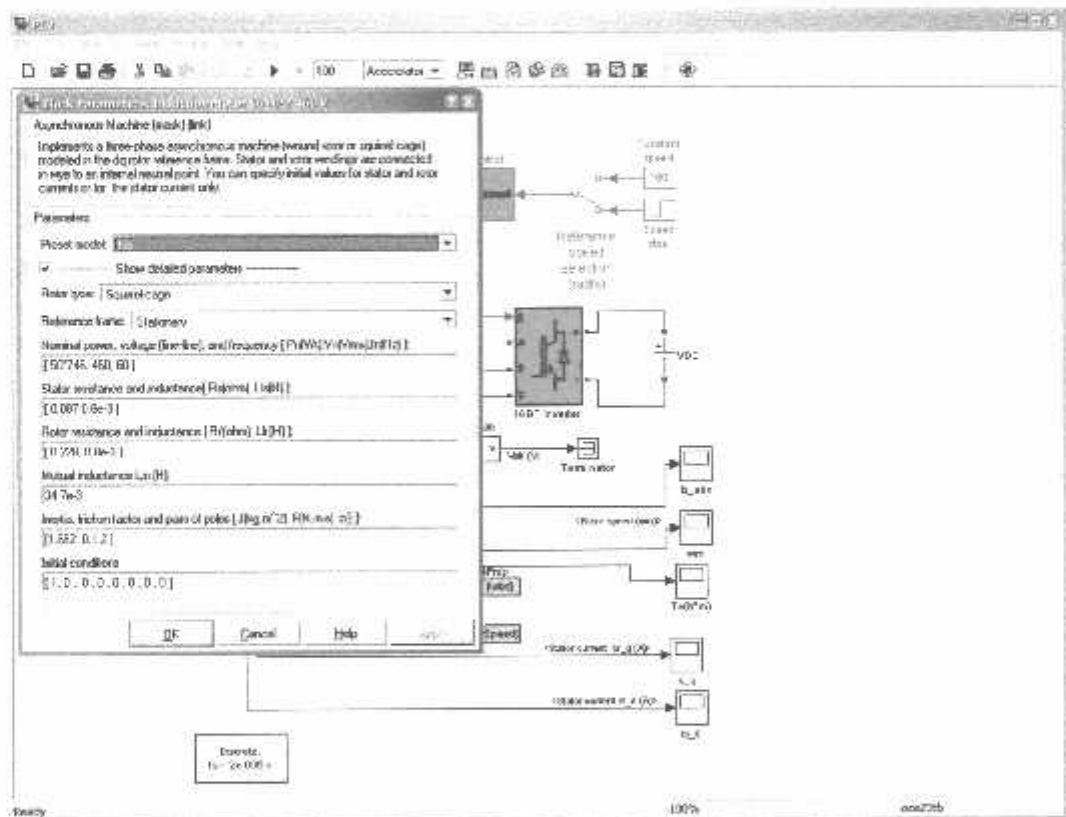
Penalaan parameter kontroler PID selalu didasari atas tinjauan terhadap karakteristik yang diatur (*Plant*). Dengan demikian betapapun rumitnya *plant* tersebut harus diketahui terlebih dahulu karakteristiknya sebelum penalaan parameter PID itu dilakukan. Ada beberapa cara penalaan kontroler PID diantaranya yaitu metode respon frekuensi Ziegler-Nicholss, manual (*hand-tuning*), *loop-shaping*, metode analitik, dengan optimasi, penempatan pole (*pole placement*) dan *auto tuning*. [Jun juntsen, 1999].

BAB IV

SIMULASI DAN HASILNYA

Dalam bab ini akan dilakukan simulasi pengaturan kecepatan motor induksi 3 fase. Simulasi dilakukan dengan Simulink MatLab 7.0 . Sebelum simulasi terlebih dahulu dibuat model simulink dan rangkaian pengaturan motor induksinya.

Pada pengujian ini motor yang digunakan yaitu, motor induksi rotor sangkar, dengan teraan parameter-parameter sebagai berikut :

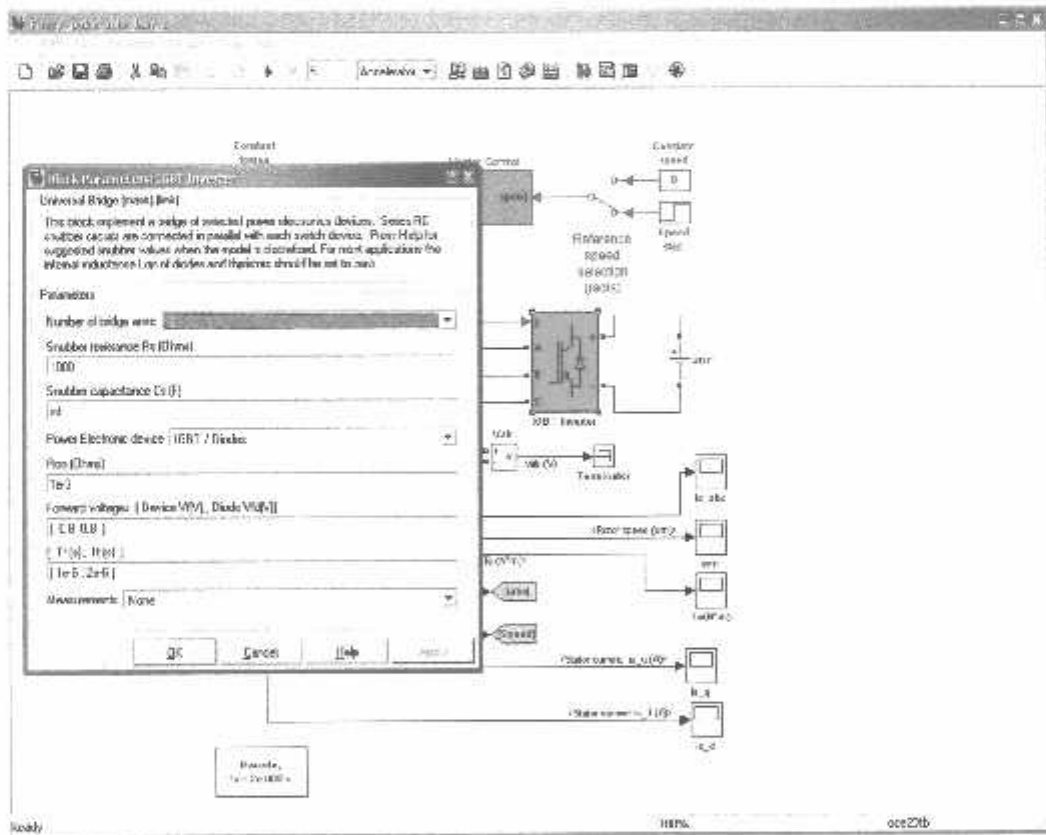


Gambar 4.1

Teraan Parameter Motor

$P = 50 \text{ HP}$	$J = 1.662 \text{ Kg.m}^2$
$n = 160 \text{ rad/det}$	$B = 0.1 \text{ N.m.dct}$
$V = 460 \text{ V}$	2 Kutub
$R_s = 0.087 \Omega$	$L_s = 0.8 \text{ mH}$
$R_r' = 0.228 \Omega$	$L_r' = 0.8 \text{ mH}$
$L_m = 34.7 \text{ mH}$	

Pada simulasi ini digunakan Inverter (*default Matlab*) dengan parameter sebagai berikut;



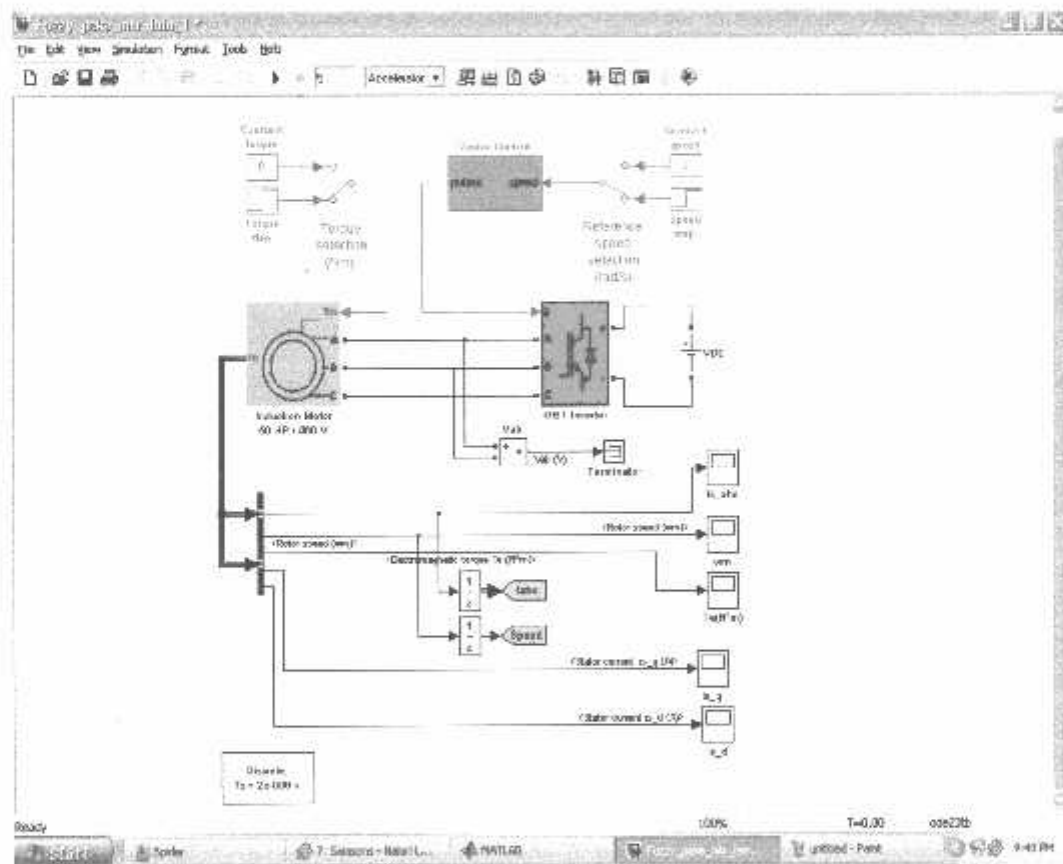
Gambar 4.2

Parameter Inverter

$E_{DC} = 780 \text{ V}$	$R_{\text{Snubber}} = 1000 \Omega$
IGBT	

4.1. Pemodelan Sistem

Berdasarkan parameter diatas dibuat model simulasi sistem pengaturan kecepatan motor induksi secara lengkap sebagai berikut:

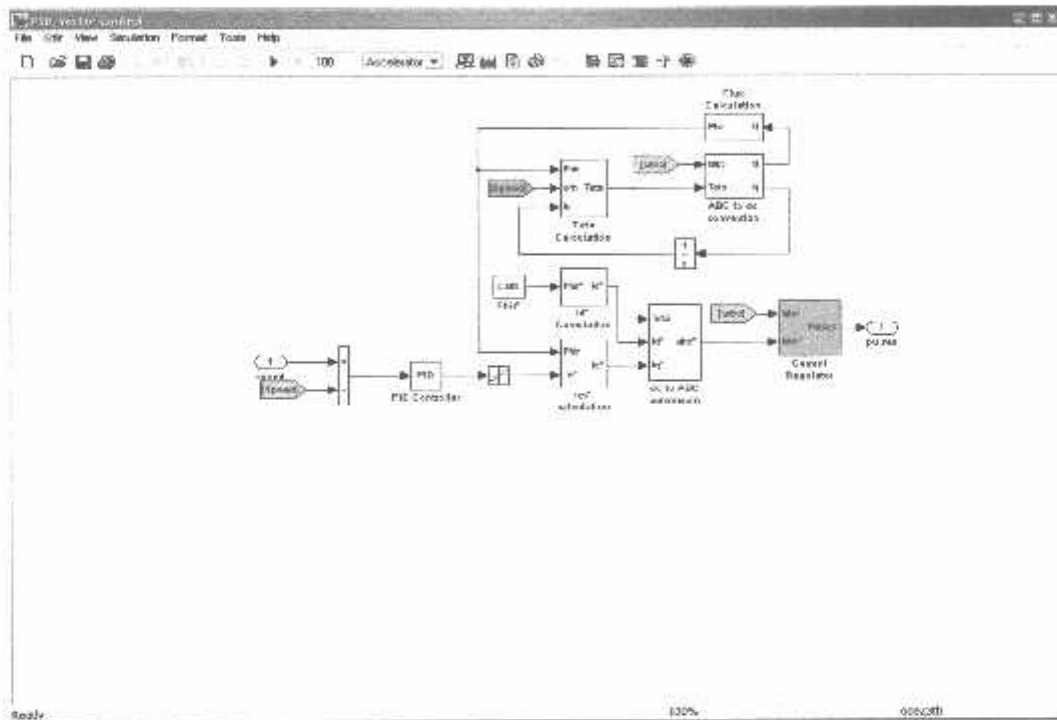


Gambar 4.3

Model Simulink Sistem Pengaturan Kecepatan Motor Induksi

4.1.1. PID Controller

Dalam blok vector control pada model system pengaturan diatas, untuk PID controllernya digunakan nilai *Default Matlab* dengan Gain $K_p = 10$, $K_i = 13$ dan $K_d = 5$. Adapun blok vector kontrolnya sebagai berikut:

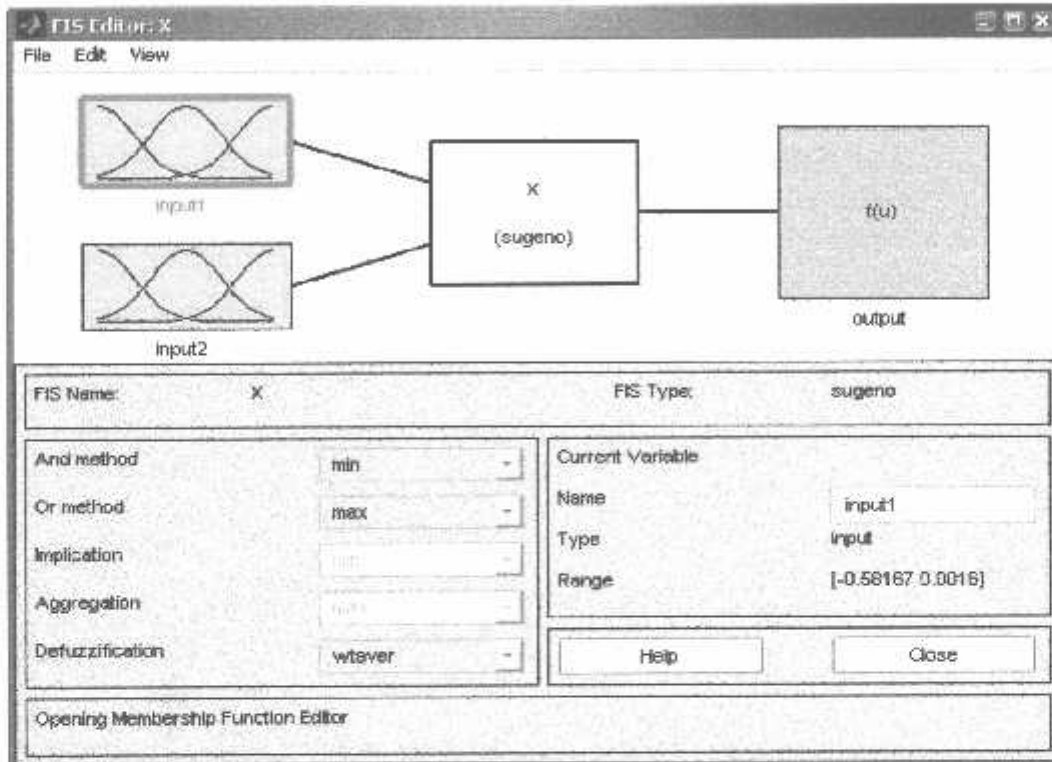


Gambar 4.4

Blok Diagram Vektor Kontrol PID

4.1.2. Fuzzy Logic Controller

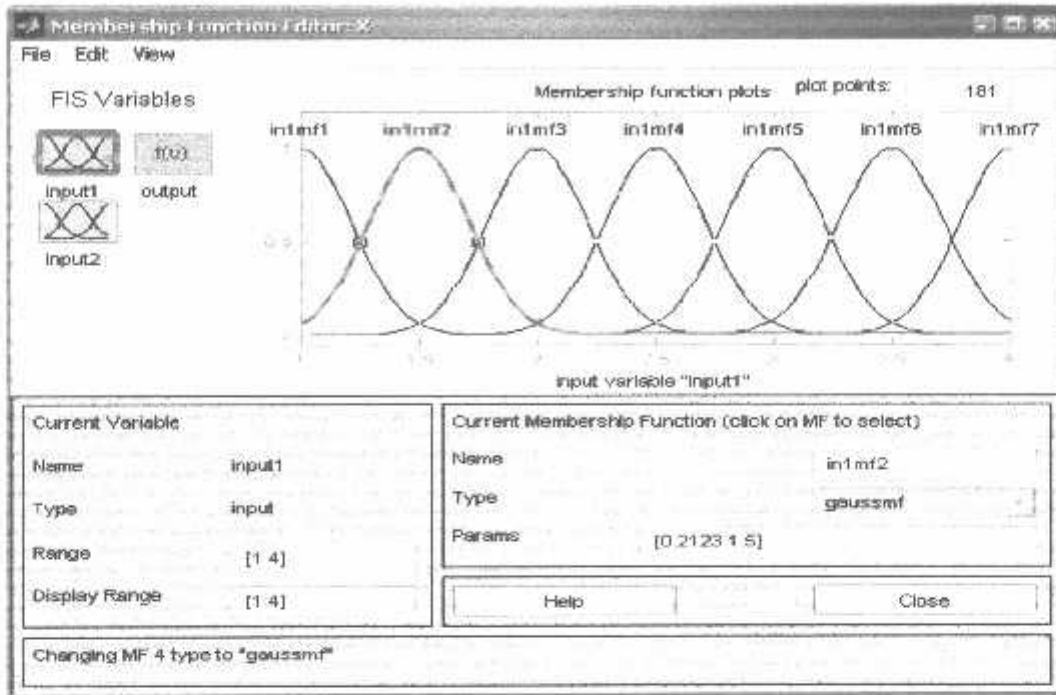
Pada blok vector control dalam model system pengaturan (gambar 4.3) di atas untuk fuzzy menggunakan metode Sugeno. Berikut ini adalah tampilan blok fuzzy controller yang digunakan.



Gambar 4.5

Proses Fuzzyfikasi FIS Editor

Pada metode fuzzy yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode fuzzy dengan dua input dan satu Output. input 1 sebagai delta error (Δe) sedangkan input dua sebagai error (e). Tiap input mempunyai tujuh membership function. Sehingga keluarannya merupakan perkalian dari kedua input tadi. Adapun membership function dari tiap-tiap input adalah sebagai berikut:

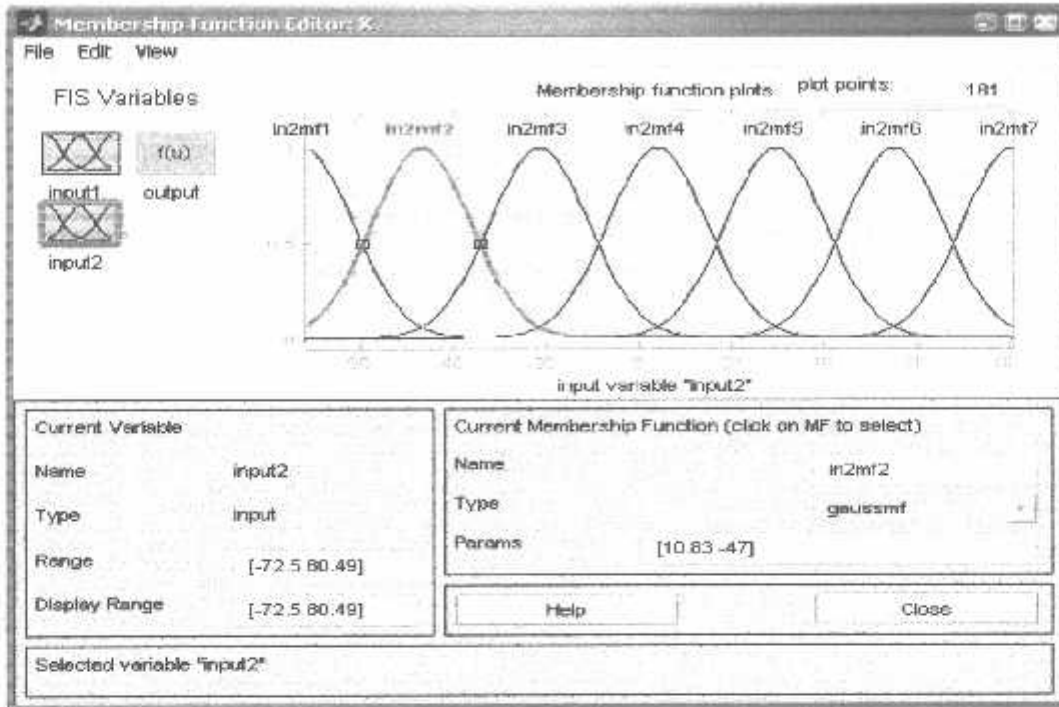


Gambar 4.6

Membership Function Input 1

Tipe *membership function* yang digunakan adalah tipe Gaussian dengan range antara 1 dan 4. Untuk input 1 membership functionnya ada tujuh, yaitu:

- in1mf1 (*input1 membership function1*) dengan params [0.1623 1]
- in1mf2 (*input1 membership function2*) dengan params [0.2123 1.5]
- in1mf3 (*input1 membership function3*) dengan params [0.2123 2]
- in1mf4 (*input1 membership function4*) dengan params [0.2123 2.5]
- in1mf5 (*input1 membership function5*) dengan params [0.2123 3]
- in1mf6 (*input1 membership function6*) dengan params [0.2215 3.496]
- in1mf7 (*input1 membership function7*) dengan params [0.2124 4]

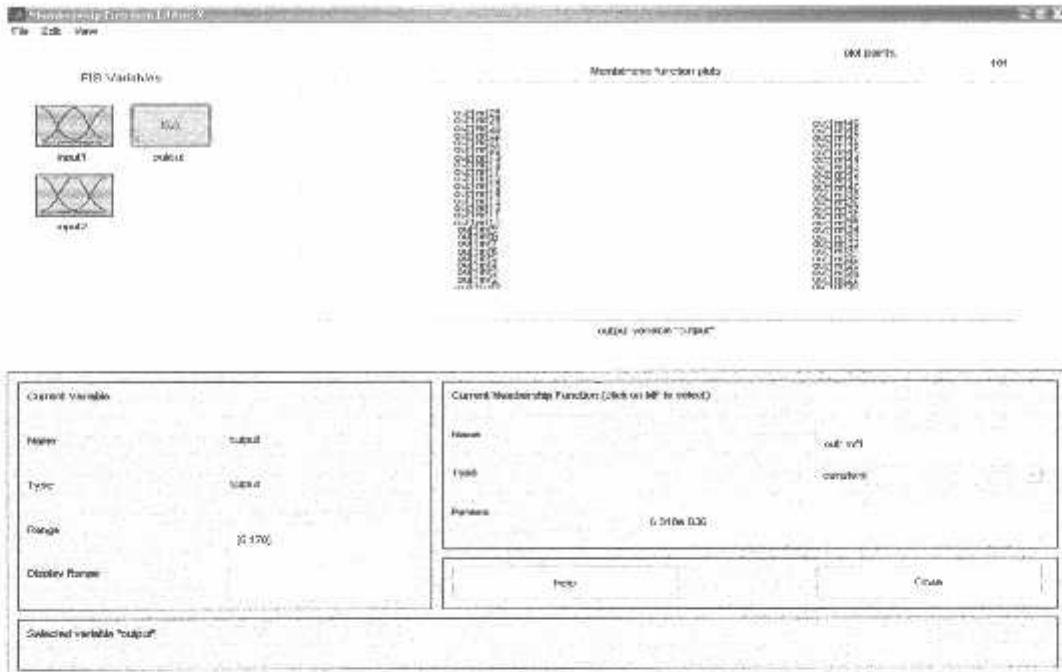


Gambar 4.7

Membership Function Input 2

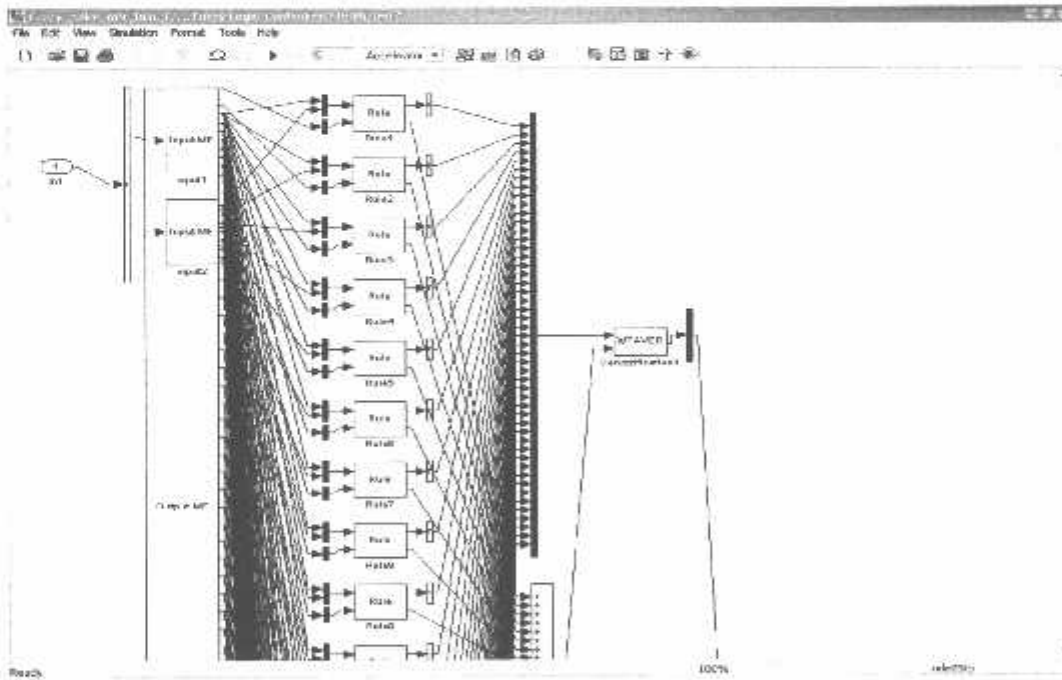
Tipe *membership function* yang digunakan adalah tipe Gaussian dengan range antara -72.5 dan 80.49. Untuk input 1 *membership function*nya ada tujuh, yaitu:

- In2mf1 (*input2 membership function1*) dengan params [10.83 -56]
- In2mf2 (*input2 membership function2*) dengan params [10.83 -47]
- In2mf3 (*input2 membership function3*) dengan params [10.83 -21.5]
- In2mf4 (*input2 membership function4*) dengan params [10.83 3.994]
- In2mf5 (*input2 membership function5*) dengan params [10.83 29.49]
- In2mf6 (*input2 membership function6*) dengan params [10.83 54.99]
- In2mf7 (*input2 membership function7*) dengan params [10.83 80.49]



Gambar 4.8

Tampilan Output Fuzzy

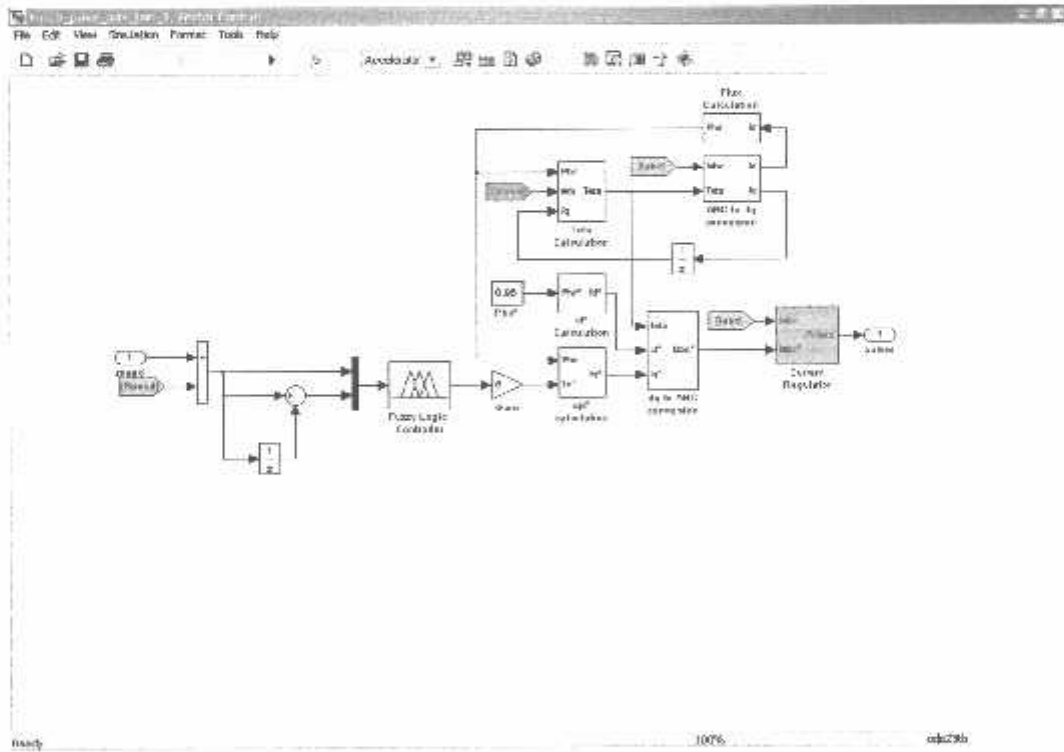


Gambar 4.9

Rule Base

Tabel 4.1
Aturan Kontrol Fuzzy

		Δe						
		NB	NS	NK	SN	PK	PS	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NS	NK	SN
	NS	NB	NB	NB	NS	NK	SN	PK
	NK	NB	NB	NS	NK	SN	PK	PS
	SN	NB	NS	NK	SN	NK	PS	PB
	PK	NS	NK	SN	PK	PS	PB	PB
	PS	NK	SN	PK	PS	PB	PB	PB
	PB	SN	PK	PS	PB	PB	PB	PB



Gambar 4.10

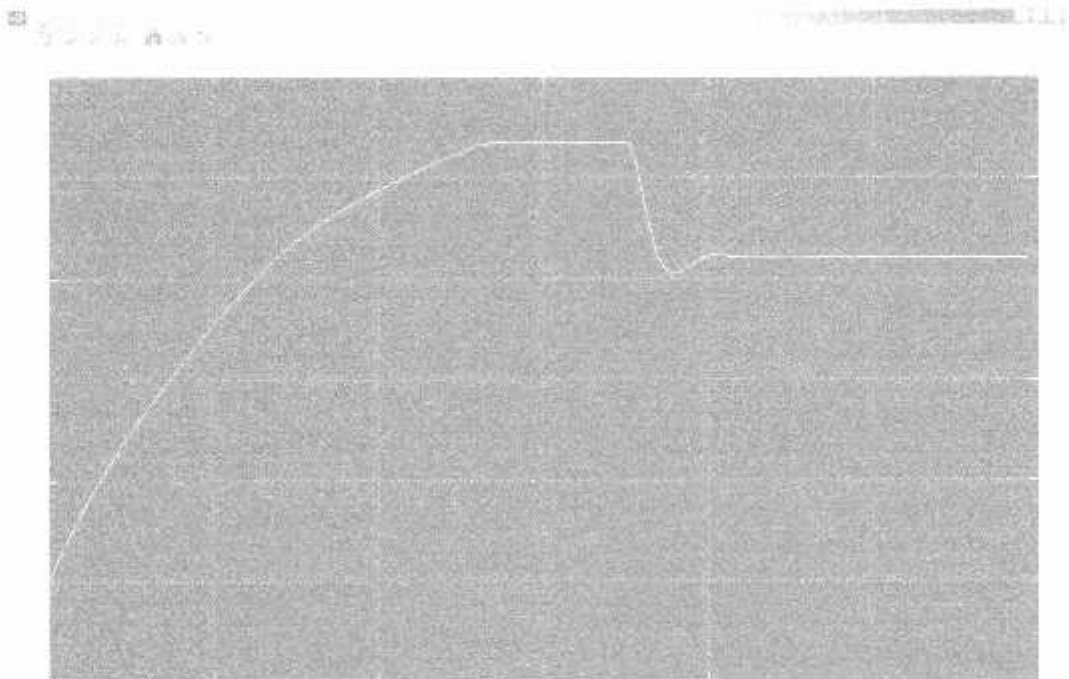
Blok Diagram Vektor Kontrol Fuzzy

4.2. Simulasi

Setelah diperoleh model simulink dari rangkaian pengaturan motor induksinya, maka selanjutnya dilakukan simulasi dengan menggunakan parameter-parameter yang telah ada. Simulasi dilakukan selama 0-100 detik. Beban awal adalah nol. Selanjutnya beban berubah seiring perubahan waktu. Simulasi dihentikan hingga tercapai keadaan *steady state*

4.3. Hasil Simulasi

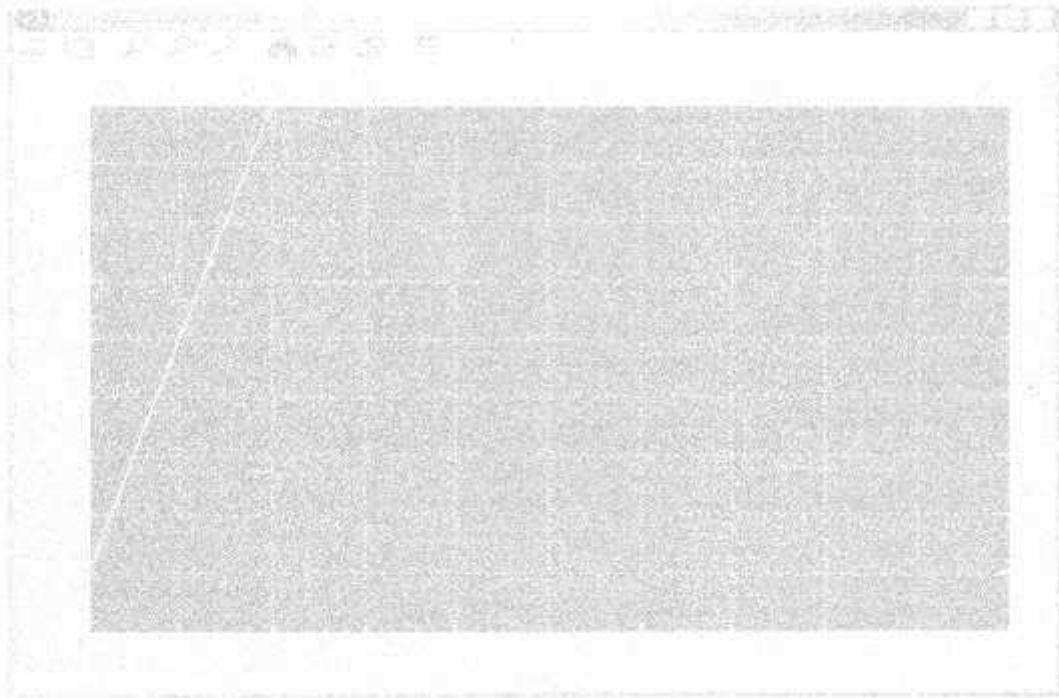
4.3.1. Hasil Simulasi Dengan Menggunakan PID Controller



Gambar 4.11

Hasil simulasi kecepatan dengan PID controller

4.3.1. Hasil Simulasi Dengan Menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC)



Gambar 4.12

Hasil simulasi kecepatan dengan menggunakan FLC

Dari hasil simulasi seperti pada Gambar 4.11 dan 4.12, dapat dilihat bahwa respon kecepatan motor meningkat secara bertahap menuju keadaan *steady state*. Sistem dengan menggunakan PID control system mengalami *steady state* pada kecepatan 160.05 rad/s. Sedangkan sistem yang menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC) mengalami *steady state* pada kecepatan 159.425 rad/s. Untuk sistem yang menggunakan PID controller, *steady state* dicapai pada detik 42. Sedangkan untuk FLC *steady state* dicapai setelah 1 detik simulasi dimulai..

Sistem yang menggunakan PID controller *steady state error*nya sebesar 0.05 sedangkan dengan FLC sebesar 0.575.

Error steady state diperoleh dari selisih nilai *steady state* dengan *set point*. Untuk PID nilai *steady statenya* 160.05 sedangkan FLC 159.425. Jadi untuk PID nilai *steady state error*nya $160.05 - 160 = 0.05$ dan FLC adalah $160 - 159.425 = 0.575$.

Selengkapnya perbandingan antara nilai *overshoot*, *settling time* dan *error steady state* dari kedua Controller diatas dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 4-2

Perbandingan Nilai *Overshoot*, *Settling Time* dan *Error Steady State* Hasil Simulasi Dengan Fuzzy Logic Controller dan PID Kontroller

Keadaan	Fuzzy Logic Controller	PID Controller
<i>Overshoot</i>	159.425 rad/s	217.62 rad/s
<i>Settling Time</i>	1 detik	42 detik
<i>Error Steady State</i>	0.575 rad/s	0.05 rad/s

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari simulasi yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan bahwa:

1. Sistem yang menggunakan FLC lebih cepat mencapai keadaan tunak (*steady state*) dari pada sistem yang menggunakan PID controller, yaitu sistem yang menggunakan FLC hanya membutuhkan waktu 1 detik untuk mencapai *steady state* sedangkan yang menggunakan membutuhkan waktu 42 detik untuk mencapai *steady state*.
2. Sistem yang menggunakan FLC memiliki nilai *overshoot* yang lebih kecil dibandingkan yang menggunakan PID Controller, yaitu sistem dengan FLC *overshoot* nya 159.425 rad/s sedangkan dengan PID *overshoot* nya 217.62 rad/s
3. Sistem yang menggunakan PID controller *steady state error*nya sebesar 0.05 sedangkan dengan FLC sebesar 0.575. Jadi sistem dengan PID controller *steady state error*nya lebih baik dari yang menggunakan FLC.

5.2. Saran

Banyak hal menarik untuk dikaji dari FLC ini salah satunya adalah prinsip kerjanya yang hanya berdasarkan aturan yang sangat sederhana yaitu 'jika-maka'. Dari kesederhanaan dan kelebihan yang dimilikinya, kontroler ini sangat diminati

dalam perancangan suatu system control. Oleh karena itu untuk pengembangan yang lebih lanjut disarankan:

1. Mencoba mengembangkan aturan dan langkah kerja dari FLC
 2. Mencoba menggunakan sistem kontrol lain yang berkaitan dengan fuzzy logic misalnya; Neuro fuzzy, Fuzzy Adaptif, Fuzzy Swa - atur.
 3. Mencoba membuat / merancang alat kontrolnya yang nantinya dapat dikombinasikan dengan program simulasinya.
 4. Mencoba pada motor induksi jenis lain.
-

DAFTAR PUSTAKA

- 1) E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, "**Electric Machinery**", McGraw-Hill International, Fourth Edition.
 - 2) Zuhail, "**Dasar Teknik Tenaga Listrik**", Penerbit ITB Bandung
 - 3) Sri Kusumadewi, "**Analisis & Desain Sistem Fuzzy Menggunakan Tool Box Matlab**", Penerbit GRAHA ILMU
 - 4) Djoko Achyanto, Ir, Msc, **Mesin - Mesin Listrik**, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta, 1992
 - 5) Yon Rijono, Drs, **Dasar Teknik Tenaga Listrik**, Edisi Pertama, Andi, Yogyakarta
-



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama : ABDUL ZAHID MAWARDIN
NIM : 01.12.088
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
Judul Skripsi : PENGATURAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI
EKSITASI PWM SINUSOIDAL MENGGUNAKAN
FUZZY LOGIC CONTROLLER

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :

Hari : Senin
Tanggal : 20 Maret 2006
Dengan Nilai : 74.59 (B+)



Ir. Mochtar Asroni, MSME
Ketua

Panitia Ujian Skripsi

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Sekretaris

Anggota Penguji

Ir. M Abdul Hamid, MT
Penguji Pertama

Ir. H. Choiri
Penguji Kedua