

**LAPORAN PENELITIAN
INTERNAL STTA TAHUN 2017/2018**



**Perbaikan Stabilitas Dinamik Sistem Tenaga Listrik
Dengan Metode Logika *Fuzzy Proportional Integral Derivative***

Oleh:

**Paulus Setiawan, S.T., M.T.
NIP: 011406112**


**Dibiayai melalui Dana Penelitian Internal STTA
Tahun Anggaran 2017/2018**


**DEPARTEMEN TEKNIK AERONAUTIKA
SEKOLAH TINGGI TEKNOLOGI ADISUTJIPTO
2018**

Halaman Pengesahan

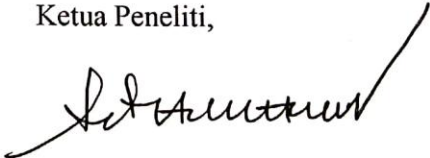
1. Judul Penelitian : **Perbaikan Stabilitas Dinamik Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Logika Fuzzy Proportional Integral Derivative**
2. Bidang Penelitian : Teknik Elektro
3. Ketua Peneliti
 - a. Nama Lengkap : Paulus Setiawan, S.T., M.T.
 - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c. NIP/NIDN : 011406112/0505057602
 - d. Pangkat/Golongan : III/B
 - e. Jabatan Fungsional : Tenaga Pengajar
 - f. Departemen : Teknik Aeronautika
4. Lokasi Penelitian : Laboratorium Elektronika STTA
5. Waktu Penelitian : 3 bulan
6. Jumlah Biaya : Rp. 1.250.000,00
(Stau Juta Dua Ratus Lima Puluh Ribu Rupiah)

Yogyakarta, November 2018



Mengetahui,
Ketua STTA
Wakil

Paulus Setiawan, S.T., M.T.
NIDN: 0521047001



Ketua Peneliti,


Paulus Setiawan, S.T., M.T.
NIDN: 0505057602

Menyetujui,
Kepala P3M STTA

Dr. Okto Dinaryanto, S.T., M.M., M.Eng.
NIDN: 0504107202

Ringkasan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas penggunaan logika *fuzzy* yang menggantikan kendali *Proportional Integral Derivative* (PID) dalam perbaikan stabilitas dinamik sistem tenaga listrik. Penelitian diawali dengan membuat model matematika sistem tenaga listrik kedalam persamaan variabel keadaan, kemudian membentuk model blok diagram yang merupakan *plant* sistem. *Plant* dikendalikan oleh *Power System Stabilizer* (PSS) yang masukkannya dari perubahan kecepatan rotor dan keluarannya diterapkan kedalam sistem eksitasi atau penguatan. Logika *fuzzy* digunakan sebagai pengganti PIDPSS dan PIDPSS ini digunakan sebagai pengganti PSS konvensional.

Struktur pengendali logika *fuzzy* disusun menggunakan dua input dengan tiga, lima, dan tujuh fungsi keanggotaan. Pengujian unjuk kerja sistem yang telah terbentuk dilakukan dengan memberikan gangguan kenaikan dan penurunan daya listrik, selanjutnya mengamati hasil tanggapan dinamis pada variabel sistem berupa perubahan kecepatan rotor, sudut ayunan rotor, tegangan terminal, dan daya listrik. Hasil pengujian yang nanti akan dilakukan, kemudian dibandingkan antara PSS konvensional dengan PIDPSS dan logika *fuzzy* (FPIDPSS).

Kata Kunci: PID, PIDPSS, dan FPIDPSS.

Surat Bebas Perpustakaan

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hero Wintolo,S.T.,M.Kom.
NIP : 010303032
Jabatan : Kepala Perpustakaan
Unit Kerja/PTS : Perpustakaan STTA

menerangkan bahwa telah menerima hasil penelitian **Paulus Setiawan, S.T., M.T.** dengan judul

**Perbaikan Stabilitas Dinamik Sistem Tenaga Listrik
Dengan Metode Logika *Fuzzy Proportional Integral Derivative***

dan digunakan sebagai Buku Pustaka dan Bahan Bacaan di Perpustakaan Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto Yogyakarta.

Demikian untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, November 2018
Kepala Perpustakaan STTA



Hero Wintolo,S.T.,M.Kom.
NIP:010303032

Surat Keterangan Karya Ilmiah

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama & gelar : Freddy Kurniawan, S.T., M.T.
NIP / NIDN : 010301031 / 05217037601
Pangkat/Golongan : III/D
Jabatan Fungsional : Lektor (200 AK)
Bidang Ilmu : Teknik Elektro
Unit Kerja / PT : Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

Memberikan rekomendasi untuk Karya Ilmiah dengan Judul:

Perbaikan Stabilitas Dinamik Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Logika *Fuzzy Proportional Integral Derivative*

a.n. Saudara di bawah ini:

Nama & gelar : Paulus Setiawan, S.T., M.T.
NIPY / NIDN : 030131/0517037601
Pangkat/Golongan : III/A
Jabatan Fungsional : Tenaga Pengajar
Bidang Ilmu : Teknik Elektro
Unit Kerja / PT : Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

Isi rekomendasi Karya Ilmiah itu sebagai berikut:

- a. Mutu : Amat Baik / Baik / Cukup
- b. Softifikasi : Amat Baik / Baik / Cukup
- c. Kemutakhiran : Amat Baik / Baik / Cukup

Demikian untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, November 2018

Yang memberikan rekomendasi

Freddy Kurniawan, S.T., M.T.
NIP 010301031

Daftar Isi

Halaman Pengesahan	2
Ringkasan.....	iii
Surat Bebas Perpustakaan.....	iv
Surat Keterangan Karya Ilmiah	v
Daftar Isi.....	vi
Daftar Tabel	viii
Daftar Gambar	ix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Kajian Pustaka	4
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	5
2.3 Komponen Dasar Sistem Tenaga Listrik	6
2.4 Pemodelan Generator Sinkron Tiga Fase	7
2.5 Sistem Tenaga <i>Single Machine Infinite Bus</i> (SMIB)	8
2.6 Kendali <i>Power System Stabilizer</i> (PSS)	13
2.7 Kendali <i>Proportional Integral Derivative</i> (PID)	15
2.7.1 Pengendali PIDPSS	16
2.7.2 Fungsi alih PIDPSS	17
2.8 Pengendali Logika <i>Fuzzy</i>	18
2.8.1 Unit Fuzifikasi	18
2.8.2 Unit Aturan <i>Fuzzy</i> (<i>Fuzzy Rule Base</i>)	19
2.8.3 Unit Inferensi <i>Fuzzy</i> / Unit Penarik Kesimpulan (<i>fuzzy Inference System</i>)	20
2.8.3.1 Metode <i>Max-Min</i>	20
2.8.3.2 Metode <i>Max-Dot</i>	21

2.8.4 Unit Defuzifikasi	22
2.8.4.1 Metode Rerata Maksimum (<i>Mean of Max</i> , MOM)	22
2.8.4.2 Metode Pusat Area (<i>Centre of Area</i> , COA)	23
2.8.4.3 Metode Sugeno.....	23
2.8.4.3.1 Metode <i>Fuzzy</i> Sugeno Orde Nol	23
2.8.4.3.2 Metode <i>Fuzzy</i> Sugeno Orde Satu	24
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Diagram Alir Penelitian	25
3.2 Bahan Penelitian	25
3.3 Jalan Penelitian	26
3.3.1 Perhitungan Parameter Sistem Tenaga Listrik SMIB dan Parameter Blok PSS	26
3.3.2 Perhitungan dan Penentuan Parameter Blok Diagram PIDPSS	27
3.3.3 Penyusunan Model <i>Fuzzy Inference System</i> (FIS) pada Pengendali FPIDPSS	28
3.3.3.1 Proses Fuzifikasi pada Pengendali FPIDPSS	30
3.3.3.2 Proses Penalaran Aturan (<i>rule</i>) dan Defuzifikasi	34
3.3.4 Pelatihan dan Analisis Hasil Penelitian Simulasi Pengendali FPIDPSS.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Tanggapan Dinamis Sistem Pada Saat Keadaan Awal	43
4.2 Pengujian Gangguan Kenaikan Daya Elektrik	51
4.3 Pengujian Gangguan Penurunan Daya Elektrik	59
BAB V PENUTUP	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
Daftar Pustaka	68
Lampiran	70

Daftar Tabel

Tabel 1 Korelasi kendali PID	16
Tabel 2 Data hasil pengolahan simulasi pada blok diagram PIDPSS	30
Tabel 3 Definisi fungsi keanggotaan secara diskrit variabel $\Delta\omega$	33
Tabel 4 Definisi fungsi keanggotaan secara diskrit variabel $d\Delta\omega$	33
Tabel 5 Tabel aturan (<i>rule</i>) <i>fuzzy</i> yang disusun	40

Daftar Gambar

Gambar 1	Komponen dasar pembangkit tenaga listrik	6
Gambar 2	Sistem eksitasi dan pengaturan tegangan	7
Gambar 3	Model Mesin Sinkron <i>Park</i>	7
Gambar 4	Rangkaian ekivalen sumbu-d dan sumbu-q mesin sinkron	8
Gambar 5	Model Sistem Tenaga SMIB	9
Gambar 6	Diagram Blok Fungsi Alih Sistem SMIB (Yu, 1983)	9
Gambar 7	Fasor arus dan tegangan	11
Gambar 8	Blok Diagram PSS	13
Gambar 9	Sistem sederhana dengan kendali PID	15
Gambar 10	Blok Diagram Fungsi Alih PIDPSS	17
Gambar 11	Pengendali logika fuzzy	18
Gambar 12	Proses Fuzifikasi	19
Gambar 13	Proses pengambilan keputusan dengan metode <i>Max-Min</i>	21
Gambar 14	Inferensi <i>fuzzy Max-Dot</i>	22
Gambar 15	Diagram Alir Penelitian	25
Gambar 16	Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan PSS konvensional	27
Gambar 17	Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan PIDPSS	28
Gambar 18	Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan FPIDPSS	29
Gambar 19	Struktur Pengendali FPIDPSS	30
Gambar 20	Fungsi keanggotaan dari nilai input variabel $\Delta\omega$ (perubahan kecepatan rotor) dan $d\Delta\omega$ (delta perubahan kecepatan rotor)	34
Gambar 21	Aturan-aturan (<i>rules</i>) fuzzy yang disusun	40
Gambar 22	Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat keadaan awal	43
Gambar 23	Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat keadaan awal	45
Gambar 24	Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat keadaan awal	47

Gambar 25 Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat keadaan awal	49
Gambar 26 Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu	51
Gambar 27 Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu	53
Gambar 28 Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu	55
Gambar 29 Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu	57
Gambar 30 Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu	59
Gambar 31 Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu	61
Gambar 32 Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu	63
Gambar 33 Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu	65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu permasalahan yang muncul pada suatu sistem tenaga listrik adalah masalah stabilitas dan dinamika sistem terhadap adanya gangguan. Pada bekerjanya suatu generator dengan baik, kecepatan mekanik dari rotor akan sama dengan kecepatan berputarnya medan puatar stator. Kesamaan kecepatan ini cenderung dipertahankan apabila terjadi gangguan karena timbulnya kopel-kopel pesinkron pada generator (Elangovan, 1985). Jika pada suatu generator yang terhubung pada jaring, yang mengandung generator-generator lain, putaran rotornya turun, maka sudut dayanya akan berkurang. Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik seperti pada generator dapat menimbulkan osilasi terhadap parameter-parameter sistem seperti tegangan, frekuensi, dan daya. Sementara itu, kebutuhan sistem menghendaki agar parameter-parameter tersebut bernilai tetap pada suatu titik operasi tertentu. Oleh karena itu, permasalahan dalam stabilitas sistem tenaga adalah bagaimana agar osilasi yang terjadi akibat gangguan tersebut dapat secepat mungkin stabil.

Studi stabilitas yang tepat dan berkesinambungan sangat diperlukan untuk menganalisis sistem supaya dapat bekerja dengan efektif. Untuk mempelajari stabilitas dinamik yaitu stabilitas generator yang mengalami perubahan beban, maka digunakan pemodelan terhadap komponen-komponen seperti generator sinkron, saluran transmisi, dan beban yang diturunkan dari persamaan-persamaan matematis yang mewakili perilaku dinamika sistem.

Penurunan persamaan-persamaan matematis yang mewakili perilaku dinamika sistem dapat dideskripsikan dengan menggunakan persamaan diferensial linear dan akibat yang terjadi yang berupa osilasi frekuensi rendah dapat distabilkan kembali dengan menambahkan sinyal kendali tambahan (Yu, 1983). Penambahan sinyal kendali tersebut dilakukan dengan menambahkan blok PSS (*Power System Stabilizer*) berupa blok washout dan lead compensator dengan masukan berupa perubahan kecepatan rotor, perubahan frekuensi atau perubahan akselerasi daya. Penalaan sinyal kendali tambahan secara konvensional dilakukan dengan menghitung parameter PSS berdasarkan data sistem yang telah diketahui.

Seiring dengan berkembangnya dan kemajuan penelitian dibidang ilmu pengetahuan, untuk memperbaiki kompensator mendahului kemudian digunakan kendali kompensator PID

(*Proportional Integral Derivative*). Pengendali ini merupakan pengendali proses linear dengan teori matematika yang lengkap dan mampu merancang secara tepat dan aman suatu kendali terprogram. Kendali PID dapat memperbaiki tanggapan transien dan mengeliminasi galat pada kondisi tunak. Tetapi disisi lain, PID juga mempunyai kelemahan, diantara timbulnya lonjakan yang relatif besar dan waktu pencapaian kondisi tunak yang relatif lama.

Berdasarkan kelemahan-kelemahan tersebut, sistem kendali PID mulai diganti dengan pengendali logika *fuzzy*. Pengendali logika *fuzzy* yang tidak memerlukan model analisis telah terbukti memiliki banyak keunggulan. Sebagai contoh pada sistem kendali mesin cuci, transmisi otomatis pada mobil, dan sistem kendali pemberhentian otomatis pada kereta api bawah tanah. Namun, kinerja pengendali logika *fuzzy* sangat bergantung pada keahlian dan pengalaman seorang pakar untuk menentukan aturan-aturan dan fungsi keanggotaan. Hal ini dikarenakan seorang pakar telah seringkali atau banyak melakukan percobaan.

Untuk menghindari penelitian yang dilakukan secara coba-coba, Takagi Sugeno pada tahun 1985 memperkenalkan sebuah metode penalaran logika *fuzzy* yang lebih sesuai untuk analisa secara matematis, dan disebut sebagai metode Sugeno. Pada metode Mamdani, baik input (*antecedent*) maupun output (*consequent*) sistem berupa himpunan *fuzzy*. Sedangkan pada metode Sugeno, outputnya tidak berupa himpunan *fuzzy*, melainkan berupa konstanta tegas atau persamaan linear. Keuntungan yang diperoleh dari penalaran logika fuzzy metode Sugeno adalah: komputasinya lebih cepat dan efisien, bekerja paling baik untuk teknik-teknik linear seperti kendali PID, bekerja paling baik untuk teknik optimasi, dan lebih cocok untuk analisa atau pendekatan sistem secara matematis.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian diatas, masalah yang dapat dirumuskan adalah bagaimana menyusun struktur pengendali logika *fuzzy* yang dapat menggantikan blok PSS konvensional dan *Proportional Integral Derivative* PSS (PIDPSS). Pengendali logika *fuzzy* ini menggunakan sinyal masukan berupa perubahan kecepatan rotor dan menggunakan aturan defuzifikasi Sugeno. Selain itu pengendali logika *fuzzy* ini juga diharapkan mampu memperbaiki penurunan nilai *overshoot* dan *settling time* yang lebih cepat, sehingga dapat memberikan peredaman osilasi yang lebih baik dari pengendali PSS konvensional dan PIDPSS. Hal-hal yang terkait dengan perancangan (desain) suatu sistem logika *fuzzy* ini meliputi pendefinisian karakteristik model

secara fungsional dan operasional, dekomposisi variabel model menjadi himpunan fuzzy, aturan-aturan fuzzy, dan penentuan metode defuzifikasi untuk tiap-tiap variabel solusi.

1.3 Tujuan Penelitian

Dari penelitian mengenai implementasi logika fuzzy dalam meningkatkan kinerja *Proportional Integral Derivative Power System Stabilizer* ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui unjuk kerja, tanggapan respons frekuensi, dan perubahan kecepatan sudut rotor pada pengendali logika fuzzy yang menggantikan blok PSS konvensional dan *Proportional Integral Derivative* PSS (PIDPSS) dalam meredam osilasi sistem akibat gangguan yang terjadi pada sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB), kemudian membandingkannya dengan pengendali *Power System Stabilizer konvensional* (PSS konvensional) yang menggunakan rangkaian *washout* dan *lead Compensation* (Yu, 1983) dan PIDPSS.
2. Mengetahui unjuk kerja pengendali logika fuzzy dengan tiga fungsi keanggotaan, kemudian membandingkannya hasilnya dengan unjuk kerja pengendali logika fuzzy yang menggunakan lima dan tujuh fungsi keanggotaan.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan metode yang lebih cepat dan efektif untuk memonitor atau mengetahui kestabilan sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa area dan terinterkoneksi. Sehingga jika terjadi ketidakstabilan pada sistem akan dapat segera diketahui untuk dilakukan penanggulangan atas ketidakstabilan sistem tersebut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Penelitian didalam permasalahan stabilitas dinamik dapat dideskripsikan dengan menggunakan persamaan differensial linear dan akibat yang terjadi berupa osilasi frekuensi rendah dapat distabilkan kembali dengan penambahan sinyal kendali tambahan. Penambahan sinyal kendali tersebut dilakukan dengan menambahkan blok PSS dengan masukan berupa perubahan kecepatan rotor, perubahan frekuensi atau perubahan akselerasi daya. Penalaan sinyal kendali tambahan secara konvensional dilakukan dengan menghitung parameter PSS berdasarkan data sistem yang telah diketahui (Yu, 1983).

Penggunaan konstanta *proportional* (K_p), konstanta *integral* (K_i), dan konstanta *derivative* (K_d) secara bersamaan untuk menambahkan sinyal kendali kedalam sistem eksitasi generator sinkron dilakukan oleh Hsu dan Liou (1987). Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah nilai *eigen* yang lebih negatif disebelah kiri sumbu imajiner dapat tercapai, tetapi *settling time* (ST) yang terjadi masih cukup lama untuk mencapai kestabilan sehingga perlu ditala lagi untuk ketiga konstantanya.

Penggunaan logika *fuzzy* untuk penalaan sinyal PSS meliputi perhitungan parameter PSS, penentuan sinyal keluaran blok PSS, menganalogikan kompensator mendahului dengan penentuan konstanta proporsional dan derivatif, mengubah sinyal analog ke digital, merancang sebuah sistem sehingga sinyal digital tersebut menjadi sinyal input kedalam *micro computer*, serta mengubah lagi sinyal digital tersebut kedalam sinyal analog dilakukan oleh Hiyama dkk (1994). Sistem pengendali logika fuzzy yang bekerja berdasarkan sistem *micro computer* disebut *Advanced Fuzzy Logic Power System Stabilizer* (AFLPSS).

Penerapan sistem kendali logika *fuzzy* pada sistem eksitasi akan mengakumulasikan cara kerja PSS dilakukan oleh Hoang dkk (1996). Sistem kendali logika *fuzzy* yang berfungsi sebagai *Fuzzy Power System Stabilizer* (FPSS) yang menggantikan blok PSS konvensional akan bekerja berdasarkan perubahan input dan output yang terjadi tanpa memperhitungkan kelakuan parameter dan model sistem yang sebenarnya, sehingga mampu menyesuaikan terhadap perubahan yang terjadi. Pada penelitian ini digunakan himpunan segitiga dengan tujuh fungsi keanggotaan dan aturan (*rule*) Mamdani.

Penggunaan model sistem *multi-machine* dengan teknik penalaan secara otomatis menggunakan algoritma genetik untuk mendesain bobot matrik dan fungsi keanggotaan aturan-aturan *fuzzy* pada PSS dengan input masukan berupa perubahan kecepatan rotor dan perubahan daya elektrik dilakukan oleh Robandi (2002). Hasil yang diperoleh adalah algoritma genetik dapat mengoptimalkan fungsi keanggotaan aturan logika *fuzzy*, tetapi model ini kurang sesuai bila diterapkan pada sistem adaptif dikarenakan perlunya waktu yang cukup lama untuk sistem proses pembelajaran.

Penelitian tentang studi PSS dengan PID adaptif berbasis logika *fuzzy* dilakukan oleh Wakimin (2001). Pada penelitian ini sistem adaptif berbasis logika *fuzzy* digunakan untuk menala parameter-parameter konstanta penguatan *proportional*, *derivative*, dan *integral*. Kemudian dari hasil penelitian ini didapat perbandingan hasil antara sistem PSS dengan PID konvensional yang ditala berdasarkan aturan Ziegler-Nichols dan PID adaptif berbasis logika *fuzzy* dengan menggunakan lima fungsi keanggotaan.

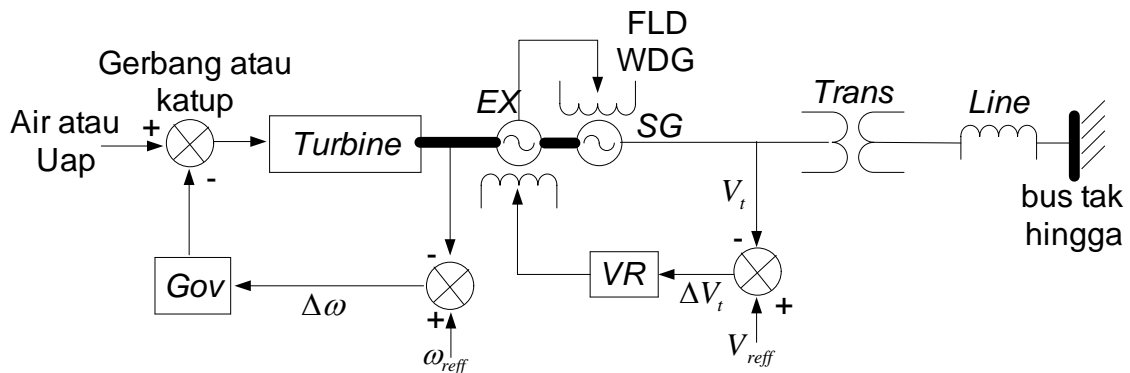
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Secara umum stabilitas sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan komponen-komponen pada sistem tenaga listrik dalam memberikan keserempakan atau keseimbangan. Selama sistem dalam operasi normal, komponen-komponen dari sistem tenaga listrik memberikan keseimbangan dan saling mempengaruhi antara komponen yang satu dengan komponen yang lain. Misalnya jika terjadi gangguan atau perubahan secara mendadak, komponen-komponen sistem tenaga listrik tidak dapat seimbang. Dengan kata lain perbedaan kondisi komponen-komponen sistem tenaga listrik tidak bisa mengembalikan pada kondisi serempak.

Berkaitan dengan permasalahan stabilitas dikenal stabilitas keadaan tetap (*steady-state*), stabilitas dinamik, dan stabilitas transien. Stabilitas keadaan tetap berkaitan dengan keandalan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keadaan sinkron terhadap gangguan kecil perlahan, dan gangguan kecil ini dapat diatasi atau kembali stabil dengan eksitasi konvensional dan pengaturan *governor*. Stabilitas dinamik berkaitan dengan kestabilan sistem tenaga listrik setelah adanya gangguan kecil seperti perubahan tegangan dan beban secara mendadak dan akibat dari gangguan ini dapat distabilkan kembali ke titik operasi semula. Stabilitas transien berkaitan dengan kestabilan sistem setelah adanya gangguan yang besar seperti gangguan hubung singkat dan sistem dapat menuju kondisi tidak stabil atau menuju titik kestabilan yang baru.

2.3 Komponen Dasar Sistem Tenaga Listrik

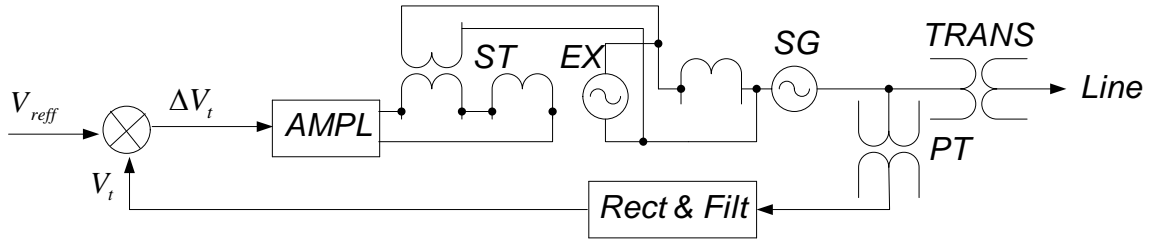
Komponen dasar sistem pembangkit daya listrik diperlihatkan pada Gambar 1 (Yu, 1983). Pada Gambar 2.1, turbin (*Turbine*) dan *governor* (*Gov*) dengan kecepatan umpan balik $\Delta\omega$, generator (*SG*), eksitasi atau penguat (*EX*), dan regulator atau pengatur tegangan (*VR*) dengan tegangan umpan balik ΔV_t , transformator (*Trans*), dan jaringan transmisi (*Line*).



Gambar 1 Komponen dasar pembangkit tenaga listrik

Turbin berfungsi sebagai konversi energi mekanik pada proses termodinamika. Energi dari turbin dikonversikan melalui sirip turbin dan dialihkan ke poros yang terhubung ke generator. Bila putaran berubah, *governor* berfungsi sebagai umpan balik untuk mencapai nilai keseimbangan baru pada sistem. Generator sinkron berfungsi sebagai konversi energi mekanik ke energi listrik, biasanya tipe generator sinkron yang dipakai adalah tiga fase, dan berbasis pada hukum induksi Faraday. Komponen utamanya adalah (1) belitan jangkar, (2) belitan medan, dan (3) masukan energi mekanik dalam bentuk gaya dari suatu torsi yang menyebabkan gerak relatif medan terhadap belitan jangkar.

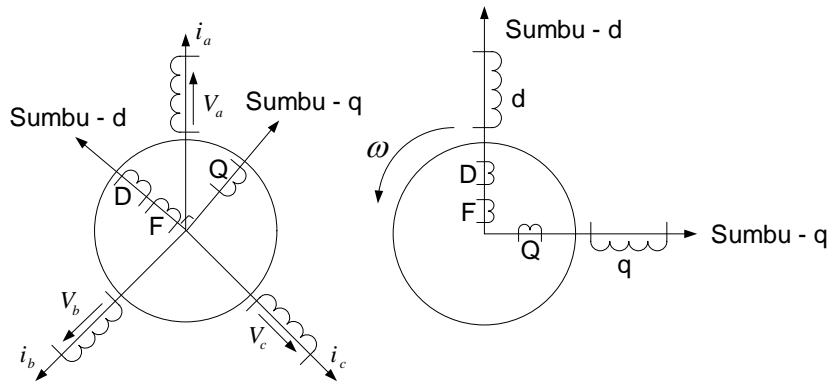
Pada Gambar 2 diperlihatkan sistem eksitasi dan pengaturan tegangan (*voltage regulator VR*). Tegangan terminal generator sinkron (*SG*) diukur melalui trafo potensial (*PT*) yang kemudian disearahkan dan difilter, kemudian dibandingkan dengan tegangan referensi (V_{ref}) untuk memperoleh deviasi perubahan tegangan (ΔV_t). Setelah dilewatkan melalui penguat (*AMPL*) sinyal penguatan ini digunakan untuk mengendalikan eksitasi medan generator. Kerja umpan balik demikian akan menaikkan sistem eksitasi yaitu bila tegangan terminal generator turun dibawah tegangan referensi dan mengurangi sistem eksitasi yaitu bila tegangan terminal naik diatas tegangan referensi. Untuk menstabilkan sistem eksitasi secara sendiri dilakukan oleh stabilizing Transformer (*ST*).



Gambar 2 Sistem eksitasi dan pengaturan tegangan

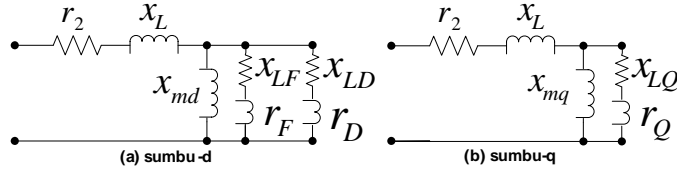
2.4 Pemodelan Generator Sinkron Tiga Fase

Generator sinkron merupakan komponen yang penting dalam sistem tenaga listrik. Generator sinkron berfungsi untuk mengkonversikan tenaga mekanik yang berasal dari suatu penggerak mula (*prime mover*) menjadi tenaga listrik. Generator sinkron mempunyai dua bagian utama yaitu bagian yang berputar (rotor) dan bagian yang diam (stator). Generator sinkron dapat digambarkan secara skematis dengan model *Park* seperti pada Gambar 3. *Park* memperlihatkan bahwa tiga buah kumparan jangkar pada stator telah diganti dengan dua buah kumparan jangkar sumbu d dan sumbu q. Terdapat dua buah kumparan jangkar yaitu kumparan d pada sumbu d dan kumparan q pada sumbu q. Terdapat pula dua buah kumparan peredam D dan Q yang terletak pada sumbu d dan sumbu q serta sebuah kumparan F yang terletak pada sumbu d.



Gambar 3 Model Mesin Sinkron *Park*

Dengan merujuk pada Gambar 3, maka pada Gambar 4 memperlihatkan rangkaian ekuivalen sumbu-d dan sumbu-q mesin sinkron, yang sama dengan rangkaian ekuivalen transformator tiga belitan dan dua belitan.



Gambar 4 Rangkaian ekivalen sumbu-d dan sumbu-q mesin sinkron

Rangkaian ekivalen pada Gambar 4 kemudian kita turunkan kedalam persamaan-persamaan:

Persamaan reaktansi sinkron

$$x_d = x_L + x_{md}, x_q = x_L + x_{mq} \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan total reaktansi medan

$$x_F = x_{LF} + x_{md}, x_D = x_{LD} + x_{md}, x_Q = x_{LQ} + x_{mq} \dots \dots \dots (2)$$

Persamaan reaktansi peralihan (transient)

$$x'_d = x_L + \frac{x_{LF} \cdot x_{md}}{x_{LF} + x_{md}} \dots \dots \dots (3)$$

Persamaan reaktansi sub peralihan (subtransient)

$$T'_{d0} = \frac{1}{\omega_b r_F} (x_{LF} + x_{md}) \dots \dots \dots (4)$$

dimana:

x_d dan x_d : komponen sumbu langsung dan melintang dari reaktansi tunak.

x'_d : komponen sumbu langsung dari reaktansi peralihan (transient).

x_{md} dan x_{mq} : komponen sumbu langsung dan melintang dari reaktansi magnetisasi.

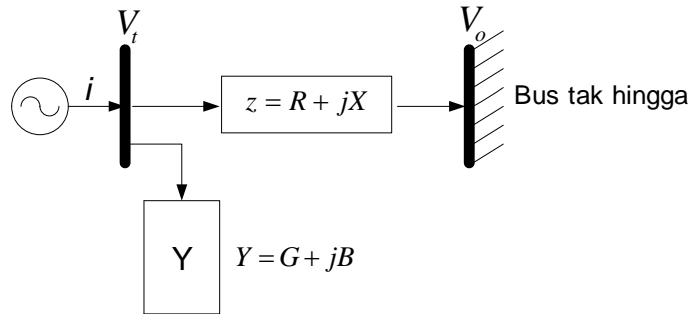
r_F dan x_{LF} : resistansi dan reaktansi bocor kumparan medan.

x_D dan x_Q : komponensumbu langsung dan melintang dari reaktansi peredaman

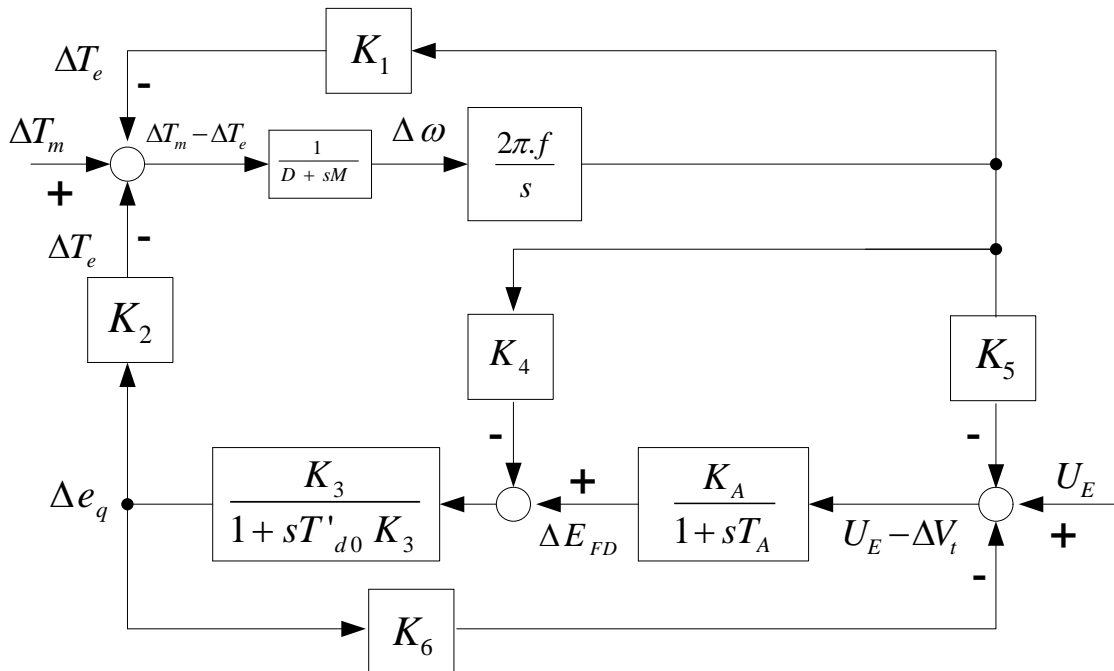
r_2 dan x_L : resistansi dan reaktansi dari belitan sumbu-d dan sumbu-q.

2.5 Sistem Tenaga *Single Machine Infinite Bus* (SMIB)

Plant yang digunakan dalam simulasi ini adalah suatu sistem *single machine infinite bus* (SMIB) dengan sebuah mesin (generator) tunggal terhubung pada suatu *bus* tak hingga. Suatu model SMIB dengan generator, arus jangkar i , tegangan terminal V_t , tegangan *bus* tak hingga V_o , impedansi saluran transmisi Z , dan admitansi beban lokal Y ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model Sistem Tenaga SMIB.



Gambar 6. Diagram Blok Fungsi Alih Sistem SMIB (Yu, 1983).

Diagram blok fungsi alih dalam simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 6 (Yu, 1983). Pada blok diagram ini ada dua simpal utama yaitu simpal mekanik dan simpal elektrik, dimana:

- $\Delta\omega$: perubahan kecepatan rotor.
- $\Delta\delta$: perubahan sudut rotor.
- Δe_q : perubahan tegangan terminal.
- ΔE_{FD} : perubahan tegangan medan generator.
- ΔT_m : perubahan torsi mekanik.
- ΔT_e : perubahan torsi elektrik.
- M : konstanta inersia.

D : koefisien peredaman mekanik.

$2\pi f$: kecepatan sinkron.

T'_{d0} : konstanta waktu transien sumbu-d.

T_A : konstanta waktu dari AVR.

K_A : penguat regulator tegangan.

K_1 : perubahan torsi elektrik untuk suatu perubahan sudut rotor dengan fluks gandeng tetap dalam sumbu-d.

K_2 : perubahan torsi elektrik untuk perubahan fluks gandeng sumbu-d dengan sudut rotor tetap.

K_3 : impedansi eksternal dengan $R = 0$ (faktor impedansi)

K_4 : pengaruh demagnetisasi untuk perubahan sudut rotor $\Delta\delta$.

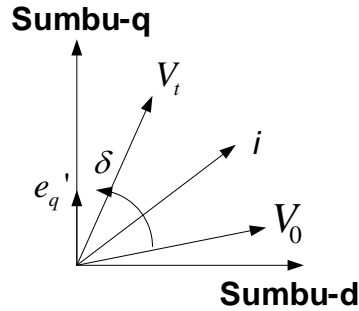
K_5 : perubahan tegangan terminal V_t untuk suatu perubahan kecil sudut rotor dengan fluks gandeng sumbu-d tetap.

K_6 : perubahan tegangan terminal V_t untuk suatu perubahan kecil fluks gandeng sumbu-d dengan sudut rotor tetap.

Perubahan torsi ($\Delta T_m - \Delta T_e$) digunakan sebagai masukan dan sudut torsi sebagai keluaran. Simpal mekanik mempunyai dua buah blok fungsi alih. Blok pertama didasarkan pada persamaan kesetimbangan torsi dan blok kedua menunjukkan hubungan kecepatan sudut rotor.

Dalam simpal elektrik sebagai masukan adalah ΔE_{FD} dan sebagai keluarannya adalah Δe_q . Blok ini terdiri dari fungsi alih yang menggambarkan rangkaian medan yang dipengaruhi oleh reaksi jangkar dan penguatan K_3 . Sinyal elektrik ini mempunyai kendali tambahan U_E dikurangi perubahan tegangan terminal V_t sebagai masukan dan perubahan internal Δe_q sebagai keluaran.

Hubungan fasor antara arus jangkar i , tegangan terminal V_t , tegangan bus tak-hingga V_0 , dan tegangan internal e_q' pada Gambar 5 dapat dinyatakan seperti pada Gambar 7. Sudut torsi didefinisikan sebagai sudut antara tegangan terminal bus tak hingga V_0 dan tegangan terminal e_q' .



Gambar 7. Fasor arus dan tegangan.

Persamaan-persamaan untuk i , V_t , dan δ adalah:

$$I = i_d + j i_q \dots\dots\dots(5)$$

$$V_t = V_d + j V_q \dots\dots\dots(6)$$

Dimana: i_d dan i_q adalah komponen arus jangkar I .

V_d dan V_q Adalah komponen tegangan terminal V_t .

$$\delta = \angle(e_q, V_0) \dots\dots\dots(7)$$

Sedangkan fasor V_0 :

$$V_0 = V_0(\sin \delta + j \cos \delta) \dots\dots\dots(8)$$

Konstanta dan parameter berikutnya adalah:

$$1 + ZY = C_1 + j C_2$$

Tetapan parameter yang diperlukan dalam analisis adalah

$$R_1 = R - C_2 x'_d \dots\dots\dots(9)$$

$$R_2 = R - C_2 x_q \dots\dots\dots(10)$$

$$X_1 = X + C_1 x_q \dots\dots\dots(11)$$

$$X_2 = X + C_1 x'_d \dots\dots\dots(12)$$

Dimana:

$$C_1 = 1 + RG - XB \dots\dots\dots(13)$$

$$C_2 = XG + RB \dots\dots\dots(14)$$

$$Z_e = R_1 R_2 + X_1 X_2 \dots\dots\dots(15)$$

$$Y_d = (C_1 X_1 - C_2 X_2) / Z_e^2 \dots\dots\dots(16)$$

$$Y_q = (C_1 X_1 + C_2 X_2) / Z_e^2 \dots\dots\dots(17)$$

Komponen arus jangkar i_d dan i_q diberikan dengan persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} \cdot e'_{q0} - \frac{V_0}{Z_e} \begin{bmatrix} R_2 & X_1 \\ -X_2 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(18)$$

Linearisasi persamaan diatas adalah:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_d \\ Y_q \end{bmatrix} \Delta e_q + \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} \Delta \delta \dots\dots\dots(19)$$

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \frac{V_0}{Z_e} \begin{bmatrix} -R_2 & X_1 \\ X_2 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \delta_0 \\ \cos \delta_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(20)$$

Dimana δ_0 adalah sudut awal.

Dalam penentuan konstanta (K), K_1 dan K_2 dari torsi elektrik mesin sinkron pada kecepatan mendekati kecepatan sinkron dapat dinyatakan secara pendekatan:

$$T_e \approx P_e = i_d V_d + i_q V_q \text{ per unit} \dots\dots\dots(21)$$

Dengan substitusi V_d dan V_q pada persamaan (21), diperoleh:

$$T_e = i_q e_q + (x_q - x'_d) i_d i_q \dots\dots\dots(22)$$

Dengan pelinearisasi dan subtitusi Δi_d dan Δi_q pada persamaan (19):

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta e_q \dots\dots\dots(23)$$

Dengan:

$$\begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i_{q0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_d & F_q \\ Y_d & Y_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (x_q - x'_d) i_{q0} \\ e'_{q0} + (x_q - x'_d) i_{d0} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(24)$$

K_3 dan K_4 dari persamaan medan. Persamaan tegangan kumparan medan yang telah dilinearisasi dapat dituliskan menjadi:

$$(1 + sT'_{d0}) \Delta e_q = \Delta E_{FD} - (x_d - x'_d) \Delta i_d \dots\dots\dots(25)$$

$$(1 + sT_A) \Delta E_{FD} = K_A (U_E - \Delta V_t) = K_A (U_E - K_5 \Delta \delta - K_6 \Delta e_q) \dots\dots\dots(36)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka *vector variable state space* menjadi:

$$x = [\Delta \omega \quad \Delta \delta \quad \Delta e_q \quad \Delta E_{FD}]^T \dots\dots\dots(37)$$

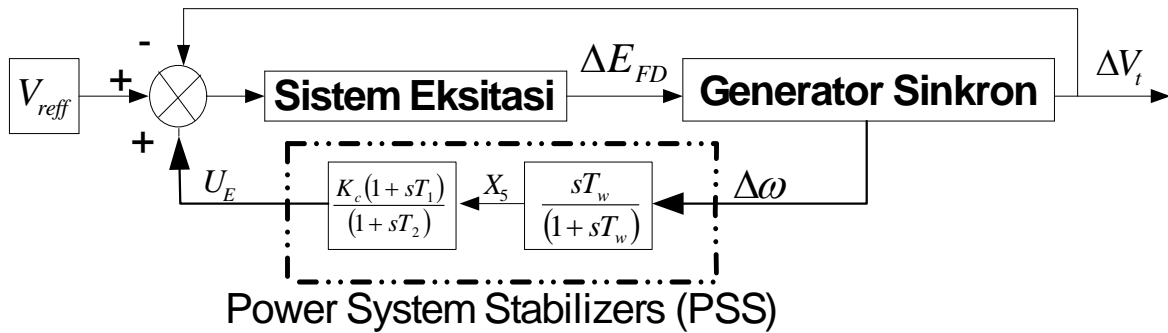
Dan elemen matriks sistem dapat diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta e_q} \\ \dot{\Delta E_{FD}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -D & -K_1 & -K_2 & 0 \\ \frac{M}{\omega_b} & \frac{M}{0} & \frac{M}{0} & 0 \\ 0 & -K_4 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T'_{d0}}{-K_A K_5} & \frac{T'_{d0} K_3}{-K_A K_6} & \frac{T'_{d0}}{-1} \\ 0 & \frac{T_A}{T_A} & \frac{T_A}{T_A} & \frac{T_A}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta e_q \\ \Delta E_{FD} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(38)$$

Karena ada ketinggalan fase $(1 + sT_A)$ dan $(1 + sT'_{d0} K_3)$ untuk $s = j\omega_n$, sebuah kompensator lead (mendahului) fase harus dimasukkan kedalam perancangan sistem eksitasi, sehingga torsi peredaman ΔT_E sefase dengan $\Delta\omega$ pada frekuensi osilasi. Selain itu, kompensator ini juga harus mempunyai perolehan (gain) yang memberikan nilai magnitude peredaman yang memadai.

2.6 Kendali Power System Stabilizer (PSS)

Blok diagram *Power System Stabilizer* (PSS) terdiri dari rangkaian *washout* dan kompensator seperti pada Gambar 8. Rangkaian *washout* diperlukan untuk mengeliminasi bias keadaan tetap pada keluaran PSS, sedangkan kompensator diberikan untuk derajat mendahului (*lead*).



Gambar 8. Blok Diagram PSS

T_w merupakan konstanta waktu *washout*, K_c merupakan penguat PSS, T_1 dan T_2 merupakan konstanta waktu derajat *lead*, $\Delta\omega$ merupakan sinyal masukan untuk PSS berupa perubahan kecepatan rotor, dan U_E merupakan sinyal keluaran PSS yang ditambahkan kedalam sistem eksitasi sebagai sinyal kendali tambahan (*supplementary control*).

Untuk menentukan nilai K, T, dan T dapat dihitung dari blok diagram sistem tenaga listrik (Yu, 1983) sebagai:

1. Mendesain PSS dari frekuensi mode mekanis alami tak teredam (*undamped natural mechanical mode frequency*). Frekuensi mode mekanis alami tak teredam diberikan oleh

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_b \cdot K_1}{M}} \dots\dots\dots(39)$$

2. Menentukan fungsi alih G_E bagian maju (*forward path*) sistem tenaga, yakni fungsi alih dari keluaran PSS ke torsi elektrik. Dari perhitungan fungsi alih ini dapat ditentukan apakah diperoleh fase *lead* atau *lag*. Fase *lead* atau *lag* $G_E = \angle G_E|_s$.

3. Mendesain kompensasi fase *lead* atau *lag* T_w . Jika sinyal masukan untuk PSS dipilih T_w , maka

$$\angle G_E + \angle G_c = 0 \dots\dots\dots(40)$$

Kemudian menentukan konstanta waktu derajat *lead* atau *lag*

$$G_c = \frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \dots\dots\dots(41)$$

4. Mendesain penguat PSS K_c

$$K_c = \frac{D_E}{|G_E|_s |G_c|_s} \dots\dots\dots(42)$$

Dimana D_E merupakan peredaman elektrik, untuk frekuensi mode mekanis alami tak teredam $D_E = 2 \cdot \zeta_n \cdot \omega_n \cdot M$ dan ζ_n merupakan koefisien peredaman berkisar antara 0,1 sampai 0,3 pu.

Diagram fungsi alih dari sinyal eksitasi tambahan dapat dinyatakan sebagaimana terdapat pada Gambar 8. Persamaan yang diperoleh dari fungsi alih tersebut adalah

$$(1 + sT_w)X_5 = sT_w \Delta \omega \dots\dots\dots(43)$$

$$(1 + sT_2)U_E = K_c (1 + sT_1)X_5 \dots\dots\dots(44)$$

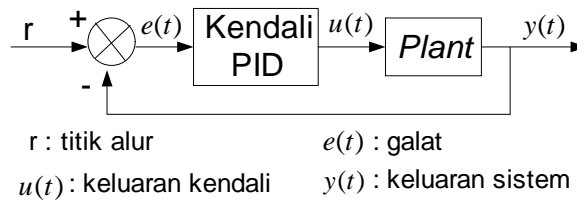
Vektor variabel keadaan baru yang terbentuk adalah

$$x = [\Delta \omega, \Delta \delta, \Delta e_q, \Delta E_{FD}, X_5, U_E]^T \dots\dots\dots(45)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta e_q} \\ \dot{\Delta E_{FD}} \\ \dot{X_5} \\ \dot{U_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{(T'_{d0} K_3)} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_A K_5}{T_A} & \frac{-K_A K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & \frac{-1}{T_w} & 0 \\ 0 & \frac{-K_C K_1 T_1}{MT_2} & \frac{-K_C K_2 T_1}{MT_2} & 0 & \frac{K_C}{T_2} \left(1 - \frac{T_1}{T_w}\right) & \frac{-1}{T_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta e_q \\ \Delta E_{FD} \\ X_5 \\ U_E \end{bmatrix} \dots\dots\dots(46)$$

2.7 Kendali Proportional Integral Derivative (PID)

Banyak sistem terkarakteristikan oleh hubungan masukan-keluaran dikarenakan hubungan internalnya tidak signifikan. Kendali sederhana seperti *proportional* (P), *integral* (I), dan *derivative* (D) dapat digunakan sebagai pengendali ataupun gabungannya yaitu PID seperti terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Sistem sederhana dengan kendali PID

Kendali PID menggabungkan keseluruhan kebaikan dari masing-masing komponen pembentuknya. Kendali tersebut digunakan untuk memperbaiki isyarat galat $e(t)$ dengan cara mengintegrasikan dan menurunkan isyarat-galat untuk memperoleh isyarat galat yang mendekati nol. Persamaan kendali dengan aksi gabungan itu diberikan oleh persamaan (47)

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \tau_d \frac{de(t)}{dt} \dots\dots\dots(47)$$

Dimana:

K_p : penguatan *proportional*

τ_i : waktu *integral*

τ_d : waktu *derivative*

Kendali *proportional* (K_p) akan memberikan efek mengurangi waktu naik, tetapi tidak menghapus kesalahan keadaan tunak. Kendali *integral* (K_i) akan memberikan efek menghapus kesalahan keadaan tunak, tetapi akan berakibat memburuknya respon transient. Kendali *derivative* (K_d) akan memberikan efek meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi *overshoot*, dan menaikkan respon transfer. Efek dari setiap kendali (K_p , K_i , K_d) dalam sistem loop tertutup diperlihatkan pada tabel berikut ini:

Tabel 1 Korelasi kendali PID

Respon loop Tertutup	Waktu naik	<i>Overshoot</i>	Waktu turun	Kesalahan keadaan tunak
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
K_d	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K_i	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

Hubungan korelasi yang terdapat pada tabel tersebut mungkin tidak sepenuhnya akurat, karena K_p , K_i , dan K_d adalah saling bebas. Pada kenyataannya, mengubah salah satu variabel dapat mengubah dua yang lainnya. Karena alasan tersebut, tabel ini hanya digunakan sebagai referensi saat kita menentukan nilai untuk K_p , K_i , dan K_d .

2.7.1 Pengendali PIDPSS

Berdasarkan pada persamaan (44) terdapat blok *lead compensator* dengan $H_2(s) = K_c \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)$, blok *lead compensator* ini dapat dianalogikan dengan blok *Proportional*

Derivative (PD) (Wolovich, 1994):

$$H_2(s) = K_c \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) = K_c \left(\frac{T_1s+1}{\alpha T_1s+1} \right) = K_p \frac{\left(\frac{K_d}{K_p} s+1 \right)}{\left(\frac{K_d}{NK_p} s+1 \right)} = H_{PD}(s) \dots\dots\dots(48)$$

$$K_p = K_c$$

Dimana: $K_d = K_c T_1$, sehingga $T_1 = \frac{K_d}{K_p} \dots\dots\dots(49)$

$$N = \frac{1}{\alpha}$$

$$G_c(s) = K_p + K_d s + \frac{K_i}{s} = (1 + K_{d2} s) \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} \right) \dots\dots\dots(50)$$

Persamaan (50) merupakan persamaan orde dua yang dipecah kedalam persamaan orde satu (kuo,1995), sehingga didapatkan

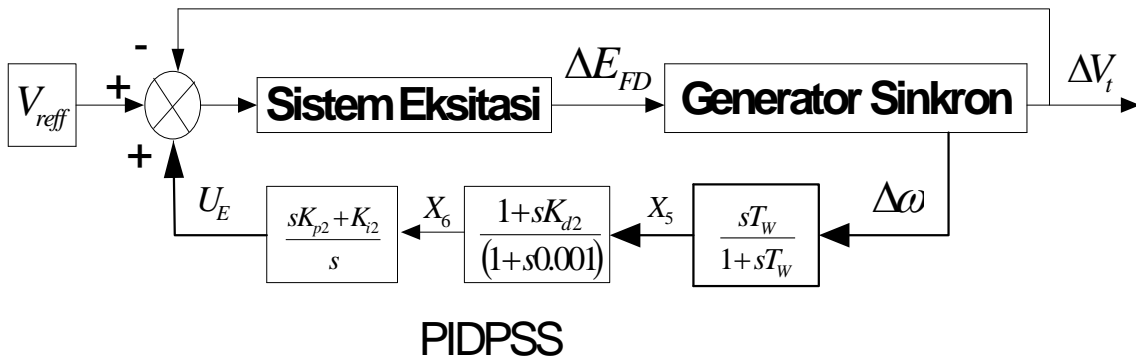
$$K_p = K_{p2} + K_{d2} \cdot K_{i2} \dots\dots\dots(51)$$

$$K_d = K_{d2} \cdot K_{p2} \dots\dots\dots(52)$$

$$K_i = K_{i2} \dots\dots\dots(53)$$

2.7.2 Fungsi alih PIDPSS

Diagram fungsi alih dari sinyal PIDPSS dapat dinyatakan pada Gambar 10 sebagai:



Gambar 10. Blok Diagram Fungsi Alih PIDPSS

Persamaan yang diperoleh dari fungsi alih tersebut adalah:

$$(1 + sT_w).X_5 = sT_w.\Delta\omega \dots\dots\dots(54)$$

$$(1 + s0.001).X_6 = (1 + sK_{d2}).X_5 \dots\dots\dots(55)$$

$$sU_E = (sK_{p2} + K_{i2}).X_6 \dots\dots\dots(56)$$

Vektor variabel keadaan baru yang terbentuk adalah:

$$x = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e_q, \Delta E_{FD}, X_5, X_6, U_E]^T \dots\dots\dots(57)$$

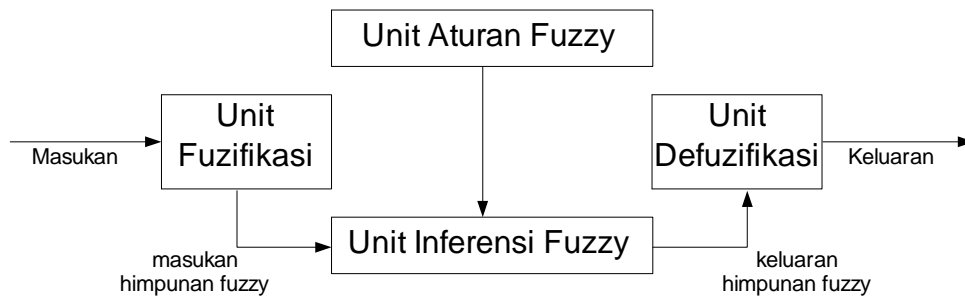
$$\begin{bmatrix} \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\omega_b} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta e_q} \\ \dot{\Delta E_{FD}} \\ \dot{X_5} \\ \dot{X_6} \\ \dot{U_E} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-D}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\omega_b}{M} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_4}{T'_{d0}} & \frac{-1}{(T'_{d0} K_3)} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-K_A K_5}{T_A} & \frac{-K_A K_6}{T_A} & \frac{-1}{T_A} & 0 & \frac{K_A}{T_A} & 0 \\ 0 & \frac{-K_1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & \frac{-1}{T_w} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1000.K_1 K_{d2}}{M} & \frac{-1000.K_2 K_{d2}}{M} & 0 & 1000 - \left(\frac{1000 K_{d2}}{T_w}\right) & -1000 & 0 \\ 0 & \frac{-1000.K_1 K_{p2} K_{d2}}{M} & \frac{-1000.K_2 K_{p2} K_{d2}}{M} & 0 & K_{p2} \left(1000 - \frac{1000 K_{d2}}{T_w}\right) & K_{i2} - 1000 K_{p2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega \\ \Delta\delta \\ \Delta e_q \\ \Delta E_{FD} \\ X_5 \\ X_6 \\ U_E \end{bmatrix} \dots(58)$$

2.8 Pengendali Logika Fuzzy

Pengendali logika fuzzy adalah suatu pengendali sistem yang menggunakan logika fuzzy dalam pengendaliannya. Dalam mendesain pengendali logika fuzzy ini terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain:

1. Data-data yang menyatakan fungsi keanggotaan himpunan fuzzy
2. Aturan fuzzy, yaitu peraturan yang menentukan nilai hasil keluaran pengendali bagi setiap nilai masukan.

Suatu pengendali logika fuzzy memiliki konfigurasi dasar seperti terlihat pada Gambar 11. Adapun bagian-bagiannya adalah:



Gambar 11. Pengendali logika fuzzy

2.8.1 Unit Fuzifikasi

Proses fuzifikasi merupakan proses untuk mengubah variabel *non fuzzy* (variabel numerik) menjadi variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Nilai masukan-masukan yang masih dalam bentuk variabel numerik yang telah dikuantisasi sebelum diolah oleh pengendali logika *fuzzy* harus diubah terlebih dahulu kedalam variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun

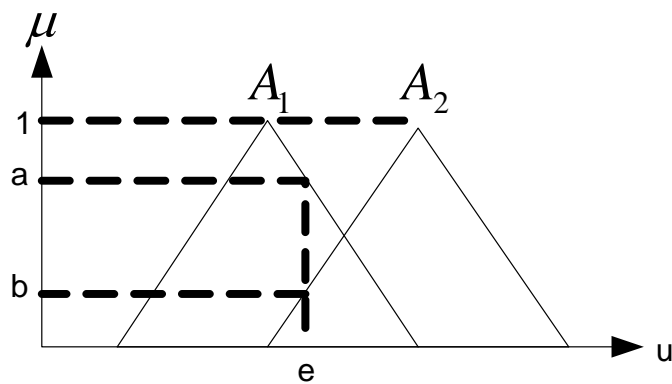
maka dari nilai-nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna nantinya untuk proses pengolahan secara *fuzzy* pula.

Dengan kata lain fuzifikasi merupakan pemetaan titik-titik numerik (*crisp points*) $x = (x^1, x^2, \dots, x^n)^T \in U$ ke himpunan fuzzy A di U . U adalah semesta pembicaraan. Paling tidak ada dua kemungkinan pemetaan yaitu:

1. Fuzifikasi *singleton*: A adalah fuzzy singleton dengan support \underline{x} , artinya, $\mu_A(\underline{x})=1$ untuk $\underline{x}' = \underline{x}$ dan $\mu_A(\underline{x}')=0$ untuk $\underline{x}' \in U$ yang lain dengan $\underline{x}' \neq \underline{x}$.
2. Fuzifikasi *nonsingleton*: $\mu_A(\underline{x})=1$ dan $\mu_A(\underline{x}')$ menurun dari 1 sebagaimana \underline{x}'

bergerak menjauh dari \underline{x} . Sebagai contoh: $\mu_A(x') = \exp\left[-\frac{(x'-x)^2}{\sigma^2}\right]$ (59)

dimana σ^2 adalah parameter yang menentukan bentuk dari $\mu_A(\underline{x}')$. Proses fuzifikasi tersebut dapat dijelaskan pada Gambar 12.



Gambar 12. Proses Fuzifikasi.

Pada Gambar 12 dapat dilihat bahwa sinyal e mengalami fuzifikasi menjadi besaran *fuzzy* A_1 dengan derajat keanggotaan a dan besaran *fuzzy* A_2 dengan derajat keanggotaan b .

2.8.2 Unit Aturan *Fuzzy* (*Fuzzy Rule Base*)

Unit ini terdiri dari aturan *fuzzy* jika-maka. Aturan ini merupakan inti pada pengendalian dan dibuat dengan pertimbangan rasio dan efisiensi. Sebagai contoh dapat dituliskan sebagai:

Jika x_1 adalah A_1 dan ... dan x_m adalah A_m maka y adalah B .

Dimana A_1 dan B adalah himpunan keanggotaan *fuzzy* sedangkan x_1 adalah masukan pengendali dan y adalah keluaran pengendali.

2.8.3 Unit Inferensi *Fuzzy* / Unit Penarik Kesimpulan (*fuzzy Inference System*)

Misal pada aturan *fuzzy* jika-maka, himpunan *fuzzy* A berada dalam semesta pembicaraan U sedangkan himpunan *fuzzy* B berada dalam semesta pembicaraan V , maka fungsi dari unit pengolah *fuzzy* adalah memetakan himpunan *fuzzy* A di U ke himpunan *fuzzy* B di V sesuai dengan aturan *fuzzy* yang ditetapkan.

Dalam memetakan himpunan ini terdapat beberapa metode, salah satu metode yang banyak digunakan adalah metode Mamdani. Penjabaran dari metode Mamdani adalah sebagai berikut:

$$\mu_{A_1x_1 \dots x_n} (x_1, \dots, x_n) = \mu_{A_1}(x_1) * \dots * \mu_{A_n}(x_n) \dots \dots \dots (60)$$

Sehingga bila ada pernyataan pada *rule base* yang menyatakan: jika $\langle FP_1 \rangle$ maka $\langle FP_2 \rangle$, dalam bentuk persamaan logika dinyatakan $p \rightarrow q = p \wedge q$ maka implikasi Mamdani adalah:

$$\mu_{QMM}(x, y) = \min[\mu_{FP1}(x), \mu_{FP2}(y)] \dots \dots \dots (61)$$

Terdapat dua macam metode inferensi *fuzzy* yaitu:

1. Metode inferensi *fuzzy* dengan operasi maksimum-minimum (*Max-Min*)
2. Metode inferensi *fuzzy* dengan operasi perkalian (*Max-Dot*)

Seandainya kita memiliki basis aturan kendali *fuzzy* dengan dua aturan:

Aturan ke-1: jika x adalah A_1 dan y adalah B_1 maka z adalah C_1 .

Aturan ke-2: jika x adalah A_2 dan y adalah B_2 maka z adalah C_2 .

Misalkan *fire-strength* untuk aturan ke- i dinyatakan dengan α_i dan untuk masukan x_0 dan y_0 , *fire-strength* α_1 dan α_2 dari basis aturan dinyatakan oleh:

$$\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0) \dots \dots \dots (62)$$

$$\alpha_2 = \mu_{A_2}(x_0) \wedge \mu_{B_2}(y_0) \dots \dots \dots (63)$$

2.8.3.1 Metode *Max-Min*

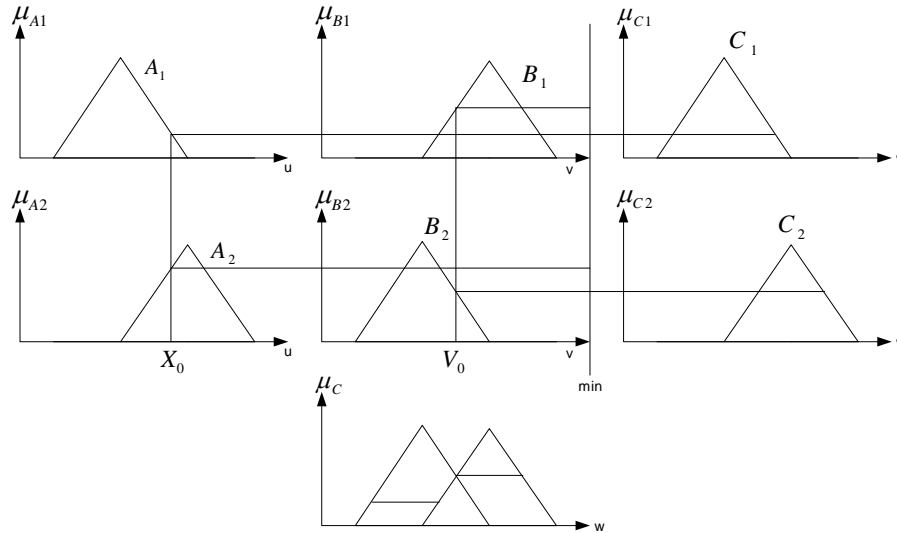
Pada metode *Max-Min*, pengambilan keputusan didasarkan pada aturan operasi minimum Mamdani:

$$R_c = A \times B = \int_{u \times v} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) / (u, v) \dots \dots \dots (64)$$

Keputusan yang diambil berdasarkan aturan ke- i dapat dinyatakan dengan $\alpha_i \wedge \mu_{c_i}(w)$, sehingga keanggotaan C adalah titik yang diberikan oleh

$$\mu_c(w) = (\alpha_1 \wedge \mu_{c_1}(w)) \vee (\alpha_2 \wedge \mu_{c_2}(w)) \dots\dots\dots(65)$$

Proses pengambilan keputusan ini *Max-Min* seperti terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Proses pengambilan keputusan dengan metode *Max-Min*.

2.8.3.2 Metode *Max-Dot*

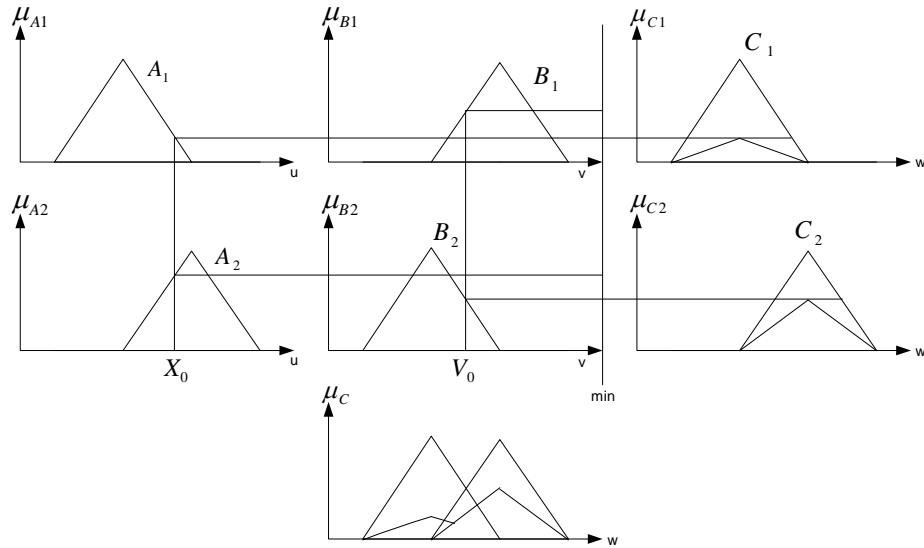
Metode ini menggunakan aturan operasi produk Larsen Rp sebagai implikasi fuzzy. Operasi produk (larsen):

$$R_p = A \times B = \int_{u \times v} \mu_A(u) \cdot \mu_B(v) \div (u \cdot v) \dots\dots\dots(66)$$

Keputusan kendali untuk aturan ke- i dinyatakan dengan $\alpha_i \cdot \mu_{c_i}(w)$. Maka keanggotaan konsekuensi c yang telah disimpulkan dinyatakan dengan:

$$\mu_c(w) = (\alpha_i \cdot \mu_{c_i}(w)) \vee (\alpha_i \cdot \mu_{c_i}(w)) \dots\dots(67)$$

Gambar 20 menunjukkan proses inferensi *Max-Dot* untuk nilai masukan *crisp* x_0 dan y_0 yang diperlukan sebagai *fuzzy singletons*. *Fuzzy singletons* adalah himpunan *fuzzy* yang memiliki himpunan *support* berupa titik tunggal di U . Sedangkan himpunan *support* dari suatu himpunan *fuzzy* F adalah himpunan bilangan pasti. Semua titik μ dalam U sedemikian hingga $\mu_F(u) > 0$. Penggunaan metode implikasi didasarkan pada metode yang memberikan hasil yang terbaik.



Gambar 14. Inferensi *fuzzy Max-Dot*

2.8.4 Unit Defuzifikasi

Setelah mekanisme pertimbangan *fuzzy* melaksanakan seluruh aturan yang dimiliki, maka dilanjutkan dengan proses defuzifikasi untuk menghasilkan data tegas. Defuzifikasi merupakan proses perubahan keputusan aksi kendali *fuzzy* menjadi aksi kendali *non-fuzzy (crisp)*, karena proses membutuhkan data *non-fuzzy* untuk mengendalikan proses. Teknik defuzifikasi yang sering digunakan antara lain: metode rerata maksimum, metode pusat area, dan metode Sugeno.

2.8.4.1 Metode Rerata Maksimum (*Mean of Max, MOM*)

Metode ini merupakan prosedur yang paling sederhana dalam melakukan seleksi nilai keluaran atau aksi kendali, v_0 , yang memaksimalkan fungsi keanggotaan.

$$v_0 \max_{v \in V} \mu_v(v) \dots\dots\dots(67)$$

Jika terdapat lebih dari satu nilai keanggotaan maksimum dalam v , v_0 tidak ditentukan secara unik oleh prosedur diatas, tetapi melalui prosedur pendekatan rata-rata maksimum (*Mean of Maximum = MOM*), yaitu:

$$v_0 = \sum_{j=1}^J \frac{v_j}{J} \dots\dots\dots(68)$$

Dengan:

v_0 = nilai keluaran

J = jumlah / frekuensi fungsi keanggotaan mencapai nilai pendukung maksimum

v_j = nilai keluaran maksimum ke- j

$\mu_v(v)$ = derajat keanggotaan elemen-elemen pada *fuzzy* set v

v = semesta pembicaraan

Algoritma MOM ini mengabaikan fungsi keanggotaan keluaran tetapi dapat menyederhanakan proses defuzifikasi keluaran w_0 yang telah didefuzifikasikan hanya tergantung titik-titik irisan dari masukan, dan tidak kepada bentuk fungsi keanggotaan.

2.8.4.2 Metode Pusat Area (*Centre of Area, COA*)

Metode COA ini menghasilkan titik berat daerah distribusi kemungkinan aksi kendali fuzzy. Dalam bentuk diskrit, metode ini dinyatakan sebagai:

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \dots\dots\dots(69)$$

Dengan m adalah jumlah tingkat kuantisasi dari keluaran.

v_0 = nilai keluaran

m = tingkat kuantisasi

v_k = elemen ke- k

$\mu_v(v_k)$ = derajat keanggotaan elemen-elemen pada fuzzy set v

v = semesta pembicaraan

2.8.4.3 Metode Sugeno

Penalaran dengan metode Sugeno hampir sama dengan penalaran metode sebelumnya, hanya saja *output* (konsekuen) sistem tidak berupa himpunan *fuzzy*, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear.

2.8.4.3.1 Metode *Fuzzy Sugeno Orde Nol*

Secara umum bentuk model *fuzzy Sugeno* orde nol adalah:

$$\text{If } (x_1 \text{ is } A_1) \bullet (x_2 \text{ is } A_2) \bullet (x_3 \text{ is } A_3) \bullet \dots \bullet (x_n \text{ is } A_n) \text{ Then } z = k \dots\dots\dots(70)$$

Dengan A adalah himpunan *fuzzy* ke- i sebagai *input (antecedent)*, dan k adalah suatu konstanta tegas sebagai *output (consequent)*.

2.8.4.3.2 Metode *Fuzzy Sugeno Orde Satu*

Secara umum bentuk model *fuzzy Sugeno* orde satu adalah:

If(x_1 is A_1).(x_2 is A_2).(x_3 is A_3). \dots (x_n is A_n) *Then*

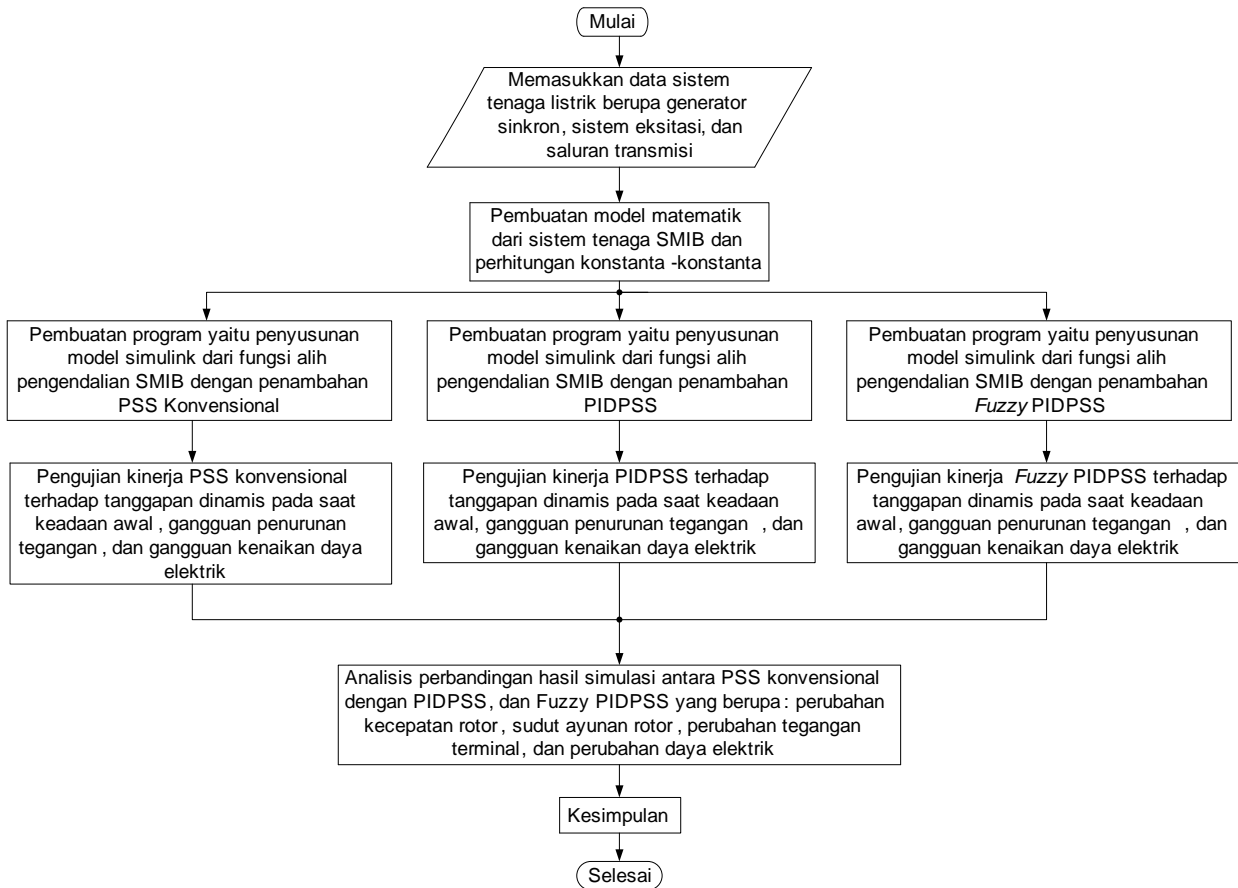
$$z = p_1 * x_1 + p_2 * x_2 + p_3 * x_3 + \dots + p_n * x_n + q \dots\dots\dots(71)$$

Dengan A adalah himpunan *fuzzy* ke- i sebagai *input (antecedent)*, dan p adalah suatu konstanta tegas sebagai *output (consequent)* ke- i dan q juga merupakan konstanta dalam *consequent*. Dengan komposisi aturan Sugeno ini, maka defuzifikasinya dilakukan dengan cara mencari nilai rata-ratanya.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Urutan kegiatan penelitian ini sesuai dengan diagram alir pada Gambar 15.



Gambar 15 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bahan Penelitian

Bahan dalam penelitian ini adalah berupa tulisan yang berasal dari berbagai sumber antara lain berupa jurnal, buku-buku teks tentang stabilitas dan pengendalian sistem tenaga listrik, dan makalah-makalah yang berkaitan dengan persoalan pemodelan generator sinkron serta peredaman osilasi sistem tenaga listrik.

Data sistem generator sinkron terhubung ke bus tak berhingga yang digunakan sebagai *plant* yang dikendalikan diambil dari buku *Electric Power System Dynamics* (Yu, 1983) yang terdiri dari data generator, sistem eksitasi, jaringan dan beban, serta kondisi awal.

Generator:

$$\begin{array}{lll} M = 9.26 & T_{d0} = 7.76 & D = 0 \\ x_d = 0.973 & x'_d = 0.190 & x_q = 0.550 \end{array}$$

Sistem Eksitasi:

$$K_A = 50 \qquad T_A = 0.05$$

Saluran Transmisi dan Beban:

$$\begin{array}{ll} R = -0.034 & X = 0.997 \\ G = 0.249 & B = 0.262 \end{array}$$

Kondisi awal:

$$P_{e0} = 1.0 \qquad Q_{e0} = 0.015 \qquad V_{t0} = 1.05$$

3.3 Jalan Penelitian

Penelitian ini dimaksudkan untuk menyelidiki seberapa jauh perbaikan stabilitas sistem tenaga listrik dengan menggunakan logika *fuzzy* yang menggantikan PSS konvensional dan PIDPSS. Tahapan pelaksanaannya adalah:

1. Perhitungan parameter sistem tenaga listrik SMIB dan parameter blok PSS
2. Perhitungan dan penentuan parameter blok PIDPSS
3. Penyusunan dan pelatihan model *Fuzzy Inference System* (FIS) pada pengendali FPIDPSS
4. Analisis hasil simulasi.

3.3.1 Perhitungan Parameter Sistem Tenaga Listrik SMIB dan Parameter Blok PSS

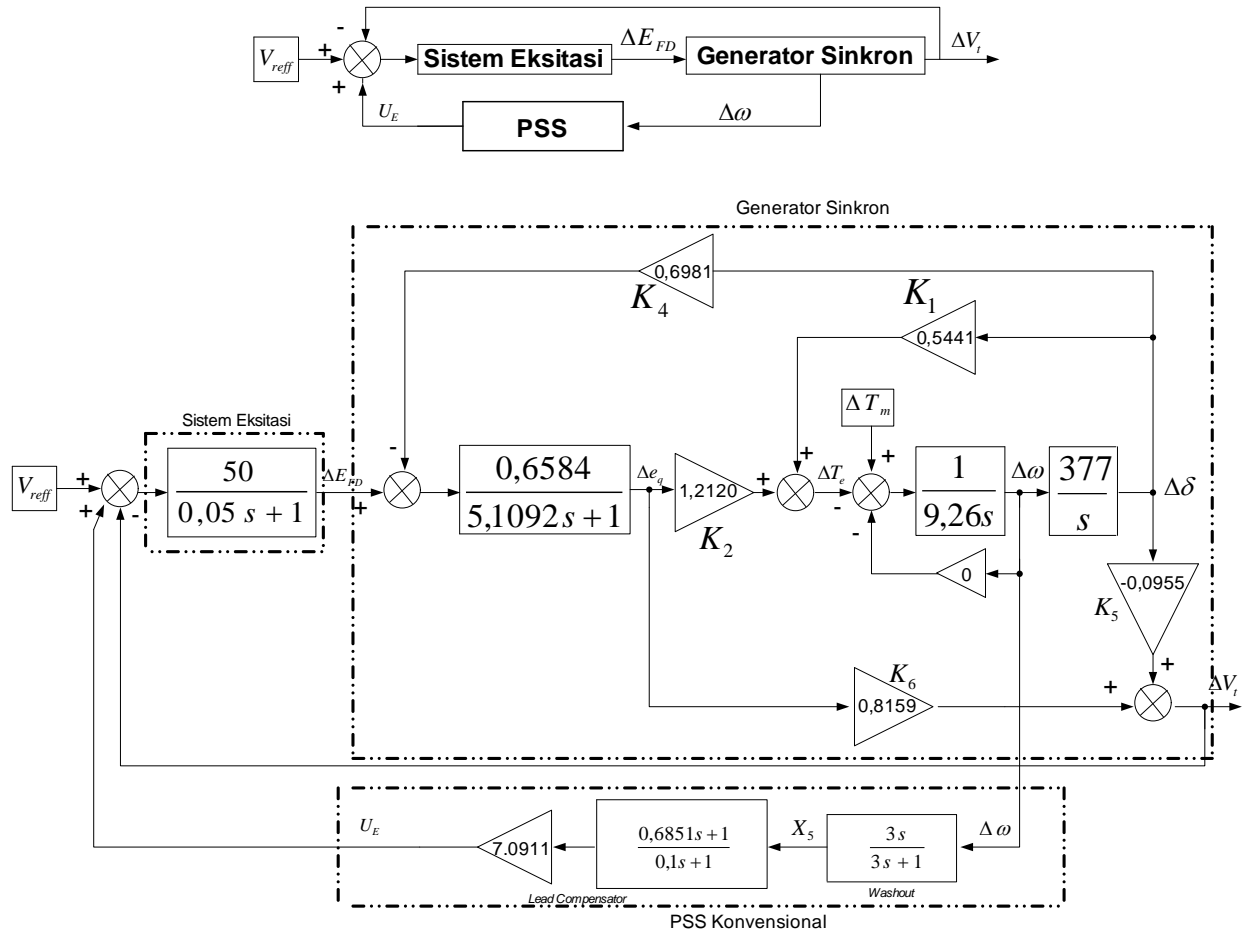
Berdasarkan rumusan yang telah dijelaskan pada Bab II, kemudian dilakukan perhitungan parameter stabilitas sistem tenaga listrik yang meliputi nilai konstanta K_1 sampai K_6 . Hasil perhitungan tersebut adalah:

$$\begin{array}{lll} K_1 = 0.5442 & K_2 = 1.2120 & K_3 = 0.6584 \\ K_4 = 0.7037 & K_5 = -0.0945 & K_6 = 0.8150 \end{array}$$

Sedangkan parameter PSS seperti ditunjukkan pada fungsi alih PSS adalah:

$$T = 3.0 \quad T_1 = 0.6581 \quad T_2 = 0.1 \quad K_c = 7.0911$$

Nilai parameter PSS ini selanjutnya digunakan untuk menentukan fungsi alih blok diagram PSS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16



Gambar 16 Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan PSS konvensional.

3.3.2 Perhitungan dan Penentuan Parameter Blok Diagram PIDPSS

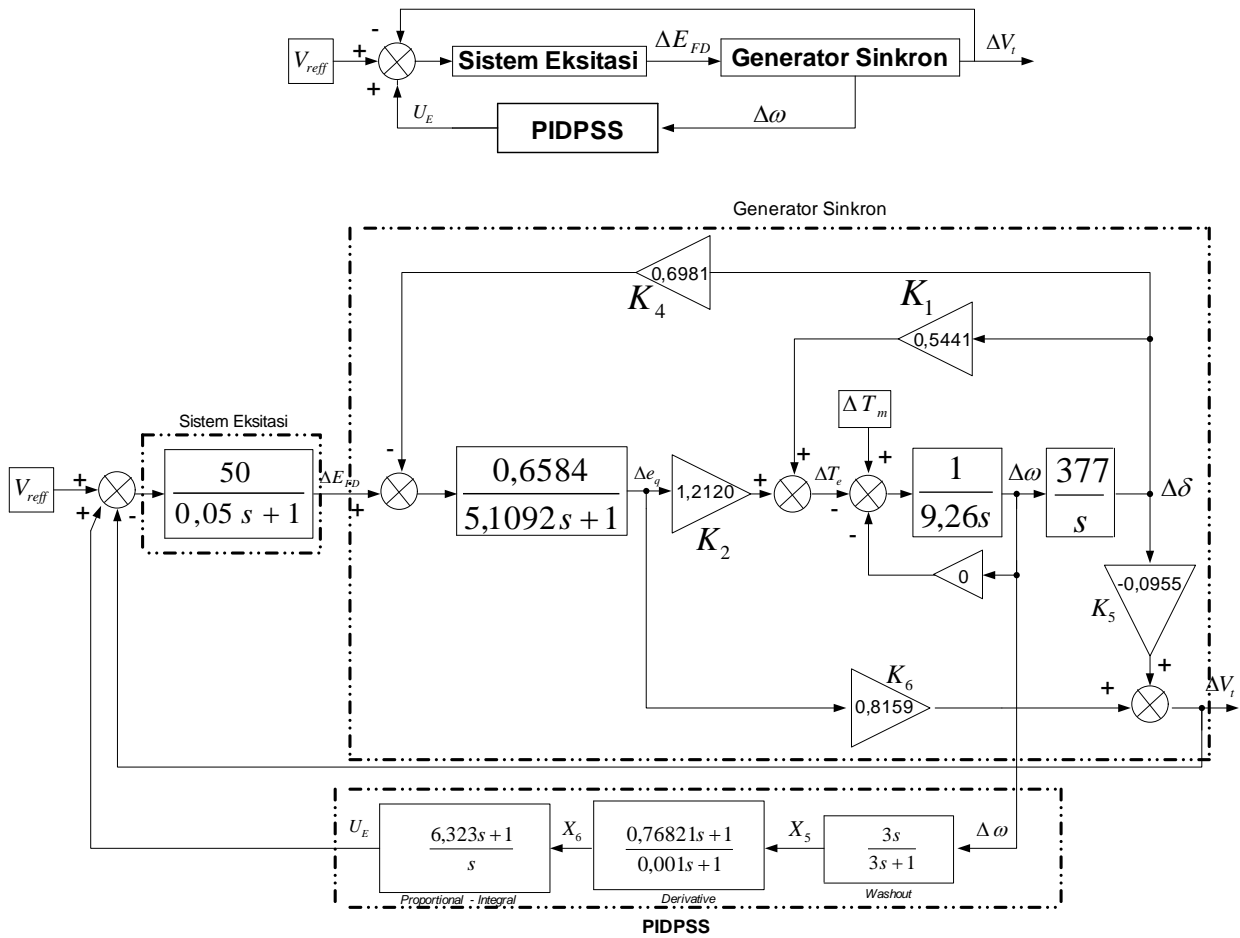
Setelah kita mendapatkan perhitungan konstanta PSS berupa T_1 dan K_c , kita dapat melakukan perhitungan lebih lanjut untuk mendapatkan konstanta dalam PID. Dari persamaan

(49) dimana: $K_c = 7.0911$, $K_p = K_c = 7.0911$, dan $T_1 = 0.685 = \frac{K_d}{K_p}$ sehingga kita dapatkan

$K_d = 4.857$. Kemudian dari persamaan (50) sampai (53), kita bisa mendapatkan konstanta untuk

PID yaitu: $K_{p2} = 6.323$, $K_{d2} = 0.76821$, dan $K_{i2} = 30$. Nilai dari parameter PID ini selanjutnya

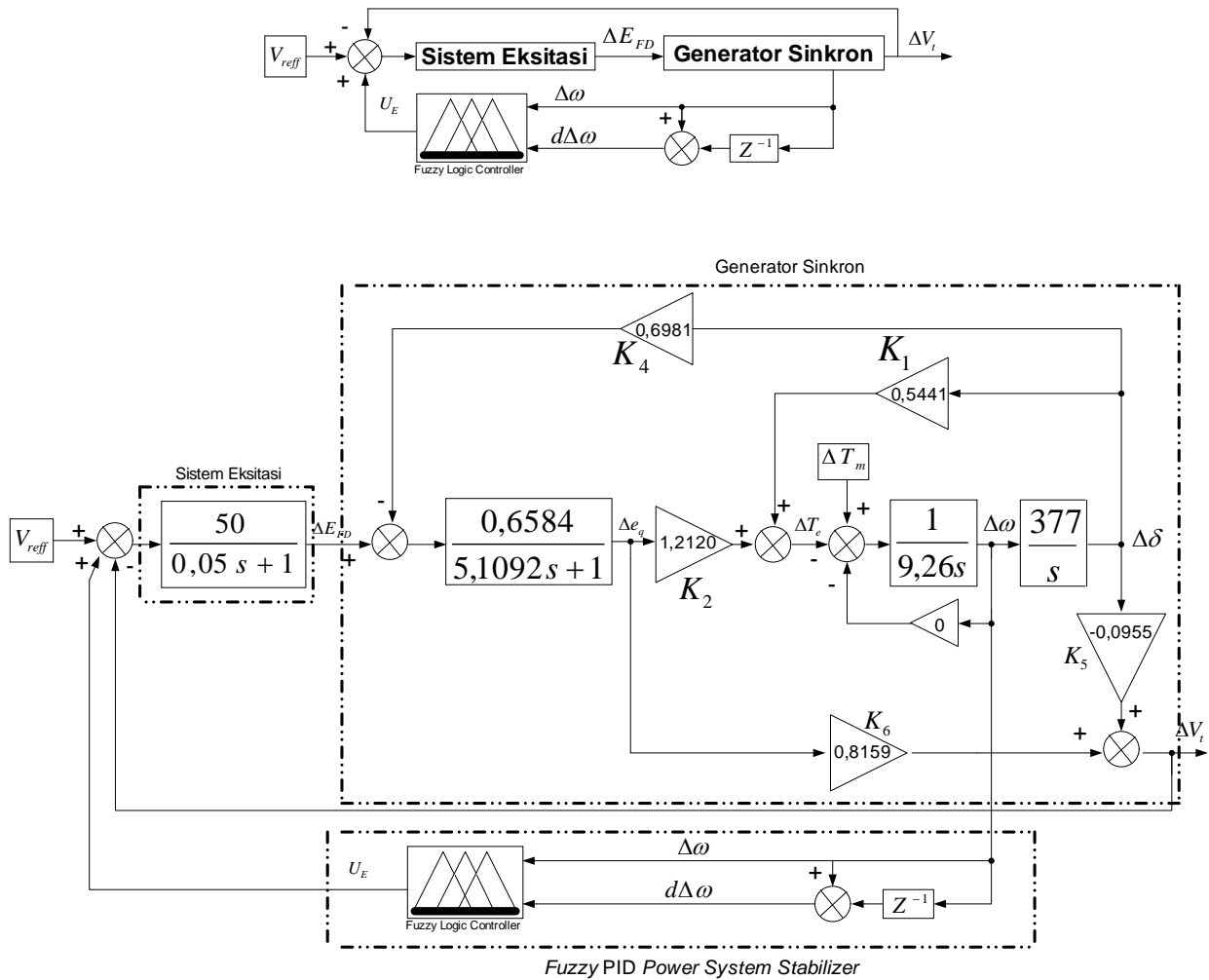
kita gunakan untuk menentukan fungsi alih blok diagram PIDPSS seperti yang ditunjukkan pada Gambar 17.



Gambar 17 Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan PIDPSS.

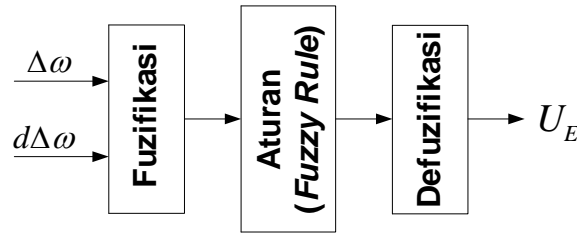
3.3.3 Penyusunan Model *Fuzzy Inference System* (FIS) pada Pengendali FPIDPSS

Pengendali yang ditunjukkan pada Gambar 18 merupakan pengendali *fuzzy* yang menggantikan blok diagram PIDPSS dan PSS konvensional, dengan pengolahan dua sinyal masukan ke pengendali, yaitu sinyal perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$), dan sinyal delta perubahan kecepatan rotor ($d\Delta\omega$). Sinyal $d\Delta\omega$ didapatkan dari pengurangan sinyal $\Delta\omega$ saat ini, $\Delta\omega_{(k)}$, dengan sinyal $\Delta\omega$ sebelumnya, $\Delta\omega_{(k-1)}$, dan kedua sinyal tersebut diolah oleh pengendali *fuzzy*. Dengan demikian terdapat dua masukan ke pengendali dan satu keluaran dari pengendali tersebut. Maka aturan yang digunakan nantinya akan meliputi tiga komponen yaitu dua komponen masukan (*antecedent*) dan satu komponen keluaran (*consequent*).



Gambar 18 Fungsi alih pengendalian SMIB dengan penambahan FPIDPSS.

Struktur logika *fuzzy* (FPIDPSS) yang digunakan, dikembangkan seperti tampak pada Gambar 19. Pada gambar tersebut terdapat proses fuzifikasi, yaitu proses perubahan sinyal masukan dalam hal ini $\Delta\omega$ dan $d\Delta\omega$ untuk diproses selanjutnya kedalam anggota himpunan *fuzzy*. Setelah proses fuzifikasi, kemudian diproses kedalam aturan (*rule*) *fuzzy*. Dalam aturan *fuzzy* ini juga terdapat proses sistem inferensi, dimana hubungan dua sinyal masukan yang digunakan, untuk selanjutnya diproses dengan operasi interseksi (*AND*). Dan karena proses interseksi *AND* yang digunakan, maka proses implikasi yang digunakan adalah *MIN*. Setelah proses aturan (*rule*), kemudian proses defuzifikasi yang digunakan pada penelitian ini adalah menggunakan metode Sugeno.



Gambar 19. Struktur Pengendali FPIDPSS.

3.3.3.1 Proses Fuzifikasi pada Pengendali FPIDPSS

Proses fuzifikasi dimulai dengan merekam hasil *running simulation* pada Gambar 18. Hasil *running* tersebut, kemudian kita jabarkan kedalam empat bagian seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Data hasil pengolahan simulasi pada blok diagram PIDPSS.

	$\Delta\omega$	$d\Delta\omega = \Delta\omega_k - \Delta\omega_{(k-1)}$	U_E
1	0	0	0
2	2.0668e-005	2.0668e-005	0.010556
3	0.000124	0.00010332	0.060577
4	0.00051539	0.00039139	0.21431
5	0.0010764	0.0005611	0.36217
6	0.0019873	0.0009109	0.49466
7	0.0021311	0.0001438	0.50794
8	0.0028364	0.0007053	0.55417
9	0.0031428	0.0003064	0.5668
10	0.0040926	0.00094978	0.58674
11	0.0049646	0.00087203	0.58615
12	0.0057463	0.00078166	0.57254
13	0.006428	0.0006817	0.54944
14	0.0070029	0.00057491	0.51886
15	0.0074667	0.0004638	0.48224
16	0.0078173	0.0003506	0.44074
17	0.0080546	0.00023727	0.3954
18	0.0081801	0.00012551	0.34713
19	0.0081969	1.6792e-005	0.29677
20	0.0081969	-8.7643e-005	0.24507
21	0.0079225	-0.00018676	0.19271
22	0.0076427	-0.00027972	0.14031
23	0.0072769	-0.00036585	0.088406
24	0.0068322	-0.00044469	0.037472
25	0.0063163	-0.00051584	-0.012077
26	0.0057373	-0.00057909	-0.059887
27	0.0051029	-0.00063434	-0.10566
28	0.00442213	-0.00068158	-0.14914
29	0.00037004	-0.00072092	-0.19014
30	0.0029479	-0.0007525	-0.2285

31	0.0021713	-0.00077658	-0.2641
32	0.0013779	-0.00079343	-0.29686
33	0.00057451	-0.0008034	-0.32673
34	-0.00023235	-0.00080686	-0.35369
35	-0.0010366	-0.00080421	-0.37776
36	-0.0018324	-0.00079588	-0.39896
37	-0.0026147	-0.0007823	-0.41735
38	-0.0033787	-0.00076393	-0.433
39	-0.0041199	-0.00074122	-0.44598
40	-0.0048345	-0.0007146	-0.4564
41	-0.005519	-0.00068454	-0.46436
42	-0.0061705	-0.00065146	-0.46997
43	-0.0067863	-0.00061578	-0.47336
44	-0.0073642	-0.00057791	-0.47466
45	-0.0079024	-0.00053825	-0.47398
46	-0.0083996	-0.00049715	-0.47146
47	-0.0088546	-0.00045498	-0.46724
48	-0.0092666	-0.00041207	-0.46144
49	-0.0096353	-0.00036871	-0.4542
50	-0.0099606	-0.00032521	-0.44563
51	-0.010242	-0.00028183	-0.43587
52	-0.010481	-0.0002388	-0.42504
53	-0.010678	-0.00019636	-0.41325
54	-0.010832	-0.00015471	-0.40062
55	-0.010946	-0.00011402	-0.38726
56	-0.011021	-7.4449e-005	-0.37326
57	-0.011057	-3.6149e-005	-0.35874
58	-0.011056	7.5936e-007	-0.34378
59	-0.01102	3.6172e-005	-0.32848
60	-0.01095	6.9998e-005	-0.31291
61	-0.010848	0.00010216	-0.28716
62	-0.010715	0.00013261	-0.28129
63	-0.010554	0.00016129	-0.26539
64	-0.010366	0.00018817	-0.2495
65	-0.010152	0.00021324	-0.2337
66	-0.009916	0.00023647	-0.21803
67	-0.0096581	0.00025787	-0.20255
68	-0.0093807	0.00027744	-0.1873
69	-0.0090855	0.00029521	-0.17233
70	-0.0087743	0.00031119	-0.15766
71	-0.0084489	0.00032542	-0.14334
72	-0.0081109	0.00033793	-0.1294
73	-0.0077622	0.00034876	-0.11586
74	-0.0074042	0.00035797	-0.10275
75	-0.0070386	0.00036559	-0.090079
76	-0.0066669	0.00037168	-0.077878

77	-0.0062906	0.0003763	-0.066159
78	-0.0059111	0.0003795	-0.054933
79	-0.0055298	0.00038135	-0.044211
80	-0.0051479	0.00038191	-0.034001
81	-0.0047666	0.00038124	-0.024309
82	-0.0043872	0.0003794	-0.015139
83	-0.0040108	0.00037646	-0.0064925
84	-0.0036383	0.00037248	0.0016292
85	-0.0032708	0.00036753	0.0092275
86	-0.0029091	0.00036167	0.016305
87	-0.0025542	0.00035496	0.022867
88	-0.0022067	0.00034747	0.028917
89	-0.0018674	0.00033925	0.034463
90	-0.0015371	0.00033037	0.039512
91	-0.0012162	0.00032089	0.044073
92	-0.0009053	0.00031087	0.048156
93	-0.00060494	0.00030036	0.05177
94	-0.00031552	0.00028941	0.054928
95	-3.7432e-005	0.00027809	0.057641
96	0.00022901	0.00026644	0.059922
97	0.00048353	0.00025452	0.061784
98	0.00072589	0.00024236	0.06324
99	0.00095592	0.00023003	0.064306
100	0.0011735	0.00021756	0.064995
101	0.0013785	0.00020499	0.065322
102	0.0015708	0.00019238	0.065302
103	0.0017506	0.00017975	0.064951
104	0.0019177	0.00016714	0.064285
105	0.0020723	0.0001546	0.063319
106	0.0022145	0.00014214	0.062069
107	0.0023443	0.00012982	0.06055
108	0.0024619	0.00011765	0.05878
109	0.0025676	0.00010566	0.056773
110	0.0026615	9.3888e-005	0.054545
111	0.0027438	8.2347e-005	0.052113
112	0.0028149	7.1062e-005	0.049491
113	0.002875	6.0056e-005	0.046695
114	0.0029243	4.9347e-005	0.043741
115	0.0029633	3.8952e-005	0.040643
116	0.0029921	2.8888e-005	0.037417
117	0.0030113	1.9169e-005	0.034076
118	0.0030211	9.8078e-006	0.030635
119	0.0030219	8.1475e-007	0.027107
120	0.0030141	-7.8003e-006	0.023506
121	0.0029981	-1.6029e-005	0.01985
122	0.0029742	-2.3865e-005	0.016138

123	0.0029429	-3.1303e-005	0.012396
124	0.0029046	-3.8339e-005	0.0086313
125	0.0028596	-4.497e-005	0.0048549

Pada Tabel 2 diatas, terdapat data nilai yang tertinggi untuk $\Delta\omega$ yaitu 0.008197 (no. 19) dan data nilai yang terendah untuk $\Delta\omega$ yaitu -0.011057 (no. 57). Sedangkan data nilai yang tertinggi untuk $d\Delta\omega$ yaitu 0.00094978 (no.10) dan data nilai yang terendah untuk $d\Delta\omega$ yaitu -0.000807 (no.34). Dari hasil data pada Tabel 2, kemudian data-data tersebut kita definisikan kedalam fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* secara diskrit seperti tampak pada Tabel 3 dan Tabel 4. Definisi fungsi keanggotaan secara diskrit ini adalah sebagai proses untuk fungsi keanggotaan yang berjumlah tiga dan berbentuk segitiga.

Tabel 3. Definisi fungsi keanggotaan secara diskrit variabel $\Delta\omega$

	-0.011057	-0.008169	-0.004318	-0.00143	0.001458	0.005309	0.008197
P	0	0	0	0	0.3	0.7	1
Z	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3	0
N	1	0.7	0.3	0	0	0	0

Tabel 4. Definisi fungsi keanggotaan secara diskrit variabel $d\Delta\omega$

	-0.000807	-0.000539	-0.000181	-0.000088	0.000346	0.000691	0.0009498
P	0	0	0	0	0.3	0.7	1
Z	0	0.3	0.7	1	0.7	0.3	0
N	1	0.7	0.3	0	0	0	0

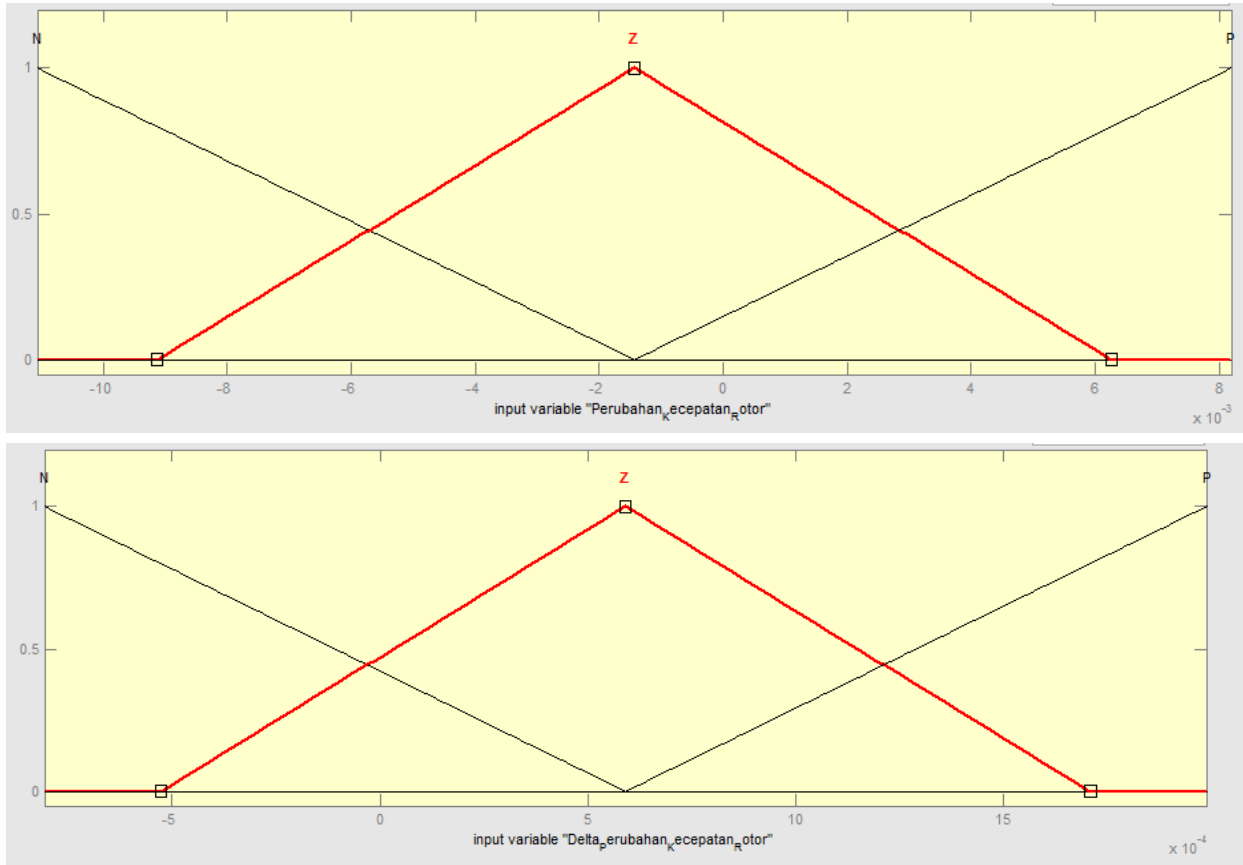
Keterangan pada Tabel 3 dan Tabel 4:

P : positif

Z : zero

N : negatif

Setelah data-data tersebut kita definisikan dalam fungsi keanggotaan secara diskrit, kemudian kita dapat menggambarannya secara keseluruhan dalam himpunan *fuzzy* seperti tampak pada Gambar 20.



Gambar 20. Fungsi keanggotaan dari nilai input variabel $\Delta\omega$ (perubahan kecepatan rotor) dan $d\Delta\omega$ (delta perubahan kecepatan rotor)

3.3.3.2 Proses Penalaran Aturan (*rule*) dan Defuzifikasi

Proses penalaran aturan (*rule*) merupakan sebuah penentuan metode defuzifikasi untuk tiap-tiap variabel solusi. Pada tahap defuzifikasi ini akan dipilih nilai-nilai dari suatu variabel seperti pada Tabel 4, yang kemudian dianalisis sehingga hasilnya merupakan keluaran dari daerah *fuzzy*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Sugeno, dimana pada metode ini kita dapat melakukan pendekatan analisis dalam persamaan linear.

Pada Tabel 4, kita mengambil sembilan buah data untuk masing-masing data $\Delta\omega$, $d\Delta\omega$, dan U_E . Kesembilan data ini merupakan penalaran *fuzzy* dengan tiga fungsi keanggotaan, sehingga aturan yang diperlukan juga sebanyak sembilan aturan. Penjabarannya adalah sebagai berikut:

1. Titik $\Delta\omega = 0.0078173$, $d\Delta\omega = 0.0003506$, dan $U_E = 0.44074$

1.1 Membuat himpunan dan input *fuzzy*

Ada 2 variabel *fuzzy* yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.0078173$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0078173] = 0$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0078173] = 0.0394$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0078173] = 0.9606$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{wZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{wP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0003506$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0003506] = 0.1715$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0003506] = 0.8285$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0003506] = 0$

1.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [0.0078173], \mu_{dwN} [0.0003506]) \\ &= (0; 0.1715) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min(\mu_{wN} [0.0078173], \mu_{dwZ} [0.00035061]) \\ &= (0; 0.8285) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min(\mu_{wN} [0.0078173], \mu_{dwP} [0.00035061]) \\ &= (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min(\mu_{wZ} [0.0078173], \mu_{dwN} [0.00035061]) \\ &= (0.0394; 0.1715) \\ &= 0.0394\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min(\mu_{wZ} [0.0078173], \mu_{dwZ} [0.00035061]) \\ &= (0.0394; 0.8285) \\ &= 0.0394\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min(\mu_{wZ} [0.0078173], \mu_{dwP} [0.00035061]) \\ &= (0.0394; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min(\mu_{wP} [0.0078173], \mu_{dwN} [0.00035061]) \\ &= (0.9606; 0.1715) \\ &= 0.1715\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 &= \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [0.0078173], \mu_{dwZ} [0.00035061]) \\ &= (0.9606; 0.8285) \\ &= 0.8285 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.0078173], \mu_{dwP} [0.00035061]) \\ &= (0.9606; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

1.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,44074 \dots\dots\dots(\text{persamaan Ke-1})$$

Setelah persamaan ke-1 kita dapatkan, dengan cara yang sama, kemudian kita mengambil data kedua untuk persamaan yang kedua, dan sampai data kesembilan untuk persamaan yang kesembilan. Analisis ini dapat kita ringkas seperti:

2. Titik $\Delta\omega = 0.0081969$, $d\Delta\omega = 0.0001679$, dan $U_E = 0.29677$

$$z = \frac{0.6162.x_1 + 0.1639.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0.6162 + 0.1639 + 0 + \dots + 0} = 0,29677 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-2})$$

3. Titik $\Delta\omega = 0.0076427$, $d\Delta\omega = -0.00027972$, dan $U_E = 0.4031$

$$z = \frac{0.4483.x_1 + 0.5517.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0.4483 + 0.5517 + 0 + \dots + 0} = 0,4031 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-3})$$

4. Titik $\Delta\omega = -0.010832$, $d\Delta\omega = -0.00015471$, dan $U_E = -0.40062$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,40062 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-4})$$

5. Titik $\Delta\omega = -0.011057$, $d\Delta\omega = -0.00003615$, dan $U_E = -0.35874$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0.35874 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-5})$$

6. Titik $\Delta\omega = -0.01095$, $d\Delta\omega = -0.000067$, dan $U_E = -0.31291$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0,31291 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-6})$$

7. Titik $\Delta\omega = 0.0029633$, $d\Delta\omega = 0.000039$, dan $U_E = -0.040643$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0+0+0+\dots+0} = -0,040643 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-7})$$

8. Titik $\Delta\omega = 0.0030211$, $d\Delta\omega = 0.0000098$, dan $U_E = 0.030635$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0+0+0+\dots+0} = 0,030635 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-8})$$

9. Titik $\Delta\omega = 0.0029981$, $d\Delta\omega = -0.000016$, dan $U_E = 0.01985$

$$z = \frac{0.x_1 + 0.x_2 + 0.x_3 + \dots + 0.x_9}{0+0+0+\dots+0} = 0,01985 \dots\dots\dots(\text{persamaan ke-9})$$

Kesembilan persamaan diatas, kemudian kita susun kedalam matriks $A.x = C$, dimana:

Matriks A =

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 \\ 0.6162 & 0.1639 & 0 & 0.013838 & 0.0394 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4483 & 0.5517 & 0 & 0.0003115 & 0.0003115 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2757 & 0.7073 & 0 & 0.2757 & 0.2027 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4154 & 0.5376 & 0 & 0.4154 & 0.4624 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.44236 & 0.5764 & 0 & 0.0673 & 0.0673 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4223 & 0.5777 & 0 & 0.1696 & 0.1696 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4258 & 0.5742 & 0 & 0.1485 & 0.1485 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4221 & 0.5777 & 0 & 0.1498 & 0.1498 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriks x =

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix};$$

Matriks C =

$$C = \begin{bmatrix} 0.59354 \\ -0.5712 \\ -0.359 \\ 0.1013 \\ 0.056 \\ -0.08194 \\ -0.06161 \\ -0.06902 \\ -0.05185 \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan penyelesaian nilai x_1 sampai x_9 , kita harus menghitung dulu matriks A invers. Tetapi setelah kita hitung, ternyata matriks A diatas tidak bisa kita dapatkan nilai-nilai inversnya, sehingga nilai-nilai x_1 sampai x_9 dari matriks $A.x = C$ diatas tidak dapat diselesaikan dan pengendali logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga tidak dapat kita gunakan (analisis secara lengkap pada LAMPIRAN no.1).

Karena persamaan matriks diatas tidak dapat kita selesaikan, maka sekarang kita mencoba dengan menggunakan fungsi keanggotaan gaussian (analisis secara lengkap pada LAMPIRAN no.2). Metode yang digunakan adalah sama dengan metode fungsi

keanggotaan segitiga. Setelah kita analisis, kita mendapatkan persamaan matriks seperti $A \cdot x = C$ dimana:

Matriks A =

$$A = \begin{bmatrix} 0.00001559 & 0.00001559 & 0.00001595 & 0.0625 & 0.0625 & 0.0040 & 0.3815 & 0.6342 & 0.0040 \\ 0.6645 & 0.1474 & 0.00008743 & 0.03487 & 0.1474 & 0.00008743 & 0.0007138 & 0.00007138 & 0.00008743 \\ 0.430 & 0.580 & 0.003 & 0.0625 & 0.0625 & 0.003 & 0.00001524 & 0.00001524 & 0.00001524 \\ 0.0098 & 0.0098 & 0.0098 & 0.2335 & 0.7898 & 0.0110 & 0.2335 & 0.2488 & 0.0110 \\ 0.0027 & 0.0027 & 0.0027 & 0.3877 & 0.5528 & 0.0039 & 0.3877 & 0.4486 & 0.0039 \\ 0.0424 & 0.0424 & 0.0036 & 0.3981 & 0.61544 & 0.0036 & 0.0896 & 0.0896 & 0.0036 \\ 0.0225 & 0.0225 & 0.0037 & 0.3968 & 0.6169 & 0.0037 & 0.1478 & 0.1478 & 0.0037 \\ 0.0257 & 0.0257 & 0.0036 & 0.4009 & 0.6122 & 0.0036 & 0.1339 & 0.1339 & 0.0036 \\ 0.0255 & 0.0255 & 0.0037 & 0.3962 & 0.6175 & 0.0037 & 0.1347 & 0.1347 & 0.0037 \end{bmatrix}$$

Matriks x =

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}$$

Matriks C =

$$C = \begin{bmatrix} 0.3271 \\ -0.6210 \\ -0.3904 \\ 0.1277 \\ 0.1082 \\ -0.1070 \\ -0.0604 \\ -0.0728 \\ -0.0691 \end{bmatrix}$$

Pada matriks A diatas, kemudian kita menghitung matriks A invers. Setelah nilai-nilai matriks A invers kita dapatkan, barulah kita bisa medapatkan nilai x_1 sampai dengan x_9 . Nilai x_1 sampai dengan x_9 inilah yang kemudian merupakan nilai keluaran himpunan fungsi keanggotaan *fuzzy* seperti:

$$\begin{aligned} x_1 &= -0.6726 & MF1 &= -0.6726 \\ x_2 &= -0.1488 & MF2 &= -0.1488 \\ x_3 &= 3.2497 & MF3 &= 3.2497 \\ x_4 &= -0.4745 & MF4 &= -0.4745 \\ x_5 &= 0.08766 \Rightarrow MF5 &= 0.08766 \\ x_6 &= -0.2532 & MF6 &= -0.2532 \\ x_7 &= -0.1129 & MF7 &= -0.1129 \\ x_8 &= 0.6104 & MF8 &= 0.6104 \\ x_9 &= 2.0633 & MF9 &= 2.0633 \end{aligned}$$

Penyusunan aturan *fuzzy* yang menghubungkan besaran masukan dan keluaran pengendali tampak pada Tabel 5. Pada Gambar 21 tampak aturan *fuzzy* dihubungkan oleh operator AND, yang berarti mencari nilai minimum dari fungsi keanggotaan

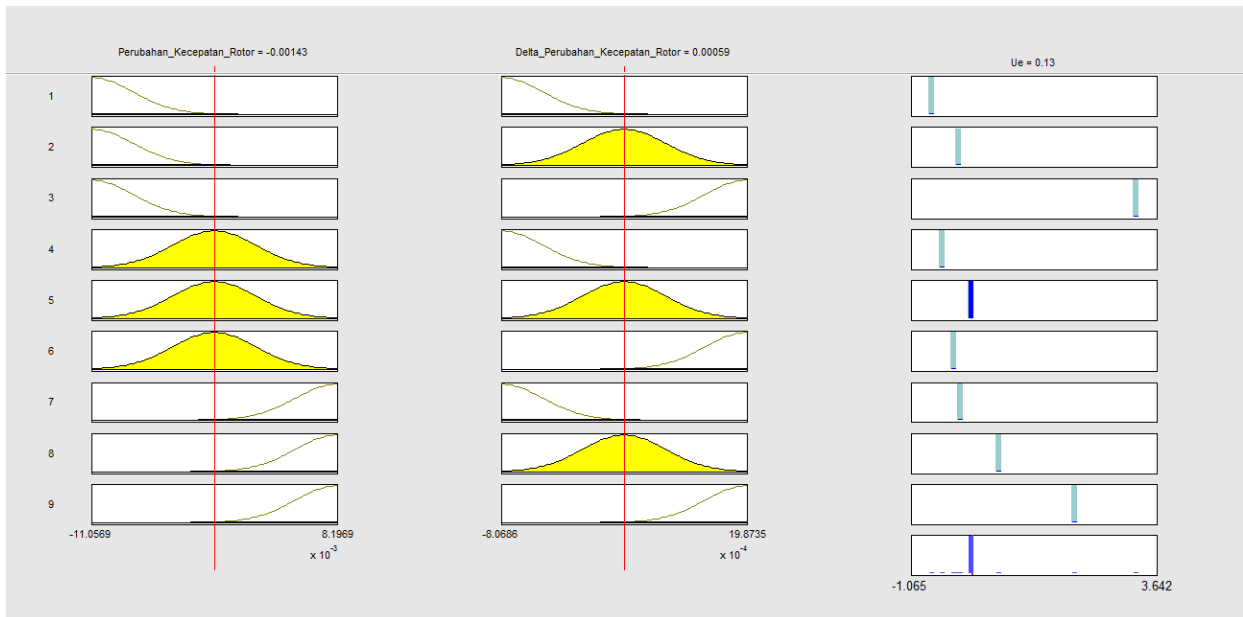
masukan. Kemudian akan didapat nilai minimum dari hasilnya dan fungsi keanggotaan keluaran.

Tabel 5. Tabel aturan (*rule*) *fuzzy* yang disusun.

		$\Delta\omega$		
		N	Z	P
$d\Delta\omega$	N	MF1	MF4	MF7
	Z	MF2	MF5	MF8
	P	MF3	MF6	MF9

Dari tiga besaran linguistik yang disusun dengan sembilan aturan *fuzzy*:

1. If $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then U_E is MF1
2. If $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then U_E is MF2
3. If $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then U_E is MF3
4. If $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then U_E is MF4
5. If $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then U_E is MF5
6. If $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then U_E is MF6
7. If $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then U_E is MF7
8. If $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then U_E is MF8
9. If $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then U_E is MF9



Gambar 21. Aturan-aturan (*rules*) *fuzzy* yang disusun.

3.3.4 Pelatihan dan Analisis Hasil Penelitian Simulasi Pengendali FPIDPSS

Setelah struktur pengendali logika *fuzzy* yang menggantikan blok PIDPSS terbentuk, tahap selanjutnya adalah tahap pelatihan. Pelatihan dilakukan dengan cara rekayasa (*trial and error*) pada proses aturan atau defuzifikasi seperti pada penjelasan sebelumnya, sampai didapatkan peredaman yang paling baik yaitu berupa penurunan nilai *overshoot* dan *settling time* dari pengendali PSS konvensional dan PIDPSS.

Pada tahap analisis penelitian simulasi dan pembahasannya, variabel penelitian yang diamati adalah:

1. Perubahan kecepatan rotor
2. Perubahan sudut rotor
3. Perubahan tegangan terminal dan
4. Perubahan daya elektrik.

Dari keempat variabel tersebut, diadakan perbandingan hasil unjuk kerja berupa *overshoot* dan *settling time* antara PSS Konvensional dengan PIDPSS dan FPIDPSS. Kemudian dari hasil perbandingan ini, dicari persentase perbaikan stabilitas dinamik sistem tenaga listrik dalam meningkatkan kinerja PSS.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

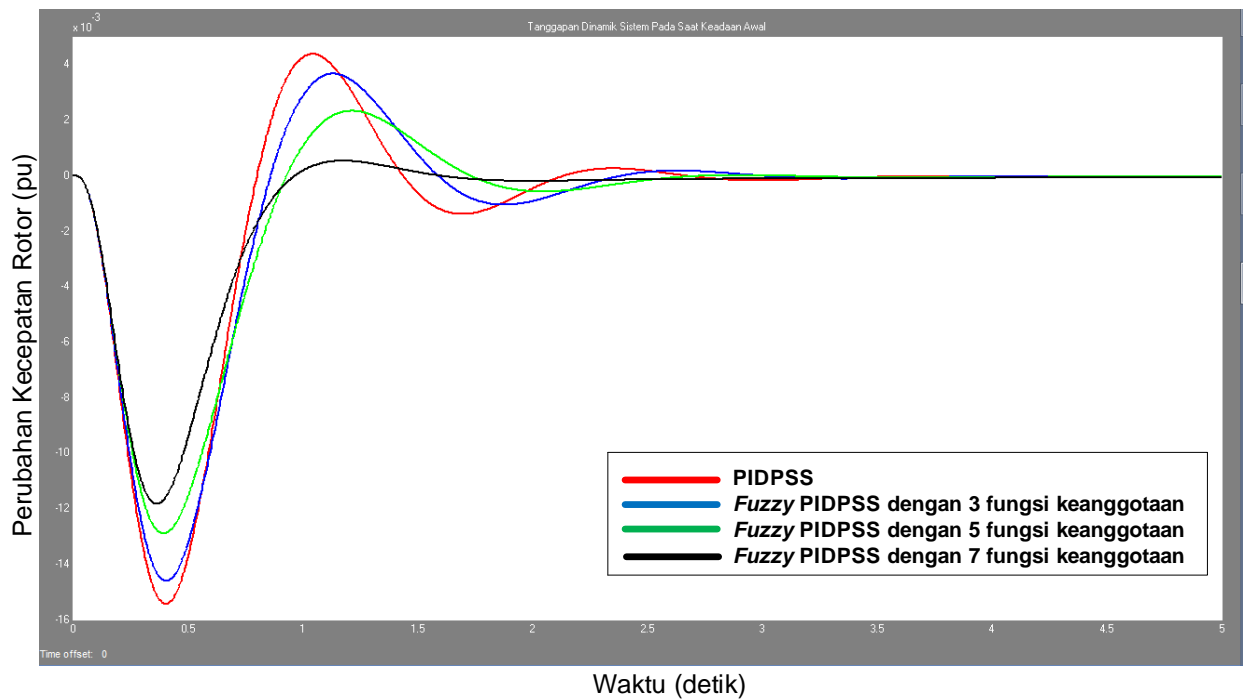
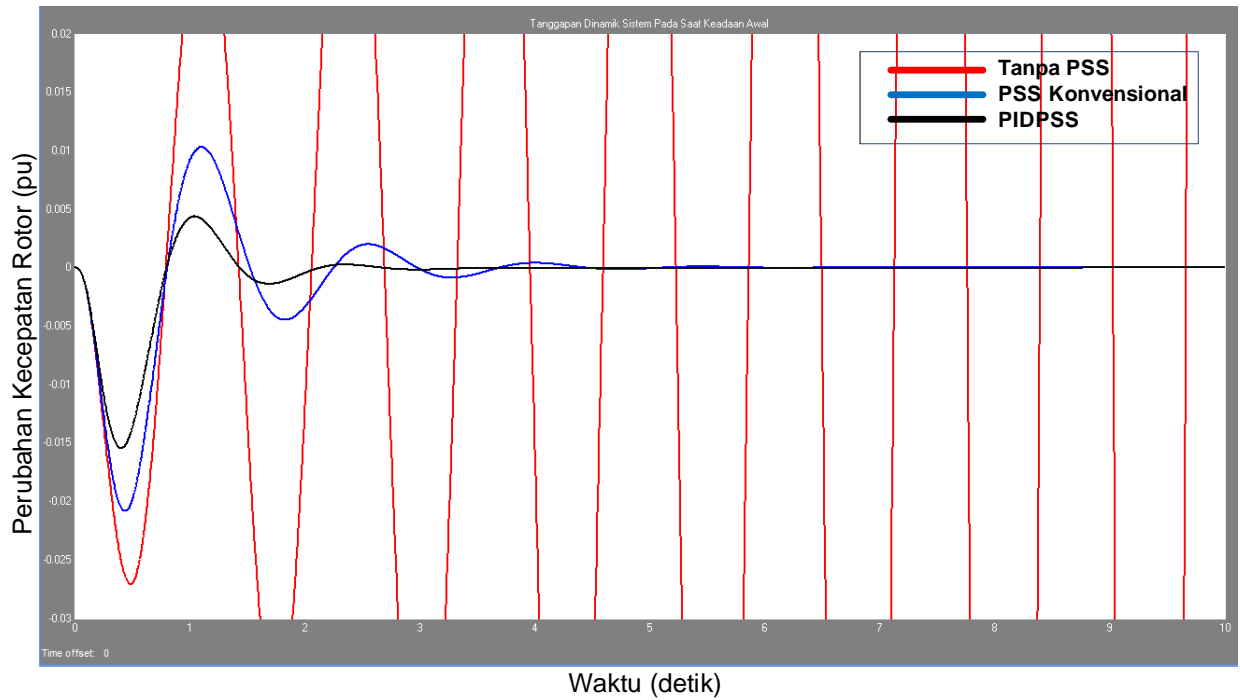
Peningkatan kinerja PSS dalam meredam osilasi dan peningkatan stabilitas dinamis sistem tenaga listrik yang dihasilkan dengan logika fuzzy (FPID), dapat dilakukan dengan melihat hasil pengujian terhadap beberapa variabel berikut:

1. Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$)
2. Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$)
3. Perubahan tegangan terminal (ΔV_t)
4. Perubahan daya elektrik (ΔT_e).

Kemudian untuk mengetahui kemampuan pengendali logika fuzzy (FPIDPSS) lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali PSS konvensional dan PIDPSS, maka dilakukan serangkaian pengujian yang terdiri dari:

1. Tanggapan dinamis sistem pada saat keadaan awal
2. Pengujian gangguan kenaikan daya elektrik
3. Pengujian gangguan penurunan daya elektrik.

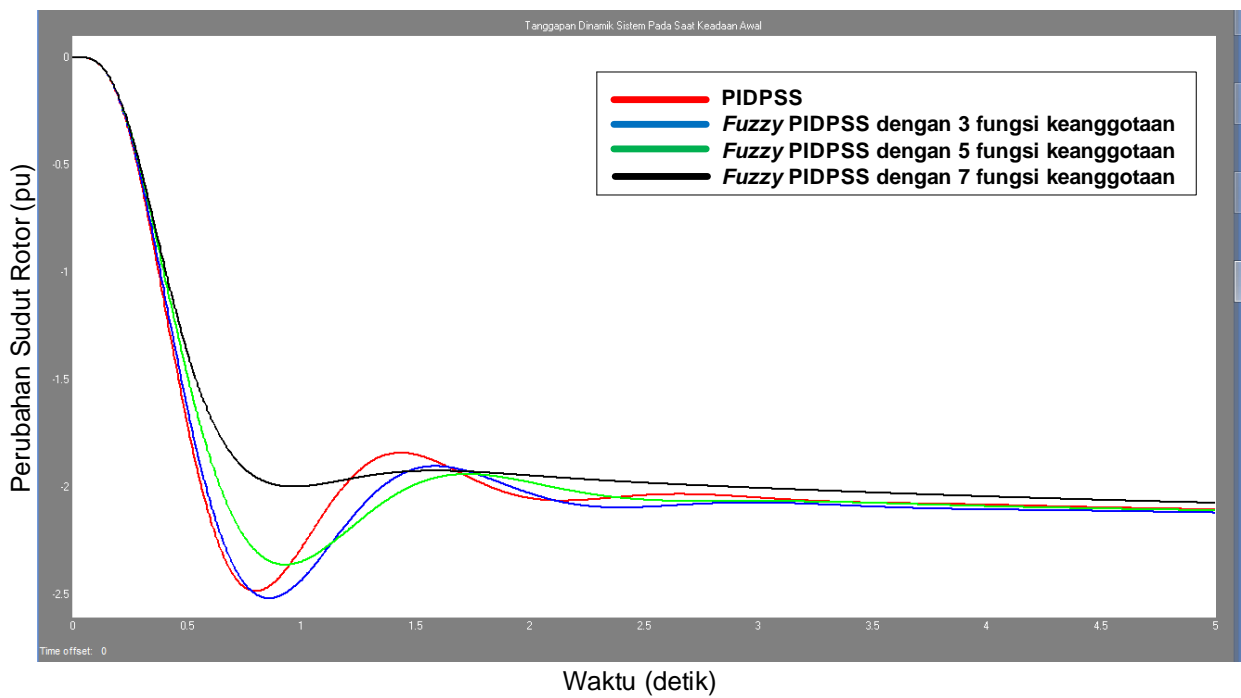
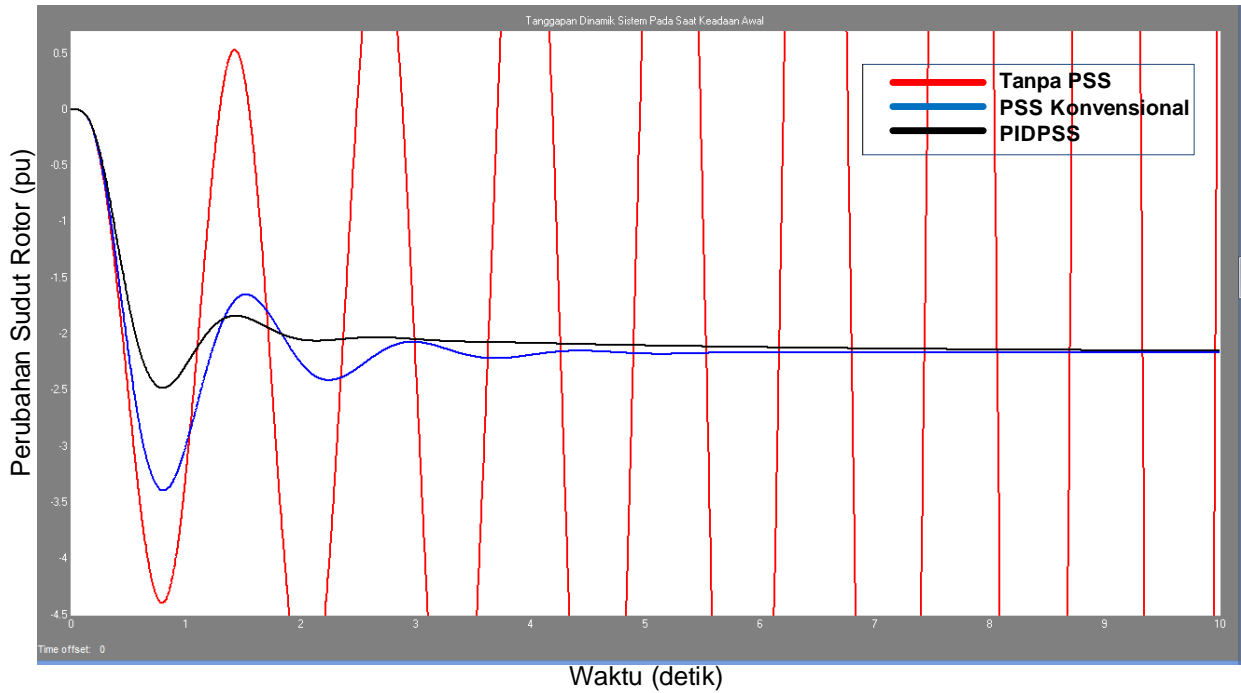
4.1 Tanggapan Dinamis Sistem Pada Saat Keadaan Awal



Gambar 22. Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat keadaan awal.

Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.00672 pu	6.4 detik	
PIDPSS	0.003 pu	3.45 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.00176 pu	2.7 detik	0.148 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0021 pu	3.4 detik	0.654 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.0024 pu	3.35 detik	1.373 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	55.36%	46.09%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	20% - 41.33%	2.89% - 21.74%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	64.29% - 73.81%	47.66% - 57.81%	

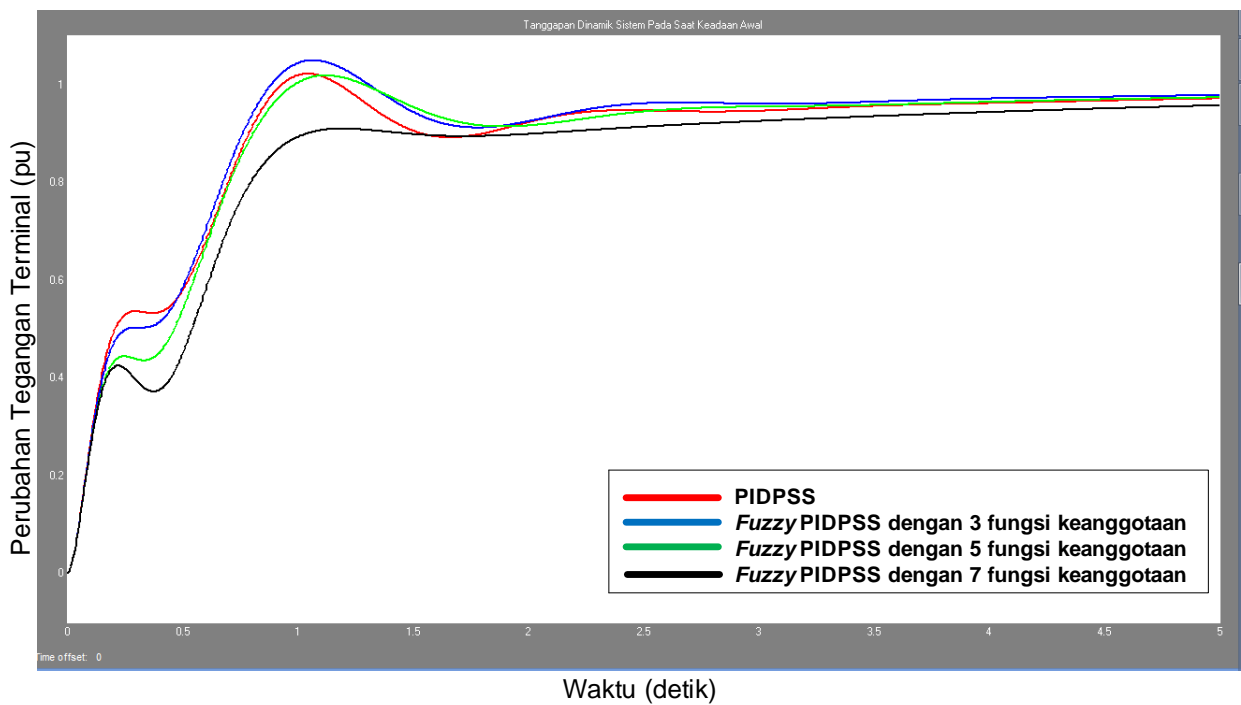
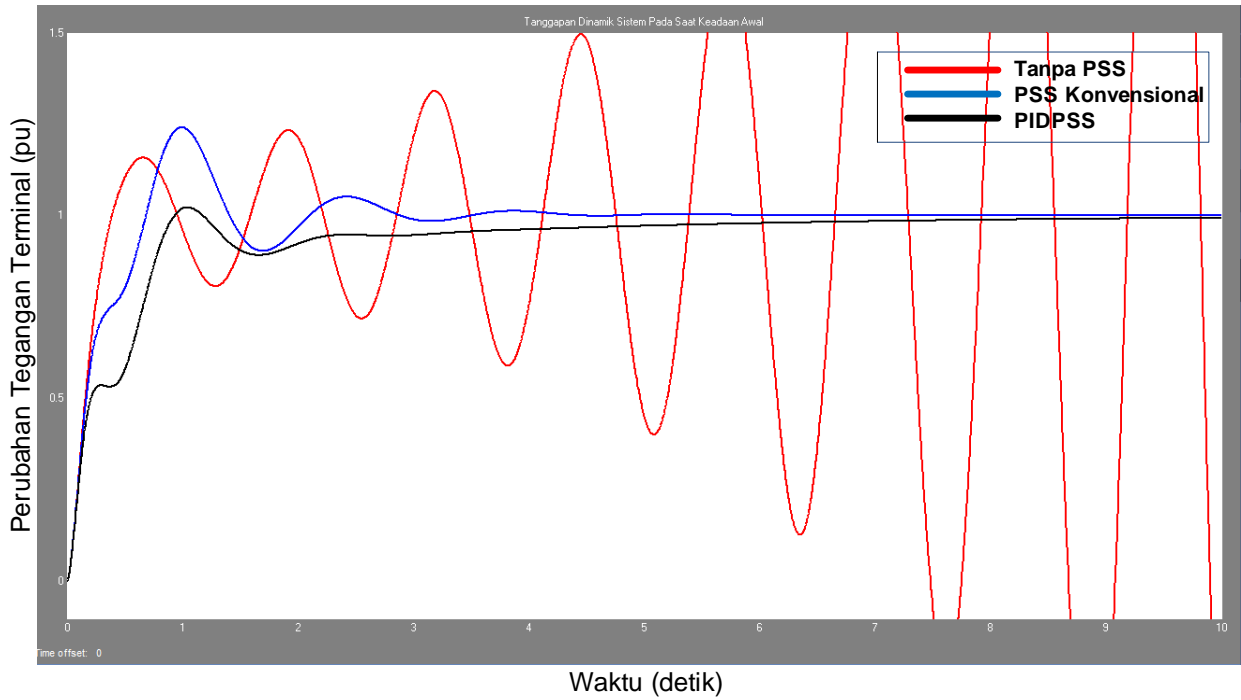
Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 22, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.00672 pu menjadi 0.003 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 55.36% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.003 pu menjadi 0.0024 pu – 0.00176 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.00672 pu menjadi 0.0024 pu – 0.00176 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 20% - 41.33% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 64.29% - 73.81% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.4 detik menjadi 3.45 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 46.09% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.45 detik menjadi 3.4 detik – 2.7 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.4 detik menjadi 3.4 detik – 2.7 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.89% - 21.74% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 47.66% - 57.81% terhadap PSS konvensional.



Gambar 23. Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat keadaan awal.

Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.34 pu	6.95 detik	
PIDPSS	0.0905 pu	3.8 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.0255 pu	3.1 detik	0.171 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0705 pu	3.7 detik	0.712 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.0686 pu	3.6 detik	1.476 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	73.38%	45.32%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	22.09% - 71.82%	2.63% - 18.42%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	79.26.29% - 92.5%	46.76% - 55.39%	

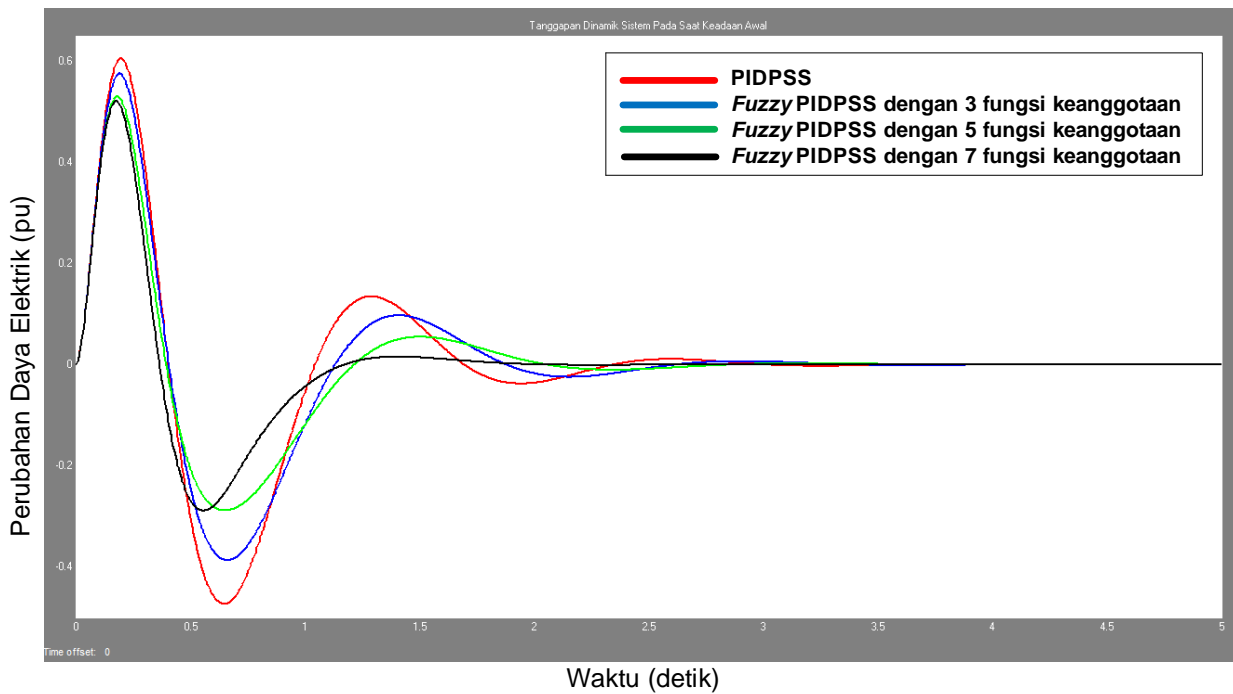
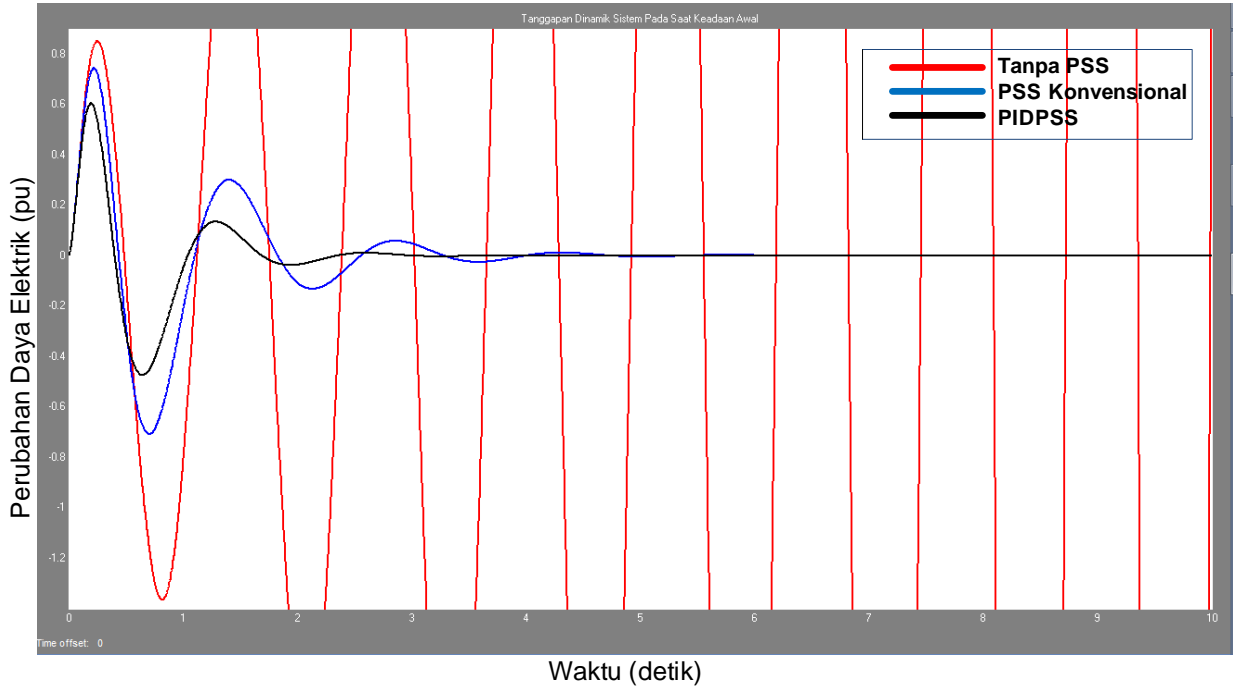
Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 23, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.34 pu menjadi 0.0905 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 73.38% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0905 pu menjadi 0.0705 pu – 0.0255 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.34 pu menjadi 0.0705 pu – 0.0255 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 22.09% - 71.82% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 79.26% - 92.5% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.95 detik menjadi 3.8 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 45.32% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.8 detik menjadi 3.7 detik – 3.1 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.95 detik menjadi 3.7 detik – 3.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.63% - 18.42% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 46.76% - 55.39% terhadap PSS konvensional.



Gambar 24. Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat keadaan awal.

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.1617 pu	6.4 detik	
PIDPSS	0.1078 pu	3.4 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.078 pu	2.6 detik	0.143 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0845 pu	3.3 detik	0.635 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.0815 pu	3.1 detik	1.271 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	33.33%	46.88%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	21.61% - 27.64%	2.94% - 23.53%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	47.74% - 51.76%	48.44% - 59.38%	

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 24, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.1617 pu menjadi 0.1078 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 33.33% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 1.078 pu menjadi 0.0845 pu – 0.078 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.1617 pu menjadi 0.0845 pu – 0.078 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 21.61% - 27.64% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 47.74% - 51.76% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.4 detik menjadi 3.4 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 46.88% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.4 detik menjadi 3.3 detik – 2.6 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.4 detik menjadi 3.3 detik – 2.6 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.94% - 23.53% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 48.44% - 59.38% terhadap PSS konvensional.

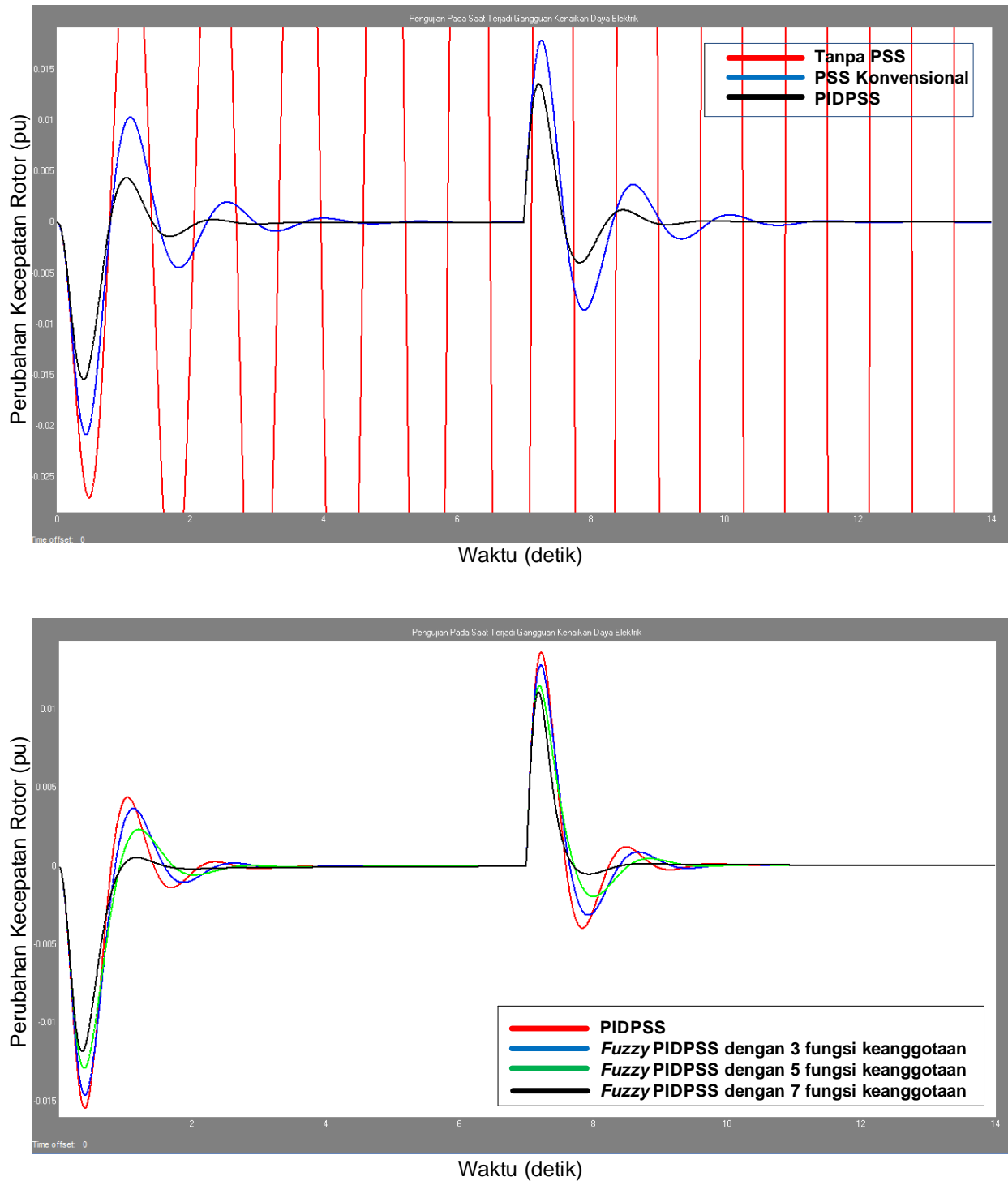


Gambar 25. Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat keadaan awal.

Perubahan daya elektrik (ΔT_e)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.195 pu	6.05 detik	
PIDPSS	0.091 pu	3.1 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.039 pu	2.8 detik	0.154 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.048 pu	3.05 detik	0.587 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.055 pu	2.95 detik	1.212 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	53.33%	48.76%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	39.56% - 57.14%	1.61% - 9.68%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	71.79% - 80%	49.59% - 53.72%	

Perubahan daya elektrik (ΔT_e) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 25, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.195 pu menjadi 0.091 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 53.33% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.091 pu menjadi 0.055 pu – 0.039 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.195 pu menjadi 0.055 pu – 0.039 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 39.56% - 57.14% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 71.79% - 80% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 6.05 detik menjadi 3.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 48.76% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.1 detik menjadi 3.05 detik – 2.8 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 6.05 detik menjadi 3.05 detik – 2.8 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 1.61% - 9.68% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 49.59% - 53.72% terhadap PSS konvensional.

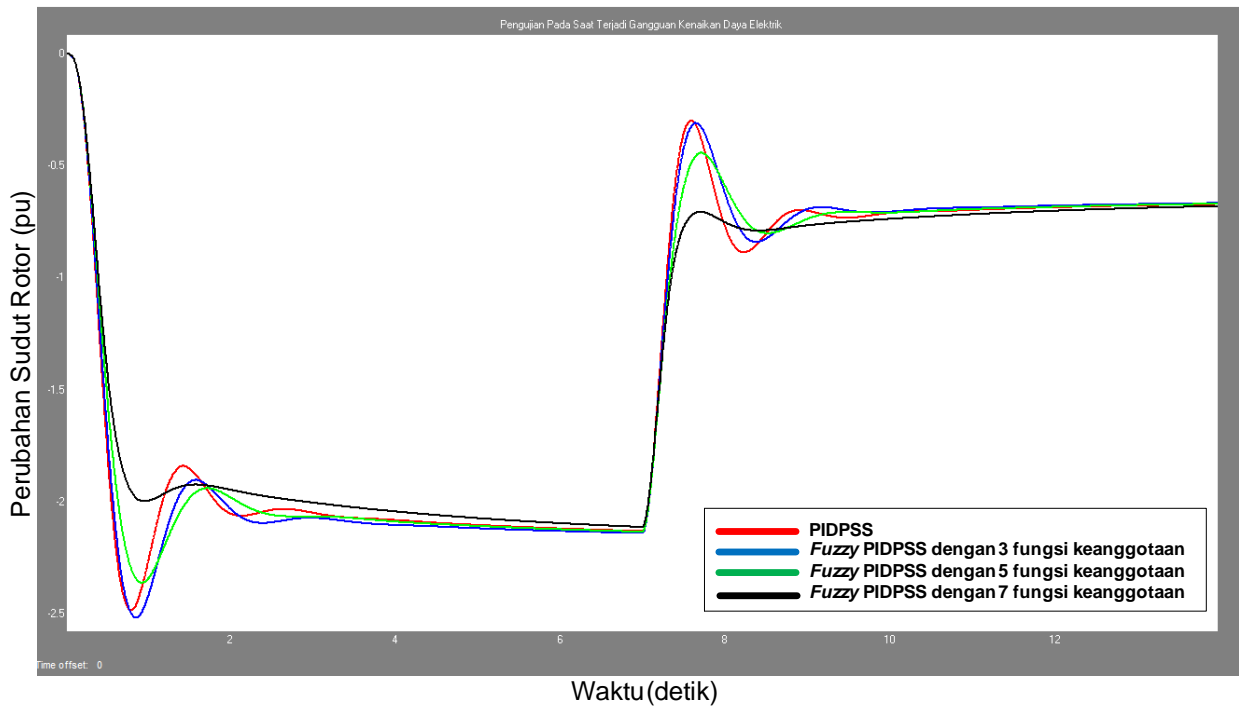
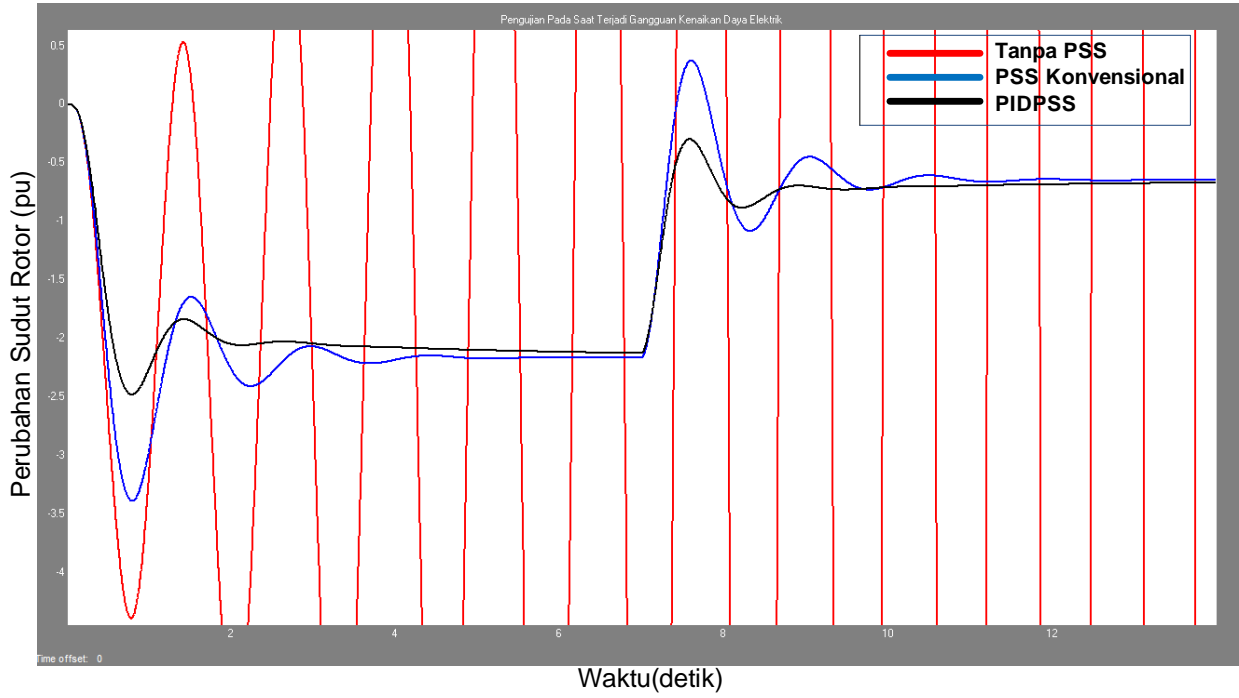
4.2 Pengujian Gangguan Kenaikan Daya Elektrik



Gambar 26. Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu.

Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.0017 pu	4.85 detik	
PIDPSS	0.000788 pu	2.45 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.00022 pu	1.6 detik	0.101 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0004 pu	2.4 detik	0.352 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.00026 pu	2.36 detik	0.759 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	53.65%	49.48%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	49.24% - 72.08%	2.04% - 34.69%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	76.47% - 87.06%	50.52% - 67.01%	

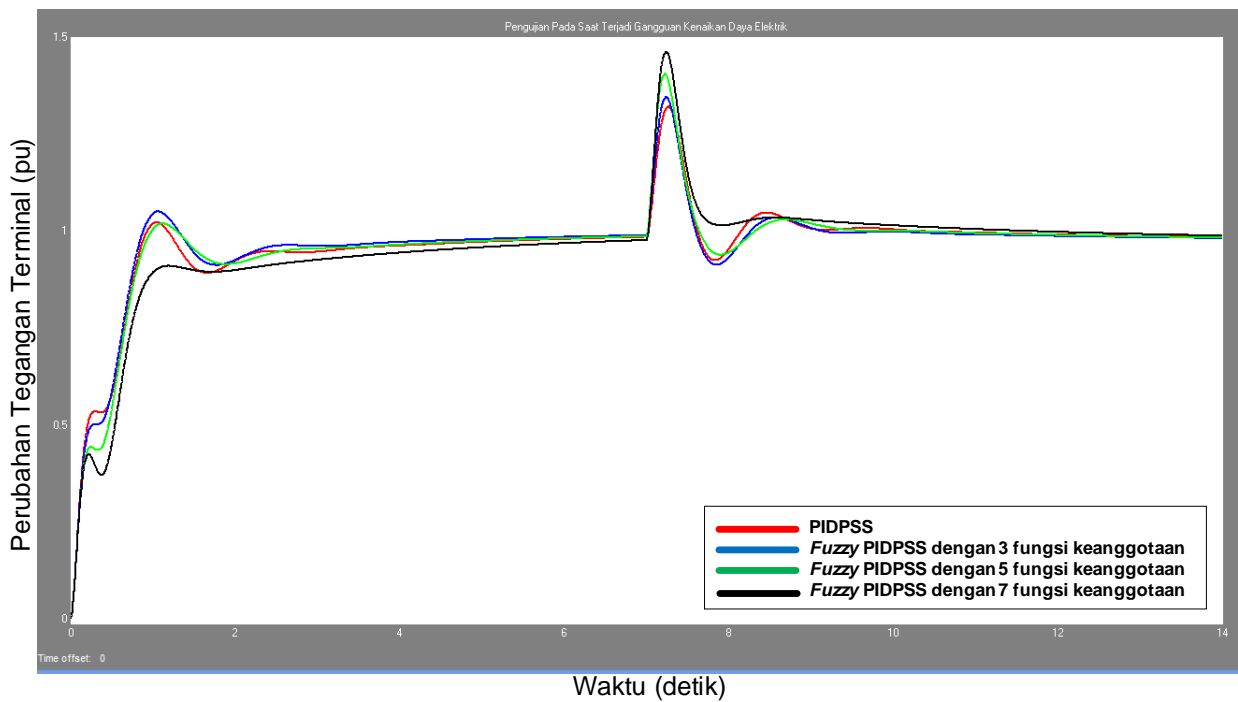
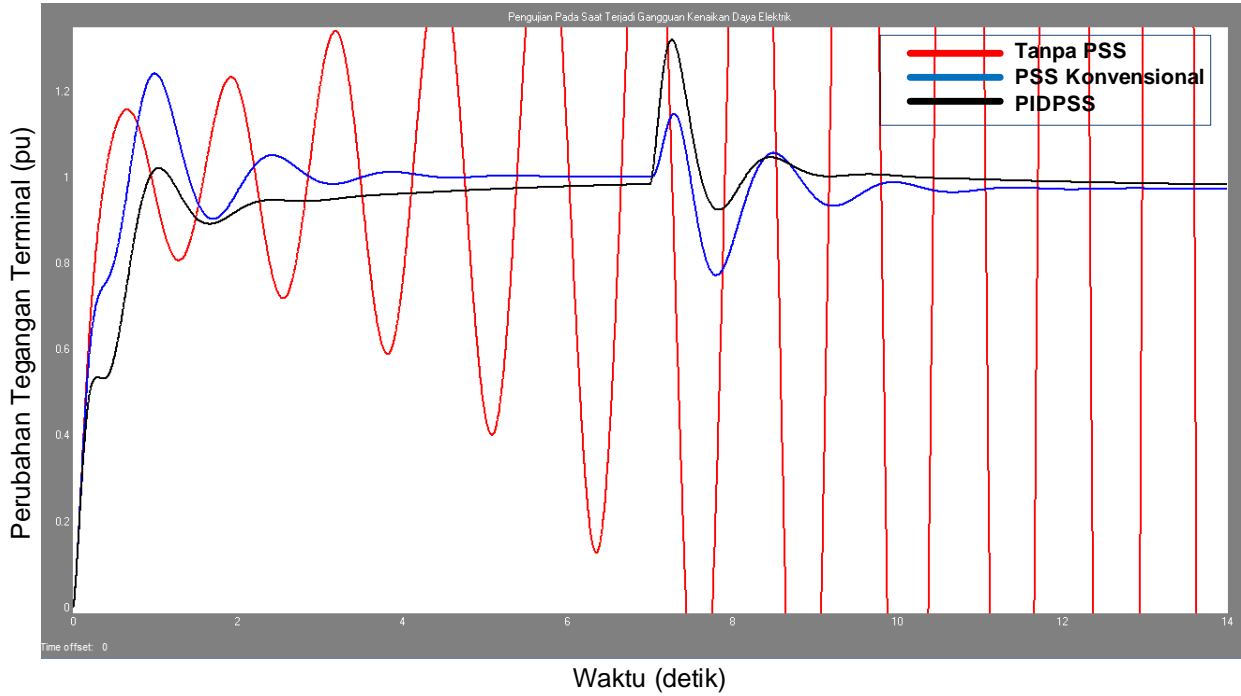
Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 26, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0017 pu menjadi 0.000788 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 53.65% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.000788 pu menjadi 0.0004 pu – 0.00022 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.0017 pu menjadi 0.0004 pu – 0.00022 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 49.24% - 72.08% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 76.47% - 87.06% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 4.85 detik menjadi 2.45 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 49.48% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.45 detik menjadi 2.4 detik – 1.6 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 5.8 detik menjadi 3.4 detik – 3.18 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 2.04% - 34.69% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 50.52% - 67.01% terhadap PSS konvensional.



Gambar 27. Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu.

Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.084 pu	4.3 detik	
PIDPSS	0.0232 pu	3.6 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.003 pu	2.3 detik	0.146 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0133 pu	2.8 detik	0.411 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.0065 pu	2.9 detik	0.933 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	72.38%	16.28%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	42.67% - 87.07%	19.44% - 36.11%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	84.17% - 96.43%	32.56% - 46.51%	

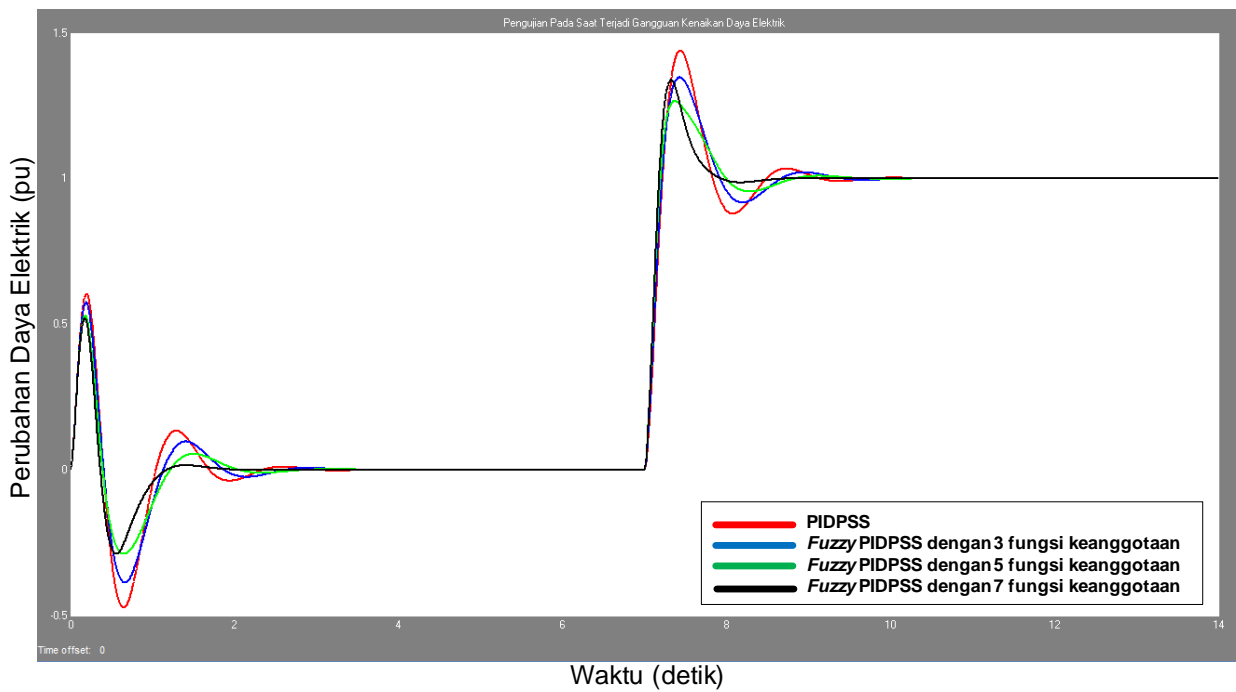
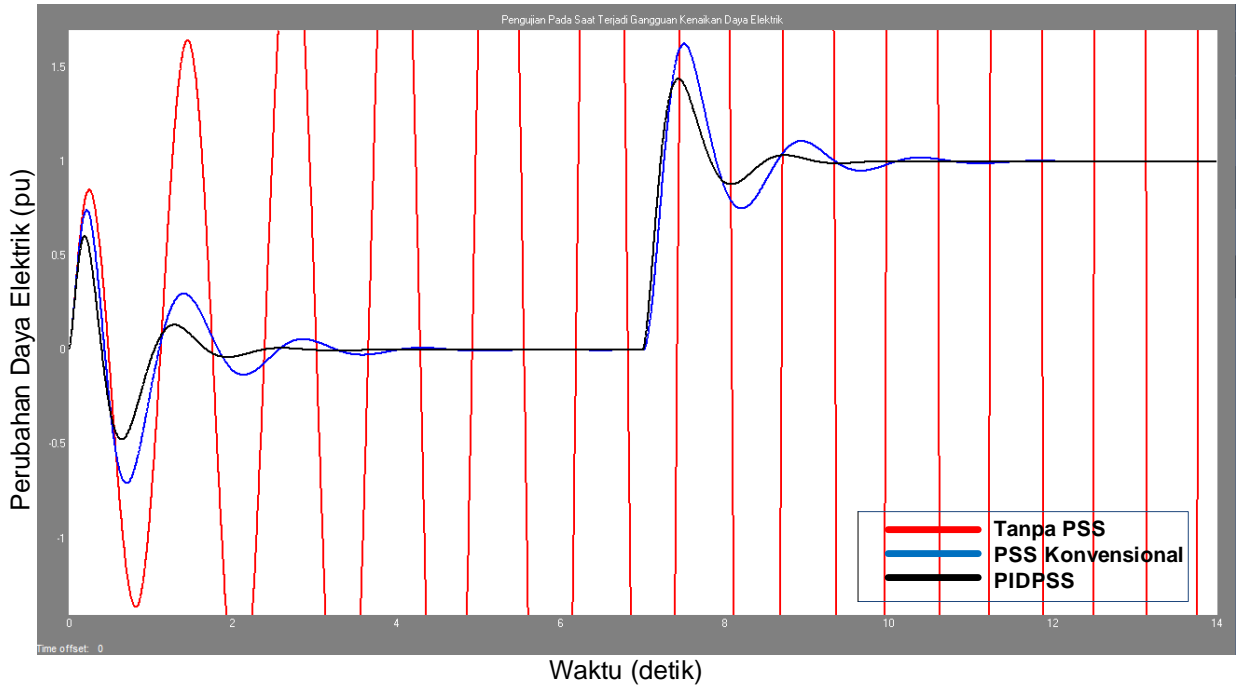
Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 27, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.084 pu menjadi 0.0232 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 72.38% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0232 pu menjadi 0.0133 pu – 0.003 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.084 pu menjadi 0.0133 pu – 0.003 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 42.67% - 87.07% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 84.17% - 96.43% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 4.3 detik menjadi 3.6 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 16.28% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.6 detik menjadi 2.9 detik – 2.3 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 4.3 detik menjadi 2.9 detik – 2.3 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 19.44% - 36.11% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 32.56% - 46.51% terhadap PSS konvensional.



Gambar 28. Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu.

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.04 pu	4 detik	
PIDPSS	0.021 pu	2.95 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.0086 pu	2 detik	0.127 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.019 pu	2.8 detik	0.411 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.01 pu	2.4 detik	0.772 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	47.5%	26.25%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	9.52% - 59.05%	5.08% - 32.2%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	52.5% - 78.5%	30% - 50%	

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 28, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.04 pu menjadi 0.021 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 47.5% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.021 pu menjadi 0.019 pu – 0.0086 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.04 pu menjadi 0.019 pu – 0.0086 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 9.52% - 59.05% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 52.5% - 78.5% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 4 detik menjadi 2.95 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 26.25% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.95 detik menjadi 2.8 detik – 2 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 4 detik menjadi 2.8 detik – 2 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 5.08% - 32.2% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 30% - 50% terhadap PSS konvensional.

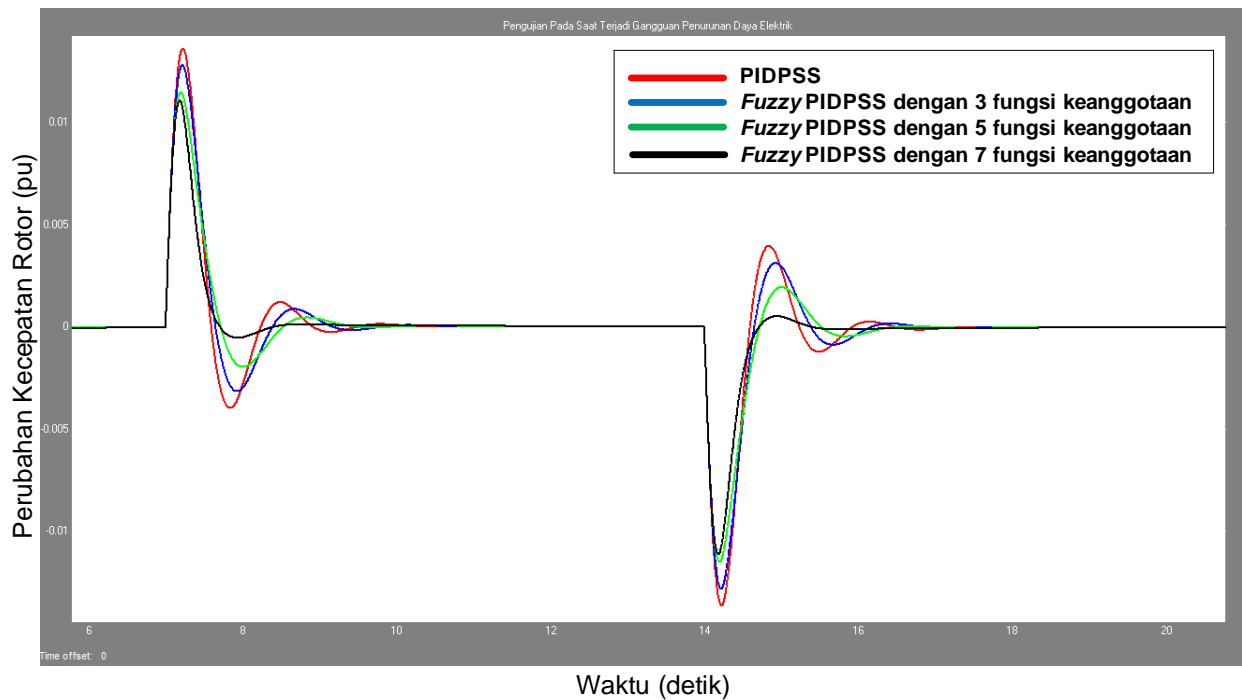
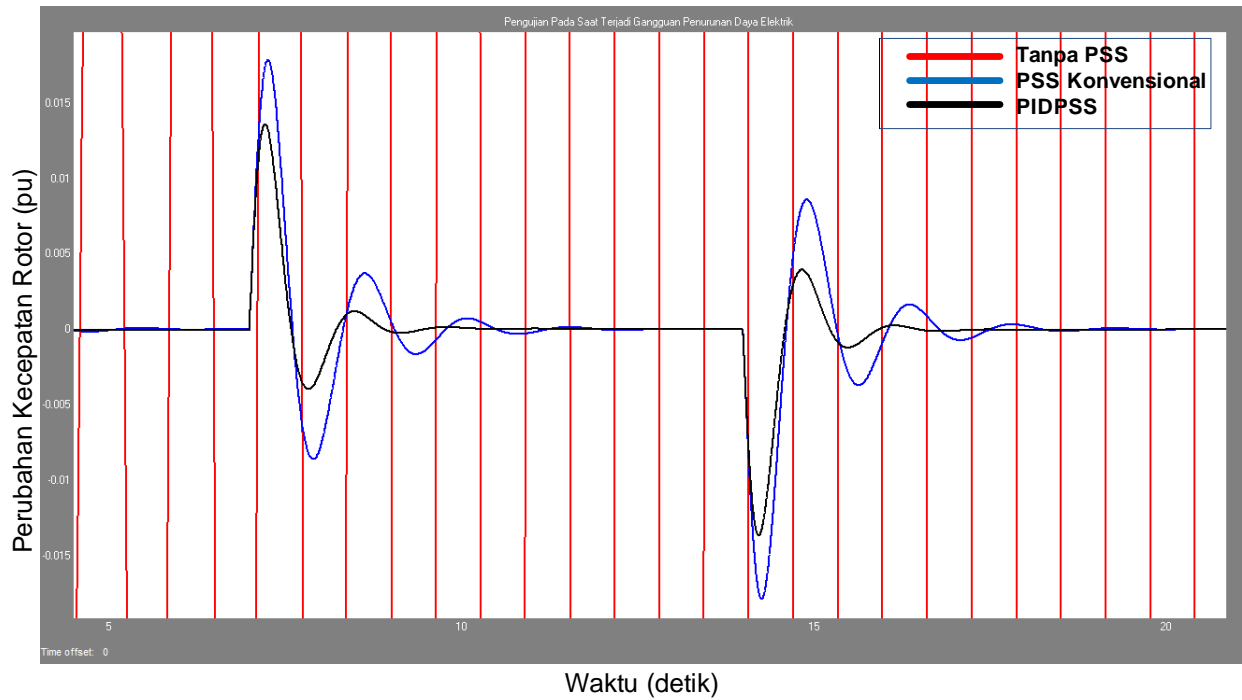


Gambar 29. Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat gangguan kenaikan beban sebesar 0.2 pu.

Perubahan daya elektrik (ΔT_e)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.05 pu	5.05 detik	
PIDPSS	0.024 pu	2.1 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.005 pu	1.8 detik	0.114 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.009 pu	2 detik	0.293 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.007 pu	1.9 detik	0.611 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	52%	58.42%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	62.5% - 79.17%	4.76% - 14.28%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	82% - 90%	60.39% - 64.36%	

Perubahan daya elektrik (ΔT_e) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 29, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.05 pu menjadi 0.024 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 52% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.024 pu menjadi 0.009 pu – 0.005 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.05 pu menjadi 0.009 pu – 0.005 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 62.5% - 79.17% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 82% - 90% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 5.05 detik menjadi 2.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 58.42% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.1 detik menjadi 2 detik – 1.8 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 5.05 detik menjadi 2 detik – 1.8 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 4.76% - 14.28% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 60.39% - 64.36% terhadap PSS konvensional.

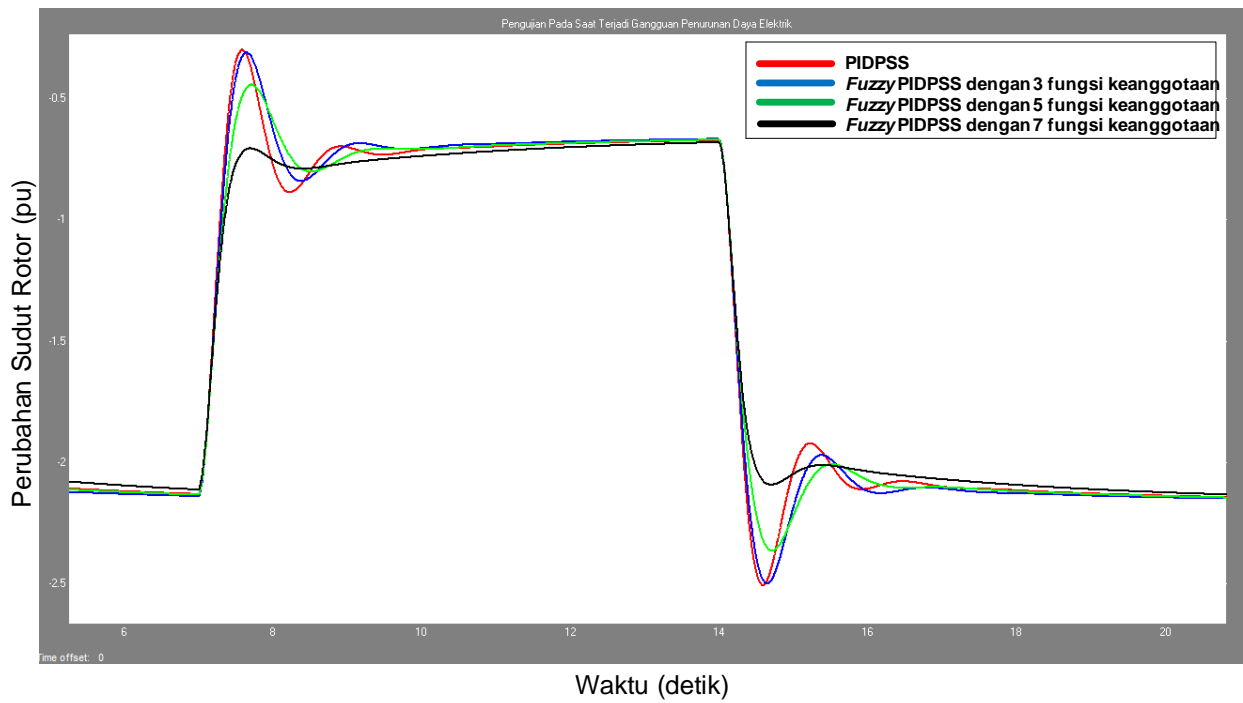
4.2 Pengujian Gangguan Penurunan Daya Elektrik



Gambar 30. Grafik osilasi pada variabel perubahan kecepatan rotor saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu.

Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.00128 pu	4.3 detik	
PIDPSS	0.00064 pu	2.9 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.00014 pu	1.65 detik	0.105 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0004 pu	2.5 detik	0.388 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.00031 pu	2.4 detik	0.904 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	50%	32.56%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	37.5% - 78.13%	13.79% - 43.13%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	68.75% - 89.06%	41.86% - 61.63%	

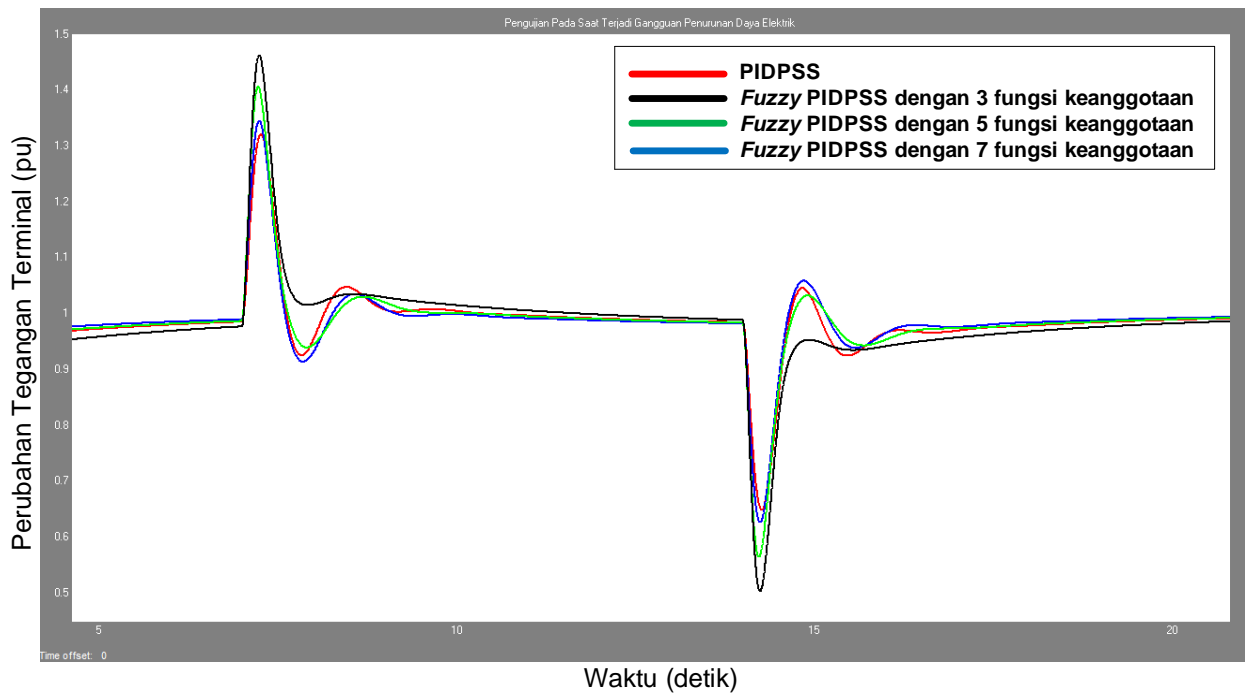
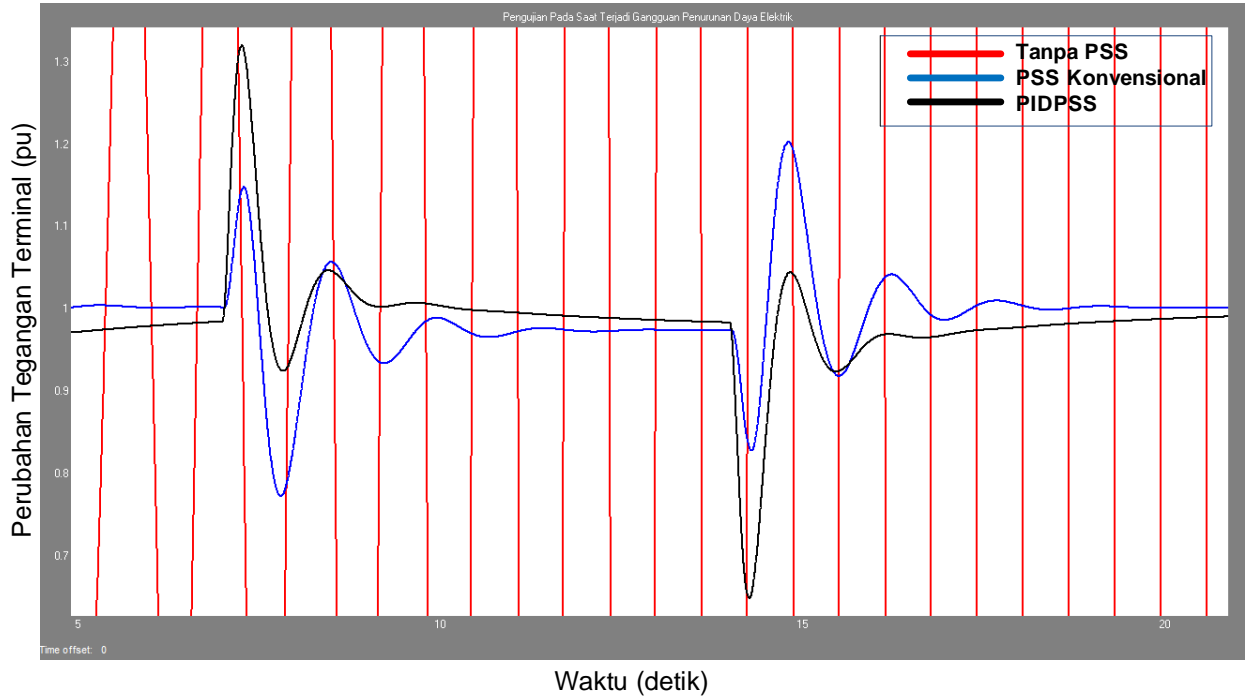
Perubahan kecepatan rotor ($\Delta\omega$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 30, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.00128 pu menjadi 0.00064 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 50% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.00064 pu menjadi 0.0004 pu – 0.00014 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.00128 pu menjadi 0.0004 pu – 0.00014 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 37.5% - 78.13% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 68.75% - 89.06% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 4.3 detik menjadi 2.9 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 32.56% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.9 detik menjadi 2.5 detik – 1.65 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 4.3 detik menjadi 2.5 detik – 2.65 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 13.79% - 43.13% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 41.86% - 61.63% terhadap PSS konvensional.



Gambar 31. Grafik osilasi pada variabel perubahan sudut rotor saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu.

Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.0626 pu	5.1 detik	
PIDPSS	0.0185 pu	3.7 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.0022 pu	2.3 detik	0.146 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.0138 pu	3.3 detik	0.512 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.01 pu	2.8 detik	1.055 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	70.45%	27.45%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	25.41% - 88.11%	10.81% - 37.84%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	77.96% - 96.48%	35.29% - 54.91%	

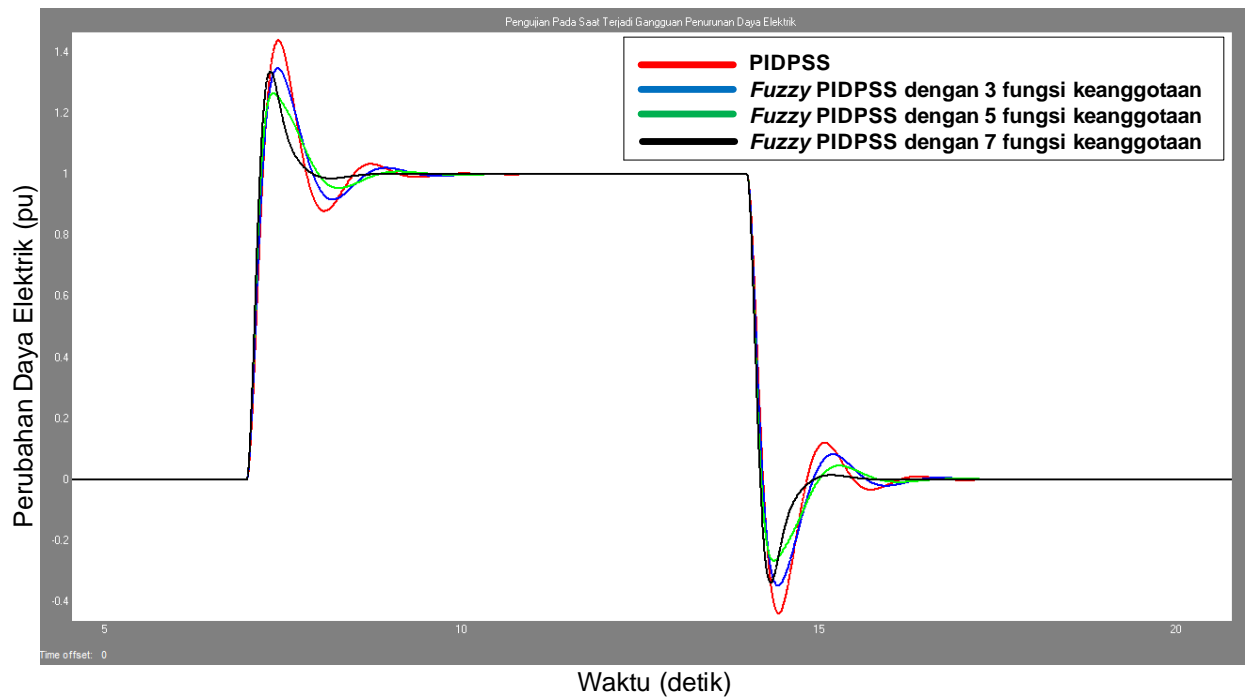
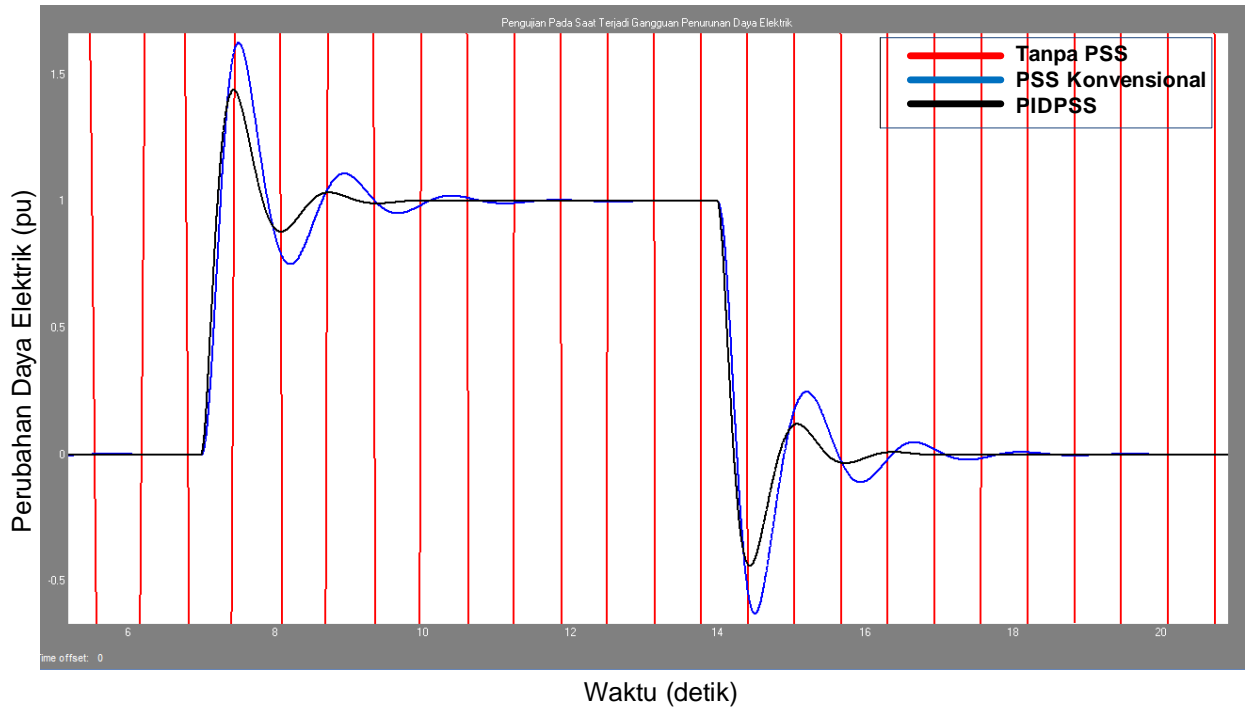
Perubahan sudut rotor ($\Delta\delta$) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 31, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0626 pu menjadi 0.0185 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 70.45% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.0185 pu menjadi 0.0138 pu – 0.002 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.0626 pu menjadi 0.0138 pu – 0.002 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 25.41% - 88.11% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 77.96% - 96.48% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 5.1 detik menjadi 3.7 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 22.45% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 3.7 detik menjadi 3.3 detik – 2.3 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 5.1 detik menjadi 3.3 detik – 2.3 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 10.81% - 37.84% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 35.29% - 54.91% terhadap PSS konvensional.



Gambar 32. Grafik osilasi pada variabel perubahan tegangan terminal saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu.

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.03 pu	4.45 detik	
PIDPSS	0.016 pu	2.95 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.0074 pu	1.6 detik	0.101 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.015 pu	2.3 detik	0.356 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.0125 pu	2.2 detik	0.829 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	46.67%	33.71%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	6.25% - 53.75%	22.03% - 45.76%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	50% - 75.33%	48.31% - 64.04%	

Perubahan tegangan terminal (ΔV_t) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 32, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.03 pu menjadi 0.015 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 46.67% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.015 pu menjadi 0.016 pu – 0.0074 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.03 pu menjadi 0.016 pu – 0.0074 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 6.25% - 53.75% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 50% - 75.33% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 4.45 detik menjadi 2.95 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 33.71% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.95 detik menjadi 2.3 detik – 1.6 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 4.45 detik menjadi 2.3 detik – 1.6 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 22.03% - 45.76% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 48.31% - 64.04% terhadap PSS konvensional.



Gambar 33. Grafik osilasi pada variabel perubahan daya elektrik saat gangguan penurunan beban sebesar 0.15 pu.

Perubahan daya elektrik (ΔT_e)	Nilai <i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	Waktu Komputasi
PSS konvensional	0.037 pu	5. detik	
PIDPSS	0.018 pu	2.9 detik	
FPIDPSS dengan 7 fungsi keanggotaan	0.003 pu	1.6 detik	0.101 detik
FPIDPSS dengan 5 fungsi keanggotaan	0.01 pu	2.45 detik	0.379 detik
FPIDPSS dengan 3 fungsi keanggotaan	0.007 pu	1.9 detik	0.716 detik
Penurunan PIDPSS terhadap PSS konvensional	51.35%	42%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PIDPSS	44.44% - 83.33%	15.52% - 44.83%	
Penurunan FPIDPSS terhadap PSS konvensional	72.97% - 91.89%	51% - 68%	

Perubahan daya elektrik (ΔT_e) pada PIDPSS yang terdapat dalam Gambar 33, mengalami penurunan *overshoot* dari 0.037 pu menjadi 0.018 pu terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 51.35% terhadap PSS konvensional. Kemudian pada FPIDPSS mengalami penurunan *overshoot* dari 0.018 pu menjadi 0.01 pu – 0.003 pu terhadap PIDPSS dan penurunan *overshoot* dari 0.018 pu menjadi 0.01 pu – 0.003 pu terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 44.44% - 83.33% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 72.97% - 91.89% terhadap PSS konvensional. Penurunan *settling time* pada PIDPSS dari 5 detik menjadi 2.9 detik terhadap PSS konvensional, sehingga PIDPSS mengalami penurunan sebesar 42% terhadap PSS konvensional. Kemudian FPIDPSS mengalami penurunan *settling time* dari 2.9 detik menjadi 2.45 detik – 1.6 detik terhadap PIDPSS dan penurunan *settling time* dari 5.8 detik menjadi 3.4 detik – 3.1 detik terhadap PSS konvensional, sehingga FPIDPSS mengalami penurunan sebesar 15.52% - 44.83% terhadap PIDPSS dan penurunan sebesar 51% - 68% terhadap PSS konvensional.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh dari simulasi terhadap berbagai jenis pengujian dapat disimpulkan:

1. Perbaikan unjuk kerja stabilitas dinamik sistem tenaga listrik dapat terlihat dari penurunan nilai *overshoot* dan *settling time*.
2. Penerapan pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) untuk memperbaiki stabilitas dinamik pada sistem SMIB dapat memberikan unjuk kerja kerja peredaman osilasi yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali PSS konvensional. Kemudian penerapan pengendali logika *fuzzy Proportional Integral Derivative* (FPID) untuk memperbaiki stabilitas dinamik pada sistem SMIB dapat memberikan unjuk kerja peredaman osilasi yang lebih baik lagi jika dibandingkan dengan pengendali PIDPSS. Hasil penurunan *overshoot* pada ketiga jenis pengujian yaitu berkisar antara 73.881% - 89.069% untuk variabel perubahan kecepatan rotor, 92.5% - 96.48% untuk variabel perubahan sudut rotor, 51.76% - 78.5% untuk variabel perubahan tegangan terminal, dan 80% - 91.89% untuk variabel perubahan daya elektrik. Sedangkan hasil penurunan *settling time* berkisar antara 57.81% - 67.01% untuk variabel perubahan kecepatan rotor.
3. Pada penelitian ini pengendali logika *fuzzy* dengan jumlah tujuh fungsi keanggotaan dapat memberikan hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan pengendali logika *fuzzy* yang menggunakan lima dan tiga fungsi keanggotaan, hal ini dapat dilihat dari hasil penurunan nilai *overshoot*, *settling time*. Tetapi untuk kecepatan waktu komputasi, pengendali logika *fuzzy* dengan jumlah tujuh fungsi keanggotaan lebih lama jika dibandingkan dengan pengendali logika *fuzzy* yang menggunakan lima dan tiga fungsi keanggotaan

Daftar Pustaka

- Elangovan, S., Lim, C., Min, (1985, September), A New Stabilizer Design Technique for Multimachine Power System, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, No. 9, pp 2393-2400.
- Emami, M., R., Turksen, I., Burhan, (1998, August), *Development of Systematic Methodology of Fuzzy Logic Modelling*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 6, No. 3, pp 346-361.
- Hiyama, T., Kugimiya, M., dan Satoh, H., (1994, September), *Advanced PID Type Fuzzy Logic Power System Stabilizer*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, No. 3, pp. 514-520.
- Hiyama, T., (1994, September), Robustness of Fuzzy Logic Power System Stabilizers Applied to Multimachine Power System, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 9, No. 3, pp. (451-459).
- Hoang, P., dan Tomsovic, K., (1996, June), *Design and Analysis of an Adaptive Fuzzy Power System Stabilizer*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, No. 2, pp. 445-461.
- Hsu, Y., Y., (1987, September), *Design of Self-Tuning PID Power System Stabilizers for Synchronous Generator*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. EC-2, No. 3, pp. 343-348.
- Hu, B., G., Mann, G., K., I., dan Gosine, R., G., (1999, October), *New Methodology for Analytical and Optimal Design of Fuzzy PID Controllers*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 7, No. 7, pp. 521-539.
- Hu, B., G., Mann, G., K., I., dan Gosine, R., G., (2001, October), *A Systematic Study of Fuzzy PID Controllers Fuction Based Evaluation Approach*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, No. 5, pp. 669-712.
- Jamshidi, M., Vadiiee, N., dan Ross, J., Timothy, (1993), *Fuzzy Logic Control (Software and Hardware Applications)*, Prentice-Hall International Inc, New Jersey.

- Kim, D., dan Rhee, S., (2001, June), *Design of an Optimal Fuzzy Logic Controller Using Response Surface Methodology*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, No. 3, pp. 404-412.
- Kuo, B., C., (1995), *Automatic Control Systems*, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Li, W., (1998, November), *Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral Derivative Controller*, IEEE transactions on Fuzzy Systems, vol. 6, No. 4, pp. 449-463.
- Li, H., Xiong, (1997, October), *A Comparative Design and Tuning for Conventional Fuzzy Control*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, vol. 27, No. 5, pp. 884-889.
- Malki, H., A., Li, H., dan Chen, G., (1994, November), *New Design and Stability Analysis of Fuzzy Proportional Derivative Control Systems*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 2, No. 4, pp. 245-254.
- Ogata, K., (2002), *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall Inc, New Jersey.
- Padiyar, K., R., (1984), *Power System Dynamics Stability and Control*, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd, Singapore.
- Robandi, I., (2002, October), *The Fuzzy Rules and Weighting Matrices Automatic Tuning Strategy on Optimal Fuzzy Logic Power System Stabilizer By Using Genetic Algorithm*, Proceeding Seminar Sistem Tenaga Listrik III, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, hal. II-31 – II-41.
- Toliyat, H., A., Sadeh, J., dan Ghazi, R., (1996, March), *Design of Augmented Fuzzy Logic Power System Stabilizers to Enhance Power System Stability*, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 11, pp. 97-103.
- Wakimin, (2001), *Studi Power System Stabilizer dengan PID berbasis Logika Fuzzy*, Skripsi Sarjana, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Wolovich, W., A., (1994), *Automatic Control System Basic Analysis and Design*, Saunders College Publishing, Florida.
- Yu, Y., N., (1983), *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, New York.
- Zhao, Z., Y., Tomizuka, M., dan Isaka, S., (1993, October), *Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers*, IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, vol. 23, No. 5, pp. 1392-1398.

LAMPIRAN

Analisis aturan (*rule*) logika *fuzzy*

Lampiran no. 1 Aturan logika *fuzzy* dengan 3 fungsi Keanggotaan segitiga

1. Titik $\Delta\omega = 0.0081969$, $d\Delta\omega = 0.0001679$, dan $U_E = 0.29677$

1.1 Membuat himpunan dan input *fuzzy*

Ada 2 variabel *fuzzy* yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.0078173$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan *fuzzy* N, $\mu_{wN} [0.0078173] = 0$
- Himpunan *fuzzy* Z, $\mu_{wZ} [0.0078173] = 0.7663$
- Himpunan *fuzzy* P, $\mu_{wP} [0.0078173] = 1$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0003506$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan *fuzzy* N, $\mu_{wN} [0.0003506] = 0.4104$
- Himpunan *fuzzy* Z, $\mu_{wZ} [0.0003506] = 0.5896$
- Himpunan *fuzzy* P, $\mu_{wP} [0.0003506] = 0$

1.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.0001679]) \\ &= \min (0; 0.4104) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 &= \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.0001679]) \\ &= \min (0; 0.5896) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.0001679]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 &= \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.0001679]) \\ &= \min (0.7663; 0.4104) \\ &= 0.4104\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 &= \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.0001679]) \\ &= \min (0.7663; 0.5896) \\ &= 0.5896\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.0001679]) \\ &= \min (0.7663; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_7 &= \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.0001679]) \\ &= \min (1; 0.4104) \\ &= 0.4104\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 &= \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.0001679]) \\ &= \min (1; 0.5896) \\ &= 0.5896 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.0001679]) \\ &= \min (1; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

1.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E \\ z &= \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,29677 \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

2. Titik $\Delta\omega = -0.0073642$, $d\Delta\omega = -0.00057791$, dan $U_E = -0.47466$

2.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = -0.0073642$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.0073642] = 0.6162$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.0073642] = 0.3838$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.0073642] = 0$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = -0.00057791$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00057791] = 0.8361$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00057791] = 0.1639$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00057791] = 0$

2.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [-0.0073642], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.6162; 0.8361) \\ &= 0.6162 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 2 &= \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.6162; 0.1639) \\ &= 0.1639 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 3 &= \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.6162; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 4 &= \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.3838; 0.8361) \\ &= 0.3838 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 5 &= \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.3838; 0.1639) \end{aligned}$$

$$= 0.1639$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= \min (0.3838; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= \min (0; 0.8361) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= \min (0; 0.1639) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

2.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.6162.x1 + 0.1639.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0.6162 + 0.1639 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.6162.x1 + 0.1639.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0.6162 + 0.1639 + 0 + \dots + 0} = 0,47466 \dots \dots \dots (2)$$

3. Titik $\Delta\omega = -0.011057$, $d\Delta\omega = -0.00003615$, dan $U_E = -0.35874$

3.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.0078173$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.011057] = 0.9997$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.011057] = 0.0003115$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.011057] = 0$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0003506$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00003615] = 0.4483$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00003615] = 0.5517$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00003615] = 0$

3.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.9997; 0.4483) \\ &= 0.4483 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.9997; 0.5517) \\ &= 0.5517 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.9997; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 &= \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.0003115; 0.4483) \\ &= 0.0003115\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 &= \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.0003115; 0.5517) \\ &= 0.0003115\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 &= \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= \min (0.0003115; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_7 &= \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= \min (0; 0.4483) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_8 &= \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= \min (0; 0.5517) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

3.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.4483 \cdot x_1 + 0.5517 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + \dots + 0 \cdot x_9}{0.4483 + 0.5517 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.4483 \cdot x_1 + 0.5517 \cdot x_2 + 0 \cdot x_3 + \dots + 0 \cdot x_9}{0.4483 + 0.5517 + 0 + \dots + 0} = 0,35874 \dots \dots \dots (3)$$

4. Titik $\Delta\omega = 0.0013875$, $d\Delta\omega = 0.00020499$, dan $U_E = 0.065322$

4.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.0078173$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0013875] = 0$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0013875] = 0.7073$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.011057] = 0.2927$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0003506$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.00020499] = 0.2757$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.00020499] = 0.7243$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.00020499] = 0$

4.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [0.0013875], \mu_{dwN} [0.00020499]) \\ &= \min (0; 0.2757) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [0.0013875], \mu_{dwZ} [0.00020499]) \\ &= \min (0; 0.7243) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.0013875], \mu_{dwP} [0.00020499]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013875], \mu_{dwN} [0.00020499]) \\ &= \min (0.7073; 0.2757) \\ &= 0.2757\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013875], \mu_{dwZ} [0.00020499]) \\ &= \min (0.7073; 0.7243) \\ &= 0.5517\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013875], \mu_{dwP} [0.00020499]) \\ &= \min (0.7073; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_7 = \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [0.0013875], \mu_{dwN} [0.00020499])$$

$$= \min (0.2927; 0.2757)$$

$$= 0.2757$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_8 = \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [0.0013875], \mu_{dwZ} [0.00020499])$$

$$= \min (0.2927; 0.7243)$$

$$= 0.2927$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_9 = \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.0013875], \mu_{dwP} [0.00020499])$$

$$= \min (0.2927; 0)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

4.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,065322 \dots \dots \dots (4)$$

5. Titik $\Delta\omega = 0.0030211$, $d\Delta\omega = 0.0000098$, dan $U_E = 0.030635$

5.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.0030211$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0030211] = 0$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0030211] = 0.5376$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.0030211] = 0.4624$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0000098$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0000098] = 0.4154
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0000098] = 0.5846
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [0.0000098] = 0

5.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= \min (0; 0.4154) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= \min (0; 0.5846) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= \min (0.5376; 0.4154) \\ &= 0.4154 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= \min (0.5376; 0.5846) \\ &= 0.5376 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= \min (0.5376; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= \min (0.4624; 0.4154) \\ &= 0.4154 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= \min (0.4624; 0.5846) \\ &= 0.4624 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= \min (0.4624; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

5.3 Defuzzy

Metode defuzzy yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0,030635 \dots\dots\dots(5)$$

6. Titik $\Delta\omega = -0.00078254$, $d\Delta\omega = -0.00000166$, dan $U_E = -0.072115$

6.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = -0.00078254$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0030211] = 0
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0030211] = 0.9327
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [-0.0030211] = 0.0673

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = -0.00000166$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0000098] = 0.4236
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0000098] = 0.5764
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [0.0000098] = 0

6.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166]) \\ &= \min (0; 0.4236) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_2 = \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166])$$

$$= \min (0; 0.5764)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha3 = \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166])$$

$$= \min (0; 0)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha4 = \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166])$$

$$= \min (0.9237; 0.4236)$$

$$= 0.4154$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha5 = \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166])$$

$$= \min (0.9237; 0.5764)$$

$$= 0.5764$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha6 = \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166])$$

$$= \min (0.9237; 0)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha7 = \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166])$$

$$= \min (0.0673; 0.4154)$$

$$= 0.0673$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha8 = \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166])$$

$$= \min (0.0673; 0.5846)$$

$$= 0.0673$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_9 = \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166]) \\ = \min (0.0673; 0.2030) \\ = 0.0673$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

6.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E \\ z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0.072215 \dots\dots\dots(6)$$

7. Titik $\Delta\omega = 0.00020303$, $d\Delta\omega = 0.00000201$, **dan** $U_E = -0.046007$

7.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.00020303$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0030211] = 0$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0030211] = 0.8304$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.0030211] = 0.1696$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.00000201$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0000098] = 0.4223
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0000098] = 0.5777
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [0.0000098] = 0

7.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.00000201]) \\ &= \min (0; 0.4223) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.00000201]) \\ &= \min (0; 0.5777) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.00000201]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.00000201]) \\ &= \min (0.8304; 0.4223) \\ &= 0.4223\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.00000201]) \\ &= \min (0.8304; 0.5777) \\ &= 0.5777\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.00000201]) \\ &= \min (0.8304; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.00000201]) \\ &= \min (0.1696; 0.4223) \\ &= 0.1696 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.00000201]) \\ &= \min (0.1696; 0.5777) \\ &= 0.1696 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.00000201]) \\ &= \min (0.1696; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

7.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E \\ z &= \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0.046007 \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

8. Titik $\Delta\omega = -0.000000656$, $d\Delta\omega = 0.000004705$, dan $U_E = -0.053218$

8.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = -0.000000656$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0030211] = 0$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0030211] = 0.8515$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.0030211] = 0.1485$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = -0.000004705$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0000098] = 0.4258$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0000098] = 0.5742$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0000098] = 0$

8.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwN} [-0.000004705]) \\ &= \min (0; 0.4258) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705]) \\ &= \min (0; 0.5742) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwP} [-0.000004705]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_4 = \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dwN} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.8515; 0.4258)$$

$$= 0.4223$$

Nilai konsekuen $U_E = x4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_5 = \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.8515; 0.5742)$$

$$= 0.5777$$

Nilai konsekuen $U_E = x5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_6 = \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dWP} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.8515; 0)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_7 = \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dWN} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.1485; 0.4258)$$

$$= 0.1485$$

Nilai konsekuen $U_E = x7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_8 = \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.1485; 0.5742)$$

$$= 0.1485$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_9 = \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dWP} [-0.000004705])$$

$$= \min (0.1485; 0)$$

$$= 0$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

8.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = 0.053218 \dots\dots\dots(8)$$

9. Titik $\Delta\omega = 0.000011852$, $d\Delta\omega = 0.0000004457$, dan $U_E = -0.050852$

9.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar 20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{wN} a = -0.01106; b = -0.01106; dan c = -0.00143

Untuk μ_{wZ} a = -0.01106; b = -0.00143; dan c = 0.008197

Untuk μ_{wP} a = -0.00143; b = 0.008197; dan c = 0.008197

Jika $\Delta\omega = 0.000011852$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0030211] = 0
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0030211] = 0.8502
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [-0.0030211] = 0.1498

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Gambar20.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ (x - a)/(b - a); & a \leq x \leq b \\ (c - x)/(c - b); & b \leq x \leq c \\ 0; & x \geq c \end{cases}$$

Untuk μ_{dwN} a = -0.0008069; b = -0.0008069; dan c = -0.0005902

Untuk μ_{dwZ} a = -0.0008069; b = -0.0005902; dan c = 0.001987

Untuk μ_{dwP} a = 0.0005902; b = 0.001987; dan c = 0.001987

Jika $d\Delta\omega = 0.0000004457$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, μ_{wN} [0.0000098] = 0.4221
- Himpunan fuzzy Z, μ_{wZ} [0.0000098] = 0.5779
- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [0.0000098] = 0

9.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikanR1} = \min (\mu_{wN} [0.000011852], \mu_{dwN} [0.0000004457]) \\ &= \min (0; 0.4221) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [0.000011852], \mu_{dwZ} [0.00000044571]) \\ &= \min (0; 0.57791) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.000011852], \mu_{dwP} [0.00000044571]) \\ &= \min (0; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.000011852], \mu_{dwN} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.8502; 0.4221) \\ &= 0.4221\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.000011852], \mu_{dwZ} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.8502; 0.5779) \\ &= 0.5779\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.000011852], \mu_{dwP} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.8502; 0) \\ &= 0\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.000011852], \mu_{dwN} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.1498; 0.4221) \\ &= 0.1498\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.000011852], \mu_{dwZ} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.1498; 0.5779)\end{aligned}$$

$$= 0.1498$$

Nilai konsekuen $U_E = x8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.000011852], \mu_{dwP} [0.00000044571]) \\ &= \min (0.1498; 0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x9$

9.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = U_E$$

$$z = \frac{0.x1 + 0.x2 + 0.x3 + \dots + 0.x9}{0 + 0 + 0 + \dots + 0} = -0.050852 \dots\dots\dots(9)$$

Kesembilan persamaan diatas, kemudian kita susun kedalam matriks $A.x = C$, dimana:

Matriks A =

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 & 0.4104 & 0.5896 & 0 \\ 0.6162 & 0.1639 & 0 & 0.013838 & 0.0394 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4483 & 0.5517 & 0 & 0.0003115 & 0.0003115 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2757 & 0.7073 & 0 & 0.2757 & 0.2027 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4154 & 0.5376 & 0 & 0.4154 & 0.4624 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.44236 & 0.5764 & 0 & 0.0673 & 0.0673 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4223 & 0.5777 & 0 & 0.1696 & 0.1696 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4258 & 0.5742 & 0 & 0.1485 & 0.1485 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.4221 & 0.5777 & 0 & 0.1498 & 0.1498 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriks x =

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix};$$

Matriks C =

$$C = \begin{bmatrix} 0.59354 \\ -0.5712 \\ -0.359 \\ 0.1013 \\ 0.056 \\ -0.08194 \\ -0.06161 \\ -0.06902 \\ -0.05185 \end{bmatrix}$$

Untuk mendapatkan penyelesaian nilai x_1 sampai x_9 , kita harus menghitung dulu matriks A^{-1} (A invers). Tetapi setelah kita hitung, ternyata matriks A diatas tidak bisa kita dapatkan nilai-nilai inversnya, sehingga nilai-nilai x_1 sampai x_9 dari matriks $A.x = C$ diatas tidak dapat diselesaikan dan pengendali logika fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga tidak dapat kita gunakan.

Lampiran no. 2 Aturan logika *fuzzy* dengan 3 fungsi Keanggotaan *gaussian*

1. Titik $\Delta\omega = 0.0081969$, $d\Delta\omega = 0.00001679$, dan $U_E = 0.29677$

1.1 Membuat himpunan dan input *fuzzy*

Ada 2 variabel *fuzzy* yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = 0.0081969$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan *fuzzy* N, $\mu_{wN} [0.0081969] = 0.00001519$
- Himpunan *fuzzy* Z, $\mu_{wZ} [0.0081969] = 0.0625$
- Himpunan *fuzzy* P, $\mu_{wP} [0.0081969] = 1$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0005902$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = 0.00001679$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan *fuzzy* N, $\mu_{wN} [0.00001679] = 0.3815$
- Himpunan *fuzzy* Z, $\mu_{wZ} [0.00001679] = 0.6342$
- Himpunan *fuzzy* P, $\mu_{wP} [0.00001679] = 0.0040$

1.2 Aplikasi Operator *fuzzy*

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.00001679]) \\ &= (0.00001519; 0.3815) \\ &= 0.00001519\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_2 = \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.00001679])$$

$$= (0,00001519; 0.6342)$$

$$= 0.00001519$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_3 = \mu_{predikatR3} = \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.00001679])$$

$$= (0,00001519; 0.0040)$$

$$= 0.00001519$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_4 = \mu_{predikatR4} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.00001679])$$

$$= (0.0625; 0.3815)$$

$$= 0.0625$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_5 = \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.00001679])$$

$$= (0.0625; 0.6342)$$

$$= 0.0625$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_6 = \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.00001679])$$

$$= (0.0625; 0.0040)$$

$$= 0.0040$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_7 = \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwN} [0.00001679])$$

$$= (1; 0.3815)$$

$$= 0.3815$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\alpha_8 = \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwZ} [0.00001679])$$

$$= (1; 0.6342)$$

$$= 0.6342$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [0.0081969], \mu_{dwP} [0.00001679]) \\ &= (1; 0.0040) \\ &= 0.0040 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

1.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.00001519 \cdot x_1 + 0.00001519 \cdot x_2 + 0.00001519 \cdot x_3 + \dots + 0.0040 \cdot x_9}{0.00001519 + 0.00001519 + 0.00001519 + \dots + 0.0040} = U_E \\ z &= \frac{0.00001519 \cdot x_1 + 0.00001519 \cdot x_2 + 0.00001519 \cdot x_3 + \dots + 0.0040 \cdot x_9}{0.00001519 + 0.00001519 + 0.00001519 + \dots + 0.0040} = 0,29677 \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

2. Titik $\Delta\omega = -0.0073642$, $d\Delta\omega = -0.00057791$, dan $U_E = -0.47466$

2.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = 0.0081969$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.0073642] = 0.6645$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.0073642] = 0.3487$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.0073642] = 0.0007138$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = -0.00057791$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00057791] = 0.982$

- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00057791] = 0.1474$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00057791] = 0.00008743$

2.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [0.0081969], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= (0.6645; 0.982) \\ &= 0.6645\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= (0,6645; 0.1474) \\ &= 0.1474\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= (0,6645; 0.00008743) \\ &= 0.00008743\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= (0.3487; 0.982) \\ &= 0.3487\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= (0.3487; 0.1474) \\ &= 0.1474\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= (0.3487; 0.00008743) \\ &= 0.00008743\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 &= \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwN} [-0.00057791]) \\ &= (0.0007138; 0.982) \\ &= 0.0007138 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 &= \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwZ} [-0.00057791]) \\ &= (0.0007138; 0.1474) \\ &= 0.0007138 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [-0.0073642], \mu_{dwP} [-0.00057791]) \\ &= (0.0007138; 0.00008743) \\ &= 0.00008743 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

2.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.6645 \cdot x_1 + 0.1474 \cdot x_2 + 0.00008743 \cdot x_3 + \dots + 0.00008743 \cdot x_9}{0.6645 + 0.1474 + 0.00008743 + \dots + 0.00008743} = U_E \\ z &= \frac{0.6645 \cdot x_1 + 0.1474 \cdot x_2 + 0.00008743 \cdot x_3 + \dots + 0.00008743 \cdot x_9}{0.6645 + 0.1474 + 0.00008743 + \dots + 0.00008743} = 0,47466 \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

3. Titik $\Delta\omega = -0.011057$, $d\Delta\omega = -0.00003615$, dan $U_E = -0.35874$

3.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = -0.011057$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.011057] = 1$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.011057] = 0.0625$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.011057] = 0.00001524$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = -0.00003615$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00003615] = 0.4301$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00003615] = 0.5801$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00003615] = 0.003$

3.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= (1; 0.4301) \\ &= 0.4301 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= (1; 0.5801) \\ &= 0.5801 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= (1; 0.003) \\ &= 0.003 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= (0.0625; 0.4301) \\ &= 0.0625 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= (0.0625; 0.5801) \\ &= 0.0625 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= (0.0625; 0.003) \\ &= 0.003 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwN} [-0.00003615]) \\ &= (0.00001524; 0.4301) \\ &= 0.00001524 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwZ} [-0.00003615]) \\ &= (0.00001524; 0.5801) \\ &= 0.00001524 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [-0.011057], \mu_{dwP} [-0.00003615]) \\ &= (0.00001524; 0.003) \\ &= 0.00001524 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

3.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.4301 \cdot x_1 + 0.5728 \cdot x_2 + 0.003 \cdot x_3 + \dots + 0.00001524 \cdot x_9}{0.4301 + 0.5728 + 0.003 + \dots + 0.00001524} = U_E \\ z &= \frac{0.4301 \cdot x_1 + 0.5728 \cdot x_2 + 0.003 \cdot x_3 + \dots + 0.00001524 \cdot x_9}{0.4301 + 0.5728 + 0.003 + \dots + 0.00001524} = 0,35874 \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

4. Titik $\Delta\omega = 0.0013785$, $d\Delta\omega = 0.00020499$, dan $U_E = 0.065322$

4.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk gaussian seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = 0.0013785$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0013785] = 0.0098$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0013785] = 0.7898$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0013785] = 0.2488$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = 0.00020499$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.00020499] = 0.2335$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.00020499] = 0.8163$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.00020499] = 0.0110$

4.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [0.0013785], \mu_{dwN} [0.00020499]) \\ &= (0.0098; 0.2335) \\ &= 0.0098 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [0.0013785], \mu_{dwZ} [0.00020499]) \\ &= (0.0098; 0.8163) \end{aligned}$$

$$= 0.0098$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.0013785], \mu_{dwP} [0.00020499]) \\ &= (0.0098; 0.0110) \\ &= 0.0098\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013785], \mu_{dwN} [0.00020499]) \\ &= (0.7898; 0.2335) \\ &= 0.2335\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013785], \mu_{dwZ} [0.00020499]) \\ &= (0.7898; 0.8163) \\ &= 0.7898\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.0013785], \mu_{dwP} [0.00020499]) \\ &= (0.7898; 0.0110) \\ &= 0.0110\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.0013785], \mu_{dwN} [0.00020499]) \\ &= (0.2488; 0.2335) \\ &= 0.2335\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.0013785], \mu_{dwZ} [0.00020499]) \\ &= (0.2448; 0.8163) \\ &= 0.2448\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.0013785], \mu_{dwP} [0.00020499]) \\ &= (0.2448; 0.0110) \\ &= 0.0110 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

4.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.0098.x_1 + 0.0098.x_2 + 0.0098.x_3 + \dots + 0.0110.x_9}{0.0098 + 0.0098 + 0.0098 + \dots + 0.0110} = U_E \\ z &= \frac{0.0098.x_1 + 0.0098.x_2 + 0.0098.x_3 + \dots + 0.0110.x_9}{0.0098 + 0.0098 + 0.0098 + \dots + 0.0110} = 0,065322 \dots\dots\dots(4) \end{aligned}$$

5. Titik $\Delta\omega = 0.0030211$, $d\Delta\omega = 0.0000098$, dan $U_E = 0.030635$

5.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = 0.0030211$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0030211] = 0.0027$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0030211] = 0.5528$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0030211] = 0.4486$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = 0.0000098$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0000098] = 0.3877$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0000098] = 0.6271$

- Himpunan fuzzy P, μ_{wP} [0.0000098] = 0.0039

5.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= (0.0027; 0.3877) \\ &= 0.0027\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= (0.0027; 0.6271) \\ &= 0.0027\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= (0.0027; 0.0039) \\ &= 0.0027\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= (0.5528; 0.3877) \\ &= 0.2335\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= (0.5528; 0.6271) \\ &= 0.5528\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= (0.5528; 0.0039) \\ &= 0.0039\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwN} [0.0000098]) \\ &= (0.4486; 0.3877) \\ &= 0.3877 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwZ} [0.0000098]) \\ &= (0.4486; 0.6271) \\ &= 0.4486 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [0.0030211], \mu_{dwP} [0.0000098]) \\ &= (0.4486; 0.0039) \\ &= 0.0039 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

5.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.0027 \cdot x_1 + 0.0027 \cdot x_2 + 0.0027 \cdot x_3 + \dots + 0.0039 \cdot x_9}{0.0027 + 0.0027 + 0.0027 + \dots + 0.0039} = U_E \\ z &= \frac{0.0027 \cdot x_1 + 0.0027 \cdot x_2 + 0.0027 \cdot x_3 + \dots + 0.0039 \cdot x_9}{0.0027 + 0.0027 + 0.0027 + \dots + 0.0039} = 0,030635 \dots\dots\dots(5) \end{aligned}$$

6. Titik $\Delta\omega = -0.00078254$, $d\Delta\omega = -0.00000166$, dan $U_E = -0.072215$

6.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = -0.00078254$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00078254] = 0.0424$

- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00078254] = 0.9875$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00078254] = 0.0896$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = -0.00000166$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.00000166] = 0.3981$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.00000166] = 0.6154$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.00000166] = 0.0036$

6.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166]) \\ &= (0.0424; 0.3981) \\ &= 0.0424 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166]) \\ &= (0.0424; 0.6154) \\ &= 0.0424 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166]) \\ &= (0.0424; 0.0036) \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166]) \\ &= (0.9875; 0.3981) \\ &= 0.3981 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 5 &= \mu_{predikatR5} = \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166]) \\ &= (0.9875; 0.6154) \\ &= 0.6154 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 6 &= \mu_{predikatR6} = \min (\mu_{wZ} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166]) \\ &= (0.9875; 0.0036) \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 7 &= \mu_{predikatR7} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwN} [-0.00000166]) \\ &= (0.0896; 0.3981) \\ &= 0.0896 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 8 &= \mu_{predikatR8} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwZ} [-0.00000166]) \\ &= (0.0896; 0.6154) \\ &= 0.0896 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha 9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [-0.00078254], \mu_{dwP} [-0.00000166]) \\ &= (0.0896; 0.0036) \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

6.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$z = \frac{0.0424.x_1 + 0.0424.x_2 + 0.0036.x_3 + \dots + 0.0036.x_9}{0.0424 + 0.0424 + 0.0036 + \dots + 0.0036} = U_E$$

$$z = \frac{0.0424.x_1 + 0.0424.x_2 + 0.0036.x_3 + \dots + 0.0036.x_9}{0.0424 + 0.0424 + 0.0036 + \dots + 0.0036} = -0,072215 \dots\dots\dots(6)$$

7. Titik $\Delta\omega = 0.00020303$, $d\Delta\omega = 0.0000002008$, dan $U_E = -0.046007$

7.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan fuzzy, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk gaussian seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = 0.00020303$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.00020303] = 0.0225$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.00020303] = 0.9233$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.00020303] = 0.1478$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = 0.0000002008$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0000002008] = 0.3968$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0000002008] = 0.6169$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0000002008] = 0.0037$

7.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \mu_{predikatR1} = \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.0000002008]) \\ &= (0.0225; 0.3968) \\ &= 0.0225 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \mu_{predikatR2} = \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.0000002008]) \\ &= (0.0225; 0.6169) \end{aligned}$$

$$= 0.0225$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.0000002008]) \\ &= (0.0225; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.0000002008]) \\ &= (0.9233; 0.3968) \\ &= 0.3968 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.0000002008]) \\ &= (0.9233; 0.6169) \\ &= 0.6169 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.0000002008]) \\ &= (0.9233; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwN} [0.0000002008]) \\ &= (0.1478; 0.3968) \\ &= 0.1478 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwZ} [0.0000002008]) \\ &= (0.1478; 0.6169) \\ &= 0.1478 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 &= \mu_{predikatR9} = \min (\mu_{wP} [0.00020303], \mu_{dwP} [0.0000002008]) \\ &= (0.1478; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

7.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.0225 \cdot x_1 + 0.0225 \cdot x_2 + 0.0037 \cdot x_3 + \dots + 0.0037 \cdot x_9}{0.0225 + 0.0225 + 0.0037 + \dots + 0.0037} = U_E \\ z &= \frac{0.0225 \cdot x_1 + 0.0225 \cdot x_2 + 0.0037 \cdot x_3 + \dots + 0.0037 \cdot x_9}{0.0225 + 0.0225 + 0.0037 + \dots + 0.0037} = -0,046007 \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

8. Titik $\Delta\omega = -0.000000656$, $d\Delta\omega = -0.000004705$, **dan** $U_E = -0.0532118$

8.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = -0.000000656$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.000000656] = 0.0257$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.000000656] = 0.9407$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.000000656] = 0.1339$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = -0.000004705$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.000004705] = 0.4009$

- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.000004705] = 0.6122$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.000004705] = 0.0036$

8.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwN} [-0.000004705]) \\ &= (0.0257; 0.4009) \\ &= 0.0257\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705]) \\ &= (0.0257; 0.6122) \\ &= 0.0257\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [-0.000000656], \mu_{dwP} [-0.000004705]) \\ &= (0.0257; 0.0036) \\ &= 0.0036\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dwN} [-0.000004705]) \\ &= (0.9407; 0.4009) \\ &= 0.4009\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705]) \\ &= (0.9407; 0.6122) \\ &= 0.6122\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned}\alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000000656], \mu_{dwP} [-0.000004705]) \\ &= (0.9407; 0.0036) \\ &= 0.0036\end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dwN} [-0.000004705]) \\ &= (0.1339; 0.4009) \\ &= 0.1339 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dwZ} [-0.000004705]) \\ &= (0.1339; 0.6122) \\ &= 0.1339 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [-0.000000656], \mu_{dwP} [-0.000004705]) \\ &= (0.1339; 0.0036) \\ &= 0.0036 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

8.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.0257 \cdot x_1 + 0.0257 \cdot x_2 + 0.0036 \cdot x_3 + \dots + 0.0036 \cdot x_9}{0.0257 + 0.0257 + 0.0036 + \dots + 0.0036} = U_E \\ z &= \frac{0.0257 \cdot x_1 + 0.0257 \cdot x_2 + 0.0036 \cdot x_3 + \dots + 0.0036 \cdot x_9}{0.0257 + 0.0257 + 0.0036 + \dots + 0.0036} = -0,053218 \dots\dots\dots(8) \end{aligned}$$

9. Titik $\Delta\omega = -0.000011852$, $d\Delta\omega = 0.0000004457$, **dan** $U_E = -0.050852$

9.1 Membuat himpunan dan input fuzzy

Ada 2 variabel fuzzy yang akan dimodelkan yaitu:

- $\Delta\omega$ terdiri atas 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).
- $d\Delta\omega$ terdiri dari 3 himpunan *fuzzy*, yaitu N (Negatif), Z (Zero), dan P (Positif).

A. Variabel $\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk *gaussian* seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{wN} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.01106$

Untuk μ_{wZ} $\sigma = -0.004088$; dan $c = -0.00143$

Untuk μ_{wP} $\sigma = -0.004088$; dan $c = 0.008197$

Jika $\Delta\omega = -0.000011852$ maka nilai keanggotaan *fuzzy* pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [-0.000011852] = 0.0255$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [-0.000011852] = 0.9387$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [-0.000011852] = 0.1347$

B. Variabel $d\Delta\omega$

Untuk merepresentasikan variabel $d\Delta\omega$ digunakan kurva berbentuk segitiga seperti terlihat pada Lampiran no. 3.

Fungsi keanggotaan:

$$f(x, \sigma, c) = c \frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}$$

Untuk μ_{dwN} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = -0.0008069$

Untuk μ_{dwZ} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.0005902$

Untuk μ_{dwP} $\sigma = 0.0005933$; dan $c = 0.001987$

Jika $d\Delta\omega = -0.000004705$ maka nilai keanggotaan fuzzy pada tiap-tiap himpunan adalah:

- Himpunan fuzzy N, $\mu_{wN} [0.0000004457] = 0.3962$
- Himpunan fuzzy Z, $\mu_{wZ} [0.0000004457] = 0.6175$
- Himpunan fuzzy P, $\mu_{wP} [0.0000004457] = 0.0037$

9.2 Aplikasi Operator fuzzy

Aturan ke-1

[R1] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_1$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = \mu_{predikatR1} &= \min (\mu_{wN} [-0.000011852], \mu_{dwN} [0.0000004457]) \\ &= (0.0255; 0.3962) \\ &= 0.0255 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_1$

Aturan ke-2

[R2] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_2$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = \mu_{predikatR2} &= \min (\mu_{wN} [-0.000011852], \mu_{dwZ} [0.0000004457]) \\ &= (0.0255; 0.6175) \\ &= 0.0255 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_2$

Aturan ke-3

[R3] if $\Delta\omega$ is N and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_3$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_3 = \mu_{predikatR3} &= \min (\mu_{wN} [-0.000011852], \mu_{dwP} [0.0000004457]) \\ &= (0.0255; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_3$

Aturan ke-4

[R4] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_4$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_4 = \mu_{predikatR4} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000011852], \mu_{dwN} [0.0000004457]) \\ &= (0.9387; 0.3962) \end{aligned}$$

$$= 0.3962$$

Nilai konsekuen $U_E = x_4$

Aturan ke-5

[R5] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_5$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_5 = \mu_{predikatR5} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000011852], \mu_{dwZ} [0.0000004457]) \\ &= (0.9387; 0.6175) \\ &= 0.6175 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_5$

Aturan ke-6

[R6] if $\Delta\omega$ is Z and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_6$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_6 = \mu_{predikatR6} &= \min (\mu_{wZ} [-0.000011852], \mu_{dWP} [0.0000004457]) \\ &= (0.9387; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_6$

Aturan ke-7

[R7] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is N then $U_E = x_7$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_7 = \mu_{predikatR7} &= \min (\mu_{wP} [-0.000011852], \mu_{dWN} [0.0000004457]) \\ &= (0.1347; 0.3962) \\ &= 0.1347 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_7$

Aturan ke-8

[R8] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is Z then $U_E = x_8$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_8 = \mu_{predikatR8} &= \min (\mu_{wP} [-0.000011852], \mu_{dwZ} [0.0000004457]) \\ &= (0.1347; 0.6175) \\ &= 0.1347 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_8$

Aturan ke-9

[R9] if $\Delta\omega$ is P and $d\Delta\omega$ is P then $U_E = x_9$;

Operator yang digunakan adalah AND, sehingga:

$$\begin{aligned} \alpha_9 = \mu_{predikatR9} &= \min (\mu_{wP} [-0.000011852], \mu_{dWP} [0.0000004457]) \\ &= (0.1347; 0.0037) \\ &= 0.0037 \end{aligned}$$

Nilai konsekuen $U_E = x_9$

9.3 Defuzzy

Metode *defuzzy* yang digunakan adalah rata-rata terbobot (*weight average*), diperoleh:

$$\begin{aligned} z &= \frac{0.0255 \cdot x_1 + 0.0255 \cdot x_2 + 0.0037 \cdot x_3 + \dots + 0.0037 \cdot x_9}{0.0255 + 0.0255 + 0.0037 + \dots + 0.0037} = U_E \\ z &= \frac{0.0255 \cdot x_1 + 0.0255 \cdot x_2 + 0.0037 \cdot x_3 + \dots + 0.0037 \cdot x_9}{0.0255 + 0.0255 + 0.0037 + \dots + 0.0037} = -0,050852 \dots\dots\dots(9) \end{aligned}$$

A.x = C dimana:

Matriks A =

$$A = \begin{bmatrix} 0.00001559 & 0.00001559 & 0.00001595 & 0.0625 & 0.0625 & 0.0040 & 0.3815 & 0.6342 & 0.0040 \\ 0.6645 & 0.1474 & 0.00008743 & 0.03487 & 0.1474 & 0.00008743 & 0.0007138 & 0.00007138 & 0.00008743 \\ 0.430 & 0.580 & 0.003 & 0.0625 & 0.0625 & 0.003 & 0.00001524 & 0.00001524 & 0.00001524 \\ 0.0098 & 0.0098 & 0.0098 & 0.2335 & 0.7898 & 0.0110 & 0.2335 & 0.2488 & 0.0110 \\ 0.0027 & 0.0027 & 0.0027 & 0.3877 & 0.5528 & 0.0039 & 0.3877 & 0.4486 & 0.0039 \\ 0.0424 & 0.0424 & 0.0036 & 0.3981 & 0.61544 & 0.0036 & 0.0896 & 0.0896 & 0.0036 \\ 0.0225 & 0.0225 & 0.0037 & 0.3968 & 0.6169 & 0.0037 & 0.1478 & 0.1478 & 0.0037 \\ 0.0257 & 0.0257 & 0.0036 & 0.4009 & 0.6122 & 0.0036 & 0.1339 & 0.1339 & 0.0036 \\ 0.0255 & 0.0255 & 0.0037 & 0.3962 & 0.6175 & 0.0037 & 0.1347 & 0.1347 & 0.0037 \end{bmatrix}$$

Matriks x =

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}$$

Matriks C =

$$C = \begin{bmatrix} 0.3271 \\ -0.6210 \\ -0.3904 \\ 0.1277 \\ 0.1082 \\ -0.1070 \\ -0.0604 \\ -0.0728 \\ -0.0691 \end{bmatrix}$$

Sehingga kita dapatkan:

$$\begin{aligned} x_1 &= -0.6726 & MF1 &= -0.6726 \\ x_2 &= -0.1488 & MF2 &= -0.1488 \\ x_3 &= 3.2497 & MF3 &= 3.2497 \\ x_4 &= -0.4745 & MF4 &= -0.4745 \\ x_5 &= 0.08766 & \Rightarrow MF5 &= 0.08766 \\ x_6 &= -0.2532 & MF6 &= -0.2532 \\ x_7 &= -0.1129 & MF7 &= -0.1129 \\ x_8 &= 0.6104 & MF8 &= 0.6104 \\ x_9 &= 2.0633 & MF9 &= 2.0633 \end{aligned}$$

Lampiran no. 3 Pengendali logika *fuzzy* dengan 3 fungsi Keanggotaan *gaussian*

