



TUGAS AKHIR - TF 181801

**PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM
DISTILASI METANOL-AIR BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL***

**VIKO DIAN NANO
NRP. 02311640000051**

Dosen Pembimbing:
Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Hendra Cordova, S.T., M.T.

Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 181801

***CONTROL SYSTEM DESIGN IN METHANOL-WATER
DISTILLATION COLUMN BASED ON FUZZY LOGIC CONTROL***

VIKO DIAN NANO
NRP. 02311640000051

Supervisors:

Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Hendra Cordova, S.T., M.T.

*Department of Engineering Physics
Faculty of Industrial Technology and System Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2020*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini.

Nama : Viko Dian Nano
NRP : 02311640000051
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "**PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI METANOL-AIR BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROL**" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya-benarnya.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,

A yellow rectangular stamp with the text "METERAI KEPOLISIAN" at the top, "6000" in large numbers in the center, and "ENAM RIBU RUPIAH" at the bottom. The stamp also features a small emblem of the Indonesian police and a unique identification number "514355329". A handwritten signature in black ink is written over the stamp.

Viko Dian Nano

NRP. 02311640000051

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN - 1
TUGAS AKHIR

**PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI
METANOL-AIR BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL***

Oleh:

Viko Dian Nano

NRP. 02311640000051

Surabaya,

Menyetujui,
Pembimbing I



Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.

NIP. 19660116 198903 2 001

Menyetujui,
Pembimbing II



Hendra Cordova, S.T, M.T

NIP. 19690530 199412 1 001

Mengetahui,

Kepala Departemen

Teknik Fisika FT-IRS ITS



Dr. Suyanto, S.T, M.T.

NIP. 19711113 199512 1 002

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN - 2

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI METANOL-AIR BERBASIS *FUZZY LOGIC CONTROL*

TUGAS AKHIR





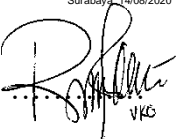
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri & Rekayasa Sistem (FTIRS)
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

VIKO DIAN NANO

NRP. 0231164000051

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.  (Pembimbing I)
2. Hendra Cordova, S.T., M.T.  (Pembimbing II)
3. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.  (Ketua Penguji)
4. Dr.rer.nat. Ir. Aulia M. T. Nasution, M.Sc.  (Penguji I)
Surabaya, 14/08/2020
5. Dr.rer.nat. Ruri Agung Wahyuono, S.T., M.T.  (Penguji II)
VKC

SURABAYA

2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI METANOL-AIR BERBASIS *FUZZY LOGIC* *CONTROL*

Nama : Viko Dian Nano
NRP : 02311640000051
Departemen : Teknik Fisika FTIRS - ITS
Dosen Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Hendra Cordova, S.T, M.T

ABSTRAK

Kemurnian metanol diperoleh melalui pemisahan komposisi campuran metanol dari air di dalam kolom distilasi. Pengendalian komposisi menjadi sangat penting, komposisi produk atas (*distillate*) dan produk bawah (*bottom product*) dijaga kestabilan agar sesuai dengan *set point* dengan memanipulasi laju aliran *reflux* (L) dan laju aliran *steam reboiler* (Q_r). Sistem pengendalian komposisi pada kolom distilasi dikatakan sebagai sistem MIMO yang kompleks karena interaksi proses antara variabel yang dimanipulasi dan variabel yang dikontrol. Pada penelitian ini, sistem MIMO desentralisasi digunakan untuk meminimalisir pengaruh perubahan *manipulated variable* yang mengubah kestabilan proses. Model pengendalian yang diusulkan adalah *fuzzy logic control* yang mempunyai sifat sesuai untuk sistem nonlinier. *Fuzzy* akan digunakan sebagai *gain schedule* untuk nilai parameter kontrol pada pengendali PID. Pengendali yang dirancang akan dibandingkan karakteristik respon antara pengendali PID konvensional dengan pengendali fuzzy tipe-1 *gain schedule* dan fuzzy tipe-2 *gain schedule*. Hasil didapatkan bahwa fuzzy tipe-1 *gain schedule* memiliki kestabilan sistem yang paling baik dibandingkan PID dan fuzzy tipe-2 *gain schedule* dengan nilai *overshoot* sebesar 24,31% pada komposisi *distillate* dan 13765% pada komposisi *bottom product* dengan *rise time* sebesar 3,19 detik dan 3,17 detik serta *settling time* masing-masing sebesar 52,32 detik dan 67,06 detik. Selain itu, pengendali fuzzy tipe-1 *gain schedule* juga tahan terhadap gangguan serta adaptif terhadap perubahan *set point* yang diberikan.

Kata Kunci: *fuzzy gain schedule*, komposisi, MIMO desentralisasi, PID

Halaman ini sengaja dikosongkan

**CONTROL SYSTEM DESIGN IN METHANOL-AIR
DISTILLATION COLUMN BASED ON FUZZY LOGIC
CONTROL**

Name : Viko Dian Nano
NRP : 0231164000051
Department : Engineering Physics FTIRS - ITS
Supervisors : Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T.
Hendra Cordova, S.T, M.T

ABSTRACT

The purity of methanol is obtained by separating the composition of the methanol mixture from water in the distillation column. Composition control is very important, the composition of the top product (distillate) and the bottom product (bottom product) is maintained stability to match the set point by manipulating the reflux flow rate (L) and the reboiler steam flow rate (Q_r). The composition control system in the distillation column is said to be a complex MIMO system because of the interaction of the process between the variable being manipulated and the variable being controlled. In this study, the decentralized MIMO system was used to minimize the influence of changes in manipulated variables that change the stability of the process. The proposed control model is fuzzy logic control which is suitable for nonlinear systems. Fuzzy will be used as a gain schedule for the values of control parameters on the PID controller. The controller designed will compare the response characteristics between conventional PID controllers with fuzzy type-1 gain schedule and fuzzy type-2 gain schedule controllers. The results show that fuzzy type-1 gain schedule has the best system stability compared to PID and fuzzy type-2 gain schedule with an overshoot value of 24.31% in the distillate composition and 13765% in the bottom product composition with a rise time of 3.19 seconds and 3.17 seconds and the settling time of 52.32 seconds and 67.06 seconds respectively. In addition, the fuzzy type-1 gain schedule controller is also resistant to interference and adaptive to changes in a given set point.

Keywords: *composition, fuzzy gain schedule, MIMO desentralisasi, PID*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN PADA KOLOM DISTILASI METANOL-AIR BERBASIS FUZZY LOGIC CONTROL”**

Pada kesempatan kali ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan tugas akhir ini yaitu kepada:

1. Kedua orang tua serta keluarga atas segala kasih sayang dan doa serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku kepala Departemen Teknik Fisika ITS
3. Ibu Prof. Dr. Ir. Aulia Siti Aisjah, M.T dan Bapak Hendra Cordova, S.T. M.T selaku dosen pembimbing tugas akhir yang dengan sabar membantu dan membimbing penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku dosen wali dengan sabar memotivasi, mengarahkan dan membimbing penulis selama kuliah di Teknik Fisika.
5. Bapak Totok Ruki Biyanto S.T., M.T., Ph.D. yang juga turut membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen Teknik Fisika FT-IRS ITS yang telah memberikan dukungan dan ilmunya kepada penulis.
7. Tim Tugas Akhir kolom distilasi (Agam, Auril, Tegar, Haikal) yang telah menjadi teman diskusi dan bahu-membahu dalam menyelesaikan tugas akhir ini dan juga Ferry tim kapal telah membantu diskusi mengenai fuzzy-2.
8. Teman-teman seperjuangan (Indayu, Yoanne, Yunita, Ikma, Fidah, Salma, Anisun, Evi, Irma, dll) yang sering penulis jadikan tempat berkeluh kesah serta memberi semangat untuk terus melakukan progress tugas akhir
9. Asisten Laboratorium Sistem Tertanam dan Siber-Fisik yang kebersamaan dalam proses pengerjaan tugas akhir ini

10. Laboratorium Workshop Instrumentasi sebagai tempat yang nyaman bagi penulis untuk berdiskusi dan mengerjakan progress tugas akhir
11. Seluruh teman-teman Teknik Fisika Angkatan 2016
12. Diri sendiri yang terus berjuang dan bertekad kuat untuk menyelesaikan tugas akhir yang dikerjakan dalam segala keterbatasan ini
13. Serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu saran serta kritik yang membangun sangat diharapkan. Semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, khususnya keluarga besar Teknik Fisika, dan civitas akademik ITS pada umumnya dan bagi penulis sendiri. Diharapkan laporan tugas akhir ini dapat dipergunakan dengan sebaik-baiknya. Akhir kata penulis mohon maaf atas setiap kesalahan yang dilakukan sampai penyusunan laporan ini.

Surabaya, 3 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
<i>COVER PAGE</i>	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN - 1	vii
LEMBAR PENGESAHAN - 2	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Sistematika Laporan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	7
2.1 Kajian Pustaka	7
2.2 Kolom Distilasi.....	8
2.3 Sistem Kendali MIMO	13
2.4 <i>PID Controller</i>	17
2.5 <i>First Order Plus Dead Time (FOPDT)</i>	18
2.6 Karakteristik Respon Sistem	19
2.7 <i>Fuzzy Logic Control</i>	21
2.8 <i>Fuzzy Gain Scheduling</i>	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	33
3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	34
3.2 Studi Literatur.....	34

3.3	Pengumpulan Data	34
3.4	Pemodelan Matematis Plant.....	35
3.5	Perancangan Pengendali	38
3.6	Simulasi dan Komparasi Sistem Pengendali	47
3.7	Validasi Pengendali	48
3.8	Analisa Hasil.....	48
3.9	Penarikan Kesimpulan	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		51
4.1	Uji Model <i>Open Loop</i> Plant.....	51
4.2	Hasil Perancangan Pengendali PID	52
4.3	Hasil Perancangan Pengendali Fuzzy	55
4.4	Perbandingan Kontrol PID, Fuzzy-1 <i>Gain Scheduling</i> dan Fuzzy-2 <i>Gain Scheduling</i>	63
4.5	Uji <i>Tracking Set Point</i>	67
4.6	Uji <i>Disturbance</i>	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	74
DAFTAR PUSTAKA.....		75
LAMPIRAN		79
BIODATA PENULIS.....		83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kolom distilasi biner.....	9
Gambar 2.2 Kondensor dan <i>reflux drum</i>	10
Gambar 2.3 <i>Tray</i> kolom	11
Gambar 2.4 <i>Feed tray</i>	11
Gambar 2.5 <i>Reboiler</i> dan <i>base</i> kolom	12
Gambar 2.6 Kolom distilasi metanol-air	13
Gambar 2.7 Diagram blok interaksi MIMO 2x2	14
Gambar 2.8 Diagram blok untuk skema 2x2 <i>multiloop control</i>	15
Gambar 2.9 Diagram blok kontrol PID	17
Gambar 2.10 Grafik respon FOPDT	18
Gambar 2.11 Karakteristik respon sistem	20
Gambar 2.12 Representasi linear naik.....	22
Gambar 2.13 Representasi linear turun	23
Gambar 2.14 Representasi kurva segitiga	23
Gambar 2.15 Representasi kurva trapesium.....	24
Gambar 2.16 Representasi kurva bahu	25
Gambar 2.17 Blok diagram sistem logika fuzzy tipe-1	25
Gambar 2.18 Operasi max-min secara grafis	27
Gambar 2.19 Blok diagram sistem logika fuzzy tipe-2	29
Gambar 2.20 <i>Fuzzy gain scheduling</i>	31
Gambar 3.1 Flowchart penelitian	33
Gambar 3.2 Ilustrasi pengendalian komposisi kolom distilasi.....	36
Gambar 3.3 Diagram blok sistem pengendali PID.....	39
Gambar 3.4 Diagram blok <i>fuzzy gain scheduling-PID</i>	40
Gambar 3.5 Ilustrasi <i>input-output</i> pengendali fuzzy	41
Gambar 3.6 <i>Set up fuzzy logic control</i>	42
Gambar 3.7 Fungsi keanggotaan <i>input error</i> (e) dengan 3 variabel.....	43
Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan <i>input error</i> (e) dengan 5 variabel.....	43
Gambar 3.9 Fungsi keanggotaan <i>input error</i> (e) dengan 7 variabel.....	44

Gambar 3.10 Fungsi keanggotaan <i>ouput</i> (K_p) untuk pengendali <i>distillate</i>	44
Gambar 3.11 Fungsi keanggotaan <i>output</i> (K_p) untuk pengendali <i>bottom product</i>	45
Gambar 3.12 Fungsi keanggotaan <i>ouput</i> (K_i) untuk pengendali <i>distillate</i>	45
Gambar 3.13 Fungsi keanggotaan <i>ouput</i> (K_i) untuk pengendali <i>bottom product</i>	45
Gambar 3.14 Fungsi keanggotaan <i>input</i> pada fuzzy tipe-2.....	47
Gambar 3.15 Fungsi keanggotaan <i>output</i> pada fuzzy tipe-2.....	47
Gambar 4.1 Respon <i>open loop plant</i>	51
Gambar 4.2 Respon komposisi <i>distillate</i> (X_D) menggunakan pengendali P, PI, PID	52
Gambar 4.3 Respon komposisi <i>bottom product</i> (X_B) menggunakan pengendali P, PI, PID	54
Gambar 4.4 Respon komposisi <i>distillate</i> (X_D) menggunakan Mamdani	56
Gambar 4.5 Respon komposisi <i>bottom product</i> (X_B) menggunakan Mamdani...	57
Gambar 4.6 Respon komposisi <i>distillate</i> (X_D) menggunakan Sugeno jika dibandingkan dengan Mamdani.....	59
Gambar 4.7 Respon komposisi <i>bottom product</i> (X_B) menggunakan Sugeno jika dibandingkan dengan Mamdani.....	60
Gambar 4.8 Respon komposisi <i>distillate</i> (X_D) dengan <i>fuzzy-2 gain schedule</i>	62
Gambar 4.9 Respon komposisi <i>bottom product</i> (X_B) dengan <i>fuzzy-2 gain schedule</i>	62
Gambar 4.10 Perbandingan pengendali komposisi <i>distillate</i> (X_D) dengan konvensional dan fuzzy-1 <i>gain scheduling</i>	64
Gambar 4.11 Perbandingan pengendali komposisi <i>bottom product</i> (X_B) dengan konvensional dan fuzzy-1 <i>gain scheduling</i>	64
Gambar 4.12 Perbandingan pengendali komposisi <i>distillate</i> (X_D) dengan fuzzy-1 <i>gain scheduling</i> dan fuzzy-2 <i>gain scheduling</i> (Sugeno).....	65
Gambar 4.13 Perbandingan pengendali komposisi <i>bottom product</i> (X_B) dengan fuzzy-1 <i>gain schedule</i> dan fuzzy-2 <i>gain schedule</i> (Sugeno)	65
Gambar 4.14 Uji <i>setpoint tracking</i> komposisi <i>distillate</i> (X_D).....	68
Gambar 4.15 Uji <i>setpoint tracking</i> komposisi <i>bottom product</i> (X_B)	68
Gambar 4.16 Uji <i>disturbance</i> pengendali komposisi <i>distillate</i> (X_D)	70
Gambar 4.17 Uji <i>disturbance</i> pengendali komposisi <i>bottom product</i> (X_B).....	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kinerja pengendali PID	18
Tabel 3.1 Data <i>flow</i> dan komposisi saat keadaan beroperasi dan <i>steady</i>	35
Tabel 3.2 Data suhu saat keadaan beroperasi dan <i>steady</i>	35
Tabel 3.3 Parameter <i>autotune</i> pada pengendali <i>distillate</i> dan <i>bottom product</i>	40
Tabel 3.4 Variasi untuk pengendali fuzzy	42
Tabel 3.5 <i>Rule Base Matrix</i> 3x3	46
Tabel 3.6 <i>Rule Base Matrix</i> 5x5	46
Tabel 3.7 <i>Rule Base Matrix</i> 7x7	46
Tabel 4.1 Karakteristik respon pengendali PID komposisi <i>distillate</i> (X_D)	53
Tabel 4.2 Karakteristik respon pengendali PID komposisi <i>bottom product</i> (X_B)	54
Tabel 4.3 Perbandingan performansi pengendali komposisi <i>distillate</i> (X_D) dengan variasi jumlah variabel linguistik	56
Tabel 4.4 Perbandingan performansi pengendali komposisi <i>bottom product</i> (X_B) dengan variasi jumlah variabel linguistik	58
Tabel 4.5 Perbandingan performansi mode inferensi Mamdani dan Sugeno dengan 3 variabel linguistik	60
Tabel 4.6 Performansi fuzzy-2 <i>gain schedule</i>	63
Tabel 4.7 Perbandingan performansi pengendali komposisi <i>distillate</i> (X_D) dengan konvensional dan <i>fuzzy gain scheduling</i>	66
Tabel 4.8 Perbandingan performansi pengendali komposisi <i>bottom product</i> (X_B) dengan konvensional dan <i>fuzzy gain scheduling</i>	66
Tabel 4.9 Skenario uji <i>set point tracking</i>	67
Tabel 4.10 Skenario uji <i>disturbance</i>	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri kimia meningkat pesat di Indonesia, yang mengakibatkan kebutuhan metanol (CH_3) yang merupakan bahan baku serta bahan penunjang industri kimia mengalami peningkatan. Metanol merupakan salah satu senyawa hidrokarbon dari golongan alkohol ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}\text{O}$) dengan gugus alkil hidroksil ($-\text{OH}$). Metanol dapat digunakan sebagai bahan bakar *diesel* dimana metanol akan diubah menjadi dimetil eter sebagai cairan aerosol dan dijadikan bahan campuran untuk pembuatan LPG (Asokawati, Kusmiyati, & Mujiburohman, 2016). Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar, metanol diharapkan memiliki kemurnian yang tinggi. Metanol murni didapat melalui sebuah proses suling untuk didapatkan produk olahan dengan memisahkan campuran dari sumber fosil seperti gas alam atau batubara melalui proses distilasi. Distilasi merupakan metode pemisahan bahan kimia berdasarkan perbedaan kecepatan atau kemudahan menguap (*volatilitas*) bahan. Dalam penyulingan, campuran zat dididihkan sehingga menguap, dan uap ini kemudian didinginkan kembali ke dalam bentuk cairan. Zat yang memiliki titik didih lebih rendah akan menguap terlebih dulu.

Pengendalian komposisi pada produk kolom distilasi menjadi hal utama yang perlu dilakukan untuk mendapat produk yang berkualitas berupa kemurnian pada produk akhir. Namun masalah yang dihadapi oleh pengontrolan MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) lebih kompleks daripada masalah yang dihadapi di proses SISO (*Single Input Single Output*) karena interaksi-interaksi proses terjadi antara variabel yang dimanipulasi dan variabel yang dikontrol (Soelistya & Agustriyanto, 2002). Perubahan dalam variabel yang dimanipulasi akan mempengaruhi seluruh variabel yang dikontrol dan mengubah kestabilan dari proses. Bila efek yang dihasilkan sangat berpengaruh maka perlu dipertimbangkan penggunaan *decoupler* untuk mengurangi interaksi sehingga pengendalian sistem dapat diubah menjadi sebuah *single input single output* sistem (M & C, 2012).

Terdapat permasalahan lain dalam kolom distilasi yaitu pemakaian energi yang tinggi karena akan menentukan kualitas dari suatu produk. Untuk mengurangi beban energi yang tinggi, kolom distilasi juga dilengkapi dengan sebuah *reboiler* yang berfungsi sebagai pemanas proses distilasi dan sebuah *condenser* yang berfungsi mengkondensasi uap hasil distilasi pada produk atas menjadi cairan kembali (Roffel & Betlem, 2006). Pengontrolan yang baik dapat menekan biaya produksi kembali sekaligus meningkatkan kualitas produk. Namun, dinamika kolom distilasi yang bersifat nonstasioner, sistem multivariabel, sistem nonlinier, ketidakpastian termodinamika, dan proses dengan waktu mati membuat kontrol kolom distilasi menjadi sebuah masalah yang menarik untuk diteliti (Javadi & Hosseini, 2009). Salah satu alternatif yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas dan unjuk kerja sistem pengendalian di industri adalah mengembangkan strategi sistem pengendalian nonlinier. Pengendali konvensional untuk sistem nonlinier memberikan respon yang baik jika proses dijalankan di area sekitar kestabilan *steady state*, akan tetapi sistem kontrol cerdas mampu membuat sistem nonlinier bekerja optimal dengan mengurangi osilasi dan menstabilkan sistem (Wara & Setiyono, 2017). Salah satu pengendali yang sangat cocok digunakan dalam mengontrol sistem *multivariabel* dan nonlinear adalah *Fuzzy Logic Control* (Miccio & Cosenza, 2014).

Seringkali dinamika proses berubah sejalan dengan kondisi proses akibat dari sifat nonlinieritas sistem. Pada kondisi tertentu, parameter kontrol ini harus sering di-*tune* agar kinerjanya tetap baik. Keadaan tersebut dapat diatasi melalui perubahan parameter-parameter dari pengendali dengan memonitor kondisi operasi proses (Abadi, 2015). Salah satu teknik dalam sistem kontrol yang sering dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan metode *gain scheduling*. *Gain schedule* didasarkan pada pengukuran kondisi operasi dari proses untuk mengimbangi variasi perubahan parameter atau nonlinieritas dari proses dan akan membantu pengendali mendapatkan variabel pembantu yang sejalan dengan perubahan dinamika proses, dimana parameter tersebut dapat berubah diubah secara otomatis dengan jika terjadi perubahan kondisi operasi yang menyebabkan kinerja kontrol menurun.

Dengan adanya pengembangan pengontrolan dari penelitian sebelumnya, diharapkan dapat diperoleh sistem kontrol yang lebih handal dan dapat digunakan untuk menangani suatu sistem MIMO. Pengontrolan kolom distilasi dilakukan dengan *fuzzy* yang menerapkan suatu sistem kemampuan manusia untuk mengendalikan sesuatu, yaitu dalam bentuk aturan-aturan jika-maka (*if-then rules*), sehingga proses pengendalian akan mengikuti pendekatan secara linguistik (Negnevitsky, 2011). Salah satu keunggulan *fuzzy logic control* ini adalah kemampuan belajar terhadap informasi numerik melalui algoritma pembelajaran (*learning algorithm*) dan mampu menerjemahkan informasi linguistik dari pengetahuan operator menjadi basis kaidah atau basis aturan.

Namun, kesulitan yang dihadapi ketika merancang *fuzzy logic* adalah menentukan bentuk dan letak fungsi keanggotaan serta aturan (*rule*) yang optimal, tidak ada aturan resmi dan pasti dalam menentukan bentuk dan letak fungsi keanggotaan serta aturan yang digunakan, biasanya hanya didasarkan pada pengalaman dari manusia yang telah berhasil mengendalikan sistem tersebut (*human expert*). Sehingga perlu dilakukan variasi pada jumlah *rule base* FLC untuk menghasilkan karakteristik respon yang lebih baik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa FLC tipe-1 mempunyai kesulitan dalam hal meminimalkan efek ketidakpastian dari model *plant* (Miccio & Cosenza, 2014) sehingga memungkinkan untuk tidak menghasilkan solusi optimal sebagai pengendali. Alternatif yang digunakan dengan menggunakan FLC tipe-2 yang mampu memodelkan ketidakpastian dan menyelesaikan masalah yang kompleks serta mampu meningkatkan akurasi, dimana kompleksitas dalam kontroler tergantung pada jenis-reduksi dan tahapan defuzzifikasi.

Sehingga pada penelitian ini yang berjudul “*Perancangan Sistem Pengendalian pada Kolom Distilasi Metanol-Air Berbasis Fuzzy Logic Control*” dimana fuzzy akan digunakan sebagai *gain schedule* untuk parameter pengendali PID agar dapat memberikan referensi dan perbandingan respon dinamik pada kolom distilasi antara metode PID konvensional dengan *Fuzzy Logic Control*.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas, maka didapatkan permasalahan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Berapa nilai parameter pada sistem kendali logika fuzzy yang mampu meningkatkan performansi sistem pengendali?
- b) Apakah jumlah *rule* pada *fuzzy logic control* yang lebih banyak menghasilkan performansi yang lebih baik?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) Mengetahui parameter pada sistem *fuzzy logic control* yang mampu menghasilkan performansi terbaik pada sistem pengendali.
- b) Mengetahui pengaruh sistem fuzzy terhadap performansi yang dihasilkan.
- c) Mengetahui pengaruh jumlah *rule* pada *fuzzy logic control* untuk menghasilkan performansi yang lebih baik.
- d) Membandingkan performansi dari pengendali konvensional PID dengan pengendali *fuzzy logic*.
- e) Mengetahui kestabilan pengendali fuzzy terhadap berbagai gangguan dan perubahan *set point*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Unit yang ditinjau pada pengendalian adalah kolom distilasi metanol-air Wood and Berry.
- b) Parameter didapatkan melalui proses pengambilan data sekunder pada jurnal.
- c) Masing-masing *tray* diasumsikan 100% efisien (sifat fase uap yang meninggalkan *tray* sama dengan sifat fase cairan yang ada pada *tray*).
- d) *Software* yang digunakan dalam perancangan pengendalian fuzzy adalah MATLAB.
- e) Variabel yang dikendalikan adalah komposisi *distillate* dan *bottom product* dengan memanipulasi laju aliran *reflux* dan laju aliran uap pada *reboiler*.

- f) *Fuzzy logic* digunakan sebagai *gain schedule* untuk parameter sistem pengendali konvensional PID

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika laporan yang digunakan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Berisi tentang tinjauan Pustaka mengenai sistem control pada kolom distilasi, teori kolom distilasi, mimo desentralisasi, *fuzzy logic control* dan perancangannya.

BAB III METODOLOGI

Berisi tentang langkah-langkah pemodelan proses kolom distilasi dan perancangan kontrol PID dan fuzzy dengan simulasi pada program MATLAB.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang analisis hasil perancangan dari PID control, *fuzzy logic scheduling control* serta uji kestabilan pada pengendali.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan hasil yang didapatkan setelah dilakukan perancangan *fuzzy logic scheduling control* dan saran.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Pada penelitian ini yang berjudul “*Perancangan Sistem Pengendalian pada Kolom Distilasi Metanol-Air Berbasis Fuzzy Logic Control*” memiliki tujuan memberikan referensi untuk perbandingan serta menyempurnakan penelitian terdahulu. Sehingga beberapa referensi pada penelitian ini ditunjukkan sebagai berikut :

- **M. Miccio and B. Cosenza, “Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers,” *J. Process Control*, vol. 24, no. 5, pp. 475–484, 2014.**

Penelitian ini dilakukan sebagai pengembangan dari tipe-1 dan tipe-2 *fuzzy logic PID controller* untuk mengontrol kolom distilasi biner, dimana model matematika yang dilakukan sulit karena memiliki nonlinieritas yang tinggi dan ketidakpastian pada parameternya. Performansi yang dihasilkan oleh tipe-1 FLC akan dibandingkan secara simulasi dengan tipe-2 FLC. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *fuzzy controller* memiliki ketahanan dan control yang efektif sebagai pengendali, terutama untuk tipe-2. Performansi yang dihasilkan lebih baik dan lebih cepat mencapai kestabilan dibuktikan dengan *overshoot* yang lebih rendah dibanding tipe-1 FLC. Tipe-2 FLC akan meningkatkan IAE sebesar 27% dibandingkan tipe-1.

- **S. Javadi and J. Hosseini, “Control of binary distillation column using fuzzy PI controllers,” *Proc. 11th WSEAS Int. Conf. Math. Comput. Methods Sci. Eng. MACMESE '09*, pp. 50–57, 2009.**

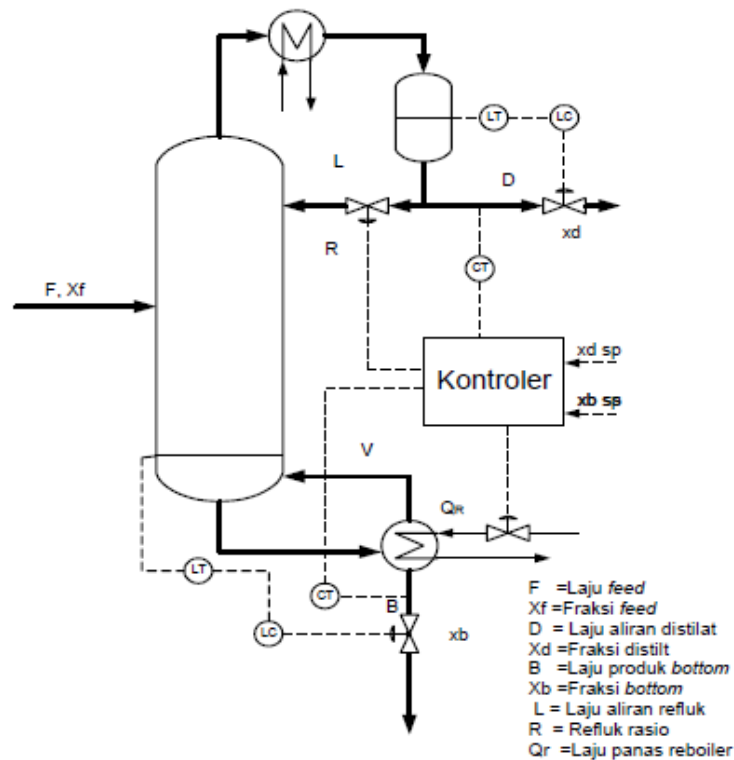
Pengendalian yang dilakukan pada penelitian ini berupa pengendalian komposisi dari *top product* dan *bottom product*. *Fuzzy control* mencapai keakuratan performansi sebagai pengendali komposisi *top* dan *bottom* juga untuk *feed rate*, *top* dan *bottom rate*. *Error* yang dihasilkan mendekati nol dan berjalan sesuai dengan *set point*.

- **R. Guru, A. Arumugam, G. Balasubramanian, and V. S. Balaji, “Fuzzy based composition control of distillation column,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 1863–1869, 2013.**

Penelitian ini menyajikan skema kontrol berbasis *fuzzy logic* pada sebuah *bubble cap* kolom distilasi. *Fuzzy rule base dan Inference System of Fuzzy (FIS)* direncanakan untuk mengatur rasio *reflux* (variabel yang dimanipulasi) untuk mendapatkan komposisi produk yang diharapkan (metanol). *Fuzzy logic control* dapat mengatasi masalah nonlinier dalam pengendalian proses. Fungsi keanggotaan segitiga digunakan untuk mewakili variabel *input* dan *output*. Jika dibandingkan dengan control PID konvensional, FLC memberikan kontribusi IAE, ISE, dan ITAE yang lebih rendah dari FLC. FLC memberikan kinerja lebih baik dan bekerja secara efisien dalam hal mengurangi waktu penyelesaian dan *overshoot*.

2.2 Kolom Distilasi

Kolom distilasi biner pada umumnya terdiri atas sebuah kolom vertikal yang terpecah menjadi beberapa *tray* dengan ukuran yang sama. Kolom distilasi juga dilengkapi dengan sebuah *reboiler* yang berfungsi sebagai pemanas proses distilasi dan sebuah *condenser* yang berfungsi mengkondensasi uap hasil distilasi pada produk atas menjadi cairan kembali (Roffel & Betlem, 2006). Skema kolom distilasi biner dengan instrumen terkait ditunjukkan oleh Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kolom distilasi biner

Kolom distilasi terdiri atas beberapa komponen yaitu sebagai berikut:

- Shell*, atau kolom merupakan tempat terjadinya pemisahan komponen.
- Tray* digunakan untuk memperbesar kontak antara cairan dan gas sehingga komponen dapat dipisahkan sesuai dengan rapat jenisnya, dalam bentuk gas atau cairan.
- Reboiler*, merupakan tempat penguapan cairan yang keluar dari bagian bawah kolom.
- Condenser*, merupakan tempat untuk mendinginkan atau mengondensasikan uap yang meninggalkan bagian atas kolom distilasi.
- Reflux Drum*, untuk menampung uap yang terkondensasi dari kolom bagian atas sehingga cairan (*reflux*) dapat diumpanbalikkan ke kolom

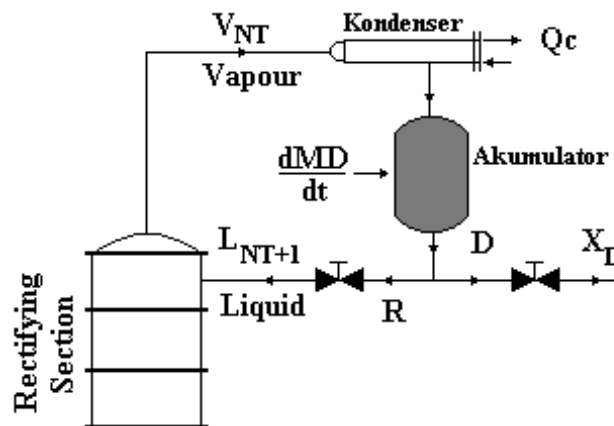
Prinsip kerja sederhana dari kolom distilasi adalah campuran yang akan dipisahkan masuk melalui *feed tray* kemudian turun ke bagian bawah kolom, cairan dengan titik didih rendah akan menguap ke atas akibat panas *reboiler* dan setelah

sampai diatas kolom akan didinginkan oleh *condenser* menjadi cairan, kembali dan disebut produk atas (X_D). Cairan yang tidak terpanaskan oleh *reboiler* dan keluar dari bagian bawah kolom adalah produk bawah (X_B)(Mishra & Dan, 2013). Terdapat berbagai macam struktur kontrol komposisi pada kolom distilasi. Gambar 2.1 juga menunjukkan struktur kontrol L-V pada kolom distilasi biner. Variabel yang dikontrol adalah X_D dan X_B dengan memanipulasi laju aliran *reflux* (L) dan laju aliran *steam* pada *reboiler* (Q_r) dan variabel gangguan yang mempengaruhi proses adalah laju aliran umpan (F) dan konsentrasi umpan (X_F)(R. Biyanto, 2015).

2.2.1 Pemodelan Kolom Distilasi

Model matematis dari kolom distilasi umumnya diturunkan dengan konsep hukum fisika. Konsep hukum fisika pada kolom distilasi biner berupa kesetimbangan massa dan energi yang dapat diterangkan sebagai berikut(Luyben, Tyréus, & Luyben, 1999):

Kesetimbangan massa pada kondensor dan reflux drum



Gambar 2.2 Kondensor dan *reflux drum*(R. Biyanto, 2007)

Neraca massa total:

$$\frac{dM_D}{dt} = V_{NT} - L_{NT+1} - D \quad (2.1)$$

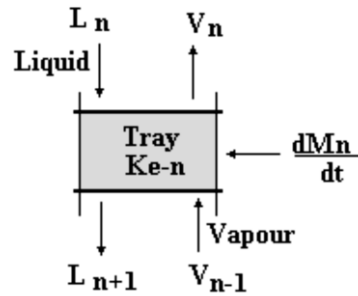
Neraca massa komponen:

$$\frac{d(M_D X_D)}{dt} = V_{NT} Y_{NT} - (L_{NT+1} + D) X_D \quad (2.2)$$

Neraca panas:

$$\frac{d(M_D h_D)}{dt} = V_{NT} H_{NT} - L_{NT+1} h_{NT+1} - D h_D - Q_c \quad (2.3)$$

Kesetimbangan massa pada tiap tray



Gambar 2.3 Tray kolom(R. Biyanto, 2007)

Neraca massa total:

$$\frac{dM_n}{dt} = L_{n+1} - L_n + V_{n-1} - V_n \quad (2.4)$$

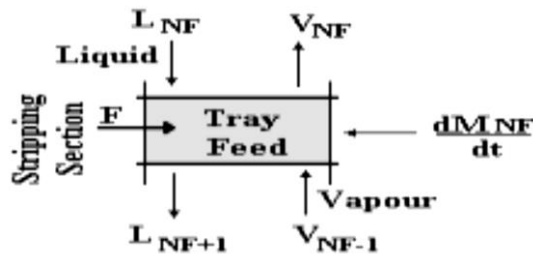
Neraca massa komponen :

$$\frac{d(M_n X_n)}{dt} = L_{n+1} X_{n+1} - L_n X_n + V_{n-1} Y_{n-1} - V_n Y_n \quad (2.5)$$

Neraca massa panas :

$$\frac{d(M_n h_n)}{dt} = L_{n+1} h_{n+1} - L_n h_n + V_{n-1} H_{n-1} - V_n H_n \quad (2.6)$$

Kesetimbangan massa pada tray umpan (n = N_F)



Gambar 2.4 Feed tray(R. Biyanto, 2007)

Neraca massa total:

$$\frac{dM_{NF}}{dt} = L_{NF+1} - L_{NF} + F + V_{NF-1} - V_{NF} \quad (2.7)$$

Neraca massa komponen :

$$\frac{d(M_{NF} X_{NF})}{dt} = L_{NF+1} X_{NF+1} - L_{NF} X_{NF} + V_{NF-1} Y_{NF-1} - V_{NF} Y_{NF} + F X_F \quad (2.8)$$

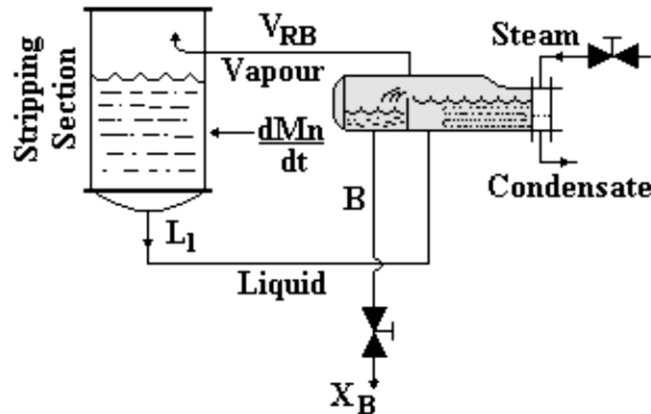
Neraca panas :

$$\frac{d(M_{NF} h_{NF})}{dt} = L_{NF+1} h_{NF+1} - L_{NF} h_{NF} + V_{NF-1} H_{NF-1} - V_{NF} H_{NF} + F h_F \quad (2.9)$$

Neraca panas :

$$\frac{d(M_n h_n)}{dt} = L_{n+1} h_{n+1} - L_n h_n + V_{n-1} H_{n-1} - V_n H_n \quad (2.10)$$

Kesetimbangan massa pada reboiler dan base kolom



Gambar 2.5 Reboiler dan base kolom (R. Biyanto, 2007)

Neraca massa total:

$$\frac{dM_n}{dt} = L_1 - V_{RB} - B \quad (2.11)$$

Neraca massa komponen:

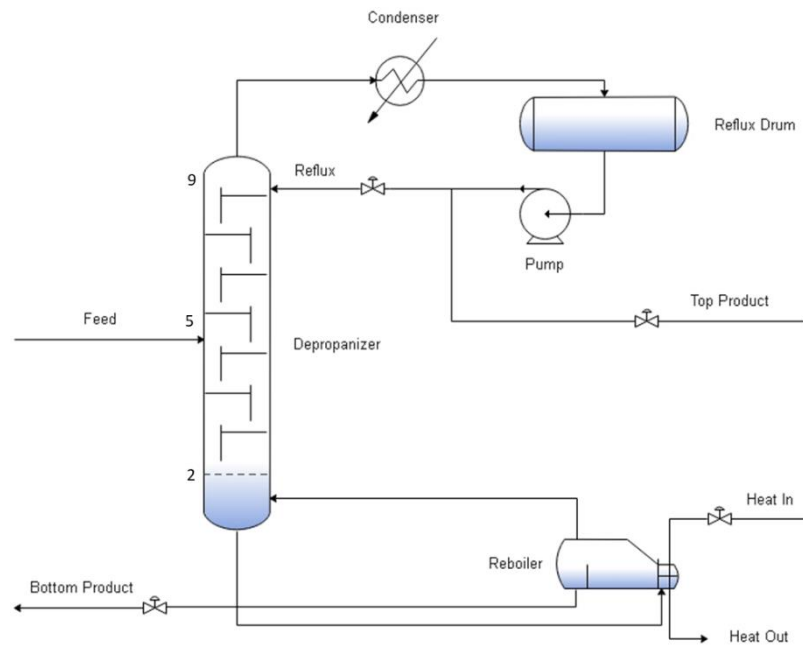
$$\frac{d(M_B X_B)}{dt} = L_1 X_1 - V_{RB} Y_B - B X_B \quad (2.12)$$

Neraca panas:

$$\frac{d(M_B h_B)}{dt} = L_1 h_1 - V_{RB} H_{RB} - B h_B + Q_R \quad (2.13)$$

2.2.2 Kolom Metanol-Air

Kolom distilasi pemisahan antara metanol-air ini memiliki 9 tray seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6. Kolom distilasi biner Wood & Berry ini memisahkan aliran *feed* (F, X_F) menjadi dua bagian yaitu produk atas (D, X_D) dan produk bawah (B, X_B). Tujuan dari pemisahan tersebut adalah memperoleh kemurnian produk akhir hasil pemisahan. Produk atas (*distillate*) diharapkan berupa metanol yang memiliki komposisi 96% wt sedangkan produk bawah (*bottom product*) dijaga agar komposisi metanol hanya 0,5% wt dan sisanya air. Suatu model dinamis antar tray yang nonlinier telah dikembangkan dengan menggunakan kesetimbangan massa dan energi.



Gambar 2.6 Kolom distilasi metanol-air

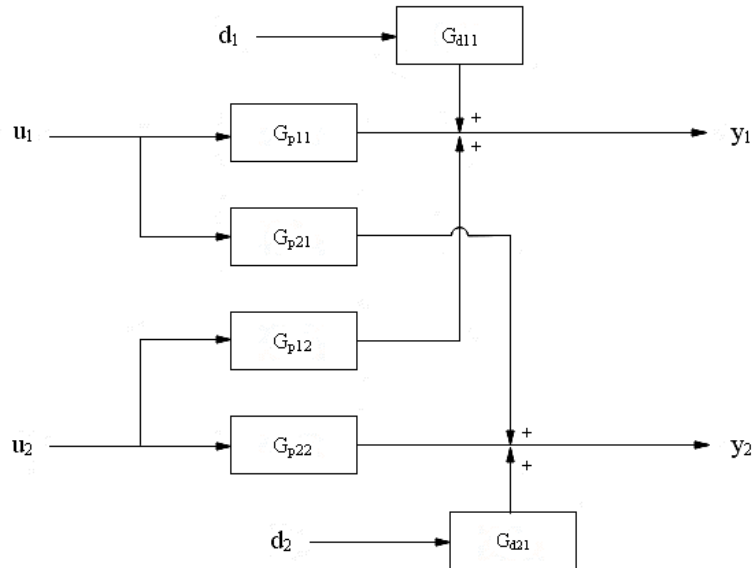
Terdapat berbagai struktur kontrol untuk kolom distilasi biner. Struktur terbaik akan berpengaruh dalam pengendalian struktur *plantwide*. Pada kolom distilasi metanol-air, berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (R. Biyanto, 2015), konfigurasi control LV adalah yang paling sesuai untuk pengendalian kolom distilasi tunggal sistem biner metanol-air dengan nilai IAE yang terkecil.

Komposisi produk terjaga akibat *supply heat* pada *reboiler* dan *reflux* yang digunakan untuk mengendalikan temperatur, jika temperatur terjaga maka tekanan pada *top* kolom juga akan terjaga. Terjaganya temperatur dan tekanan tersebut akan berpengaruh pada level kolom distilasi. Berdasarkan (Homkes, 2017), level kolom dapat dikendalikan dengan memanipulasi laju aliran pada *reflux* dan *steam reboiler*. Sehingga untuk menjaga komposisi *distillate* akan dikendalikan laju alir *reflux* (L), sedangkan komposisi *bottom* dikendalikan dengan laju alir *steam reboiler* (Q_r).

2.3 Sistem Kendali MIMO

Sistem MIMO merupakan sistem kendali dengan variabel *output* yang dikendalikan dan variabel *input* yang dimanipulasi berjumlah lebih dari satu. Salah satu karakteristik dari sistem kendali MIMO adalah adanya interaksi antara variabel *output* yang dikendalikan dengan variabel *input* yang dimanipulasi (Sutapa,

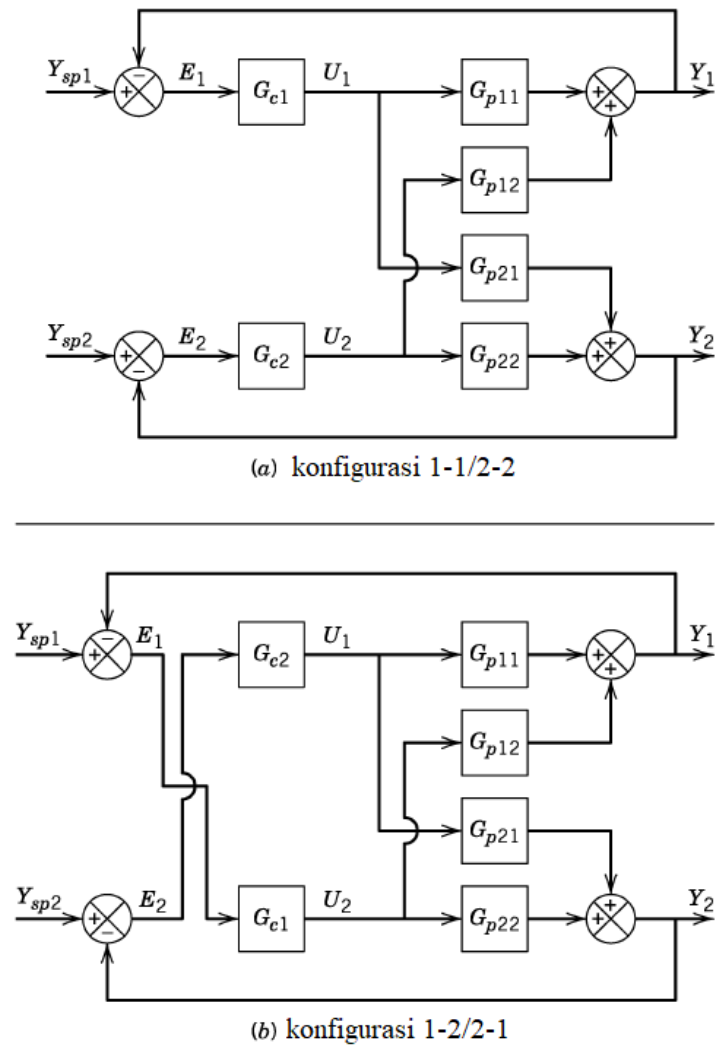
Setiyono, & Wahyudi, 2017). Terdapat banyak variasi dari sistem MIMO salah satunya yaitu sistem MIMO 2x2 merupakan suatu sistem multivariabel dengan dua variabel *output* yang dikendalikan (y) dan dua variabel *input* yang dimanipulasi (u). Gambar 2.7 dibawah menunjukkan interaksi model MIMO 2x2.



Gambar 2.7 Diagram blok interaksi MIMO 2x2

2.3.1 Sistem MIMO Desentralisasi

Sistem kontrol MIMO terdesentralisasi adalah sistem kontrol MIMO yang hanya menggunakan pasangan diagonal dari proses MIMO itu sendiri. Struktur kontrol terdesentralisasi ditunjukkan oleh Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Diagram blok untuk skema 2x2 *multiloop control* (Dale E Seborg, 2011)

Sistem kendali MIMO terdesentralisasi terdiri dari pengendali umpan-balik independen yang mengendalikan *subset* dari variabel *output* yang dikendalikan dengan *subset* dari variabel *input* yang dimanipulasi (Skogestad & Postlethwaite, 2007). Sistem kendali MIMO terdesentralisasi terdiri dari satu rangkaian sistem kendali SISO independen (Szita & Sanathanan, 2000). Sistem kendali MIMO 2x2 terdesentralisasi memiliki dua struktur yang berbeda, yaitu struktur pengendali 1-1/2-2 dan struktur pengendali 1-2/2-1 (Dale E Seborg, 2011). Struktur 1-1/2-2 sistem MIMO terdesentralisasi ditunjukkan oleh Gambar 2.8 diatas.

Pemilihan konfigurasi kontrol untuk sistem MIMO sangatlah penting karena berkaitan dengan kestabilan proses. Konfigurasi kontrol yang baik dalam sistem

MIMO adalah konfigurasi yang dapat meminimalkan proses interaksi dalam sistem MIMO dan menjamin bahwa variabel yang dimanipulasi memberikan kontrol yang efektif terhadap variabel yang dikontrol

2.3.2 *Relative Gain Array (RGA)*

RGA berfungsi untuk menghitung interaksi masukan-keluaran pada sistem kendali MIMO dan menentukan struktur sistem kendali MIMO terdesentralisasi (Hu, Cai, & Xiao, 2010). Analisis RGA pada proses sistem MIMO 2x2 digunakan menentukan struktur atau konfigurasi sistem MIMO terdesentralisasi yang akan digunakan (Dale E Seborg, 2011).

RGA adalah pendekatan yang paling sering digunakan untuk menentukan pasangan konfigurasi kontrol *multiloop* SISO pada sistem MIMO. RGA untuk sistem FOPDT dapat dihitung dengan menggunakan *gain steady state* proses. Dengan demikian *gain steady state* proses MIMO 2x2 dapat dituliskan pada persamaan 2.14 berikut:

$$RGA = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Relative gain (λ) dari proses G_{11} dapat dihitung dengan persamaan 2.15 dan 2.16

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}}} \quad (2.15)$$

$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{11} = \lambda_{21} \quad (2.16)$$

Relative gain untuk proses yang lain dapat dihitung dengan cara yang sama atau dengan menggunakan aturan aljabar RGA yang menyatakan jumlah dari setiap baris dan kolom untuk matriks RGA sama dengan satu. Matriks RGA untuk proses MIMO 2x2 dapat dituliskan pada persamaan 2.17.

$$RGA = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 1 - \lambda \\ 1 - \lambda & \lambda \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Jika nilai *relative gain* yang diperoleh bernilai 1 atau mendekati 1 ($\lambda \geq 0,5$), struktur MIMO 2x2 terdesentralisasi yang digunakan adalah konfigurasi 1-1/2-2. Jika nilai *relative gain* yang diperoleh lebih kecil dari 0,5 ($\lambda < 0,5$), struktur MIMO 2x2 terdesentralisasi yang digunakan adalah konfigurasi 1-2/2-1 (Dale E Seborg, 2011). Diagram blok dari masing-masing konfigurasi pasangan kontrol MIMO disajikan pada gambar 2.8 diatas.

2.4 PID Controller

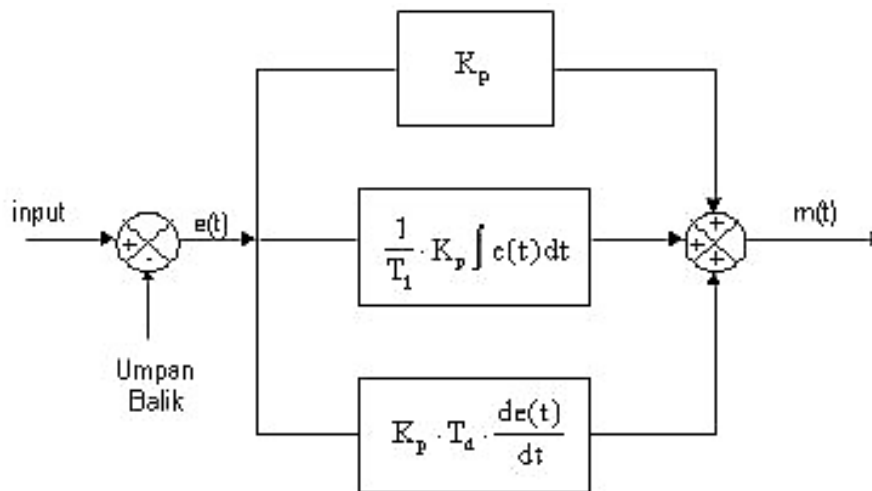
Kontrol PID merupakan sebuah kontroler untuk menentukan presisi dari suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut dan berguna untuk memperbaiki kinerja dari suatu sistem. Berikut adalah persamaan kontroler PID dalam bentuk laplace (Setiawan, 2008).

$$CO(s) = K_p \left(e(s) + \frac{1}{\tau_i s} e(s) + \tau_d s e(s) \right) \quad (2.18)$$

atau

$$CO(s) = \left(K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \right) e(s) \quad (2.19)$$

Keluaran kontroler PID merupakan jumlahan dari keluaran kontroler proporsional, keluaran kontroler integral, dan keluaran kontroler derivatif. Gambar 2.9 menunjukkan blok diagram kontroler PID.



Gambar 2.9 Diagram blok kontrol PID

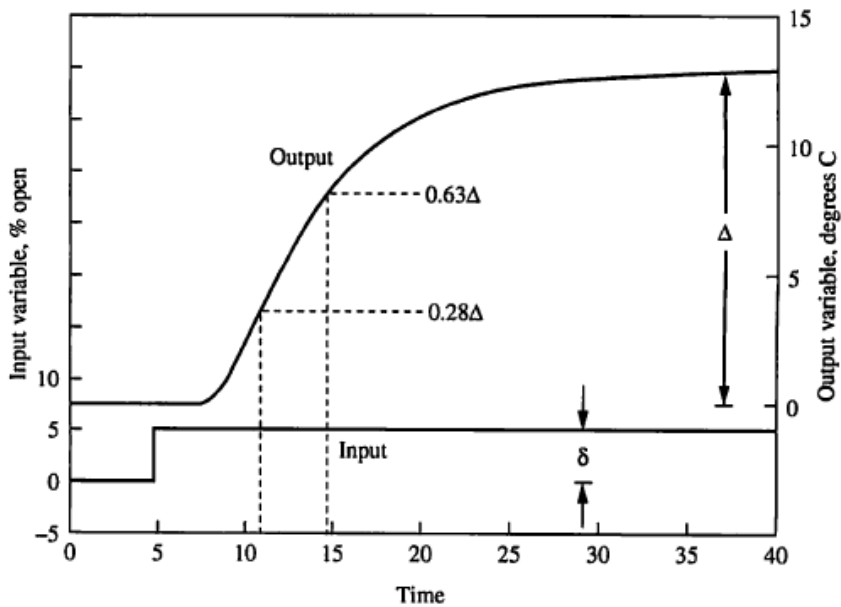
Secara teoritis nilai-nilai parameter kontrol PID besarnya dapat diatur secara independen, tetapi secara praktis (terutama terkait dengan model proses yang dikontrol), pengaturan atau tuning yang dilakukan terhadap salah satu parameter kontrol, umumnya memerlukan pengaturan ulang pada parameter yang lain. Sebagai contoh, untuk sebuah model proses tertentu, pengubahan nilai K_p (diperbesar atau diperkecil) umumnya akan memerlukan *setting* ulang pada besaran parameter kontrol K_i (atau τ_i) dan K_d (atau τ_d). Tabel 2.1 dibawah memperlihatkan pengaruh perubahan setiap parameter PID terhadap unjuk kerja pengontrolan proses secara umum.

Tabel 2.1 Kinerja pengendali PID

Respon close loop	Risetime	Overshoot	Error steady state
Proporsional	Berkurang	Meningkat	Berkurang
Integral	Berkurang	Meningkat	Hampir nol
Derivative	Berubah sedikit	Berkurang	Berubah sedikit

2.5 First Order Plus Dead Time (FOPDT)

First Order Plus Dead Time (FOPDT) merupakan suatu fungsi alih yang mengombinasikan antara sistem orde satu dengan waktu tunda. Adanya waktu mati akan membuat sistem menjadi tidak stabil. FOPDT didapat dari uji *open loop*. Grafik respon dari FOPDT yang disajikan pada gambar 2.10 berikut:



Gambar 2.10 Grafik respon FOPDT (Thomas E. Marlin, 2000)

Model matematis respon proses FOPDT dapat direpresentasikan ke dalam bentuk fungsi alih proses ($G(s)$) dengan transformasi *laplace* yang ditunjukkan pada persamaan:

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta} \quad (2.20)$$

dengan K merupakan *gain* proses, θ merupakan waktu mati pada proses, dan τ merupakan konstanta waktu proses.

Nilai K adalah *gain* sistem yang merupakan perbandingan perubahan proses variabel yang diukur dengan perubahan sinyal *output* dari *controller* dengan persamaan:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta MV} \quad (2.21)$$

Untuk τ (*time constant*) didapat dari persamaan 2.22 sebagai berikut.

$$\tau = 1,5 (t_{63\%} - t_{28\%}) \quad (2.22)$$

dimana:

$t_{63\%}$: Waktu yang dibutuhkan ketika variabel proses mencapai 63% dari nilai akhir

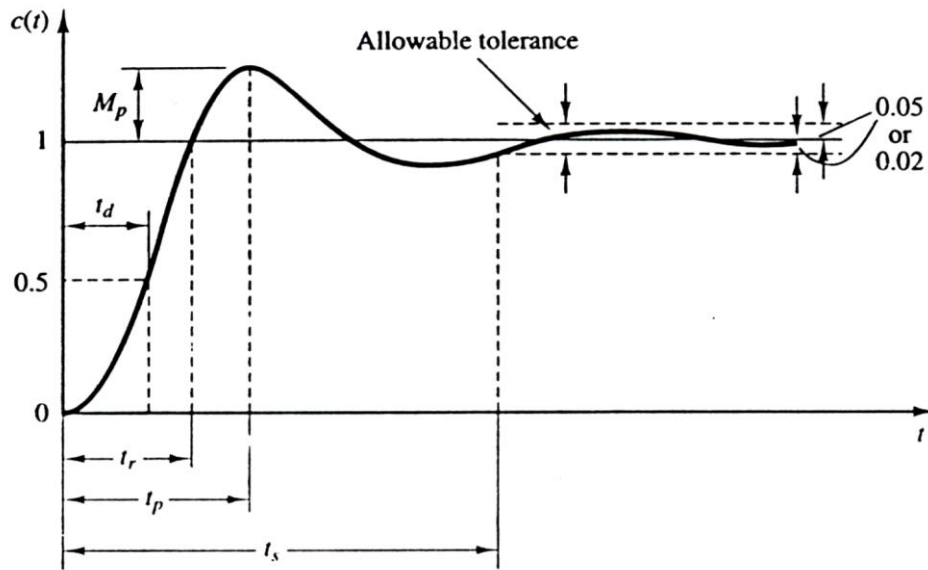
$t_{28\%}$: Waktu yang dibutuhkan ketika variabel proses mencapai 28% dari nilai akhir

Sedangkan θ (*dead time*) adalah perbedaan waktu dari respon saat sinyal step diberikan sampai respon mulai bergerak. Atau bisa dituliskan pada persamaan 2.23 berikut.

$$\theta = t_{63\%} - \tau \quad (2.23)$$

2.6 Karakteristik Respon Sistem

Analisis ini dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif pada respon sistem dari pengendali. Analisis kuantitatif dapat dilakukan dengan melihat karakteristik respon, seperti *maximum overshoot*, *settling time* dan eror *steady state*. Analisis kualitatif dilakukan dengan cara menghitung nilai *integral absolute error* (IAE). Pada Gambar 2.11 ditunjukkan parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan analisis performansi pengendali.



Gambar 2.11 Karakteristik respon sistem

Dalam grafik terdapat beberapa karakteristik yang bisa ditinjau meliputi:

- Time constant (τ) : ukuran waktu yang menyatakan kecepatan respon, yang di ukur mulai $t = 0$ s/d respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*.
- Waktu naik (*risetime*) t_r : ukuran waktu yang menyatakan keberadaan suatu respon, yang di ukur mulai respon 5% s/d 95% dari respon *steady state* (dapat pula 10% s/d 90%).
- Waktu puncak (*peak time*) t_p : waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.
- Waktu tunda (*delay time*) t_d : ukuran waktu yang menyatakan faktor keterlambatan respon *output* terhadap *input*, di ukur mulai $t = 0$ s/d respon mencapai 50% dari respon *steady state*.
- *Maximum overshoot* (M_p) : Nilai relatif yang menyatakan perbandingan harga maksimum respon yang melampaui harga *steady state* dibanding dengan nilai *steady state*
- Waktu turun (*settling time*) t_s : ukuran waktu yang menyatakan respon telah masuk 5% atau 2% atau 0,5% dari respon *steady state*.

Sedangkan untuk melakukan analisis kualitatif dilakukan dengan menghitung nilai IAE seperti yang dijelaskan berikut:

- *Integral Absolute Error (IAE)*

Indeks performansi yang didefinisikan oleh kriteria IAE dapat dilihat pada persamaan (Duarte-Mermoud & Prieto, 2004)

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2.24)$$

Sistem optimal adalah sistem yang meminimumkan harga integral ini. Kriteria IAE hanya mengintegalkan kesalahan mutlak pada waktu tertentu. IAE digunakan untuk sistem yang memiliki respon yang cukup lambat seperti pada sistem dengan waktu mati dan sistem dengan osilasi minimal tak berkelanjutan.

2.7 Fuzzy Logic Control

Fuzzy set pertama kali diperkenalkan oleh *Prof. Lotfi Zadeh* dalam papernya yang memaparkan ide dasar *fuzzy set*. Secara harafiah *fuzzy* berarti samar, sedangkan kebalikannya adalah *crisp* yang secara harafiah berarti tegas. Sebagai contoh temperature/suhu, biasa dinyatakan sebagai panas, agak panas, dingin, atau sangat dingin.

Himpunan *fuzzy* didasarkan pada gagasan untuk memperluas jangkauan fungsi karakteristik, sehingga fungsi tersebut akan mencakup bilangan real pada interval 0 – 1. Nilai keanggotaannya menunjukkan bahwa suatu nilai dalam semesta pembicaraan tidak hanya berada pada 0 atau 1, namun juga nilai yang terletak diantaranya. Dengan kata lain nilai kebenaran suatu hal tidak hanya bernilai benar atau salah. Nilai 0 menunjukkan salah, nilai 1 menunjukkan benar dan masih ada nilai-nilai yang terletak diantaranya.

Sejak tahun 1985 pengendalian berbasis logika *fuzzy* mengalami perkembangan pesat, terutama dalam hubungannya dengan penyelesaian masalah kendali yang bersifat tak linier, sulit dimodelkan, berubah karakteristiknya terhadap waktu (*time varying*) dan kompleks.

2.7.1 Himpunan Fuzzy

Dalam teori logika fuzzy dikenal himpunan fuzzy (*fuzzy sets*) yang pengelompokan sesuatu berdasarkan variabel bahasa (*linguistic variable*), yang dinyatakan dalam fungsi keanggotaan. Di dalam semesta pembicaraan (*universe of*

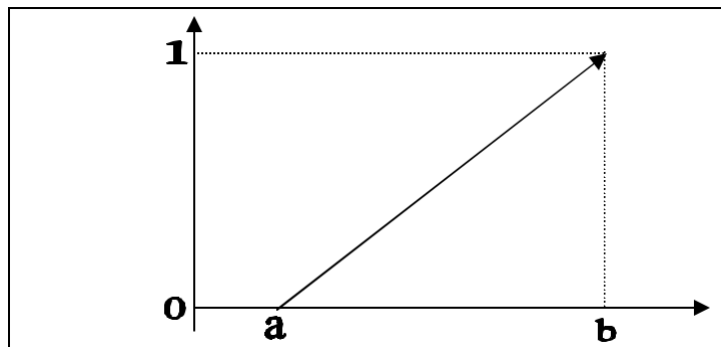
discourse), fungsi keanggotaan dari suatu himpunan fuzzy tersebut bernilai dari 0 sampai 1.

2.7.2 Fungsi Keanggotaan Fuzzy

Fungsi keanggotaan merupakan suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data kedalam nilai keanggotaannya (disebut juga dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Untuk mendapatkan nilai keanggotaan dapat menggunakan cara pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi keanggotaan yang digunakan dalam teori himpunan fuzzy adalah:

a) Representasi Linier

Pada representasi linear, pemetaan *input* ke derajat keanggotaannya digambarkan sebagai suatu garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas. Ada 2 keadaan himpunan fuzzy yang linear. Pertama, kenaikan himpunan dimulai pada nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan nol bergerak ke kanan menuju ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih tinggi seperti pada Gambar 2.12.

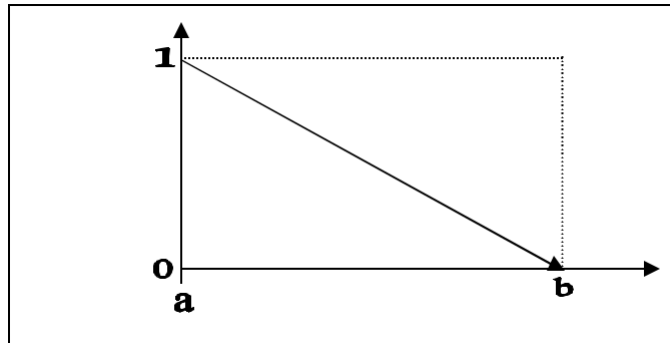


Gambar 2.12 Representasi linear naik

Persamaan fungsi keanggotaan linear naik:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & ; a \leq x \leq b \\ 1 & ; x \geq b \end{cases} \quad (2.25)$$

Kedua, merupakan kebalikan yang pertama. Garis lurus dimulai dari nilai domain dengan derajat keanggotaan tertinggi pada sisi kiri, kemudian bergerak menurun ke nilai domain yang memiliki derajat keanggotaan lebih rendah seperti pada Gambar 2.13.



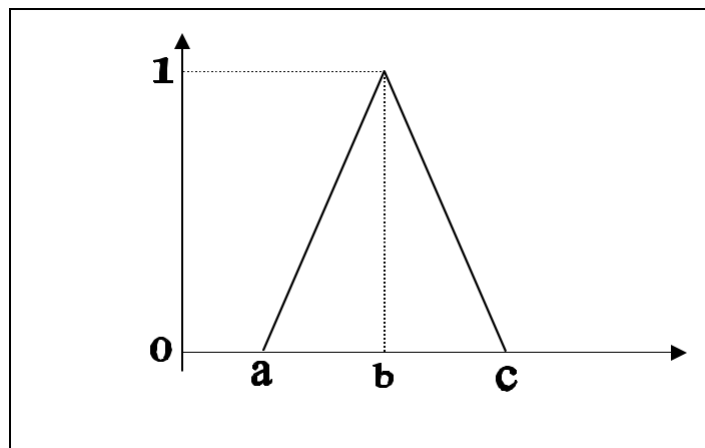
Gambar 2.13 Representasi linear turun

Persamaan fungsi keanggotaan linear turun:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; a \leq x \leq b \\ 1; x \geq b \end{cases} \quad (2.26)$$

b) Representasi Segitiga

Pada dasarnya merupakan gabungan antara 2 garis (*linear*) seperti terlihat pada Gambar 2.14 berikut:



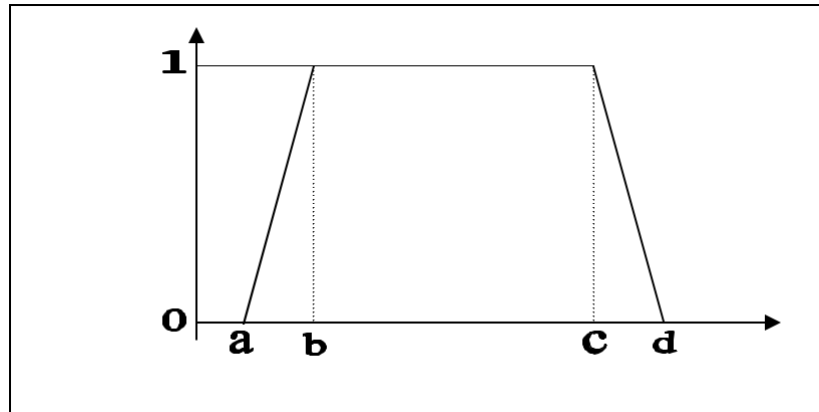
Gambar 2.14 Representasi kurva segitiga

Persamaan fungsi keanggotaan kurva segitiga:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}; a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-b}; b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.27)$$

c) Representasi Kurva Trapesium

Kurva trapesium pada dasarnya seperti bentuk segitiga, hanya saja ada beberapa titik yang memiliki nilai keanggotaan 1 seperti pada Gambar 2.15 berikut:



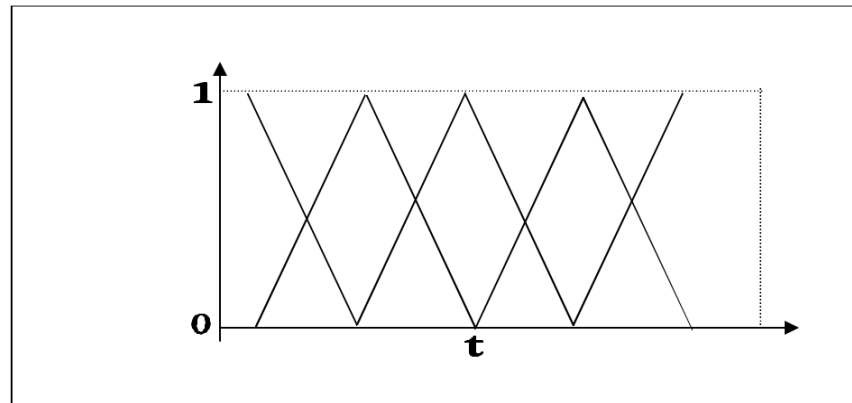
Gambar 2.15 Representasi kurva trapesium

Persamaan fungsi keanggotaan kurva trapesium

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c}; & c \leq x \leq d \\ 1; & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (2.28)$$

d) Representasi Kurva Bahu

Daerah yang terletak ditengah-tengah suatu variabel yang dipresentasikan dalam bentuk segitiga, pada sisi kanan dan kirinya akan naik dan turun (*misalkan: dingin bergerak ke sejuk bergerak ke hangat dan bergerak ke panas*). Tetapi terkadang salah satu sisi dari variabel tersebut tidak mengalami perubahan. Sebagai contoh, apabila telah mencapai kondisi panas, kenaikan temperatur akan tetap berada pada kondisi panas. Himpunan fuzzy ‘bahu’, bukan segitiga, digunakan untuk mengakhiri variabel suatu daerah fuzzy. Bahu kiri bergerak dari benar ke salah, demikian juga bahu kanan bergerak dari salah ke benar. Gambar 2.16 menunjukkan variabel temperatur dengan daerah bahunya.



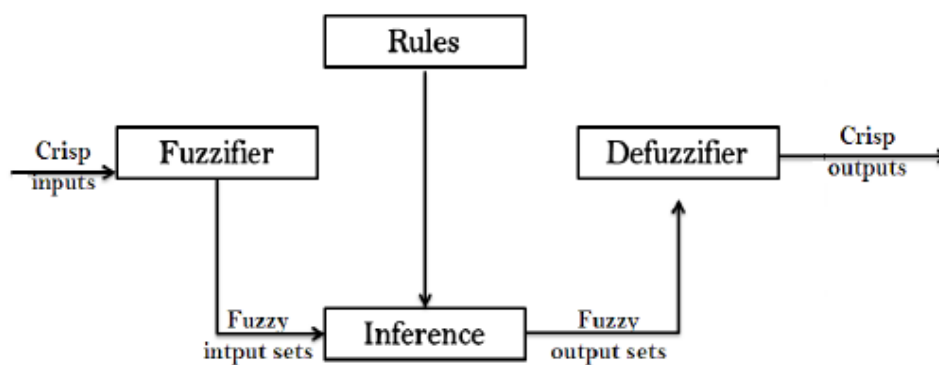
Gambar 2.16 Representasi kurva bahu

2.7.3 Cara kerja Logika Fuzzy

Dalam sistem kontrol logika fuzzy terdapat beberapa tahapan operasional meliputi:

- 1) Fuzzifikasi
- 2) Aturan dasar (*rule base*)
- 3) Mesin penalaran (*inference engine*)
- 4) Defuzzifikasi

Blok diagram kontrol logika fuzzy ditunjukkan pada gambar 2.17 berikut dimana fuzzy terdiri dari 4 tahapan.



Gambar 2.17 Blok diagram sistem logika fuzzy tipe-1

Penjelasan pada setiap prosesnya dijelaskan berikut ini:

a) Fuzzifikasi

Proses pemetaan nilai tegas dari masukan menjadi himpunan fuzzy menggunakan fungsi keanggotaan. Nilai masukan dipetakan ke dalam derajat keanggotaan dengan menggunakan fungsi berikut :

b) Aturan Dasar (*rule base*)

Aturan dasar atau *rule base* pada kontrol logika fuzzy merupakan suatu bentuk aturan relasi/implikasi “Jika-Maka” atau “*If-Then*” seperti pada pernyataan berikut:

$$\text{“JIKAN” } X = A \text{ dan “JIKAN” } Y = B \text{ “MAKAN” } Z = C$$

Aturan dasar kontrol logika fuzzy ditentukan dengan bantuan seorang pakar yang mengetahui karakteristik objek yang akan dikendalikan. Aturan dasar tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk matrik aturan dasar kontrol logika fuzzy.

c) Inferensi

Inferensi merupakan sistem pengambilan keputusan pada konsep logika fuzzy. Dimana derajat keanggotaan yang dihasilkan dari proses sebelumnya digabungkan berdasarkan aturan tertentu. Kemudian, kaidah-kaidah yang aktif dipotongkan ke himpunan kesimpulan. Salah satu model penalaran max-min. Dalam penalaran max-min proses pertama yang dilakukan adalah melakukan operasi operasi min sinyal keluaran lapisan fuzzifikasi, yang diteruskan dengan operasi max untuk mencari nilai keluaran yang selanjutnya akan difuzzifikasikan sebagai bentuk keluaran pengontrol. Operasional max-min tersebut dinyatakan sebagai berikut.

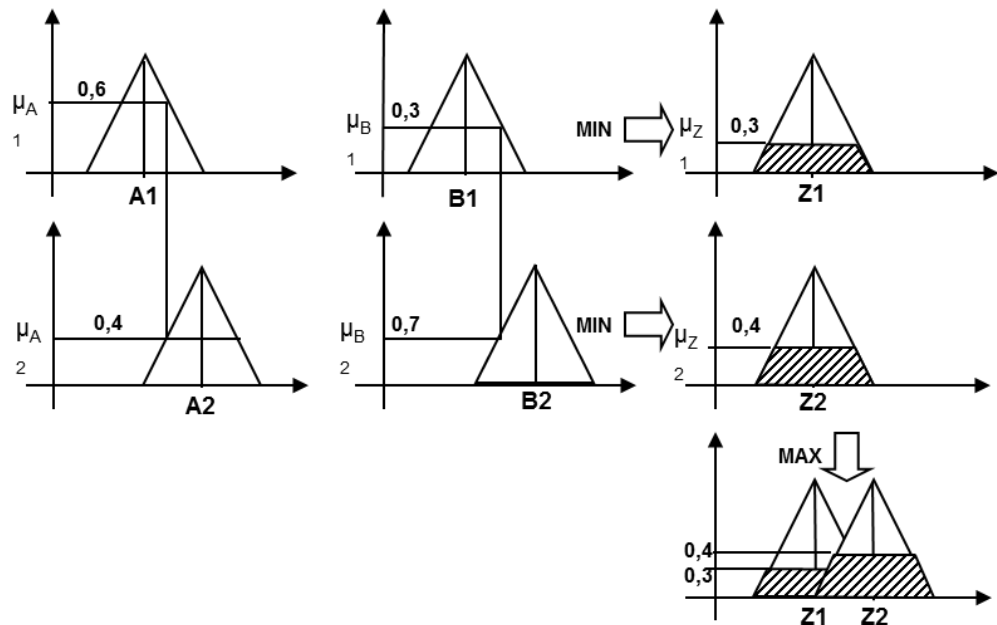
- Operasi min (*irisan*)

$$\begin{aligned} a \cap b &= \min (a,b) = a \text{ if } \leq b \\ &= a \text{ if } a > b \end{aligned} \quad (2.29)$$

- Operasi max (*union*)

$$\begin{aligned} a \cup b &= \max (a,b) = a \text{ if } \geq b \\ &= a \text{ if } a \leq b \end{aligned} \quad (2.30)$$

Proses penalaran max-min dapat dijelaskan dengan gambar 2.18



Gambar 2.18 Operasi max-min secara grafis

d) Defuzzifikasi

Defuzzifikasi didefinisikan sebagai sesuatu proses yang mengubah nilai himpunan kesimpulan menjadi nilai tegas yang akan menjadi hasil keluaran T1FLS. Teknik defuzzifikasi yang paling banyak digunakan adalah teknik defuzzifikasi *centroid*. Teknik ini bertujuan untuk mencari titik tengah dari gravitasi dari area *consequent* yang dihasilkan pada proses penalaran. Pusat gravitasi adalah titik dimana apabila daerah tersebut dibagi dua berdasarkan titik itu, hasil pembagiannya memiliki luasan yang sama. Metode dalam defuzzifikasi antara lain:

- a. Metode *Center of Area (COA)* merupakan metode yang paling umum digunakan. Pada metode ini, solusi *crisp* diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah fuzzy. Rumus metode *centroid* didefinisikan sebagai

$$z^* = \frac{\int z \cdot \mu_c(z) dz}{\int \mu_c(z)} \quad (2.31)$$

Untuk variabel kontinu, dan persamaan 2.36 untuk variabel diskrit

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \cdot \mu_c(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu_c(z_j)} \quad (2.32)$$

- b. Metode bisektor mengambil nilai pada domain himpunan *fuzzy* yang memiliki nilai keanggotaan pada daerah *fuzzy* sebagai solusi tegas, dan didefinisikan sebagai

$$x_p = \int_a^p \mu(x)dx = \int_p^b \mu(x)dx \quad (2.33)$$

Dengan $a = \min (x : x \in X)$ dan $b = \max (x : x \in X)$ sedangkan $p = x$ yang membagi daerah inferensi menjadi dua bagian yang sama besar.

- c. Metode *Mean of Maximum* (MOM)

Solusi tegas diperoleh dengan cara mengambil nilai rata-rata domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

- d. Metode *Largest of Maximum* (LOM)

Solusi tegas diperoleh dengan cara mengambil nilai terbesar dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

- e. Metode *Smallest of Maximum* (SOM)

Solusi tegas diperoleh dengan cara mengambil nilai terkecil dari domain yang memiliki nilai keanggotaan maksimum.

2.7.4 *Fuzzy Logic Control Tipe-2*

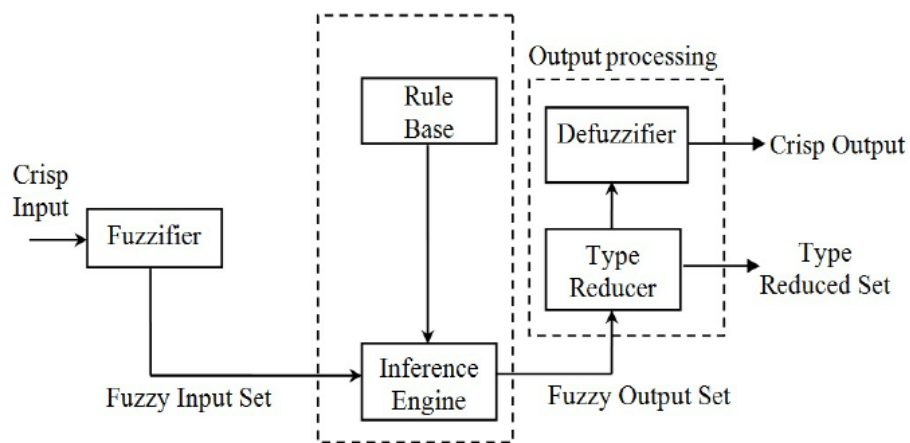
Sistem logika fuzzy tipe-1 adalah tipe yang banyak digunakan. Akan tetapi, T1FLS hanya bisa menangani tingkat ketidakpastian yang terbatas, sedangkan di dalam pengaplikasian sering dihadapkan pada banyak sumber dengan tingkat ketidakpastian yang tinggi. Hal tersebut merupakan masalah utama sehingga T1FLS tidak dapat sepenuhnya menangani atau mengakomodasi ketidakpastian linguistik dan numerik yang terkait dengan perubahan dan lingkungan yang tidak terstruktur.

Namun, hal tersebut menjadi dasar terciptanya interval sistem logika fuzzy tipe-2 (IT2FLS). Akhir-akhir ini, IT2FLS telah menarik perhatian para peneliti dan sangat berguna ketika mengalami hambatan dalam menentukan fungsi keanggotaan yang tepat, atau dalam memodelkan beragam pendapat dari individu yang berbeda. Karena memiliki formasi yang lebih kompleks, IT2FLS dianggap berpotensi lebih baik untuk memodelkan suatu ketidakpastian (T.Allawi & Y. Abdalla, 2014).

Sistem Logika Fuzzy Interval Tipe-2 (IT2FLS) terdiri dari empat proses utama yakni fuzzifikasi, pengambilan keputusan (*inferensi*), reduksi tipe, dan defuzzifikasi. Struktur tersebut hampir sama dengan sturuktur T1FLS. Yang menjadi perbedaan adalah setelah mendapatkan hasil dari keluaran inferensi, dilanjutkan dengan mereduksi untuk mengubah himpunan dari IT2FLS menjadi himpunan T1FLS. Sehingga, T1FLS terdefuzzifikasi menjadi nilai tegas pada keluaran IT2FLS(Hassani & Zarei, 2015). Nilai ketidakpastian pada IT2FLS tidak hanya mendapatkan sebuah nilai tegas sebagai titik akhir dari fungsi keanggotaan, tetapi juga mendapatkan nilai lainnya yang memungkinkan untuk mewakili nilai linguistic IT2FLS dilambangkan sebagai \tilde{A} , sedangkan derajat keanggotaan x dalam \tilde{A} , dilambangkan sebagai $\mu_{\tilde{A}}(x)$. Dan dapat disimpulkan sebagai:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int f_x(u)/(u), u \in j \subseteq [0,1] \quad (2.34)$$

Dimana (x) adalah variabel primer dengan domain Z , $\mu_{\tilde{A}}(x)$ adalah nilai keanggotaan dari x , lalu $f_x(u)$ merupakan variabel sekunder dari masing-masing berat u . u adalah variabel sekunder, di mana variabel J_x onpada masing-masing $x \in X$, J_x merupakan variabel primer pada x .



Gambar 2.19 Blok diagram sistem logika fuzzy tipe-2

Fuzzifikasi merupakan proses memetakan besaran tegas menjadi nilai keanggotaan pada himpunan IT2FLS yang menghasilkan batas-batas dari LMF dan UMF. UMF and LMF merupakan himpunan fuzzy yang berada tepat pada nilai-nilai tertinggi dan terendah dari FOU (*Footprint of Uncertainties*).

Interferensi. Pada proses ini sama dengan proses inferensi pada T1FLS, di mana nilai *antecedent* yang didapatkan dari proses sebelumnya digunakan untuk pengambilan keputusan. Perbedaannya, tingkat keanggotaan pada UMF dan LMF memiliki dua nilai yang dihasilkan. Hubungan *input* atau *output* dengan himpunan T1FLS yang mengaktifkan satu aturan pada inferensi dan keluaran pada inferensi tersebut.

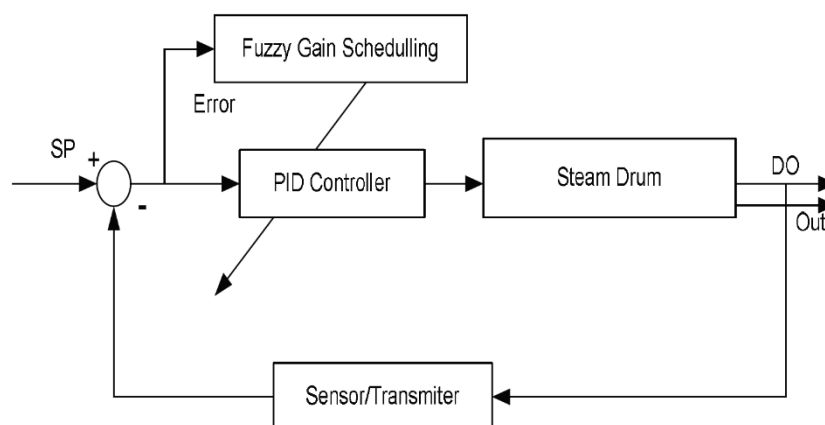
Reduksi Tipe. Proses ini merupakan proses yang khusus dimiliki IT2FLS. Reduksi tipe ini diperkenalkan oleh Karnik and Mendel (Hassani & Zarei, 2015). Disebut sebagai reduksi karena pada proses ini membawa kita dari himpunan fuzzy keluaran tipe-2 yang dihasilkan oleh inferensi menjadi himpunan fuzzy tipe-1. Himpunan reduksi tipe kemudian didefuzzifikasikan untuk mendapatkan hasil berupa nilai crisp.

Defuzzifikasi. Dari tahapan reduksi, dari mendapatkan hasil keluaran himpunan reduksi yang dihasilkan oleh titik yang paling kiri y_l dan titik yang paling kanan y_r .

2.8 *Fuzzy Gain Scheduling*

Kontrol PID merupakan algoritma kontrol yang banyak digunakan di industri proses karena bentuknya yang sederhana dan mudah diimplementasikan. Pada kondisi operasi tertentu (seperti misalnya sering terjadi gangguan pada proses atau parameter proses yang berubah-ubah), parameter kontrol ini harus sering di-*tune* agar kinerjanya tetap baik. Salah satu teknik dalam sistem kontrol yang sering dilakukan untuk mengatasi permasalahan ini adalah dengan menggunakan metode *gain scheduling*, dimana parameter kontrol diubah secara otomatis jika terjadi perubahan kondisi operasi yang menyebabkan kinerja kontrol menurun.

Dalam rangka memberikan contoh penggunaan *fuzzy logic* di bidang kontrol proses, maka selanjutnya akan dibahas salah satu metode *PID gain scheduling* dengan menggunakan *fuzzy logic*. Metode ini dinamakan *fuzzy PID gain scheduling*. Pada aplikasi ini, *fuzzy* berfungsi menghitung parameter kontrol PID (K_p , T_i dan T_d), berdasarkan perubahan parameter luar misalnya error (Zhao, Tomizuka, & Isaka, 1993). Secara umum, diagram kontrol *fuzzy PID gain scheduling* dapat digambarkan seperti gambar 2.20 berikut.



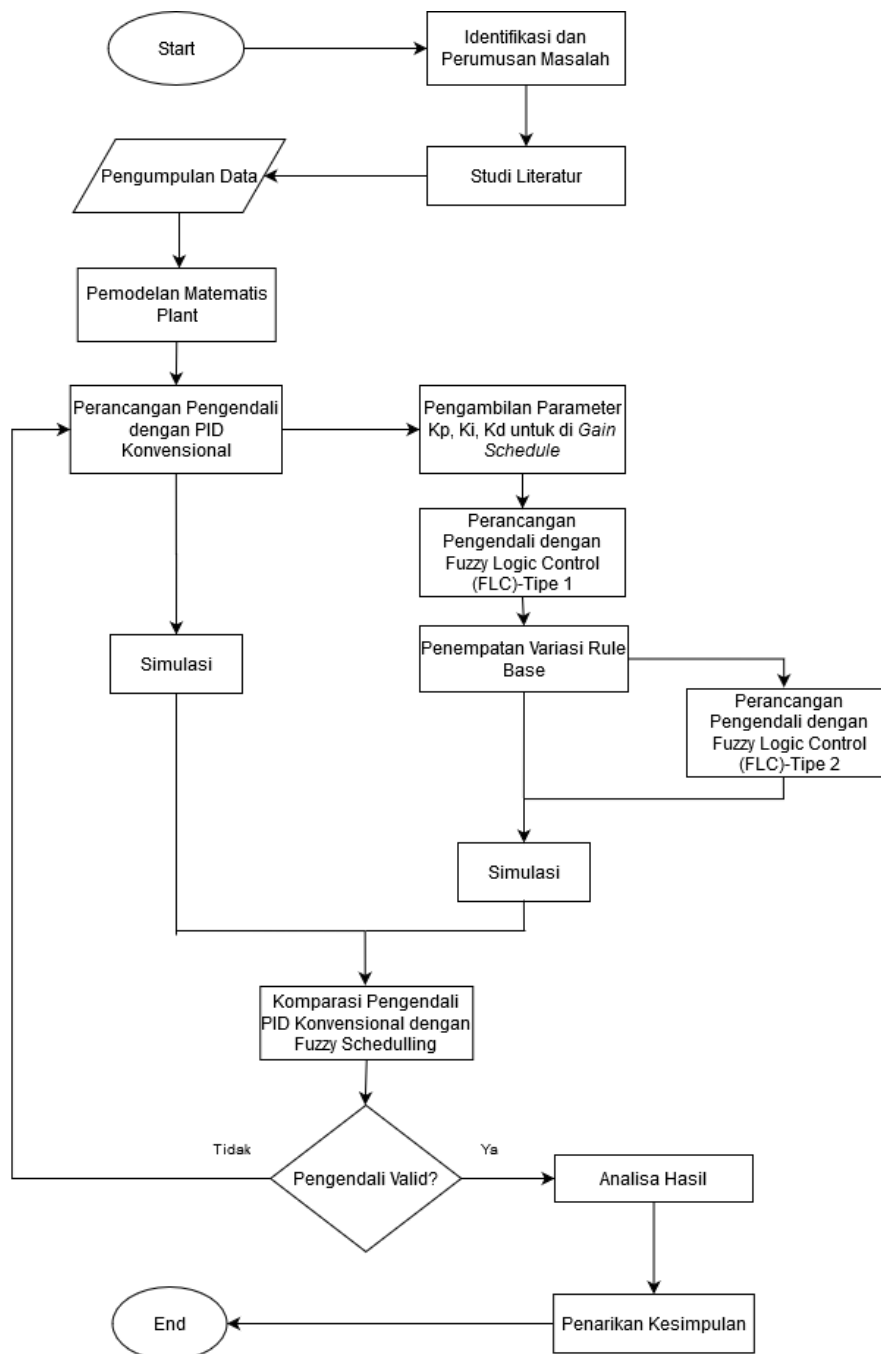
Gambar 2.20 *Fuzzy gain scheduling*

Pada gambar diatas menunjukkan bahwa *fuzzy logic* digunakan sebagai *gain schedule* untuk control PID berupa parameter kontrol yaitu K_p , K_i dan K_d . Parameter PID yang digunakan oleh modul kendali dijadwal berdasarkan titik kerja atau kondisi operasi yang dihadapi. *Gain scheduling* didasarkan pada pengukuran kondisi operasi dari proses untuk mengimbangi variasi-variasi perubahan parameter atau nonlinearitas dari proses. *Gain scheduling* merupakan cara yang ampuh untuk mereduksi pengaruh-pengaruh dari variasi parameter. *Gain scheduling* memungkinkan untuk mendapatkan variabel pembantu yang berkorelasi dengan perubahan dalam dinamika proses, yang kemudian mereduksi pengaruh-pengaruh dari variasi parameter dengan merubah parameter pengendali sebagai fungsi variabel pembantu (Abadi, 2015). *Gain schedule* ini mendapatkan *input* dari informasi ekstra dari luar. Informasi ekstra ini dapat berupa informasi perubahan pada *plant* atau informasi gangguan pada *plant* yang dapat merubah fungsi alih dari sistem. *Gain scheduling* mempunyai keuntungan lebih yaitu bahwa parameter pengendali dapat berubah dengan cepat dalam menanggapi perubahan proses.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir pada penelitian tugas akhir mengenai “**Perancangan Sistem Pengendalian pada Kolom Distilasi Metanol-Air Berbasis *Fuzzy Logic Control***” adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Pada tahap ini dilakukan analisis masalah yang sering dihadapi pada dunia industri khususnya objek pada kolom distilasi. Permasalahan pada kolom distilasi berupa sulitnya melakukan kontrol karena sistemnya yang nonlinier. Selain itu, kolom distilasi memiliki sifat nonlinieritas yang tinggi serta multivariabel sehingga sulit untuk dilakukan pengendalian. Pada industri kimia, kolom distilasi dipergunakan untuk memisahkan metanol dari campurannya untuk mendapatkan metanol dengan kemurnian tinggi. Sehingga, dilakukan penelitian pada tugas akhir ini untuk mengendalikan komposisi pada produk atas (*distillate*) dan produk bawah (*bottom product*) kolom distilasi untuk menjaga komposisi produk kolom distilasi metanol-air dengan menggunakan kontrol logika fuzzy sebagai *gain schedule* pengendali PID guna memperbaiki karakteristik respon sistem pengendali konvensional.

3.2 Studi Literatur

Tahap studi literatur pada tugas akhir ini dimaksud untuk membangun pemahaman awal sampai mendalam secara teoritis terhadap materi yang mendukung penelitian tugas akhir ini dengan mengumpulkan literatur dan referensi yang relevan mengenai kolom distilasi, model matematis kolom, *control MIMO*, pemahaman mengenai sistem *fuzzy logic control*, *gain schedule*. Hasil yang diperoleh dari studi literatur ini digunakan sebagai acuan dalam menentukan langkah-langkah dan kerangka berpikir dalam menyelesaikan permasalahan pada penelitian ini.

3.3 Pengumpulan Data

Pengambilan data dilakukan dengan mencari sumber data sekunder dari jurnal. Data yang akan diminta adalah kondisi saat *steady state* berupa *flow rate reflux*, *flow rate steam reboiler*, *bottom product composition*, *distillate composition* dan *feed flow rate* kolom distilasi.

Kolom distilasi yang ditinjau adalah kolom distilasi untuk digunakan memisahkan metanol dengan air. Beberapa data telah diambil dari jurnal yang dapat dilihat pada tabel berikut ini (Wood & Berry, 1973):

Tabel 3.1 Data *flow* dan komposisi saat keadaan beroperasi dan *steady*

<i>Stream</i>	<i>Mass Flow Rate</i> [lb/min]	<i>Composition</i> [wt.% methanol]
<i>Overhead</i>	1.18	96.0
<i>Reflux</i>	1.95	96.0
<i>Bottom</i>	1.27	0.5
<i>Feed</i>	2.45	46.5
<i>Steam</i>	1.71	-

Tabel 3.2 Data suhu saat keadaan beroperasi dan *steady*

<i>Stream</i>	Suhu [°F]
<i>Reflux</i>	151.7
<i>Feed</i>	168.0
<i>Steam</i>	233.0
<i>Condensate</i>	227.5
<i>Reboiler</i>	209.6
<i>Plate 1</i>	203.6
<i>Plate 2</i>	194.4
<i>Plate 3</i>	181.2
<i>Plate 4</i>	172.9
<i>Plate 5</i>	164.1
<i>Plate 6</i>	156.8
<i>Plate 7</i>	152.1
<i>Plate 8</i>	148.5
<i>Condenser</i>	143.9

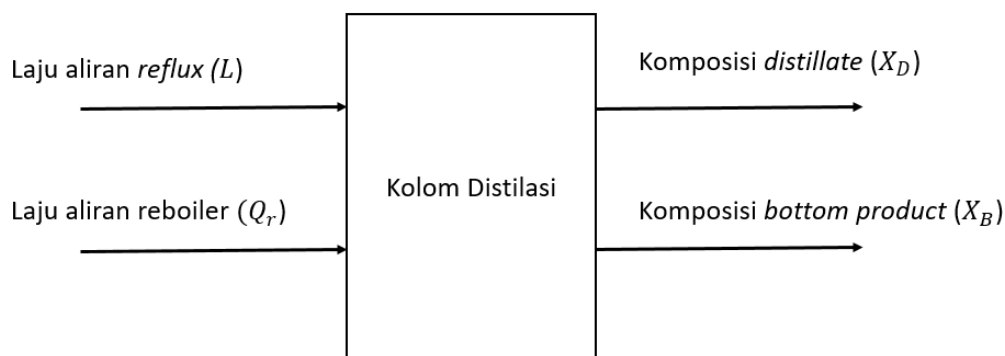
3.4 Pemodelan Matematis Plant

Pemodelan kolom distilasi dilakukan dengan menentukan persamaan fungsi transfer dalam bentuk FOPDT (*First Order Plus Dead Time*). Model FOPDT merupakan model fungsi alih orde satu yang disertai dengan waktu mati. Sistem orde satu akan mempunyai fungsi alih bervariasi s dengan pangkat tertinggi satu.

Adanya waktu mati akan membuat sistem menjadi tidak stabil. Model matematis proses FOPDT dapat direpresentasikan kedalam persamaan laplace seperti persamaan berikut

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta} \quad (3.1)$$

Dimana parameter τ adalah konstanta waktu proses, K adalah *gain* statis proses, dan θ adalah waktu mati proses. Berikut adalah ilustrasi *input-output plant* berdasarkan variabel yang dikendalikan dan variabel yang dimanipulasi:



Gambar 3.2 Ilustrasi pengendalian komposisi kolom distilasi

Pada konfigurasi L-V kolom distilasi biner, aliran *reflux* L digunakan untuk mengatur komposisi distilat X_D dan *heat input* Q_r ke dalam reboiler digunakan untuk mengatur komposisi vapor yang menguap pada *bottom* V dan X_B . *Distillate flow rate* D dipakai untuk mempertahankan *reflux drum level* dan *bottom flow rate* B untuk mengatur level pada kolom (R. Biyanto, 2015).

3.4.1 Fungsi Transfer Model MIMO

Hubungan *input-output* loop terbuka dapat ditulis dalam bentuk matriks:

$$\begin{bmatrix} X_D \\ X_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ Q_r \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Proses kolom distilasi yang diidentifikasi adalah kolom distilasi metanol-air yang memiliki diameter 9 inch dan 8 *tray* (Wood and Berry) dimana variabel yang dikontrol adalah komposisi produk distilat (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) dengan memanipulasi laju aliran *reflux* (L) dan laju aliran *steam reboiler* (Q_r).

Berdasarkan model proses kolom distilasi penelitian Wood dan Berry (Wood & Berry, 1973), fungsi transfer proses dalam bentuk FOPDT ialah :

$$G_{11} \rightarrow \frac{X_D}{L} = \frac{12,8 \exp(-1s)}{16,7s+1} \quad (3.3)$$

$$G_{12} \rightarrow \frac{X_D}{Q_r} = \frac{-18,9 \exp(-3s)}{21s+1} \quad (3.4)$$

$$G_{21} \rightarrow \frac{X_B}{L} = \frac{6,6 \exp(-7s)}{10,9s+1} \quad (3.5)$$

$$G_{22} \rightarrow \frac{X_B}{Q_r} = \frac{-19,4 \exp(-3s)}{14,4s+1} \quad (3.6)$$

Sehingga model pasangan kontrol LV pada kolom distilasi adalah dengan fungsi transfer sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} X_D \\ X_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12,8e^{-s}}{16,7s+1} & \frac{-18,9e^{-3s}}{21s+1} \\ \frac{6,6e^{-7s}}{10,9+1} & \frac{-19,4e^{-3s}}{14,4s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ Q_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Sedangkan fungsi alih gangguan dalam bentuk FOPDT ditunjukkan oleh persamaan (Wara & Setiyono, 2017)

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3,8e^{-8,1s}}{14,9s+1} & \frac{0,22e^{-7,7s}}{14s+1} \\ \frac{4,9e^{-3,4s}}{13,2s+1} & \frac{14e^{-9,2s}}{12,1s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ X_F \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Interaksi proses dapat menyebabkan interaksi yang tidak diinginkan antara dua atau lebih *loop* kontrol. Interaksi kontrol *loop* disebabkan oleh adanya *loop* umpan balik ketiga. Untuk merancang pengendali terdesentralisasi, pasangan yang cocok antara *input* yang dimanipulasi dan *output* terkontrol dipilih menggunakan analisis *Relative Gain Array* (RGA) untuk melemahkan interaksi.

3.4.2 Relative Gain Array

RGA adalah pendekatan yang paling sering digunakan untuk menentukan pasangan konfigurasi kontrol *multiloop* SISO pada sistem MIMO. RGA untuk sistem FOPDT dapat dihitung dengan menggunakan *gain steady state* proses. Dengan demikian *gain steady state* proses MIMO 2x2 dapat dituliskan pada persamaan

$$RGA = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Relative gain (λ) dari proses G_{11} dapat dihitung dengan persamaan

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \left[\frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}} \right]} \quad (3.10)$$

$$\lambda_{12} = 1 - \lambda_{11} = \lambda_{21} \quad (3.11)$$

Jika λ mendekati 1 maka variabel *input* atau kontroler memberikan efek yang besar kepada sistem, sebaliknya jika λ mendekati 0 maka kontroler memberikan efek yang sangat kecil terhadap sistem. Dengan memasukkan nilai K pada masing-masing *relative gain*, sehingga didapatkan:

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1 - \left[\frac{-18.9 \times 6.6}{12.8 \times (-19.4)} \right]}$$

$$\lambda_{11} = \lambda_{22} = 2.0093$$

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = 1 - 2.0093 = -1.0093$$

Matriks RGA akan menjadi:

$$RGA = \begin{bmatrix} 2.0093 & -1.0093 \\ -1.0093 & 2.0093 \end{bmatrix}$$

Hasil nilai *relative gain* (λ) yang diperoleh dipilih nilai *gain* yang paling mendekati nilai 1 (Dale E Seborg, 2011), *relative gain* (λ) yang diperoleh ($\lambda = 2,0093$) dan memiliki nilai yang lebih besar dari 0,5 ($\lambda \geq 0,5$). Sesuai dengan teori pada subbab 2.3.2 berarti variabel yang dimanipulasi memberikan pengaruh yang besar terhadap variabel yang dikontrol, sehingga struktur kendali yang dipilih pada kolom distilasi biner pemisahan metanol-air Wood & Berry adalah struktur pengendali 1-1/2-2 sistem MIMO 2x2 terdesentralisasi yang berarti pada struktur ini Y_1 (komposisi *distillate*) dikendalikan oleh U_1 (laju aliran *reflux*) sedangkan Y_2 (komposisi *bottom product*) dikendalikan oleh U_2 (laju aliran uap *reboiler*).

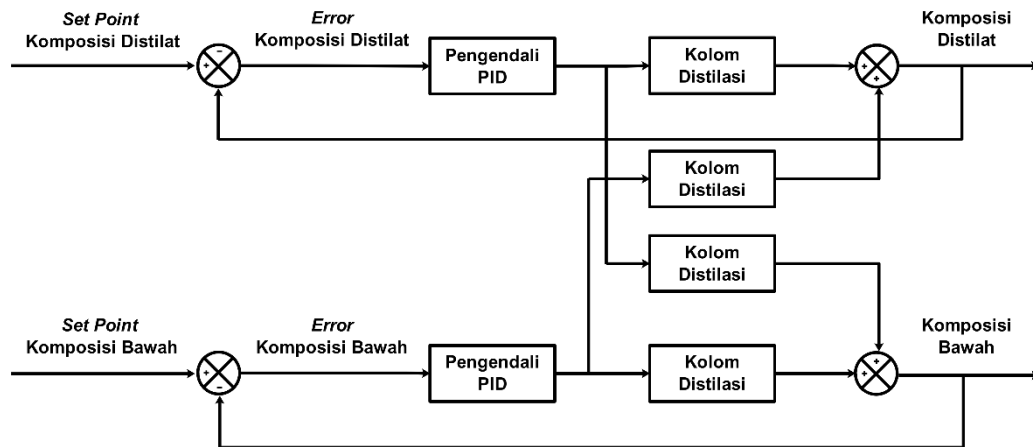
3.5 Perancangan Pengendali

Pengendali dirancang dengan menggunakan dua metode yaitu PID konvensional dan *Fuzzy Logic Control* (FLC) sebagai *gain schedule* dari pengendali konvensional PID yang dilakukan terhadap 2 tipe fuzzy yaitu fuzzy tipe-1 dan fuzzy tipe-2. Pengendali PID konvensional dilakukan untuk mencari karakteristik respon terbaik antara pengendali P, PI dan PID melalui *autotune* parameter. Di sisi lain, perancangan pengendali fuzzy tipe-1 dilakukan sebagai *gain*

schedule untuk pengendali konvensional PID dengan berbagai variasi mode inferensi dan jumlah fungsi keanggotaan yang akan dicari parameter terbaiknya melalui respon yang dihasilkan. Parameter terbaik dari pengendali fuzzy tipe-1 *gain schedule* akan digunakan sebagai acuan parameter untuk merancang fuzzy tipe-2. Ketiga pengendali akan dibandingkan karakteristik responnya dengan menganalisis *timedomain* dan *performance index* pada masing-masing pengendalinya.

3.5.1 Perancangan Pengendali PID

Perancangan pengendali yang pertama yaitu konvensional PID dilakukan dengan menggunakan Simulink pada *software* Matlab. Konfigurasi dari sistem pengendalian komposisi pada kolom distilasi methanol-air di dasarnya pada perhitungan RGA pada subbab 3.4.2 untuk menentukan pasangan konfigurasi kontrol *multiloop* SISO pada sistem MIMO, didapatkan bahwa konfigurasi yang tepat untuk mengurangi interaksi antar variabel pada *plant* adalah struktur pengendali 1-1/2-2 sistem MIMO 2x2 terdesentralisasi. Sehingga pengendali PID dirancang dengan diagram blok yang dapat ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini.



Gambar 3.3 Diagram blok sistem pengendali PID (Ramli & Basaar, 2016)

Besarnya fungsi transfer pada masing – masing blok diagram di atas adalah bentuk persamaan yang ditunjukkan pada Persamaan 3.3 sd 3.6. Terdapat 4 pasang fungsi transfer yang terbentuk yang berasal dari masing-masing pengaruh *process variable* (PV) terhadap *manipulated variabel* (MV). Penentuan gain pengendali P, PI dan PID diperoleh berdasarkan *autotuning* Simulink.

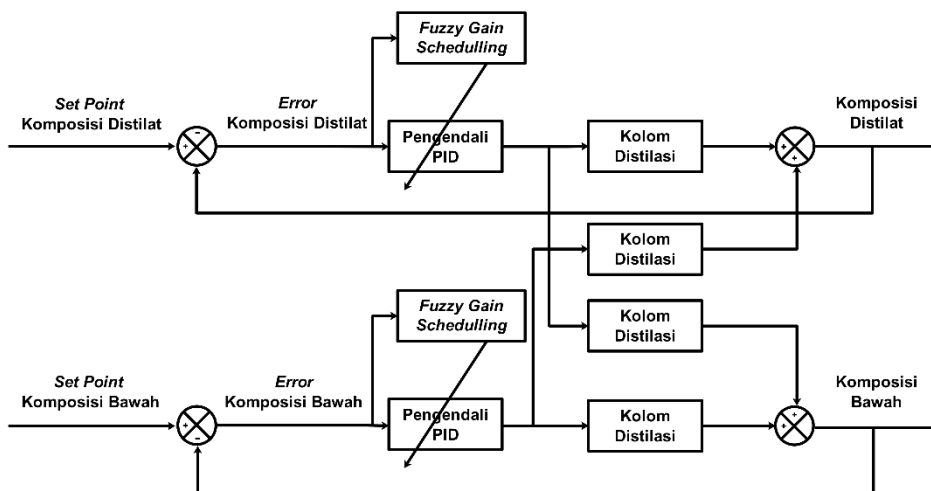
Tabel 3.3 Parameter *autotune* pada pengendali *distillate* dan *bottom product*

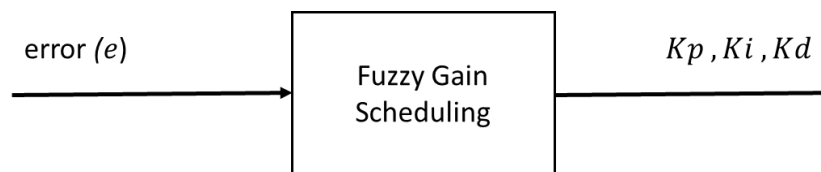
	<i>Distillate Controller</i>			<i>Bottom Product Controller</i>		
	P	PI	PID	P	PI	PID
Proportional	0.5463	0.1885	0.21	-0.1768	-0.05838	-0.0859
Integral	-	0.071	0.3194	-	-0.01547	-0.0154
Derivative	-	-	0	-	-	0.1909
Filter Coefficient	-	-	100	-	-	0.14482

Nilai parameter K_p , K_i dan K_d dilakukan melalui siklus *tuning* dengan cara memberikan sebuah pengendali PID pada *control loop* atas serta tidak memberikan kontroler pada *control loop* bawah, dan sebaliknya hingga didapatkan respon dinamik dengan grafik yang sesuai dan mendekati *set point*.

3.5.2 Perancangan Pengendali Fuzzy Tipe-1 Gain Scheduling

Perancangan sistem pengendalian yang kedua dengan menggunakan sistem logika fuzzy tipe 1 *gain scheduling*. Pengendali *fuzzy logic* dirancang menggunakan software Matlab dengan *toolbox* fuzzy dengan 1 *input* dan 1 *output*. Parameter *input* berupa *error* (e) untuk menghasilkan *output* berupa nilai K_p , K_i dan K_d . *Error* yang dimaksud berupa selisih antara *process variable* yaitu komposisi dengan *set point*nya, sedangkan *output* yang dimaksud berupa sinyal kontrol K_p , K_i atau K_d untuk mengendalikan laju aliran. Blok diagram sistem pengendalian menggunakan pengendali *fuzzy gain schedule* disajikan pada gambar 3.4, sedangkan ilustrasi *input-output* fuzzy pada gambar 3.5 berikut:

**Gambar 3.4** Diagram blok *fuzzy gain scheduling-PID*



Gambar 3.5 Ilustrasi *input-output* pengendali fuzzy

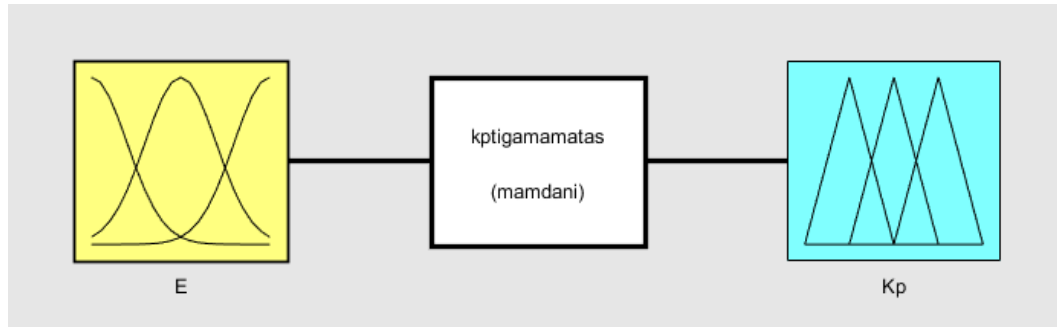
Pengendalian FLC yang disimulasikan dilakukan variasi dengan menggunakan dua metode inferensi yaitu Mamdani dan Sugeno. Selain itu variasi dilakukan pula untuk variabel linguistik yang berjumlah 3, 5 dan 7 untuk mengetahui pengaruh perbedaan jumlah *rule base* terhadap respon yang dihasilkan. Pada dasarnya tidak ada aturan resmi dan pasti dalam menentukan *rule base*, biasanya hanya berdasarkan pengalaman dari operator manusia yang telah mampu mengendalikan sistem tersebut (*human expert*). Sehingga hubungan antara *input* dan *output* pada *rule base* yang dirancang mengacu pada jurnal yang pernah melakukan penelitian sebelumnya.

Perancangan kontrol fuzzy dilakukan melalui beberapa tahapan yaitu perancangan arsitektur dan fungsi keanggotaan fuzzy serta penentuan *rule base* untuk menentukan hubungan antar *input* dan *ouput*. Fungsi keanggotaan yang digunakan berbentuk segitiga baik *input* maupun *output*.

Pada perancangan arsitektur fuzzy digunakan 1 *input* pada sistem kendali pada tersebut berupa *error* komposisi. Rentang himpunan fuzzy untuk *error* yang digunakan adalah nilai -1 sd 1 karena *error* komposisi pada suatu produk berada pada rentang tersebut, hal ini didasarkan pada persamaan $error = SP - PV$, jika ditentukan sebuah *set point* dengan nilai 0, dengan nilai PV maksimal yang memungkinkan sebesar 1 maka akan menghasilkan *error* senilai -1, sama halnya dengan jika *set point* ditentukan sebesar 1, dengan nilai PV minimal yang memungkinkan sebesar 0 maka akan menghasilkan *error* dengan nilai 1. Sehingga rentang *error* yang dipilih yaitu -1 hingga 1.

Sedangkan pada rentang *output* fuzzy, pada metode inferensi Mamdani hal tersebut bergantung pada pengambilan nilai Kp Ki Kd saat merancang pengendali konvensional PID. Nilai Kp Ki Kd akan menjadi nilai tengah diantara jangkauan nilai Kp Ki Kd yang mungkin terjadi, lebih lanjut akan disampaikan pada bagian perancangan fungsi keanggotaan. Sedangkan pada mode inferensi Sugeno

dikarenakan fungsi keanggotaan dari konsekuen berupa *singleton* sehingga memiliki rentang 0-1. Berikut adalah tampilan *set up* dari *toolbox* fuzzy pada matlab:



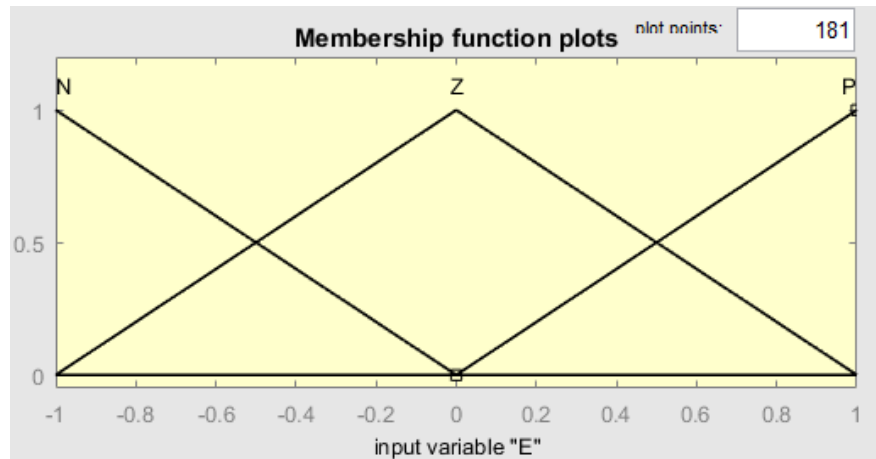
Gambar 3.6 *Set up fuzzy logic control*

Pada blok proses terdapat algoritma logika fuzzy yang bertindak sebagai pengambil keputusan. Perubahan *error* dari komposisi akan berpengaruh terhadap *output* dalam bentuk parameter sistem pengendalian (K_p , K_i , K_d). Variabel linguistik akan dibagi menjadi 3 variasi yaitu 3 variabel, 5 variabel dan 7 variabel baik pada kedua mode inferensi untuk dilihat pengaruh jumlah *rule* terhadap respon pengendali. Secara umum, penentuan variasi dari perancangan pengendali fuzzy ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 3.4 Variasi untuk pengendali fuzzy

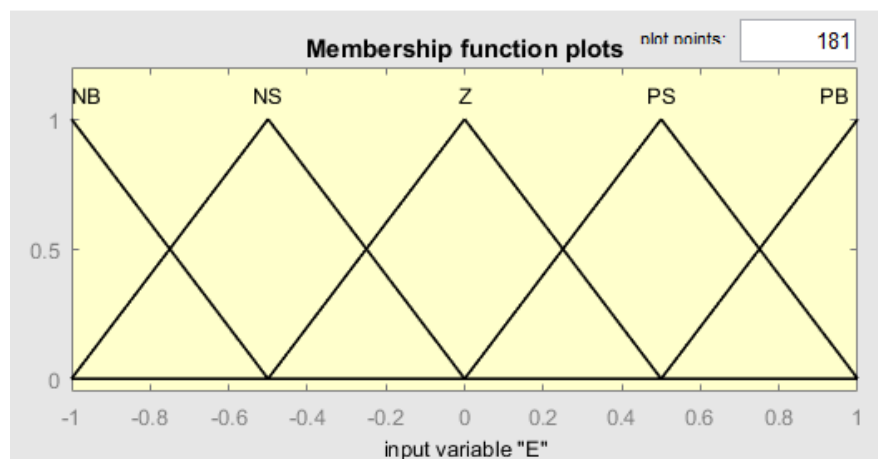
Mode Inferensi	Skenario 1			Skenario 2	Skenario 3
	Fuzzy 1-Mamdani			Fuzzy 1-Sugeno	Fuzzy 2
Jumlah variabel linguistik					
% <i>input</i> (e)	3	5	7	3	3
% <i>output</i> (K_p)	3	3	3	3	3
% <i>output</i> (K_i)					
Jumlah <i>rule</i>	3	5	7	3	3
Bentuk fungsi keanggotaan					
% <i>input</i> (e)	Segitiga			-	-
% <i>output</i> (K_p)	Segitiga			-	-
% <i>output</i> (K_i)					
Interval keanggotaan					
% <i>input</i> (e)	-1 sd 1			-1 sd 1	-1 sd 1
% <i>output</i> (K_p)	0.1 sd 0.5 (X_D) -0.15 sd -0.05 (X_B)			0 sd 1	0 sd 1
% <i>output</i> (K_i)	0 sd 0.1 (X_D) -0.02 sd 0 (X_B)			0 sd 1	0 sd 1

Pada himpunan fuzzy yang berjumlah tiga, variabel linguistik *input* berupa *Negative (N)*, *Zero (Z)* dan *Positive (P)*. Jumlah variabel linguistik akan divariasikan berdasarkan tabel 3.4. Pada gambar berikut menunjukkan himpunan *error (e)* dengan 3 buah keanggotaan yaitu *negative, zero* dan *positive*.



Gambar 3.7 Fungsi keanggotaan *input error (e)* dengan 3 variabel

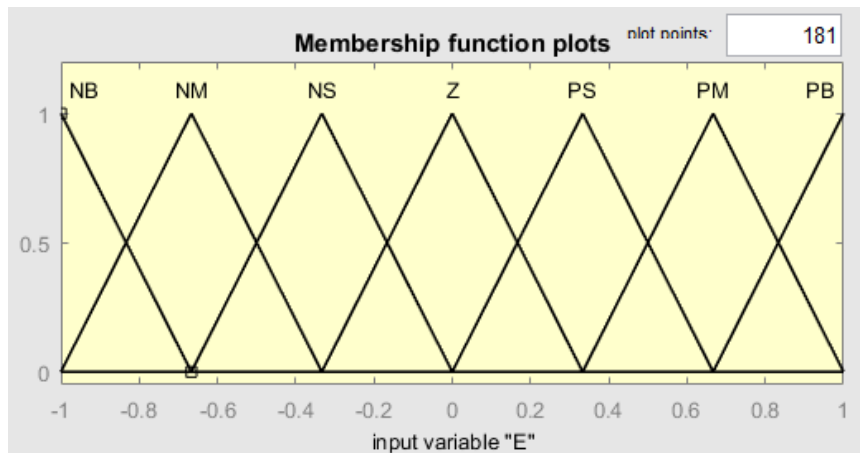
Pada himpunan fuzzy yang berjumlah lima, variabel linguistik berupa *Negative Big (NB)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (Z)*, *Positive Small (PS)* dan *Positive Big (PB)*. Hal tersebut berlaku untuk fungsi keanggotaan *input* dan juga *output*. Pada gambar berikut menunjukkan himpunan *error (e)* dengan 5 buah himpunan fuzzy.



Gambar 3.8 Fungsi keanggotaan *input error (e)* dengan 5 variabel

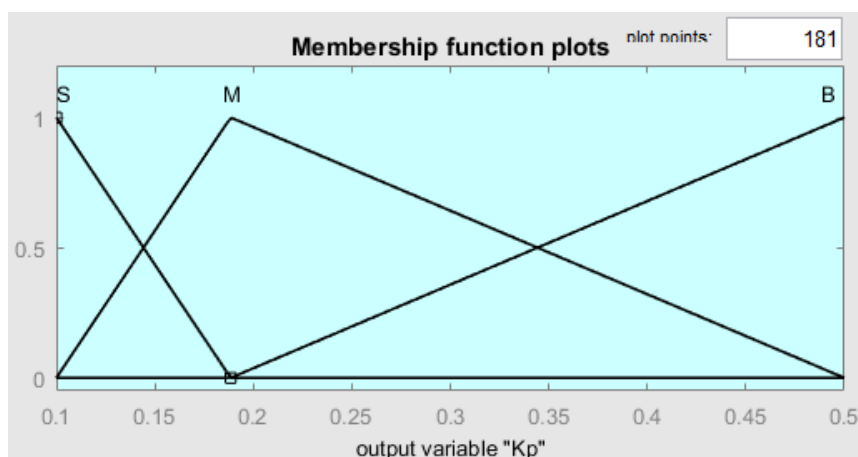
Sedangkan pada himpunan fuzzy yang berjumlah tujuh, variabel linguistik berupa *Negative Big (NB)*, *Negative Medium (NM)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (Z)*, *Positive Small (PS)*, *Positive Medium (PM)* dan *Positive Big (PB)*. Hal tersebut

berlaku untuk fungsi keanggotaan *input* dan juga *output*. Pada gambar berikut menunjukkan himpunan *error* (E) dengan 7 buah himpunan fuzzy

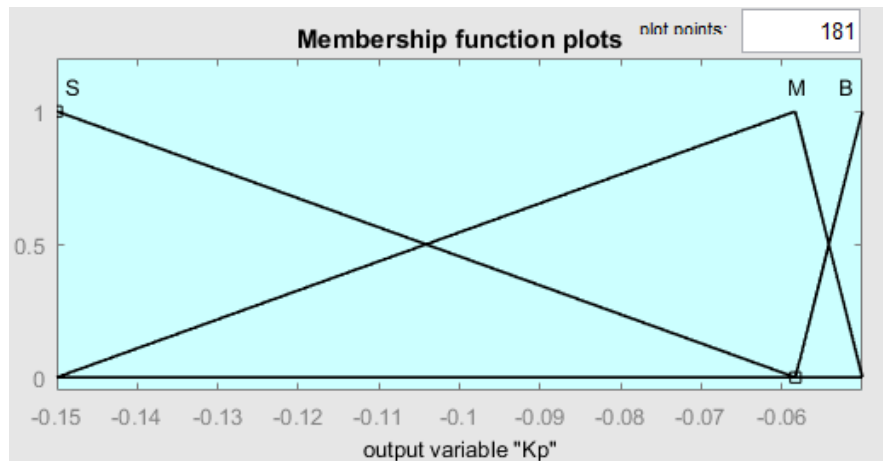


Gambar 3.9 Fungsi keanggotaan *input error* (e) dengan 7 variabel

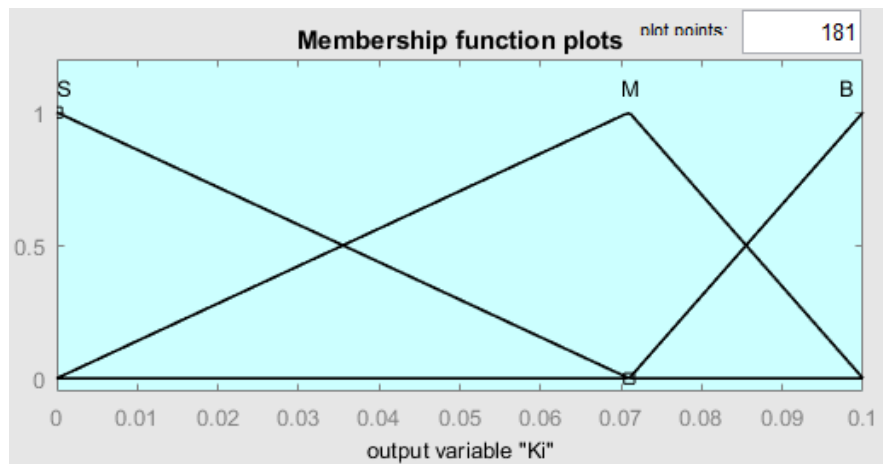
Sedangkan untuk keanggotaan *output* jumlah variabel linguistik ditetapkan sebanyak tiga berupa *Small* (S), *Medium* (M), *Big* (B) dan hal tersebut berlaku untuk semua fungsi keanggotaan *input* yang divariasikan. Terdapat perbedaan *output* parameter sistem pengendalian (K_p , K_i , K_d) pada metode sugeno, fungsi keanggotaan dari *rule* konsekuen yang dibuat bukan berbentuk segitiga melainkan berbentuk *singleton* sehingga tidak perlu membuat bentuk fungsi keanggotaan. Berikut adalah menunjukkan himpunan *output* (berupa K_p dan K_i) untuk masing masing pengendali atas dan pengendali bawah



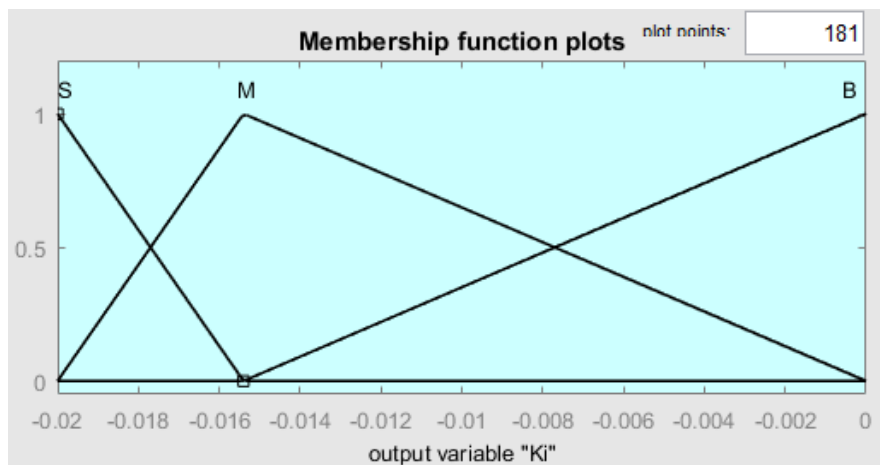
Gambar 3.10 Fungsi keanggotaan *ouput* (K_p) untuk pengendali *distillate*



Gambar 3.11 Fungsi keanggotaan *output* (K_p) untuk pengendali *bottom product*



Gambar 3.12 Fungsi keanggotaan *ouput* (K_i) untuk pengendali *distillate*



Gambar 3.13 Fungsi keanggotaan *ouput* (K_i) untuk pengendali *bottom product*

Setelah merancang fungsi keanggotaan pada masing-masing metode fuzzy, langkah selanjutnya yaitu membuat *rule* atau aturan logika fuzzy untuk kendali komposisi. Aturan logika fuzzy ini menghubungkan masukan dengan keluaran yang didapatkan pada berbagai penelitian terdahulu pada kolom distilasi yang lain. Dalam perancangan simulasi ini dibuat beberapa aturan untuk proses pengendalian diantaranya dengan basis aturan tersebut sebagai berikut:

Tabel 3.5 *Rule Base Matrix 3x3*

IF	N	Z	P
THEN	S	M	B

Tabel 3.6 *Rule Base Matrix 5x5*

IF	NB	NS	Z	PS	PB
THEN	S	S	M	B	B

Tabel 3.7 *Rule Base Matrix 7x7*

IF	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
THEN	S	S	S	M	B	B	B

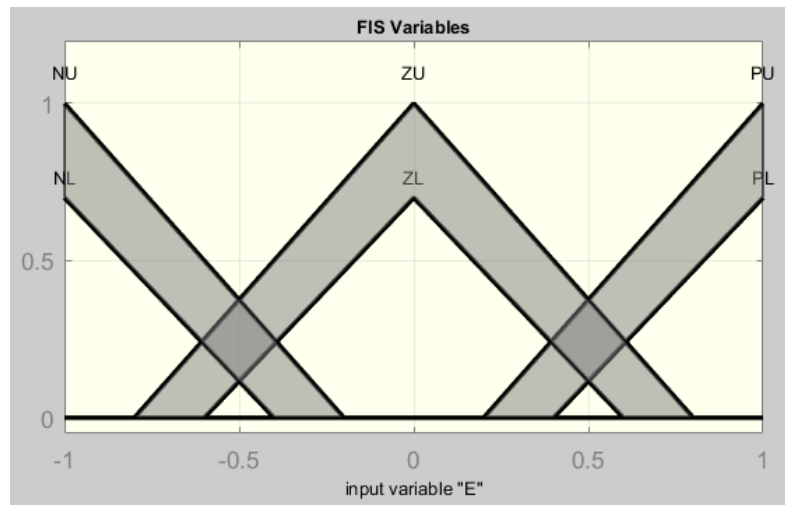
3.5.3 Perancangan Pengendali Fuzzy Tipe-2 Gain Scheduling

Perancangan sistem pengendali yang ketiga dengan menggunakan fuzzy tipe-2. Parameter pada fuzzy tipe-2 didapatkan berdasarkan nilai parameter fuzzy tipe 1 yang menghasilkan performansi terbaik yaitu dengan menggunakan metode inferensi mamdani yang memiliki 3 himpunan fuzzy seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.4.

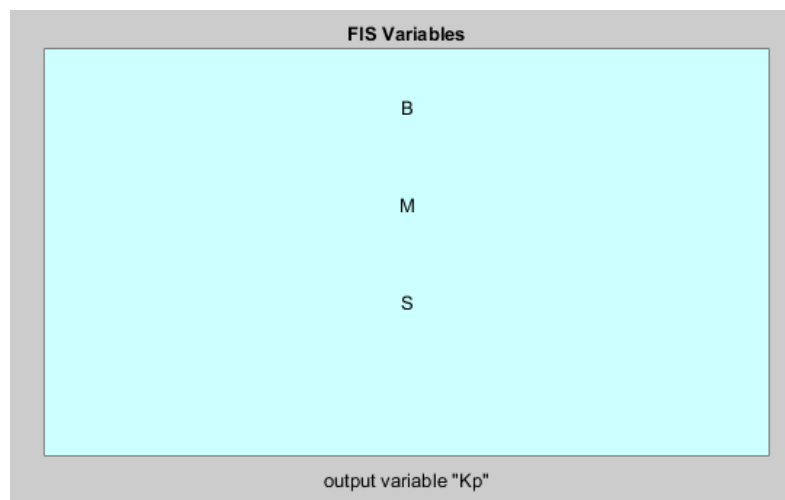
Pada FLC tipe-2 memiliki struktur yang hampir sama dengan struktur FLC tipe-1. Yang menjadi perbedaan adalah setelah mendapatkan hasil dari keluaran inferensi, dilanjutkan dengan mereduksi untuk mengubah himpunan dari FLC tipe-2 menjadi himpunan FLC tipe-1. Sehingga, FLC tipe-1 terdefuzzifikasi menjadi nilai tegas pada keluaran FLC tipe-2.

Parameter *Footprint of Uncertainties (FOU)* dilakukan dengan *autofill* pada *toolbox* fuzzy-2 sehingga tidak dihitung secara matematis. Berikut merupakan

himpunan fuzzy pada fuzzy tipe-2 dengan jumlah variabel linguistik 3 buah yaitu *Negative (N)*, *Zero (Z)* dan *Positive (P)*



Gambar 3.14 Fungsi keanggotaan *input* pada fuzzy tipe-2



Gambar 3.15 Fungsi keanggotaan *output* pada fuzzy tipe-2

Fungsi keanggotaan dan *rule base* yang digunakan pada perancangan fuzzy tipe-2 didasarkan pada bentuk dan pola fuzzy-1 dengan performansi yang paling baik.

3.6 Simulasi dan Komparasi Sistem Pengendali

Simulasi dilakukan dengan menggunakan simulink pada software Matlab 2016b. Simulasi yang dilakukan berupa pengendali PID dengan menggunakan blok-blok pada Simulink yang merepresentasikan diagram blok pengendali PID. Setelah *set up* keseluruhan dirancang, *autotune* parameter Kp, Ki, Kd dilakukan

secara satu-per satu pada masing-masing pengendali atas dan bawah sehingga akan mendapatkan grafik respon dari pengendali PID. Setelah itu, perancangan pengendali fuzzy tipe-1 dan tipe-2 dilakukan dengan memasukkan parameter *input* dan *output* pada *fuzzy logic toolbox* kedalam simulink yang nantinya juga dilihat grafik respon yang dihasilkan. Nilai performansi terbaik dari berbagai variasi yang dilakukan pada perancangan fuzzy-1 *gain schedule* akan menjadi parameter untuk mendesain pengendali fuzzy-2 *gain schedule*. Hasil simulasi akan berupa grafik waktu terhadap *output* dimana pada grafik didapatkan informasi berupa time domain seperti *rise time*, *settling time*, *maximum overshoot* dan *error steady state*. Lalu dibandingkan antara ketiga pengendali dirancang manakah yang memiliki karakteristik respon terbaik untuk dapat mengendalikan komposisi kolom distilasi metanol-air.

3.7 Validasi Pengendali

Validasi hasil perancangan pengendali dilakukan pada pengendali yang memiliki karakteristik respon terbaik. Validasi tersebut dilakukan dengan menguji kestabilan pengendali fuzzy terhadap sebuah gangguan serta perubahan *set point*. Variabel gangguan yang mempengaruhi proses adalah laju aliran umpan (F) dan konsentrasi umpan (X_F), namun pada simulasi uji gangguan dilakukan dengan memberikan sinyal step pada keluaran plant pada detik tertentu dan akan dilihat apakah respon akan kembali kepada kestabilan setelah diberi gangguan. Sedangkan pada uji *set point tracking* dilakukan dengan mengubah *set point* pada detik tertentu apakah *process variabel* akan mengikuti *set point* yang diubah. Pengendali yang baik akan menghasilkan respon yang sesuai dan bersifat adaptif dengan *set point* walaupun nilai *set point* diubah-ubah serta kestabilan tidak terpengaruh terhadap gangguan yang diberikan. Hasil respon yang dihasilkan oleh pengendali akan dilihat apakah hasil performansi memenuhi kriteria dan standar karakteristik respon sistem pengendali seperti *error steady state* yang ditetapkan dibawah 2%.

3.8 Analisa Hasil

Dari diagram alir pengendali komposisi kolom distilasi yang dinamik tersebut, akan diidentifikasi selanjutnya melalui karakteristik responnya pada

persamaan yang telah dituliskan pada subbab 2.6. Analisis dilakukan dengan membandingkan karakteristik respon yang dihasilkan oleh PID konvensional dengan FLC. Data dihasilkan berupa performansi sistem meliputi karakteristik dinamik sistem seperti *time domain specification* meliputi *maximum overshoot*, *rise time*, *error steady state* serta *performance indices* seperti *Integral Absolute Error* (IAE). Sehingga dapat diketahui metode kontrol yang memberikan respon terbaik dari kedua metode tersebut.

3.9 Penarikan Kesimpulan

Kesimpulan dapat ditarik setelah membahas data yang diperoleh. Kesimpulan didapat berdasarkan tujuan yang dirancang yaitu perbandingan hasil respon dari perancangan pengendali PID, fuzzy tipe-1 *gain schedule* dan fuzzy tipe-2 *gain schedule*.

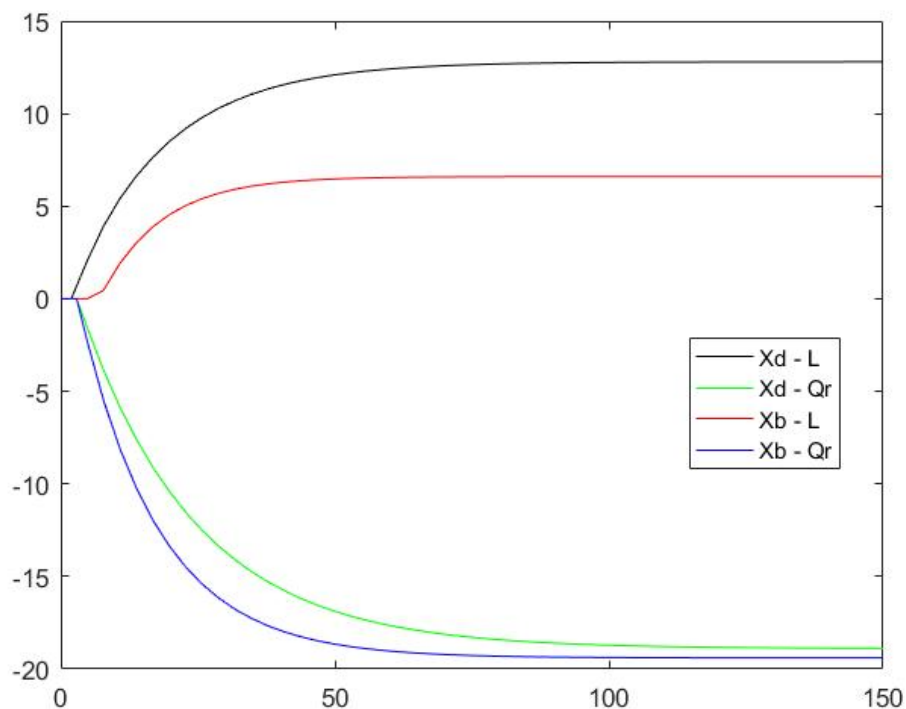
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Uji Model *Open Loop Plant*

Setelah didapatkan model plant, selanjutnya untuk validasi model disimulasikan dengan menggunakan bantuan software Matlab R2016b dengan data hasil pengukuran yang telah didapatkan. Uji validasi dilakukan menggunakan uji *loop* terbuka dan didapatkan hasil respon seperti pada gambar berikut



Gambar 4.1 Respon *open loop plant*

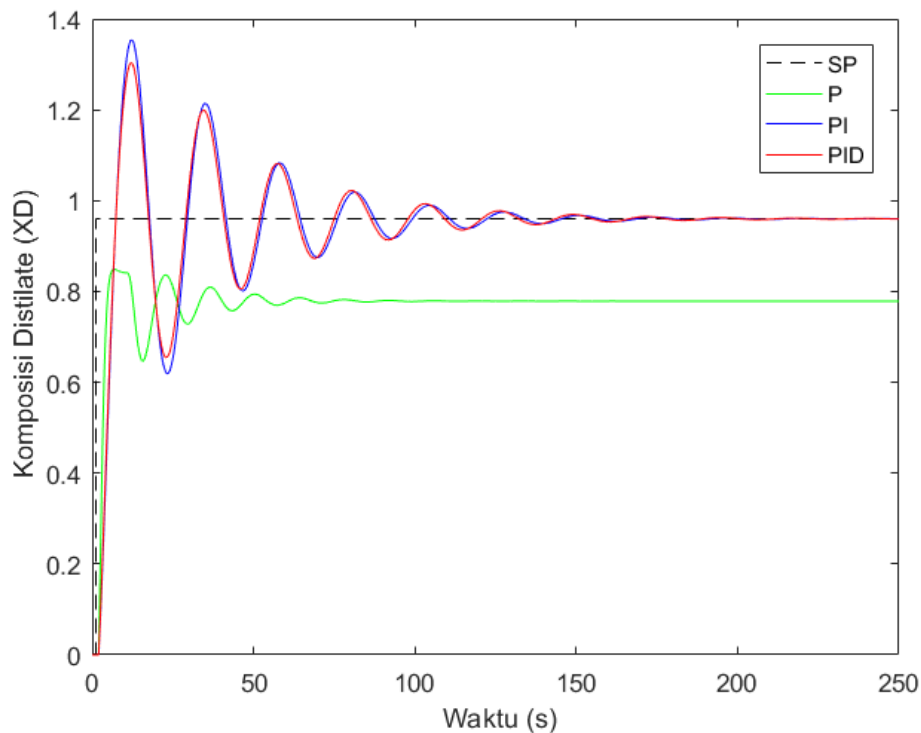
Uji *open loop* ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari respons *plant* disaat tidak ada *feedback*. Sinyal *input* yang diberikan berupa sinyal step. Hasil dari grafik tersebut menunjukkan bahwa respon sudah mencerminkan nilai K pada fungsi transfer namun pengujian *open loop* terhadap *plant* kolom distilasi biner di atas menghasilkan respon keluaran fraksi mol produk distilat dan fraksi mol produk bawah tidak sesuai dengan yang diinginkan. Karena keluaran *open loop plant* ini

tidak sesuai dengan yang diinginkan, maka diperlukan *controller* untuk memperoleh keluaran yang diharapkan.

4.2 Hasil Perancangan Pengendali PID

Pengendali PID dirancang menggunakan simulink pada software matlab 2016b. Adapun nilai parameter tuning diinisialisasi menggunakan fitur *autotuning* dengan parameter yang ditunjukkan pada tabel 3.3. Dilakukan *tuning* pada masing-masing pengendali P, PI dan PID secara bergantian dengan cara memberikan sebuah pengendali PID pada *control loop* atas serta tidak memberikan kontroler pada *control loop* bawah, dan sebaliknya hingga mendapat parameter K_p , K_i , K_d yang menghasilkan respon yang sesuai. Masing-masing pengendalian tiap komposisi akan dibandingkan karakteristik responnya dengan menggabungkannya ke dalam satu grafik.

Melalui pengendalian masing-masing komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) dengan *autotune* PID, didapatkan hasil sebagai berikut:



Gambar 4.2 Respon komposisi *distillate* (X_D) menggunakan pengendali P, PI, PID

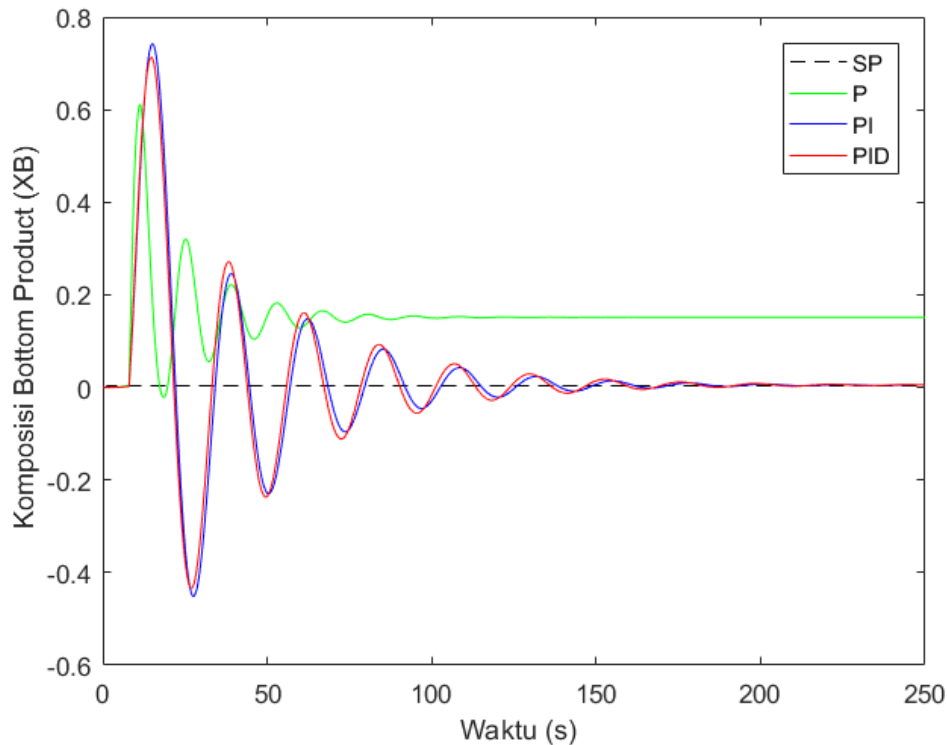
Dengan karakteristik respon pada masing-masing pengendali dirumuskan pada tabel berikut:

Tabel 4.1 Karakteristik respon pengendali PID komposisi *distillate* (X_D)

	Komposisi <i>Distillate</i> (X_D)		
	P	PI	PID
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	8.9840	41.0355	35.8053
<i>Rise Time (s)</i>	1.9331	4.0999	4.1033
<i>Settling Time (s)</i>	45.0500	117.8207	117.0030
<i>Peak Time (s)</i>	6.8000	12.2000	12.1000
<i>Error steady state</i>	0.1813	0	0

Dari hasil pengujian terhadap produk atas (*distillate*) didapatkan bahwa pengendali P memiliki *overshoot*, *rise time*, *settling time*, *peak time* yang paling rendah, namun terdapat *error steady state* yang dihasilkan cukup tinggi sehingga tidak cocok digunakan sebagai pengendali komposisi. Sedangkan respon yang dihasilkan PI dan PID cenderung hampir sama keduanya, pengendali PID relatif memiliki respon yang lebih baik dibandingkan PI karena memiliki nilai *overshoot* yang lebih kecil yaitu 35,80 detik dengan *rise time* 4,1 detik serta *settling time* yang tidak terlalu lama yaitu 117 detik. Sehingga dari analisis ini secara keseluruhan, pengendali PID memiliki performasi yang paling baik.

Sedangkan untuk pengendalian pada komposisi *bottom product* dengan pengendali P, PI, PID didapatkan hasil respon sebagai berikut:



Gambar 4.3 Respon komposisi *bottom product* (X_B) menggunakan pengendali P, PI, PID

Dengan karakteristik respon pada masing-masing pengendali dirumuskan sebagai berikut:

Tabel 4.2 Karakteristik respon pengendali PID komposisi *bottom product* (X_B)

	Komposisi <i>Bottom Product</i> (X_B)		
	P	PI	PID
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	303.5451	13491	13989
<i>Rise Time (s)</i>	0.3889	2.7830	2.8902
<i>Settling Time (s)</i>	74.8493	133.9042	143.5418
<i>Peak Time (s)</i>	11.3000	15.1000	14.7000
<i>Error steady state</i>	-0.1465	0	0

Dari hasil pengujian terhadap produk bawah (*bottom product*) didapatkan nilai *overshoot* yang tinggi pada semua pengendali, hal tersebut dikarenakan untuk mengatur komposisi mencapai *set point* 0,005 pengendali melakukan *overshoot* hingga komposisi 0,7. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan *set point* antara pengendali *distillate* (X_D) dan *bottom product* (X_B) yang cukup jauh serta interaksi

antara *manipulated variabel* yang saling berpengaruh. Pengendali P tidak cocok untuk dijadikan pengendali komposisi karena memiliki *error steady state* yang besar. Sehingga dapat dibandingkan pengendali PI dan PID. Keduanya memiliki karakteristik respon yang relatif sama. Jika dilihat dari nilai *overshoot*, *undershoot*, *rise time* dan *settling time* terlihat bahwa pengendali PI memiliki respon yang lebih baik dibandingkan PID karena memiliki *risetime* 2,78 detik serta *settling time* 133,9 detik. Namun, pengendali yang dirancang masih memiliki nilai *overshoot* yang besar hingga 13491%. Sehingga dari analisis ini secara keseluruhan, pengendali PI memiliki performansi yang paling baik.

Berdasarkan analisa rancangan pengendali PID konvensional untuk mengendalikan kedua komposisi, respon yang digunakan sebagai perbandingan dengan pengendali *fuzzy gain scheduling-PID* adalah pengendali PI untuk kedua komposisi yaitu *distillate* dan *bottom product* karena memiliki relatif respon yang sama dengan PID berdasarkan hasil *autotune*. Sehingga parameter Kp dan Ki pada pengendali PI akan di *gain schedule* menggunakan fuzzy. Masing-masing respon tersebut juga akan dibandingkan dengan perancangan pengendali menggunakan *fuzzy logic tipe-1* dan *tipe-2 gain schedule*.

4.3 Hasil Perancangan Pengendali Fuzzy

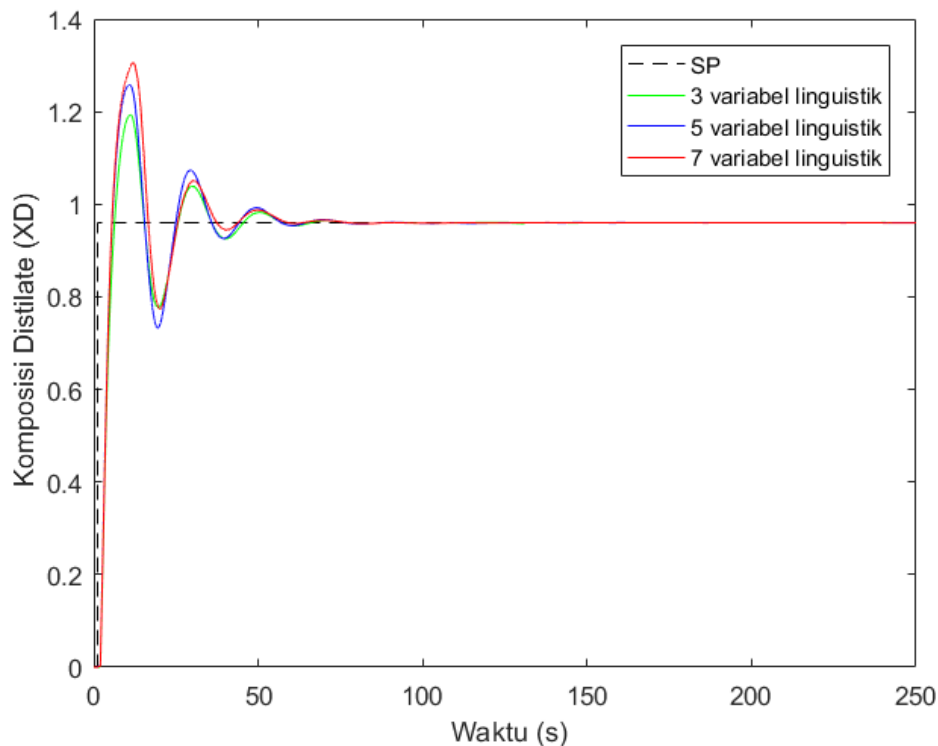
4.3.1 Fuzzy tipe-1 Gain Scheduling

Perancangan pengendali dengan menggunakan fuzzy dilakukan dengan menggunakan toolbox *Fuzzy Inference System (FIS)* yang tersedia pada matlab. Hasil rancangan fuzzy akan dimasukkan sebagai blok pengendali pada Simulink. Perancangan fuzzy pada pengendalian ini menggunakan masing-masing 1 *input* yaitu *error* (e) dan 1 *output* berupa nilai Kp atau Ki sebagai *gain schedule* dari pengendali PID. Jumlah fungsi keanggotaan yang digunakan dalam perancangan pengendali divariasikan dengan menggunakan fungsi keanggotaan sebanyak 3, 5, dan 7 yang akan dilihat respon pengaruh jumlah variabel linguistik terhadap respon *output*.

Pengendali fuzzy dirancang menggunakan 2 metode yang berbeda yaitu Mamdani dan Sugeno. Berikut hasil respon yang diberikan dengan menggunakan kedua metode tersebut:

a. Mode Inferensi Mamdani

Perancangan fuzzy dengan Mamdani menggunakan fungsi keanggotaan pada setiap *input* dan *output*-nya. Fungsi keanggotaan yang dirancang yaitu segitiga dengan MFS auto. Hasil respon pengendalian didapatkan sebagai berikut:



Gambar 4.4 Respon komposisi *distillate* (X_D) menggunakan Mamdani

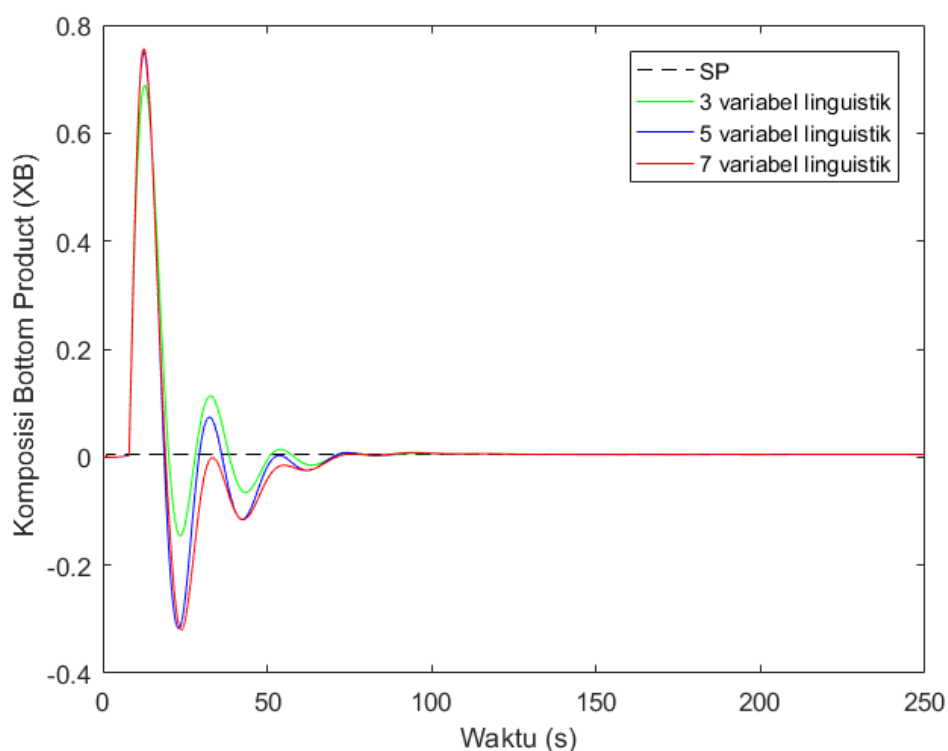
Jika dilakukan analisis perbandingan performansi dari ketiga variasi yang dilakukan berupa perbedaan jumlah variabel linguistik didapatkan nilai karakteristik respon sebagai berikut:

Tabel 4.3 Perbandingan performansi pengendali komposisi *distillate* (X_D) dengan variasi jumlah variabel linguistik

	Jumlah Variabel Linguistik		
	3	5	7
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	24.3151	30.9969	36.0315
<i>Undershoot (%)</i>	0	0	0
<i>Risetime (s)</i>	3.1945	2.6835	2.6802
<i>Settlingtime (s)</i>	52.3273	53.2882	53.3487
<i>Peakttime (s)</i>	11.1422	10.9011	11.9604
<i>Error steady state</i>	0	0	0

Berdasarkan hasil performansi, terlihat bahwa performansi dengan menggunakan jumlah variabel linguistik sebanyak 3 akan menghasilkan nilai *overshoot*, *settling time* yang lebih baik dibanding sebanyak 5 dan 7 variabel. Nilai *overshoot* yang dihasilkan mencapai 24,31 dan *settling time* sebesar 52,32 detik yang merupakan performansi paling baik dibandingkan dengan yang lain karena respon akan lebih cepat mencapai kestabilan disertai *overshoot* yang masih dibawah standar. Namun walaupun terdapat nilai *rise time* yang lebih besar yaitu 3,19 detik hal tersebut tidak terlalu berbeda jauh dengan yang jumlah variabel linguistik lain yang mencapai masing-masing 2,68 detik. Sehingga, berdasarkan analisis dapat disimpulkan bahwa pengendali dengan jumlah variabel linguistik sebanyak 3 memiliki performansi yang lebih baik dibanding jumlah yang lain.

Sedangkan pada variasi jumlah variabel linguistik untuk pengendali *bottom product* dihasilkan respon sebagai berikut:



Gambar 4.5 Respon komposisi *bottom product* (X_B) menggunakan Mamdani

Jika dilakukan analisis perbandingan performansi dari ketiga variasi yang dilakukan berupa perbedaan jumlah variabel linguistik didapatkan nilai karakteristik respon sebagai berikut:

Tabel 4.4 Perbandingan performansi pengendali komposisi *bottom product* (X_B) dengan variasi jumlah variabel linguistik

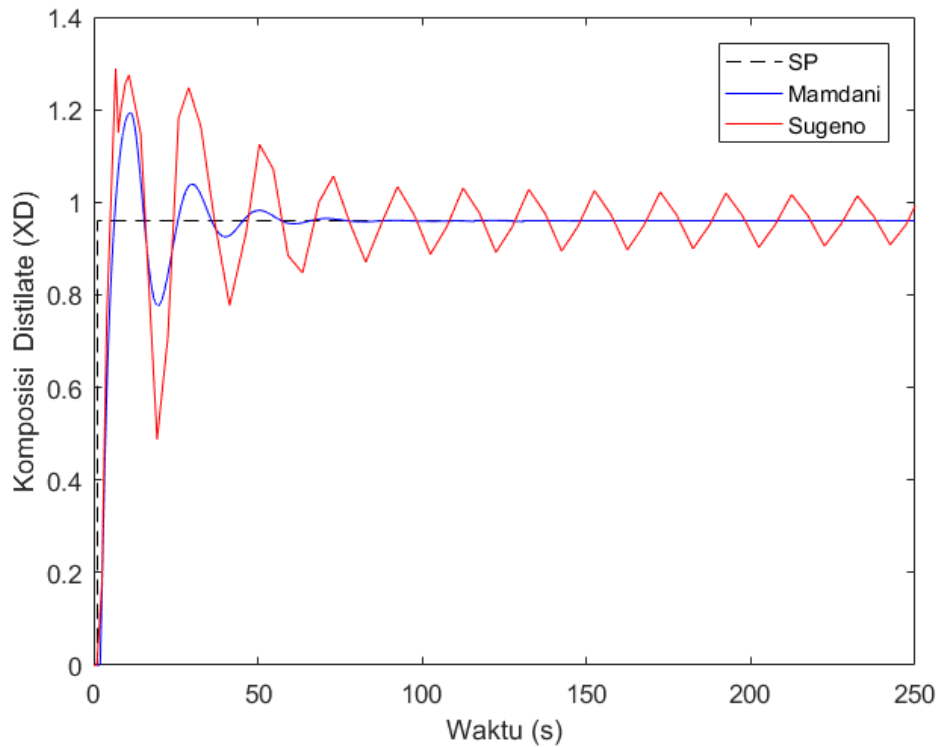
	Jumlah Variabel Linguistik		
	3	5	7
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	13765	14700	15415
<i>Undershoot (%)</i>	2938.4	6277	6574.3
<i>Risetime (s)</i>	3.1751	3.1649	3.1945
<i>Settlingtime (s)</i>	67.0614	67.3731	67.8077
<i>Peakttime (s)</i>	12.7657	12.5077	12.4476
<i>Error steady state</i>	0	0	0

Berdasarkan hasil performansi, terlihat bahwa performansi dengan menggunakan jumlah variabel linguistik sebanyak 3 akan menghasilkan nilai *overshoot*, *undershoot*, *rise time*, *settling time* yang lebih baik dibanding sebanyak 5 dan 7 variabel. Nilai *overshoot* dan *undershoot* yang dihasilkan mencapai masing-masing 13765% dan 2938.4% dengan *rise time* selama 3,17 detik dan *settling time* sebesar 67,06 detik yang merupakan performansi paling baik dibandingkan dengan yang lain karena respon akan lebih cepat mencapai kestabilan. Namun masih terdapat nilai *overshoot* yang besar sama seperti yang dihasilkan pengendali PI pada tabel 4.2. Hal tersebut disebabkan perbedaan *set point* yang begitu besar antara kedua pengendali disertai adanya kekurangan dari sistem MIMO yang memungkinkan adanya interaksi dari masing-masing *manipulated variabel*. Sehingga, berdasarkan analisis dapat disimpulkan bahwa pengendali dengan jumlah variabel linguistik sebanyak 3 memiliki performansi yang lebih baik dibanding jumlah yang lain.

Jumlah variabel linguistik dengan performansi terbaik pada masing-masing pengendali dapat disimpulkan memiliki jumlah sebanyak 3 variabel untuk kedua pengendali baik *distillate* (X_D) maupun *bottom product* (X_B). 3 variabel tersebut yaitu *Negative (N)*, *Zero (Z)* dan *Positive (P)* untuk *input error* (e). Selanjutnya masing-masing pengendali dengan mode inferensi Mamdani yang terbaik dengan akan dibandingkan dengan mode inferensi lain yaitu Sugeno dengan nilai parameter yang sama.

b. Mode Inferensi Sugeno

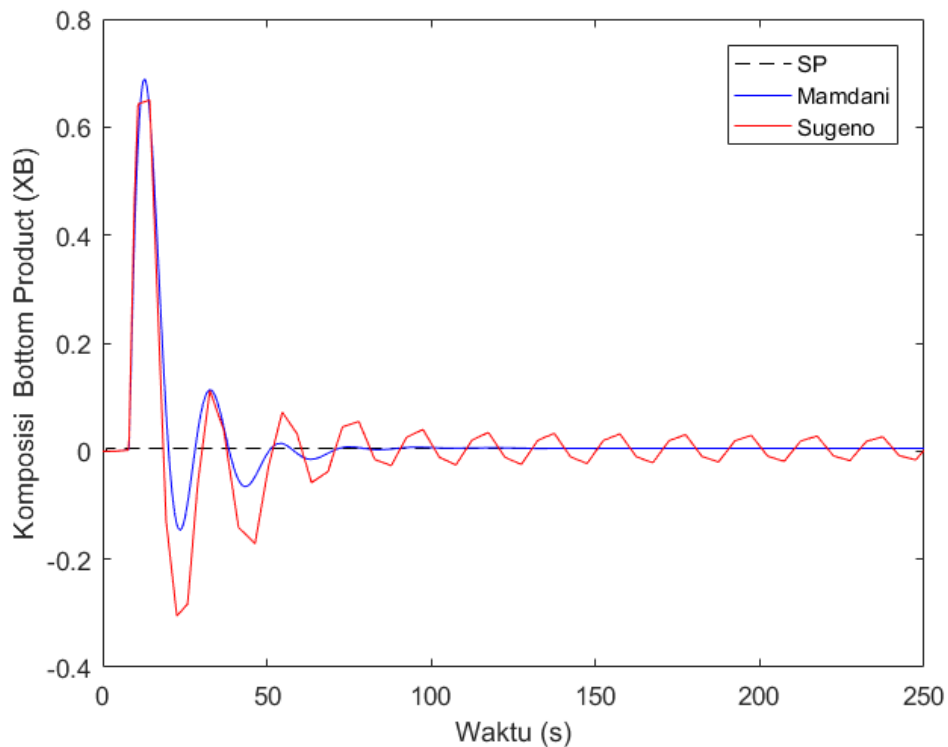
Setelah didapatkan jumlah variabel linguistik optimal sebanyak 3 buah dengan mode inferensi Mamdani, selanjutnya dilakukan perancangan dengan



memasukkan parameter yang sama dengan mode inferensi Sugeno. Perancangan fuzzy dengan Sugeno menggunakan fungsi keanggotaan pada *input* sama seperti Mamdani, namun pada *outputnya* tidak digunakan fungsi keanggotaan karena metode Sugeno memiliki variabel linguistik berupa *singleton*. Fungsi keanggotaan yang dirancang yaitu segitiga dengan MFS *auto*. Hasil respon pengendalian didapatkan sebagai berikut

Gambar 4.6 Respon komposisi *distillate* (X_D) menggunakan Sugeno jika dibandingkan dengan Mamdani

Dapat dilihat bahwa dengan nilai parameter yang sama dengan metode Mamdani berupa jumlah fungsi keanggotaan, aturan *rule*, rentang *input-output* namun dengan menggunakan mode inferensi yang berbeda akan menghasilkan respon yang berbeda pula. Sedangkan untuk pengendalian komposisi *bottom product* (X_B) dengan Sugeno dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.7 Respon komposisi *bottom product* (X_B) menggunakan Sugeno jika dibandingkan dengan Mamdani

Hasil respon kedua pengendali akan dianalisis melalui karakteristik responnya akan diketahui melalui tabel 4.5 berikut

Tabel 4.5 Perbandingan performansi mode inferensi Mamdani dan Sugeno dengan 3 variabel linguistik

	3 variabel linguistik			
	Komposisi <i>Distillate</i>		Komposisi <i>Bottom Product</i>	
	Mamdani	Sugeno	Mamdani	Sugeno
Maximum Overshoot (%)	24.3151	29.8367	13765	36399
Undershoot (%)	0	0	2938.4	17130
Risetime (s)	3.1945	2.8709	3.1751	2.8185
Settlingtime (s)	52.3273	∞	67.0614	∞
Peaktime (s)	11.1422	6.7063	12.7657	14.3115

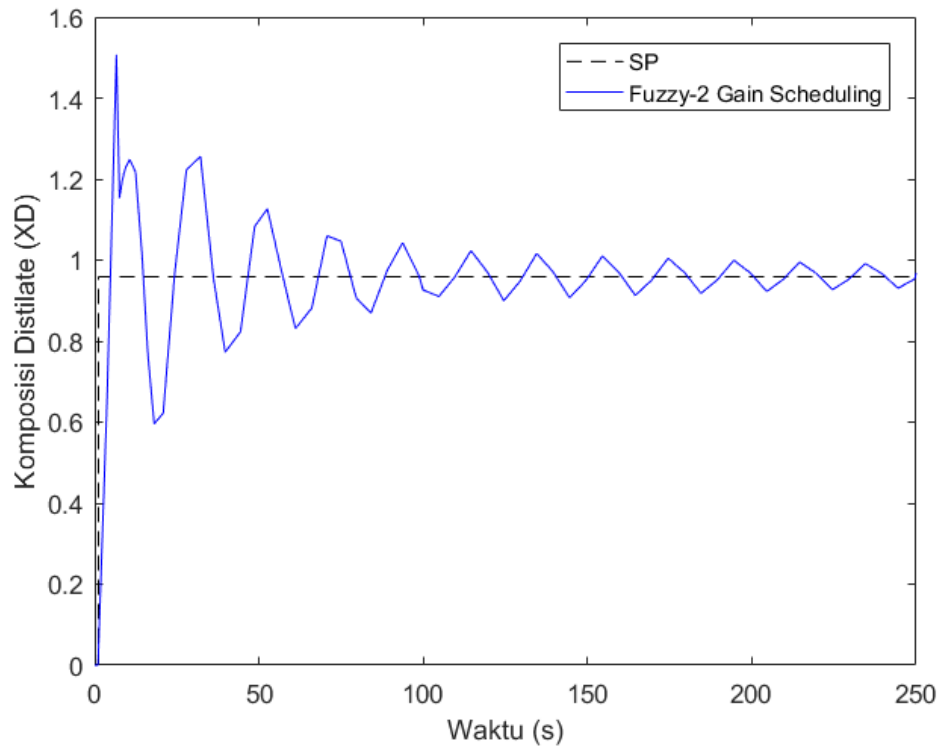
Berdasarkan hasil analisis, metode inferensi Mamdani memiliki respon yang lebih baik dibandingkan mode inferensi Sugeno dari segi *overshoot*, *settling*

time. Pada pengendalian komposisi distillate, nilai *overshoot* pada mode Sugeno mencapai 29.83% sedangkan mode Mamdani sebesar 24.31%.

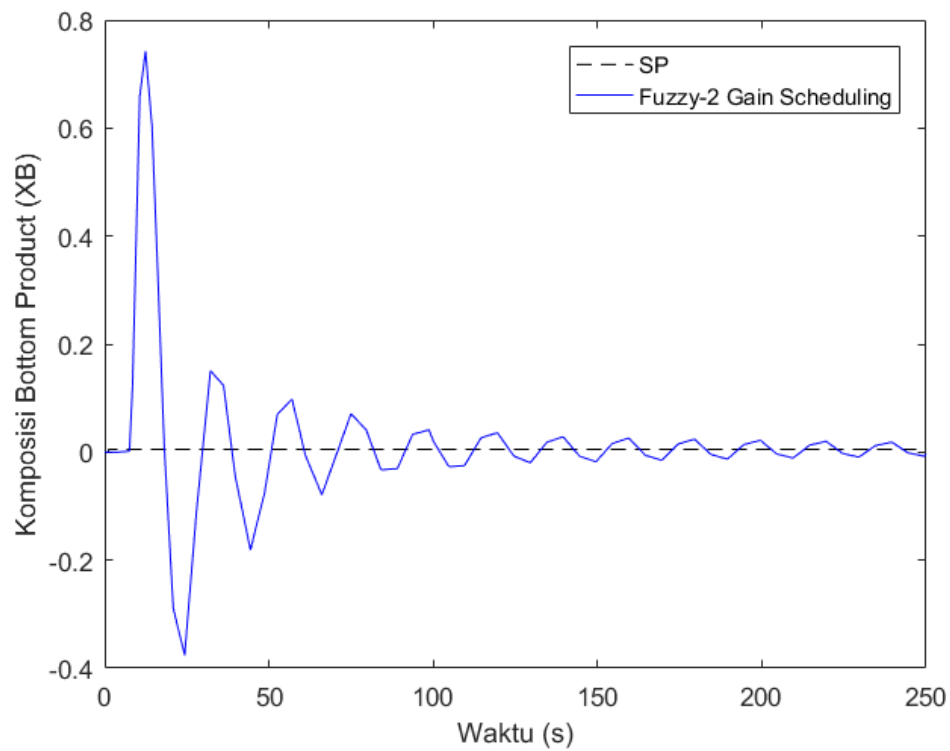
Pada mode Sugeno dengan perancangan melalui parameter yang didapatkan dengan mode Mamdani pengendali tidak dapat dikatakan stabil karena adanya osilasi yang tidak akan berhenti. Hal tersebut disebabkan penentuan parameter output untuk Kp dan Ki dengan mode Sugeno menggunakan fungsi *singleton* yang mana tidak cocok untuk diterapkan pada sebuah pengendalian yang mengharapkan keluaran fuzzy *controller* berupa nilai yang memiliki derajat keanggotaan diantara dua variabel linguistik. Mode defuzzifikasi sugeno menggunakan *weighted average/center of singleton* berbeda dengan Mamdani yang menggunakan COA (*Center of Area*) untuk mendapatkan nilai crisp kembali.

4.3.2 Fuzzy tipe-2 Gain Scheduling

Perancangan pengendali fuzzy tipe-2 dilakukan dengan menggunakan nilai parameter terbaik yang dihasilkan oleh pengendali fuzzy tipe-1. Berdasarkan hasil simulasi, performansi terbaik dihasilkan pada jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 3 dengan mode inferensi Mamdani. Jumlah fungsi keanggotaan *input-output* sebanyak 3 dan bentuk fungsi keanggotaan adalah segitiga yang nantinya akan ditambahkan parameter *lower* pada fungsi keanggotaan *upper*. Namun pada simulasi fuzzy tipe-2 ini, dilakukan dengan mode inferensi Sugeno karena *toolbox* fuzzy tipe-2 hanya menyediakan fitur untuk metode Sugeno. Sehingga pada komparasi akan dibandingkan fuzzy-2 *gain scheduling* dengan fuzzy-1 *gain scheduling* yang memiliki mode inferensi yang sama. Berikut hasil respon yang diberikan dengan menggunakan nilai parameter pada perancangan fuzzy tipe-1 *gain schedule* dengan 3 buah fungsi keanggotaan:



Gambar 4.8 Respon komposisi *distillate* (X_D) dengan *fuzzy-2 gain schedule*



Gambar 4.9 Respon komposisi *bottom product* (X_B) dengan *fuzzy-2 gain schedule*

Jika dilakukan analisis performansi dari perancangan pengendali fuzzy-2 *gain scheduling* yang dilakukan didapatkan nilai karakteristik respon sebagai berikut:

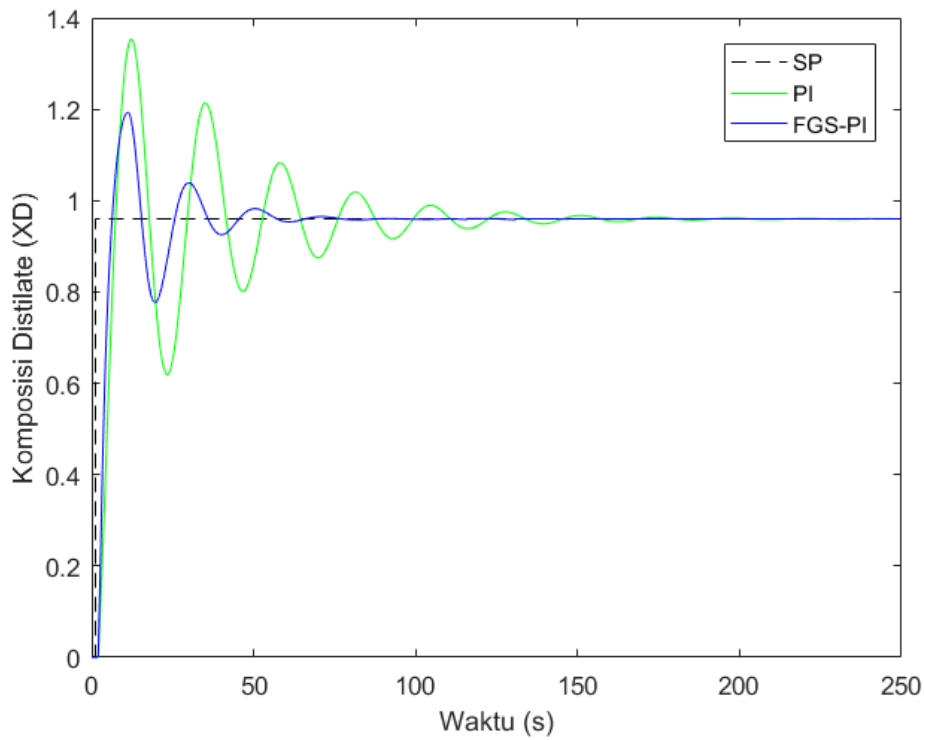
Tabel 4.6 Performansi fuzzy-2 *gain schedule*

	Fuzzy-2 Gain Schedule	
	Komposisi <i>Distillate</i>	Komposisi <i>Bottom Product</i>
<i>Maximum Overshoot (%)</i>	55.6213	11352
<i>Undershoot (%)</i>	0	22599
<i>Risetime (s)</i>	3.0882	0.0239
<i>Settlingtime (s)</i>	∞	∞
<i>Peaktime (s)</i>	6.6199	12.4326

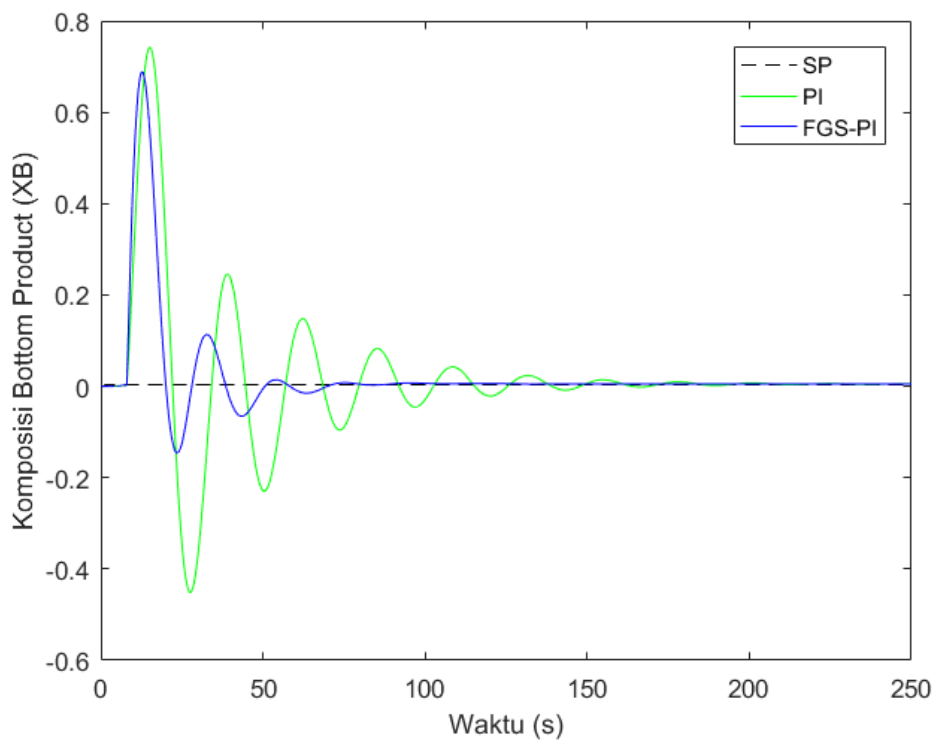
Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa perancangan pengendali fuzzy-2 *gain schedule* memiliki *overshoot* hingga 55,6% untuk komposisi *distillate* dan 11532% untuk komposisi *bottom product*, namun fuzzy-2 *gain schedule* tidak memiliki *settling time* akibat tidak stabilnya sistem, respon akan terus berosilasi hingga waktu tidak terhingga. Hal tersebut diakibatkan pemilihan mode inferensi yang digunakan tidak sesuai.

4.4 Perbandingan Kontrol PID, Fuzzy-1 *Gain Scheduling* dan Fuzzy-2 *Gain Scheduling*

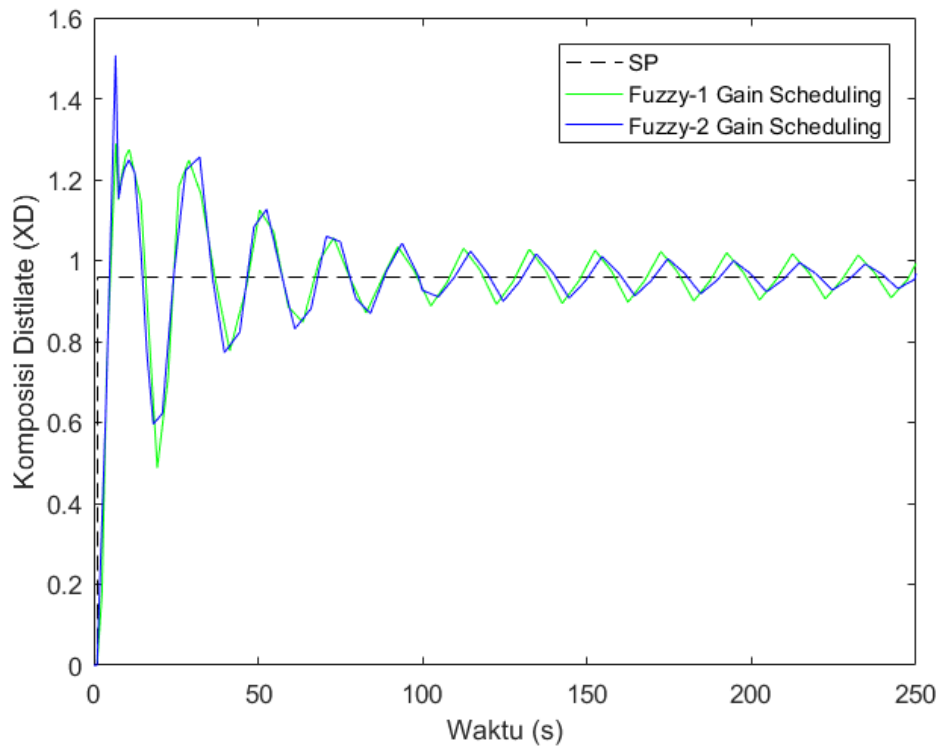
Dari perancangan pengendali dengan 3 metode yaitu pengendali konvensional PID, fuzzy-1 *gain scheduling* dan fuzzy-2 *gain scheduling* akan dibandingkan masing-masing karakteristik responnya. Pengendali konvensional yang dipilih yaitu PI karena memiliki performansi yang relatif lebih baik dibandingkan dengan PID walaupun sebenarnya perbandingan antar karakteristik baik PI maupun PID hampir memiliki nilai yang sama yang tidak begitu jauh dari kedua pengendali. Sedangkan pengendali fuzzy *gain schedule* yang dibandingkan memiliki jumlah variabel linguistik *input* yang sama sebanyak 3 yaitu *Negatif (N)*, *Zero (Z)* dan *Positif (P)* untuk *error*. Perbedaan mendasar pada adanya FOU yang ada pada fuzzy tipe-2. Nilai FOU tersebut didapatkan melalui MFS *auto* yang tersedia pada *toolbox*. Didapatkan grafik perbandingan responnya sebagai berikut:



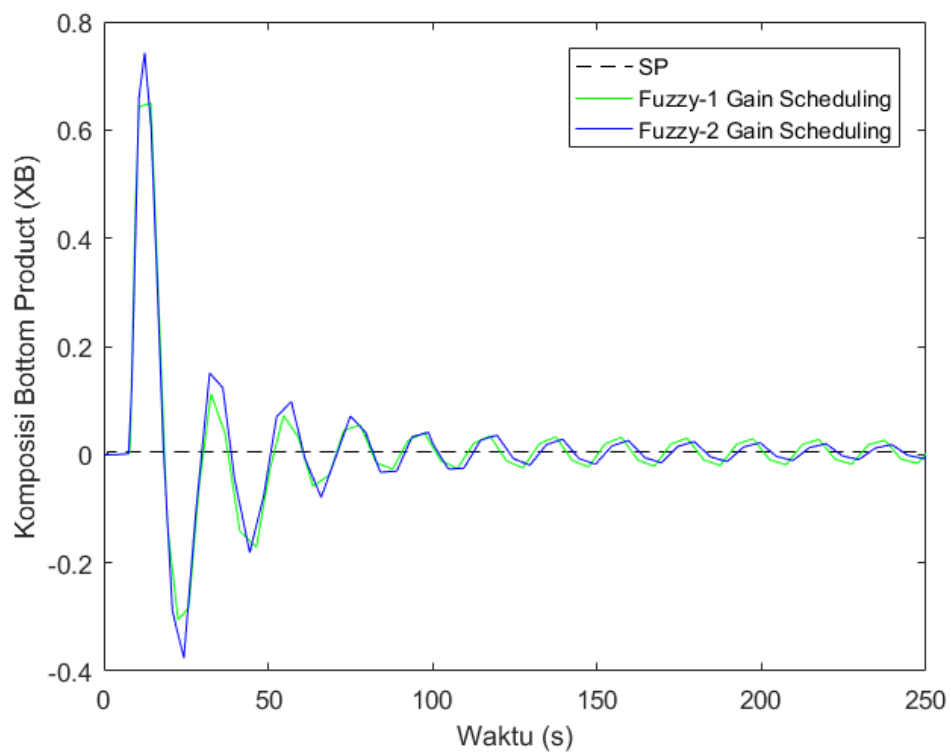
Gambar 4.10 Perbandingan pengendali komposisi *distillate* (X_D) dengan konvensional dan fuzzy-1 *gain scheduling*



Gambar 4.11 Perbandingan pengendali komposisi *bottom product* (X_B) dengan konvensional dan fuzzy-1 *gain scheduling*



Gambar 4.12 Perbandingan pengendali komposisi *distillate* (X_D) dengan fuzzy-1 *gain scheduling* dan fuzzy-2 *gain scheduling* (Sugeno)



Gambar 4.13 Perbandingan pengendali komposisi *bottom product* (X_B) dengan fuzzy-1 *gain schedule* dan fuzzy-2 *gain schedule* (Sugeno)

Selanjutnya, akan dilakukan perbandingan performansi melalui karakteristik respon yang dihasilkan. Didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4.7 Perbandingan performansi pengendali komposisi *distillate* (X_D) dengan konvensional dan *fuzzy gain scheduling*

	Komposisi <i>Distillate</i> (X_D)			
	PI	FGS1-PI (Mam)	FGS1-PI (Sug)	FGS2-PI
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	41.0355	24.3151	29.8367	55.6213
<i>Undershoot</i> (%)	0	0	0	0
<i>Risetime</i> (s)	4.0999	3.1945	2.8709	3.0882
<i>Settlingtime</i> (s)	117.8207	52.3273	∞	∞
<i>Peaktime</i> (s)	12.2000	11.1422	6.7063	6.6199

Tabel 4.8 Perbandingan performansi pengendali komposisi *bottom product* (X_B) dengan konvensional dan *fuzzy gain scheduling*

	Komposisi <i>Bottom Product</i> (X_B)			
	PI	FGS1-PI (Mam)	FGS1-PI (Sug)	FGS2-PI
<i>Maximum Overshoot</i> (%)	13491	13765	36399	11352
<i>Undershoot</i> (%)	8260.3	2938.4	17130	22599
<i>Risetime</i> (s)	2.7830	3.1751	2.8185	0.0239
<i>Settlingtime</i> (s)	133.9042	67.0614	∞	∞
<i>Peaktime</i> (s)	15.1000	12.7657	14.3115	12.4326

Dari hasil perbandingan antara ketiga pengendali, didapatkan pada pengendali komposisi produk *distillate* (X_D) pengendali fuzzy tipe-1 *gain scheduling* memiliki performansi yang lebih baik dibanding konvensional PI. Hal tersebut didasarkan pada nilai *overshoot* yang lebih kecil yaitu 24,31% dengan *settling time* yang lebih cepat yaitu 117,8 detik.

Dan pada pengendali komposisi *bottom product* (X_B) pengendali fuzzy tipe-1 *gain scheduling* juga memiliki performansi yang lebih baik dibanding konvensional PI melalui *overshoot* dan *settling time* nya. Nilai *overshoot* didapatkan sebesar 13765% dan *settling time* sebesar 67,06 detik.

Sedangkan pada mode sugeno yang dirancang pada fuzzy-1 dan fuzzy-2 *gain schedule* didapatkan bahwa fuzzy-1 memiliki respon yang lebih baik diantaranya

karena *overshoot* yang dihasilkan lebih rendah dan juga *risetime* dan *settling time* yang semakin cepat.

4.5 Uji *Tracking Set Point*

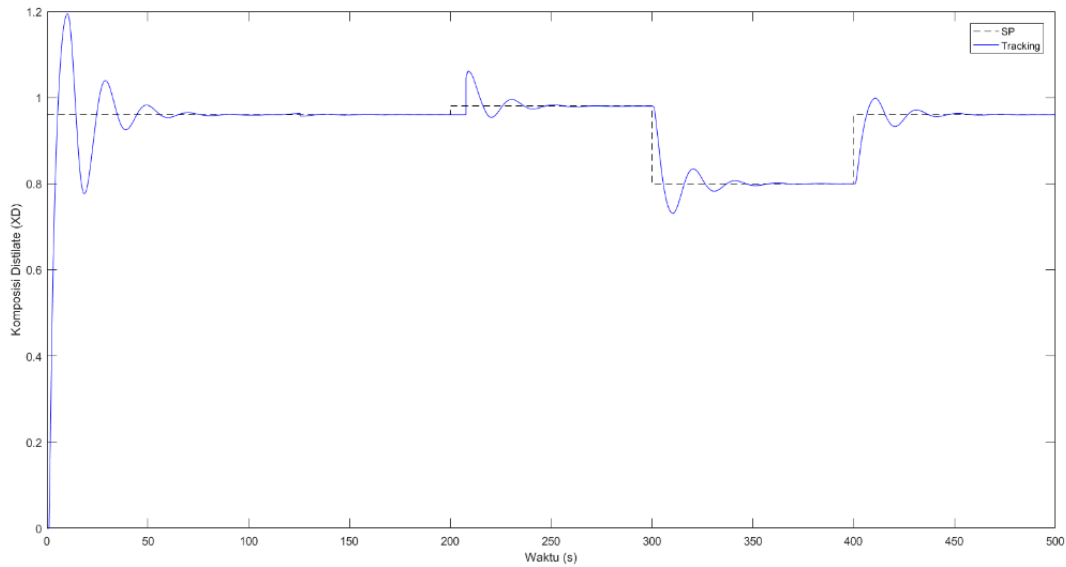
Uji ini dilakukan pada pengendali fuzzy tipe-1 *gain scheduling* untuk memastikan validnya pengendali yang dirancang. Pengujian dilakukan dengan mengubah nilai *set point* produk atas (X_D) dan produk bawah (X_B) untuk melihat kinerja pengendali fuzzy *gain scheduling* terhadap perubahan *set point* yang diberikan (*tracking set point*).

Pengujian pada bagian ini dilakukan dengan menaikkan *set point* komposisi produk atas (X_D) sebesar $X_D+0,02$ pada detik ke 300 dan menurunkan *set point* pada detik ke 400. Sedangkan pada pengendali produk bawah (X_B) dinaikkan *set point* sebesar $X_B+0,095$ pada detik ke-300 dan menurunkan *set point* sebesar $X_B-0.003$ pada detik ke-400. *Set point* kedua pengendali diubah pada detik yang sama. Skenario *set point tracking* dijelaskan pada tabel berikut:

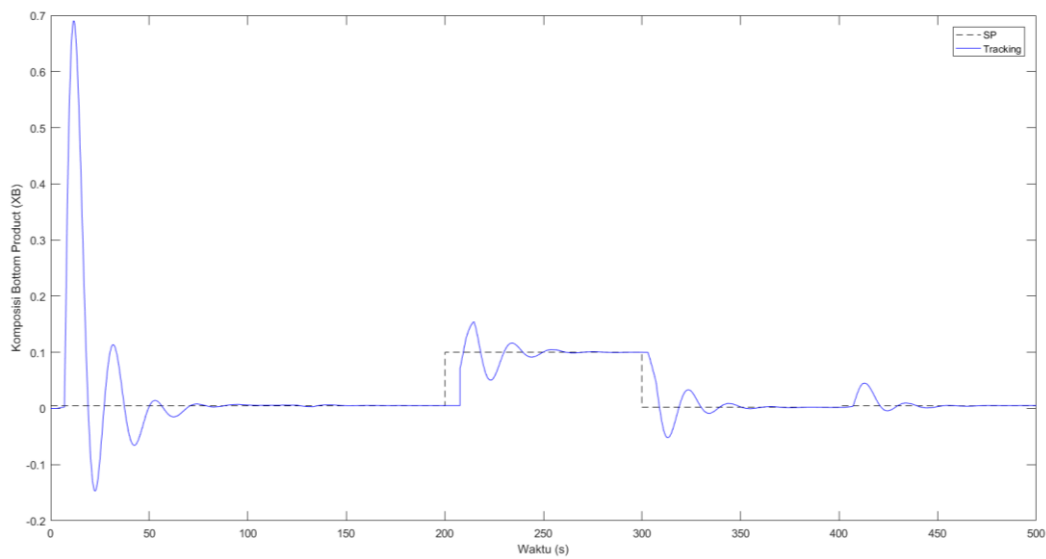
Tabel 4.9 Skenario uji *set point tracking*

<i>Set Point</i>	Komposisi <i>Distillate</i> (SP = 0.96)		Komposisi <i>Bottom Product</i> (SP = 0.005)	
	Naik	Turun	Naik	Turun
Detik <i>tracking</i>	300	400	300	400
Rentang naik	$X_D+0.02$	$X_D-0.16$	$X_B+0,095$	$X_B-0,003$
Nilai	0.98	0.8	0.1	0.002

Respon komposisi produk atas (X_D) atas hasil *tracking* ditunjukkan oleh Gambar 4.14 sedangkan respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 4.15 berikut:



Gambar 4.14 Uji *setpoint tracking* komposisi *distillate* (X_D)



Gambar 4.15 Uji *setpoint tracking* komposisi *bottom product* (X_B)

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15, dapat dilihat bahwa pengendali fuzzy-1 *gain scheduling* mampu mengikuti perubahan *set point* pada komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) dan mampu kembali mempertahankan *set point* komposisi.

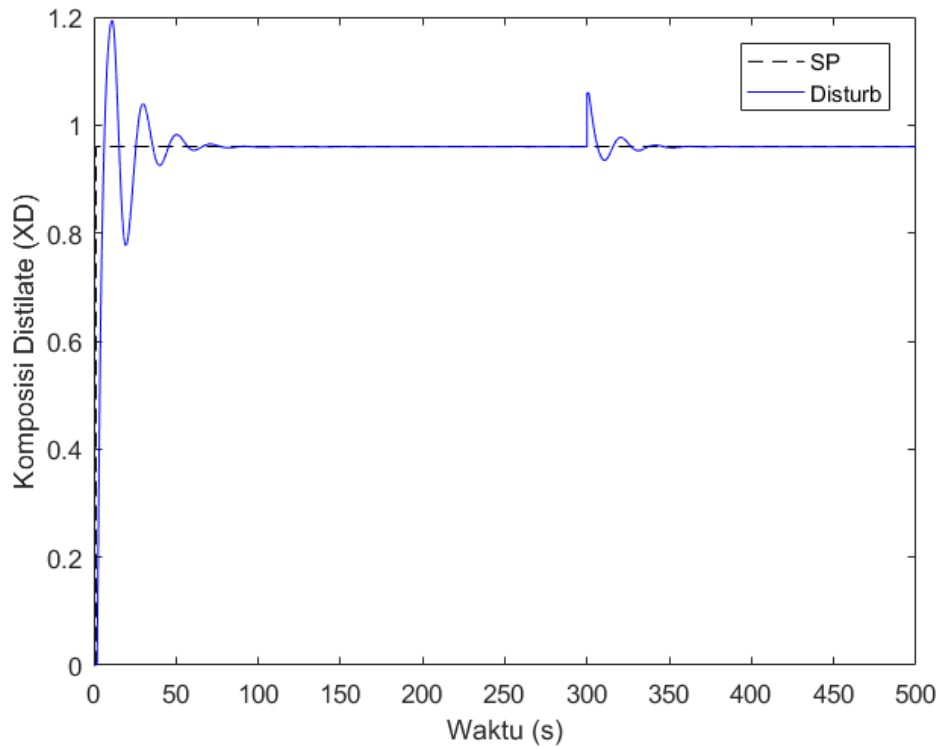
4.6 Uji *Disturbance*

Uji gangguan (*disturbance*) dilakukan pada pengendali fuzzy tipe-1 *gain scheduling*. Pada asumsi model sempurna yang disertai gangguan, pengujian dilakukan dengan memberikan *input step* pada *output plant* untuk melihat performa kontroler *fuzzy gain scheduling* dalam meredam efek gangguan dan mempertahankan *set point* yang ditetapkan (*rejecting disturbance*).

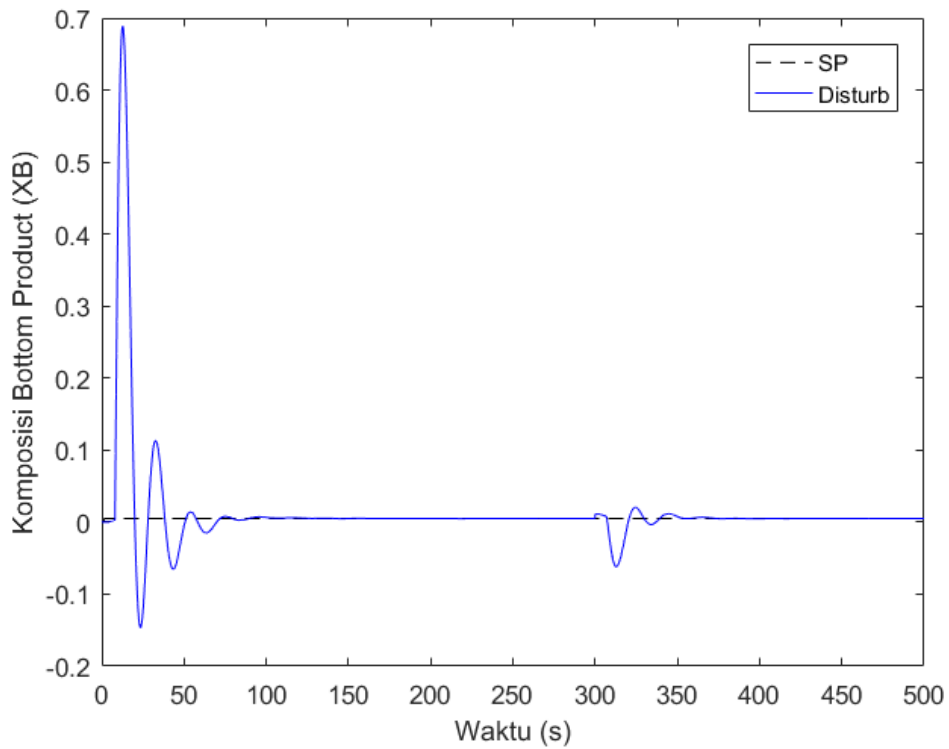
Pengujian dengan menggunakan unit *step* dilakukan dengan menambahkan nilai variabel *input* gangguan sebesar 0.01 pada komposisi *distillate* (X_D) dan gangguan sebesar 0.006 pada komposisi *bottom product* (X_B). Nilai tersebut merupakan penambahan dari *flow* saat keadaan *steady* sebesar 2,45 lb/min. Pemberian gangguan ini dilakukan pada detik ke-300 untuk kedua pengendali saat *plant* sebelumnya sudah dalam keadaan stabil. Pada pengujian ini hasil respon uji gangguan terhadap komposisi produk atas (X_D) ditunjukkan oleh Gambar 4.16 sedangkan respon komposisi produk bawah (X_B) ditunjukkan oleh Gambar 4.17. Adapun skenario penambahan gangguan dijelaskan pada tabel berikut:

Tabel 4.10 Skenario uji *disturbance*

<i>Disturbance</i>	Komposisi <i>Distillate</i> (SP = 0.96)	Komposisi <i>Bottom Product</i> (SP = 0.005)
detik	300	300
<i>Initial value</i>	0	0
<i>Final value</i>	0.1	0.006



Gambar 4.16 Uji *disturbance* pengendali komposisi *distillate* (X_D)



Gambar 4.17 Uji *disturbance* pengendali komposisi *bottom product* (X_B)

Berdasarkan grafik respon sistem pada Gambar 4.16 dan Gambar 4.17, dapat dilihat bahwa pengendali fuzzy-1 *gain scheduling* mampu meredam gangguan yaitu kenaikan laju aliran *feed* (F) yang direpresentasikan berupa sinyal *step* dan mengembalikan respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) pada *set point* yang diberikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian tugas ini yaitu:

- a) Parameter pada pengendali *fuzzy tipe-1 gain scheduling* yang mampu menghasilkan performansi terbaik pada sistem pengendali terdapat pada mode inferensi yang digunakan yaitu Mamdani dengan jumlah variabel linguistik sebanyak 3.
- b) Jumlah variabel linguistik pada *fuzzy gain scheduling* berpengaruh pada karakteristik respon yang dihasilkan, dengan jumlah 3 variabel pengendali mampu menghasilkan respon yang lebih baik dari jumlah variabel sebanyak 5 dan 7 variabel. Jumlah variabel linguistik tersebut juga akan mempengaruhi jumlah *rule base* yang dirancang. Respon yang dihasilkan menghasilkan *overshoot* yang lebih kecil serta mempercepat *settling time* sistem.
- c) Performansi dari pengendali *fuzzy-1 gain schedule* lebih baik daripada pengendali konvensional PI. Pada pengendali komposisi distillate (X_D) nilai *overshoot* yang lebih kecil yaitu 24,31% dengan *settling time* yang lebih cepat yaitu 117,8 detik. Sedangkan pada pengendali komposisi *bottom product* (X_B) nilai *overshoot* dan *settling time* nya juga lebih baik daripada pengendali PI. Nilai *overshoot* didapatkan sebesar 13765% dan *settling time* sebesar 67,06 detik.
- d) Pengendali *fuzzy gain schedule* adaptif terhadap berbagai gangguan dan perubahan *set point*. Perubahan gangguan berupa kenaikan laju aliran *feed* (F) yang direpresentasikan berupa sinyal step dan mengembalikan respon komposisi produk atas (X_D) dan komposisi produk bawah (X_B) pada *set point* yang diberikan. Sedangkan pada uji *set point tracking* baik naik dan turun pengendali mampu mengikuti perubahan *set point* dan mampu kembali mempertahankan *set point* komposisi.

5.2 Saran

Adapun saran terhadap penelitian tugas akhir ini yaitu:

- a) Penggunaan aplikasi *decoupling* untuk meminimalisir interaksi yang terjadi pada komposisi akibat perubahan variabel manipulasi
- b) Penambahan *input* fuzzy berupa delta *error* untuk meningkatkan akurasi dari proses inferensi yang dilakukan.
- c) Penggunaan algoritma optimisasi untuk menentukan titik titik keanggotaan pada *fuzzy set*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, I. (2015). *Simulasi Pengendalian Level Steam Drum dengan Pengendali PID Berbasis Fuzzy Gain Scheduling*. 18(September), 219–232.
- Asokawati, A. F., Kusmiyati, S. T., & Mujiburohman, M. (2016). *Prarancangan Pabrik Metanol Dari Batubara Dengan Proses Gasifikasi Kapasitas Produksi 100.000 Ton/Tahun*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Dale E Seborg. (2011). *Process Dynamics and Control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Duarte-Mermoud, M. A., & Prieto, R. A. (2004). Performance index for quality response of dynamical systems. *ISA Transactions*, 43(1), 133–151. [https://doi.org/10.1016/s0019-0578\(07\)60026-3](https://doi.org/10.1016/s0019-0578(07)60026-3)
- Hassani, H., & Zarei, J. (2015). Interval Type-2 fuzzy logic controller design for the speed control of DC motors. *Systems Science and Control Engineering*, 3(1), 266–273. <https://doi.org/10.1080/21642583.2015.1013644>
- Homkes, R. (2017). System interfacing, instrumentation, and control systems. *Mechatronics: An Introduction*, 1050–1059. <https://doi.org/10.1201/9781420037241>
- Hu, W., Cai, W. J., & Xiao, G. (2010). Relative gain array for MIMO processes containing integrators and/or differentiators. *11th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, ICARCV 2010*, (December), 231–235. <https://doi.org/10.1109/ICARCV.2010.5707220>
- Javadi, S., & Hosseini, J. (2009). Control of binary distillation column using fuzzy PI controllers. *Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering, MACMESE '09*, 50–57.
- Luyben, W. L., Tyréus, B. D., & Luyben, M. L. (1999). *Plantwide process control*. M, B., & C, S. (2012). Dynamic Modeling , Simulation and Control of MIMO Systems. *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 3(3), 71–84.

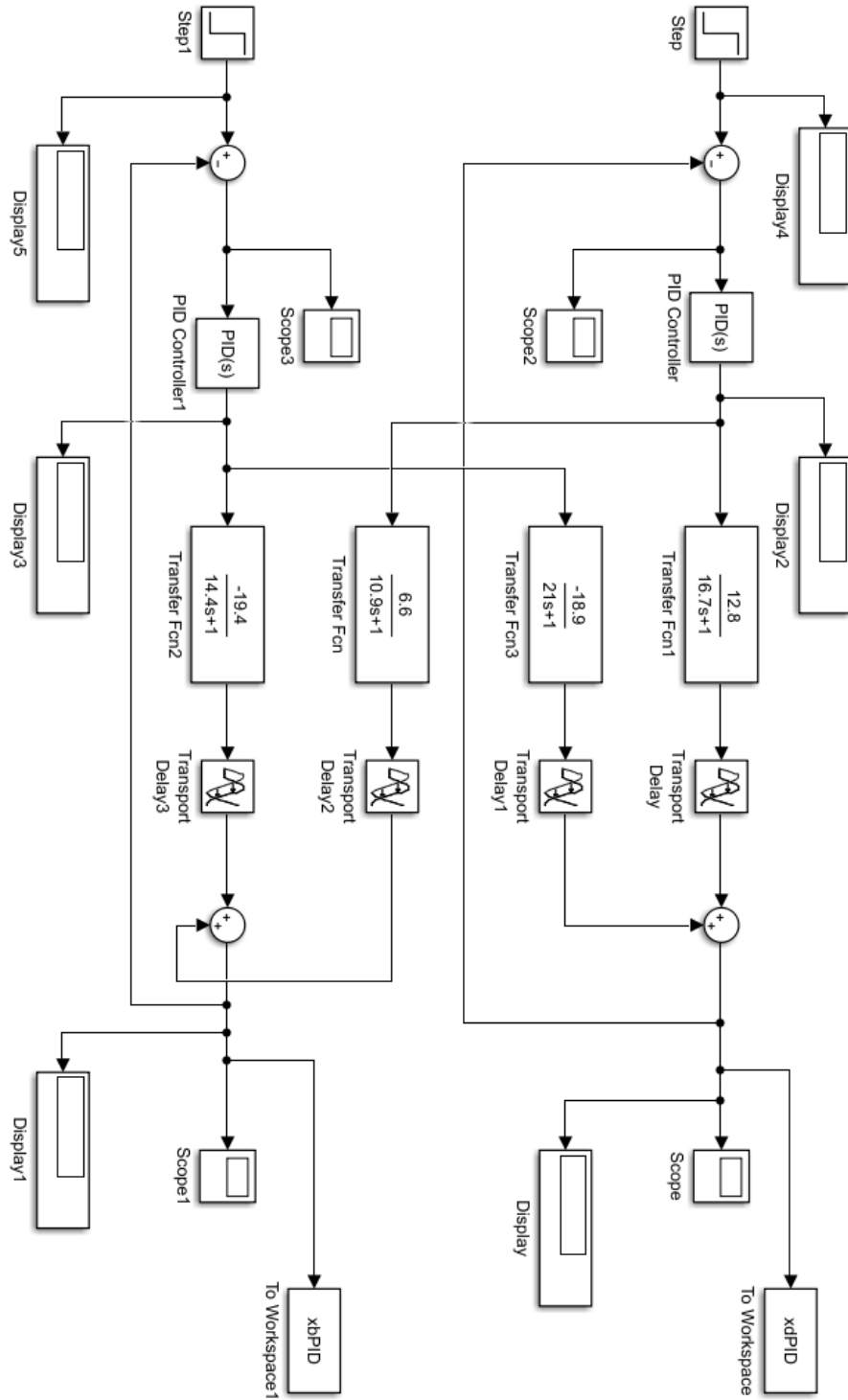
- Miccio, M., & Cosenza, B. (2014). Control of a distillation column by type-2 and type-1 fuzzy logic PID controllers. *Journal of Process Control*, 24(5), 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.12.007>
- Mishra, R. K., & Dan, T. K. (2013). Design of an internal model control for SISO binary distillation column. *2013 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology, ICE-CCN 2013*, 666–669. <https://doi.org/10.1109/ICE-CCN.2013.6528583>
- Negnevitsky, M. (2011). Artificial Intelligence 3e e-book A Guide to Intelligent Systems. In *Artificial Intelligence* (Vol. 73). [https://doi.org/10.1016/0004-3702\(94\)00017-U](https://doi.org/10.1016/0004-3702(94)00017-U)
- R. Biyanto, T. (2007). Algoritma Genetika untuk Mengoptimasi Konsumsi Energi pada Proses Kolom Distilasi Metanol-Air. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(1), 43–49. <https://doi.org/10.9744/jte.7.1.43-49>
- R. Biyanto, T. (2015). STRATEGI KONTROL KOLOM DISTILASI TUNGGAL SISTEM BINER METANOL- STRATEGI KONTROL KOLOM DISTILASI TUNGGAL SISTEM BINER METANOL-AIR. *Research Gate*, (November 2005).
- Ramli, N. M., & Basaar, M. A. (2016). *BINARY DISTILLATION COLUMN CONTROL TECHNIQUES : A*. (2), 87–91.
- Roffel, B., & Betlem, B. H. (2006). *Process dynamics and control: modeling for control and prediction*.
- Setiawan, I. (2008). Kontrol PID Untuk Proses Industri. In *Jakarta: Elex Media Komputindo*.
- Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2007). Multivariable Feedback Control—Analysis and Design. *IEEE Control Systems*, 27(1), 80–81. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.284514>
- Soelistya, A., & Agustriyanto, R. (2002). *Studi Aplikasi Decoupling Control untuk Pengendalian Komposisi Kolom Distilasi*. 1–8.
- Sutapa, R. B., Setiyono, B., & Wahyudi, W. (2017). Simulasi Model Kendali Kolom Distilasi Biner Wood & Berry Dengan Adaptive Internal Model Control 2 Degree of Freedom (Aimc 2 Dof) Menggunakan Matlab. *Transmisi*, 19(4), 145. <https://doi.org/10.14710/transmisi.19.4.145-151>

- Szita, G., & Sanathanan, C. K. (2000). Model matching approach for designing decentralized MIMO controllers. *Journal of the Franklin Institute*, 337(6), 641–660. [https://doi.org/10.1016/s0016-0032\(00\)00035-1](https://doi.org/10.1016/s0016-0032(00)00035-1)
- T.Allawi, Z., & Y. Abdalla, T. (2014). An Optimized Interval Type-2 Fuzzy Logic Control Scheme based on Optimal Defuzzification. *International Journal of Computer Applications*, 95(13), 26–31. <https://doi.org/10.5120/16655-6633>
- Thomas E. Marlin. (2000). *Process Control: Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. Hamilton, Ontario: McGraw-Hill Education.
- Wara, B. B., & Setiyono, B. (2017). Kinerja Kontroler Internal Model Kontrol (Imc) Pada Plant First Orde Plus Dead Time (Fopdt). 19(2), 58–64. <https://doi.org/10.12777/transmisi.19.2.58-64>
- Wood, R. K., & Berry, M. W. (1973). Terminal composition control of a binary distillation column. *Chemical Engineering Science*, 28(9), 1707–1717. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(73\)80025-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(73)80025-9)
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M., & Isaka, S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(5), 1392–1398. <https://doi.org/10.1109/21.260670>

Halaman ini sengaja dikosongkan

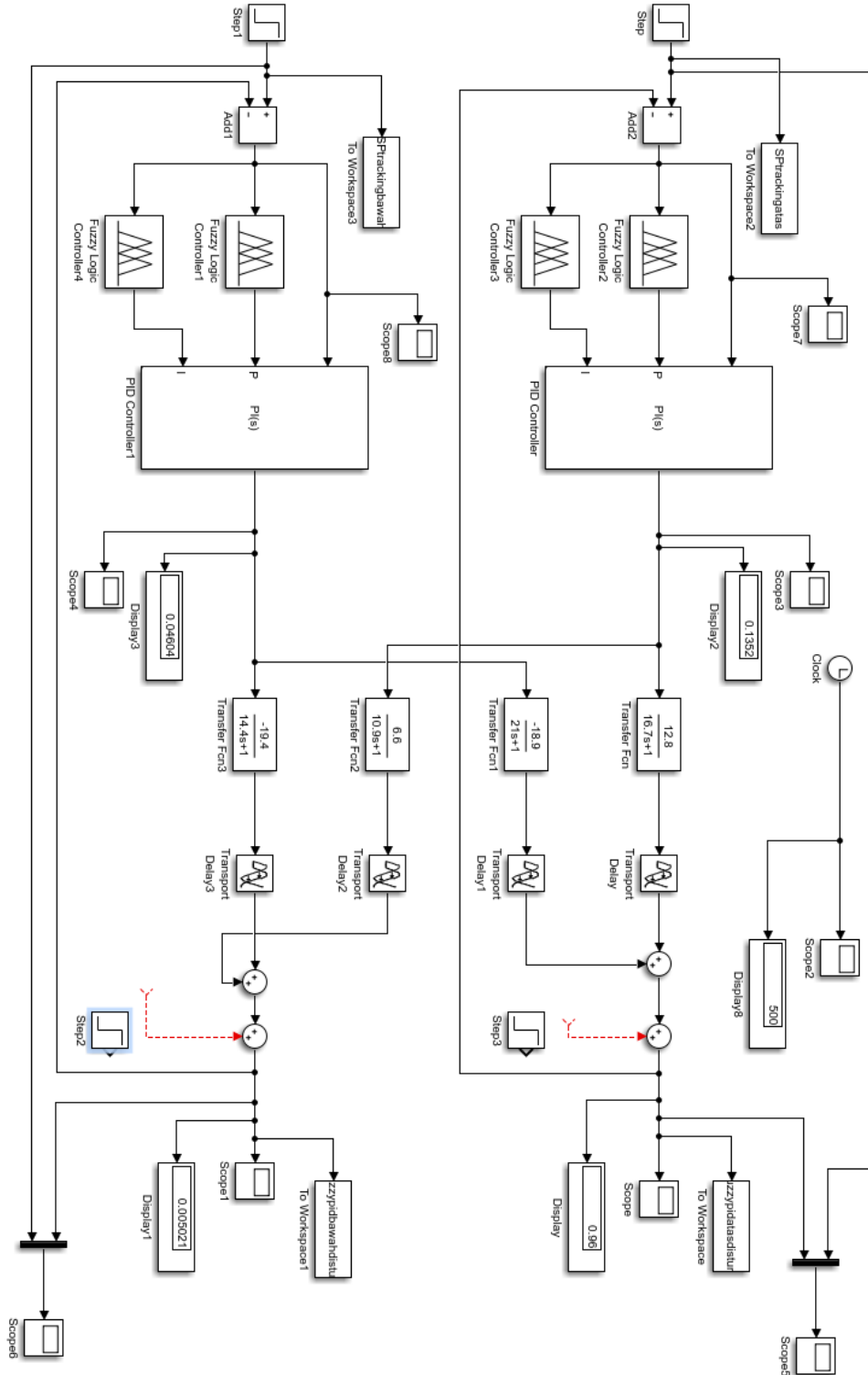
LAMPIRAN

A. Simulink Model PID Control MIMO



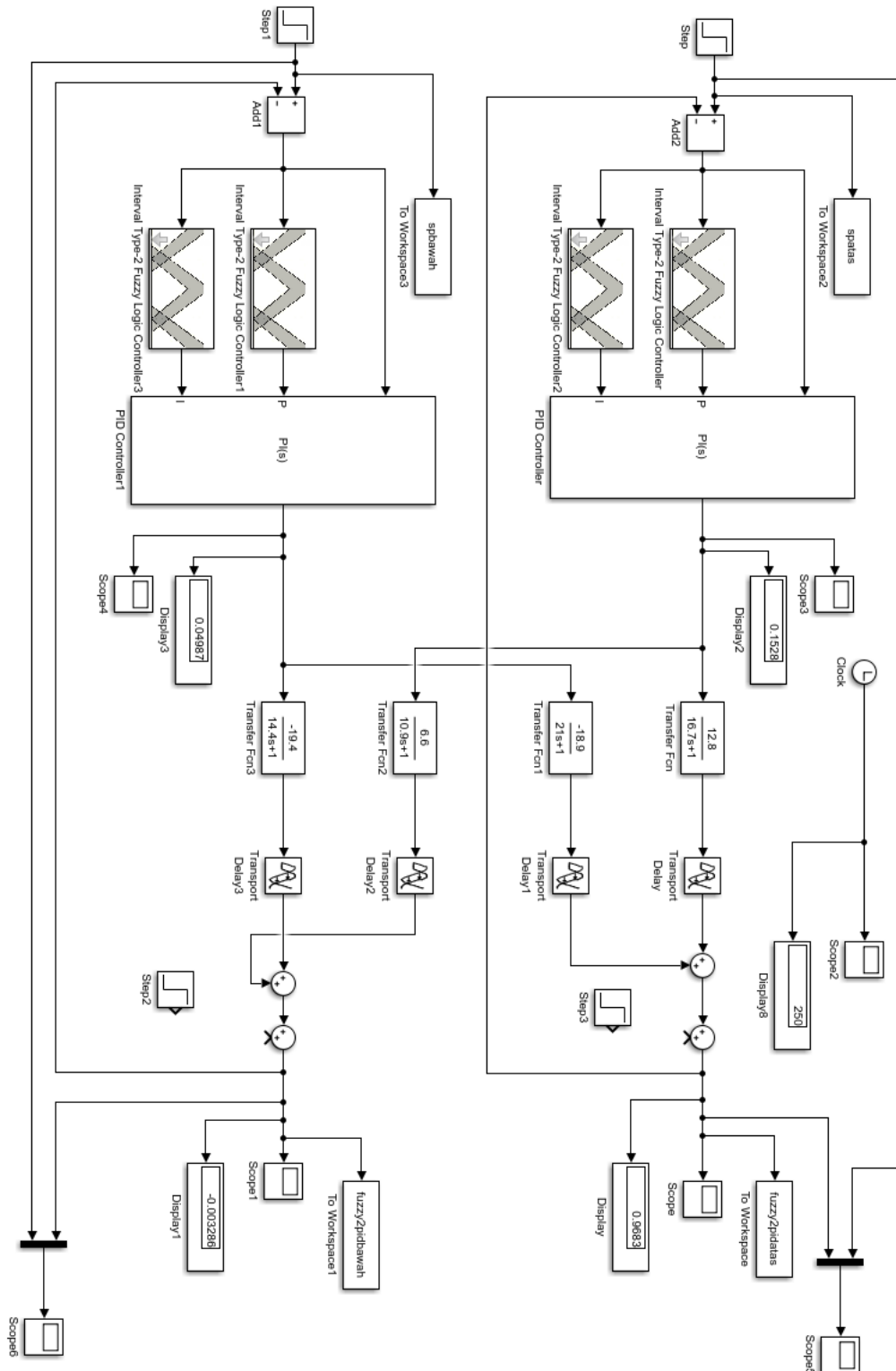
Gambar A.1 Diagram blok pengendali konvensional

B. Simulink Model Fuzzy Logic Control Fuzzy-1 Gain Schedule



Gambar B.1 Diagram blok pengendali fuzzy tipe-1 gain scheduling

Fuzzy-2 Gain Schedule



Gambar B.2 Diagram blok pengendali fuzzy tipe-2 gain scheduling

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Nama lengkap dari penulis yaitu Viko Dian Nano, dengan nama panggilan Viko. Penulis dilahirkan di Malang pada 19 Juli 1998. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis berdomisili di Kota Malang, Jawa Timur. Riwayat pendidikan penulis adalah: SDN Bareng 2 Malang (2004-2010), SMPN 8 Malang (2010-2013), SMAN 5 Malang (2013-2016) dan mengawali perkuliahan di Departemen Teknik Fisika, Institut

Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016.

Pada bulan Juli 2020 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Sistem Pengendalian pada Kolom Distilasi Metanol-Air Berbasis *Fuzzy Logic Control***. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email*: vikodiannano@gmail.com