

**PERANCANGAN KONTROL LOGIKA FUZZY  
UNTUK PENGATURAN SUHU DAN KETINGGIAN AIR  
PADA BOILER DI PT. CAMARIN EKA LAKSANA  
SINGOSARI MALANG**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**RONY SETIAWAN**

**NIM. 0001060371 - 63**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
MALANG**

**2007**

**PERANCANGAN KONTROL LOGIKA FUZZY  
UNTUK PENGATURAN SUHU DAN KETINGGIAN AIR  
PADA BOILER DI PT. CAMARIN EKA LAKSANA  
SINGOSARI MALANG**

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**RONY SETIAWAN**

**NIM. 0001060371 - 63**

Mengetahui dan Menyetujui,

**DOSEN PEMBIMBING:**

**Pembimbing I**

**Pembimbing II**

Ir. Purwanto, MT  
NIP. 131 574 847

Fitriana Suhartati, ST, MT  
NIP. 132 206 527

**PERANCANGAN KONTROL LOGIKA FUZZY  
UNTUK PENGATURAN SUHU DAN KETINGGIAN AIR  
PADA BOILER DI PT. CAMARIN EKA LAKSANA  
SINGOSARI MALANG**

Disusun Oleh:

**RONY SETIAWAN**

**NIM. 0001060371-63**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus  
pada tanggal 7 Februari 2007

**DOSEN PENGUJI**

**Ir. Chairuzzaini**

**NIP. 130 682 589**

**Dipl. Ing Ir. Moch. Rusli**

**NIP. 131 653 473**

**Ir. Erni Yudaningtyas, MT**

**NIP. 131 879 035**

**Rusmi Ambarwati, ST, MT**

**NIP. 132 258 188**

Mengetahui  
Ketua Jurusan Teknik Elektro

**Ir. Purwanto, MT**

**NIP. 131 574 847**



## KATA PENGANTAR

Puji syukur dan terima kasih yang sebesar-besarnya ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas berkat dan karunia-Nya-lah saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir ini dengan judul “Perancangan Kontrol Logika Fuzzy Untuk Pengaturan Suhu dan Ketinggian Air pada Boiler di PT. Camarin Eka Laksana Singosari Malang” disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan dalam menyelesaikan pendidikan dan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Jurusan Elektro Universitas Brawijaya Malang.

Penyusun menyadari sepenuhnya bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini banyak memperoleh dorongan serta bantuan dari berbagai pihak. Maka dalam kesempatan ini penyusun mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada:

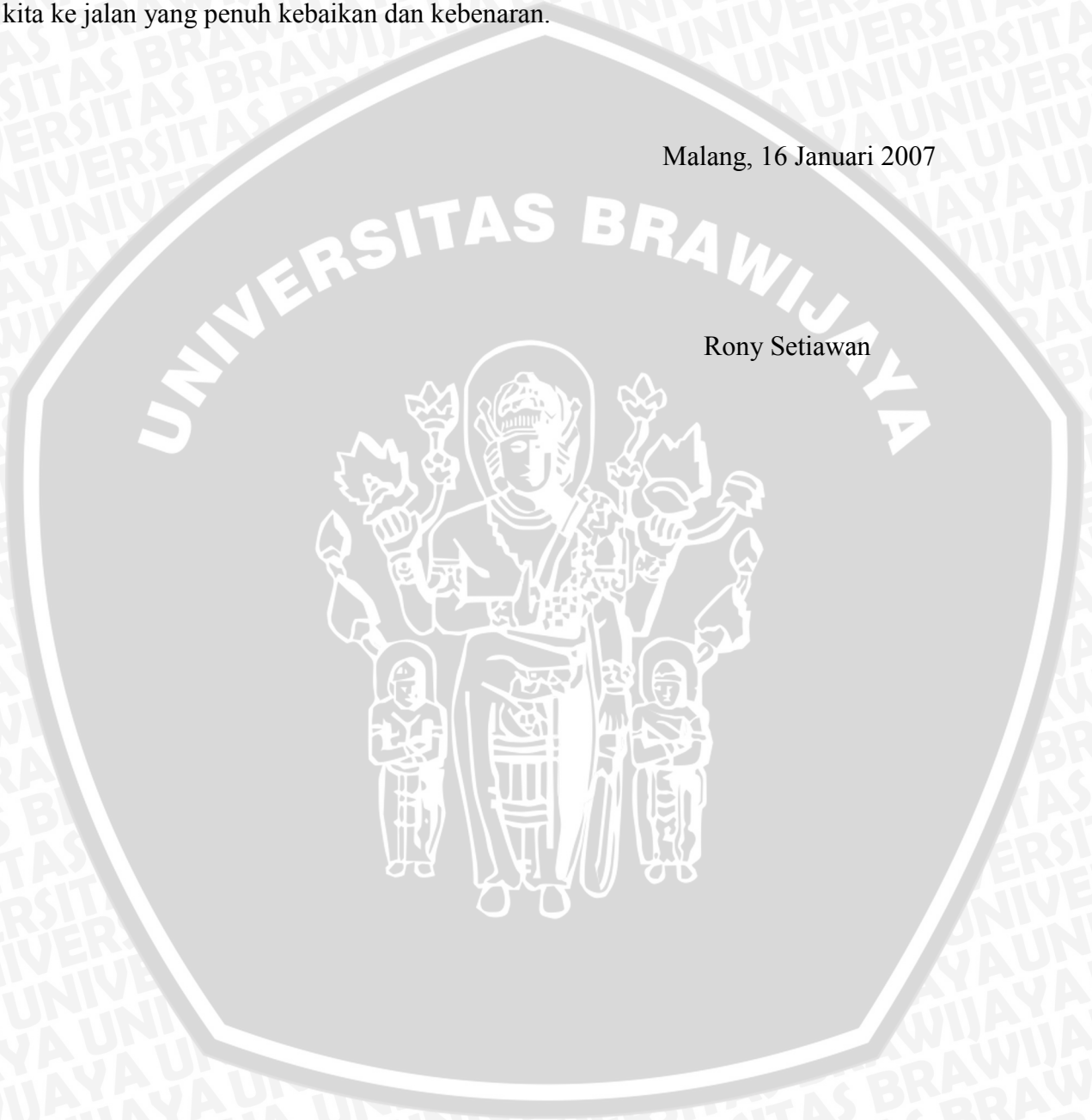
1. Papa dan Mama yang telah memberikan bantuan material dan spiritual.
2. Ir. Purwanto, MT dan Fitriani Suhartati, ST, MT selaku dosen pembimbing atas bantuannya dalam memberikan bimbingan, ide, pengarahan, saran serta masukan selama pengerjaan skripsi ini.
3. Dipl. Ing Ir. M Rusli selaku KKDK Program Studi Kontrol yang telah memberikan ide dalam pengerjaan proposal tugas akhir ini.
4. Ir. Purwanto, MT dan Ir. Hery Purnomo selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang telah memberi fasilitas dalam pengerjaan tugas akhir ini.
5. Seluruh staf pengajar Jurusan Elektro Universitas Brawijaya.
6. Bu Mien, Bu Kamil, Pak Wisnu dan seluruh karyawan Jurusan Elektro yang telah membantu kemudahan administrasi selama perkuliahan.
7. Wijaya Kurniawan, ST yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tugas akhir baik memberi ide maupun arahan agar tugas akhir ini dapat dengan cepat terselesaikan.
8. Roni, Domi, Rudy, Yoppie dan seluruh teman Elektro khususnya angkatan 2000 yang telah memberikan bantuan, dorongan dan motivasi sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.

Semoga segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis menjadi amalan yang baik dan mendapat berkat dari Tuhan Yang Maha Esa.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan dan kelemahan. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari para pembaca sehingga kekurangan dan kelemahan yang ada dapat diperbaiki. Semoga tugas akhir ini dapat membawa manfaat yang baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca dan semoga Tuhan Yang Maha Esa senantiasa membimbing kita ke jalan yang penuh kebaikan dan kebenaran.

Malang, 16 Januari 2007

Rony Setiawan



DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
I. 1. Latar Belakang .....	1
I. 2. Rumusan Masalah .....	2
I. 3. Tujuan .....	2
I. 4. Batasan Masalah .....	2
I. 5. Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB II DASAR TEORI</b> .....	<b>4</b>
II. 1. Definisi .....	4
II. 2. Klasifikasi <i>Boiler</i> .....	4
II. 2. 1. Ketel Cornwall dan Ketel Lancashire .....	6
II. 2. 2. Ketel Schots dan Ketel Schots Kembar .....	8
II. 2. 3. Ketel Kombinasi .....	10
II. 2. 4. Ketel Lokomotif .....	12
II. 2. 5. Ketel-ketel Tegak dan Ketel Cochran .....	14
II. 3. Logika <i>Fuzzy</i> .....	14
II. 3. 1. Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	19
II. 3. 2. Fungsi Keanggotaan <i>Fuzzy</i> .....	20
II. 3. 3. Operasi Himpunan <i>Fuzzy</i> .....	23
II. 3. 4. Variabel Linguistik ( <i>Linguistic Variable</i> ) .....	24
II. 3. 5. Kaidah Atur ( <i>Rule Evaluation</i> ) .....	25
II. 3. 6. Mekanisme Penalaran Aproksimasi ( <i>Approximate Reasoning</i> ) .....	26
II. 4. Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> .....	26
II. 4. 1. Fuzzifikasi .....	28
II. 4. 2. Inferensi <i>Fuzzy</i> .....	29
II. 4. 3. Defuzzifikasi .....	32



<b>BAB III METODOLOGI</b> .....	<b>34</b>
III. 1. Rancangan Penelitian .....	34
III. 1. 1. Pengambilan Data .....	34
III. 1. 2. Menentukan Model Matematis Sistem .....	34
III. 1. 3. Perancangan Kontrol Logika <i>Fuzzy</i> .....	34
III. 1. 4. Simulasi Sistem .....	35
III. 2. Cara Kerja Penelitian .....	35
<b>BAB IV PEMODELAN SISTEM DAN PERANCANGAN KONTROLER</b> .....	<b>36</b>
IV. 1. Definisi .....	36
IV. 2. Pemodelan Sistem .....	36
IV. 2. 1. Model Matematis Sensor dan <i>Transmitter</i> .....	37
IV. 2. 2. Model Matematis Katup ( <i>Valve</i> ) .....	39
IV. 2. 3. Model Matematis dan Blok Diagram <i>Boiler</i> .....	41
IV. 3. Perancangan Kontroler Logika <i>Fuzzy</i> .....	43
IV. 3. 1. Proses Fuzzifikasi .....	43
IV. 3. 2. Inferensi .....	46
IV. 3. 3. Proses Defuzzifikasi .....	48
<b>BAB V PENGUJIAN DAN SIMULASI</b> .....	<b>49</b>
V. 1. Blok Diagram Sistem Pengendalian .....	49
V. 2. Respon Sistem Pengendalian Suhu .....	49
V. 3. Respon Sistem Pengendalian Ketinggian Air .....	51
V. 4. Blok Diagram Sistem Pengendalian dengan Gangguan .....	52
V. 5. Respon Sistem Pengendalian Suhu dengan Gangguan .....	53
V. 6. Respon Sistem Pengendalian Ketinggian Air dengan Gangguan .....	54
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	<b>55</b>
VI. 1. Kesimpulan .....	55
VI. 2. Saran .....	55
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>56</b>
<b>LAMPIRAN</b> .....	<b>57</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Ketel Lancashire .....	6
Gambar 2.2	Ketel Schots .....	8
Gambar 2.3.	Ketel Schots kembar .....	8
Gambar 2.4.	Ketel Kombinasi .....	10
Gambar 2.5.	Ketel Lokomotif .....	12
Gambar 2.6.	Ketel-ketel Tegak dan ketel Cochran .....	14
Gambar 2.7	Konvensional set dan set <i>fuzzy</i> temperatur .....	15
Gambar 2.8	Pengklasifikasian suhu dalam konvensional set dan set <i>fuzzy</i> temperatur .....	16
Gambar 2.9	Konsep dasar logika <i>fuzzy</i> .....	17
Gambar 2.10	Himpunan <i>fuzzy</i> dan fungsi keanggotaannya .....	19
Gambar 2.11	Bagian-bagian pada fungsi keanggotaan .....	20
Gambar 2.12	Fungsi keanggotaan bentuk S .....	21
Gambar 2.13	Fungsi keanggotaan bentuk $\pi$ .....	21
Gambar 2.14	Fungsi keanggotaan bentuk T .....	22
Gambar 2.15	Fungsi keanggotaan bentuk Trapesium .....	22
Gambar 2.16	Fungsi keanggotaan bentuk Gaussian .....	23
Gambar 2.17	Contoh operasi gabungan himpunan <i>fuzzy</i> A dan B .....	24
Gambar 2.18	Contoh operasi irisan himpunan <i>fuzzy</i> A dan B .....	24
Gambar 2.19	Contoh operasi komplemen himpunan <i>fuzzy</i> A .....	24
Gambar 2.20	Diagram representasi dari fuzzyfikasi kecepatan .....	25
Gambar 2.21	Sistem kontrol logika <i>fuzzy</i> secara umum .....	27
Gambar 2.22	Struktur kontroler logika <i>fuzzy</i> dasar .....	27
Gambar 2.23	Inferensi <i>fuzzy</i> dengan metode MAX-MIN .....	30
Gambar 2.24	Inferensi <i>fuzzy</i> dengan metode MAX-DOT .....	30
Gambar 2.25	Fungsi implikasi MIN .....	31
Gambar 2.26	Fungsi implikasi DOT .....	32
Gambar 4.1	Skema loop tertutup <i>boiler</i> .....	37
Gambar 4.2	Diagram blok sensor- <i>transmitter</i> suhu .....	38
Gambar 4.3	Diagram blok sensor- <i>transmitter</i> ketinggian .....	39
Gambar 4.4	Diagram blok <i>boiler</i> .....	42



Gambar 4.5	FIS Editor: FLC .....	43
Gambar 4.6	<i>Membership function editor error</i> suhu untuk lima himpunan <i>fuzzy</i> .....	44
Gambar 4.7	<i>Membership function editor</i> level suhu untuk lima himpunan <i>fuzzy</i> .....	45
Gambar 4.8	<i>Membership function editor</i> CV bahan bakar untuk lima himpunan <i>fuzzy</i> .....	45
Gambar 4.9	<i>Membership function editor</i> CV air untuk lima himpunan <i>fuzzy</i> ....	46
Gambar 4.10	<i>Rule editor</i> untuk proses pengendalian suhu dan level .....	48
Gambar 5.1	Diagram blok sistem pengendalian dengan kontroler logika <i>fuzzy</i> ..	49
Gambar 5.2	Grafik <i>flow</i> bahan bakar pada sistem pengendalian suhu .....	49
Gambar 5.3	Grafik sinyal kontrol pada sistem pengendalian suhu .....	50
Gambar 5.4	Respon suhu pada sistem pengendalian suhu .....	50
Gambar 5.5	Grafik <i>flow</i> air pada sistem pengendalian ketinggian air .....	51
Gambar 5.6	Grafik sinyal kontrol pada sistem pengendalian ketinggian air .....	51
Gambar 5.7	Respon <i>level</i> pada sistem pengendalian ketinggian air .....	52
Gambar 5.8	Diagram blok sistem pengendalian dengan gangguan .....	52
Gambar 5.9	Gangguan berupa variasi perubahan suhu antara $-1.5^{\circ}\text{C}$ sampai dengan $1.5^{\circ}\text{C}$ .....	53
Gambar 5.10	Respon suhu pada sistem pengendalian dengan gangguan .....	53
Gambar 5.11	Gangguan berupa variasi perubahan ketinggian air antara $-0.06\text{ m}$ sampai dengan $0.06\text{ m}$ .....	54
Gambar 5.12	Respon ketinggian air pada sistem pengendalian dengan gangguan .....	54

## ABSTRAK

RONY SETIAWAN, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang, Januari 2007, Judul **”Perancangan Kontrol Logika Fuzzy Untuk Pengaturan Suhu dan Ketinggian Air Pada Boiler di PT. Camarin Eka Laksana Singosari Malang ”**

Dosen Pembimbing: Ir. Purwanto, MT dan Fitriana Suhartati, ST, MT.

---

---

Penggunaan *boiler* pada mesin *press* sangat signifikan perannya dalam industri karet karena kesalahan kerja *boiler* dapat mengakibatkan suhu yang dibutuhkan pada proses produksi tidak tercapai dan mengakibatkan gagalnya proses produksi, sehingga diperlukan kontroler untuk mengatur suhu dan ketinggian air pada *boiler*. Untuk mengatur suhu dan ketinggian air tersebut dapat dicapai dengan mengatur *flow* bahan bakar dan *flow* air. Kontrol logika *fuzzy* karena dianggap cukup baik dan andal untuk mengendalikan baik *plant* linier maupun yang tidak linier.

Sebelum perancangan kontroler harus dicari model matematis sistem untuk mengetahui persamaan karakteristiknya kemudian merancang *membership input* dan *output* lalu dibuat *rule-rulanya* dari pengalaman manusia atau *operator* dan dipilih metode defuzzifikasi yang digunakan. Untuk melihat performansinya diujikan ke sistem dengan dan tanpa gangguan.

Berdasarkan hasil simulasi dapat diambil kesimpulan bahwa sistem dikatakan baik karena dapat meminimalkan *error steady state* sampai dengan 0 % untuk pengendalian suhu dan ketinggian air tanpa gangguan dan 1.2 % untuk pengendalian suhu air dengan gangguan, 5.4 % untuk pengendalian ketinggian air dengan gangguan.



## BAB I PENDAHULUAN

### I. 1. Latar Belakang

Semakin hari, semakin tinggi tingkat kebutuhan manusia akan produk yang terbuat dari karet untuk digunakan dalam kebutuhan sehari-hari. Tingginya tingkat kebutuhan tersebut diimbangi dengan banyaknya jumlah pabrik karet yang ada. PT. Camarin Eka Laksana merupakan salah satu dari sekian banyak pabrik karet tersebut.

Produk yang dihasilkan oleh PT. Camarin Eka Laksana adalah selang gas, barang-barang karet dan matras karet. Semua produksi tersebut dibuat dengan bantuan mesin *press*. Untuk mencetak karet ini, diperlukan panas yang spesifik agar hasil pemrosesan bahan baku sesuai dengan produksi yang direncanakan. *Boiler* berfungsi mengirimkan *steam* kepada *matras press*. Karena pentingnya fungsi *boiler* ini, maka kesalahan kerja *boiler* dapat mengakibatkan suhu yang dibutuhkan pada proses produksi yaitu  $160 - 180\text{ }^{\circ}\text{C}$  tidak tercapai dan mengakibatkan gagalnya proses produksi. Sebab jika suhu terlalu rendah maka cetakan pada bahan baku karet akan tidak merata. Sebaliknya jika suhu terlalu tinggi maka hasil cetakan akan terlalu tipis dan mudah putus. Selama ini pengaturan suhu dan ketinggian air (tinggi yang diharapkan adalah 1,1 meter atau dua per tiga dari kapasitas penuh *boiler*) pada *boiler* dilakukan secara manual yaitu melalui pengamatan operator.

Ada beberapa sistem pengaturan yang digunakan dalam proses industri tetapi pada skripsi ini dipilih sistem kontrol logika *fuzzy*. Sistem pengendalian dengan teknologi analog yang telah teruji sampai saat ini adalah kontroler PID (*Proportional Integral Differential*). Dalam merancang kendali otomatis, maka model dari *plant* yang akan dikendalikan haruslah diketahui terlebih dahulu. Proses pemodelan sendiri biasanya sangat kompleks, memakan waktu yang lama, serta memiliki risiko dan biaya yang tidak sedikit. Sehingga *plant* sulit untuk dimodelkan dan didefinisikan.

Salah satu solusi sampai saat ini dianggap cukup baik dan andal adalah kontroler logika *fuzzy* (*fuzzy logic controller*) yang dikenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh yang merupakan operasi *JIKA-MAKA* (*IF-THEN*). Hal ini tidak lain adalah untuk penyempurnaan dari teknologi kontrol digital, sehingga dapat mengendalikan baik *plant* linier maupun yang tidak linier.

Mengacu pada permasalahan di atas dan belum adanya sistem yang mengendalikan suhu dan ketinggian air agar sesuai dengan yang dikehendaki maka



skripsi ini akan membahas tentang simulasi perancangan kontroler logika *fuzzy* sebagai sistem pengendali suhu dan ketinggian air pada *boiler*.

## I. 2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah ditekankan pada:

1. Bagaimana merancang kontroler logika *fuzzy* untuk mengendalikan suhu dan ketinggian air pada drum *boiler*?
2. Bagaimana mengevaluasi hasil perancangan untuk mengatasi gangguan dengan simulasi menggunakan simulink Matlab ?

## I. 3. Tujuan

Tujuan penulisan skripsi ini adalah mendesain kontrol logika *fuzzy* untuk pengaturan suhu dan ketinggian air pada *boiler* di PT Camarin Eka Laksana.

## I. 4. Batasan Masalah

Pada penyusunan skripsi ini, dilakukan pembatasan-pembatasan masalah sebagai berikut:

- a. Parameter sistem yang digunakan berdasarkan data-data yang diperoleh dari PT. Camarin Eka Laksana.
- b. Model matematik plant diasumsikan linier dan *time invariant* pada kondisi tertentu
- c. Analisis hasil perancangan berdasarkan hasil simulasi sistem menggunakan MATLAB.

## I. 5. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dipakai pada pembuatan skripsi ini adalah:

### Bab I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

## **Bab II Dasar Teori**

Bab ini berisi penjelasan mengenai *boiler* dan prinsip kerja-nya serta memuat teori tentang kontrol logika *fuzzy*.

## **Bab III Metodologi**

Bab ini berisi penjelasan mengenai metode yang digunakan dalam menyelesaikan permasalahan yang diangkat dalam skripsi ini.

## **Bab IV Pemodelan Sistem dan Perancangan Controller Logika Fuzzy**

Bab ini berisi pembahasan mengenai penurunan model matematis dari plant yaitu drum boiler dan perancangan controller logika *fuzzy* untuk mengendalikan *plant*.

## **Bab V Pengujian dan Simulasi**

Bab ini berisi tentang pengujian dan hasil simulasi sistem yang didapat setelah digunakannya controller logika *fuzzy*.

## **Bab VI Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari keseluruhan penyusunan skripsi ini.

## BAB II DASAR TEORI

### II.1 Definisi

Ada beberapa istilah yang perlu diketahui agar dapat mengerti tentang prinsip kerja *boiler* (Djokosetyardjo,2003), istilah tersebut antara lain:

1. *Boiler* : sebuah alat/mesin yang digunakan untuk mengubah energi yang terkandung dalam bahan bakar menjadi daya yang dibutuhkan dalam bentuk uap.
2. Uap kenyang : uap yang dalam keadaan seimbang (mempunyai pasangan harga tekanan dan temperature mendidih) dengan air yang ada di bawahnya.
3. Uap yang dipanaskan lanjut (*superheated steam*) : uap yang temperaturnya lebih tinggi daripada temperature air mendidih pada tekanan tertentu.
4. Pemanas lanjut uap (*superheater*) : alat untuk memanaskan uap kenyang menjadi uap yang dipanaskan lanjut.
5. *Ekonomizer* : alat untuk pemanas air awal.

### II.2 Klasifikasi *Boiler*

*Boiler*, yang dalam penulisan selanjutnya disebut ketel uap, diklasifikasikan menjadi 3 golongan utama (Djokosetyardjo,2003) yaitu:

1. Ketel-ketel pipa api dan lorong api.

Yaitu ketel-ketel api dan gas asap yang digunakan untuk memanasi air dan uap, akan melalui silinder api, lorong-lorong api, dan pipa-pipa ataupun tabung-tabung api, yang di bagian luarnya terdapat air atau uap.

Jenis ini adalah ketel-ketel uap kecil dan tergolong sederhana yang hanya mampu memproduksi uap maksimum sebanyak 10 ton uap per jam, dengan tekanan maksimum  $24 \text{ kg/cm}^2$ . Jadi tergolong untuk tekanan rendah.

Ketel-ketel ini umumnya mempunyai isi air yang cukup besar sehingga sering pula disebut ketel tangki.

Yang termasuk golongan ini antara lain:



- a. Ketel Cornwall dan ketel Lancashire.
- b. Ketel Schots dan ketel Schots kembar.
- c. Ketel Kombinasi dan variannya.
- d. Ketel Lokomotip dan ketel Lokomobil.
- e. Ketel-ketel Tegak, ketel Cochran dan variannya.

Umumnya ketel-ketel tersebut masih dapat dilayani dengan tangan (manual).

2. Ketel-ketel pipa air yang biasa.

Yaitu ketel-ketel air atau uap di dalam pipa-pipa atau tabung-tabung, yang dipanasi oleh api atau asap di bagian luarnya.

Ketel ini umumnya bertekanan sedang yaitu antara  $45 \text{ kg/cm}^2$  sampai dengan  $140 \text{ kg/cm}^2$ , dengan produksi uap mencapai 1000 ton uap per jamnya. Jenis ketel ini mempunyai efisiensi yang lebih besar daripada ketel-ketel pipa api dan umumnya sudah tidak dapat lagi dilayani dengan tangan (manual).

Yang termasuk golongan ini antara lain:

- a. Ketel Seksi dan variannya.
  - b. Ketel Yarrow dan variannya.
  - c. Ketel D atau ketel dengan dua drum.
  - d. Ketel Pancaran dan variannya.
3. Ketel-ketel pipa air dengan perencanaan khusus.

Ketel jenis ini direncanakan dengan maksud:

- Digunakan untuk tekanan tinggi melebihi  $225 \text{ kg/cm}^2$ .
- Dapat menggunakan bahan bakar nuklir.
- Dapat menggunakan air dengan kualitas agak rendah.
- Memperbesar beban tungku ketel atau perpindahan panasnya.

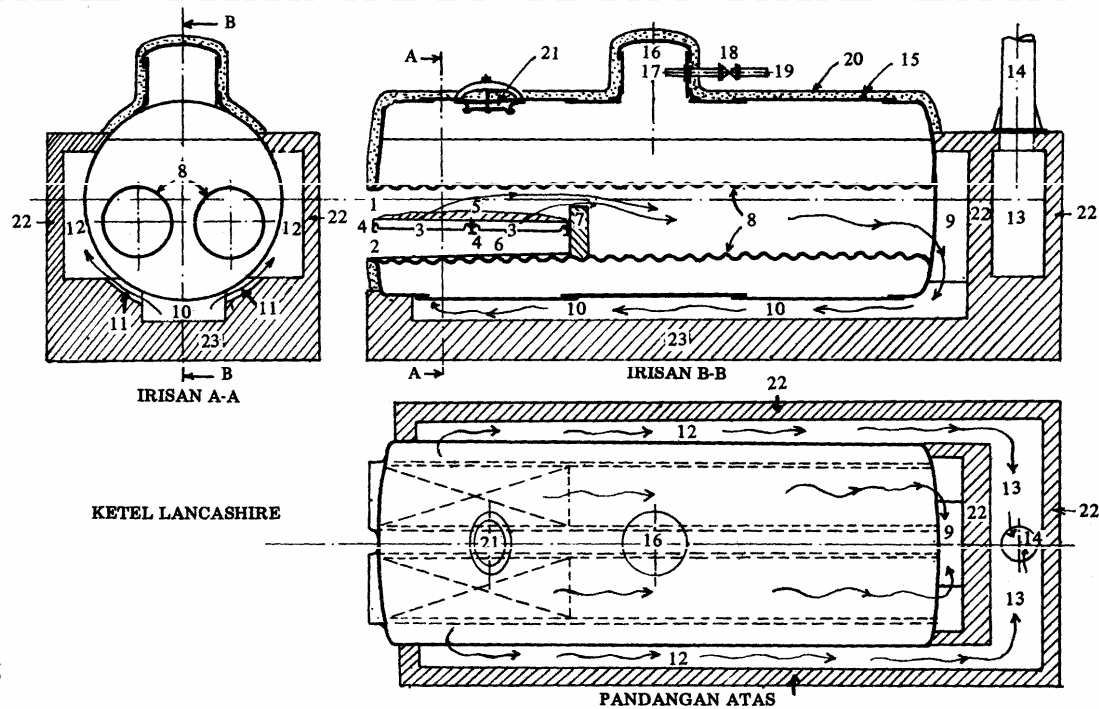
Yang termasuk golongan ini antara lain:

- a. Ketel Siklus Ganda dan variannya berupa reactor nuklir.
- b. Ketel untuk tekanan superkritis yaitu ketel Benson, ketel Sulzer, dan ketel Universal pressure boiler.
- c. Ketel Velox dan ketel-ketel dengan tungku bertekanan untuk memperbesar beban tungku atau perpindahan panasnya.
- d. Ketel Merkuri yang menggunakan air raksa.

Ketel jenis ini didesain untuk penyempurnaan ketel-ketel pipa air yang biasanya.

Karena boiler yang digunakan pada sistem ini adalah ketel dengan tekanan yang rendah, maka pembahasan dibatasi pada ketel-ketel pipa api.

### II. 2. 1 Ketel Cornwall dan Ketel Lancashire



**KETERANGAN GAMBAR KETEL LANCASHIRE:**

- 1 = Pintu bahan bakar.
- 2 = Pintu angin bawah = Pintu udara sekunder.
- 3 = Batang-batang rangka bakar.
- 4 = Penyangga batang-batang rangka bakar.
- 5 = Lapisan bahan bakar padat.
- 6 = Sumuran abu = Ash pit.
- 7 = Jembatan api = Fire bridge.
- 8 = Silinder api = Fire cylinder.
- 9 = Kotak api = Fire box.
- 10 = Kolong api.
- 11 = Saiuran atau seioakan api.
- 12 = Lorong api kiri/kanan.
- 13 = Kotak asap = Smoke box.
- 14 = Cerobong asap = Stack = Chimney.
- 15 = Tangki ketel = Drum ketel = Boiler vessel = Boiler drum.
- 16 = Dom uap = Steam dome.
- 17 = Pipa pengambilan uap kenyang.
- 18 = Keran uap = Steam valve.
- 19 = Uap kenyang menuju ke pemakaian.
- 20 = Isolasi panas.
- 21 = Lubang orang = Man hole.
- 22 = Tembokan ketel.
- 23 = Fondasi ketel.

Gambar 2.1. Ketel Lancashire

Sumber: Djokosetyardjo, 2003: 199-200

Api atau gas asap akan memanas bagian-bagian ketel uap dengan urutan sebagai berikut: mula-mula memanas silinder api dari belakang ke depan, kemudian





mencapai front depan drum ketel yang disebut kotak api, selanjutnya memanasi drum ketel sebelah bawah dari depan ke belakang, kemudian menyurut melalui selokan gas asap dan mencapai lorong api di sebelah kanan dan kiri drum ketel serta memanasi dinding drum ketel sebelah kanan dan kiri dari depan ke belakang.

Selama perjalanannya, temperatur api atau gas asap tersebut akan menurun sehingga temperatur air yang bersentuhan dengan dinding drum ketel sebelah bawah relatif lebih tinggi sedikit dibandingkan temperatur air yang berbatasan dengan dinding ketel sebelah kanan dan kiri.

Karena air yang panas relatif lebih ringan daripada air yang dingin, maka air yang panas akan naik ke permukaan sedangkan yang dingin akan turun ke bawah sehingga terjadi sirkulasi air pada drum ketel tersebut yang menyebabkan temperatur air akan merata di seluruh drum ketel.

Air pengisian ketel dipompakan ke dalam ketel melalui pipa berkerat gergaji sehingga air masuk merata ke seluruh permukaan. Kadang-kadang pipa berkerat ditempatkan di ruang uap di atas permukaan air, kadang-kadang di bawah permukaan air. Pada ketel Lancashire, pengisian air dilakukan di bawah permukaan air.

Salah satu sifat yang baik dari ketel Lancashire adalah kemungkinan orang untuk masuk ke dalamnya guna membersihkan kerak-kerak batu ketel.

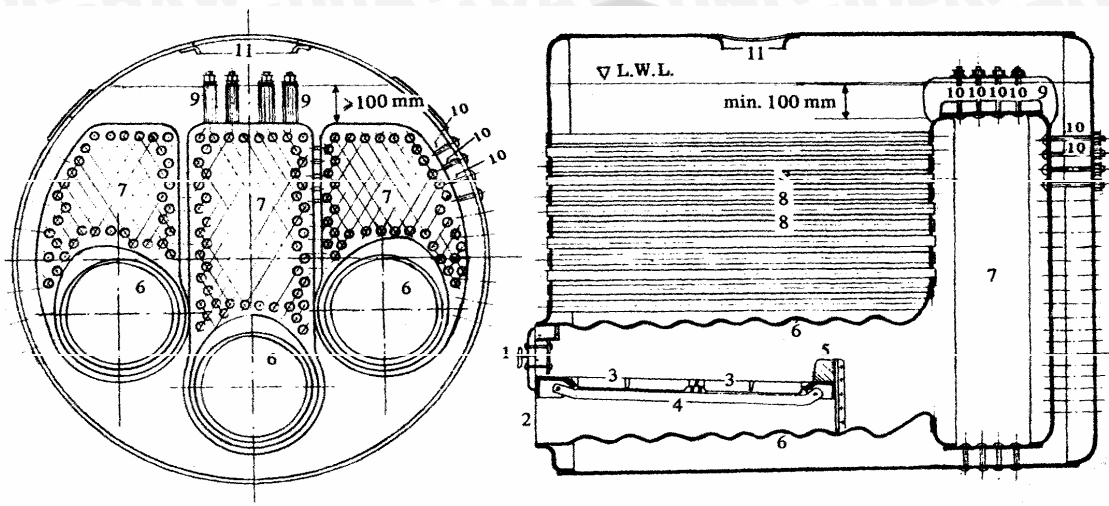
Bagian-bagian drum ketel yang tidak bersinggungan dengan gas asap, yaitu di bagian atas, diberi lapisan isolasi panas.

Di tengah-tengah drum ketel di bagian atas diberi kubah uap, dengan seluruh uap yang terbentuk dikumpulkan di situ. Corong pipa tempat pengambilan uap terletak di kubah uap tersebut.

Selama perjalanannya, gas asap setelah keluar dari silinder api dan mencapai kotak asap di bagian depan serta mencapai lorong-lorong api di sebelah kanan dan kiri drum ketel, sebagian dari gas asap tersebut hanya memanasi tembokan ketel saja sehingga tidak ada penyerahan panas pada daerah ini. Hal tersebut merupakan salah satu kelemahan dari drum ketel ini. (Djokosetyardjo, 2003:197-202)



## II. 2. 2 Ketel Schots dan Ketel Schots Kembar

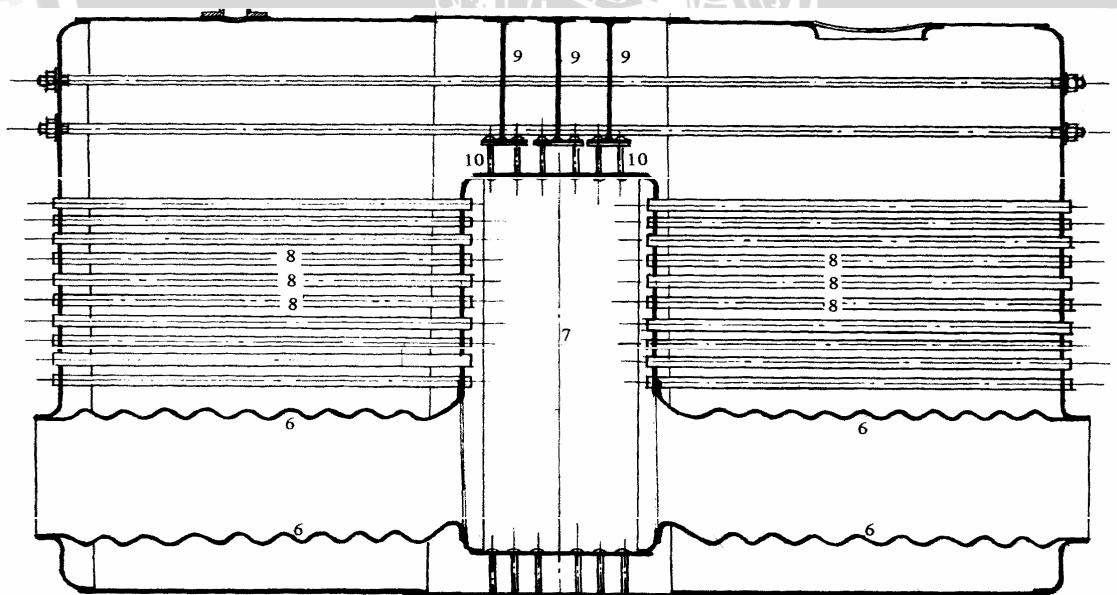


KETEL SCHOTS

KETERANGAN:

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| 1 = Pintu bahan bakar             | 6 = Silinder api                        |
| 2 = Pintu angin bawah             | 7 = Kotak api ( <i>Flame case</i> )     |
| 3 = Batang-batang rangka bakar    | 8 = Pipa-pipa api ( <i>Fire pipes</i> ) |
| 4 = Penyangga batang rangka bakar | 9 = Jembatan penunjang                  |
| 5 = Jembatan api                  | 10 = Baut-baut dan mur-mur penunjang    |
|                                   | 11 = Lubang orang ( <i>man hole</i> )   |

Gambar 2.2 Ketel Schots



Ketel Schots Kembar

KETERANGAN GAMBAR:

- |                  |                              |
|------------------|------------------------------|
| 6 = Silinder api | 8 = Pipa-pipa api            |
| 7 = Kotak api    | 9 = Pelat penunjang          |
|                  | 10 = Batang-batang penunjang |

Gambar 2.3. Ketel Schots Kembar

Sumber: Djokosetyardjo, 2003: 203,205

Jenis ketel ini direncanakan agar api atau gas asap selalu bersinggungan dengan dinding-dinding yang berbatasan dengan air atau uap.

Silinder api pada ketel ini bermuara pada kotak api yang terendam seluruhnya di dalam air dalam drum ketel.

Api dan gas asap mengalir dari rangka bakar yang terdapat di dalam silinder api, melalui silinder api sampai ke kotak api, dan dari kotak api melalui pipa-pipa api mencapai cerobong asap dan keluar melaluinya.

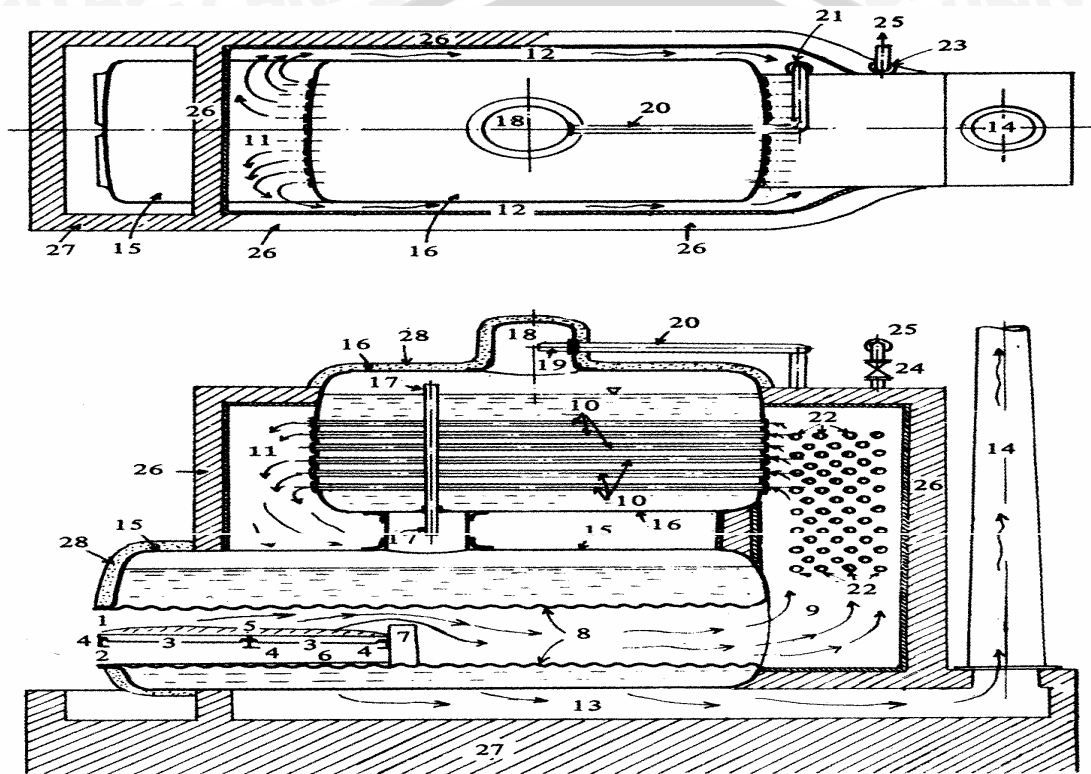
Untuk menghasilkan produksi uap yang besar, ketel Schots dapat dibuat kembar.

Kelemahan dari ketel ini adalah besarnya drum ketel yang memerlukan dinding yang tebal pula sehingga untuk kapasitas yang besar, ketel ini menjadi mahal.

(Djokosetyardjo, 2003:202-206)



### II. 2. 3 Ketel Kombinasi



**KETERANGAN GAMBAR KETEL KOMBINASI:**

- 1 = Pintu bahan bakar
- 2 = Pintu angin bawah = Pintu udara sekunder
- 3 = Batang-batang rangka bakar
- 4 = Penyangga batang-batang rangka bakar
- 5 = Lapisan bahan bakar padat
- 6 = Sumuran abu = Ash pit
- 7 = Jembatan api = Fire bridge
- 8 = Silinder api = Fire cylinder
- 9 = Kotak api = Fire box
- 10 = Pipa-pipa api = Fire pipes
- 11 = Kotak asap = Smoke box
- 12 = Lorong gas asap sebelah kanan dan kiri drum ketel
- 13 = Kolong gas asap = Flue gas canal
- 14 = Cerobong asap = Stack = Chimney
- 15 = Drum bawah = Lower drum = Lower vessel
- 16 = Drum atas = Upper drum = Upper vessel
- 17 = Pipa penghubung uap drum bawah ke drum atas
- 18 = Dom uap = Steam dome
- 19 = Pipa pengambilan uap kenyang dari dom uap
- 20 = Pipa uap kenyang menuju Pemanas lanjut uap
- 21 = Tabung pembagi uap kenyang = Saturated Steam Header
- 22 = Pipa-pipa Pemanas lanjut uap = Superheater's pipes
- 23 = Tabung pengumpul uap yang dipanaskan lanjut = Superheated Steam Header
- 24 = Keran uap utama = Main Steam Valve
- 25 = Uap yang dipanaskan lanjut menuju ke pemakaian
- 26 = Tembokan ketel
- 27 = Fondasi ketel

**Gambar 2.4.** Ketel Kombinasi



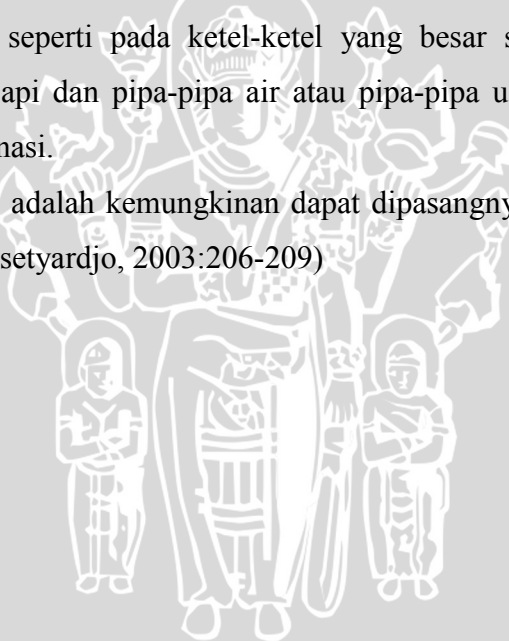
Sumber: Djokosetyardjo, 2003: 207

Ketel ini memerlukan dua buah drum ketel, yang satu di bawah dan yang satu lagi di atasnya. Silinder-silinder api ditempatkan khusus pada sebuah drum yaitu drum bawah, sedangkan pipa-pipa api ditempatkan khusus pada drum lainnya yaitu drum atas.

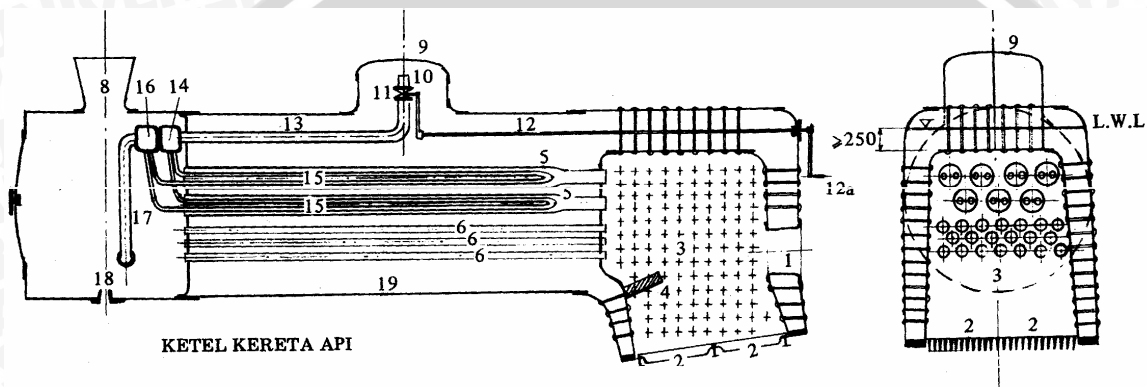
Seperti pada ketel lainnya, dalam silinder api terdapat rangka bakar untuk meletakkan bahan bakar padat di atasnya, atau di ujung silinder api tersebut dapat ditempatkan pembakar bila bahan yang digunakan adalah minyak bakar atau gas alam.

Untuk menghubungkan api atau gas asap dari silinder api di drum bawah dengan pipa-pipa api di drum atas, di bagian depan terdapat kotak api yang terbuat dari tembokan batu tahan api. Dalam kotak api ini dapat dipasang pemanas lanjut uap maupun pemanas air awal seperti pada ketel-ketel yang besar sehingga terdapat kombinasi antara pipa-pipa api dan pipa-pipa air atau pipa-pipa uap. Karena itulah ketel ini disebut ketel kombinasi.

Keuntungan ketel ini adalah kemungkinan dapat dipasangnya pemanas lanjut uap atau *ekonomiser*. (Djokosetyardjo, 2003:206-209)



## II. 2. 4 Ketel Lokomotip



**KETERANGAN:**

- |  |  |
|--|--|
| 1 = Pintu bahan bakar                      | 11 = Keran uap utama ( <i>Main steam valve</i> ) |
| 2 = Batang-batang rangka bakar             | 12 = Batang pengatur pengambilan uap             |
| 3 = Kotak api                              | 12a = Tuas ( <i>handle</i> ) pengatur            |
| 4 = Jembatan api                           | 13 = Pipa uap kenyang menuju superheater         |
| 5 = Tabung-tabung api ( <i>Fire tube</i> ) | 14 = Header (pembagi) uap kenyang                |
| 6 = Pipa-pipa api ( <i>Fire pipes</i> )    | 15 = Pipa-pipa superheater (pemanas lanjut)      |
| 7 = Kotak asap ( <i>Smoke box</i> )        | 16 = Header (pengumpul) uap dipanaskan           |
| 8 = Cerobong asap                          | 17 = Pipa uap yang dipanaskan - lanjut           |
| 9 = Dom uap ( <i>Steam dome</i> )          | 18 = Penghembus                                  |
| 10 = Pengambilan uap                       | 19 = Tangki ketel ( <i>Boiler vessel</i> )       |

Gambar 2.5. Ketel Lokomotip

Sumber: Djokosetyardjo, 2003: 210

Di bagian belakang ketel terdapat sebuah tungku yang merupakan kotak api dengan di bagian bawah tungku terdapat rangka bakar yang digunakan untuk membakar bahan bakar padat, kayu, atau batubara. Jika menggunakan bahan bakar minyak, dipasang pembakar.

Dari tungku api ini, api atau gas asap akan dialirkan ke depan melalui pipa-pipa api atau tabung-tabung api. Di dalam tabung-tabung api ditempatkan pipa-pipa pemanas lanjut uap.

Pada ujung depan ketel terdapat kotak asap tempat semua tabung-tabung api bermuara. Agak di bagian atas pada kotak asap ini terdapat sebuah tabung pembagi

uap kenyang yang mendapat uap kenyang dari kubah uap melalui sebuah pipa penyalur uap.

Dari tabung pembagi uap kenyang, uap kenyang dibagi dan disalurkan ke dalam pipa-pipa pemanas lanjut yang ditempatkan dalam tabung-tabung api sehingga pemanas lanjut memperoleh panasnya dari api atau gas asap dengan cara pancaran atau sebagian dari konveksi yaitu tempat yang lebih jauh dari tungku api.

Uap yang dipanaskan lanjut yang dihasilkan ketel ini akan melakukan ekspansi dalam turbin uap yang menggerakkan roda-roda lokomotif. Uap bekas setelah digunakan untuk menggerakkan turbin akan menuju corong penghembus. Gas asap yang terdapat pada kotak asap akan dihembus keluar oleh uap bekas melalui cerobong asap.

Bantuan hembusan uap bekas terhadap gas asap di kotak asap akan berarti memperbesar tarikan cerobongnya sehingga dapat dibakar bahan bakar yang lebih banyak di atas rangka bakar atau di dalam tungku kira-kira sebanyak dua kali dibandingkan ketel-ketel pipa api lainnya.

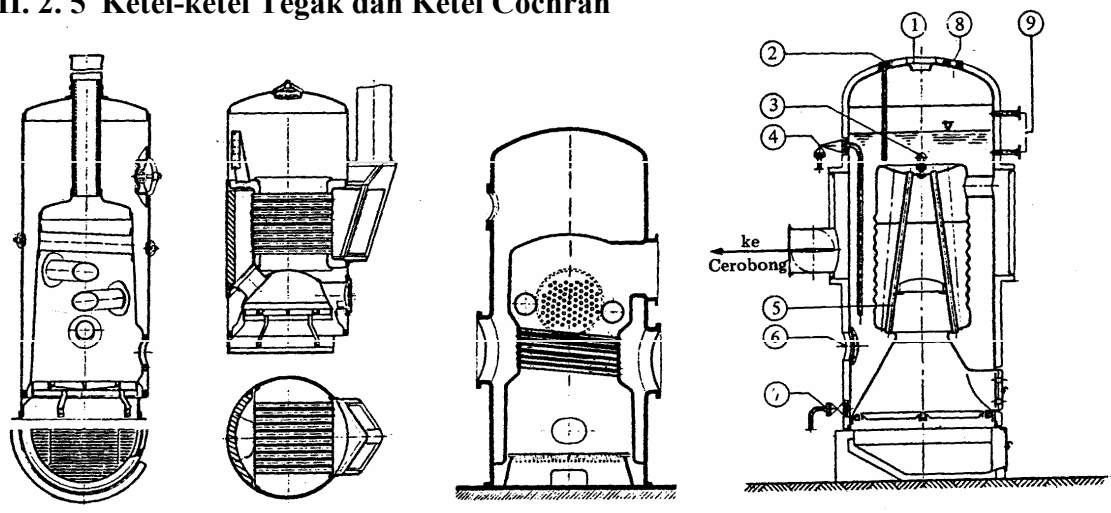
Pintu angin bawah menghadap ke depan sehingga bila lokomotif berjalan maju maka akan terjadi hembusan angin bawah yang makin besar, bila kecepatan lokomotif makin besar, akan membantu memperbesar tarikan cerobong. Dengan demikian, beban rangka bakar juga makin meningkat.

Keadaan ini sangat membantu fleksibilitas operasional penggunaan ketel uap pada lokomotif, yaitu makin bertambah beban ketel lokomotif, justru makin bertambah besar beban rangka bakarnya. Dengan kata lain, beban rangka bakar sebanding dengan kecepatan lokomotif. Tidak ada ketel yang fleksibel seperti ketel lokomotif ini.

Pada ujung paling depan, yaitu sebelah depan kotak asap, terdapat pintu yang dapat dibuka dengan maksud untuk membersihkan pipa-pipa api atau tabung-tabung api dari kotoran hasil pembakaran yang berupa abu. (Djokosetyardjo, 2003:209-213)



## II. 2. 5 Ketel-ketel Tegak dan Ketel Cochran



Gambar 2.6. Ketel-ketel Tegak dan ketel Cochran

Sumber: Djokosetyardjo, 2003: 215

Untuk jumlah produksi uap yang kecil, antara 0,2 sampai 1 ton uap per jam, digunakan ketel uap yang paling sederhana yaitu ketel-ketel tegak dan ketel Cochran. Ketel ini umumnya dipakai untuk melayani mesin-mesin pengangkat yang dapat dipindah-pindahkan.

Efisiensi ketel ini rendah tapi harganya sangat murah. Tekanan di dalam tangki ketel tidak lebih dari  $8 \text{ kg/cm}^2$ . (Djokosetyardjo, 2003:214)

## II. 3 Logika Fuzzy

Teorema *fuzzy set* (himpunan *fuzzy*) merupakan perkembangan dari teorema himpunan klasik. Teorema ini pertama kali diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Zadeh dari University of California at Berkeley, pada tahun 1965. Selama beberapa dekade

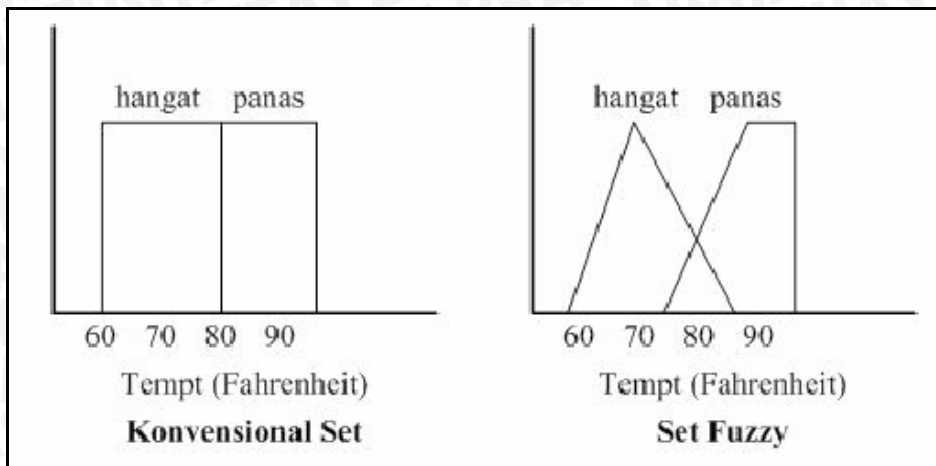
logika *fuzzy* telah digunakan pada lingkup domain permasalahan yang cukup luas. Lingkup ini antara lain mencakup pengendalian proses, klasifikasi, manajemen dan pengambilan keputusan, riset operasi, ekonomi dan lainnya (Kusumadewi, 2002:1).

Dalam perkembangannya, aplikasi teorema *fuzzy set* banyak digunakan dalam bidang sistem pengaturan, awalnya dipelopori oleh Prof. Ebrahim Mamdani dari Queen Mary College. Oleh Prof. Ebrahim Mamdani, teorema ini digunakan untuk mengatur berbagai proses pada tangki pencampur dan proses pada mesin uap, dalam skala laboratorium, hingga pada akhirnya dapat diterima masyarakat ilmiah sebagai terobosan di bidang kecerdasan buatan (Son Kuswadi, 2000:15).

Logika *fuzzy* dikatakan sebagai logika baru yang lama, sebab ilmu tentang logika *fuzzy* modern dan metodis baru ditemukan beberapa tahun lalu, padahal sebenarnya konsep tentang logika *fuzzy* itu sendiri sudah ada pada diri kita sejak lama (Kusumadewi, 2002:1).

Berbeda dengan teori himpunan klasik (*crisp*) yang berbasis *two valued logic*, teorema *fuzzy set* ini berdasarkan *multi valued logic*. Dalam teori himpunan berbasis *two valued logic*, derajat keanggotaan elemen-elemen dalam semesta pembicaraan memiliki dua kemungkinan nilai yaitu 0 atau 1. Suatu elemen adalah seluruhnya bagian dari suatu himpunan dengan nilai 1 atau tidak sama sekali jika bernilai nol. Tetapi, dalam teorema *fuzzy set*, derajat keanggotaan elemen-elemen dimungkinkan memiliki nilai bilangan real 0 sampai dengan 1. Dimana 0 didefinisikan sebagai salah dan 1 didefinisikan sebagai benar dan dimungkinkan ada nilai yang terletak di antara 0 sampai 1 sehingga dikenal adanya derajat kebenaran atau keanggotaan (Jun Yan, 1994:2).

Sebagai contoh, apakah 80 derajat Fahrenheit tergolong hangat atau panas? Dalam logika *fuzzy*, dan dalam dunia nyata, “kedua-duanya benar” mungkin merupakan jawabannya. Seperti yang terlihat pada grafik *fuzzy* pada gambar 2.7, 80 derajat adalah sebagian hangat dan sebagian panas dalam penggambaran set *fuzzy* (Mujahidin, 2004).

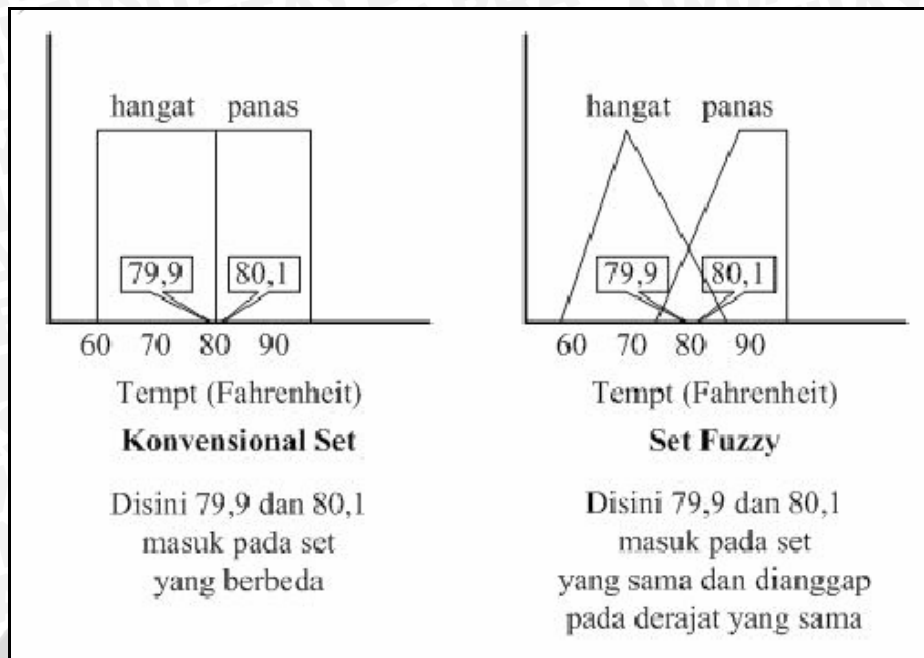


**Gambar 2.7** Konvensional set dan set *fuzzy* temperatur  
 Sumber: Mujahidin, 2004 : 4

Dalam logika klasik menggunakan set konvensional yang ditunjukkan gambar 2.8, 79,9 derajat dapat diklasifikasikan sebagai hangat, dan 80,1 derajat dapat diklasifikasikan sebagai panas. Perubahan kecil dalam sistem dapat menyebabkan perbedaan reaksi yang berarti. Dalam sistem *fuzzy*, perubahan kecil temperatur akan memberikan hasil perubahan yang tidak jelas pada kinerja sistem (Mujahidin, 2004).

Logika *fuzzy* mengenali tidak hanya *clear cut*, alternatif hitam dan putih, tapi juga tingkatan tak terbatas antara keduanya. Sebagai contoh temperatur 80 derajat Fahrenheit dapat diklasifikasikan antara daerah nol sampai satu sebagai panas pada tingkat 0,6. Nilai ini kemudian digunakan untuk menurunkan kepastian atau penyelesaian *crisp* terhadap masalah perancangan. Walaupun kelihatan kontradiksi dari namanya, logika *fuzzy* memberikan metode ketepatan yang dapat diandalkan dari persoalan pengambilan keputusan *crisp* (Mujahidin, 2004).

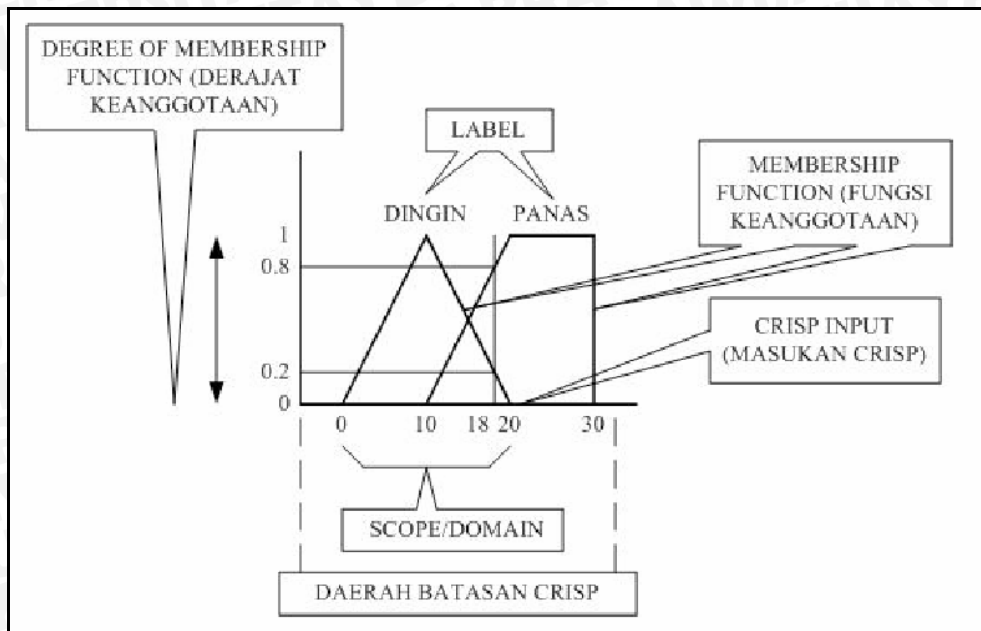




**Gambar 2.8** Pengklasifikasian suhu dalam konvensional set dan set *fuzzy* temperatur  
 Sumber: Mujahidin, 2004 : 4

Konsep dasar yang berhubungan dengan logika *fuzzy* dapat dilihat pada gambar 2.9 (Mujahidin, 2004). Derajat keanggotaan adalah derajat dimana nilai *crisp* sesuai dengan fungsi keanggotaan (dari 0 sampai 1), juga mengacu sebagai tingkat keanggotaan, nilai kebenaran, atau masukan *fuzzy*. Label adalah nama deskriptif yang digunakan untuk mengidentifikasi sebuah fungsi keanggotaan.

Fungsi keanggotaan adalah mendefinisikan *fuzzy* set dengan memetakan masukan *crisp* dari domainnya ke derajat keanggotaan. Masukan *crisp* adalah masukan numerik. Lingkup/domain adalah lebar fungsi keanggotaan. Daerah batasan *crisp* adalah jangkauan seluruh nilai yang mungkin dapat diaplikasikan pada variabel sistem.



**Gambar 2.9** Konsep dasar logika *fuzzy*  
 Sumber: Mujahidin, 2004 : 6

Sistem logika *fuzzy* adalah sistem yang didasarkan atas pengetahuan (*knowledge based*) atau sistem yang didasarkan atas kaidah-kaidah ataupun aturan-aturan (*rule base*). Inti dari sistem *fuzzy* adalah basis pengetahuan yang terdiri dari aturan-aturan yang dituliskan sebagai kumpulan pernyataan-pernyataan “jika-maka”. Logika *fuzzy* dipilih berdasarkan pertimbangan seperti (Kusumadewi,2002:3):

- a. Konsep logika *fuzzy* mudah dimengerti karena konsep penalaran *fuzzy* sangat sederhana.
- b. Logika *fuzzy* sangat fleksibel.
- c. Logika *fuzzy* dapat membangun dan mengaplikasikan pengalaman-pengalaman para pakar secara langsung tanpa harus melalui proses pelatihan.
- d. Logika *fuzzy* berdasarkan atas bahasa alamiah yang digunakan dalam kehidupan sehari-hari, sehingga mudah dimengerti dan dipahami.
- e. Logika *fuzzy* dapat bekerjasama dengan teknik-teknik kendali secara konvensional.

Dalam merancang kendali otomatis, maka model dari plant yang akan dikendalikan haruslah diketahui terlebih dahulu. Proses pemodelan sendiri biasanya sangat sulit, memakan waktu yang lama, memiliki risiko dan biaya yang tidak sedikit. Berdasarkan model yang diperoleh maka perancang akan melakukan perancangan kendali dengan teknik-teknik yang telah banyak dikemukakan para ahli teknik

kendali, seperti teknik tanggapan frekuensi, root locus, state space dan pengendali optimal. (Son Kuswadi, 2000: 1)

Akan tetapi teknik-teknik tersebut hanya terbatas untuk proses atau plant yang variasinya dari model linier. Tetapi banyak sekali proses yang modelnya tidak linier, kompleks dan sukar didefinisikan. Proses-proses tersebut pada kenyataannya bisa dikendalikan secara manual dengan hasil yang cukup baik. Operator kendali tersebut biasanya adalah tenaga terampil yang mengandalkan pengalaman praktis tanpa dilatarbelakangi teori pengendalian yang rumit. Hal ini disebabkan operator tersebut mengendalikan proses dengan dasar logika yang dibangun oleh pengalaman yang didapat dalam waktu lama. (Son Kuswadi, 2000: 4)

Oleh karena itu perancangan sistem kontrol otomatis untuk keperluan proses tersebut menggunakan metode yang memadai, dalam hal ini digunakan teori logika *fuzzy* sebagai basis kontrol perancangan kontroler.

Kontrol logika *fuzzy* dapat diaplikasikan pada sistem yang memiliki salah satu kriteria sebagai berikut (Jun Yan, 1994: 7):

1. Operasinya dilakukan secara manual atau berdasarkan pengalaman seseorang, sedangkan algoritma kontrol konvensional sulit didapatkan
2. Menggunakan kontroler dengan metode konvensional, tetapi tetap membutuhkan operator untuk pengaturan
3. Dioperasikan secara manual
4. Sistemnya sangat kompleks
5. Sistemnya tidak linier
6. Membutuhkan pemodelan sistem dan hal tersebut sulit untuk dilakukan

Pendekatan logika *fuzzy* juga dapat digunakan dengan metode konvensional, misalnya digunakan untuk mengubah besarnya parameter dari PID kontroler. Sehingga kontrol logika *fuzzy* adalah suatu peralatan yang digunakan untuk mengganti atau untuk digunakan bersama dengan metode lain.

Secara umum kontroler logika *fuzzy* mempunyai kemampuan (Son Kuswadi, 2000:38):

1. Beroperasi tanpa campur tangan manusia secara langsung, memiliki efektifitas yang sama dengan manusia.
2. Mampu memecahkan masalah sistem yang kompleks dan non linier.
3. Memenuhi spesifikasi operasional dan kriteria kinerja.
4. Strukturnya sederhana, kuat dan beroperasi *real time*



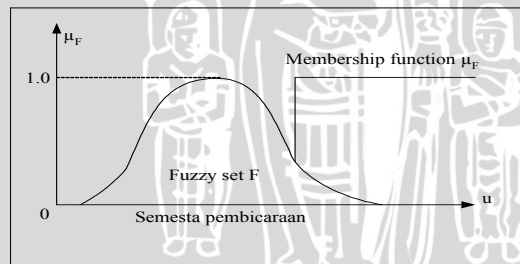
Perancangan pengendalian logika *fuzzy* menggabungkan aspek pendefinisian himpunan *fuzzy* dan aspek logika *fuzzy* untuk memperoleh suatu sistem kontrol yang dapat beroperasi layaknya seorang operator ahli, sehingga dikenal dengan sistem kendali cerdas. Kemampuan lainnya adalah dapat mengolah data dengan batasan yang kabur (*fuzzy*) untuk mendapatkan keputusan yang akurat (Son Kuswadi, 2000).

Kontrol logika *fuzzy* biasanya terdiri dari: (Jun Yan, 1994: 7)

1. Unit fuzzifikasi yang digunakan untuk memetakan masukan yang dalam bentuk *crisp* menjadi bentuk *fuzzy*.
2. Basis pengetahuan dimana merupakan kumpulan dari aturan pengendalian yang diperlukan untuk mencapai tujuan pengendali.
3. Mekanisme operasi *fuzzy* dimana mengolah masukan *fuzzy* yang diberikan.
4. Unit defuzzifikasi yang merubah bentuk *fuzzy* ke bentuk *crisp*.

### II. 3 .1 Himpunan *Fuzzy*

Jika  $U$  adalah kumpulan objek-objek yang dilambangkan  $\{u\}$ , maka  $U$  dinyatakan sebagai semesta pembicaraan, dan  $u$  adalah elemen dari  $U$ . Himpunan *fuzzy*  $F$  dalam semesta pembicaraan  $U$  dikarakterisasi dengan fungsi keanggotaan  $\mu_F$ .  $\mu_F$  memiliki kemungkinan nilai dalam interval  $[0,1]$ , seperti diperlihatkan pada gambar 2.10 (Jun Yan, 1994:16).



**Gambar 2.10** Himpunan *fuzzy* dan fungsi keanggotaannya  
 Sumber : Jun Yan, 1994 :16

Himpunan *fuzzy*  $F$  dalam semesta pembicaraan  $U$ , adalah kumpulan elemen  $u$  dengan fungsi keanggotan  $\mu_F$  (Jun Yan, 1994:16) :

$$F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U \} \tag{2-1}$$

1)

Jika  $U$  adalah kontinyu, maka himpunan *fuzzy*  $F$  dapat dinyatakan sebagai :

$$F = \int u \mu_F(u) / u \tag{2-2}$$

2)

Jika U adalah diskrit, maka himpunan *fuzzy* F dapat dinyatakan sebagai :

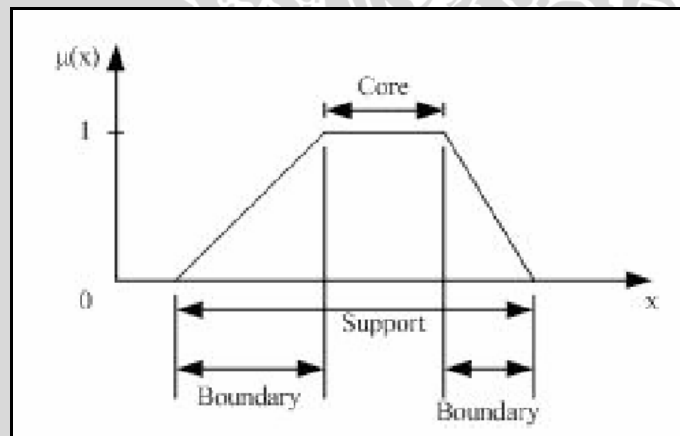
$$F = \sum \mu_F(u_i) / u_i \quad (2-3)$$

Himpunan  $\alpha$ -cut dari himpunan *fuzzy* F, dilambangkan  $F_\alpha$ , adalah kumpulan elemen u dalam semesta pembicaraan U, dimana  $\mu_F(u) \geq \alpha$ . Maka dapat dikatakan bahwa himpunan  $\alpha$ -cut mengabaikan semua elemen dengan besar derajat keanggotaan lebih kecil dari  $\alpha$ .

### II. 3. 2 Fungsi Keanggotaan *Fuzzy*

Fungsi keanggotaan menotasikan nilai kebenaran anggota himpunan. Interval nilai yang digunakan yaitu nol dan satu. Tiap fungsi keanggotaan memetakan elemen himpunan crisp ke semesta himpunan *fuzzy* (G. Klir dan Bo Yuan, 1995: 11).

Pada himpunan *fuzzy*, semua informasi terkandung dalam fungsi keanggotaannya. Bagian-bagian pada fungsi keanggotaan *fuzzy* terdiri dari inti (*core*), penyangga (*support*), dan batas-batas (*boundaries*), seperti pada gambar 2.11



Gambar 2.11 Bagian-bagian pada fungsi keanggotaan  
Sumber : Timothy J Ross, 1995: 88

Inti (*core*) didefinisikan sebagai daerah semesta yang ditandai oleh derajat keanggotaan satu.

$$\mu_A(x) = 1 \quad (2-4)$$

Penyangga (*support*) didefinisikan sebagai daerah semesta yang ditandai oleh derajat keanggotaan tidak sama dengan nol.

$$\mu_A(x) \neq 0 \quad (2-5)$$

5)

Batas-batas (*boundaries*) didefinisikan sebagai daerah semesta yang memiliki elemen-elemen yang derajat keanggotaannya tidak nol atau satu.

$$0 < \mu_A(x) < 1 \tag{2-}$$

6)

Fungsi keanggotaan ditentukan secara subyektif dan intuitif, pemilihan fungsi keanggotaan akan mempengaruhi sistem *fuzzy* secara keseluruhan (Son Kuswadi, 2000: 20). Fungsi keanggotaan yang biasa digunakan adalah sebagai berikut:

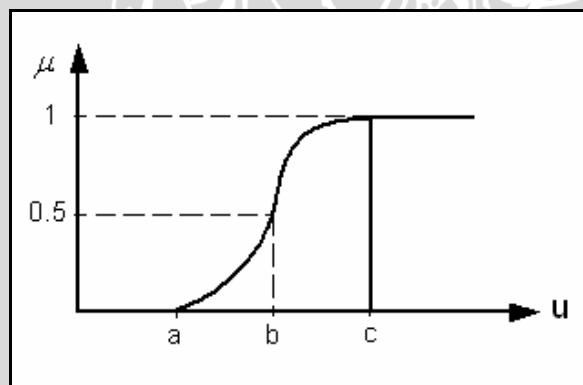
1. Fungsi keanggotaan bentuk S.

Definisi fungsi-S adalah sebagai berikut :

$$S(u,a,b,c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ 2\left(\frac{u-a}{c-a}\right)^2 & a \leq u \leq b \\ 1-2\left(\frac{c-u}{c-a}\right)^2 & b \leq u \leq c \\ 1 & u > c \end{cases} \quad b = \frac{(a+c)}{2} \tag{2-}$$

7)

Fungsi keanggotaan bentuk S ditunjukkan pada gambar 2.12



Gambar 2.12 Fungsi keanggotaan bentuk S  
Sumber : Jun Yan, 1994 :18

2. Fungsi keanggotaan bentuk π

Definisi Fungsi-π adalah sebagai berikut :

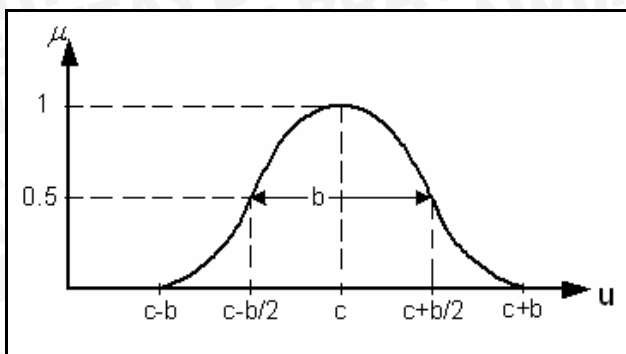
$$\pi(u; b, c) = \begin{cases} S(u; c-b, c-\frac{b}{2}, c) & u \leq c \\ 1-S(u; c, c+\frac{b}{2}, c+b) & u \geq c \end{cases} \tag{2-}$$

8)

Fungsi keanggotaan bentuk π ditunjukkan pada gambar 2.13







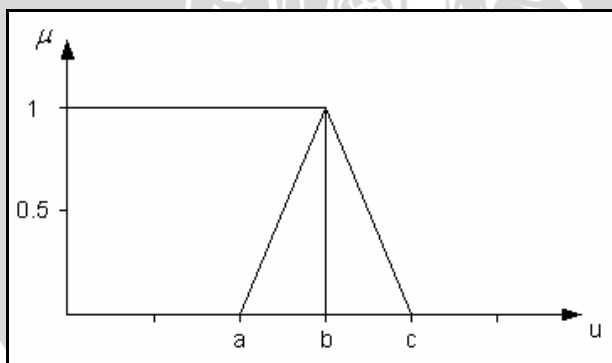
**Gambar 2.13** Fungsi keanggotaan bentuk  $\pi$   
 Sumber : Jun Yan, 1994 :19

3. Fungsi keanggotaan bentuk Triangular.

Definisi Fungsi Triangular sebagai berikut :

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ \frac{c-u}{c-b} & b \leq u \leq c \\ 0 & u > c \end{cases} \quad (2-9)$$

Fungsi keanggotaan bentuk Triangular ditunjukkan pada gambar 2.14



**Gambar 2.14** Fungsi keanggotaan bentuk T  
 Sumber : Jun Yan, 1994 :19

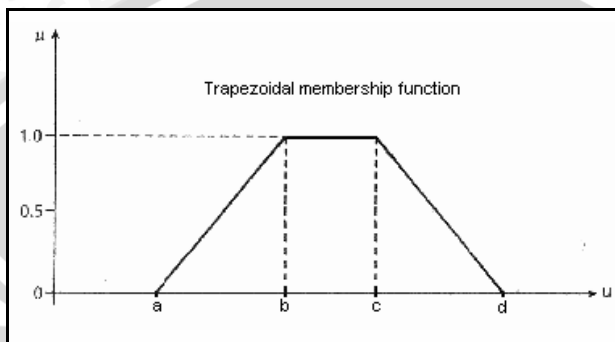
4. Fungsi keanggotaan bentuk Trapezium.

Definisi Fungsi Trapezium sebagai berikut :

$$T(u; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & u < a \\ \frac{u-a}{b-a} & a \leq u \leq b \\ 1 & b \leq u \leq c \\ \frac{d-u}{d-c} & c \leq u \leq d \\ 0 & u > d \end{cases} \quad (2-10)$$

10)

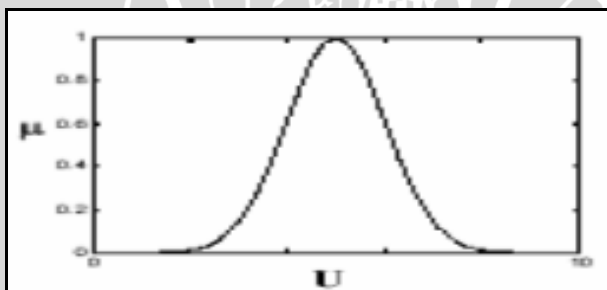
Fungsi keanggotaan bentuk Trapesium ditunjukkan pada gambar 2.15



Gambar 2.15 Fungsi keanggotaan bentuk Trapesium  
Sumber : Kusumadewi, 2002 :34

### 5. Fungsi keanggotaan bentuk Gaussian

Grafik fungsi keanggotaan berbentuk gaussian dapat ditunjukkan pada gambar 2.16 :



Gambar 2.16 Fungsi keanggotaan bentuk Gaussian  
Sumber : Kusumadewi, 2002 :52

### II. 3. 3 Operasi Himpunan Fuzzy

Operasi dasar yang digunakan dalam himpunan fuzzy A dan B pada semesta himpunan X dengan fungsi keanggotaan  $\mu_A$  dan  $\mu_B$  terdiri dari gabungan, irisan, dan komplemen, operasi dasar yang berlaku didefinisikan sebagai berikut (Jun Yan, 1994:20):

#### a. Gabungan (union)

Gabungan himpunan fuzzy A dan B didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cup B} = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \text{maks}\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2-$$

12)

Operasi gabungan diperlihatkan pada gambar 2.17

b. Irisan (*intersection*)

Irisan dua himpunan *fuzzy* A dan B didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu_{A \cap B} = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2-$$

13)

Operasi irisan diperlihatkan pada gambar 2.18.

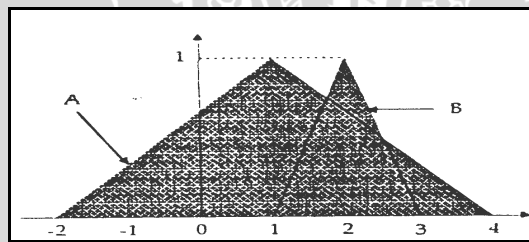
c. Komplemen (*complement*)

Komplemen himpunan *fuzzy* A dinotasikan sebagai  $\bar{A}$ . Operasi komplemen didefinisikan sebagai :

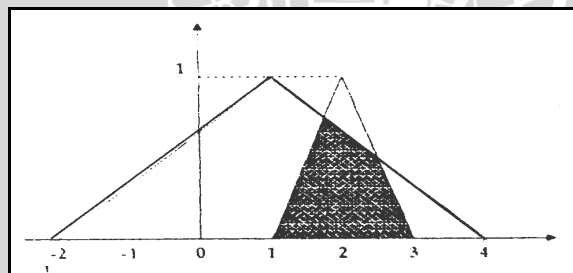
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2-$$

14)

Operasi komplemen himpunan *fuzzy* A diperlihatkan dalam gambar 2.19

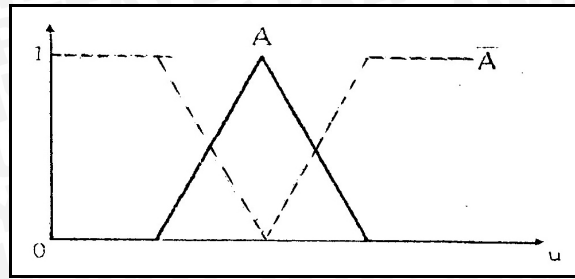


**Gambar 2.17** Contoh operasi gabungan himpunan *fuzzy* A dan B  
 Sumber : Timothy J Ross, 1997 : 27



**Gambar 2.18** Contoh operasi irisan himpunan *fuzzy* A dan B  
 Sumber : Timothy J Ross, 1997 : 27





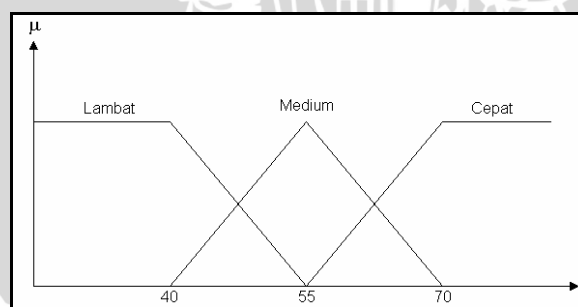
Gambar 2.19 Contoh operasi komplement himpunan fuzzy A  
 Sumber : Timothy J Ross, 1997 : 28

### II. 3. 4 Variabel Linguistik (*Linguistic Variable*)

Variabel linguistik adalah variabel yang menggunakan kata-kata sebagai nilainya. Variabel linguistik ini berupa ungkapan-ungkapan yang bersifat kualitatif dan berfungsi untuk menyatakan himpunan fuzzy.

Himpunan fuzzy memiliki nilai kebenaran yang dinyatakan dalam bentuk informasi linguistik, seperti sangat lambat, lambat, sedang, agak cepat, cepat dan sebagainya sebagai variabel, yang disebut variabel fuzzy. Variabel linguistik dapat dipandang sebagai variabel yang nilainya merupakan bilangan fuzzy atau sebagai variabel yang nilai-nilainya didefinisikan dalam bentuk linguistik.

Sebagai contoh, lambat didefinisikan sebagai kecepatan di bawah 40 m/jam, medium sebagai kecepatan 55 m/jam dan cepat sebagai kecepatan di atas 70 m/jam, maka fungsi keanggotaan dengan kecepatan sebagai variabel linguistik dengan tiga variabel fuzzy: lambat, medium dan cepat yang ditunjukkan pada gambar 2.20



Gambar 2.20 Diagram representasi dari fuzzyfikasi kecepatan  
 Sumber : Kuswadi 2000 : 23

### II. 3. 5 Kaidah Atur (*Rule Evaluation*)

Kaidah atur yang digunakan dalam logika fuzzy berupa kaidah atur “If-Then” (Jun Yan, 1994:30). Aturan “If” menunjukkan situasi sedangkan aturan “Then” menunjukkan aksi. Aturan “If” disebut antiseden sedangkan “Then” disebut konsekuen (Kuswadi, 2000:36). Antiseden ini menunjukkan daerah masukan yang

dikarakteristikan dalam semesta himpunan variabel masukan. Bentuk umum dari aturan logika *fuzzy* ini sebagai berikut,

*If* (kondisi), *Then* (aksi) (2-15)

Tujuan utama dari *fuzzy knowledge base* adalah (Jun Yan, 1994 : 31):

1. Menyediakan pengalaman seorang ahli dengan tepat.
2. Menyediakan cara yang mudah bagi perancang untuk membuat dan memprogram aturan *fuzzy*.
3. Mengurangi biaya dari desain.

Pada proses penurunan-penurunan aturan *fuzzy* sendiri ada empat cara yaitu (Son Kuswadi, 2000:7):

1. dari pengetahuan “expert” maupun diturunkan dari ilmu rekayasa yang bersesuaian
2. dari sifat/kemampuan operator, yang direkam dan kemudian dilakukan analisis untuk menemukan aturan-aturan tersebut
3. dari penurunan berdasar model *fuzzy* dari sistem atau proses
4. dari pembelajaran

### II. 3. 6 Mekanisme Penalaran Aproksimasi (*Approximate Reasoning*)

Prinsip-prinsip dasar dari penalaran dengan logika *fuzzy* berawal dari pernyataan logika yang selalu bernilai benar, disebut Tautologi. Tautologi yang umum dikenal seperti yaitu *Generalized Modus Ponens* (GMP) atau *direct reasoning* dan *Generalized Modus Tollens* (GMT) atau disebut juga *indirect reasoning* (Kuswadi, 2000:35).

Pada logika *fuzzy* yang sering diekspresikan dalam bentuk “if-then” disebut juga *fuzzy relation*. Sebuah *fuzzy relation* R dapat juga disebut *fuzzy implication* (Jun Yan, 1994:29). Jika himpunan *fuzzy* dinotasikan dengan A, A', B, B' dan variabel linguistik dinotasikan dengan x dan y, maka GMP dan GMT dapat dinyatakan sebagai berikut (Jun Yan, 1994:30):

#### a. Generalized Modus Ponens (GMP)

Pernyataan 1 (aturan) : Jika x adalah A maka y adalah B



Pernyataan 2 (fakta) : x adalah A'

Penyelesaian / kesimpulan : y adalah B'

Dalam hal ini penyelesaian B' dapat dinotasikan dengan

$$B' = A' \bullet R \quad (2-16)$$

dengan R adalah relasi *fuzzy* dari implikasi *fuzzy* yang mewakili pernyataan pertama, tanda  $\bullet$  adalah operator komposisi.

#### b. Generalised Modus Tollens (GMT)

Pernyataan 1 (aturan) : Jika x adalah A maka y adalah B

Pernyataan 2 (fakta) : y adalah B'

Penyelesaian / kesimpulan: x adalah A'

Dalam hal ini penyelesaian A' dapat dinotasikan dengan :

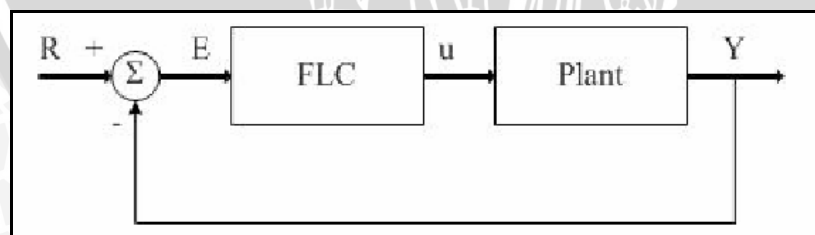
$$A' = R \bullet B' \quad (2-17)$$

dengan R adalah relasi *fuzzy* dari implikasi *fuzzy* yang mewakili pernyataan pertama.

## II. 4 Kontrol Logika Fuzzy

Kontroler logika *fuzzy* menggunakan himpunan, aturan kontrol dan mekanisme inferensi *fuzzy* untuk menentukan aksi kontrol pada *plant*. Kontroler logika *fuzzy* merupakan kontrol dengan *loop* tertutup. Sistem kontrol logika *fuzzy* secara umum dapat dilihat pada gambar 2.21.

R adalah masukan atau *set point* sistem. Variabel dari sistem terdiri dari dua jenis yaitu variabel masukan (E) atau *error* yang merupakan masukan dari kontrol logika *fuzzy* dan variabel keluaran (U) yang digunakan oleh kontrol logika *fuzzy* untuk melakukan aksi kontrol terhadap *plant*. Y adalah keluaran *plant* (Jun Yan, 1994:46).

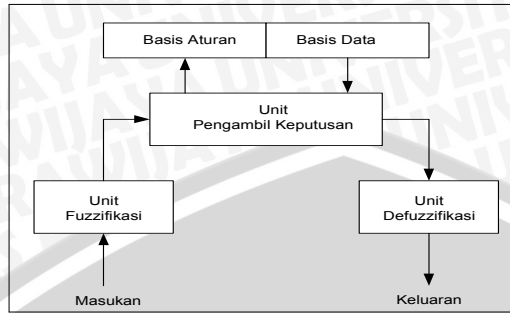


Gambar 2.21 Sistem kontrol logika *fuzzy* secara umum  
Sumber : Jun Yan, 1994 :46

Elemen utama kontroler logika *fuzzy* terdiri dari unit fuzzifikasi, unit mekanisme pengambil keputusan (inferensi), unit defuzzifikasi, dan unit basis pengetahuan. Basis pengetahuan dibagi dua yaitu basis data untuk menentukan fungsi



keanggotaan himpunan *fuzzy* pada masing-masing variabel dan basis aturan untuk memetakan nilai *fuzzy* dari masukan ke nilai keluaran (Jun Yan, 1994:46). Struktur kontroler logika *fuzzy* dasar diperlihatkan dalam gambar 2.22.



**Gambar 2.22** Struktur kontroler logika *fuzzy* dasar  
Sumber : Jun Yan,1994 :47

Nilai keluaran ke dan dari kontroler berbentuk *crisp*, operator fuzzifikasi memetakan *crisp* ke dalam bentuk *fuzzy* dan operator defuzzifikasi memetakan *fuzzy* ke dalam bentuk *crisp*. Kaidah atur untuk menentukan aksi kontrol ditentukan dengan menggunakan kaidah atur pendekatan tabel.

Kontrol logika *fuzzy* adalah sistem berbasis aturan (*rule based sistem*) yang didalamnya terdapat himpunan aturan *fuzzy* yang mempresentasikan mekanisme pengambilan keputusan. Aturan yang dibuat digunakan untuk memetakan variabel *input* ke variabel *output* dengan pernyataan *If-Then* (Jun Yan, 1994:47).

#### II. 4. 1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan proses pemetaan dari himpunan non *fuzzy* (variabel numerik) ke variabel *fuzzy* (variabel linguistik). Nilai-nilai masukan yang masih dalam bentuk numerik sebelum diolah oleh pengendali *fuzzy* harus diubah terlebih dahulu ke dalam bentuk variabel *fuzzy*. Melalui fungsi keanggotaan yang telah disusun maka dari nilai-nilai masukan tersebut menjadi informasi *fuzzy* yang berguna nantinya (Kuswadi 2000: 33).

Proses fuzzifikasi dapat diekspresikan sebagai berikut (Jun Yan, 1994:49):

$$x = \text{fuzzifier}(x_0) \tag{2-}$$

18)

dengan :  $x_0$  = vektor nilai *crisp* variabel masukan

$x$  = vektor himpunan *fuzzy* variabel yang terdefinisi

*fuzzifier* = operator fuzzifikasi yang memetakan himpunan *crisp* ke himpunan *fuzzy*

Untuk masukan data *crisp*, tujuan dari fuzzifikasi adalah (Jun Yan, 1994: 47):

1. Mendapatkan nilai dari variabel masukan
2. Memetakan nilai *crisp* dari variabel masukan ke semesta pembicaraan
3. Mengubah data yang dipetakan ke bentuk *fuzzy* singleton jika diperlukan, atau mengubah ke variabel linguistik yang tepat yang telah ditentukan

Bentuk-bentuk himpunan *fuzzy* yang sering digunakan adalah bentuk segitiga dan trapesium karena mudah dalam penerapan dan proses penentuan derajat keanggotaannya tidak membutuhkan waktu yang lama atau singkat karena sifatnya yang linier (Timothy J Ross, 1995). Pada representasi linier, permukaan digambarkan sebagai suatu garis lurus. Bentuk ini paling sederhana dan menjadi pilihan yang baik untuk mendekati suatu konsep yang kurang jelas (Kusumadewi, 2002:30).

Pada pemilihan jumlah, bentuk, dan range dari fungsi keanggotaan tidak bersifat mengikat, tetapi bersifat subjektif. Pedoman memilih fungsi keanggotaan untuk proses *fuzzifikasi*, menurut Jun Yan, menggunakan (Jun Yan, 1994: 49):

1. Himpunan *fuzzy* dengan distribusi simetris.
2. Gunakan himpunan *fuzzy* dengan jumlah ganjil, pemilihan sebaiknya 5 atau 7.
3. Mengatur himpunan *fuzzy* agar saling menumpuk.
4. Menggunakan fungsi keanggotaan bentuk segitiga atau trapesioda.

## II. 4. 2 Inferensi *Fuzzy*

Inferensi adalah proses untuk mendapatkan aksi keluaran dari suatu masukan dengan mengikuti aturan-aturan (*rule*) yang telah ditetapkan. Keputusan yang dihasilkan dari proses ini masih dalam bentuk *fuzzy*, yaitu berupa derajat keanggotaan.

Algoritma *fuzzy* harus selalu dapat untuk menentukan aksi kontrol untuk semua nilai masukan. Hal tersebut mencakup beberapa hal antara lain pengalaman desain, pengetahuan teknik, dan juga *overlapping fuzzy set* untuk memastikan bahwa semua masukan akan menghasilkan tanggapan atau aksi keluaran (Jun Yan, 1994: 53).

Jika jumlah dari *fuzzy set* untuk tiap variabel masukan dilambangkan sebagai  $m$  dan jumlah dari variabel masukan sistem dengan  $n$ , maka dibutuhkan  $m^n$  aturan



yang berbeda. Misalnya, jika jumlah dari *fuzzy set* dari tiap variabel masukan sistem adalah tujuh dan jumlah variabel masukan adalah tiga, maka  $7^3 = 343$  aturan dibutuhkan. (Jun Yan, 1994: 53).

Untuk menarik kesimpulan dari masukan *fuzzy* diperlukan basis pengetahuan dan basis data (himpunan-himpunan *fuzzy*) melalui suatu proses yang disebut proses inferensi *fuzzy*. Beberapa metode inferensi *fuzzy* yang berdasarkan komposisi yang sering digunakan di dunia industri yaitu metode Maksimum-Minimum (MAX-MIN) dan Maksimum-Perkalian (MAX-DOT) (Jun Yan, 1994: 54):

Bentuk umum kaidah atur *fuzzy* dua masukan dan satu keluaran, yaitu :

$R_1$  : Jika x adalah  $A_1$  dan y adalah  $B_1$  maka z adalah  $C_1$

$R_2$  : Jika x adalah  $A_2$  dan y adalah  $B_2$  maka z adalah  $C_2$

$R_i$  : Jika x adalah  $A_i$  dan y adalah  $B_i$  maka z adalah  $C_i$

Bentuk umum diatas x, y, z adalah variabel linguistik yang merepresentasikan dua variabel keadaan proses dan satu variabel pengendalian .  $A_i, B_i, C_i$  adalah nilai variabel linguistik x, y, z pada semesta U, V, W.

Ada beberapa metode *inferensi fuzzy* yang paling sering atau umum digunakan pada industri yaitu (Jun Yan, 1994: 54):

a). Metode Maksimum-Minimum (MAX-MIN)

Pada metoda penalaran MAX-MIN fungsi keanggotaan konsekuen dinyatakan dengan:

$$\mu_C(W) = [ \alpha_1 \wedge \mu_{C_1}(w) ] \vee [ \alpha_2 \wedge \mu_{C_2}(w) ] \quad (2-20)$$

Dimana :  $\alpha_1 = \mu_{A_1}(x_0) \wedge \mu_{B_1}(y_0)$

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

dengan  $\alpha_i = \mu_{A_i}(x_0) \wedge \mu_{B_i}(y_0)$

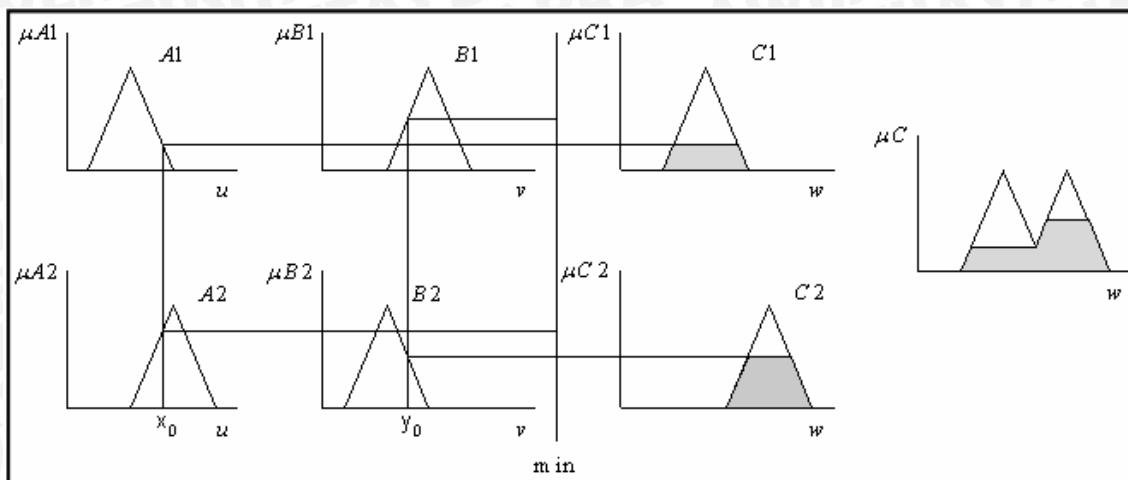
Sebagai contoh, terdapat dua basis kaidah atur *fuzzy*, yaitu :

$R_1$  : Jika x adalah  $A_1$  dan y adalah  $B_1$  maka z adalah  $C_1$

$R_2$  : Jika x adalah  $A_2$  dan y adalah  $B_2$  maka z adalah  $C_2$

Lebih jelas metode ini dideskripsikan dalam gambar 2.23.





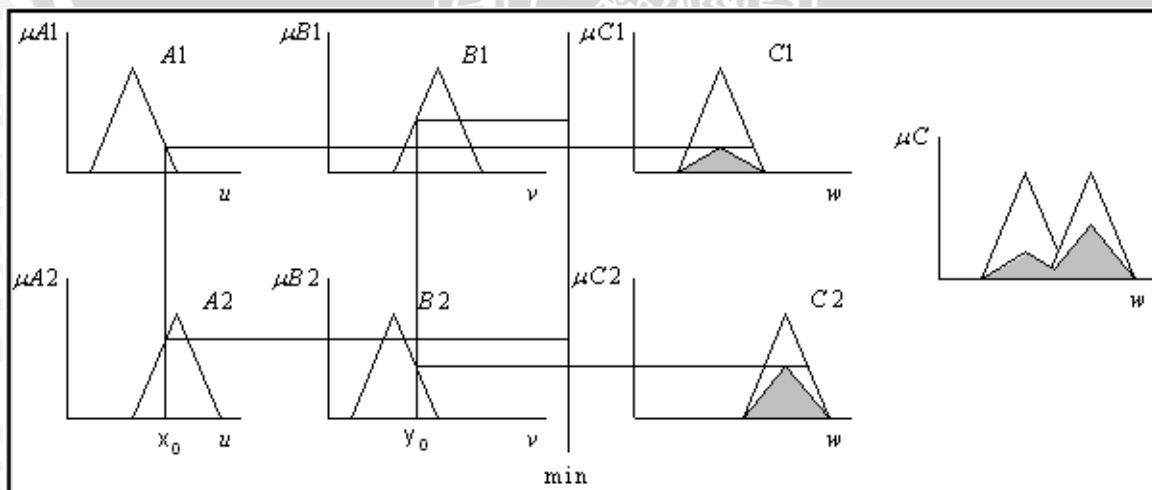
**Gambar 2.23** Inferensi *fuzzy* dengan metode MAX-MIN  
 Sumber: Jun Yan, 1994 : 55.

b). Metode Maksimum-Perkalian (MAX-DOT)

Metode ini juga menggunakan nilai  $\alpha$  seperti pada inferensi Maksimum-Minimum, namun keanggotaan C sebagai hasil inferensi adalah nilai maksimum dari perkalian nilai keanggotaan masing-masing variabel masukan pada bagian antesiden. Metode MAX-DOT fungsi keanggotaan konsekuen C dinyatakan dengan

$$\mu_c(\omega) = (\alpha_1 \cdot \mu_{c1}(\omega)) \vee (\alpha_2 \cdot \mu_{c2}(\omega)) \quad (2-21)$$

Metode penalaran MAX-DOT diperlihatkan dalam gambar 2.24



**Gambar 2.24** Inferensi *fuzzy* dengan metode MAX-DOT  
 Sumber : Jun Yan, 1994 : 55

Kaidah *Fuzzy* Jika-Maka (*Fuzzy Rules*)

Tiap-tiap aturan (proposisi) pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan .

Ada dua jenis proposisi *fuzzy*, yaitu (Kusumadewi, 2002):

1. *Conditional fuzzy proposition*

Jenis ini ditandai dengan penggunaan pernyataan IF. Secara umum:

IF  $x$  is  $A$  THEN  $y$  is  $B$

dengan  $x$  dan  $y$  adalah skalar, dan  $A$  dan  $B$  adalah variabel linguistik. Proposisi yang mengikuti IF disebut anteseden, sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan penghubung *fuzzy*, seperti:

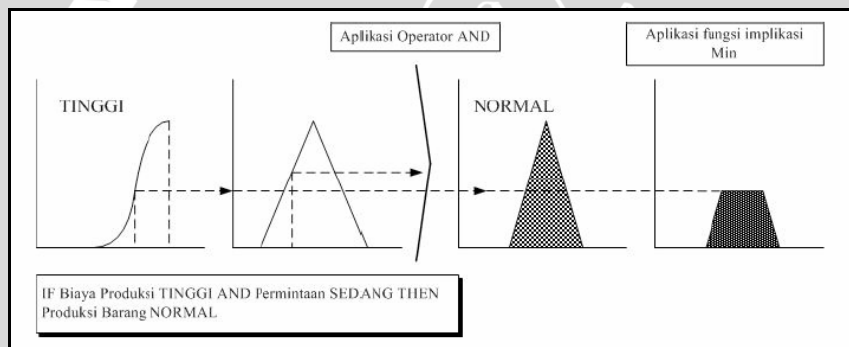
IF ( $x_1$  is  $A_1$ ) . ( $x_2$  is  $A_2$ ) . ( $x_3$  is  $A_3$ ) . . . . ( $x_n$  is  $A_n$ ) THEN  $y$  is  $B$

dengan  $\bullet$  adalah operator (misal OR atau AND).

Apabila suatu proposisi menggunakan bentuk terkondisi, maka ada dua fungsi implikasi yang dapat digunakan, yaitu:

a) Min (*minimum*).

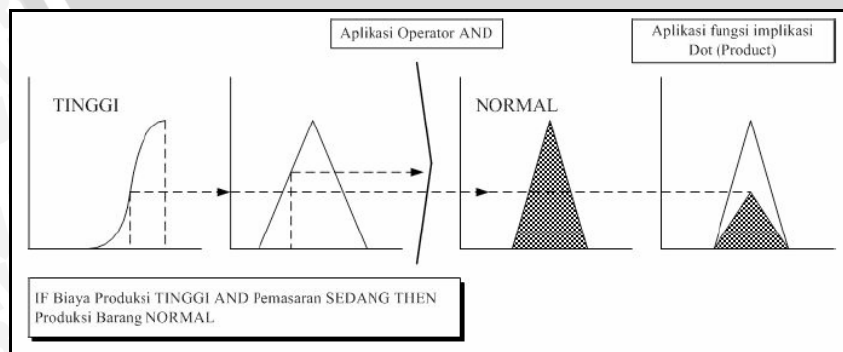
Fungsi ini akan memotong output himpunan *fuzzy*. gambar 2.25 menunjukkan salah satu contoh penggunaan fungsi min.



Gambar 2.25 Fungsi implikasi MIN  
Sumber: Kusumadewi, 2002 : 90

b) Dot (*product*).

Fungsi ini akan menskala output himpunan *fuzzy*. gambar 2.26 menunjukkan salah satu contoh penggunaan fungsi dot.



Gambar 2.26 Fungsi implikasi DOT  
Sumber: Kusumadewi, 2002 : 90

## 2. Unconditional fuzzy proposition

Jenis ini ditandai dengan tidak digunakannya pernyataan IF. Secara umum:

$x$  is  $A$

dengan  $x$  skalar, dan  $A$  adalah variabel linguistik.

Proposisi yang tak terkondisi selalu diaplikasikan dengan model AND, tergantung pada bagaimana proposisi tersebut diaplikasikan, bisa membatasi daerah output, bisa juga mendefinisikan daerah solusi (jika tidak ada aturan terkondisi yang dieksekusi).

### II. 4. 3 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan proses pemetaan himpunan *fuzzy* ke himpunan *crisp*. Proses ini merupakan kebalikan dari proses fuzzifikasi berfungsi untuk mengubah variabel keluaran yang masih berupa derajat keanggotaan ke dalam sinyal keluaran variabel numerik (*non fuzzy*) (Kuswadi 2000: 33).

Proses defuzzifikasi dapat diekspresikan sebagai berikut (Jun Yan, 1994: 55):

$$y_0 = \text{defuzzifier}(y) \quad (2-22)$$

dengan :

$y$  = aksi kontrol *fuzzy*.  
 $y_0$  = aksi kontrol *crisp*.  
defuzzifier = operator defuzzifikasi.

Dua metode defuzzifikasi yang umum digunakan adalah (Son Kuswadi, 2000: 37):

#### a) Metode rata-rata maksimum (*Mean of Maximum*) MOM

Metode MOM disebut pula sebagai defuzzifikasi tinggi, aksi kontrol mewakili aksi kontrol yang fungsi keanggotaan mencapai maksimum (Jun Yan, 1994: 56). Nilai *crisp* yang dihasilkan oleh operasi MOM adalah :

$$v_0 = \sum_{j=1}^J \frac{v_j}{J} \quad (2-$$

$$23) \quad v_j = \max_{v \in V} \mu_v(v)$$



dengan :

$v_0$  = nilai keluaran

$J$  = jumlah harga maksimum

$v_j$  = nilai keluaran maksimum ke- $j$

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

$V$  = semesta pembicaraan

### b) Metode pusat luasan (*Center of Area*) COA

Metode COA menghasilkan aksi kontrol pada pusat berat distribusi. Metode ini merupakan metode yang paling umum dan sering digunakan dalam penerapan logika *fuzzy*. Adapun dapat didefinisikan sebagai:

$$v_0 = \frac{\sum_{k=1}^m v_k \mu_v(v_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_v(v_k)} \quad (2-24)$$

24)

dengan :

$v_0$  = nilai keluaran

$m$  = tingkat kuantisasi

$v_k$  = elemen ke- $k$

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

$V$  = semesta pembicaraan

Beberapa alasan penggunaan dari metode *Center of Area* (COA) adalah sebagai berikut (Kusumadewi, 2002:98):

1. Nilai *defuzzy* bergerak secara perlahan sehingga perubahan dari suatu keadaan himpunan *fuzzy* ke bentuk lainnya berjalan dengan halus.
2. Mudah dihitung sehingga dapat menghemat waktu untuk pengambilan keputusan.

## BAB III METODOLOGI

### III.1. Rancangan Penelitian

Untuk merealisasikan tujuan yang ingin dicapai dalam penulisan tugas akhir ini, langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

#### III.1.1. Pengambilan Data

Data yang dikumpulkan diperoleh dari PT. Camarin Eka Laksana Singosari. Baik berupa *manual book* maupun dari data yang dikumpulkan langsung dari lapangan. Data-data tersebut meliputi sistem yang akan diteliti, parameter-parameter, dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut.

#### III.1.2. Menentukan Model Matematis Sistem

Langkah-langkah yang dilakukan untuk mendapatkan model matematis sistem antara lain adalah sebagai berikut:

- menentukan sistem yang akan diteliti dan komponen-komponen yang menyusun sistem tersebut.
- setelah diketahui komponen-komponen penyusun sistem beserta parameter-parameternya, maka sistem dapat dimodelkan menjadi sebuah persamaan matematis.

#### III.1.3. Perancangan Kontrol Logika *Fuzzy*

Menentukan parameter-parameter yang berkaitan dalam perancangan logika fuzzy. Parameter-parameter tersebut dapat berupa metode fuzzifikasi, inferensi, maupun defuzzifikasi. Dimana fungsi dari pengendali fuzzy adalah mengatur besarnya suhu dan ketinggian air pada *boiler*.

Adapun proses fuzzifikasi digunakan untuk mengubah variabel *non fuzzy* menjadi variabel *fuzzy*. Nilai masukan *non fuzzy* akan dikuantisasi terlebih dahulu ke dalam variabel *fuzzy* sehingga didapat derajat fungsi keanggotaan. Metode fuzzifikasi yang digunakan adalah menggunakan fungsi keanggotaan segitiga yang simetris.

Inferensi *fuzzy* merupakan proses untuk mendapatkan aksi keluaran dari suatu kondisi masukan dengan mengikuti aturan-aturan (*rule*) yang telah ditetapkan. Metode inferensi *fuzzy* yang akan digunakan menggunakan metode max-min. Aturan-

aturan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk “*if-then*” yang merupakan relasi dari *fuzzy*. Banyaknya aturan *fuzzy* sendiri bisa disusun dari beberapa *rule-rule*.

Setelah melalui proses inferensi diperoleh keputusan yang berupa variabel *fuzzy* sehingga perlu diubah menjadi variabel *non fuzzy*. Untuk mengubah variabel *fuzzy* menjadi harga keluaran *non fuzzy* diperlukan proses defuzzifikasi. Metode defuzzifikasi yang digunakan pada tugas akhir ini berupa metode COA (*Center of Area*).

#### III.1.4. Simulasi Sistem

Simulasi sistem dilakukan dengan menggunakan fasilitas-fasilitas yang tersedia pada perangkat lunak program MATLAB, antara lain *simulink* dan *control toolbox*. Dari hasil simulasi tersebut, dapat dibandingkan respon sistem dengan kontroler logika *fuzzy* dengan dan tanpa gangguan.

#### III.2. Cara Kerja Penelitian

Dalam usaha untuk mencapai tujuan dan menjawab rumusan masalah dalam skripsi ini, dilakukan tahap-tahap pengerjaan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Untuk menganalisa masalah kontrol pada plant, dilakukan dengan menghimpun informasi dari buku-buku yang berkaitan. Buku-buku tersebut sebagian besar diperoleh dari perpustakaan pusat Universitas Brawijaya, perpustakaan jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Sedangkan untuk pengambilan data parameter sistem, digunakan data sekunder yang berasal dari penelitian sebelumnya.

2. Pemodelan sistem dan perancangan kontroler.
3. Melakukan simulasi dan menganalisa hasil simulasi sistem.
4. Menarik kesimpulan.



## BAB IV

### PEMODELAN SISTEM DAN PERANCANGAN KONTROLER

#### IV.1 Definisi

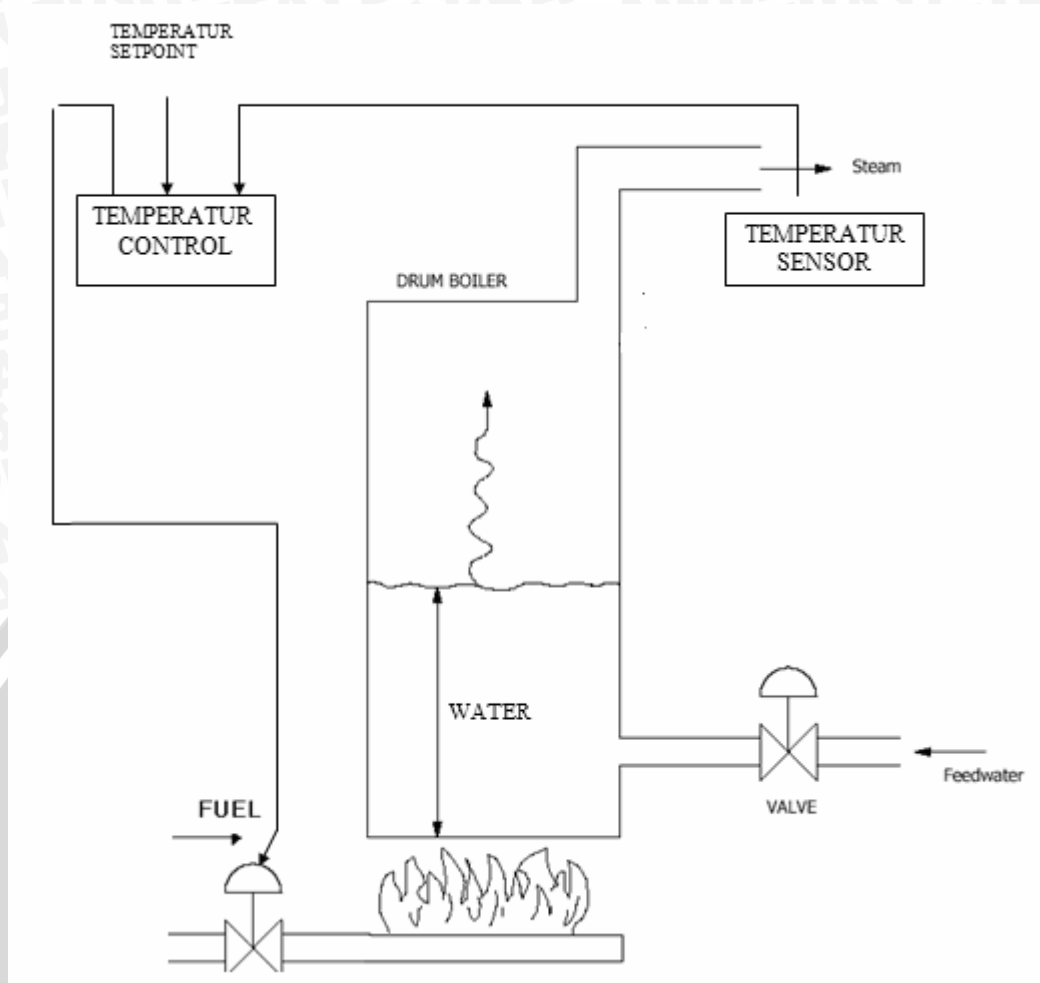
Pemodelan adalah upaya untuk menyatakan sistem dari bentuk fisik menjadi bentuk persamaan matematika. Untuk tujuan itu, dilakukan upaya dengan menyusun hubungan-hubungan fisik dari sistem sesungguhnya. Bagian terpenting dari model matematis sistem adalah persamaan karakteristik. Persamaan karakteristik sistem menentukan kelakuan (respon) sistem tersebut. Kelakuan (respon) sistem dapat diamati dari kurva hasil simulasi model matematis sistem. Langkah berikutnya adalah proses validasi, yang bertujuan untuk membuktikan valid atau tidaknya model matematis tersebut. Pada tahap ini, data hasil simulasi tersebut dibandingkan dengan data dari sistem sebenarnya. Jika kedua data tersebut tidak signifikan perbedaannya, maka dapat dianggap bahwa model matematis dapat mewakili sistem fisik yang sebenarnya. Sehingga sistem dapat dianalisis melalui model matematisnya.

Dalam proses penurunan model matematis sistem, terdapat tiga macam cara pendekatan yang dapat dipergunakan. Yang pertama adalah menyajikan model matematis sistem dengan menggunakan persamaan diferensial. Yang kedua adalah dengan menggunakan pendekatan fungsi alih (*transfer function*), dan yang ketiga adalah pendekatan ruang-keadaan (*state-space*). Dalam masalah kendali *fuzzy* akan lebih menguntungkan jika menggunakan pendekatan fungsi alih.

#### IV.2 Pemodelan Sistem

Sistem *boiler* terdiri dari beberapa komponen yang menyusunnya. Komponen-komponen tersebut antara lain adalah *valve* dan *drum boiler*. Skema loop tertutup sistem ditunjukkan pada Gambar 4.1.

Penjelasan dari skema loop tertutup tersebut adalah sebagai berikut: bahwa suhu *steam* yang diperlukan untuk proses produksi adalah  $160 - 180^{\circ} \text{C}$ , dikontrol dengan mengatur aliran bahan bakar boiler. Air baru kembali dialirkan ke dalam boiler sebagai pengganti air yang berkurang akibat penguapan. Sistem bekerja pada  $P = 10$  bar. Air masuk dengan suhu  $30^{\circ} \text{C}$ .



Gambar 4.1 Skema loop tertutup boiler

Sumber: Perancangan

Model matematis sistem diperlukan untuk simulasi yang bertujuan untuk mendapatkan respon dinamik sistem. Langkah pertama untuk mendapatkan model matematis sistem adalah dengan mencari persamaan matematis untuk setiap komponen yang menyusun sistem tersebut.

#### IV.2.1 Model Matematis Sensor dan Transmitter

Pada industri proses dan kebanyakan industri lain, komponen sensor dan transmitter umumnya terdapat dalam satu kesatuan. Sensor/transduser adalah suatu elemen/alat yang langsung mengadakan kontak dengan variabel yang diukur dan mampu menerima sinyal dalam bentuk suatu besaran dan mengubahnya menjadi besaran lain.

Termometer hambatan adalah salah satu jenis sensor suhu yang terbuat dari beberapa bahan yang berfungsi sebagai hambatan listrik dan merupakan fungsi dari suhu. Termometer hambatan didasarkan pada prinsip bahwa hambatan suatu bahan meningkat seiring dengan peningkatan temperatur bahan itu.

Pada aplikasi di industri diperlukan sensor suhu dengan sensitivitas tinggi, respon cepat, tahan terhadap kontaminasi dari bahan lain, dan keakuratan yang tinggi. Kawat platina mempunyai daya hambat tinggi yang perubahannya hampir linier dengan temperatur. Sebagai tambahan, platina adalah logam mulia, yang mana berarti bahwa non-aktif dengan kebanyakan reaksi kimia. Dengan kelebihan ini, termometer hambatan dari bahan platina menjadi suatu standard internasional untuk pengukuran temperatur.

Hubungan tahanan-suhu untuk elemen yang terbuat dari bahan platina, seperti termometer hambatan yang dipakai pada sistem ini, dalam matematik merupakan hubungan yang linier, dalam suatu model matematis, hanya berupa sebuah konstanta penguatan, dari sensor-transmitter ke elemen pengendali.

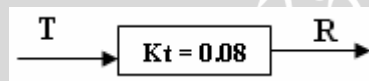
Gain penguatan sensor-transmitter didefinisikan sebagai  $K = \frac{span_{output}}{span_{input}}$

(Gunterus, 1997: 3-29). Dari data teknis diperoleh bahwa  $\Delta T$  (span) adalah bahwa  $0^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$  memberi kesetaraan arus listrik  $4 - 20 \text{ mA}$ .

Sehingga:  $span = (200 - 0)^{\circ}\text{C}$   
 $= 200^{\circ}\text{C}$

didapatkan  $K_t = \frac{16}{200} = 0,08 \text{ mA}/^{\circ}\text{C}$

dan diagram blok menjadi seperti pada Gambar 4.2 :



Gambar 4.2 Diagram blok sensor-transmitter suhu

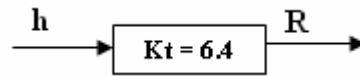
Demikian pula untuk sensor ketinggian, gain penguatan sensor-transmitter didefinisikan sebagai  $K = \frac{span_{output}}{span_{input}}$ . Dari data teknis diperoleh bahwa  $\Delta h$  (span) adalah bahwa  $0 - 2,5 \text{ m}$  memberi kesetaraan arus listrik  $4 - 20 \text{ mA}$ .

Sehingga:  $span = (2,5 - 0) \text{ m}$   
 $= 2,5 \text{ m}$



didapatkan 
$$K_t = \frac{16}{2,5} = 6,4 \text{ mA/m}$$

Bentuk diagram blok *transmitter* ketinggian ditunjukkan pada gambar 4.3:



Gambar 4.3 Diagram blok *sensor-transmitter* ketinggian

#### IV.2.2 Model Matematis Katup (*Valve*)

Katup kendali terdiri dari sebuah divais pneumatik (*motor valve*) yang menggerakkan tangkai (*stem*) katup sebagai fungsi tekanan pada perubahan sekat rongga. Batang memposisikan suatu sumbat (*steker*) pada mulut pegangan katup. Ketika tekanan meningkat, sumbat bergerak ke bawah dan membatasi aliran cairan yang melewati klep itu.

Karakteristik aliran katup adalah hubungan antara prosentase laju aliran dan prosentase terbukanya katup, dimana bukaan katup bervariasi antara 0 – 100%, di mana pengaturan laju aliran dikerjakan oleh bagian yang berputar setelah mendapat gaya dari kontroler. Katup digunakan sebagai elemen pengendali akhir yang langsung mengubah variabel manipulasi berdasarkan sinyal yang diterima dari kontroler.

Dalam proses ini terdapat 2 (dua) *valve* untuk mengatur variabel manipulasi, yaitu *valve water* dan *valve fuel*. Fungsi alih masing-masing *valve* adalah sebagai berikut :

- *Valve water*

Fungsi alih *valve water* ini merupakan sistem orde satu yang secara umum diberikan

oleh :

$$\frac{F(s)}{U(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s + 1} \dots\dots\dots(4.1)$$

Sumber: Coughanowr, 1991: 124-127

dimana  $F(s)$  = laju aliran massa, kg/s

$U(s)$  = Sinyal kendali elektrik, mA

$G_T$  = Gain total *valve water*

$T_{CV}$  = konstanta waktu dari *valve water*, detik

Konstanta waktu *valve* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$T_{CV} = T_V(\Delta V + R_V) \dots\dots\dots(4.2)$$

dengan  $T_V$  = *time stroke*

$\Delta V$  = fraksi perubahan posisi *valve water*

$$= \frac{flow_{max} - flow_{min}}{flow_{max}} = \frac{1,6 - 0,258}{1,6} = 0,839$$

$R_V$  = perbandingan konstanta waktu dengan *time stroke*

( $R_V = 0,3$  untuk aktuator piston dan  $R_V = 0,03$  untuk aktuator diafragma)

Karena sinyal kendali elektrik, sedangkan katup kendali hanya menerima sinyal pneumatik, sehingga untuk menjalankan *valve* tersebut sinyal keluaran melalui transduser I/P diubah dari 4-20 mA menjadi 3-15 Psi atau 0,2-1 kg/cm<sup>2</sup>. Maka didapat gain transduser sebagai berikut:

$$K_T = \frac{Span_{output}}{Span_{input}} = \frac{15 - 3Psi}{20 - 4mA} = 0,75 \text{ Psi/mA}$$

Penguatan *valve* untuk karakteristik aliran linier adalah:

$$K_V = \frac{flow_{max}}{Perubahan_{masukan}} = \frac{1,6kg/s}{12Psi} = 0,133kg/dt.Psi$$

Sehingga penguatan total *valve*:

$$G_T = K_T \times K_V = 0,75 \times 0,133 = 0,1kg/dt.mA$$

dan konstanta waktu *valve*:

$$T_{CV} = T_V (\Delta V + R_V) = 2(0,839 + 0,03) = 1,738$$

Maka fungsi alih *valve* adalah :

$$\frac{F(s)}{U(s)} = \frac{G_T}{T_{CV}s + 1} = \frac{0,1}{1,738s + 1} \dots\dots\dots(4.3)$$

▪ *Valve fuel*

Katup kendali yang digunakan untuk mengatur jumlah bahan bakar adalah *pneumatic valve*. Fungsi alih katup kendali merupakan sistem orde satu yang secara umum diberikan oleh :

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \dots\dots\dots(4.4)$$

Dengan K dan  $\tau$  berturut turut adalah konstanta *valve fuel* dan konstanta waktu *valve fuel*.

Dengan memasukkan data dari data teknis maka diperoleh fungsi alih *valve fuel* sebagai berikut:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1/16}{41.65s + 1} = \frac{0.0625}{41.65s + 1} \dots\dots\dots(4.5)$$

**IV.2.3 Model Matematis dan Blok Diagram Boiler**

Dinamika proses pengendalian temperatur dalam boiler dapat dinyatakan dalam persamaan hukum kesetimbangan energi, dimana laju energi panas yang masuk dikurangi laju energi yang meninggalkannya sama dengan laju energi yang terakumulasi. (Holman, 1992: 129)

$$\frac{d}{dt} \{MaCa \frac{dT}{dt}\} = \frac{dQi}{dt} - \frac{d}{dt} \{ma_2CaT - ma_1CaTa\} \dots\dots\dots(4.6)$$

Dengan:

Ma = Massa air dalam boiler (Kg)

Ca = Kalor jenis air (J/Kg.°C)

Qi = Energi yang dihasilkan oleh bahan bakar (J)

ma<sub>1</sub> = Laju air masuk (Kg/dt)

ma<sub>2</sub> = Laju uap rata-rata (Kg/dt)

Ta = Suhu air masuk (°C)

T = Suhu air sistem atau suhu steam (°C)

Persamaan (4.7) dikalikan dengan  $\frac{1}{Ca}$  menjadi :

$$\frac{d}{dt} \{Ma \frac{dT}{dt}\} = \frac{dQi}{dt} \frac{1}{Ca} - \frac{d}{dt} \{ma_2T - ma_1Ta\} \dots\dots\dots(4.7)$$

atau

$$\frac{d}{dt} \{Ma \frac{dT}{dt}\} + ma_2 \frac{dT}{dt} = \frac{dQi}{dt} \frac{1}{Ca} + \frac{dma_1}{dt} Ta \dots\dots\dots(4.8)$$

Dengan transformasi Laplace persamaan (4.8) menjadi:

$$sMasT(s) + ma_2sT(s) = \frac{sQi(s)}{Ca} + sma_1(s)Ta \dots\dots\dots(4.9)$$

Setelah ruas kiri dan kanan diintegrasikan menjadi:

$$sMaT(s) + ma_2T(s) = \frac{Qi(s)}{Ca} + ma_1(s)Ta \dots\dots\dots(4.10)$$

Di mana

$$Qi = K_1 \int mf dt \dots\dots\dots(4.11)$$

Dengan transformasi Laplace persamaan (4.11) menjadi:





$$Q_i(s) = \frac{K_1 mf}{s} \dots\dots\dots(4.12)$$

Dengan:

$K_1$  = Kesebandingan energi per kg solar (=41000KJ/Kg)

mf = laju bahan bakar solar (Kg/dt)

Dinamika proses pengendalian ketinggian dalam boiler dapat dinyatakan dalam persamaan hukum kesetimbangan massa, dimana laju massa yang masuk dikurangi laju massa yang meninggalkannya sama dengan laju massa yang terakumulasi. (Ogata, 1996: 141)

$$M_i - M_o = A\rho \frac{dh}{dt} \dots\dots\dots(4.13)$$

Dengan:

$M_i$  = laju massa yang masuk (Kg/dt)

$M_o$  = laju massa yang keluar (Kg/dt)

A = luas penampang (m<sup>2</sup>)

h = ketinggian (m)

$\rho$  = massa jenis air (1000 Kg/m<sup>3</sup>)

Dengan transformasi Laplace persamaan (4.13) menjadi:

$$M_i(s) - M_o(s) = sAh(s) \dots\dots\dots(4.14)$$

Karena laju massa yang keluar merupakan laju uap yang sebanding dengan panas dari bahan bakar, maka

$$M_o = K_2 mf \dots\dots\dots(4.15)$$

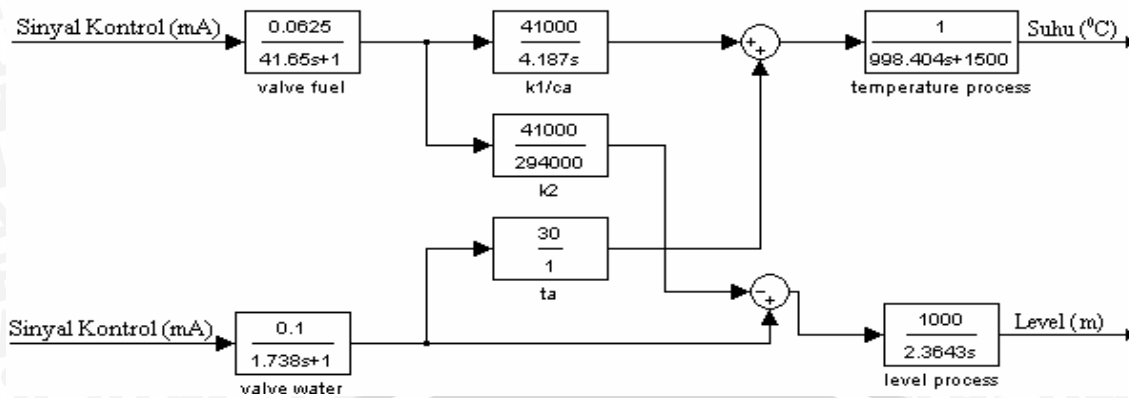
$$K_2 = \frac{K_1}{C(100 - T_a)} \dots\dots\dots(4.16)$$

Dengan:

C = kalor jenis air (=4200J/Kg. °C)

Sehingga diagram blok sistem boiler seperti pada gambar 4.4:





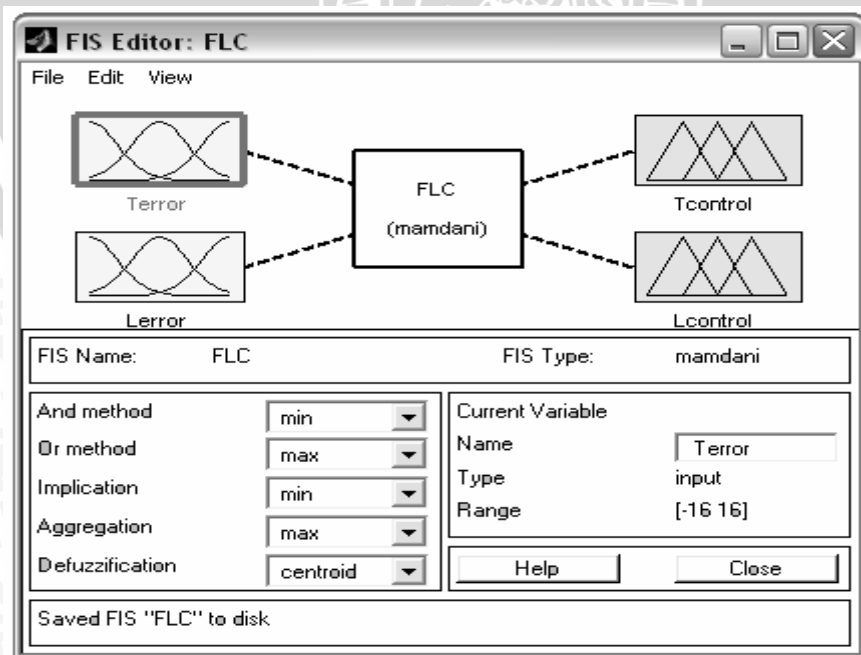
Gambar 4.4 Diagram blok boiler

### IV.3 Perancangan Kontroler Logika Fuzzy

Perencanaan kontroler logika *fuzzy* terdiri dari tiga tahap yaitu, proses fuzzifikasi proses inferensi, dan yang terakhir adalah proses defuzzifikasi besaran *fuzzy* ke besaran *crisp*.

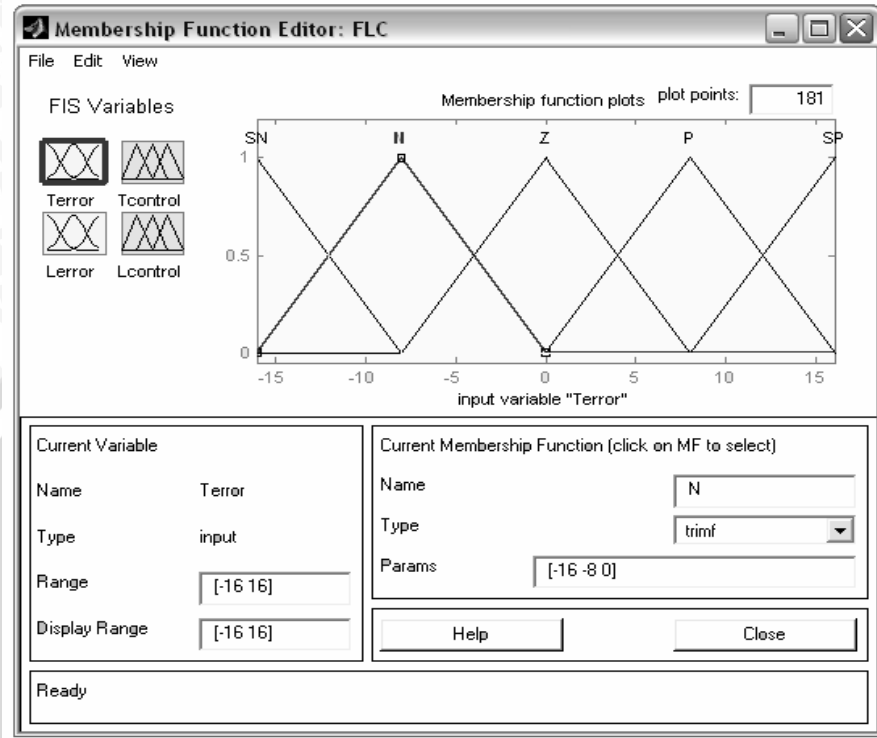
Sistem *fuzzy* yang dirancang masing-masing memiliki dua variabel masukan yaitu *error level* dan *error suhu* dan dua variabel keluaran yaitu besarnya arus yang masuk *control valve air (water)* dan yang masuk *control valve bahan bakar (fuel)*. *Term-term* yang digunakan dalam fungsi keanggotaan *error level* dan *error suhu* adalah sangat negatif (SN), negatif (N), *zero* (Z), positif (P) dan sangat positif (SP).

#### IV.3.1 Proses Fuzzifikasi



Gambar 4.5 FIS Editor: FLC  
Sumber: Simulasi

Pada tahap ini terjadi proses pemetaan *error* suhu,  $\Delta$  *error* suhu, output CV air dan output CV bahan bakar yang masing-masing terbagi menjadi lima keanggotaan sehingga diperoleh fungsi keanggotaan untuk *error* suhu, *error level*, output CV air dan output CV bahan bakar sebagai berikut:



**Gambar 4.6** Membership function editor *error* suhu untuk lima himpunan fuzzy  
Sumber: Simulasi

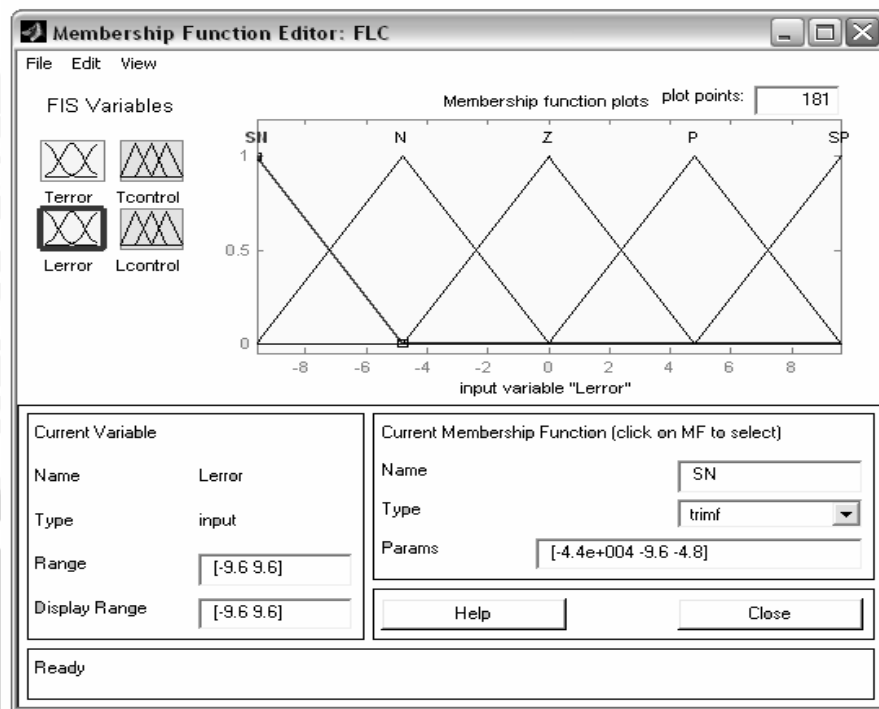
Nilai *error* suhu diset dalam rentang -16 sampai 16. Domain masing-masing *term* adalah sebagai berikut: SN [-44000 -16 -8], N [-16 -8 0], Z [-8 0 8], P [0 8 16], SP [8 16 44000].

Nilai *error level* diset dalam rentang -9.6 sampai 9.6. Domain masing-masing *term* adalah sebagai berikut: SN [-44000 -9.6 -4.8], N [-9.6 -4.8 0], Z [-4.8 0 4.8], P [0 4.8 9.6], SP [4.8 9.6 44000].

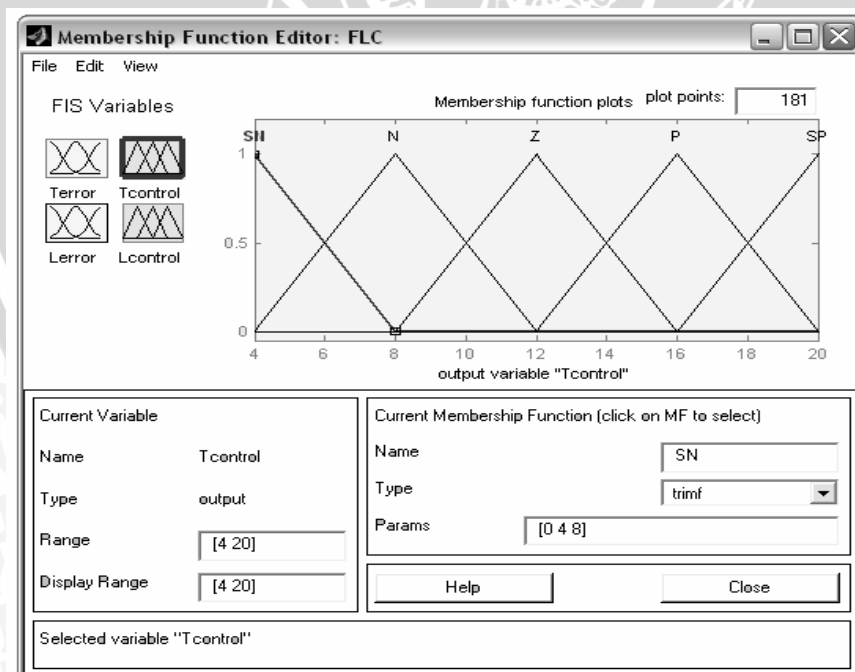
Nilai CV air (*water*) diset dalam rentang 4 sampai 20. Domain untuk masing-masing *term* adalah sebagai berikut: SN [0 4 8], N [4 8 12], Z [8 12 16], P [12 16 20], SP [16 20 24].

Nilai CV bahan bakar (*fuel*) diset dalam rentang 4 sampai 20. Domain untuk masing-masing *term* adalah sebagai berikut: SN [0 4 8], N [4 8 12], Z [8 12 16], P [12 16 20], SP [16 20 24].

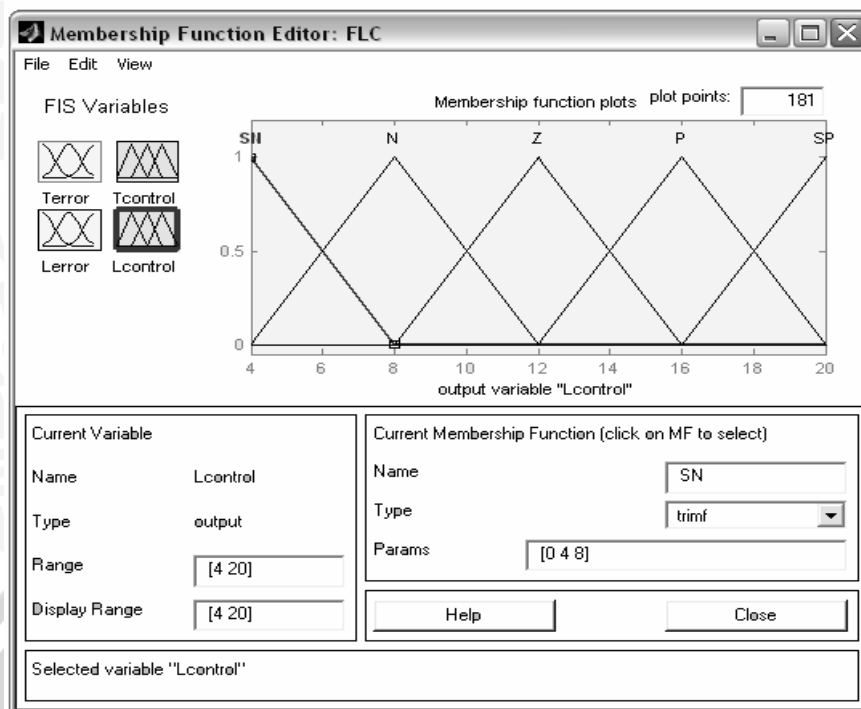




Gambar 4.7 Membership function editor error level untuk lima himpunan fuzzy  
Sumber: Simulasi



Gambar 4.8 Membership function editor CV bahan bakar untuk lima himpunan fuzzy  
Sumber: Simulasi



**Gambar 4.9** Membership function editor CV air untuk lima himpunan fuzzy  
Sumber: Simulasi

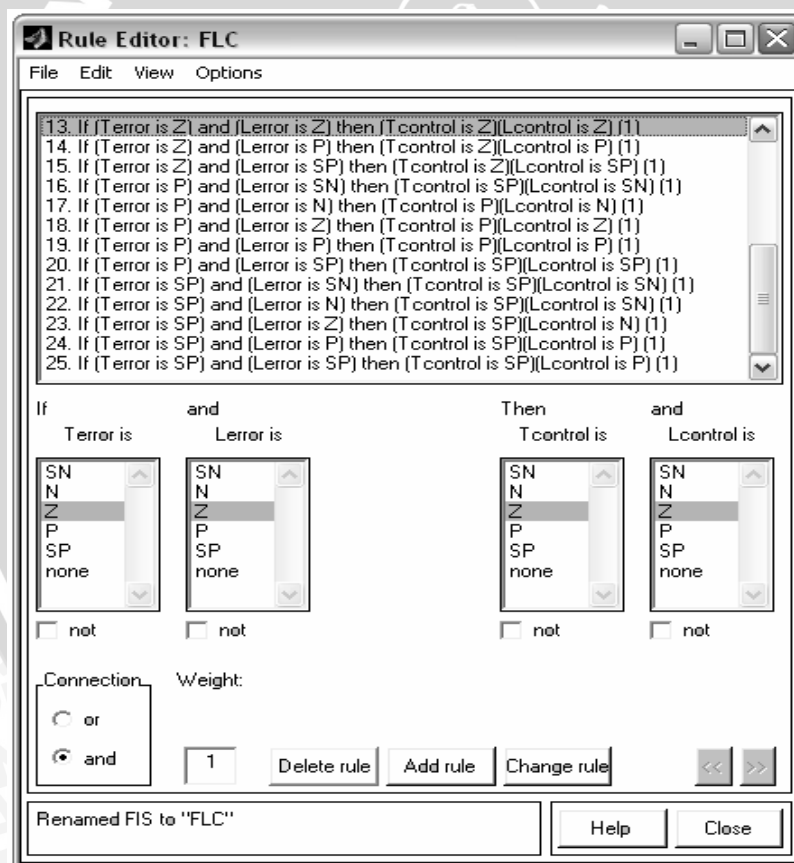
### IV.3.2 Inferensi

Pada tahap ini terjadi proses penyusunan aturan-aturan serta penalaran logika fuzzy. Penyusunan aturan berdasarkan pada kaidah “Jika (proposisi fuzzy) maka (proposisi fuzzy)” yang melibatkan variabel *error* suhu,  $\Delta$  *error* suhu, *error level*,  $\Delta$  *error level*.

Untuk proses pengendalian suhu didapatkan aturannya sebagai berikut:

1. **IF** Error is SN **AND** Lerror is SN **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol SN
2. **IF** Error is SN **AND** Lerror is N **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol N
3. **IF** Error is SN **AND** Lerror is Z **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol P
4. **IF** Error is SN **AND** Lerror is P **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol SP
5. **IF** Error is SN **AND** Lerror is SP **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol SP
6. **IF** Error is N **AND** Lerror is SN **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol SN
7. **IF** Error is N **AND** Lerror is N **THEN** Tcontrol is N **AND** Lcontrol N
8. **IF** Error is N **AND** Lerror is Z **THEN** Tcontrol is N **AND** Lcontrol Z
9. **IF** Error is N **AND** Lerror is P **THEN** Tcontrol is N **AND** Lcontrol P
10. **IF** Error is N **AND** Lerror is SP **THEN** Tcontrol is SN **AND** Lcontrol SP
11. **IF** Error is Z **AND** Lerror is SN **THEN** Tcontrol is Z **AND** Lcontrol SN
12. **IF** Error is Z **AND** Lerror is N **THEN** Tcontrol is Z **AND** Lcontrol N

13. **IF** Error is Z **AND** Lerror is Z **THEN** Tcontrol is Z **AND** Lcontrol Z
14. **IF** Error is Z **AND** Lerror is P **THEN** Tcontrol is Z **AND** Lcontrol P
15. **IF** Error is Z **AND** Lerror is SP **THEN** Tcontrol is Z **AND** Lcontrol SP
16. **IF** Error is P **AND** Lerror is SN **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol SN
17. **IF** Error is P **AND** Lerror is N **THEN** Tcontrol is P **AND** Lcontrol N
18. **IF** Error is P **AND** Lerror is Z **THEN** Tcontrol is P **AND** Lcontrol Z
19. **IF** Error is P **AND** Lerror is P **THEN** Tcontrol is P **AND** Lcontrol P
20. **IF** Error is P **AND** Lerror is SP **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol SP
21. **IF** Error is SP **AND** Lerror is SN **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol SN
22. **IF** Error is SP **AND** Lerror is N **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol SN
23. **IF** Error is SP **AND** Lerror is Z **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol N
24. **IF** Error is SP **AND** Lerror is P **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol P
25. **IF** Error is SP **AND** Lerror is SP **THEN** Tcontrol is SP **AND** Lcontrol P



Gambar 4.10 Rule editor untuk proses pengendalian suhu dan level



#### IV.3.3 Proses Defuzzifikasi

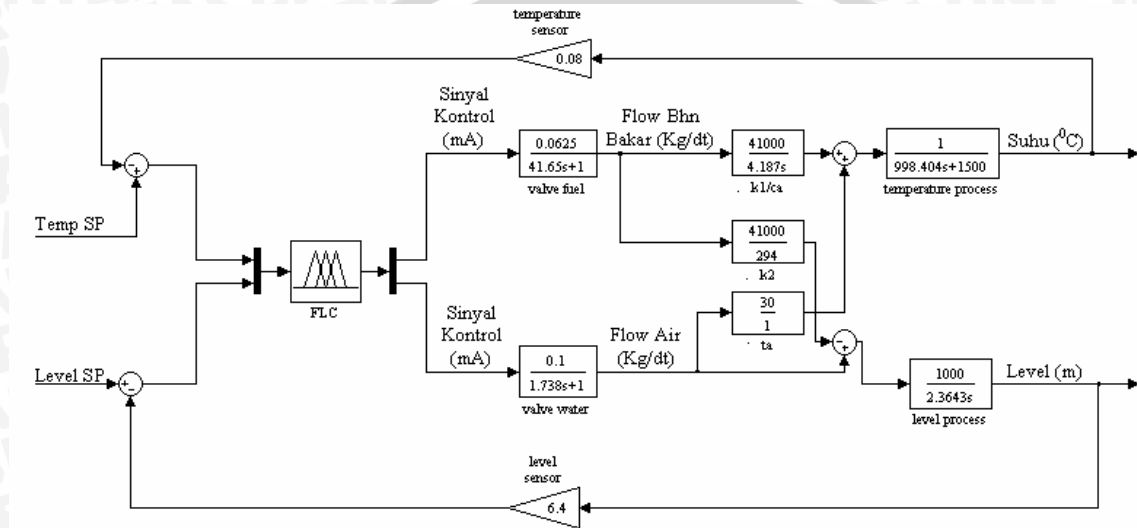
Tahap ini merupakan tahap terakhir dalam perancangan kontroler *fuzzy*. Proses mekanisme pengambilan keputusan (*reasoning mechanism*) bertugas untuk melakukan pengambilan keputusan berdasarkan basis data dan basis aturan sehingga dari masukan fuzzifikasi dapat diperoleh keluaran logika *fuzzy*. Metode implikasi yang digunakan dalam pengaturan ini adalah metode max-min. Proses defuzzifikasi yang digunakan dalam pengaturan ini adalah metode *Center of Area* (COA).



## BAB V PENGUJIAN DAN SIMULASI

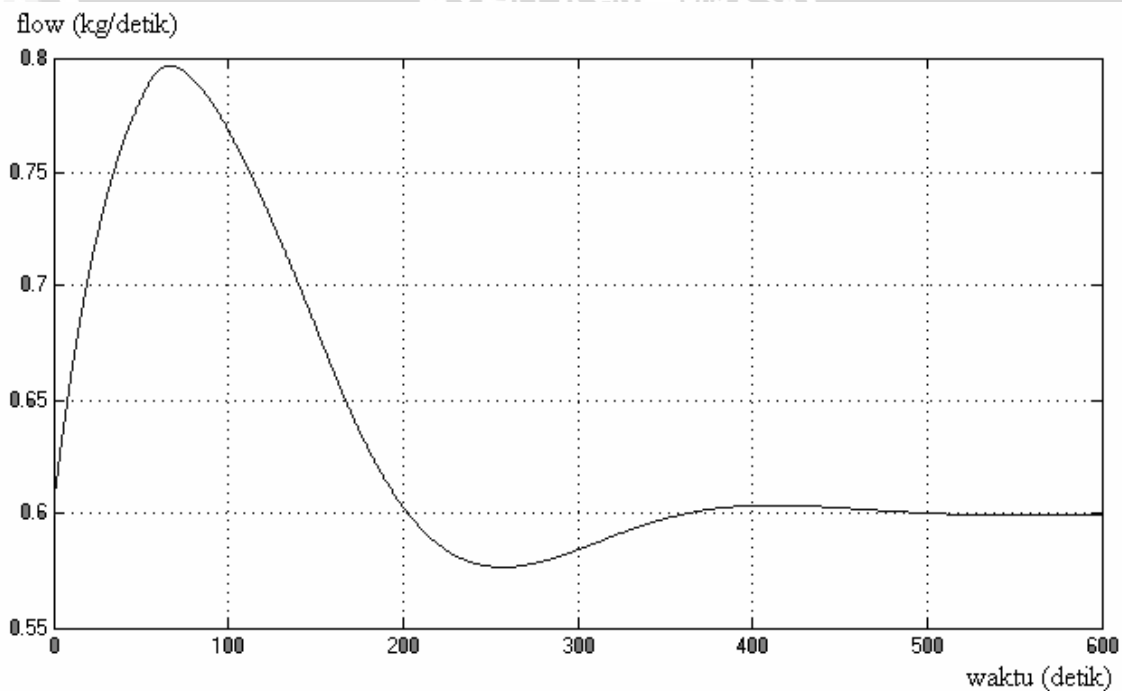
### V.1 Blok Diagram Sistem Pengendalian

Setelah perancangan, kontroler logika *fuzzy* untuk sistem pengendalian suhu dan ketinggian air diujikan ke dalam sistem seperti pada blok diagram sebagai berikut:

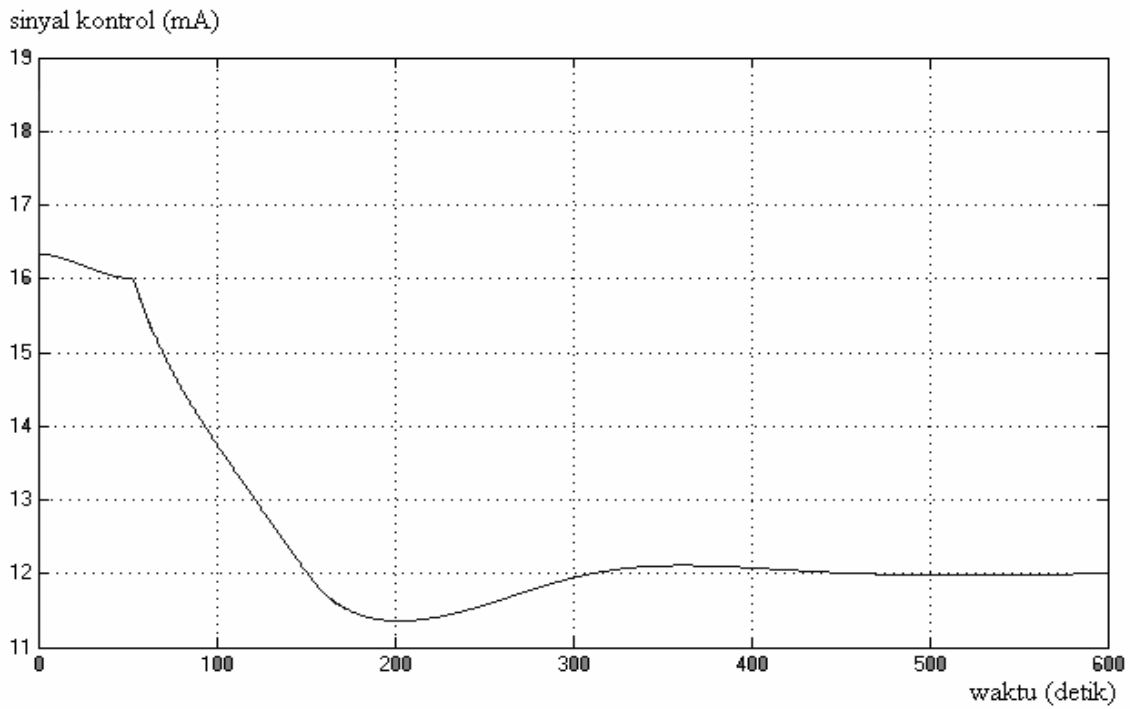


Gambar 5.1 Diagram blok sistem pengendalian dengan kontroler logika *fuzzy*

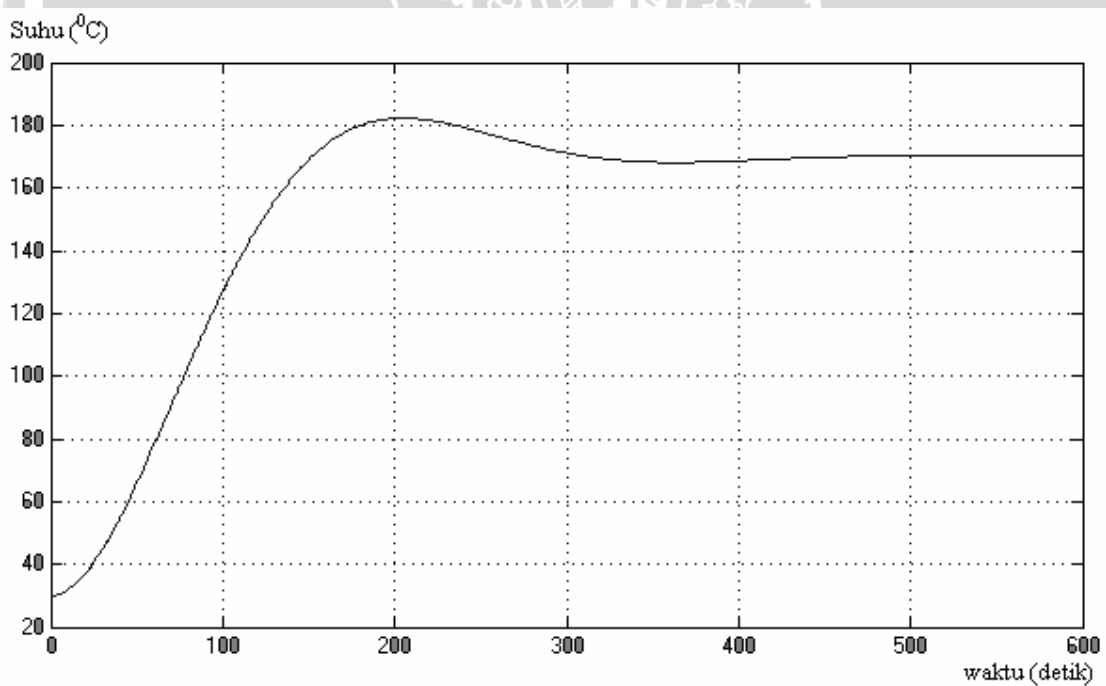
### V.2 Respon Sistem Pengendalian Suhu



Gambar 5.2 Grafik *flow* bahan bakar pada sistem pengendalian suhu



Gambar 5.3 Grafik sinyal kontrol pada sistem pengendalian suhu



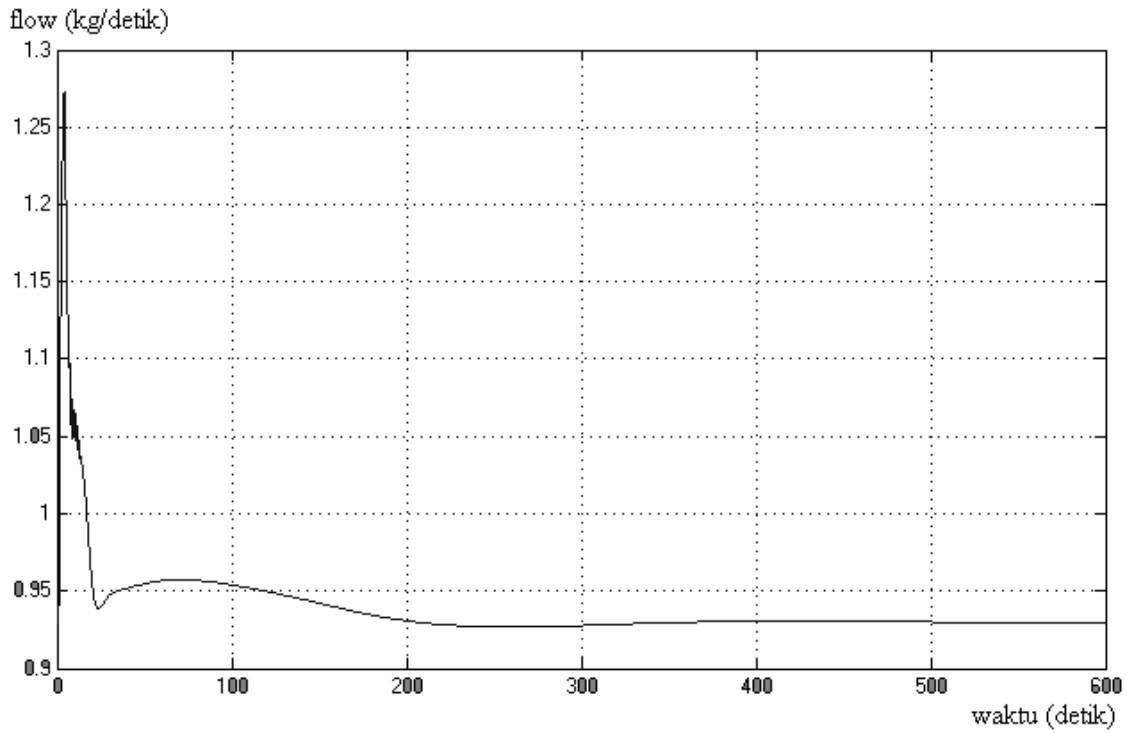
Gambar 5.4 Respon suhu pada sistem pengendalian suhu

Dari hasil simulasi di atas didapat bahwa sistem pengendalian suhu dengan *setpoint* suhu 170 °C, mempunyai spesifikasi respon sebagai berikut: *settling time* 340 detik, *maximum overshoot* 8.82 %, *error steady state* 0 %.

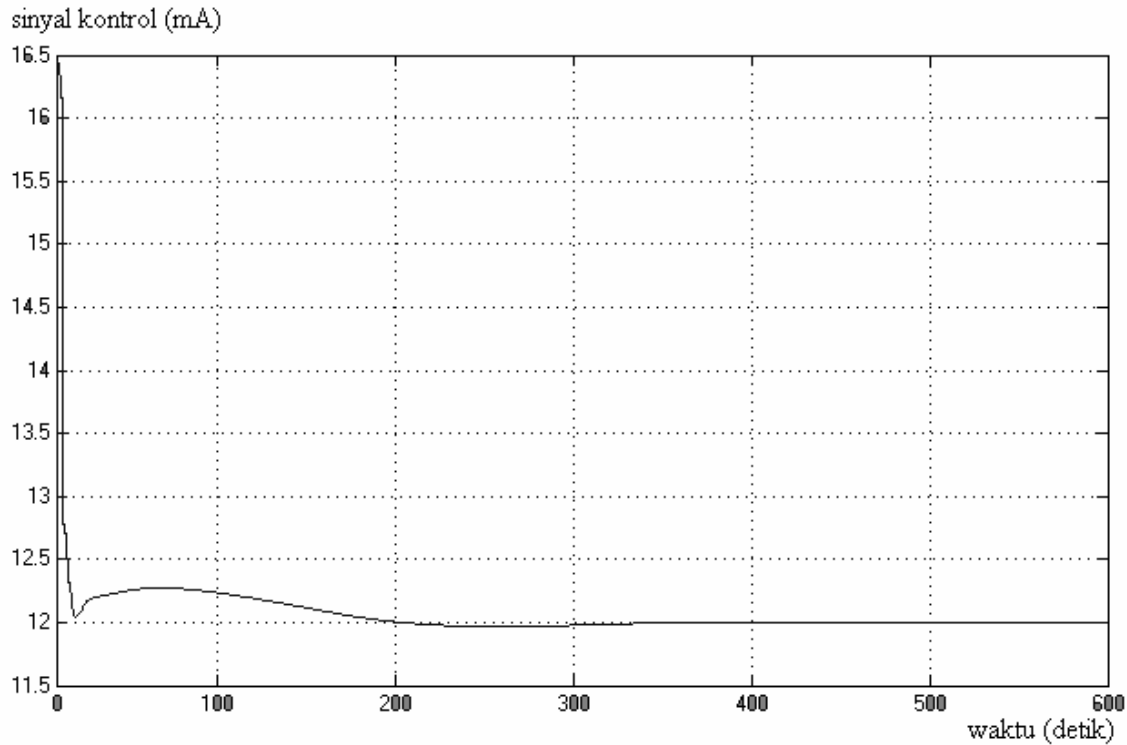




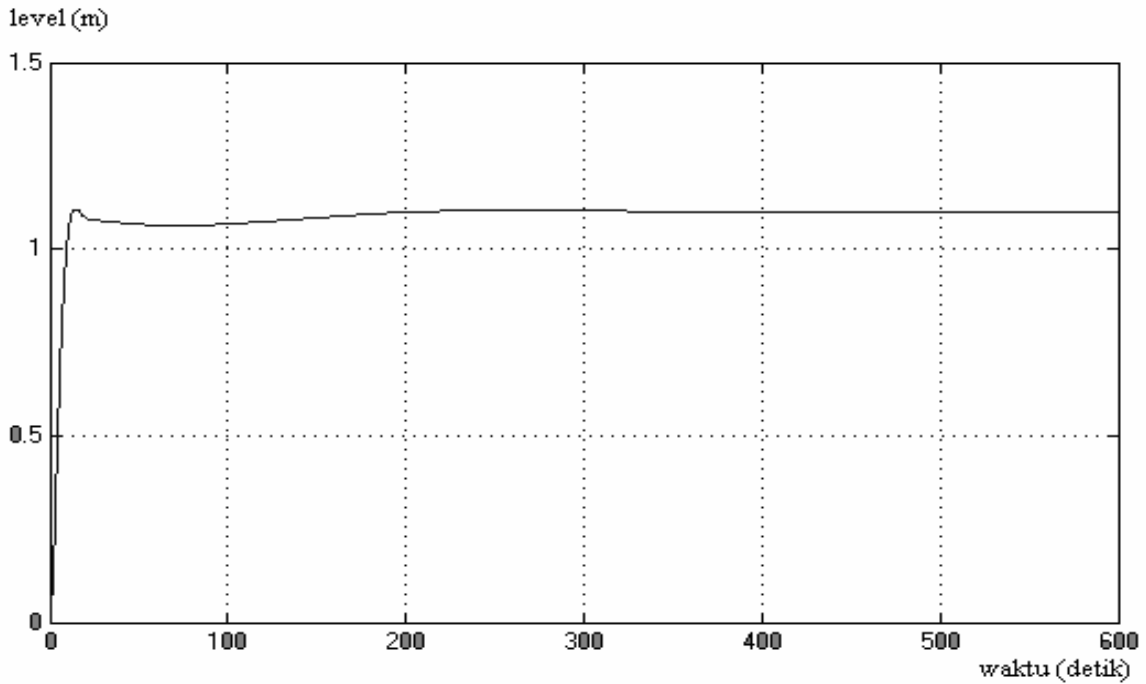
### V.3 Respon Sistem Pengendalian Ketinggian Air



Gambar 5.5 Grafik *flow* air pada sistem pengendalian ketinggian air



Gambar 5.6 Grafik sinyal kontrol pada sistem pengendalian ketinggian air

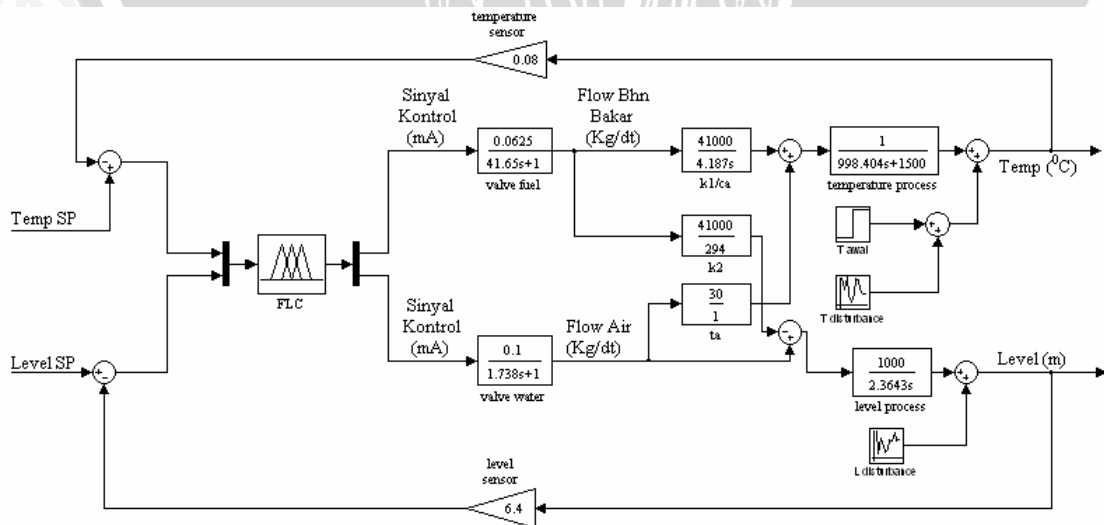


Gambar 5.7 Respon level pada sistem pengendalian ketinggian air

Dari hasil simulasi di atas didapat bahwa sistem pengendalian ketinggian air dengan *setpoint* ketinggian air 1.1 meter, mempunyai spesifikasi respon sebagai berikut: *settling time* 190 detik, *maximum overshoot* 0 %, *error steady state* 0 %.

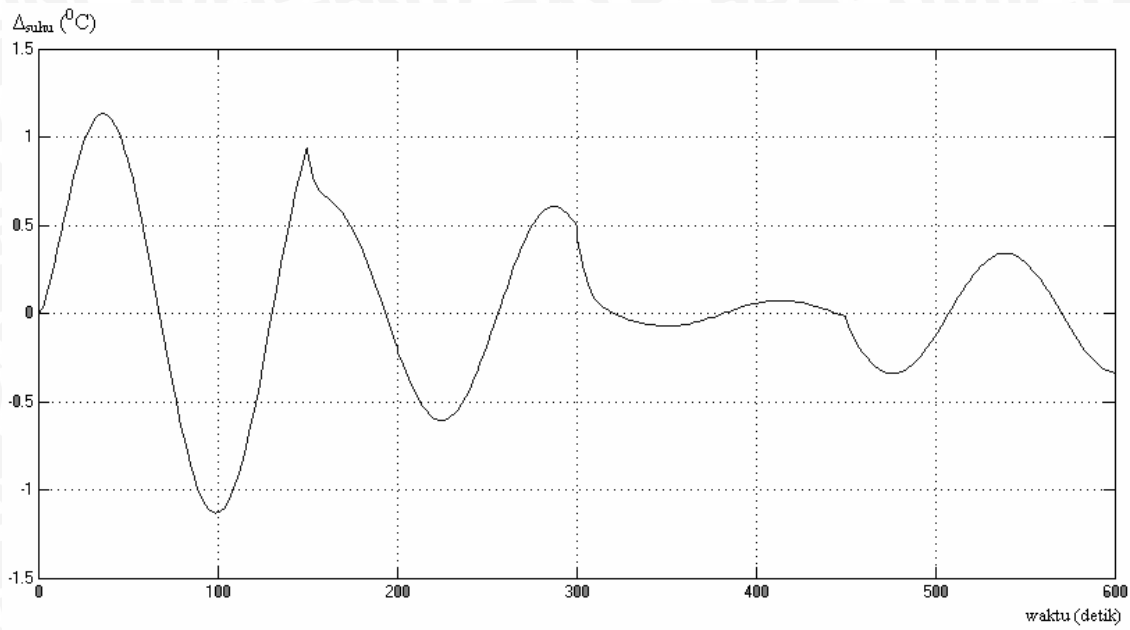
#### V. 4 Blok Diagram Sistem Pengendalian dengan Gangguan

Pengujian terakhir adalah melihat pengaruh gangguan terhadap performansi sistem pengendalian. Gangguan yang diberikan adalah perubahan suhu awal air yang masuk berupa sinyal acak antara  $-1.5^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $1.5^{\circ}\text{C}$  dan perubahan ketinggian air berupa sinyal acak antara  $-0.06\text{ m}$  sampai dengan  $0.06\text{ m}$ .

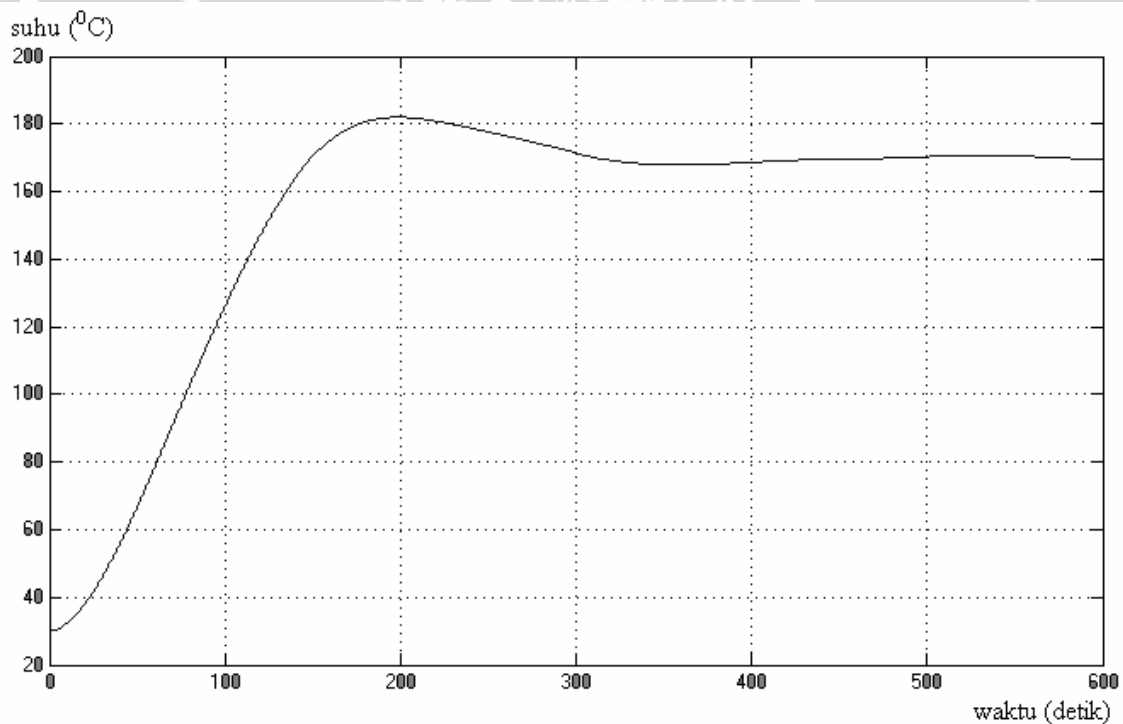


Gambar 5.8 Diagram blok sistem pengendalian dengan gangguan

## V.5 Respon Sistem Pengendalian Suhu dengan Gangguan



Gambar 5.9 Gangguan berupa variasi perubahan suhu antara  $-1.5^{\circ}C$  sampai dengan  $1.5^{\circ}C$



Gambar 5.10 Respon suhu pada sistem pengendalian dengan gangguan

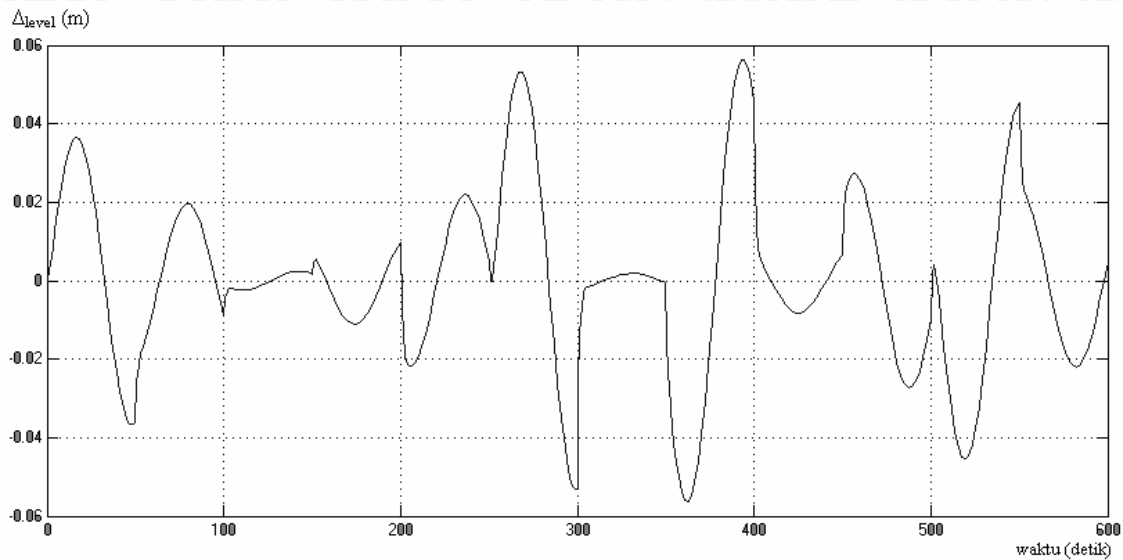
Dari hasil simulasi di atas didapat bahwa sistem pengendalian suhu dengan *setpoint* suhu  $170^{\circ}C$  dan gangguan perubahan suhu awal air yang masuk berupa sinyal acak antara  $-1.5^{\circ}C$  sampai dengan  $1.5^{\circ}C$ , mempunyai spesifikasi respon



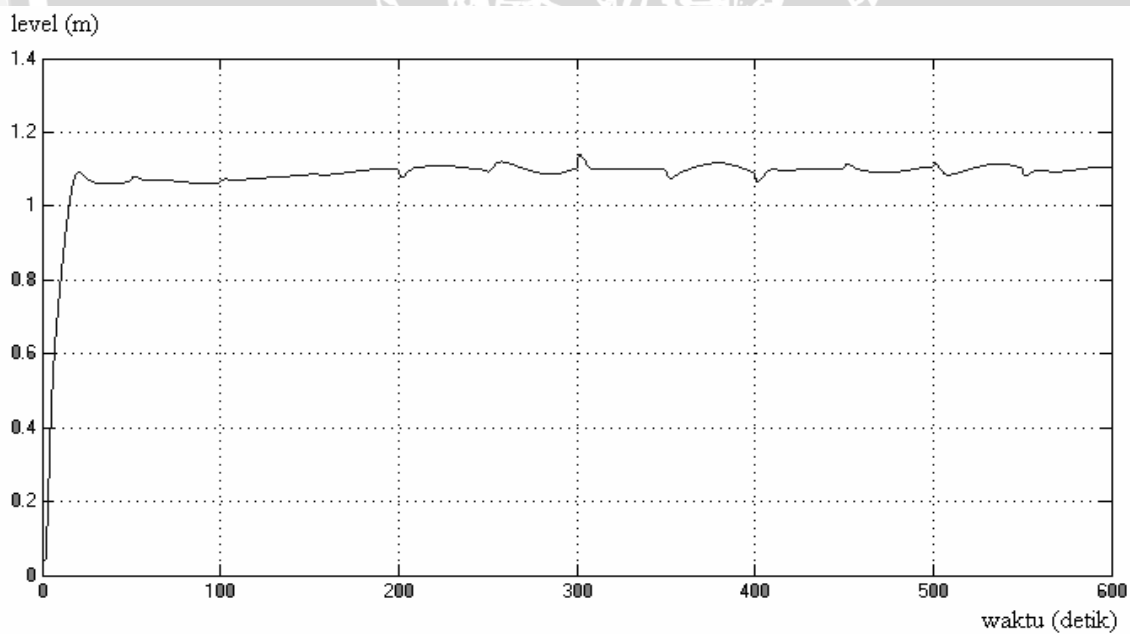
sebagai berikut: *settling time* 340 detik, *maximum overshoot* 8.82 %, *error steady state* 0 %.

### V.6 Respon Sistem Pengendalian Ketinggian Air dengan Gangguan

Sedangkan untuk gangguan berupa variasi perubahan ketinggian air antara -0.06 m sampai dengan 0.06 m, didapat respon sistem pengendalian sebagai berikut:



Gambar 5.11 Gangguan berupa variasi perubahan ketinggian air antara -0.06 m sampai dengan 0.06 m



Gambar 5.12 Respon ketinggian air pada sistem pengendalian dengan gangguan

Dari hasil simulasi di atas didapat bahwa sistem pengendalian ketinggian air dengan *setpoint* ketinggian air 1.1 meter dan gangguan perubahan ketinggian air berupa sinyal acak antara -0.06 m sampai dengan 0.06 m, mempunyai spesifikasi

respon sebagai berikut: *settling time* 210 detik, *maximum overshoot* 0 %, *error steady state*  $\pm 5.4$  %.



## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### VI.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dengan kontroler logika *fuzzy* pada sistem pengendalian suhu dan ketinggian air pada *boiler* di P.T Camarin Eka Laksana Singosari Malang, melalui pengujian dan analisis yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. pada pengendalian suhu untuk sistem tanpa gangguan dengan *setpoint* suhu  $170^{\circ}\text{C}$  didapat *settling time* 340 detik, terjadi *overshoot* sebesar 8.82 %, dan meminimalkan *error steady state* sampai dengan 0 %.
2. pada pengendalian ketinggian air dengan *setpoint* ketinggian air 1.1 meter, didapat *settling time* 190 detik, tidak terjadi *overshoot*, dan meminimalkan *error steady state* sampai dengan 0 %.
3. pada pengendalian suhu untuk sistem dengan gangguan perubahan suhu awal air yang masuk berupa sinyal acak antara  $-1.5^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $1.5^{\circ}\text{C}$  pada *setpoint* suhu  $170^{\circ}\text{C}$  didapat *settling time* 340 detik, terjadi *overshoot* sebesar 8.82 %, dan meminimalkan *error steady state* sampai dengan 0 %.
4. pada pengendalian ketinggian air untuk sistem dengan gangguan perubahan ketinggian air berupa sinyal acak antara -0.06 m sampai dengan 0.06 m pada *setpoint* ketinggian air 1.1m didapat *settling time* 210 detik, tidak terjadi *overshoot*, dan terjadi kenaikan *error steady state* sampai dengan 5.4 %.
5. sistem dapat dikatakan cukup baik karena dapat meminimalkan error kurang dari 6 % pada saat terkena gangguan sinyal acak.

#### VI.2 Saran

1. Dimungkinkan adanya pemakaian bentuk *membership* yang lain (*gaussian*), jumlah *membership* yang lebih banyak (7, 9) ataupun metode defuzzifikasi yang lain (MoM) untuk meningkatkan kinerja kontroler.
2. dimungkinkan perancangan kontroler yang lain (*robust, adaptive dll*) yang mungkin memiliki performansi yang lebih baik dari kontrol logika *fuzzy*.



## DAFTAR PUSTAKA

- Coughanowr, D. R. 1991. *Process System Analysis and Control*, Singapore: Prentice Hall.
- Gunterus, F. 1994. *Sistem Kontrol Proses*, Jakarta: Elex Media Konputindo.
- Holman, J.P. 1988. *Thermodynamics*, Singapore: McGraw-Hill.
- Kurniawan, I. B. 2005. *Penerapan Kendali Optimal dengan Metode LQG pada Boiler di PT. Camarin Eka Laksana Singosari Malang*. Skripsi: Teknik Elektro Brawijaya Malang
- Kusumadewi, S. 2002. *Analisis dan Desain Sistem Fuzzy Menggunakan ToolBox Matlab*, Edisi Pertama: Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta
- Kuswadi, S. 2000. *Kendali Cerdas*. EEPIS Press : Surabaya
- Djokosetyardjo. M. J. 2003. *Ketel Uap*. Jakarta: Penerbit PT. Pradnya Paramita.
- Mujahidin, 2004. *Belajar Logika Fuzzy*. Malang: Laboratorium Mikroelektronika ITN.
- Ogata, K. 1992. *Teknik Kontrol Automatik Jilid I*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Ogata, K. 1992. *Teknik Kontrol Automatik Jilid II*. Jakarta: Penerbit Erlangga
- Ross, T. J. 1997. *Fuzzy Logic with Engineering Application*. International Editions, McGraw-Hill, Inc, Singapore.
- Yan, J. 1994. *Using Fuzzy Logic*. Prentice Hall Int.: Cambridge.

## LAMPIRAN

**Data Teknis:****1. Boiler**

Kapasitas (average)	: 1500 kg / jam steam
Dimensi (p/l/t)	: 1.665 m/ 1.42 m/ 1.75 m
Volume	: 1000 liter
Tekanan	: 10 bar

**2. Valve Air (Water Valve)**

Flow Rate	: max 1.6 kg / s
	: min 0.258 kg / s
Range	: 3-15 psi
Waktu Stroking	: 2 s
Rv	: 0.03
Karakteristik	: linier

**3. Valve Bahan Bakar (Fuel Valve)**

Konstanta Waktu	: 41.65 s
Valve open	: 1 inch
Karakteristik	: linier

**4. Air**

Temperatur	: 30 °C
Massa	: 998.404 kg
Kapasitas panas ( <i>Ca</i> )	: 4.187 kJ / kg °C

**5. Solar**

Konversi 1 kg solar menghasilkan energi sebesar 41000 kJ