



TUGAS AKHIR SM - 141501

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEMPERATUR UAP
PADA *SUPERHEATER* DENGAN MENGGUNAKAN
METODE *FUZZY SLIDING MODE CONTROL***

MARDIANA SEPTIANI
NRP 1211 100 089

Dosen Pembimbing
Dr. Dra. Mardijah, MT

JURUSAN MATEMATIKA
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - SM 141501

***DESIGN OF STEAM TEMPERATURE CONTROLLER
SYSTEM ON SUPERHEATER USING FUZZY SLIDING
MODE CONTROL METHOD***

MARDIANA SEPTIANI
NRP 1211 100 089

Supervisor
Dr. Dra. Mardijah, MT

DEPARTMENT OF MATHEMATICS
Faculty of Mathematics and Natural Science
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN

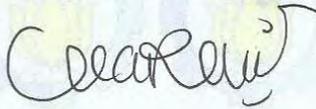
**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEMPERATUR UAP
PADA SUPERHEATER DENGAN MENGGUNAKAN
METODE FUZZY SLIDING MODE CONTROL**

**DESIGN OF STEAM TEMPERATURE CONTROLLER
SYSTEM ON SUPERHEATER USING FUZZY SLIDING
MODE CONTROL METHOD**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains
Pada Bidang Studi Matematika Terapan
Program Studi S-1 Jurusan Matematika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :
MARDIANA SEPTIANI
NRP. 1211 100 089

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



Dr. Dra. Mardlijah, MT.
NIP. 19670114 199102 2 001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Matematika
EMIPA ITS



Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si.
NIP. 19660414 199102 2 001
Surabaya, Juli 2015

**PERANCANGAN SISTEM KENDALI TEMPERATUR UAP
PADA SUPERHEATER DENGAN MENGGUNAKAN METODE
FUZZY SLIDING MODE CONTROL**

Nama : Mardiana Septiani
NRP : 1211 100 089
Jurusan : Matematika – FMIPA ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Dra. Mardlijah, MT.

ABSTRAK

Pada suatu sistem PLTU, boiler adalah komponen yang memegang peranan penting. Superheater merupakan salah satu komponen dalam boiler yang berfungsi untuk merubah uap jenuh menjadi uap panas lanjut. Variabel yang diukur dalam superheater adalah temperatur uap dimana set point yang harus dicapai adalah 814 K. Pada penelitian ini dirancang sistem pengendali FSMC pada sistem temperatur uap superheater dan analisis terhadap performansi sistemnya dengan membandingkan metode FSMC dengan SMC. Pengendali FSMC dapat menghasilkan temperatur uap yang stabil di sekitar 813.9 K baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan eksternal dan internal, sedangkan dengan pengendali SMC, temperatur uap dapat stabil di sekitar 813.5 K. Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa pengendali FSMC dapat menghasilkan temperatur uap yang lebih akurat (error yang lebih kecil) daripada SMC, namun pengendali FSMC memiliki kekurangan yaitu membutuhkan waktu yang lebih lama daripada pengendali SMC.

Kata Kunci:*Superheater, Sliding Mode Control, Fuzzy Sliding Mode Control.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**DESIGN OF STEAM TEMPERATURE CONTROLLER SYSTEM
ON SUPERHEATER USING FUZZY SLIDING MODE CONTROL
METHOD**

Name : Mardiana Septiani
NRP : 1211 100 089
Department of : Mathematics – FMIPA ITS
Supervisor : Dr. Dra. Mardlijah, MT.

ABSTRACT

At a power plant systems, boiler is an important component. Superheater is one component in a boiler that serves to transform the heat into superheated steam. Variables measured in the steam superheater is the temperature where the set point is to be achieved is 814 K. In this study designed control system FSMC on temperature steam superheater and analysis of the performance of the system by comparing the method FSMC with SMC. FSMC controller can generate steam temperature stable at around 813.9 K either without disturbance or with external and internal disturbances, while the SMC controllers, temperature steam can be stable at about 813.5 K. Thus, it was concluded that the FSMC controller can generate more accurate temperature steam (smaller error) than the SMC, however FSMC controller has the disadvantage that it takes longer than SMC controllers.

Keywords: *Superheater, Sliding Mode Control, Fuzzy Sliding Mode Control.*

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT Tuhan semesta alam yang telah memberikan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Perancangan Sistem Kendali Temperatur Uap pada *Superheater* dengan Menggunakan Metode *Fuzzy Sliding Mode Control***” yang merupakan salah satu persyaratan akademis dalam menyelesaikan Program Studi S-1 pada Jurusan Matematika FMIPA ITS Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan berkat kerja sama, bantuan, dan dukungan dari banyak pihak. Sehubungan dengan hal itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Dr. Dra. Mardijah, MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan semangat serta bimbingan dengan sabar dan penuh perhatian.
2. Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika.
3. Prof. DR. Basuki Widodo, M.Sc selaku Dosen Wali yang telah memberikan motivasi.
4. Drs. Sentot Didik, M.Si, Drs. Suharmadi S, M.Phil, Prof. Dr. M. Isa Irawan dan Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku Dosen Penguji Ujian Tugas Akhir.
5. Dr. Chairul Imron, MI.Komp selaku Koordinator Tugas Akhir.
6. Seluruh jajaran dosen dan staf jurusan Matematika ITS.
7. Seluruh teman-teman mahasiswa jurusan Matematika ITS.
8. Semua pihak yang telah memberikan ilmu kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan saran dan kritik dari pembaca. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi semua pihak yang berkepentingan.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

Special thanks to:

1. Papa dan Mama tercinta yang senantiasa dengan ikhlas memberikan semangat, doa, dan nasihat-nasihat yang sungguh berarti bagi penulis.
2. Seluruh keluarga tersayang, Mak, Mbah, Yan, Novi, Koko, Mbak Mona, Dedek, Meme, Pandu, Atthew, Addriel, Mira serta semua Tante dan Om yang selalu memberi *support* kepada penulis. ({})
3. *Happy Girls*, Eni dan Vimala yang selalu ada dan menemani di saat senang maupun susah selama ini. Semoga kita selalu bisa menjadi “Happy Girls” ya :*
4. Teman-teman seperjuangan Linda, Yahya, Zacky, Heri, Fendi, Agyl, Musa, Habib, Toni, Agus, Virama yang memberikan banyak bantuan kepada penulis serta teman-teman Matematika 2011 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu. ☺
5. Moh. Lutfi Baihaqie yang selalu memberikan semangat dan kesabaran dalam menemani serta menghibur penulis dalam setiap kepayahan di pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Racana Putra Putri Sepuluh Nopember dan pembina serta seluruh keluarga besar Gugusdepan Surabaya 610-611 yang memberi semangat kepada penulis untuk segera menyelesaikan Tugas Akhir serta memberikan pengalaman yang luar biasa selama penulis menjalani kuliah di ITS.
7. Seluruh teman-teman Paguyuban Karya Salemba Empat ITS yang memberikan banyak pengalaman dan *networking* selama penulis mendapat beasiswa.
8. Lina, Tika, Dian, Luluk, Dzifah, Bebe, Teyez, Eva, Nadya, Nurh dan sahabat sedari SMP dan SMA yang selalu menyemangati penulis.
9. Keluarga besar PT. PJB UP Gresik yang telah memberikan kesempatan untuk dapat melakukan kerja praktek sehingga

dapat tercetus ide serta mendapat banyak ilmu untuk mengerjakan Tugas Akhir ini.

Tentu saja masih banyak pihak lain yang turut andil dalam penyelesaian tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu. Semoga Allah membalas dengan balasan yang lebih baik bagi semua pihak yang telah membantu penulis. *Amin ya rabbal 'alamin.*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
DAFTAR LAMPIRAN	xxv

BAB I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	3
1.5 Manfaat	3
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir	3

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem <i>Superheater</i>	5
2.1.1 Pemodelan Matematika pada Temperatur <i>Superheater</i>	7
2.2 Sistem Pengendalian	8
2.2.1 Pengelompokan Sistem Pengendalian	9
2.2.2 Kestabilan Sistem	10
2.2.3 Ketidakpastian pada Sistem	10
2.3 <i>Sliding Mode Control</i>	11
2.3.1 Fungsi <i>Switching</i>	11

2.3.2 Permukaan <i>Sliding</i>	11
2.3.3 Kondisi <i>Sliding</i>	12
2.3.4 Perancangan Pengendali SMC	13
2.3.4 Kondisi <i>Chattering</i>	14
2.3.5 <i>Sliding Mode Control</i> dengan Boundary Layer (BL)	14
2.4 <i>Fuzzy Logic Control</i>	15
2.4.1 Konsep Himpunan <i>Fuzzy</i>	16
2.4.2 Variabel Linguistik	16
2.4.3 Fungsi Keanggotaan	17
2.4.4 Penentuan Aturan <i>Fuzzy</i>	19
2.4.5 Struktur Dasar Pengendali Fuzzy	19
2.5 <i>Fuzzy Sliding Mode Control</i>	20
2.5.1 Skema Dasar Pengendali FSMC	20
2.5.2 Perancangan Pengendali FSMC	21

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian	25
3.2 Diagram Alur Metode Penelitian	26

BAB IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Pemodelan pada <i>Superheater</i>	29
4.2 Perancangan Pengendali Sistem Temperatur Uap pada <i>Superheater</i>	31
4.2.1 Perancangan Pengendali <i>Sliding Mode Control (SMC)</i>	31
4.2.2 Perancangan Pengendali <i>Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)</i>	35
4.3 Simulasi dan Analisis Hasil Rancangan Pengendali	40
4.3.1 Simulasi tanpa Gangguan	41

4.3.2 Simulasi dengan Gangguan Eksternal	42
4.3.3 Simulasi dengan Gangguan Internal	46
BAB V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN	53
BIODATA PENULIS	57

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Sistem Temperatur Uap <i>Superheater</i> 7
Gambar 2.2	Diagram Blok Sederhana dari Sistem Loop Tertutup 10
Gambar 2.3	Kondisi Sliding..... 13
Gambar 2.4	Kondisi <i>Chattering</i> 14
Gambar 2.5	Fungsi Keanggotaan Segitiga..... 18
Gambar 2.6	Fungsi Keanggotaan Trapesium..... 18
Gambar 2.7	Struktur Dasar <i>Fuzzy Logic Controller</i> 20
Gambar 2.8	Skema Dasar Pengendali FSMC pada Suatu Sistem Lup Tertutup..... 20
Gambar 2.9	Interpretasi Grafis dari s_p dan d 22
Gambar 3.1	Diagram Alur Metode Penelitian 27
Gambar 4.1	Diagram Blok Sistem <i>Superheater</i> 30
Gambar 4.2	Grafik Temperatur Temperatur Uap tanpa Kontroler 30
Gambar 4.3	Diagram Blok Sistem Temperatur Uap <i>Superheater</i> dengan Pengendali SMC 34
Gambar 4.4	Diagram Blok Subsistem SMC 34
Gambar 4.5	Fungsi Keanggotaan s_p pada Pengendali FSMC 37
Gambar 4.6	Fungsi Keanggotaan d pada Pengendali FSMC 38
Gambar 4.7	Fungsi Keanggotaan <i>Control Input u</i> pada Pengendali FSMC 38
Gambar 4.8	Diagram Blok Sistem <i>Superheater</i> dengan Pengendali FSMC 39
Gambar 4.9	Rancangan Subsistem <i>Sliding Mode Controller</i> dari Pengendali FSMC 40
Gambar 4.10	Perbandingan Grafik Temperatur Uap pada <i>Superheater</i> tanpa Gangguan 41

Gambar 4.11	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal <i>Impuls</i> 1 kJ	43
Gambar 4.12	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal <i>Impuls</i> 5 kJ	43
Gambar 4.13	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal <i>Square</i> 1 kJ.....	44
Gambar 4.14	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal <i>Square</i> 5 kJ.....	45
Gambar 4.15	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperkecil.....	46
Gambar 4.16	Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperbesar	47

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Aturan Umum <i>Fuzzy</i> untuk Pengendali FSMC ..	23
Tabel 4.1 Data Parameter <i>Superheater</i>	27
Tabel 4.2 Aturan <i>Fuzzy</i> untuk Pengendali FSMC pada Sistem <i>Superheater</i>	35

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR SIMBOL

\dot{E}_{sh}	Total laju energi pada <i>superheater</i> (J/s)
\dot{E}_{in}	Laju energi <i>input superheater</i> (J/s)
\dot{E}_{out}	Laju energi <i>output superheater</i> (J/s)
ρ	Massa jenis steam <i>superheater</i> (kg/m ³)
V_{sh}	Volume <i>superheater</i> (m ³)
c_p	Kalor spesifik <i>superheater</i> (J/kg.°C)
\dot{m}_{in}	Laju aliran massa steam <i>superheater</i> yang masuk (kg/s)
\dot{m}_{out}	Laju aliran massa steam <i>superheater</i> yang keluar (kg/s)
T_{in}	Temperatur <i>input superheater</i> (°C)
T_{out}	Temperatur <i>output superheater</i> (°C)
Q_{sh}	Kalor pembakaran pada <i>superheater</i> per satuan waktu (J/s)
q	Laju aliran massa steam <i>desuperheater</i> (kg/s)
h	Entalpi steam <i>desuperheater</i> (J/kg)

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
LAMPIRAN A Sinyal Gangguan Eksternal.....	53
LAMPIRAN B Perancangan Pengendali SMC.....	55

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang yang mendasari penulisan Tugas Akhir. Di dalamnya mencakup identifikasi permasalahan pada topik Tugas Akhir. Uraian ini bersifat umum yang menjelaskan secara ringkas hal-hal yang akan dilakukan pada penyelesaian Tugas Akhir. Informasi yang telah diperoleh tersebut kemudian dirumuskan menjadi permasalahan yang akan diberikan asumsi-asumsi dan batasan-batasan untuk membatasi pembahasan pada Tugas Akhir ini.

1.1 Latar Belakang

Pembangkit tenaga listrik merupakan produsen energi listrik yang dituntut untuk mampu menyediakan pasokan energi listrik yang bermutu bagi para konsumen. Energi listrik dapat diperoleh dari berbagai macam cara, salah satunya adalah energi kalor (panas). Mula-mula energi kalor dipakai untuk menguapkan air dalam *boiler* hingga mencapai tekanan dan temperatur tertentu. Uap tersebut dipakai untuk menggerakkan turbin, sehingga turbin dapat menggerakkan generator listrik. Pembangkit listrik jenis ini disebut Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

PLTU diharapkan mampu bekerja secara optimal agar proses distribusi listrik tidak terhambat. Untuk menunjang keberhasilan tujuan tersebut tentu diperlukan komponen-komponen pendukung atau peralatan yang selalu bekerja dalam keadaan baik. Pada suatu sistem PLTU terdapat beberapa jenis komponen utama, salah satunya adalah *boiler*. *Superheater* merupakan salah satu komponen dalam *boiler* yang berfungsi untuk merubah uap jenuh menjadi uap panas lanjut. Variabel yang diukur dalam *superheater* adalah temperatur uap dimana *set point* yang harus dicapai adalah 541°C. Pengendalian temperatur uap pada *superheater* adalah hal

yang sangat penting untuk keamanan dan efisiensi operasional dari *boiler*. Disinilah uap yang digunakan untuk memutar turbin pertama kali dihasilkan.

Salah satu metode yang cukup diminati dan menjadi usulan para ilmuwan dewasa ini adalah *Sliding Mode Control* (SMC). Pengendali SMC memiliki beberapa kelebihan, yaitu sifatnya yang sangat robust, yaitu mampu bekerja dengan baik pada sistem nonlinear yang memiliki ketidakpastian model ataupun parameter. Namun demikian, pengendali SMC masih memiliki kekurangan, yaitu sedikit lebih rumit dalam perancangannya dan masih adanya *error* [1].

Untuk memperbaiki performansi sistem, SMC murni dimodifikasi dan dikombinasikan dengan konsep Fuzzy Logic Control (FLC) sehingga hasil modifikasi ini disebut *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC). Sehingga pada Tugas Akhir ini, akan dirancang suatu desain sistem kendali temperatur uap pada *superheater* dengan menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana rancangan sistem kendali *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk temperatur uap pada *superheater*.
2. Bagaimana performansi sistem temperatur uap pada *superheater* dengan pengendali *Fuzzy Sliding Mode Control*.

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas disini dibatasi pada:

1. Plant yang dijadikan objek penelitian adalah *superheater* pada PLTU Unit 3-4 PT. PJB UP Gresik.
2. Variabel yang dikontrol adalah temperatur uap dari *superheater*.
3. Model *fuzzy* yang digunakan adalah model *fuzzy* mamdani.

1.4 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Merancang sistem kendali *Fuzzy Sliding Mode Control* untuk temperatur uap pada *superheater*.
2. Menganalisa performansi sistem temperatur uap pada *superheater* dengan pengendali *Fuzzy Sliding Mode Control*.

1.5 Manfaat

Manfaat dari Tugas Akhir ini adalah untuk memberikan gambaran rancangan desain sistem kendali temperatur uap pada *superheater* dengan menggunakan metode *Fuzzy Sliding Mode Control*.

1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir

Penulisan laporan Tugas Akhir ini disusun dalam lima bab. Adapun sistematika penulisan dalam laporan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penyusunan Tugas Akhir, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan laporan Tugas Akhir.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan tentang dasar-dasar teori yang akan digunakan pada Tugas Akhir ini, yaitu *superheater*, sistem pengendalian, *Sliding Mode Control* (SMC), *Fuzzy Logic Control* (FLC), dan *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC).

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang tahap-tahap yang dilakukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.

4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan tentang bagaimana rancangan pengendali temperatur uap pada *superheater* dengan menggunakan metode FSMC. Selain itu, pada bab ini juga dirancang pengendali SMC pada *superheater* agar dapat dilakukan analisa terhadap performansi sistem berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan memasukkan beberapa nilai awal, gangguan dan perubahan parameter.

5. BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan tentang penarikan kesimpulan dan saran dari pembahasan Tugas Akhir ini.

6. Lampiran

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai dasar teori yang digunakan dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Dasar teori yang akan dijelaskan dibagi menjadi beberapa subbab yaitu sistem *superheater*, sistem pengendalian, *Sliding Mode Control*, *Fuzzy Logic Control* dan *Fuzzy Sliding Mode Control*.

2.1 Sistem *Superheater*

Superheater merupakan suatu komponen dalam *boiler* yang digunakan untuk memanaskan lanjut uap saturasi sampai dihasilkan uap yang benar – benar kering. Pemanasan lanjut berguna untuk menjaga agar uap tidak mengembun pada waktu penyebaran di dalam turbin sehingga dapat mengurangi tekanan balik yang diakibatkan oleh mengembunnya uap sebelum waktunya [2].

Prinsip kerja perpindahan panas *superheater* di PLTU terjadi secara konduksi dan konveksi. Uap yang dihasilkan dari ruang bakar dan *water wall Heat Recovery Area* (HRA) meninggalkan *steam drum* sebagai uap jenuh kemudian dipanaskan menjadi uap panas lanjut. Pemanasannya diambil dari panas gas hasil pembakaran di ruang bakar. *Superheater* di dalam boiler PLTU dibagi menjadi tiga tingkatan, yaitu:

1. *Primary Superheater*

Terletak di belakang saluran gas HRA. Setiap elemen terdiri dari 3 pipa dengan bentuk horizontal loop oleh penahan. Uap dari primary inlet header masuk ke dalam *superheater* dan mengalir turun melalui pipa-pipa transfer ke *spray type attemperator* dan masuk ke *secondary inlet header*.

2. *Secondary Superheater*

Letaknya di bagian paling atas dari ruang bakar. Setiap elemen-elemen terdiri dari 9 pipa dengan bentuk horizontal loop. Uap dari *secondary superheater* yang masuk ke pipa penggantung dan mengalir ke atas melalui pipa sepanjang aliran gas. Dari *outlet header* di atas yang menyelubungi chasing, uap mengalir melalui pipa transfer ke *spray attemporator* dan masuk ke *final superheater inlet heater*.

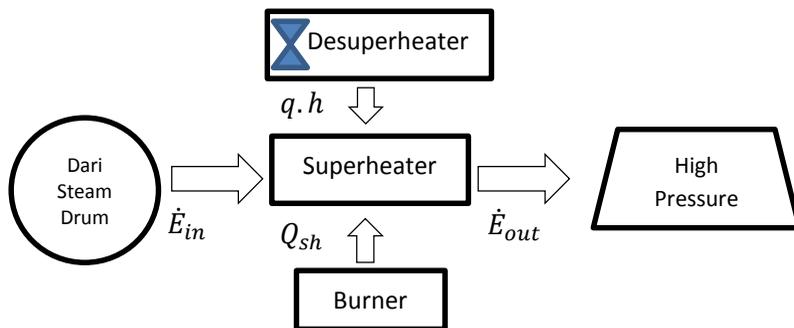
3. *Final Superheater*

Uap dari *final superheater inlet header* masuk ke dalam *final superheater* dan meninggalkan uap melalui *outlet header* menuju *high pressure turbin*.

Pada dasarnya temperatur pada *superheater* harus dijaga supaya selalu mencapai *set point*, agar sesuai dengan temperatur yang digunakan untuk memutar turbin. Bila temperatur uap kurang dari *set point* yang ditentukan maka akan menjadi uap basah sehingga dapat menyebabkan korosi pada turbin. Begitu juga jika temperatur melebihi *set point*, maka akan menjadi uap kering yang membahayakan bagi turbin serta bahan bakar akan terbuang sia-sia. Oleh karena itu, jika temperatur melebihi *set point*, sistem akan menstabilkan temperatur *superheater* sehingga mencapai suhu yang diinginkan. Ketika *cold steam* dari tungku pemanas masuk ke *superheater* maka *cold steam* akan dinaikkan temperaturnya hingga menjadi *hot steam* pada temperatur 541°C. Jika temperatur dari *superheater* di atas *set point*, maka *desuperheater* (*superheater spray*) akan mengeluarkan air yang berfungsi untuk menurunkan suhu hot steam hingga mencapai *set point*. *Supply* air tersebut diatur oleh aksi dari *control valve*, *control valve* akan membuka dan menutup sesuai dengan kebutuhan dari plant *superheater* sehingga selalu mencapai *set point*.

2.1.1 Pemodelan Matematika pada Temperatur *Superheater*

Superheater merupakan tempat berupa jalur pipa-pipa sebagai proses lanjut dalam pengolahan steam yang memanfaatkan flue gas hasil pembakaran, sehingga didapat steam untuk proses ke turbin yang sesuai dengan standart yang telah ditentukan. Sistem temperatur uap *superheater* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem Temperatur Uap *Superheater*

Hukum kesetimbangan energi menyatakan bahwa laju energi yang masuk ke dalam sistem adalah sebanding dengan laju energi yang keluar dari sistem dan energi yang terakumulasi di dalam sistem itu sendiri [3]. Dilihat dari kesetimbangan energi yang terjadi di *superheater*, maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\left[\begin{array}{l} \text{total laju} \\ \text{energi pada} \\ \text{superheater} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{laju energi} \\ \text{dari} \\ \text{steamdrum} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{laju energi} \\ \text{ke} \\ \text{turbin} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{k calor yang} \\ \text{masuk ke} \\ \text{superheater} \end{array} \right]$$

Persamaan yang dibentuk dari hukum kesetimbangan energi pada *superheater* secara matematis adalah:

$$\dot{E}_{sh} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + Q \quad (2.1)$$

Sehingga dengan menggunakan rumus Energi Kalor, persamaan (2.1) dapat ditulis:

$$\dot{m}_{sh} \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in} \cdot c_p \cdot \Delta T_{in} - \dot{m}_{out} \cdot c_p \cdot \Delta T_{out} + Q$$

$$V_{sh} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = \dot{m}_{in} \cdot c_p (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m}_{out} \cdot c_p (T_{out} - T_{ref}) + Q$$

karena C_p konstan dan $Q = Q_{sh} + q \cdot h$, maka persamaan menjadi:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V_{sh} \cdot \rho} \left(\dot{m}_{in} (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m}_{out} (T_{out} - T_{ref}) + \frac{Q_{sh}}{c_p} + \frac{q \cdot h}{c_p} \right) \quad (2.2)$$

Dimana:

- \dot{E}_{sh} : Total laju energi pada *superheater* (J/s)
- \dot{E}_{in} : Laju energi *input superheater* (J/s)
- \dot{E}_{out} : Laju energi *output superheater* (J/s)
- ρ : Massa jenis steam *superheater* (kg/m³)
- V_{sh} : Volume *superheater* (m³)
- c_p : Kalor spesifik *superheater* (J/kg.°C)
- \dot{m}_{in} : Laju aliran massa steam *superheater* yang masuk (kg/s)
- \dot{m}_{out} : Laju aliran massa steam *superheater* yang keluar (kg/s)
- T_{in} : Temperatur *input superheater* (°C)
- T_{out} : Temperatur *output superheater* (°C)
- Q_{sh} : Kalor pembakaran pada *superheater* per satuan waktu (J/s)
- q : Laju aliran massa steam *desuperheater* (kg/s)
- h : Entalpi steam *desuperheater* (J/kg)

2.2 Sistem Pengendalian

Sistem pengendalian merupakan suatu sistem yang bekerja dalam proses pengaturan atau pengendalian pada suatu atau beberapa besaran (variabel dan parameter) sehingga berada pada suatu nilai atau dalam suatu interval nilai (range) tertentu [4].

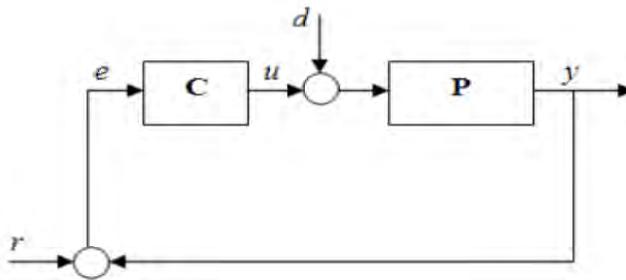
2.2.1 Pengelompokan Sistem Pengendalian

Secara umum, suatu sistem pengendalian dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan jenis operatornya, sistem pengendalian dibagi menjadi dua, yaitu manual dan otomatis.
 - a. Pengendalian secara manual adalah pengendalian yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator.
 - b. Pengendalian otomatis adalah pengendalian yang dilakukan oleh komputer, mesin, atau peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya di bawah pengawasan manusia.

Pengendalian suatu sistem kontrol *superheater* termasuk pengendalian otomatis karena menggunakan peralatan yang bekerja secara otomatis.

2. Berdasarkan jaringannya, sistem pengendalian dibagi dua yaitu jaringan loop terbuka dan loop tertutup.
 - a. Sistem loop terbuka adalah sistem pengendalian dimana keluaran tidak memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga variabel yang dikendalikan tidak dapat dibandingkan terhadap nilai yang diinginkan.
 - b. Sistem loop tertutup adalah sistem pengendalian dimana besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga besaran yang dikendalikan dapat dibandingkan dengan nilai yang diinginkan (*reference point*). Sistem loop tertutup juga disebut sebagai sistem *feedback control*. Gambar 2.2 menunjukkan diagram blok umum suatu sistem loop tertutup.



Gambar 2.2 Diagram Blok Sederhana dari Sistem Loop Tertutup

Pada Gambar 2.2 r adalah *reference point* atau nilai yang diinginkan, d gangguan bagi sistem, e sinyal *error*, u *control input*, y keluaran sistem, C sistem pengendali, dan P adalah *plant*.

2.2.2 Kestabilan Sistem

Salah satu tujuan dari penggunaan sistem pengendali pada suatu *plant* adalah untuk memperoleh suatu sistem yang stabil. Ada beberapa metode yang umum digunakan untuk menentukan atau menguji kestabilan suatu sistem. Pada sistem linear dapat dilakukan dengan beberapa metode, antara lain dengan menggunakan kriteria Nyquist, Routh – Hurwitz, atau Root Locus. Pada suatu sistem non-linear umumnya digunakan metode Lyapunov atau dengan melihat responnya secara langsung.

2.2.3 Ketidakpastian pada Sistem

Semua ketidakpastian pada suatu sistem merupakan gangguan bagi sistem. Gangguan adalah suatu sinyal yang cenderung mempunyai pengaruh yang merugikan pada harga keluaran sistem. Jika suatu gangguan dibangkitkan dari dalam sistem, disebut gangguan internal, di antaranya adalah ketidakpastian model atau parameter pada sistem. Sedangkan gangguan eksternal

dibangkitkan dari luar sistem dan merupakan suatu masukan atau sinyal tambahan bagi sistem.

2.3 Sliding Mode Control (SMC)

Sliding Mode Control merupakan merupakan teknik umpan balik terlebih dahulu dengan mendefinisikan permukaan. Sistem yang dikendalikan (variabel) akan dipindahkan ke permukaan dan sistem gerak diarahkan ke titik ekuilibrium yang diinginkan[5]. Untuk menjaga agar sistem dapat tetap terkendali, SMC memanfaatkan metode kestabilan Lyapunov.

2.3.1 Fungsi Switching

Pandang suatu sistem dinamis:

$$\dot{x}^{(n)}(t) = f(x, t) + b(x, t) \cdot u + d(t)$$

dimana u adalah control input, x merupakan vektor keadaan, $f(x, t)$ dan $b(x, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika x_d merupakan x yang diinginkan, maka tracking error-nya dapat dinyatakan dengan:

$$e(t) = x(t) - x_d(t)$$

Fungsi *switching* yaitu permukaan $S(x, t)$ di dalam ruang keadaan R^n , memenuhi persamaan [6] :

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e$$

Dengan λ berupa konstanta positif. Dimana fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding*.

2.3.2 Permukaan Sliding

Fungsi *switching* disebut dengan permukaan *sliding* (*sliding surface*) jika memenuhi:

$$S(x, t) = 0 \quad (2.3)$$

dengan λ suatu konstanta positif yang dipilih agar persamaan (2.3) menjadi permukaan yang stabil. Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen penting dari SMC sebagai tempat trayektori keadaan meluncur dari kondisi awal (*initial condition*) menuju keadaan yang diinginkan (*reference point*). Untuk sistem berorde-2 ($n=2$), permukaan *sliding* dapat ditulis:

$$S(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{2-1} = \frac{d}{dt} + \lambda e$$

atau

$$S(x, t) = \dot{e} + \lambda e \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) menunjukkan suatu garis lurus pada bidang $\dot{e}e$. Permukaan sliding ini membagi bidang menjadi dua bagian, yaitu $S > 0$ dan $S < 0$. Agar trayektori keadaan dapat meluncur, maka sistem harus berada dalam kondisi *sliding*. Dengan demikian, besar nilai *control input* bergantung pada nilai $S(x, t) = 0$

2.3.3 Kondisi *Sliding*

Perancangan *control law* pada SMC dilakukan sedemikian hingga $e(t)$ bergerak menuju permukaan *sliding* dan meluncur pada permukaan tersebut untuk semua $t \geq 0$. Untuk memperoleh *control law* digunakan suatu fungsi yang mirip fungsi Lyapunov dimana fungsi yang dikonstruksi merupakan fungsi definit positif, yaitu:

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (2.5)$$

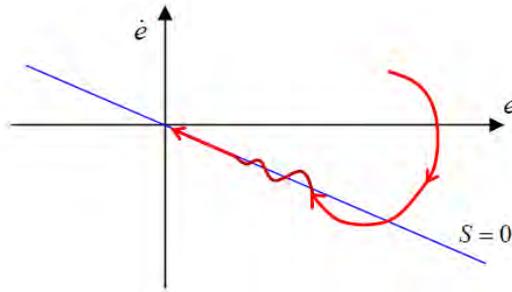
dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S \neq 0$. Kondisi yang memenuhi syarat kestabilan sistem merupakan turunan pertama dari persamaan (2.5) yang bersifat definit negatif, yaitu:

$$\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (2.6)$$

Pertidaksamaan (2.6) disebut kondisi *sliding*. Kondisi tersebut dapat ditulis dalam beberapa bentuk yaitu :

$$S\dot{S} < 0 \text{ atau } \dot{S} \text{sgn}(S) \leq -\eta \quad (2.7)$$

dengan suatu η konstanta positif. Gambar 2.3 menginterpretasikan Gambar untuk kondisi *sliding* dari metode pengendalian SMC, dimana trayektori keadaan bergerak meluncur pada garis lurus $S=0$ yang merupakan permukaan *sliding*. *Sliding mode* berarti bahwa sekali trayektori keadaan e mencapai permukaan sliding, maka trayektori sistem akan bertahan di sana sambil meluncur ke titik asal bidang $\dot{e}e$ secara independen dengan semua ketidakpastian.



Gambar 2.3 Kondisi Sliding

2.3.4 Perancangan Pengendali SMC

Perancangan suatu pengendali SMC dapat diuraikan sebagai berikut [1] :

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(x, t)$ seperti pada persamaan (2.4) dari **tracking error** sistem dinamik.
2. Menentukan permukaan *Sliding*, yaitu $S(x, t) = 0$ dari fungsi *Switching* yang telah diperoleh.
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} .

Dinamika saat dalam kondisi *sliding* dapat dituliskan sebagai:

$$S=0 \quad (2.8)$$

Dengan menyelesaikan persamaan (2.8) diperoleh ekspresi untuk nilai estimasi pengendali \hat{u} atau yang disebut kontrol ekivalen.

4. Mendefinisikan aturan SMC yaitu penggunaan *control law*,

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S)$$

Dimana fungsi signum, sgn , pada persamaan (2.8) didefinisikan sebagai :

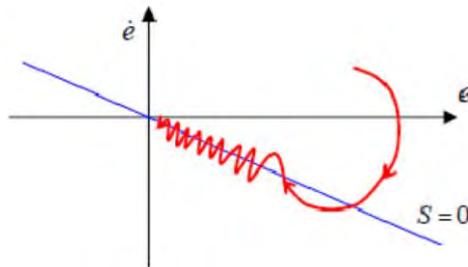
$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & , x < 1 \\ 1 & , x \geq 1 \end{cases}$$

Pada kasus dimana sistem dimodelkan dengan pengukuran sempurna dan tanpa gangguan, kontrol ekivalen sudah cukup mewakili kestabilan sistem dalam kondisi *sliding*. Namun kondisi demikian tidak pernah dijumpai dalam kenyataan sehingga masih memerlukan penambahan *control term* ($K\text{sgn}(S)$).

5. Substitusi nilai \hat{u} pada *control law* sehingga diperoleh *control input* baru sebagai pengganti *control input* sebelumnya.
6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding* pada persamaan (2.7)

2.3.4 Kondisi Chattering

Munculnya *chattering* merupakan salah satu kekurangan metode SMC. *Chattering* merupakan osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*. Hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem.



Gambar 2.4 Kondisi *Chattering*

Gambar 2.4 menginterpretasikan *chattering*, yang menyebabkan trayektori keadaan sistem berupa osilasi dan tidak menuju ke titik asal bidang $\dot{e}e$.

2.3.5 Sliding Mode Control dengan Boundary Layer (BL)

Untuk mencegah ketidakstabilan akibat *chattering*, pada SMC diterapkan satu *boundary layer* (BL) pada permukaan *sliding* yang membuat *smooth* dinamika *control input* u dan menyakinkan bahwa sistem berada di dalam *layer*. Lebar dari BL dinyatakan sebagai 2Φ . Ambil $|S|$ sebagai jarak antara keadaan e dan garis *sliding* $S = 0$. Maka vektor keadaan e berada di dalam BL jika $|S| \leq \Phi$, dan berada di luar jika $|S| > \Phi$.

Penggunaan BL di dalam *control law* pada $u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S)$ dilakukan dengan mengganti fungsi $\operatorname{sgn}(S)$ dengan $\operatorname{sat}\left(\frac{S}{\Phi}\right)$ dan K adalah konstanta positif.

Dimana fungsi saturasi sat didefinisikan sebagai :

$$\operatorname{sat}(x) = \begin{cases} x & \text{jika } |x| \leq 1 \\ \operatorname{sgn}(x) & \text{jika } |x| \geq 1 \end{cases}$$

kondisi *sliding* pada SMC menggunakan *boundary layer* adalah keadaan dimana trayektori keadaan sistem bergerak dan berosilasi disekitar permukaan *sliding* di dalam *boundary layer*. Konsep *boundary layer* ini dapat mereduksi besarnya osilasi lebar pada *chattering* sehingga sistem tetap stabil dengan nilai Φ adalah lebar dari *boundary layer*, sedangkan ϵ menyatakan ketebalan dari *boundary layer*.

2.4 Fuzzy Logic Control (FLC)

Logika *fuzzy* merupakan pengembangan dari teori himpunan *fuzzy* yang diperkenalkan oleh Prof. Lotfi A. Zadeh tahun 1965 dari Universitas California Berkeley. Logika *fuzzy* berbeda dengan logika konvensional digital biasa (*Boolean*), dimana logika biasa

hanya mengenal dua harga, yaitu “satu dan nol” atau “ya dan tidak”. Sedangkan logika *fuzzy* harga kebenaran diberikan dalam terminologi linguistik dengan menyertakan predikat kekaburan (*fuzzines*) pada proposisinya. Dengan menggunakan konsep sifat kesamaan satu nilai, logika *fuzzy* dapat memberikan nilai dari nol secara kontinu sampai satu. Pengendali *fuzzy* (*fuzzy controller*) umumnya bekerja secara heuristic (trial and error) dan berdasarkan pengalaman manusia.

2.4.1 Konsep Himpunan *Fuzzy*

Konsep himpunan bagian (*fuzzy set*) pertama kali diajukan oleh Prof. Zadeh, yang **didefinisikan** sebagai: suatu himpunan *fuzzy* (*fuzzy set*) A dalam semesta pembicaraan (*Universe of discourse*) U dinyatakan dengan fungsi keanggotaan (*membership function*) μ_A , yang harganya berada dalam interval $[0,1]$. Harga kebenaran dalam logika *fuzzy* dinyatakan berdasarkan fungsi keanggotaan μ_A , dimana untuk $\mu_A = 1$ berarti memiliki keanggotaan penuh, sedangkan $\mu_A = 0$ berarti tidak termasuk sebagai anggota dari himpunan bagian tersebut. Secara matematika himpunan *fuzzy* ini dinyatakan dengan $\mu_A:U \rightarrow [0,1]$.

Himpunan *fuzzy* A dalam semesta pembicaraan U biasa dinyatakan sebagai sekumpulan pasangan elemen u (u anggota U) dan besarnya derajat keanggotaan (*grade of membership*) elemen tersebut, μ_A sebagai [7]:

$$A = \{ (u, \mu_A(u) \mid u \in U) \}$$

2.4.2 Variabel Linguistik

Penggunaan istilah kualitatif pada logika *fuzzy* dapat menimbulkan variabel linguistik, sebagai contoh : agak sakit, sakit, sangat sakit, biru, biru muda, biru tua, dan lain –lain [8].

Variabel linguistik adalah variabel yang nilainya berupa kata atau kalimat, bukan berupa bilangan. Penggunaan kata atau kalimat

umumnya kurang spesifik dibandingkan dengan bilangan. Dapat dikatakan bahwa variabel linguistik merupakan alat dasar dari *fuzzy logic*.

Definisi 1. Variabel linguistik adalah pasangan $(X, T(x), U, G, \tilde{M})$, dengan :

X : Nama variabel

$T(x)$: Himpunan nilai - nilai linguistik dari x dengan setiap nilai adalah *fuzzy* variabel.

U : Semesta

G : Aturan sintaks atau generator bahasa

\tilde{M} : *fuzzy* subset dari U

2.4.3 Fungsi Keanggotaan

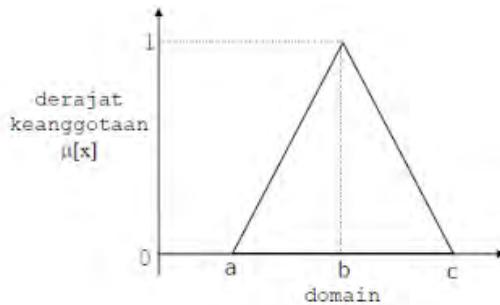
Fungsi keanggotaan adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik – titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering disebut derajat keanggotaan) yang memiliki nilai pada interval 0 sampai 1. Beberapa fungsi keanggotaan yang digunakan pada penulisan ini adalah:

1. Fungsi Keanggotaan Segitiga

Fungsi ini mempunyai tiga buah parameter. Rumus fungsi keanggotaan :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{jika } x \geq c \end{cases}$$

Bentuk diagram fungsi keanggotaan segitiga ditunjukkan pada Gambar 2.5 berikut:



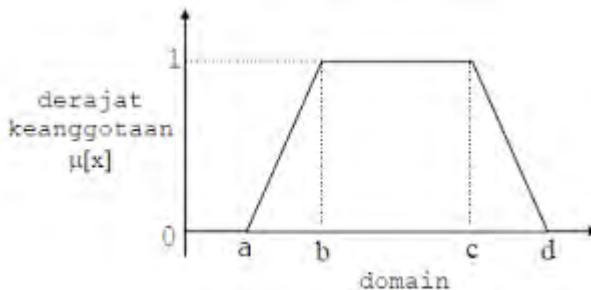
Gambar 2.5 Fungsi Keanggotaan Segitiga

2. Fungsi Keanggotaan Trapesium

Fungsi ini mempunyai empat buah parameter dan dirumuskan dengan fungsi:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a < x < b \\ 1, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ \frac{x-d}{c-d}, & \text{jika } c < x < d \\ 0, & \text{jika } x \geq d \end{cases}$$

Bentuk diagram fungsi keanggotaan trapesium ditunjukkan pada Gambar 2.6 berikut:



Gambar 2.6 Fungsi Keanggotaan Trapesium

2.4.4 Penentuan Aturan *Fuzzy*

Ada empat pendekatan yang dapat dilakukan untuk menentukan himpunan *fuzzy* beserta aturannya, yaitu [9] :

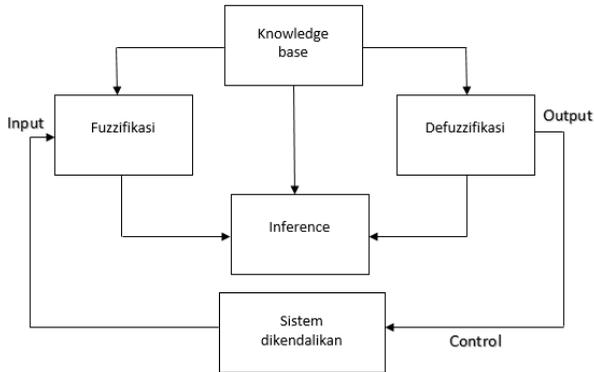
1. Menentukan dari pengalaman para ahli atau dari pengetahuan teknik pengendalian.
2. Memperhatikan perilaku manusia yang bertindak sebagai operator.
3. Menggunakan model *fuzzy* dari suatu proses.
4. Mempelajari melalui pengalaman atau simulasi dari proses pembelajaran.

2.4.5 Struktur Dasar Pengendali *Fuzzy*

Suatu pengendali *fuzzy* tersusun dari empat buah komponen yang bekerja bersamaan dan dapat diuraikan sebagai [8]:

1. Fuzzifikasi, mengubah masukan nilai-nilai *crisp* menjadi nilai-nilai *fuzzy* dan mengubah input data ke dalam nilai-nilai inguistik yang cocok.
2. *Knowledge base*, berisi aturan *fuzzy* dalam mengendalikan sistem.
3. *Inference mechanism*, mengevaluasi aturan kontrol yang relevan dan mengambil keputusan masukan yang akan digunakan untuk plant.
4. Defuzzifikasi, mengubah kesimpulan yang diperoleh dari *inference mechanism* menjadi masukan plant, dari nilai *fuzzy* menjadi nilai *crisp*.

Keempat komponen tersebut dinyatakan dengan Gambar 2.7, dimana masukan *crisp* pada suatu pengendali *fuzzy* diubah menjadi masukan *fuzzy* melalui proses fuzzifikasi. Untuk menentukan keluaran *fuzzy*, masukan *fuzzy* diproses oleh suatu mekanisme tertentu (umumnya berupa operator max-min) berdasarkan aturan – aturan *fuzzy* yang terkumpul pada *knowledge base*. Keluaran *crisp* diperoleh dari proses defuzzifikasi.



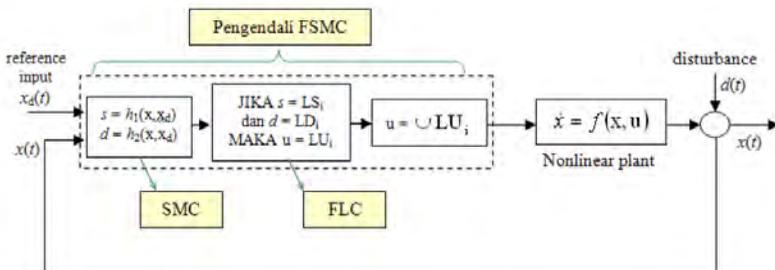
Gambar 2.7 Struktur Dasar *Fuzzy Logic Controller*

2.5 Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)

Untuk memperbaiki performansi sistem SMC, dilakukan modifikasi pada SMC dengan menggunakan FLC. Modifikasi ini umumnya disebut sebagai *fuzzy sliding mode control* (FSMC) atau *sliding mode fuzzy logic control* (SMFLC).

2.5.1 Skema Dasar Pengendali FSMC

Suatu pengendali FSMC memiliki skema dasar seperti pada Gambar 2.5, skema tersebut juga menunjukkan sistem loop tertutup [10].



Gambar 2.8 Skema Dasar Pengendali FSMC pada Suatu Sistem Loop Tertutup

Dari skema loop tertutup pada Gambar 2.8 tampak bahwa sistem pengendali FSMC tersusun oleh dua macam pengendali, yaitu pengendali SMC dan FLC. Pengendali SMC tidak bekerja secara penuh sebagaimana pengendali SMC murni. Namun, setelah melalui beberapa tahapan yang akan diproses dengan pengendali FLC.

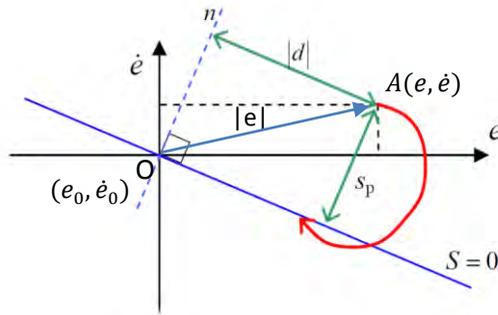
Inputan pada pengendali *fuzzy* adalah dua variabel yang ditentukan sebelumnya melalui pengendali SMC, yaitu s_p dan d . Variabel – variabel ini selanjutnya diproses dengan pengendali FLC sehingga keluaran dari pengendali FLC ini adalah *control input* u untuk *plant*.

2.5.2 Perancangan Pengendali FSMC

Perancangan pengendali FSMC bekerja sebagaimana SMC, yaitu menggunakan sebuah permukaan *sliding*. Oleh karena itu, tetap digunakan fungsi *switching* untuk menentukan besarnya nilai u . Namun langkah – langkah dalam merancang pengendali FSMC lebih sederhana daripada merancang pengendali SMC, terutama dalam hal menentukan besarnya *control input* u . Karena pada FSMC, besarnya u diperoleh dari aturan *fuzzy* dengan bentuk

$$R_C^i: \text{Jika } s = LS_i \text{ dan } d = LD_i \text{ maka } u = LU_i \quad (2.9)$$

dimana s adalah jarak antara vektor keadaan dan permukaan *sliding*, dan d adalah jarak antara vektor keadaan dan vektor normal ke permukaan *sliding* dimana vektor normal melalui titik asal dari ruang keadaan. $LS_i \in TS$ dan $LD_i \in TD$ masing – masing adalah nilai *fuzzy* dari variabel keadaan *fuzzy* s dan d pada daerah *fuzzy* ke- i dari ruang keadaan *fuzzy*. LU_i adalah vektor masukan *fuzzy* yang berkorespondensi pada daerah *fuzzy* ke- i dari ruang keadaan *fuzzy*. TS , TD dan TU adalah himpunan dari s , d dan u yang mencakup range dari nilai *fuzzy* s, d dan u [10].



Gambar 2.9 Interpretasi Grafis dari s_p dan d [10]

Gambar 2.9 menunjukkan interpretasi grafis s_p dan d pada bidang $e\dot{e}$, dimana s_p menunjukkan jarak antara titik keadaan dan permukaan *sliding*. d menunjukkan jarak antara titik keadaan dan garis normal dari permukaan *sliding* yang melalui titik asal bidang $e\dot{e}$.

Berdasarkan interpretasi grafis s_p dan d pada bidang $e\dot{e}$, nilai s_p dapat diperoleh dengan menggunakan rumus jarak titik $A(e, \dot{e})$ ke garis $S = 0$, dengan $S = \dot{e} + \lambda e = 0$, sebagai berikut:

$$s_p = \frac{|1 \cdot \dot{e} + \lambda \cdot e + 0|}{\sqrt{1^2 + \lambda^2}}$$

$$s_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1^2 + \lambda^2}}$$

Sedangkan untuk mendapatkan nilai d dapat digunakan teorema pythagoras, sehingga diperoleh :

$$|e|^2 = d^2 + s_p^2$$

$$d^2 = |e|^2 - s_p^2$$

$$d = \sqrt{|e|^2 - s_p^2}$$

dengan :

$$|e|^2 = (e - e_0)^2 + (\dot{e} - \dot{e}_0)^2$$

FSMC dirancang dengan menggunakan bidang fase yang ditentukan oleh s_p dan d . Aturan *fuzzy* dari FSMC menghasilkan nilai *fuzzy* dari input u untuk setiap pasang nilai *fuzzy* dari s_p dan d . Bentuk umum dari aturan *fuzzy* untuk FSMC dapat dilihat pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Aturan Umum *Fuzzy* untuk Pengendali FSMC [10]

		S_p							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
d	B	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
	M	PB	PB	PB	PM	NM	NB	NB	NB
	S	PB	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NB
	Z	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB

P – positive

N – negative

Z – zero

B – big

M – medium

S – small

Dari Tabel 2.1 dapat diambil beberapa contoh mengenai aturan *fuzzy* untuk FSMC, antara lain :

Jika s_p adalah *positive medium* (PM) dan d adalah *small* (S), maka u adalah *negative big* (NB). Lalu jika s_p adalah *negative big* (NB) dan d adalah *zero* (Z), maka u adalah *positive big* (PB).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan langkah-langkah yang digunakan dalam penyelesaian masalah pada Tugas Akhir. Disamping itu, dijelaskan pula tahapan pelaksanaan yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

3.1 Tahapan Penelitian

Untuk mencapai dari tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini, akan dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

a. Studi Literatur

Pada tahap ini akan dipelajari secara rinci hal-hal yang terkait dengan materi Tugas Akhir, yaitu *Sliding Mode Control* (SMC), *Fuzzy Logic Control* (FLC), serta *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC) selain itu juga mengenai sistem *superheater*. Sumber-sumber literatur tersebut diperoleh dari berbagai buku teks, laporan Tugas Akhir, jurnal ilmiah dan sumber dari internet.

b. Pemodelan Matematis *Superheater*

Pada tahap ini akan dilakukan pemodelan secara matematis sistem dari *superheater* dengan data yang telah diperoleh sehingga menjadi suatu model matematika untuk dapat diproses ke langkah selanjutnya.

c. Perancangan Sistem Kendali

Tahap selanjutnya adalah merancang sebuah sistem kendali temperatur uap dari model matematika *superheater* dengan menggunakan SMC, setelah mendapatkan rancangan tersebut lalu dilanjutkan untuk merancang FSMC.

d. Simulasi dan Analisa Hasil dengan MATLAB

Langkah selanjutnya yaitu mensimulasikan semua rancangan sistem kendali temperatur uap *superheater* tersebut

pada program MATLAB, lalu menganalisa hasil simulasi yang telah dibuat dengan cara mencoba semua kemungkinan dari parameter-parameter maupun dari semua kondisi yang ada baik tanpa gangguan maupun dengan tambahan gangguan dari luar.

e. **Penyimpulan Hasil dan Pemberian Saran**

Setelah melakukan simulasi dan analisa hasil yang telah dilakukan, selanjutnya memberikan kesimpulan yang ada serta memberikan saran-saran mengenai apa saja kelebihan maupun kekurangan dari metode FSMC jika dibandingkan metode SMC.

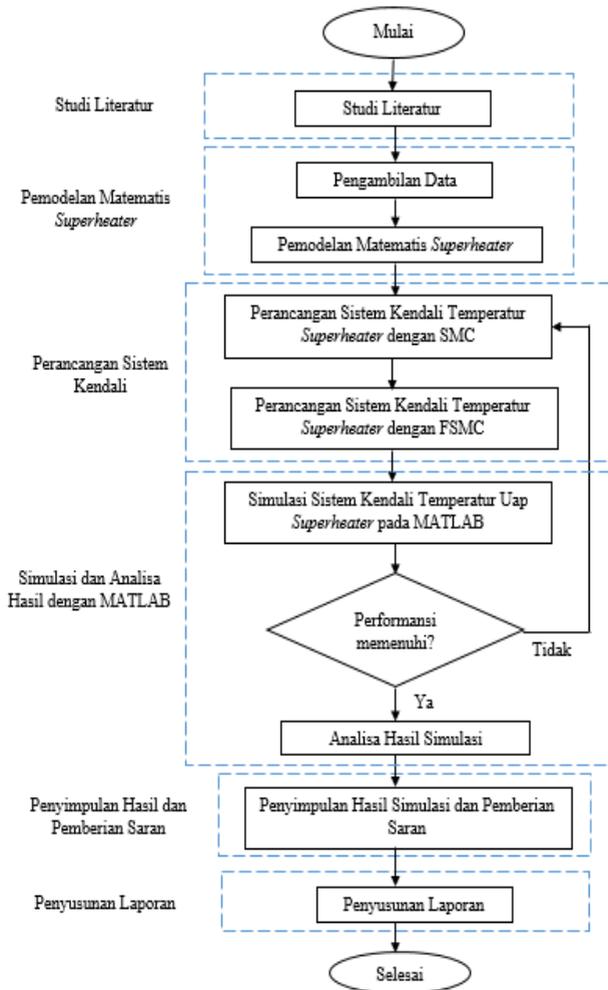
f. **Penyusunan Laporan**

Menyusun semua hasil kegiatan berupa laporan dari langkah awal sampai akhir, yaitu dari studi literatur sampai analisa hasil dan penarikan kesimpulan.

3.2 Diagram Alur Metode Penelitian

Diagram alur metode penelitian ditunjukkan pada Gambar

3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alur Metode Penelitian

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai bagaimana merancang sistem pengendali SMC dan FSMC pada sistem temperatur uap *superheater*, setelah sebelumnya telah diketahui langkah-langkah perancangan sistem pengendalian. Selain itu, pada bab ini akan dilakukan pengujian pada kedua sistem pengendali tersebut.

4.1 Pemodelan pada *Superheater*

Pemodelan matematika pada *superheater* yang mengacu dari pemodelan di bab 2 diperoleh:

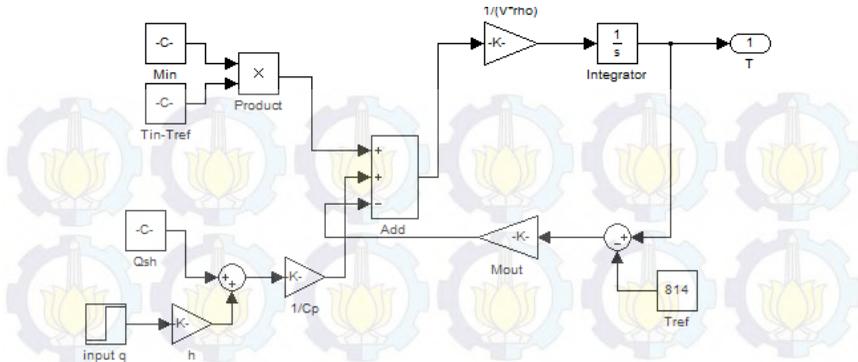
$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V_{sh} \cdot \rho} \left(\dot{m}_{in} (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m}_{out} (T_{out} - T_{ref}) + \frac{Q_{sh}}{c_p} + \frac{q \cdot h}{c_p} \right) \quad (2.2)$$

Nilai parameter-parameter dari pemodelan *superheater* tersebut dapat menggunakan nilai yang ada pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 4.1 Data Parameter *Superheater*

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
\dot{m}_{in} (kg/s)	152,77	V_{sh} (m ³)	21,45
\dot{m}_{out} (kg/s)	160,27	ρ (kg/m ³)	50,4
T_{in} (K)	634	c_p (J/kg · °K)	2822
Q_{sh} (J/s)	77.103.935	h (J/kg)	83.562

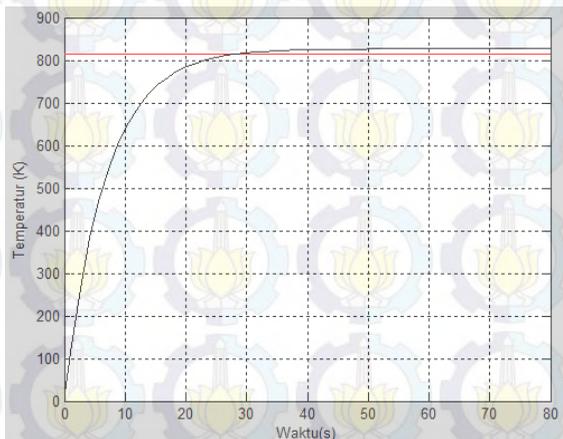
Selanjutnya dari model matematika pada Persamaan (2.2) akan diimplementasikan pada simulink Matlab tanpa sistem pengendali yang dirangkai pada diagram blok yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Diagram Blok Sistem *Superheater*

Pada Gambar 4.1 menunjukkan diagram blok sistem *superheater* yang terdiri dari Persamaan (2.2) sehingga menghasilkan suatu output T. Dengan inputan fungsi step q, dan parameter-parameter yang ada pada Tabel 4.1.

Setelah dibentuk blok diagram, lalu dengan software simulink pada Matlab disimulasikan sehingga menghasilkan grafik seperti pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Grafik Temperatur Uap Tanpa Kontroler

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa temperatur uap sudah stabil di 826.7 K namun tidak pada kondisi yang diinginkan (masih terjadi eror) yaitu di 814 K sehingga diperlukan sebuah pengendali sistem temperatur uap *superheater* dengan *desuperheater* (*superheater spray*) yang akan mengeluarkan *steam* yang berfungsi untuk menurunkan suhu *hot steam* hingga mencapai *set point* dan mendapatkan performansi yang baik.

4.2 Perancangan Pengendali Sistem Temperatur Uap pada *Superheater*

Pada perancangan pengendali sistem temperatur uap pada *superheater* ini akan dirancang sistem pengendali dengan menggunakan metode SMC dan FSMC untuk dilakukan pengujian. Perancangan kedua sistem pengendali ini selanjutnya diimplementasikan pada *software* MATLAB.

4.2.1 Perancangan Pengendali *Sliding Mode Control* (SMC)

Dalam merancang sebuah pengendali SMC, langkah pertama yang harus dilakukan menetapkan T_d yaitu temperatur uap yang diinginkan. Selanjutnya dengan menggunakan konsep SMC, akan digunakan *error* selisih antara temperatur uap yang ada dengan temperatur uap yang diinginkan.

Dari Persamaan (2.2) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{V_{sh} \cdot \rho} \left(\dot{m}_{in} \cdot (T_{in} - T_{ref}) - \dot{m}_{out} \cdot (T_{out} - T_{ref}) + \frac{Q_{sh}}{c_p} + \frac{q \cdot h}{c_p} \right)$$

dimisalkan:

$$\frac{\dot{m}_{in} \cdot (T_{in} - T_{ref})}{V_{sh} \cdot \rho} = a ; \quad \frac{\dot{m}_{out}}{V_{sh} \cdot \rho} = b ; \quad \frac{\dot{m}_{out} \cdot T_{ref}}{V_{sh} \cdot \rho} = c ; \quad \frac{Q_{sh}}{V_{sh} \cdot \rho \cdot c_p} = d ;$$

$$\frac{h}{V_{sh} \cdot \rho \cdot c_p} = e$$

$$\text{Sehingga } \dot{T} = a - bT + c + d + eq \quad (4.1)$$

Tracking error dari temperatur uap adalah:

$$\tilde{T} = T - T_d \quad \text{dengan } T_d = T_{ref} = \text{konstan}$$

Karena sistem berorde 1 maka dibentuk fungsi *switching* sebagai berikut:

$$S(T, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} \tilde{T} \quad \text{dengan } n=1$$

$$S(T, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{1-1} \tilde{T}$$

$$S(T, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^0 \tilde{T}$$

$$S(T, t) = \tilde{T}$$

$$S(T, t) = T - T_d$$

Sedangkan turunan dari S adalah

$$\dot{S}(T, t) = \dot{\tilde{T}} = \dot{T} - \dot{T}_d \quad (4.2)$$

Karena $T_d = \text{konstan}$ maka $\dot{T}_d = 0$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.1) ke (4.2), menjadi:

$$\dot{S}(T, t) = a - bT + c + d + eq \quad (4.3)$$

Selanjutnya ditentukan nilai \hat{q} dari Persamaan (4.3) saat dalam kondisi *sliding* dengan nilai $\dot{S} = 0$. Sehingga didapat:

$$a - bT + c + d + eq = 0$$

Sehingga didapat nilai \hat{q} yaitu

$$\hat{q} = \frac{-a+bT-c-d}{e} \quad (4.4)$$

Berdasarkan control law yang memenuhi kondisi sliding adalah:

$$q = \hat{q} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.5)$$

Maka dari Persamaan (4.4) dan (4.5) diperoleh:

$$q = \frac{-a+bT-c-d}{e} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.6)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (4.3) ke (4.6), diperoleh

$$\dot{S}(T, t) = a - bT + c + d + e \left(\frac{-a+bT-c-d}{e} - K \operatorname{sgn}(S) \right)$$

$$\dot{S}(T, t) = -e K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.7)$$

Kemudian akan dirancang nilai K dengan cara mensubstitusikan Persamaan (4.7) ke $\dot{V} = S\dot{S} \leq -\eta|S|$ yang telah dibahas sebelumnya agar memenuhi kondisi *sliding* yaitu:

$$S\dot{S} \leq -\eta|S|$$

$$S(-e K \operatorname{sgn}(S)) \leq -\eta|S|$$

$$\frac{S(-e K \operatorname{sgn}(S))}{|S|} \leq -\eta$$

$$\operatorname{sgn}(S) \cdot -e K \operatorname{sgn}(S) \leq -\eta|S|$$

karena $\operatorname{sgn}(S) \cdot \operatorname{sgn}(S) = 1$ maka:

$$-e K \leq -\eta$$

$$K \geq \frac{-\eta}{-e}$$

$$K \geq \frac{\eta}{e}$$

$$K \geq \left| \max \frac{\eta}{e} \right| \quad (4.8)$$

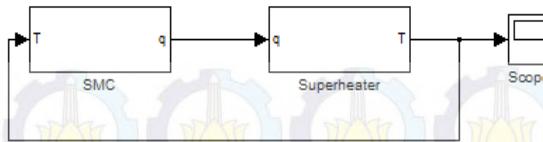
Kemudian digunakan suatu *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi *signum* (sgn) menjadi fungsi *saturasi* (sat) sebagai berikut:

$$q = \hat{q} - K \operatorname{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (4.9)$$

Dengan demikian, rancangan pengendali SMC pada temperatur uap di *superheater* yang diperoleh dari mensubstitusikan Persamaan (4.4) dan (4.8) ke Persamaan (4.9) adalah sebagai berikut:

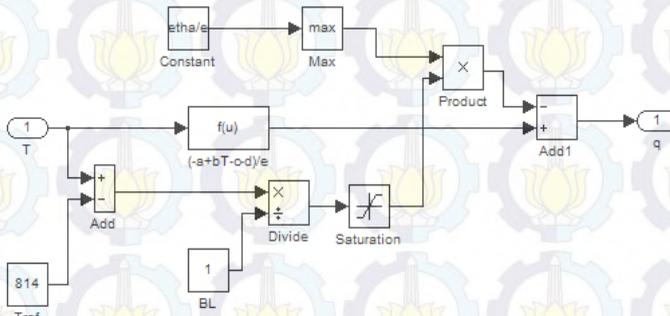
$$q = \frac{-a+bT-c-d}{e} - \left| \max \frac{\eta}{e} \right| \operatorname{sat}\left(\frac{S}{\phi}\right) \quad (4.10)$$

Setelah rancangan sistem pengendali SMC diperoleh, selanjutnya disimulasikan pada simulink Matlab. Sistem pengendali ini dirangkai dalam bentuk diagram blok pada sistem *superheater* yang berupa lup tertutup dengan beberapa nilai yang terdapat pada Tabel 4.1, selain itu juga diambil beberapa nilai-nilai lainnya yang ada di dalam perhitungan diantaranya nilai lebar *boundary layer* $\phi = 1$ dan $\eta = 0,3$. Maka akan ditampilkan diagram blok temperatur uap pada sistem *superheater* dengan pengendali SMC sebagai berikut.



Gambar 4.3 Diagram Blok Sistem Temperatur Uap *Superheater* dengan Pengendali SMC

Pada Gambar 4.3 tampak bahwa dalam diagram blok sistem temperatur uap *superheater* dengan pengendali SMC dengan subsistem yang terdiri dari subsistem plant *superheater* seperti pada Gambar 4.1 dan subsistem SMC. Berikut adalah Gambar dari subsistem SMC yang ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Diagram Blok Subsistem SMC

Gambar 4.4 menunjukkan diagram blok Subsistem SMC yang didapat dari Persamaan (4.10) yang merupakan rancangan pengendali SMC pada temperatur uap di *superheater*. Dengan masukan T yang didapat dari plant *superheater* dan keluaran yang dihasilkan adalah q.

4.2.2 Perancangan Pengendali *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC)

Dari subbab 2.5 telah dijelaskan bahwa FSMC merupakan kombinasi dari SMC dan FLC (*Fuzzy Logic Control*). Sehingga untuk merancang pengendali FSMC diperlukan suatu fungsi *switching* S sebagai berikut:

$$S = \dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T}$$

Dengan

$$\tilde{T} = T - T_d$$

$$\dot{\tilde{T}} = \dot{T} - \dot{T}_d$$

Permukaan slidingnya adalah :

$$\dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T} = 0$$

Penentuan nilai control input u pada FSMC menggunakan dua variabel masukan pada fuzzy yaitu s_p dan d seperti yang telah dibahas sebelumnya di bab 2. Sehingga didapat :

$$S_p = \frac{|\dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T}|}{\sqrt{1^2 + \lambda^2}} \quad (4.11)$$

$$d = \sqrt{\tilde{T}^2 - s_p^2} \quad (4.12)$$

Selanjutnya ditentukan fungsi keanggotaan dari s_p dan d beserta aturannya. Pada penentuan fungsi keanggotaan, perlu diketahui batasan nilai s_p dan d . Hal ini dapat dilihat dari hasil scope nilai s_p dan d dari perancangan pengendali SMC seperti pada Gambar 4.3 yang telah dibuat sebelumnya. Selanjutnya diambil nilai *error* dari plant *superheater* seperti pada Lampiran B. Sehingga didapat intervalnya yaitu:

$$s_p \in [0 \ 730]$$

$$d \in [0 \ 530]$$

Setelah diketahui batasan nilainya, selanjutnya dirancang fungsi keanggotaan dari s_p dan d . Tipe fungsi keanggotaan yang digunakan yaitu fungsi keanggotaan segitiga dan fungsi

keanggotaan trapesium seperti yang telah dibahas di bab 2. Pada fungsi keanggotaan s_p terdapat 8 variabel, yaitu NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB. Sedangkan pada fungsi keanggotaan d terdapat 4 variabel, yaitu Z, S, M, B [10]. Setelah itu, dirancang skala parameter tiap variabel dan fungsi keanggotaan sedemikian hingga didapat hasil *ouput* terbaik (yang paling mendekati reference). Sehingga diperoleh fungsi keanggotaan s_p dan d yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6.

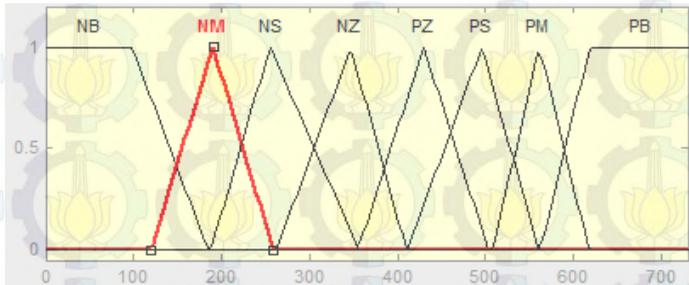
Rumus fungsi keanggotaan s_p tipe segitiga untuk variabel NM, NS, NZ, PZ, PS dan PM yaitu:

$$\mu_{s_p}(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{jika } x \geq c \end{cases}$$

Sedangkan rumus fungsi keanggotaan s_p tipe trapesium untuk variabel NB dan PB yaitu:

$$\mu_{s_p}(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } u \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ \frac{x-d}{c-d}, & \text{jika } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{jika } x \geq d \end{cases}$$

Bentuk diagram fungsi keanggotaan s_p ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Fungsi Keanggotaan s_p pada Pengendali FSMC

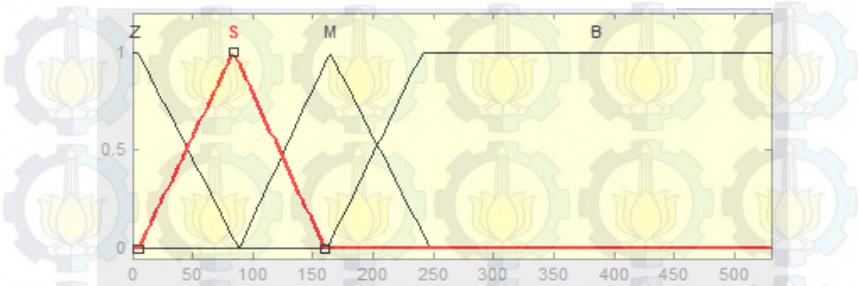
Rumus fungsi keanggotaan d tipe segitiga untuk variabel S dan M yaitu:

$$\mu_d(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c}, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ 0, & \text{jika } x \geq c \end{cases}$$

Sedangkan rumus fungsi keanggotaan d tipe trapesium untuk variabel Z dan B yaitu:

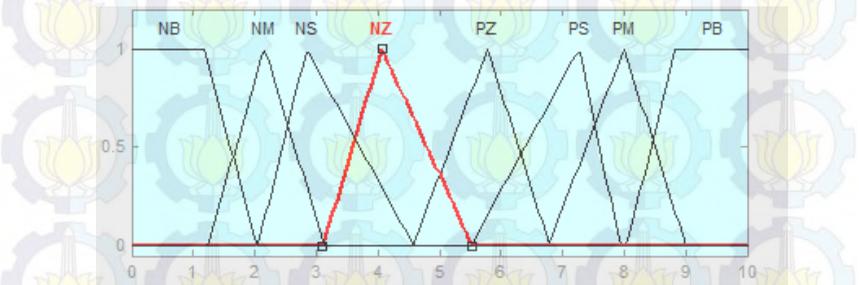
$$\mu_d(x) = \begin{cases} 0, & \text{jika } u \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{jika } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{jika } b \leq x \leq c \\ \frac{x-d}{c-d}, & \text{jika } c \leq x \leq d \\ 0, & \text{jika } x \geq d \end{cases}$$

Bentuk diagram fungsi keanggotaan d ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.6 Fungsi Keanggotaan d pada Pengendali FSMC

Nilai *control input* u secara umum ditentukan dengan menyesuaikan kemampuan dari q atau laju aliran massa *desuperheater* yang dikeluarkan. Batasan nilai dari q didapat dari data yang didapat, yaitu $[0 \ 10]$. Pada Tugas Akhir ini fungsi keanggotaan nilai u dirancang sedemikian sehingga diperoleh seperti pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Fungsi Keanggotaan *Control Input* u pada Pengendali FSMC

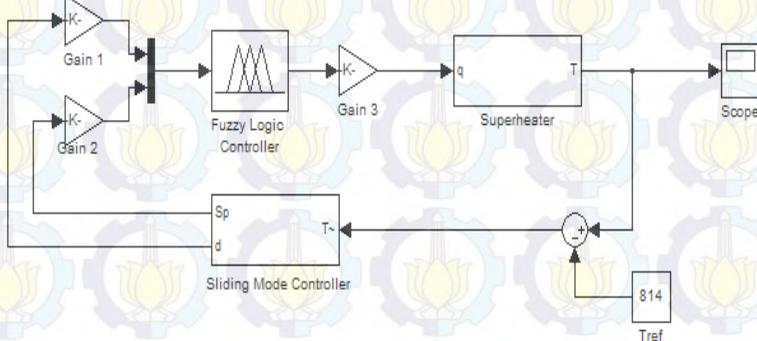
Pada aturan *fuzzy* berisikan aturan-aturan yang menghubungkan parameter masukan yaitu s_p dan d dengan parameter keluaran yaitu *Control* u yang digunakan untuk mengendalikan plant *superheater*. Metode yang digunakan untuk

perancangan aturan *fuzzy* adalah metode Mamdani. Aturan-aturan yang dipakai pada perancangan pengendali FSMC pada sistem *superheater* berjumlah 32 seperti yang telah dibahas di bab 2. Aturan-aturan tersebut disusun seperti Tabel 4.2 [10].

Tabel 4.2 Aturan *fuzzy* untuk Pengendali FSMC pada Sistem *Superheater*

		S_p							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
d	B	PB	PB	PB	PB	NB	NB	NB	NB
	M	PB	PB	PB	PM	NM	NB	NB	NB
	S	PB	PB	PM	PS	NS	NM	NB	NB
	Z	PB	PM	PS	PZ	NZ	NS	NM	NB

Setelah diperoleh rancangan fungsi keanggotaan dan aturan *fuzzy*, langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan diagram blok dan rancangan *fuzzy* pada Matlab. Hasil perancangan FSMC pada Simulink dapat dilihat pada Gambar 4.8.

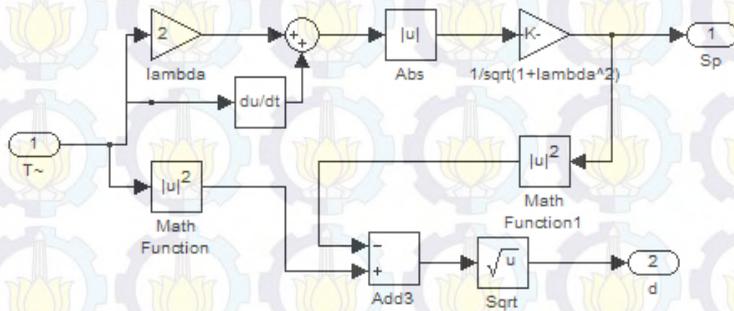


Gambar 4.8 Diagram Blok Sistem *Superheater* dengan Pengendali FSMC

Gambar 4.8 menunjukkan diagram blok sistem *superheater* dengan pengendali FSMC dimana rangkaian sistem berupa lup

tertutup dengan sistem pengendali berupa pengendali *fuzzy* yang telah dibahas sebelumnya. Dengan subsistem *Superheater* merupakan diagram blok sistem *superheater* yang sama seperti pada Gambar 4.1

Sedangkan pada bagian *sliding mode controller* rancangan di atas tersusun oleh pembentuk variabel s_p dan d sebagai berikut:



Gambar 4.9 Rancangan Subsistem *Sliding Mode Controller* dari Pengendali FSMC

Pada Gambar 4.9 menunjukkan bagian subsistem *Sliding Mode Controller* dari pengendali FSMC yang didapat dari Persamaan (4.11) dan (4.12) dengan masukan \tilde{T} dan menghasilkan keluaran s_p dan d .

Agar dapat dibandingkan dengan hasil pengendalian SMC, pada pengendali FSMC ini digunakan nilai $\lambda = 0.3$. Sedangkan nilai gain1, gain2, dan gain3 diperoleh dengan cara *trial and error*. Pada Tugas Akhir ini diambil nilai-nilai gain untuk sistem pengendali FSMC yaitu $g_1 = 0.0076$, $g_2 = 0.0001$, dan $g_3 = 0.7$.

4.3 Simulasi dan Analisis Hasil Rancangan Pengendali

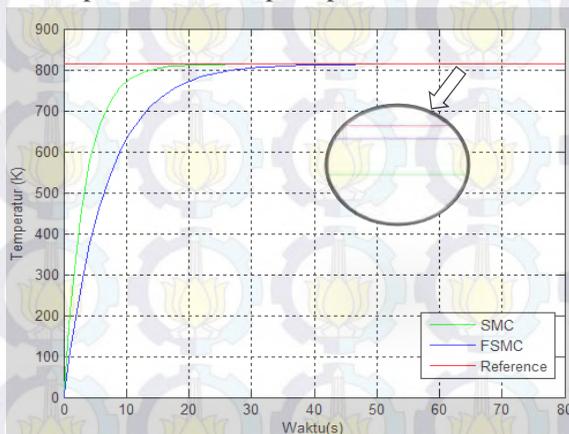
Dari hasil rancangan pada subbab sebelumnya akan dilakukan dua macam simulasi, yaitu dengan tanpa gangguan dan dengan

diberi gangguan, baik gangguan eksternal maupun gangguan internal. Gangguan eksternal yang akan diberikan pada simulasi ini berupa sinyal *impuls* dan *square* sedangkan gangguan internalnya adalah berupa perubahan – perubahan yang dilakukan pada parameter seperti temperatur uap yang masuk, laju aliran massa yang masuk, laju aliran massa yang keluar dan kalor pembakaran pada *superheater* per detik.

Pada tugas akhir ini akan diberikan nilai dari temperatur uap yang diinginkan, yaitu 814 K. Hal ini dimaksudkan bahwa nilai tersebut akan digunakan pada pengujian simulasi, baik tanpa gangguan atau pun dengan gangguan. Setiap simulasi yang dilakukan menggunakan nilai $C_p=2822$, $\rho=50.4$, $V_{sh}=21.45$, dan $h=83562$. Sedangkan parameter-parameter yang digunakan $\dot{m}_{in}=152.77$, $\dot{m}_{out}=160.27$, $T_{in}=634$, dan $Q_{sh}=77103935$.

4.3.1 Simulasi tanpa Gangguan

Akan ditunjukkan simulasi tanpa gangguan. Dari kondisi tersebut akan diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Perbandingan Grafik Temperatur Uap pada *Superheater* tanpa Gangguan

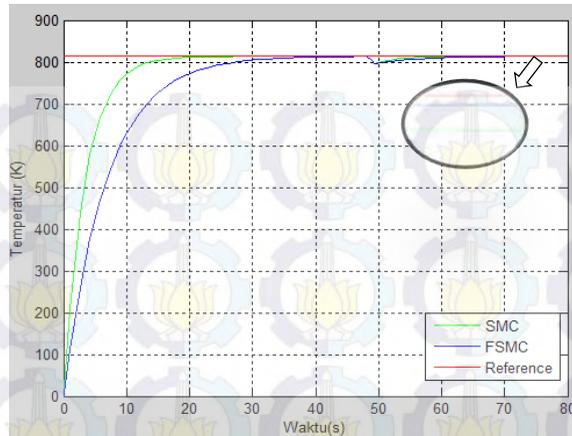
Pada kondisi tanpa gangguan tampak bahwa sistem pengendali FSMC lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih kecil daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.0937 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5028. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K. Grafik pada Gambar 4.10 menggunakan nilai λ dan parameter yang sama untuk pengendali FSMC dan SMC agar dapat dibandingkan.

4.3.2 Simulasi dengan Gangguan Eksternal

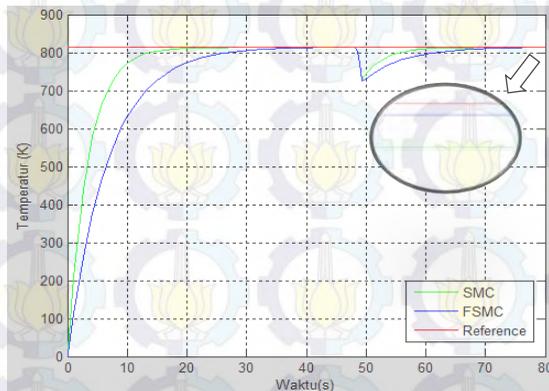
Simulasi ini dilakukan dengan menambahkan suatu sinyal yang dianggap sebagai gangguan yang berasal dari luar sistem. Pada sistem kendali temperatur uap Sinyal yang ditambahkan pada simulasi ini diantaranya sinyal *impuls* dan *square* karena kedua sinyal tersebut memiliki karakteristik yang berbeda yaitu *impuls* yang bersifat sesaat dan *square* yang bersifat kontinu pada selang waktu tertentu. Secara fisis, gangguan eksternal ini merupakan panas/ kalor yang tidak terduga yang berasal dari dalam boiler. Pada simulasi ini akan digunakan juga parameter-parameter yang sama dengan kondisi awal.

1. Uji dengan Sinyal *Impuls*

Sinyal impuls merupakan sinyal yang bernilai sangat besar dan muncul dalam waktu yang sangat singkat, sinyal ini mewakili gangguan dari luar yang bersifat sementara. Pada simulasi ini diberikan dua macam sinyal *impuls*. Yaitu yang bernilai kecil (1 kJ) dan bernilai besar (5 kJ). Hasil yang diperoleh dari uji dengan sinyal ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4.11 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Impuls* 1 kJ



Gambar 4.12 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Impuls* 5 kJ

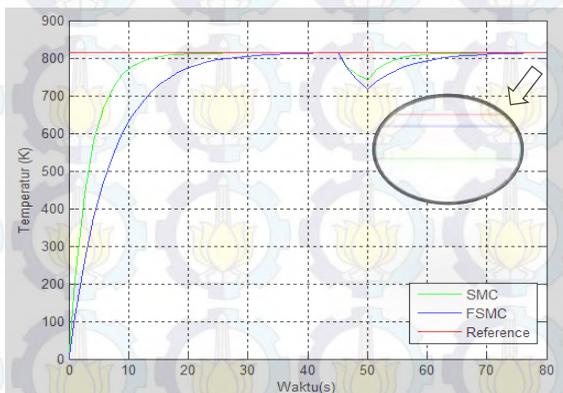
Dari Gambar 4.11 nampak bahwa pada sistem dengan gangguan *impuls* kecil, pengendali SMC dan FSMC sama-sama memiliki respon yang cepat. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC

memiliki nilai *error* sebesar -0.114 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5047 . Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

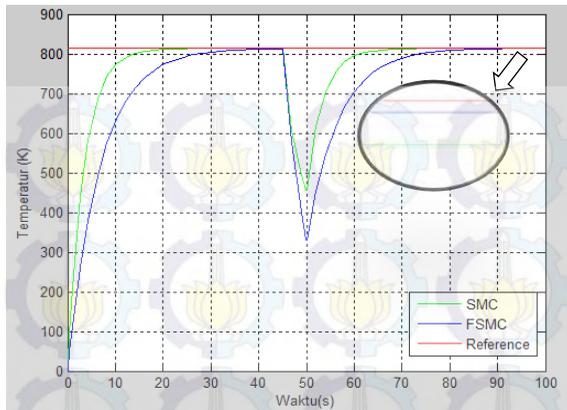
Sedangkan pada Gambar 4.12 terlihat bahwa pada sistem dengan gangguan *impuls* besar, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1136 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5124 . Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

2. Uji dengan Sinyal *Square*

Sinyal square adalah sinyal yang bernilai tetap untuk selang waktu tertentu. Pada simulasi ini diberikan dua macam sinyal *square*. Yaitu yang bernilai kecil (1 kJ) dan bernilai besar (5 kJ). Hasil yang diperoleh dari uji dengan sinyal ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4.13 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Square* 1 kJ



Gambar 4.14 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Sinyal *Square* 5 kJ

Dari Gambar 4.13 nampak bahwa pada sistem dengan gangguan *square* kecil, pengendali SMC memiliki respon yang lebih cepat. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang jauh lebih baik daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.118 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5126. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

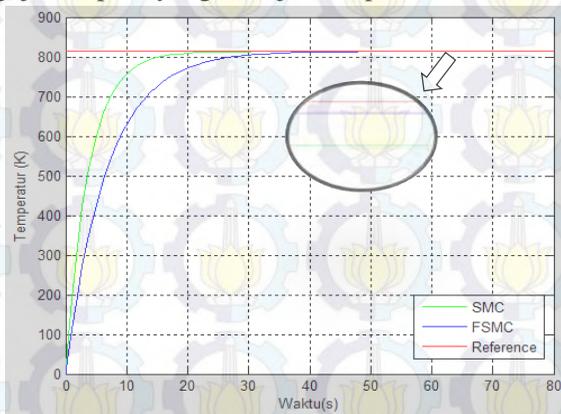
Sedangkan pada Gambar 4.14 terlihat bahwa pada sistem dengan gangguan *square* besar, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lama daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1244 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5029. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

4.3.3 Simulasi dengan Gangguan Internal

Simulasi ini dilakukan dengan mengubah nilai parameter pada sistem *superheater* untuk menguji sensitifitas sistem terhadap ketidakpastian dari dalam sistem. Parameter yang akan diubah adalah temperatur uap yang masuk, laju aliran massa yang masuk dan laju aliran massa yang keluar. Pengujian sistem pengendali terhadap gangguan internal ini dilakukan dengan memperbesar atau memperkecil nilai parameter sesuai batasan yang diberikan.

1. Gangguan Internal dengan Memperkecil Parameter

Simulasi ini dilakukan dengan memperkecil parameter dari nilai semula, \dot{m}_{in} dan \dot{m}_{out} diperkecil 10% sedangkan nilai $T_{in}=623$ dan $Q_{sh}=76332895.65$ yang merupakan nilai minimal yang ada di lapangan. Sehingga diperoleh hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut.



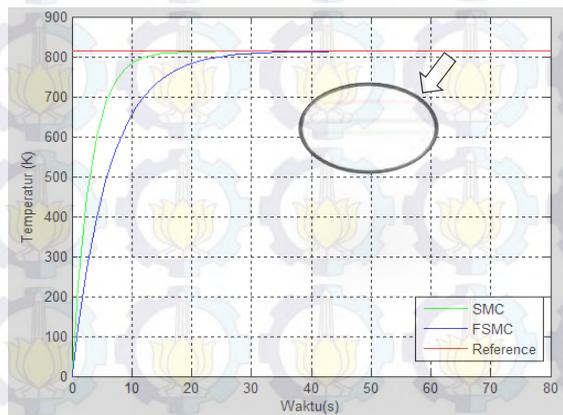
Gambar 4.15 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperkecil

Pada Gambar 4.15 terlihat bahwa pada sistem dengan parameter yang lebih besar dari parameter awal, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi

diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang lebih kecil daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1097 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.5587. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.5 K.

2. Gangguan Internal dengan Memperbesar Parameter

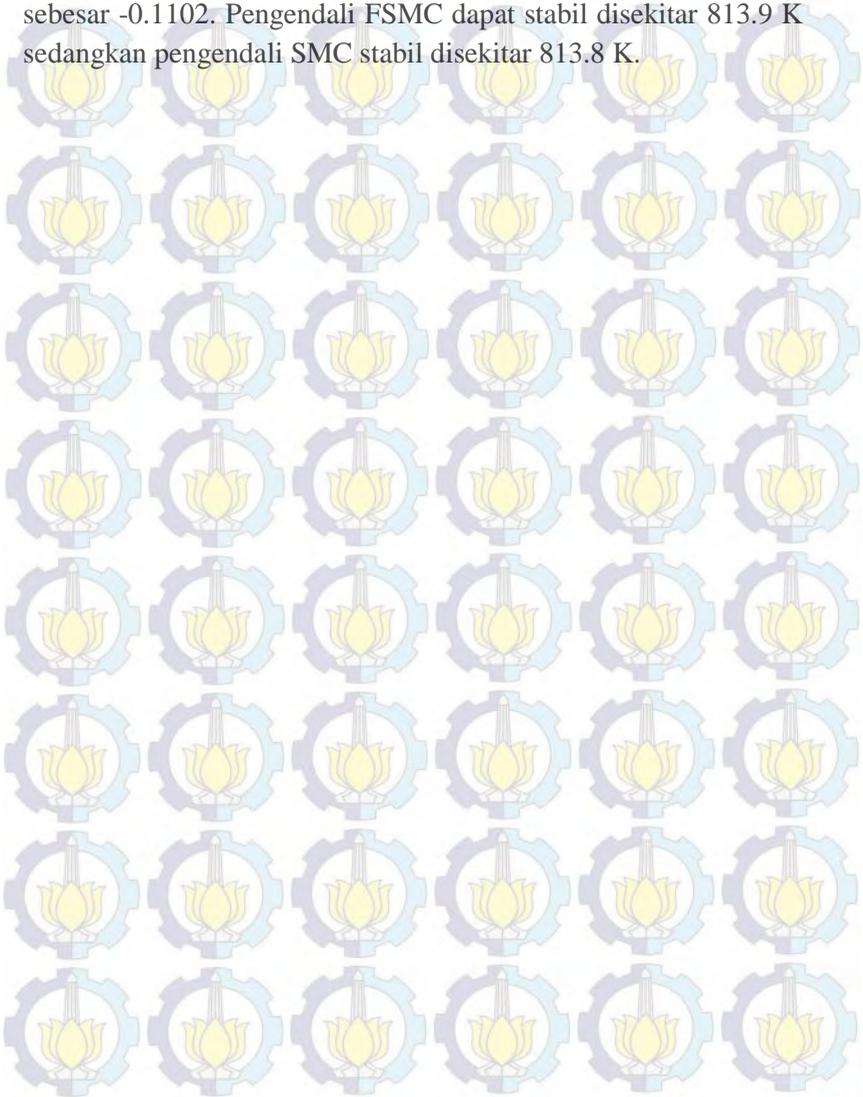
Simulasi ini dilakukan dengan memperbesar parameter dari nilai semula, \dot{m}_{in} dan \dot{m}_{out} diperbesar 10% sedangkan nilai $T_{in}=643$, dan $Q_{sh}=77874974.5$ yang merupakan nilai maksimum yang ada di lapangan. Sehingga diperoleh hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Perbandingan Grafik Temperatur Uap dengan Parameter Diperbesar

Pada Gambar 4.16 terlihat bahwa pada sistem dengan parameter yang lebih besar dari parameter awal, pengendali FSMC masih memiliki respon yang lebih lambat daripada pengendali SMC. Namun jika dilakukan pembesaran pada hasil simulasi diperoleh bahwa pengendali FSMC memiliki nilai *error* yang lebih

kecil daripada SMC. Pengendali FSMC memiliki nilai *error* sebesar -0.0802 sedangkan pengendali SMC memiliki nilai *error* sebesar -0.1102. Pengendali FSMC dapat stabil disekitar 813.9 K sedangkan pengendali SMC stabil disekitar 813.8 K.



BAB V PENUTUP

Bab ini berisi tentang beberapa kesimpulan yang dihasilkan berdasarkan penelitian yang telah dilaksanakan. Di samping itu, pada bab ini juga dimasukkan beberapa saran yang dapat digunakan jika penelitian ini ingin dikembangkan.

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan pengendali FSMC pada sistem kendali temperatur uap *superheater* terdiri dari fungsi keanggotaan *fuzzy*, aturan *fuzzy*, dan susunan diagram blok dari sistem *superheater*. Rancangan pengendali FSMC dimulai dengan pembentukan fungsi switching S, yaitu:

$$S = \dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T}$$

Dengan

$$\tilde{T} = T - T_d$$

$$\dot{\tilde{T}} = \dot{T} - \dot{T}_d$$

Permukaan slidingnya adalah :

$$\dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T} = 0$$

Setelah merancang bagian SMC, selanjutnya merancang bagian FLC, yaitu merancang fungsi keanggotaan dari s_p dan d .

$$s_p = \frac{|\dot{\tilde{T}} + \lambda \tilde{T}|}{\sqrt{1^2 + \lambda^2}}$$
$$d = \sqrt{\tilde{T}^2 - s_p^2}$$

2. Performansi sistem pengendalian temperatur uap *superheater* dengan metode FSMC menghasilkan temperatur uap dapat stabil disekitar 813.9 K baik tanpa gangguan maupun dengan gangguan eksternal dan internal. Angka ini sesuai dengan set point yang diharapkan yaitu 814 K. Sedangkan dengan pengendali SMC temperatur uap dapat stabil di sekitar 813.5 K. Jadi dapat dikatakan sistem pengendali FSMC mampu menghasilkan temperatur uap yang lebih akurat (*error* yang lebih kecil) dibandingkan dengan pengendali SMC. Selain itu, tingkat kerumitan dalam perancangan pengendali FSMC lebih sederhana dibandingkan dengan SMC.
Namun terdapat kekurangan yang dimiliki pengendali FSMC, yaitu membutuhkan waktu yang lebih lama daripada pengendali SMC dan juga membutuhkan penelaan gain agar logika *fuzzy* dapat bekerja dengan baik.

5.2 Saran

Dengan melihat hasil yang diperoleh pada penelitian ini, hal yang penulis sarankan untuk pengembangan selanjutnya yaitu, pengujian sistem pengendali FSMC pada *superheater* mendapatkan hasil yang cukup baik, namun sebaiknya perlu dikaji lebih lanjut apabila dibandingkan dengan model *fuzzy* yang lain seperti model *fuzzy* Takagi Sugeno atau dengan menggunakan metode yang lain seperti *Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control* (T2FSMC).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Herlambang, T. 2010. “Desain Pengendalian Ketinggian Air dan Temperatur Uap pada Sistem Steam Drum *Boiler* dengan Metode Sliding Mode Control (SMC)”. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Septiani, Mardiana. 2015. “Metode *Sliding Mode Control* (SMC) pada Sistem Temperatur Uap *Superheater* di PLTU 3-4 PT. PJB UP Gresik”. Laporan Kerja Praktek Jurusan Matematika. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Stephanopoulos, George. 1973. **Chemical Process Control**. New Jersey : Prentice Hall.
- [4] Ogata, Katshuiko. 2010. **Modern Control Engineering**. Prentice Hall Inc
- [5] Mardijah dkk. 2010.”Design and Performance Analysis of Speed Controller in Induction Motor with Sliding Mode Control”. Yogyakarta. Universitas Gajah Mada.
- [6] Tien, N.T. 2002. “Sliding Control.” Applied Nonlinear Control. <URL: <https://www2.hcmut.edu.vn/~nttien/Lectures/Applied%20nonlinear%20control/C.7%20Sliding%20Control.pdf>>.
- [7] Ross, Timothy J. 2010. **Fuzzy Logic with Engineering Application**. USA: University of New Mexico.
- [8] Lee, Kwang H. 2005. **First Course on Fuzzy Theory and Applications**. Germany: Springer.
- [9] Rizan, R.I. 2008. “Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Inverted Pendulum Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control. Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- [10] Palm, R., Driankov, D., dan Hellendoorn, H. 1997. **Model Based *Fuzzy Control* : *Fuzzy Gain Schedulers and Sliding Mode Fuzzy Controller***. Berlin: Springer-Verlag.
- [11] Ismanto, W . 2010. “Perancangan dan Simulasi Sistem Kontrol Posisi pada Panel Surya dengan Menggunakan Metode *Fuzzy Sliding Mode Control* (FSMC)” Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Mardiana Septiani. Penulis dilahirkan di Malang pada tanggal 21 September 1993 dan merupakan anak pertama dari 2 bersaudara. Pendidikan formal yang pernah ditempuh yaitu SDN Simokerto VI-139 Surabaya, SMP Negeri 9 Surabaya, SMK Farmasi Surabaya. Setelah lulus dari SMK, penulis melanjutkan studi di Matematika

ITS melalui SNMPTN 2011. Pada masa perkuliahan penulis mengambil bidang matematika terapan. Selama menjadi mahasiswa ITS penulis aktif di beberapa organisasi, antara lain Himpunan Mahasiswa Matematika ITS (HIMATIKA ITS) sebagai staf perekonomian, Lembaga Dakwah Jurusan Matematika ITS Ibnu Muqhlah sebagai staf Hubungan Kelembagan, UK Pramuka ITS sebagai Bendahara dan Pemangku Adat serta Paguyuban Karya Salemba Empat ITS sebagai Sekretaris Divisi Entrepreneur. Selain itu penulis juga berpartisipasi sebagai panitia OMITS (Olimpiade Matematika ITS). Selama penulisan Tugas Akhir ini penulis tidak lepas dari kekurangan. Untuk kritik, saran, dan pertanyaan mengenai Tugas Akhir ini dapat dikirimkan melalui *e-mail* ke mardiana.septiani@gmail.com

Lampiran A

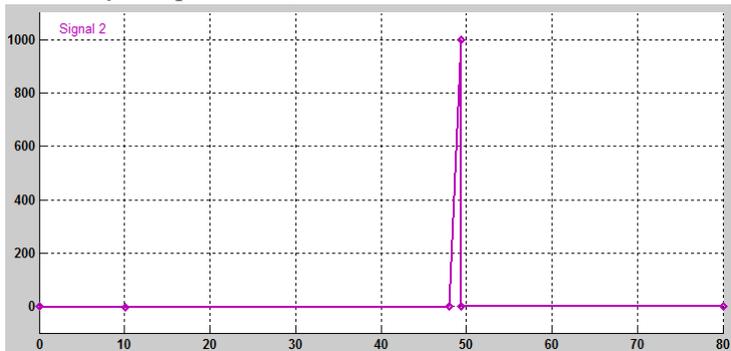
Sinyal Gangguan Eksternal

Sinyal gangguan eksternal yang digunakan pada pengujian sistem pengendali dalam Tugas Akhir ini adalah:

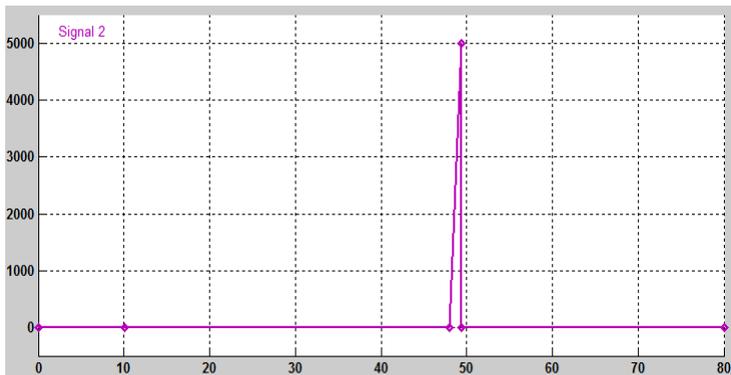
1. Sinyal *Impuls*

Pada Pengujian diberikan dua macam sinyal *impuls*, yaitu:

a. Sinyal *impuls* kecil, bernilai 1 kJ



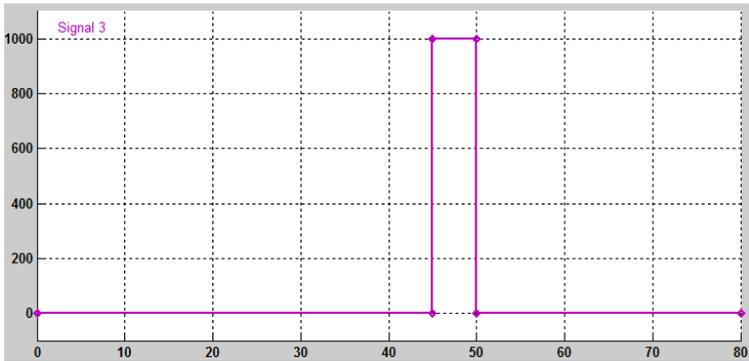
b. Sinyal *impuls* besar, bernilai 5 kJ



2. Sinyal *Square*

Pada Pengujian diberikan dua macam sinyal *square*, yaitu:

a. Sinyal *square* kecil, bernilai 1 kJ

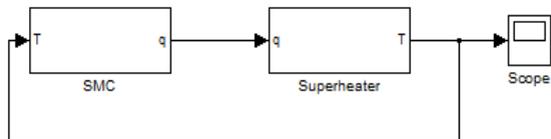


b. Sinyal *square* besar, bernilai 5 kJ

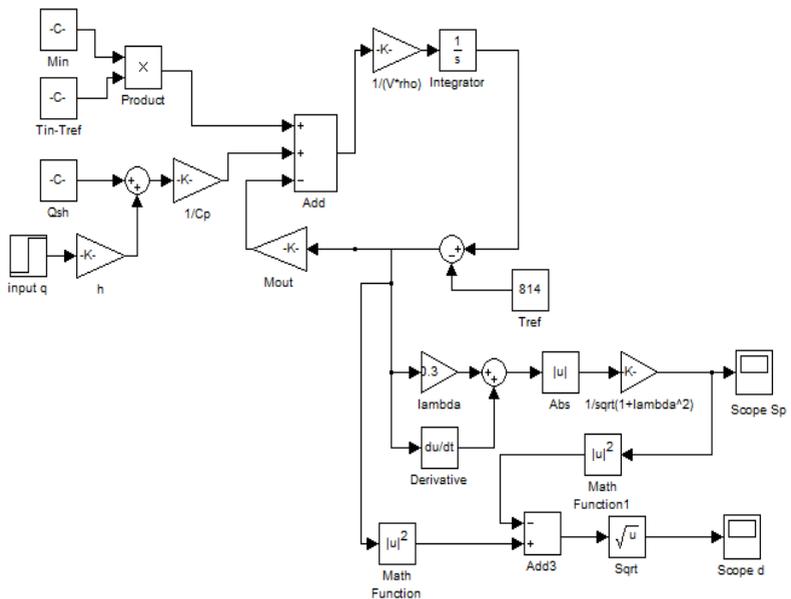


Lampiran B Rancangan Pengendali SMC (Sliding Mode Control)

Rancangan Pengendali SMC (*Sliding Mode Control*) pada Simulink Matlab



dimana bagian *superheater* pada rancangan di atas tersusun oleh pembentuk variabel s_p dan d sebagai berikut:



“Halaman ini sengaja dikosongkan”