



TUGAS AKHIR - SM141501

**PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM
PENGENDALI PANEL SURYA DENGAN METODE
TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL
(T2FSMC)**

YAHYA EFPRIANTO
NRP 1211 100 113

Dosen Pembimbing:
Dr. Dra. Mardlijah, MT

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



FINAL PROJECT - SM141501

**DESIGN AND SIMULATION OF CONTROL
SYSTEMS ON SOLAR PANELS USING TYPE 2
FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC)**

YAHYA EFPRIANTO
NRP 1211 100 113

Supervisors:
Dr. Dra. Mardlijah, MT

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

LEMBAR PENGESAHAN
PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM
PENGENDALI PANEL SURYA DENGAN
METODE TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE
CONTROL (T2FSMC)
DESIGN AND SIMULATION OF CONTROL
SYSTEMS ON SOLAR PANELS USING
TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL
(T2FSMC)

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

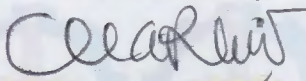
Oleh:

YAHYA EFPRIANTO

NRP. 1211 100 113

Menyetujui,

Dosen Pembimbing,



Dr. Dra. Mardijah, MT

NIP. 19670114199102 2 001

Mengetahui,

Rektor ITS

Prof. Dr. Erandika P. ITS

Prof. Dr. Erandika P. ITS

NIP. 19660414 199102 2 001

JURUSAN MATEMATIKA ITS Surabaya, Juli 2015



PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI PANEL SURYA DENGAN METODE TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC)

Nama Mahasiswa : Yahya Efprianto
NRP : 1211 100 113
Jurusan : Matematika FMIPA-ITS
Pembimbing : Dr. Dra. Mardlijah, MT

Abstrak

Panel surya merupakan alat pengkonversi panas matahari menjadi energi listrik. Pada panel surya terdapat kolektor yang berfungsi sebagai pengumpul. Kolektor bekerja maksimal jika posisi kolektor tegak lurus dengan sinar matahari. Oleh karena itu diperlukan sistem kendali yang mampu mengontrol posisi matahari agar selalu tegak lurus dengan matahari. Pada tugas akhir ini dirancang sistem pengendali T2FSMC pada sistem penggerak panel surya dan analisis terhadap performansi sistemnya dengan cara membandingkan metode T2FSMC dengan FSMC dan SMC. Sehingga didapatkan kesimpulan bahwa sistem pengendali T2FSMC bekerja lebih baik dari pada kendali FSMC dan SMC yaitu lebih robust terhadap gangguan yang berasal dari luar sistem yang direpresentasikan berupa sinyal impuls dan square yang bersifat kecil maupun besar. Namun terdapat kekurangan pada sistem pengendali T2FSMC antara lain membutuhkan waktu running yang cukup lama jika dibandingkan pengendali SMC maupun FSMC serta membutuhkan penaksiran dalam menentukan nilai gain agar logika fuzzy dapat bekerja dengan lebih baik.

Kata-kunci: *panel surya, sistem pengendali, sliding mode control (SMC), type 2 fuzzy sliding mode control (T2FSMC).*

DESIGN AND SIMULATION OF CONTROL SYSTEMS ON SOLAR PANELS USING TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC)

Name : Yahya Efprianto
NRP : 1211 100 113
Department : Mathematics FMIPA-ITS
Supervisor : Dr. Dra. Mardlijah, MT

Abstract

Solar panels are solar thermal converter tools into electrical energy. On the solar panels, there are collectors who serves as a collector. Collectors work best when the position of the collector is perpendicular to the sun. Therefore we need a control system that is able to control the position of the sun in order to be always perpendicular to the sun. In this final project, control system T2FSMC is designed on the drive system of solar panels and analysis of the performance of the system by comparing T2FSMC method with FSMC and SMC. So it was concluded that T2FSMC control system works better than FSMC and SMC, which is more robust against interference from outside of the system, that is represented in the form of impulse signals and square that is both small and large. However, there are weakness in the control system T2FSMC, the first is long running time comparing control of FSMC or SMC and second is requires a valuation of gain so the fuzzy logic work better.

Key-words: *solar panels, control systems, sliding mode control (SMC), type 2 fuzzy sliding mode control (T2FSMC).*

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbil'aalamiin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, tuhan semesta alam, yang telah memberikan segalanya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul

”PERANCANGAN DAN SIMULASI SISTEM PENGENDALI PANEL SURYA DENGAN METODE TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC)”.

sebagai salah satu syarat kelulusan Program Studi S-1 Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan kepada :

1. Prof. Dr. Erna Apriliani, M.Si selaku Ketua Jurusan Matematika ITS
2. Dr. Dra. Mardijah, M.T sebagai dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan motivasi dan pengarahan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini
3. Ibu Dra. Nuri Wahyuningsih, M. Kes., Ibu Dian Winda Setyawati S.Si, M.Si, Bapak Drs. Sentot Didik Surjanto, M.Si, dan Ibu Tahiyatul Afihani S.Si, M.Si. selaku dosen penguji atas semua saran yang telah diberikan demi perbaikan Tugas Akhir ini.

4. Dr. Chairul Imron, MI.Komp selaku Ketua Prodi S1 Matematika ITS.
5. Drs. Suharmadi, Dipl. Sc, M.Phil selaku dosen wali yang telah memberikan arahan akademik, canda tawa, dan semangat selama penulis kuliah di Jurusan Matematika FMIPA ITS.
6. Bapak dan Ibu dosen serta para staf Jurusan Matematika ITS.
7. Teman-teman mahasiswa Jurusan Matematika ITS.
8. Seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan motivasi, yang tidak dapat Penulis sebut satu persatu.

Penulis juga menyadari bahwa dalam Tugas Akhir ini masih terdapat kekurangan. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini. Akhirnya, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

Special Thank's To

Keberhasilan penulisan Tugas Akhir ini tidak lepas dari orang-orang terdekat penulis. Oleh sebab itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Nabi Muhammad SAW yang telah membimbing umat-Nya dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh ilmu, semoga sholawat selalu tercurah-limpahkan kepada beliau.
2. Ibu dan Bapak, kedua orang tua ku tercinta terima kasih atas segala doanya, juga kasih sayang dan pendidikan yang selalu dicurahkan kepada penulis selama ini.
3. Pak dhe Edi, Mbah Etik, Cak Yon, Mbah San, dan seluruh saudara yang tidak bisa disebutkan penulis satu persatu atas dukungan yang diberikan selama penulis menempuh pendidikan.
4. Adek-adek yang sangat ku sayangi, Fauzan, Dini, Novi dan Ika. Terima kasih banyak atas hiburan yang selalu diberikan ketika penulis berada dirumah.
5. Sahabatku, Hilmi, Zaki, Fendi, Farid, dan Fikri. Kalian sudah seperti saudara bagiku, lebih dari sekedar sahabat yang selalu memberikan ke-*iseng-an*, ke-*konyol-an*, dan ke-*koplak-an*.
6. Kabinet Bersahabat, Isman, Liyana, Farid, Ilham, Koboy(Dina), Faing, Zain, Aza, Lena, Aulia dan Habib yang telah memberikan kesempatan untuk menuntut ilmu non-akademik serta memberikan tawa, canda, kasih sayang, tangis, dan semua tentang kehidupan.
7. Anindita Rucitra yang telah menuntun penulis untuk tetap berproses menuju kedewasaan.

8. Teman-teman "Menara 11", teman-teman angkatan 2011, terima kasih atas doa dan dukungan kalian selama ini. Kalian merupakan keluarga baru ku disini.
9. Semua pihak yang tak bisa penulis sebutkan satu-persatu, terima kasih telah membantu sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Sistem Pengendalian	7
2.1.1 Pengelompokan sistem pengendalian ..	7
2.1.2 Kestabilan sistem.....	8
2.1.3 Ketidakpastian pada sistem.....	9
2.1.4 Performansi Sistem	9
2.2 Panel Surya	11

2.3	Pemodelan Panel Surya	12
2.3.1	Motor Servo DC	12
2.3.2	Penguat Servo	14
2.3.3	Tachometer	14
2.3.4	Roda Gigi	14
2.4	<i>Sliding Mode Control</i> (SMC)	14
2.4.1	Fungsi <i>Switching</i>	15
2.4.2	Permukaan <i>Sliding</i>	15
2.4.3	Kondisi <i>Sliding</i>	16
2.4.4	Perancangan <i>Sliding Mode Control</i> (SMC)	17
2.4.5	Kondisi <i>Chattering</i>	18
2.4.6	<i>Boudary Layer</i> BL Pada <i>Sliding Mode</i> <i>Control</i>	18
2.5	<i>Type 2 Fuzzy Logic Control</i>	19
2.5.1	Membership Function	20
2.5.2	Operasi Pada Membership Function Type-2	21
2.5.3	Struktur Dasar Pengendali <i>Type 2 Fuzzy</i>	22
2.6	<i>Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control</i> (T2FSMC)	24
2.6.1	Skema Pengendali T2FSMC	24
2.6.2	Perancangan Pengendali T2FSMC	25
BAB III	METODE PENELITIAN	27
3.1	Tahap Penelitian	27
3.2	Diagram Alir Penelitian	29
BAB IV	ANALISIS DAN PEMBAHASAN	31
4.1	Pemodelan Matematika Sistem Panel Surya	31
4.2	Perancangan Pengendali <i>Sliding Mode</i> <i>Control</i> (SMC)	34
4.3	Pengendali T2FSMC	38
4.4	Simulasi dan Analisis Hasil Rancangan Pengendali	41

4.4.1	Simulasi Tanpa Gangguan	43
4.4.2	Simulasi dengan Gangguan Eksternal .	44
4.5	Simulasi dengan Gangguan Internal	47
BAB V	PENUTUP	49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	50
	DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN A	Sistem Panel Surya	53
LAMPIRAN B	Rancangan Pengendali SMC	55
LAMPIRAN C	Rancangan Pengendali T2FSMC	59
LAMPIRAN D	Sinyal Gangguan	61
LAMPIRAN E	Biodata Penulis	63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Aturan umum fuzzy untuk pengendali FSMC	26
Tabel 4.1	Konstanta dan Parameter Penyusun Sistem	33

Daftar Simbol

$e_a(t)$	Besarnya tegangan yang diberikan pada motor (volt)
$e_b(t)$	emf balik (volt)
$i_a(t)$	Arus jangkar (Ampere)
$R_a(t)$	Tahanan kumparan jangkar (Ohm)
$L_a(t)$	Induktansi kumparan jangkar (Henry)
K_b	Konstanta emf balik (Volt-sec/rad)
K_m	Konstanta Torsi (N-m/Ampere)
J	Momen Inersia rotor ($Kg - m^2$)
B	Koefisien gesekan viskos (N-m/rad/sec)
$T_m(t)$	Torsi motor (N-m)
$\omega(t)$	Kecepatan sudut motor (rad/sec)
u	<i>Control input</i>
\mathbf{x}	Vektor keadaan
\mathbf{x}_d	Vektor keadaan yang diinginkan
\mathbf{e}	Vektor yang memuat sinyal <i>error</i>
S	Fungsi <i>switching</i>
Ψ	Lebar <i>boundary layer</i>
λ	Konstanta positif
η	Konstanta positif
\tilde{A}	Himpunan <i>type 2 fuzzy</i>
J_x	Fungsi keanggotaan utama (<i>primary membership</i>)
$\mu_{\tilde{A}}(x, u)$	Fungsi keanggotaan sekunder (<i>secondary membership</i>)
S_p	Jarak antara titik keadaan dengan permukaan <i>sliding</i>
d	Jarak antara titik keadaan dengan garis normal dari permukaan <i>sliding</i> yang melalui titik asal bidang

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram blok lup tertutup	8
Gambar 2.2	Spesifikasi Respon Transien	10
Gambar 2.3	Diagram Sistematis Sistem Panel Surya	11
Gambar 2.4	Diagram Blok Masukan dan Keluaran Sistem	12
Gambar 2.5	Model motor DC	13
Gambar 2.6	Kondisi <i>Sliding</i>	17
Gambar 2.7	Kondisi <i>Chattering</i>	18
Gambar 2.8	<i>Sliding Mode</i> dengan <i>Boundary Layer</i> .	19
Gambar 2.9	<i>Membership Function</i>	21
Gambar 2.10	Operasi pada <i>Membership Function</i> <i>Type-2</i>	22
Gambar 2.11	Struktur Dasar Pengendali <i>Type 2</i> <i>Fuzzy Logic</i>	23
Gambar 2.12	Skema Dasar Pengendali T2FSMC	24
Gambar 2.13	Interpretasi grafis dari S_p dan d	25
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 4.1	Fungsi Keanggotaan S_p	40
Gambar 4.2	Fungsi Keanggotaan d	40
Gambar 4.3	Fungsi Keanggotaan u	41
Gambar 4.4	Perbandingan respon ω tanpa gangguan	43
Gambar 4.5	Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal <i>impuls</i> besar . .	44
Gambar 4.6	Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal <i>impuls</i> kecil . .	45

Gambar 4.7	Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal <i>square</i> besar ..	46
Gambar 4.8	Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal <i>square</i> kecil ...	47
Gambar 4.9	Perbandingan respon ω dengan nilai parameter lebih besar dari parameter awal.....	48
Gambar 4.10	Perbandingan respon ω dengan nilai parameter lebih kecil dari parameter awal.....	48
Gambar A.1	Diagram Blok Panel Surya	53
Gambar B.1	Rancangan Pengendali SMC.....	55
Gambar B.2	Diagram Blok SMC	56
Gambar B.3	<i>Subsystem uc</i>	57
Gambar B.4	<i>Subsystem K</i>	58
Gambar C.1	Rancangan Pengendali T2FSMC.....	59
Gambar C.2	Rancangan Pengendali SMC pada T2FSMC	60
Gambar D.1	Sinyal <i>Impuls</i> Kecil	61
Gambar D.2	Sinyal <i>Impuls</i> Besar	61
Gambar D.3	Sinyal <i>Square</i> Kecil	62
Gambar D.4	Sinyal <i>Square</i> Besar	62

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang hal-hal yang melatarbelakangi munculnya permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini. Kemudian permasalahan tersebut disusun kedalam suatu rumusan masalah. Selanjutnya akan dijabarkan juga kedalam batasan masalah untuk mendapatkan tujuan yang diinginkan serta manfaat yang dapat diperoleh. Adapun sistematika penulisan Tugas Akhir diuraikan pada bagian akhir bab ini.

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan potensi sumber daya terbarukan yang sangat luar biasa berlimpah. Sumber daya angin, air dan matahari yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya alternatif, keberadaannya sangat mudah ditemukan. Wilayah Indonesia merupakan daerah tropis sehingga hampir seluruh permukaan wilayah Indonesia mendapatkan sinar matahari secara langsung. Hal ini harusnya memberikan keuntungan sendiri bagi bangsa Indonesia untuk mengembangkan energi alternatif bersumber dari matahari. Sumber daya alternatif seperti pemanfaatan sinar matahari kurang berkembang di Indonesia bila dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Masyarakat Indonesia lebih memilih menggunakan bahan bakar fosil daripada energi alternatif padahal bahan bakar fosil salah satu sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui dan jumlahnya pun terbatas. Di Indonesia sendiri diperkirakan cadangan minyak akan habis dalam waktu 12 tahun. Oleh

karena itu, pemerintah perlu segera mencari solusi untuk mengatasi terbatasnya persediaan sumberdaya alam dengan lebih memanfaatkan sumber energi alternatif yang ada di Indonesia. Energi Alternatif yang dapat dikembangkan di Indonesia ialah panas matahari. Beberapa negara maju seperti Jepang dan Belanda bahkan telah berhasil dalam mengembangkan sumber energi dari panas matahari.

Panel surya merupakan salah satu alat yang mampu mengonversikan panas matahari menjadi energi. Pada panel surya terdapat komponen berupa kolektor (pengumpul) yang mampu menyerap panas dari sinar matahari. Sistem ini, kolektor perlu diatur agar selalu tepat dengan posisi matahari sehingga tingkat penyerapan optimal pada waktu siang. Posisi kolektor yang tegak lurus dengan matahari mampu mengoptimalkan pengumpulan sinar matahari [1]. Posisi kolektor yang tegak lurus mampu menghasilkan energi sebesar 1000 W/m^2 . Untuk itu perlu adanya suatu sistem yang mampu mengontrol posisi panel surya agar selalu tegak lurus dengan matahari.

Telah banyak penelitian tentang sistem pengendali yang telah dilakukan salah satunya sistem pengendali *Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC)*. T2FSMC merupakan perkembangan dari FSMC yang mengombinasikan *Sliding Mode Control (SMC)* dan *Fuzzy Logic Control (FLC)*. *Sliding Mode Control (SMC)* merupakan salah satu bentuk teknik pengendalian *robust*. Beberapa keunggulan SMC yaitu sifatnya yang sangat *robust* sehingga mampu bekerja dengan baik pada sistem linier maupun nonlinear yang memiliki ketidakpastian model dan parameter [2]. Namun SMC memiliki kekurangan, diantaranya adalah munculnya *chattering* dan membutuhkan *control input* yang sangat besar untuk menanggulangi ketidakpastian parameter. Pada proses perancangan T2FSMC maupun FSMC, *sliding mode control*

(SMC) digunakan sebagai input pada proses *fuzzy*. Pada proses *fuzzy* terjadi perbedaan dalam rancangan pengendali T2FSMC dan FSMC, dimana pada pengendali T2FSMC menggunakan *type 2 fuzzy logic control* sedangkan pada pengendali FSMC menggunakan *type 1 fuzzy logic control*.

Type 2 fuzzy logic merupakan perbaikan dari *type 1 fuzzy logic*. Sistem ini diharapkan mampu menutupi kekurangan yang dari *type 1 fuzzy*. *Type 2 fuzzy logic* memiliki fungsi keanggotaan yang lebih kompleks dari *type 1 fuzzy logic*. Fungsi keanggotaan *type 2 fuzzy* terdiri dari 2 bagian yang sering disebut fungsi keanggotaan primer atau *footprint of uncertainty* (FOU) dan fungsi keanggotaan sekunder [3]. Fungsi keanggotaan sekunder terdiri dari 2 buah fungsi keanggotaan dari *type 1 fuzzy set* (*upper membership function* dan *lower membership function*). Fungsi keanggotaan *type 2 fuzzy* mampu memberikan derajat kebebasan tambahan yang memungkinkan untuk secara menangani ketidakpastian parameter dan gangguan [4].

Pada Tugas Akhir ini, akan dirancang suatu sistem pengendali menggunakan metode T2FSMC pada *plant* penggerak panel surya untuk memperoleh sistem kendali yang dapat bekerja dengan baik pada sistem nonlinier dengan ketidakpastian yang besar.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diteliti dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana rancangan sistem pengendali T2FSMC pada panel surya?
2. Bagaimana performansi sistem panel surya yang dikendalikan dengan pengendali T2FSMC?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari tugas akhir ini adalah

1. Model panel surya merupakan model yang diambil dari referensi Tugas Akhir Wawan Ismanto.
2. Sistem yang akan dikendalikan adalah perpindahan posisi dari panel surya.

Dengan asumsi yang digunakan adalah:

- Diasumsikan sistem dari panel surya bersifat terkontrol (*controllable*)
- Diasumsikan kecepatan pergerakan matahari adalah konstan

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah

1. Merancang sistem pengendali T2FSMC untuk panel surya
2. Menganalisa performansi sistem control posisi panel surya yang dikendalikan dengan pengendali T2FSMC

1.5 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini yaitu diperoleh rancangan pengendali T2FSMC pada panel surya yang *robust* terhadap sistem nonlinier yang memiliki banyak ketidakpastian serta nantinya metode T2FSMC dapat dikembangkan ataupun diterapkan pada sistem lainnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini disusun dalam lima bab, yaitu:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang gambaran umum dari penulisan Tugas Akhir yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat, dan sistematika penulisan.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada Bab II diuraikan secara umum mengenai panel surya, model matematika dari sistem panel surya yang nantinya akan digunakan sebagai *plant* dalam tugas akhir ini. Selain itu, bab ini juga berisikan materi-materi yang menunjang dalam pengerjaan tugas akhir ini antara lain *Sliding Mode Control* (SMC), *Type 2 Fuzzy Logic Control* dan *Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control* (T2FSMC).

3. BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dijelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir. Tahapan-tahapan tersebut antara lain studi literatur, menganalisis sistem panel surya, perancangan sistem pengendali panel surya, dan implementasi pada Simulink Matlab. Selanjutnya dilakukan simulasi dan analisis terhadap hasil yang didapat. Tahap terakhir adalah melakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan.

4. BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada Bab IV membahas tentang perancangan sistem kendali pada panel surya menggunakan SMC, T1FSMC, dan T2FSMC. setelah itu akan dilakukan

analisis performansi dari ketiga sistem kendali dengan memberikan gangguan pada sistem kendali.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan akhir yang diperoleh dari Tugas Akhir serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan tentang pengenalan sistem pengendalian, diskripsi tentang panel surya, prinsip kerja panel surya dan model panel surya. Selanjutnya, diuraikan teori-teori yang mendukung penelitian ini antara lain: *Sliding Mode Control* (SMC), *Type 2 Fuzzy Logic* (T2FLC) dan *Fuzzy Sliding Mode Control*.

2.1 Sistem Pengendalian

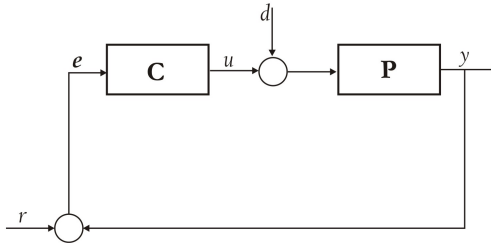
Sistem pengendalian adalah suatu sistem yang bekerja dalam proses pengaturan terhadap satu atau beberapa besaran (variabel dan parameter) sehingga berada pada suatu nilai atau interval nilai (Range) tertentu [5].

2.1.1 Pengelompokan sistem pengendalian

Secara umum, sistem pengendali dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan jenis operatornya, sistem pengendalian dibagi menjadi dua, yaitu manual dan otomatis. Pengendalian secara manual adalah pengendalian yang dilakukan oleh manusia yang bertindak sebagai operator, sedangkan pengendalian otomatis ialah pengendalian yang dilakukan oleh komputer, mesin, atau peralatan yang bekerja secara otomatis dan operasinya di bawah pengawasan manusia.
2. Berdasarkan jaringannya, sistem pengendalian dibagi dua yaitu jaringan lup terbuka dan lup tertutup. Sistem lup terbuka adalah sistem pengendalian dimana

keluaran tidak memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga variabel yang dikendalikan tidak dapat dibandingkan terhadap nilai yang diinginkan. Sistem lup tertutup adalah sistem pengendalian dimana besaran keluaran memberikan efek terhadap besaran masukan sehingga besaran yang dikendalikan dapat dibandingkan dengan nilai yang diinginkan (*reference point*). Pada Gambar 2.1 contoh skema pengendali suatu lup tertutup [2].



Gambar 2.1: Diagram blok lup tertutup

Gambar 2.1 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*.

2.1.2 Kestabilan sistem

Sistem pengendali pada suatu *plant* bertujuan untuk memperoleh suatu sistem yang stabil. Beberapa metode yang umum digunakan untuk menentukan atau menguji kestabilan suatu sistem. Pada sistem linear dapat dilakukan dengan beberapa metode antara lain dengan kriteria Nyquist, kriteria Routh-Hurwith, dan *root locus*. Pada sistem nonlinear umumnya digunakan metode Lyapunov atau dengan melihat responnya secara langsung.

2.1.3 Ketidakpastian pada sistem

Ketidakpastian pada suatu sistem merupakan gangguan pada sistem. Gangguan adalah suatu sinyal yang mempunyai pengaruh yang cenderung merugikan pada harga keluaran sistem. Jika suatu gangguan dibangkitkan dalam sistem, disebut gangguan internal, di antaranya adalah ketidakpastian model atau parameter pada sistem. Sedangkan gangguan eksternal dibangkitkan di luar sistem dan merupakan suatu masukan atau sinyal tambahan bagi sistem [5].

2.1.4 Performansi Sistem

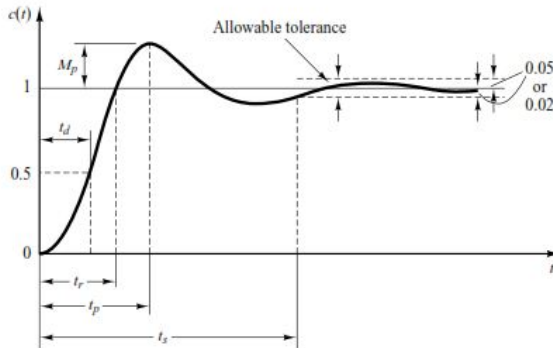
Performansi suatu sistem pengendali tidak hanya dilakukan dengan mengamati kestabilannya, namun juga dapat dilihat dari beberapa unsur lain yang umumnya disebut karakteristik respon transien. Respon transien adalah respon sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir [6], terdiri dari:

1. Waktu tunda (*delay time*), t_d : waktu yang diperlukan respon mencapai setengah nilai akhir pertama kali.
2. Waktu naik (*Rise time*), t_r : waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10% sampai 90%, 5% sampai 95%, atau 0% sampai 100% dari nilai akhirnya. Untuk sistem orde kedua redaman kurang, biasanya digunakan waktu naik 0 sampai 100%. Untuk sistem redaman lebih, biasanya digunakan waktu naik 10 sampai 90%.
3. Waktu puncak (*peak time*), t_p : waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan pertama kali.
4. Lewatan maksimum (*maximum overshoot*), M_p : harga puncak maksimum dari kurva respon yang diukur dari satu. Jika nilai keadaan tunak respon tidak sama dengan satu, maka biasa digunakan persen lewatan maksimum. Parameter M_p didefinisikan sebagai :

$$\text{persen lewatan maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Besarnya lewatan maksimum ini secara langsung menunjukkan kestabilan relatif sistem.

5. Waktu penetapan (*settling time*), t_s : waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase dari nilai akhir antara 2% atau 5%. Waktu penetapan ini dikaitkan dengan konstanta waktu terbesar dari sistem kontrol. Kriteria persentase kesalahan yang akan digunakan ditentukan dari sasaran disain sistem yang ditanyakan.

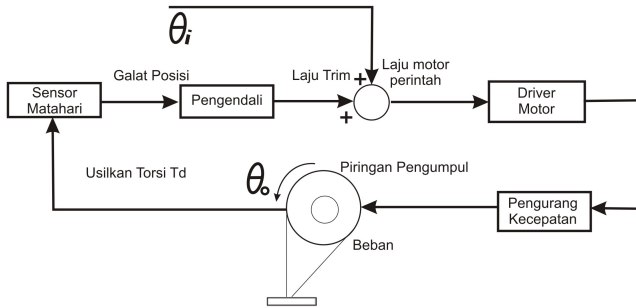


Gambar 2.2: Spesifikasi Respon Transien

Gambar 2.2 menunjukkan unsur-unsur yang umumnya terdapat pada respon transien suatu sistem dari keadaan awal hingga keadaan akhir. Unsur-unsur suatu respon transien dapat digunakan untuk melihat kestabilan maupun performansi suatu sistem.

2.2 Panel Surya

Seiring dengan perkembangan zaman banyak para ilmuwan yang tertarik untuk mempelajari tentang sistem panel surya salah satunya Benjamin S Kuo. Beliau memodelkan sistem panel surya secara sederhana seperti pada Gambar 2.3 [7].



Gambar 2.3: Diagram Sistematis Sistem Panel Surya

Prinsip kerja dari sistem ini adalah bagaimana mengatur posisi dari piringan pengumpul sinar matahari agar selalu mengikuti posisi matahari sehingga permukaan piring pengumpul matahari selalu dalam kondisi tegak lurus dengan arah sinar matahari karena mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 [7].

Sistem panel surya merupakan sistem dengan satu masukan dan satu keluaran dengan objek yang dikendalikan adalah motor servo DC seperti Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4: Diagram Blok Masukan dan Keluaran Sistem

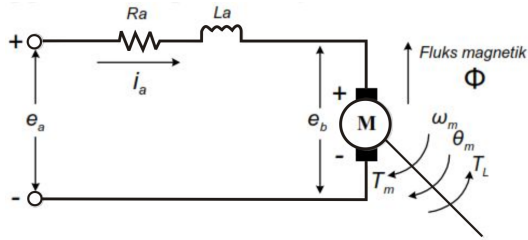
Masukkan dari sistem diatas berupa laju matahari (θ_1) yang di terima oleh dua sensor sel photovoltaic silikon persegi yang diletakkan sedemikian rupa sehingga pada saat sensor diarahkan ke matahari sinar cahaya dari celah melingkari kedua sel tersebut [7]. Sedangkan keluaran sistem adalah posisi sudut dari motor (θ_0) yang digunakan untuk menggerakkan kolektor sehingga berputar mengikuti arah posisi matahari.

2.3 Pemodelan Panel Surya

Pemodelan panel surya dilakukan dengan cara menurunkan persamaan matematis dari bagian-bagian komponen utama yang merupakan penggerak dari panel surya. Komponen utama dari panel surya terdiri dari motor DC, amplifler servo, takometer, dan roda gigi.

2.3.1 Motor Servo DC

Motor servo DC merupakan sebuah sistem elektromekanik yang khas dengan masukan (input) berupa listrik dan keluaran (output) mekanik. Secara sederhana, sebuah motor DC dapat digambarkan seperti Gambar 2.5 berikut ini:



Gambar 2.5: Model motor DC

Dari Gambar 2.5 di atas diperoleh :

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2.1)$$

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \quad (2.2)$$

$$T_m(t) = K_m i_a(t) \quad (2.3)$$

$$T_m(t) = J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \quad (2.4)$$

Dengan:

$e_a(t)$: Besarnya tegangan yang diberikan pada motor (volt)

$e_b(t)$: emf balik (volt)

$i_a(t)$: Arus jangkar (Ampere)

$R_a(t)$: Tahanan kumparan jangkar (Ohm)

$L_a(t)$: Induktansi kumparan jangkar (Henry)

K_b : Konstanta emf balik (Volt-sec/rad)

K_m : Konstanta Torsi (N-m/Ampere)

J : Momen Inersia rotor ($Kg - m^2$)

B : Koefisien gesekan viskos (N-m/rad/sec)

$T_m(t)$: Torsi motor (N-m)

$\omega(t)$: Kecepatan sudut motor (rad/sec)

2.3.2 Penguat Servo

Konstanta penguatan servo adalah $-K$, sehingga keluaran servo direpresentasikan ke dalam persamaan:

$$e_a(t) = -K[e_0(t) + e_t(t)] = -Ke_s(t) \quad (2.5)$$

2.3.3 Tachometer

Tachometer digunakan untuk mendeteksi kecepatan sudut dari motor. Keluaran dari tachometer e_t diumpanbalikkan melalui konstanta tachometer K_t dengan kecepatan angular motor $\omega_m(t)$ sehingga di peroleh persamaan

$$e_t(t) = K_t\omega(t) \quad (2.6)$$

2.3.4 Roda Gigi

Roda gigi berfungsi sebagai pengurang kecepatan sudut dari motor. Dengan persamaan

$$\theta_0 = \frac{1}{n}\theta_m \quad (2.7)$$

Pemodelan panel surya diperoleh dengan mensubstitusi komponen-komponen penggerak dari panel surya yang selanjutnya akan dibahas secara detail pada bab pembahasan.

2.4 *Sliding Mode Control* (SMC)

Sliding Mode Control (SMC) merupakan salah satu metode pengendalian sistem melalui aplikasi dari kendali pensaklaran (*switching*) berfrekuensi tinggi. Metode ini memiliki kelebihan diantaranya mampu bekerja *robust* baik pada sistem linear maupun non-linier serta terhadap suatu ketidakpastian. Namun, pengendali SMC memiliki kekurangan yang salah satunya adalah munculnya *chattering* yaitu osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk *sliding mode*, sehingga dapat mempengaruhi

kestabilan sistem. Untuk mencegah terjadinya *chattering* ini, biasanya metode tersebut menerapkan suatu *boundary layer* (BL) pada permukaan *sliding* [2].

2.4.1 Fungsi *Switching*

Pandang suatu sistem dinamis [2] :

$$\mathbf{x}^{(n)}(t) = f(\mathbf{x}, t) + b(\mathbf{x}, t) \cdot u + d(t) \quad (2.8)$$

dimana \mathbf{u} adalah *control input*, \mathbf{x} merupakan vektor keadaan, $f(\mathbf{x}, t)$ dan $b(\mathbf{x}, t)$ berupa fungsi terbatas, $d(t)$ gangguan eksternal. Jika \mathbf{x}_d merupakan \mathbf{x} yang diinginkan, maka *tracking error*-nya dapat dinyatakan oleh :

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_d(t) \quad (2.9)$$

Fungsi *switching* memenuhi persamaan [2] :

$$S(\mathbf{x}, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \mathbf{e} \quad (2.10)$$

dengan λ berupa konstanta positif dan n merupakan orde dari sistem. Fungsi *switching* ini akan digunakan untuk menentukan besarnya nilai \mathbf{u} yang merupakan suatu *control input* sehingga dapat memenuhi kondisi *sliding*.

2.4.2 Permukaan *Sliding*

Jika fungsi *switching* memenuhi kondisi $S(\mathbf{x}, t)=0$ maka fungsi ini dapat disebut permukaan sliding (*sliding surface*) [1]. Permukaan *sliding* berupa garis yang merupakan komponen 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:

$$\begin{aligned}
S(\mathbf{x}, t) &= \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \mathbf{e}, \quad \lambda > 0 \\
&= \frac{d\mathbf{e}}{dt} + \lambda \mathbf{e} \\
&\text{atau} \\
S(\mathbf{x}, t) &= \dot{\mathbf{e}} + \lambda \mathbf{e} \tag{2.11}
\end{aligned}$$

pada persamaan 2.11 bentuk permukaan *sliding* pada sistem berorde-2 ($n=2$) menunjukkan garis lurus pada bidang $e\dot{e}$. Permukaan *sliding* membagi bidang $e\dot{e}$ menjadi 2 bidang yaitu $S > 0$ dan $S < 0$. Agar trayektori keadaan dapat meluncur, maka sistem harus berada dalam kondisi *sliding*.

2.4.3 Kondisi *Sliding*

Secara umum, gerakan *sliding* dibagi menjadi dua fase, yaitu *reaching phase* dan *sliding phase*. Pada *sliding phase*, sistem *robust* terhadap gangguan, namun pada *reaching phase* sistem masih sensitif terhadap perubahan parameter dan gangguan eksternal [2]. Untuk menentukan controller yang menjamin sistem pada $S=0$, digunakan fungsi yang mirip dengan fungsi Lyapunov yang dinyatakan :

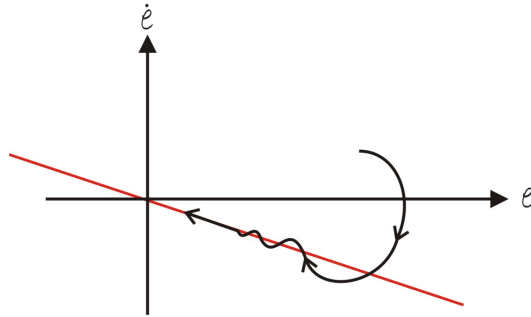
$$V = \frac{1}{2} S^2 \tag{2.12}$$

Dengan $V(0) = 0$ dan $V > 0$ untuk $S = 0$. Kondisi kestabilan suatu sistem diperoleh dari turunan pertama persamaan 2.12 yang bersifat definit negatif. Sehingga didapatkan pertidaksamaan yang disebut kondisi *sliding*.

$$\dot{S} \text{sgn}(S) \leq -\eta \text{ atau } S\dot{S} < 0 \tag{2.13}$$

Dengan η suatu konstanta positif. Gambar 2.6 menginterpretasikan untuk kondisi *sliding* dari metode

pengendalian SMC, dimana trayektori keadaan bergerak meluncur pada garis lurus $S=0$ yang merupakan permukaan *sliding*.



Gambar 2.6: Kondisi *Sliding*

2.4.4 Perancangan *Sliding Mode Control* (SMC)

Langkah-langkah untuk mendesain pengendalian dengan metode SMC adalah sebagai berikut [1]:

1. Menentukan fungsi *Switching* $S(\mathbf{x}, t)$ dari tracking error sistem dinamik
2. Menentukan permukaan *sliding*, yaitu $S(\mathbf{x}, t) = 0$ dari fungsi *switching* yang telah diperoleh
3. Menentukan nilai estimasi pengendali \hat{u} pada saat dinamika dalam kondisi *sliding* $\dot{S} = 0$
4. Mendefinisikan aturan SMC yaitu penggunaan *control law*,

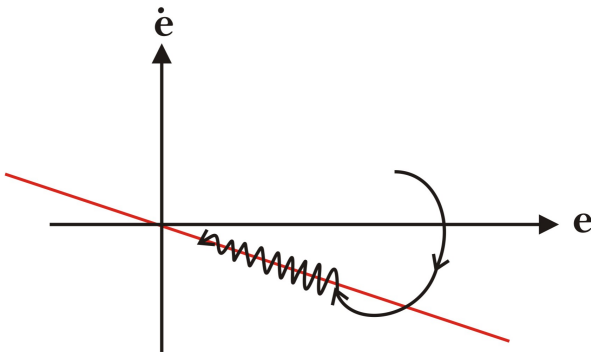
$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (2.14)$$

5. Substitusi nilai \hat{u} pada persamaan point (4) sehingga diperoleh *control input* baru

6. Menentukan nilai K yang sesuai dengan kondisi *sliding*.

2.4.5 Kondisi Chattering

Kondisi *chattering* merupakan kondisi dimana terjadi osilasi keluaran pengendali dengan frekuensi tinggi yang disebabkan oleh *switching* yang sangat cepat untuk membentuk suatu *sliding mode*. Sehingga berdampak pada stabilitas suatu sistem kendali [1]. Gambar 2.7 menunjukkan kondisi *chattering* menyebabkan lintasan trayektori keadaan sistem berupa osilasi dan tidak menunjukkan ke titik asal bidang $e\dot{e}$.



Gambar 2.7: Kondisi Chattering

2.4.6 Boudary Layer BL Pada Sliding Mode Control

Dengan adanya kondisi *chattering* yang berdampak pada stabilitas sistem maka perlu adanya *boudary layer* (BL). Pada SMC diterapkan suatu *boudary layer* pada permukaan *sliding* yang membuat *smooth* dinamika *control input* u dan menyakinkan bahwa sistem berada dalam *layer*. BL diasumsikan dengan lebar 2Φ . Jika jarak antara keadaan e

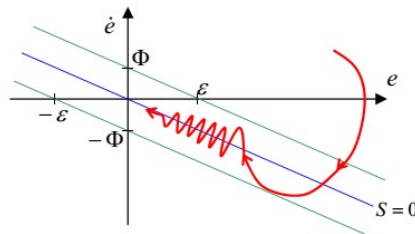
dan *sliding* $S = 0$ adalah $|S|$, maka vektor keadaan e berada dalam BL jika $|S| \leq \Phi$ dan berada diluar jika $|S| > \Phi$ [2].

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

Dimana fungsi saturasi sat didefinisikan sebagai :

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} x & \text{if } |x| < 1 \\ \text{sgn}(x) & \text{if } |x| \geq 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

Kondisi *sliding* dimana trayektori keadaan sistem bergerak dan berosilasi di sekitar permukaan *sliding* didalam *boundary layer*. Konsep BL ini dapat mengurangi besarnya osilasi pada *chattering* sehingga sistem tetap stabil dengan Φ menyatakan lebar *boundary layer* [2].



Gambar 2.8: *Sliding Mode* dengan *Boundary Layer*

2.5 Type 2 Fuzzy Logic Control

Type-2 fuzzy logic merupakan penerapan teori himpunan fuzzy pada bidang pengendalian sistem. *Type 2 fuzzy* merupakan pengembangan dari *Type 1 fuzzy*. *Type 1 fuzzy logic* sering kali basis pengetahuan yang digunakan untuk membangun *rules* tidak menentu [3]. Adapun mengapa ketidakpastian *rules* bisa terjadi, yaitu:

- a Perbedaan dalam menentukan himpunan *consequence* setiap kaidah
- b Perbedaan kata-kata *antecedent* dan *consequent* dari *rules* bisa mempunyai kaidah yang berbeda pada orang yang berbeda
- c Adanya gangguan (*noise*) yang menyisipi data

Sistem logika *type 1 fuzzy* yang memiliki fungsi keanggotaan yang tegas, tidak mampu untuk mengatasi ketidakpastian ini. Sedangkan sistem logika *fuzzy* bertipe 2 interval yang memiliki fungsi keanggotaan interval, memiliki kemampuan untuk mengatasi ketidakpastian ini [3]. Pengertian dari *interval type 2 fuzzy logic* sistem dikenalkan oleh Zadeh pada tahun 1970an sebagai perluasan dari konsep himpunan *fuzzy* biasa atau dapat disebut himpunan *type 1 fuzzy*. Konsep utama *fuzzy* bertipe 2 adalah kata dapat diartikan berbeda oleh orang yang berbeda. *Type 2 fuzzy logic* meliputi *membership function*, *fuzzy inference system*, dan *defuzzifikasi*.

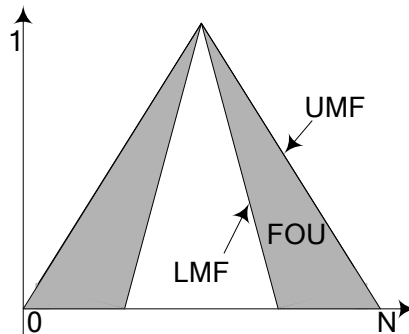
2.5.1 Membership Function

Fungsi keanggotaan *type 2 fuzzy logic* meliputi *The footprint of uncertainty* FOU, *upper membership function* (UMF) dan *lower membership function* (LMF). *The footprint of uncertainty* (FOU) memberikan derajat kebebasan tambahan yang memungkinkan untuk secara langsung memodelkan dan menangani ketidakpastian [4]. *Type 2 fuzzy* dapat juga mengurangi jumlah *rules fuzzy* jika dibandingkan dengan *type 1 fuzzy* [8]. Secara umum himpunan *type 2 fuzzy* dapat didefinisikan sebagai berikut [3]:

$$\tilde{A} = \{(x, u, \mu_{\tilde{A}}(x, u)) | \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0, 1]\} \quad (2.16)$$

dengan $J_x \subseteq [0, 1]$ representasi dari fungsi keanggotaan utama (*primary membership*) dari x dan $\mu_{\bar{A}}(x, u)$ merupakan *type 1 fuzzy* yang dikenal dengan fungsi keanggotaan sekunder (*secondary membership*).

Footprint of uncertainty (FOU) adalah daerah terbatas yang memuat derajat ketidakpastian keanggotaan utama atau yang disebut fungsi keanggotaan utama (*primary membership*), dimana FOU gabungan dari semua fungsi keanggotaan utama [8]. FOU dibatasi oleh fungsi keanggotaan sekunder (*secondary membership*) yang terdiri dari *upper membership function* (UMF) dan *lower membership function* (LMF) yang merupakan fungsi keanggotaan dari *type 1 fuzzy* [3]. *Membership function type 2 fuzzy logic* dapat dilihat pada Gambar 2.9.

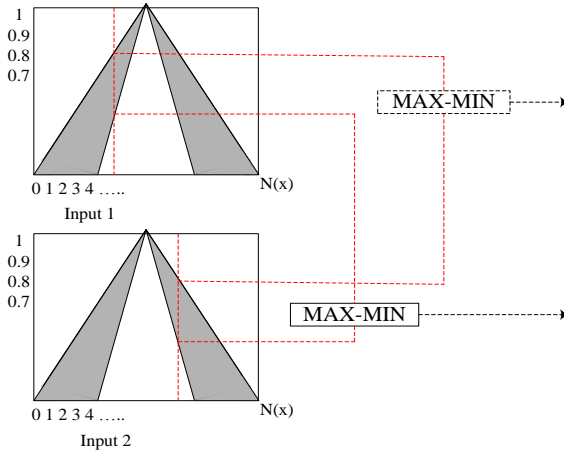


Gambar 2.9: *Membership Function*

2.5.2 Operasi Pada Membership Function Type-2

Operasi type 2 fuzzy logic (T2FL) hampir sama dengan *type 1 fuzzy set*. Pada *operasi type 2 fuzzy logic* dilakukan oleh dua *type 1 fuzzy logic* sebagai batas dari fungsi keanggotaan FOU yaitu UMF dan LMF [8]. *Operasi type 2 fuzzy*

secara umum terdiri gabungan (*union*), irisan (*intersection*), dan *complement*. Operasi gabungan (*union*) dan irisan (*intersection*) *type 2 fuzzy* dilakukan dengan operator biner minimum (\min) dan maksimum (\max) [3]. Operasi pada *Membership function type-2* dapat dilihat pada Gambar 2.10.

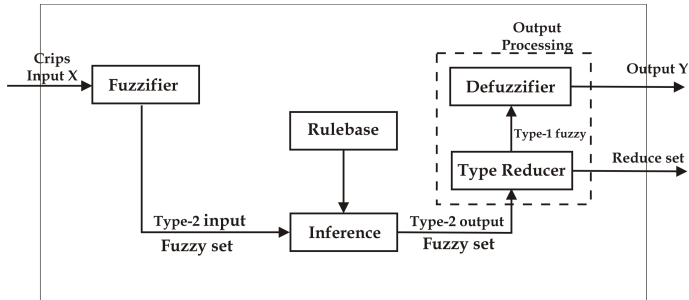


Gambar 2.10: Operasi pada *Membership Function Type-2*

2.5.3 Struktur Dasar Pengendali *Type 2 Fuzzy*

Struktur dasar pengendali *type 2 fuzzy* hampir sama dengan struktur dasar *type 1 fuzzy*. Perbedaan struktur terletak pada proses *defuzzifier*. Struktur utama dari *type 2 fuzzy logic controller* (T2FLC) mempunyai kesamaan dengan *type 1 FLC*. *Fuzzifier*, *rule-base*, *inference* dan proses *output* adalah struktur utama dari (IT2FLC). Perbedaan *type 1* dan *type 2 FLC* hanya terletak pada proses *output*. *Defuzzifier* dan *type reducer* di IT2FLC merupakan bagian utama dari proses *output*. *Type reducer* dan *defuzzifier* di T2FLC menghasilkan himpunan *output fuzzy* *type 1* atau sebuah bilangan *crisp*

dari *defuzzifier* [9]. Struktur *Type 2 fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.11



Gambar 2.11: Struktur Dasar Pengendali *Type 2 Fuzzy Logic*

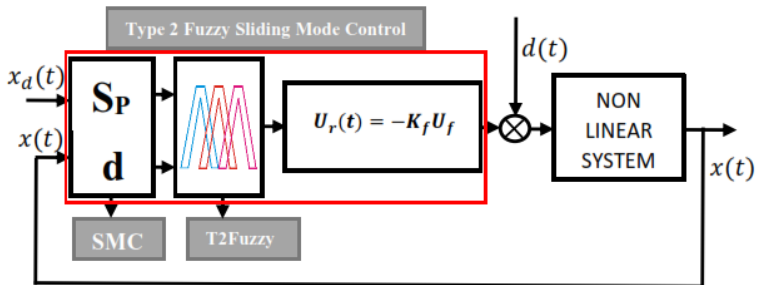
Komponen utama dapat di uraikan sebagai berikut [9]:

1. *Fuzzifier*: proses dimana mengubah masukan (nilai real) sehingga dapat digunakan pada aturan di *rulebase* dari nilai *crisp* menjadi nilai *fuzzy*.
2. *Rule-base* atau Kaidah : berisi kumpulan aturan fuzzy dalam mengendalikan sistem
3. *Inference*: mengevaluasi aturan *control* yang relevan dan mengambil keputusan masukan yang akan digunakan untuk *plant*.
4. *Defuzzifier/type reducer*: fungsi dari *defuzzifier* mengubah keluaran fuzzy ke nilai crisp/nilai sebenarnya, dimana fungsi dari tipe reduksi mentransformasi *type 2 fuzzy* ke *type 1 fuzzy*.

2.6 Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC)

2.6.1 Skema Pengendali T2FSMC

Type-2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) adalah suatu pengendali dimana pengendali ini merupakan penggabungan 2 pengendali yaitu *sliding mode control* dan *type 2 fuzzy logic control*. Skema kendali T2FSMC hampir sama dengan skema pengendali T1FSMC dimana masukkan di IT2FLC adalah dua variabel yang ditentukan sebelumnya melalui pengendali SMC, selanjutnya variabel-variabel tersebut diproses dengan pengendali IT2FLC sehingga keluar dari pengendali IT2FLC adalah *control input* u untuk plant [10]. Skema dasar pengendali T2FSMC dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12: Skema Dasar Pengendali T2FSMC

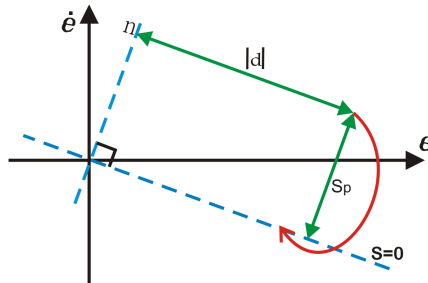
Adanya pengendali (T2FSMC) bertujuan untuk memperbaiki performansi dari sistem SMC. T2FSMC ini juga mewarisi keuntungan dari kedua metode yang dapat mengurangi jumlah *rules* secara dramatis. Kontroler ini juga dapat memberikan lebih ketahanan dari FLC konvensional (T1FLC) untuk menangani ketidakpastian dan gangguan [10].

2.6.2 Perancangan Pengendali T2FSMC

Pada skema pengendali T2FSMC telah dijelaskan bahwa skema pengendali T2FSMC hampir sama dengan skema pengendali FSMC yang berbeda hanya terletak pada fuzzy yang digunakan. Pada T2FSMC fuzzy yang digunakan adalah *type 2 fuzzy logic* sehingga fungsi keanggotaan menggunakan *type 2 fuzzy*. Perancangan T2FSMC dan FSMC bekerja seperti halnya SMC, yaitu menggunakan permukaan *sliding*. Sehingga diperlukannya fungsi *switching* untuk menentukan nilai u yang akan diinputkan pada *plant*. Pada T2FSMC nilai input u didapatkan dari aturan fuzzy sebagai berikut [1]:

$$R^i : \text{jika } S_p = \tilde{S}^i \text{ dan } d = \tilde{D}^i \text{ maka } u = \tilde{U}^i, i=1,\dots,M$$

dengan R^i merupakan ruang dari *rules fuzzy* ke i , $\tilde{S}^i \in \mathbf{FS}$ dan $\tilde{D}^i \in \mathbf{FD}$ merupakan nilai fuzzy dari keanggotaan fuzzy s dan d pada daerah fuzzy ke- i pada ruang keadaan fuzzy. \tilde{U}^i merupakan hasil masukan yang berkorespondensi pada daerah fuzzy ke- i pada ruang fuzzy. untuk S_p dan d dapat dilihat pada Gambar 2.13 [1].



Gambar 2.13: Interpretasi grafis dari S_p dan d

Dari Gambar 2.13, S_p adalah jarak antara permukaan *sliding* dengan vektor keadaan. d merupakan jarak antara

vektor keadaan dan vektor normal ke permukaan *sliding*. Maka S_p dan d dapat dituliskan ke bentuk persamaan dibawah ini [1]:

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \quad (2.17)$$

$$d = \sqrt{|e|^2 - S_p^2} \quad (2.18)$$

Pada pengendalian T2FSMC diperlukanya aturan fuzzy dimana dalam tugas akhir ini menggunakan aturan fuzzy FSMC yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 [1].

Tabel 2.1: Aturan umum fuzzy untuk pengendali FSMC

		S_p							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	B
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

Dari Tabel 2.1 dapat diambil beberapa contoh mengenai aturan untuk FSMC, antara lain: jika S_p adalah *positive medium* (PM) dan d adalah *small* (S), maka u adalah *negative big* (NB). jika S_p adalah *negative big* (NB) dan d adalah *zero* (Z), maka u adalah *positive big* (PB).

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini diuraikan langkah-langkah sistematis yang dilakukan dalam proses pengerjaan Tugas Akhir. Metode penelitian dalam Tugas Akhir ini terdiri atas enam tahap, antara lain: studi literatur, menganalisis sistem panel surya, perancangan sistem pengendali panel surya, implementasi sistem posisi panel surya dengan MATLAB dan simulasi dan analisis performansi dengan pengendali T2FSMC.

3.1 Tahap Penelitian

Dalam melakukan penelitian pada tugas akhir ini, ada beberapa tahap yang akan dilakukan antara lain :

1. Studi Literatur

Pada tahap ini akan identifikasi permasalahan dan pencarian referensi yang dapat menunjang penelitian serta pembelajaran lebih lanjut tentang metode *Sliding Mode Control* (SMC), *Interval Type 2 Fuzzy Logic Control* (IT2FLC), *Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control* (T2FSMC) dan model panel surya, serta pembelajaran tentang konsep-konsep dasar sistem pengendali. Pembelajaran lebih mendalam mengenai hal tersebut diperoleh baik melalui buku-buku literatur, jurnal, paper, maupun artikel dari internet.

2. Menganalisis sistem panel surya

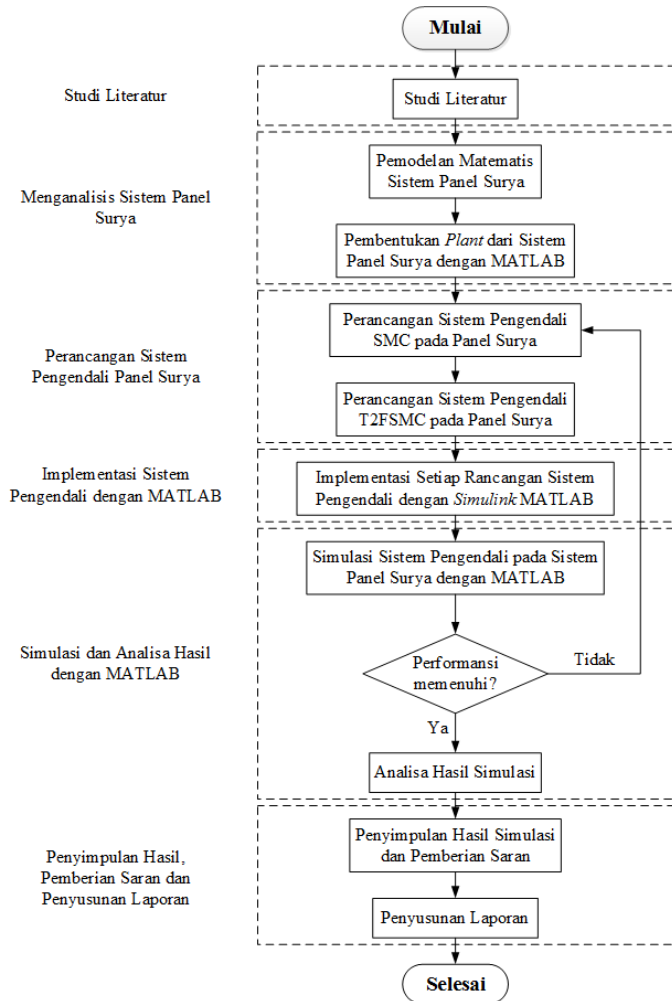
Pada tahap ini dilakukan pengabungan model matematika dari motor DC yang merupakan komponen penggerak panel surya dimana nantinya didapat satu

persamaan model matematika. Selanjutnya dari model tersebut akan diimplementasikan ke matlab dengan menggunakan *simulink*.

3. Perancangan sistem pengendali panel surya
Tahap perancangan pengendali panel surya ini akan dirancang sistem pengendali dengan metode SMC dan menentukan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* dari SMC, membuat aturan *fuzzy* untuk menentukan *control input* dari rancangan SMC sebelumnya.
4. Implementasi Sistem posisi panel surya dengan program MATLAB
Pada tahap ini akan dibuat simulink dari pengendali SMC, membuat fungsi keanggotaan dan aturan *fuzzy* pada *toolbox fuzzy* MATLAB dan melakukan perancangan T2FSMC dengan *simulink* MATLAB.
5. Simulasi dan analisis performansi sistem dengan pengendali T2FSMC
Tahap ini melakukan simulasi dengan membandingkan antara FSMC dan T2FSMC dengan melakukan perubahan pada inputan, gangguan dan parameter yang berbeda serta hasil dari setiap inputan nantinya akan dilihat respon dari panel surya.
6. Kesimpulan, saran dan penyusunan laporan tugas akhir
Tahap akhir dimana menyusun lapotan akhir dan memberikan saran serta kesimpulan dari hasil simulasi yang telah dilakukan.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Tahap penelitian diatas dapat dibuat suatu diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3.1: Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada Bab IV ini dibahas tentang sistem pengendalian posisi pada panel surya, dimana dibab sebelumnya telah diketahui langkah-langkah perancangan sistem pengendali posisi pada panel surya. Pembahasan dimulai dengan pemodelan matematika dari panel surya setelah itu dilanjutkan dengan perancangan sistem pengendali menggunakan SMC dan T2FSMC pada sistem panel surya. Rancangan yang didapat akan diimplementasikan pada Simulink Matlab dengan masing-masing sistem kendali. Setelah itu akan dilakukan pengujian pada ketiga sistem pengendali tersebut.

4.1 Pemodelan Matematika Sistem Panel Surya

Pemodelan matematika pada sistem panel surya dilakukan dengan cara mensubstitusi persamaan-persamaan dari masing-masing komponen penyusun panel surya yang telah di jelaskan sebelumnya pada bab II seperti komponen motor DC, amplifier, roda gigi dan takometer. Hal pertama yang dilakukan substitusi komponen motor DC dengan substitusi Persamaan 2.3 ke Persamaan 2.4, sehingga didapatkan :

$$\begin{aligned} K_m i_a(t) &= J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) \\ i_a(t) &= \frac{J}{K_m} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{B\omega(t)}{K_m} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Selanjutnya substitusi Persamaan 2.2 dan 4.1 ke Persamaan

2.1 maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
 e_a(t) &= R_a \left(\frac{J}{K_m} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{B\omega(t)}{K_m} \right) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_b \omega_m(t) \\
 e_a(t) &= \frac{R_a J}{K_m} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{R_a B}{K_m} \omega(t) + \frac{L_a J}{K_m} \frac{d^2\omega(t)}{d^2t} \\
 &\quad + \frac{L_a B}{K_m} \frac{d\omega(t)}{dt} + K_b \omega(t) \\
 e_a(t) &= \frac{L_a J}{K_m} \frac{d^2\omega(t)}{d^2t} + \left(\frac{R_a J}{K_m} + \frac{L_a B}{K_m} \right) \frac{d\omega(t)}{dt} \\
 &\quad + \left(\frac{R_a B}{K_m} + K_b \right) \omega(t) \tag{4.2}
 \end{aligned}$$

Persamaan 4.2 ekuivalen dengan :

$$\begin{aligned}
 \frac{L_a J}{K_m} \ddot{\omega} &= e_a(t) - \left(\frac{R_a B}{K_m} + K_b \right) \omega - \left(\frac{R_a J}{K_m} + \frac{L_a B}{K_m} \right) \dot{\omega} \\
 \frac{L_a J}{K_m} \ddot{\omega} &= e_a(t) - \left(\frac{R_a B + K_b K_m}{K_m} \right) \omega - \left(\frac{R_a J + L_a B}{K_m} \right) \dot{\omega} \\
 \ddot{\omega} &= \frac{e_a(t) - \left(\frac{R_a B + K_b K_m}{K_m} \right) \omega - \left(\frac{R_a J + L_a B}{K_m} \right) \dot{\omega}}{L_a J / K_m} \\
 \ddot{\omega} &= \frac{K_m}{L_a J} e_a(t) - \left(\frac{R_a B + K_b K_m}{L_a J} \right) \omega - \left(\frac{R_a J + L_a B}{L_a J} \right) \dot{\omega}
 \end{aligned}$$

Setelah dilakukannya substitusi komponen penyusun panel surya diperoleh model persamaan sebagai berikut :

$$\ddot{\omega} = \frac{K_m}{L_a J} e_a(t) - \left(\frac{R_a B + K_b K_m}{L_a J} \right) \omega - \left(\frac{R_a J + L_a B}{L_a J} \right) \dot{\omega} \tag{4.3}$$

Kemudian melakukan permisalan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 u &= e_a(t) \\
 C &= \frac{K_m}{L_a J} \\
 D_1 &= \frac{R_a B + K_b K_m}{L_a J} \\
 D_2 &= \frac{R_a J + L_a B}{L_a J}
 \end{aligned}$$

Dengan ditambahkan gangguan (d) maka Persamaan 4.3, maka diperoleh :

$$\ddot{\omega} = Cu - D_1\dot{\omega} - D_2\omega + d \quad (4.4)$$

Untuk nilai dari konstanta maupun parameter-parameter diambil dari referensi pada Tabel 4.1 berikut ini :

Tabel 4.1: Konstanta dan Parameter Penyusun Sistem

Komponen	Konstanta		Satuan
Motor	J	2	k.g.m ²
	B	1	N.m.s
	K_m	2	N.m/Ampere
	K_b	0.5	V/(rad/s)
	R_a	0.2	Ohm
	L_a	0.3	Henry
Servor Amplifier	K_a	10	-
Takometer	K_t	1	-
Penguatan Op-Amp	R_f	50	-

Selanjutnya dengan menggunakan model matematika pada Persamaan 4.4 akan diimplementasikan dalam bentuk diagram blok dengan Simulink Matlab, sehingga diperoleh diagram blok sistem panel surya dapat dilihat pada Lampiran A. Rangkaian sistem panel surya tersusun dari komponen-komponen sistem panel surya seperti motor DC, amplifier, potensiometer, dan roda gigi yang dirancang menjadi satu rangkaian sistem yang utuh.

4.2 Perancangan Pengendali *Sliding Mode Control* (SMC)

Model dinamis panel surya yang diperoleh dari substitusi setiap komponen penyusun panel surya pada pembahasan sebelumnya sehingga didapatkan Persamaan 4.4 sebagai berikut:

$$\ddot{\omega} = Cu - D_1\omega - D_2\dot{\omega} + d$$

Perancangan pengendali SMC hal pertama yang perlu dilakukan ialah menentukan masukkan pada SMC. Dalam kasus ini karena yang akan dikendalikan adalah posisi panel surya terhadap matahari maka masukkan pada sistem ialah kecepatan sudut (ω_d). *Error* dari sistem panel surya adalah:

$$e = \omega - \omega_d$$

$$\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_d$$

$$\ddot{e} = \ddot{\omega} - \ddot{\omega}_d$$

Pada sistem pergerakan matahari tidak mempunyai percepatan sehingga $\dot{\omega}_d = 0$ dan $\ddot{\omega}_d = 0$ maka didapat $\dot{e} = \dot{\omega}$ dan $\ddot{e} = \ddot{\omega}$. Selain itu, karena sistem berordo dua maka fungsi *swithing*:

$$S = \dot{e} + \lambda e \tag{4.5}$$

Dengan mensubstitusi nilai e dan \dot{e} ke Persamaan 4.5 didapatkan :

$$S = \dot{\omega} + \lambda(\omega - \omega_d)$$

$$S = \dot{\omega} + \lambda\omega - \lambda\omega_d$$

Sedangkan turunan S pada Persamaan 4.5 :

$$\dot{S} = \ddot{e} + \lambda\dot{e} \tag{4.6}$$

Dengan substitusi nilai $\dot{e} = \dot{\omega}$ dan $\ddot{e} = \ddot{\omega}$ pada Persamaan 4.6 diperoleh.

$$\dot{S} = \ddot{\omega} + \lambda\dot{\omega} \quad (4.7)$$

Selanjutnya substitusi Persamaan 4.4 ke Persamaan 4.7 diperoleh :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \ddot{\omega} + \lambda\dot{\omega}_d \\ \dot{S} &= Cu - D_1\dot{\omega} - D_2\ddot{\omega} + d + \lambda\dot{\omega} \\ \dot{S} &= Cu - D_1\dot{\omega} - (D_2 - \lambda)\ddot{\omega} + d \end{aligned} \quad (4.8)$$

Untuk mencari nilai estimasi pengendali \hat{u} yang diperoleh dari Persamaan 4.10 dengan nilai $\dot{S} = 0$,

$$Cu - D_1\dot{\omega} - D_2\ddot{\omega} + d + \lambda\dot{\omega} = 0 \quad (4.9)$$

Dari Persamaan 4.9 didapatkan nilai \hat{u} , yaitu:

$$\begin{aligned} Cu &= D_1\dot{\omega} + D_2\ddot{\omega} - d - \lambda\dot{\omega} \\ \hat{u} &= \frac{D_1\dot{\omega} + (D_2 - \lambda)\ddot{\omega} - d}{C} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Berdasarkan *control law* pada persamaan bab sebelumnya yang memenuhi kondisi *sliding*, yaitu :

$$u = \hat{u} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.11)$$

Kemudian substitusi Persamaan 4.10 ke Persamaan 4.11 didapatkan u :

$$u = \frac{\hat{D}_1\dot{\omega} + (\hat{D}_2 - \lambda)\ddot{\omega} - \hat{d} - \lambda\dot{\omega}}{\hat{C}} - K \operatorname{sgn}(S) \quad (4.12)$$

Dengan substitusi nilai u pada Persamaan 4.12 ke Persamaan 4.8 sehingga diperoleh

$$\begin{aligned}\dot{S} &= C \left(\frac{\hat{D}_1\omega + (\hat{D}_2 - \lambda)\dot{\omega} - \hat{d} - \lambda\dot{\omega}}{\hat{C}} - K \operatorname{sgn}(S) \right) - D_1\omega \\ &\quad - (D_2 - \lambda)\dot{\omega} + d \\ \dot{S} &= (\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) - KC \operatorname{sgn}(S) \quad (4.13)\end{aligned}$$

Kemudian menentukan kondisi *sliding*, Agar memenuhi kondisi *sliding*, yaitu :

$$S\dot{S} \leq -\eta|S| \quad (4.14)$$

Untuk memenuhi kondisi *sliding* pada Persamaan 4.14 maka nilai K pada Persamaan 4.13 dirancang sebagai berikut :

$$\begin{aligned}S \left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) - KC \operatorname{sgn}(S) \right) &\leq -\eta|S| \\ \frac{S}{|S|} \left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) - KC \operatorname{sgn}(S) \right) &\leq -\eta \\ \operatorname{sgn}(S) \left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) - KC \operatorname{sgn}(S) \right) &\leq -\eta \\ \left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) \right) \operatorname{sgn}(S) - KC &\leq -\eta \\ \left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) \right) \operatorname{sgn}(S) + \eta &\leq KC \\ \frac{\left((\hat{D}_1 - D_1)\omega + (\hat{D}_2 - D_1)\dot{\omega} + (d - \hat{d}) \right) \operatorname{sgn}(S) + \eta}{C} &\leq K \quad (4.15)\end{aligned}$$

Sehingga dari Persamaan 4.15 diperoleh nilai K adalah :

$$K = \max \left| \frac{(\hat{D}_1 - D_1)}{C} \right| \omega + \max \left| \frac{(\hat{D}_2 - D_1)}{C} \right| \dot{\omega} + \left| \frac{(d - \hat{d})}{C} \right| + \left| \frac{\eta}{C} \right| \quad (4.16)$$

Setelah mendapatkan nilai K, selanjutnya digunakan *boundary layer* untuk meminimalkan *chattering* dengan mengubah fungsi signum pada Persamaan 4.11 sehingga Persamaan 4.11 berubah menjadi

$$u = \hat{u} - K \text{sat} \left(\frac{S}{\Phi} \right) \quad (4.17)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan 4.10 dan 4.16 ke Persamaan 4.17 maka didapatkan pengendali SMC (*Sliding Mode Control*) pada panel surya sebagai berikut:

$$u = \frac{D_1 \omega + (D_2 - \lambda) \dot{\omega} - d}{C} - \left\{ \left| \frac{(\hat{D}_1 - D_1)}{C} \right| \omega + \max \left| \frac{(\hat{D}_2 - D_1)}{C} \right| \dot{\omega} + \left| \frac{(d - \hat{d})}{C} \right| + \left| \frac{\eta}{C} \right| \right\} \text{sat} \left(\frac{S}{\Phi} \right)$$

Dengan mengansumsikan :

$$\begin{aligned} C &= \frac{K_m}{L_a J} \\ D_1 &= \frac{R_a B + K_b K_m}{R_a J + L_a B} \\ D_2 &= \frac{L_a J}{L_a J} \\ \hat{C} &= \frac{\hat{K}_m}{\hat{L}_a \hat{J}} \\ \hat{D}_1 &= \frac{R_a \hat{B} + \hat{K}_b \hat{K}_m}{\hat{L}_a \hat{J}} \\ \hat{D}_2 &= \frac{R_a \hat{J} + \hat{L}_a \hat{B}}{\hat{L}_a \hat{J}} \end{aligned}$$

Setelah perancangan pengendali SMC diperoleh, selanjutnya mengimplementasikan rancangan pengendali SMC pada Simulink Matlab dapat dilihat pada Lampiran B. Rancangan pengendali SMC terdiri dari 2 subsistem yaitu SMC dan panel surya. Pengendali SMC memiliki keluaran berupa besaran nilai u yang didapat dari nilai estimasi \hat{u} dan K . Karena dalam perancangan pengendali SMC menggunakan interval terbatas yang menunjukkan nilai estimasi parameter, maka diambil beberapa interval parameter sebagai berikut :

Hambatan (<i>Ohm</i>)	:	$R_a \in [0.1, 1.0]$
Induktansi Kumparan (<i>Henry</i>)	:	$L_a \in [0.1, 5.0]$
Momen Inersia (Kgm^2)	:	$J \in [1.0, 5.0]$
Koefisien Gesek Viskos ($\frac{\text{N.m.sec}}{\text{rad}}$)	:	$B \in [0.5, 5.0]$
Koefisien Emf balik ($\frac{\text{V.sec}}{\text{rad}}$)	:	$K_b \in [0.1, 1.0]$
Konstanta Torsi ($\frac{\text{N.m}}{\text{ampere}}$)	:	$K_m \in [1.0, 5.0]$

Selain itu diambil juga nilai-nilai lainnya yang ada dalam perhitungan diantaranya $\lambda=10$, lebar *boundary layer* $\Psi=1$, dan $\eta=10$.

4.3 Pengendali T2FSMC

Perancangan pengendali T2FSMC memiliki skema perancangan yang hampir mirip dengan perancangan kendali FSMC. Perbedaan skema FSMC dan T2FSMC terletak pada tipe *fuzzy* yang digunakan. Pada T2FSMC menggunakan *type 2 fuzzy logic control* (T2FLC) oleh karena itu terjadi penggantian tipe *fuzzy* dalam perancangan T2FSMC. Perancangan T2FSMC membutuhkan masukan berupa *control input* u dari SMC. Sehingga diperlukannya fungsi *swicthing* yang sama dengan pengendali Sliding Mode Control (SMC) dengan menggunakan Persamaan 2.11 dengan $e = \omega + \omega_d$ dan $\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_d$.

Control input u pada T2FSMC diperoleh dari variabel SMC yaitu S_p dan d . Variabel S_p dan d nantinya merupakan input dalam fuzzy tipe 2 pada perancangan kendali T2FSMC. Sehingga diperlukanya perancangan sebuah fungsi keanggotaan *fuzzy* tipe 2 dari S_p dan d . Perancangan fungsi keanggotaan S_p dan d T2FSMC diperoleh dengan menentukan interval keanggotaan e dan \dot{e} yang di representasikan oleh $\omega - \omega_d$ dan $\dot{\omega} - \dot{\omega}_d$ dimana diperoleh dengan mengamati loop terbuka panel surya, maka didapatkan interval e dan \dot{e} sebagai berikut:

$$e \in [-0.000073, 0.000073]$$

$$\dot{e} \in [-0.003, 0.003]$$

Setelah diperoleh interval e dan \dot{e} . Maka selajutnya mencari nilai maksimum dari S_p dan d dengan menggunakan Persamaan 2.17 dan 2.18, didapatkan :

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} = \frac{|(\dot{\omega} - \dot{\omega}_d) + \lambda(\omega - \omega_d)|}{\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

$$= \frac{|0.0027 + 10(0.000073)|}{\sqrt{1 + 10^2}} = 0.00036816$$

$$d = \sqrt{|e|^2 - S_p^2} = \sqrt{((0.000073)^2 + (0.0027)^2) - 0^2}$$

$$d = 0.003$$

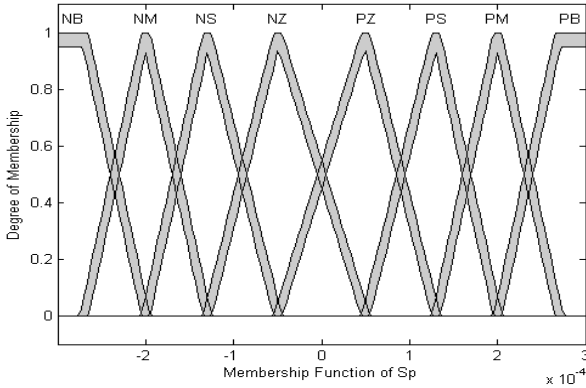
Selanjutnya dilakukan pembesaran sehingga didapatkan interval berupa keanggotaan S_p dan d sebagai berikut:

$$S_p \in [-0.00036, 0.00036]$$

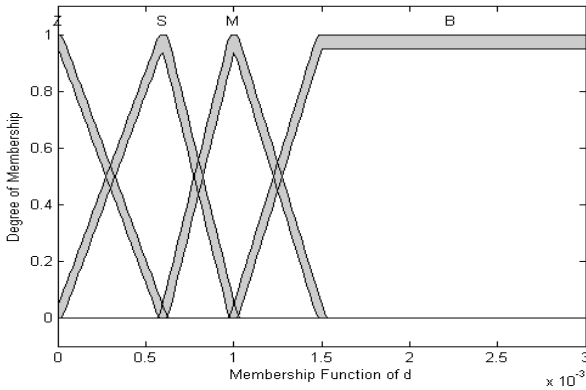
$$d \in [0, 0.003]$$

Setelah diperoleh interval S_p dan d , kemudian merancang keanggotaan S_p dan d dengan cara *trial and error* mengeser

fungsi keanggotaan sampai pada hasil yang diharapkan. Sehingga diperoleh fungsi keanggotaan tipe 2 fuzzy dari S_p dan d yang masing-masing ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2.

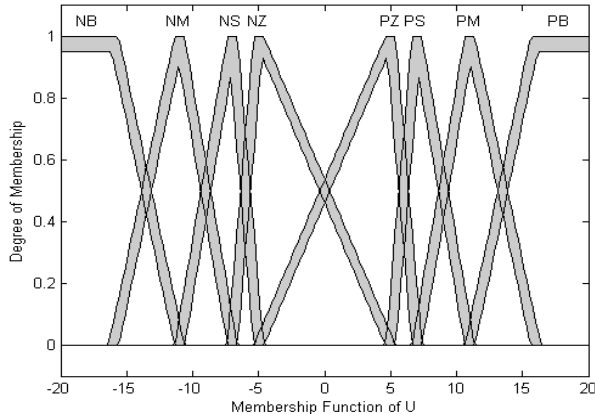


Gambar 4.1: Fungsi Keanggotaan S_p



Gambar 4.2: Fungsi Keanggotaan d

Nilai *control input* u secara umum ditentukan dengan menyesuaikan kemampuan dari motor DC. pada tugas akhir ini fungsi keanggotaan nilai u dirancang sedemikian sehingga diperoleh seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3: Fungsi Keanggotaan u

Selanjutnya mengimplementasikan perancangan sistem kendali T2FSMC ke program Matlab. Perancangan dilakukan dengan menggunakan simulink matlab sehingga diperoleh rangkaian simulink untuk T2FSMC dapat dilihat pada Lampiran C. Pada rancangan T2FSMC diperlukan nilai gain1, gain2 dan gain3 dimana diperoleh dari *trial and error*, dengan tujuan utama untuk memperoleh performasi terbaik pada sistem. Setelah dilakukan beberapa pengujian diperoleh nilai adalah $d1=0.019$, $d2=0.0035$ dan $d3=1$.

4.4 Simulasi dan Analisis Hasil Rancangan Pengendali

Pada simulasi dilakukan perbandingan sistem pengendali T2FSMC dengan sistem pengendali SMC dan sistem

pengendali FSMC. Karena akan dilakukan perbandingan 3 sistem pengendali untuk sistem pengendali FSMC dalam Tugas Akhir ini menggunakan rancangan sistem pengendali FSMC dari Tugas Akhir sebelumnya yang dikerjakan oleh wawan iswanto. Selanjutnya rancangan dari masing-masing pengendali akan dilakukan pengamatan saat tanpa gangguan dan gangguan. Gangguan yang diberikan terdiri dari gangguan eksternal dan gangguan internal. Adapun tahap-tahap yang dilakukan pada proses simulasi dengan Matlab, antara lain:

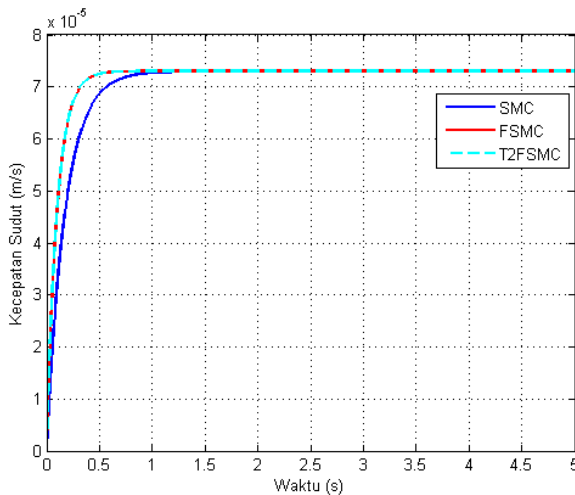
1. Inialisasi parameter pada panel surya pada *mfile*
2. Membuka *file* rangkaian masing-masing sistem pengendali yang sudah dibuat dengan Simulink Matlab
3. Mengatur nilai gain pada masing-masing rangkaian sistem pengendali
4. Mengatur sinyal gangguan pada masing-masing rangkaian dengan penambahan blok *bluider* pada Simulink Matlab
5. Menentukan waktu simulasi pada masing-masing rangkaian sistem pengendali
6. *Running* nilai parameter pada *mfile* kemudian *running* masing-masing sistem pengendali pada Simulink Matlab
7. Untuk mengetahui respon yang dihasilkan bisa melihat di blok *scope* pada masing-masing rangkaian sistem pengendali

Pada Tugas Akhir ini nanti dilakukan pengamatan dan penganalisa performansi dari masing-masing kendali

untuk menguji sifat *robust* dari sistem pengendali terhadap ketidakpastian. Setiap simulasi diberikan nilai *default* untuk kecepatan sudut yang diinginkan $\omega = 0.000073$ rad/detik dan percepatan sudut $\dot{\omega} = 0$. Hal ini dimaksudkan nilai diatas merupakan input nilai pada setiap sistem pengendali baik gangguan maupun tanpa gangguan.

4.4.1 Simulasi Tanpa Gangguan

Pada simulasi tanpa gangguan digunakan beberapa nilai parameter, yaitu : $K_b=0.5$, $K_m=2$, $J=2$, $L_a=0.3$, $R_a=0.2$, $B=1$ dan $\lambda=10$. Dari kondisi tersebut akan diperoleh hasil seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4: Perbandingan respon ω tanpa gangguan

Gambar 4.4 merupakan perbandingan antara tiga kendali yaitu SMC, FSMC dan T2FSMC saat masing-masing sistem kendali dalam keadaan tanpa gangguan. Hasil simulasi dapat terlihat bahwa respon sistem kendali T2FMSMC dan FSMC

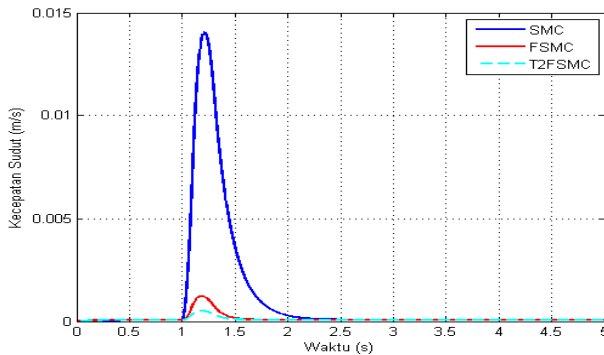
bekerja lebih baik dari pada SMC. Waktu yang dibutuhkan respon pengendali T2FSMC dan FSMC 0.8759 s ke nilai yang diinginkan. Respon pengendali SMC membutuhkan waktu 1.3212 s ke nilai yang diinginkan.

4.4.2 Simulasi dengan Gangguan Eksternal

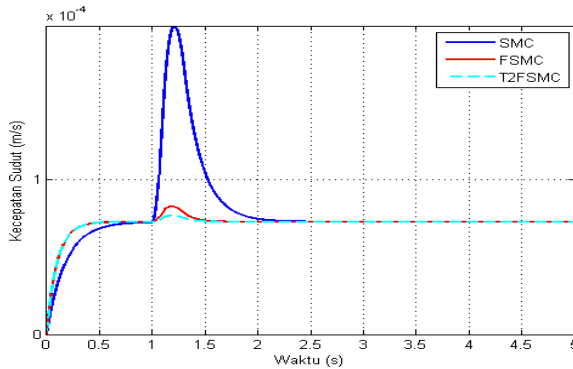
Simulasi ini dilakukan dengan menambahkan suatu sinyal yang dianggap sebagai gangguan yang berasal dari luar sistem. Sinyal yang digunakan sebagai gangguan adalah sinyal *impuls* dan sinyal *square*. Sinyal *impuls* maupun sinyal *square* memiliki karakteristik berbeda dimana sinyal *impuls* bersifat sesaat dan sinyal *square* yang bersifat kontinu pada interval tertentu. Pada simulasi ini menggunakan nilai dan parameter yang sama dengan simulasi tanpa gangguan.

1. Sinyal *Impuls*

Sinyal *impuls* merupakan sinyal yang bernilai besar pada waktu tertentu. Sinyal ini mewakili gangguan dari luar yang bersifat sesaat. Berikut hasil simulasi dengan gangguan berupa sinyal *impuls*.



Gambar 4.5: Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal *impuls* besar



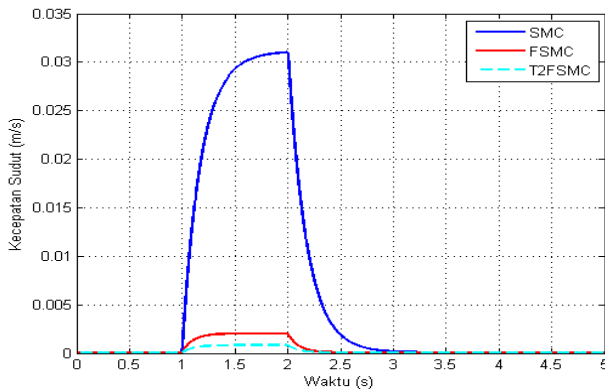
Gambar 4.6: Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal *impuls* kecil

Pada simulasi ini diberikan dua nilai gangguan berupa sinyal *impuls* yang bernilai kecil (0.001 volt) dan bernilai besar (1.1 volt) serta menggunakan nilai-nilai parameter pada kondisi awal. Pada Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 pengendali T2FSMC bekerja lebih baik terhadap gangguan berupa sinyal impuls baik bernilai besar dan kecil daripada pengendali FSMC dan SMC. Waktu untuk kembali ke nilai yang diinginkan terhadap gangguan yang bernilai besar untuk pengendali SMC 2.6218 s, FSMC 1.9182 s, dan T2FSMC 1.7222 s. Sedangkan Waktu untuk kembali ke nilai yang diinginkan terhadap gangguan yang bernilai kecil untuk pengendali SMC 2.4932 s, FSMC 1.8825 s, dan T2FSMC 1.6620 s. Hal ini dikarenakan fungsi keanggotaan pada pengendali T2FSMC lebih kompleks sehingga mampu bekerja lebih baik dalam menangani ketidakpastian.

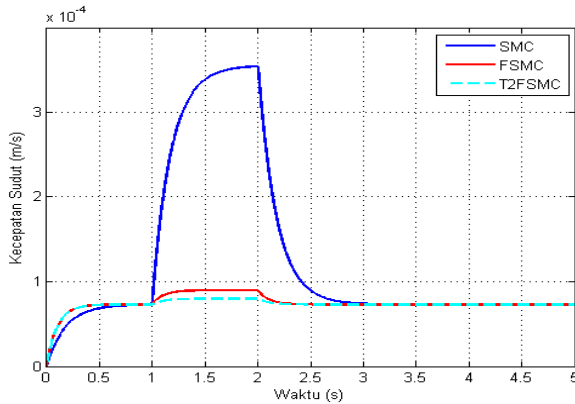
2. Uji Sinyal *Square*

Sinyal *square* adalah sinyal yang bernilai tetap (kontinu) pada suatu interval waktu tertentu. Sinyal ini mewakili

gangguan dari luar sistem yang bersifat kontinu. Berikut hasil simulasi dengan gangguan berupa sinyal *Square*. Pada pengujian sistem terhadap gangguan sinyal *square* diberikan 2 macam sinyal *square* bernilai kecil (0.001 volt) dan besar (1.1 volt) dengan menggunakan parameter kondisi awal. Pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 dapat dilihat bahwa sistem pengendali T2FSMC dengan gangguan berupa sinyal *square* bekerja lebih baik dibandingkan dengan sistem pengendali FSMC dan SMC. Waktu untuk kembali ke nilai yang diinginkan terhadap gangguan yang bernilai besar untuk pengendali SMC 3.3352 s, FSMC 2.4585 s, dan T2FSMC 2.3382 s. Sedangkan Waktu untuk kembali ke nilai yang diinginkan terhadap gangguan yang bernilai kecil untuk pengendali SMC 3.2653 s, FSMC 2.4644 s, dan T2FSMC 2.3481 s. Hal ini dikarenakan fungsi keanggotaan T2FSMC yang berupa interval sehingga mampu bekerja lebih baik pada suatu ketidakpastian dan gangguan yang berasal dari luar sistem.



Gambar 4.7: Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal *square* besar

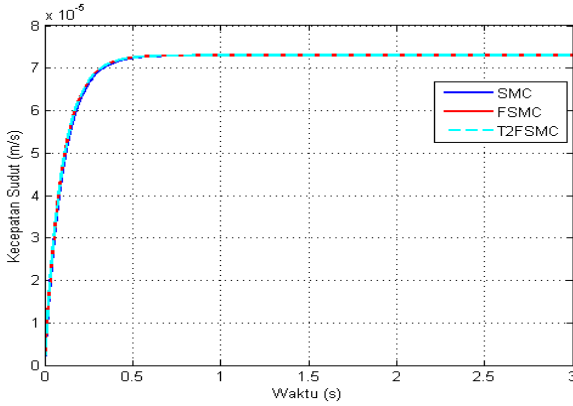


Gambar 4.8: Perbandingan respon ω dengan gangguan berupa sinyal *square* kecil

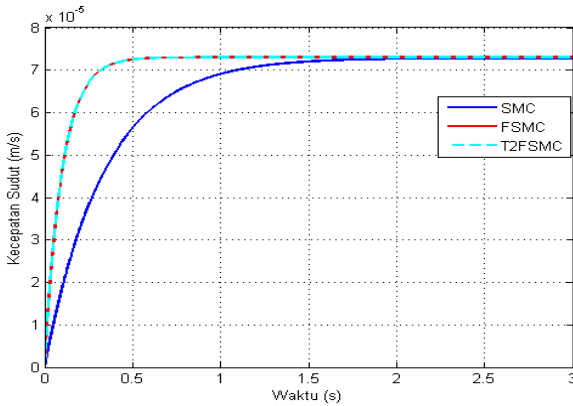
4.5 Simulasi dengan Gangguan Internal

Pada simulasi ini dilakukan pengujian masing-masing pengendali dengan mengubah parameter pada panel surya. Perubahan parameter bertujuan untuk mengetahui kepekaan sistem kendali terhadap gangguan dari dalam sistem. Parameter yang diubah adalah K_b , K_m , J , L_a , R_a dan B . Pengujian dilakukan dengan memperbesar dan memperkecil nilai parameter pada panel surya. Pada Gambar 4.9 dan Gambar 4.10 dapat dilihat bahwa pengendali T2FSMC dan pengendali FSMC bekerja lebih baik dalam mengatasi ketidakpastian parameter baik bernilai kecil maupun besar dari pada pengendali SMC. Waktu yang dibutuhkan respon menuju ke nilai yang diinginkan terhadap perubahan parameter yang bernilai kecil dari parameter awal untuk pengendali SMC 2.255 s, FSMC 0.8759 s, dan T2FSMC 0.8759 s. Sedangkan waktu yang dibutuhkan respon menuju ke nilai yang diinginkan terhadap perubahan parameter yang bernilai

besar dari parameter awal untuk pengendali SMC 0.8912 s, FSMC 0.8759 s, dan T2FSMC 0.8759 s.



Gambar 4.9: Perbandingan respon ω dengan nilai parameter lebih besar dari parameter awal



Gambar 4.10: Perbandingan respon ω dengan nilai parameter lebih kecil dari parameter awal

BAB V PENUTUP

Pada bab ini, diberikan kesimpulan yang diperoleh dari Tugas Akhir serta saran untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan pada sistem pengendali T2FSMC pada *plant* sistem penggerak panel surya didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Rancangan kendali T2FSMC yang diterapkan pada sistem penggerak panel surya bekerja sangat baik (*robust*) terhadap berbagai gangguan. Proses perancangan T2FSMC terdiri dari menentukan fungsi keanggotaan *type 2 fuzzy*, membuat *rules fuzzy* dan menyusun diagram blok dari pengendali pada sistem panel surya yang dibuat sebelumnya.
2. Performansi sistem kendali T2FSMC memiliki kelebihan yaitu mampu bekerja lebih *robust* terhadap gangguan internal maupun eksternal yang bernilai besar maupun kecil jika dibandingkan dengan pengendali FSMC dan SMC.

Adapun kekurangan pada sistem kendali T2FSMC, antara lain:

- a. Membutuhkan waktu yang cukup lama dalam proses *running* program jika dibandingkan dengan pengendali FSMC dan SMC pada saat simulasi.

- b. Membutuhkan penaksiran dalam menentukan nilai gain agar logika *fuzzy* dapat bekerja dengan lebih baik.

5.2 Saran

Adapun saran dari Tugas Akhir ini adalah :

1. Melakukan pengujian lebih lanjut rancangan pengendali T2FSMC untuk sistem-sistem lainnya untuk mengetahui lebih lanjut kinerja sistem kendali T2FSMC.
2. Pada tugas akhir ini model fuzzy MAMDANI yang dipakai dalam sistem kendali T2FSMC, maka hendaknya dikaji lebih lanjut dengan mengganti model type 2 fuzzy yang digunakan dengan model type 2 fuzzy TAKAGI SUGENO.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Iswanto, W. (2010), *Perancangan dan Simulasi Sistem Kontrol Posisi pada Panel Surya dengan Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control (FSMC)*, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- [2] Rizan, R. (2008), *Analisis dan Perancangan Sistem Pengendali pada Menggunakan Metode Fuzzy Sliding Mode Control*, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- [3] Castillo, O. 2011, *Type-2 Fuzzy Logic in Intelligent Control Applications*, Springer, German.
- [4] Mardijah, Jazedie, A., Santoso, A. dan Widodo, B. (2013), 'A New Combination Method of Fire y Algorithm and T2FSMC for Mobile Inverted Pendulum Robot', *Journal of Theoretical and Applied Information Technology* **47**, 2.
- [5] Pakpahan, S. (1988), *Kontrol Otomatik: Teori dan Penerapan*, Erlangga, Jakarta.
- [6] Ogata, K. (1995), *Teknik Kontrol Otomatik: Sistem Pengaturan Jilid I*, Erlangga, Jakarta.
- [7] Kuo, C. (1998), *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, Prenhallindo, Jakarta.
- [8] Mardijah, Abdillah, M., Jazedie, A., Santoso, A. dan Widodo, B. (2011), 'Performance Enhancemet of Inverted Pendulum System by Using Type 2

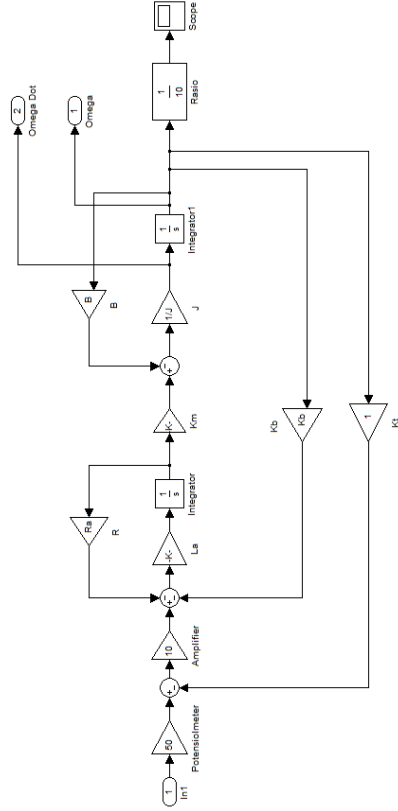
Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC)', *International Conference of Electrical Engineering and Information*.

- [9] Mardlijah, Jazedie, A., Widodo, B., Santoso, A. dan Abdillah, M. (2013), 'Design og T2FSMC Controller with Manimum Gain Scale Factor by Optimizing Membership Function Using FireFly Algorithm on Mobile Inverted Pendulum', *International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.)* **6**, 4.
- [10] Ming-Ying Hsiao, Tzuu-Hseng S. Li, J.-Z. L. C.-H. C. dan Tsai, S.-H. (2013), 'Design of interval type-2 fuzzy sliding-mode controller', *Information Sciences* **178**, 1690-1716.

LAMPIRAN A

Sistem Panel Surya

Rancangan diagram blok sistem panel surya pada Simulink Matlab diperoleh sebagai berikut.



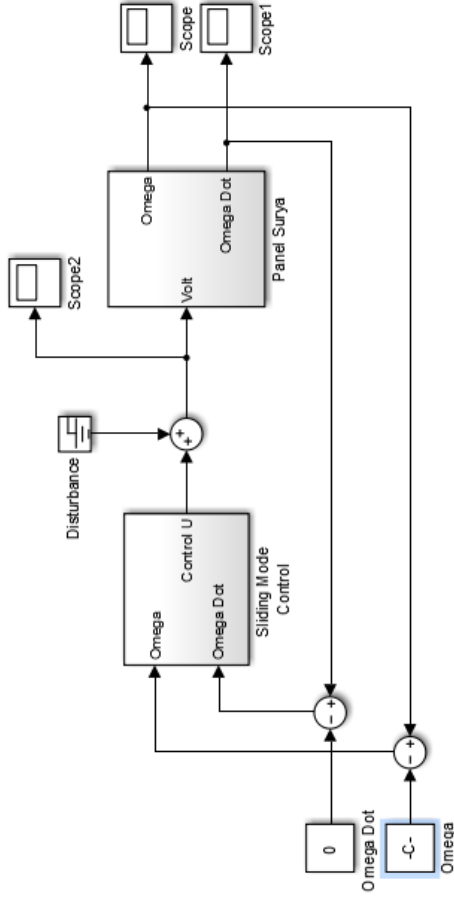
Gambar A.1: Diagram Blok Panel Surya

Halaman ini sengaja dikosongkan

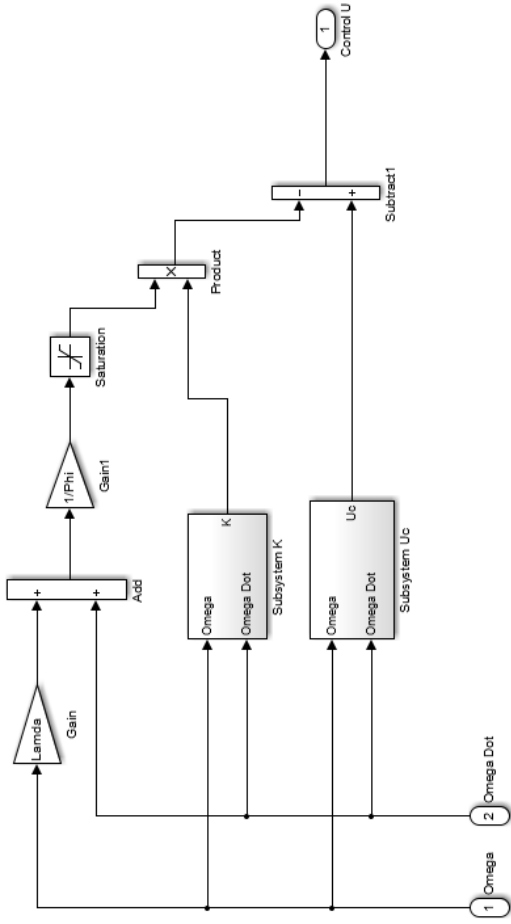
LAMPIRAN B

Rancangan Pengendali SMC

Rancangan sistem pengendali SMC (*Sliding Mode Control*) pada Simulink Matlab

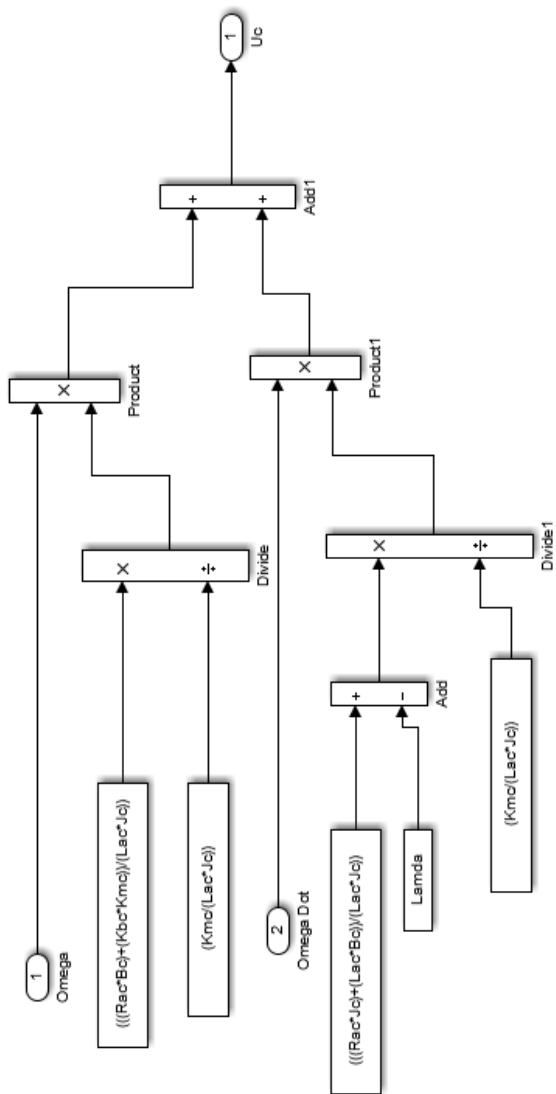


Gambar B.1: Rancangan Pengendali SMC

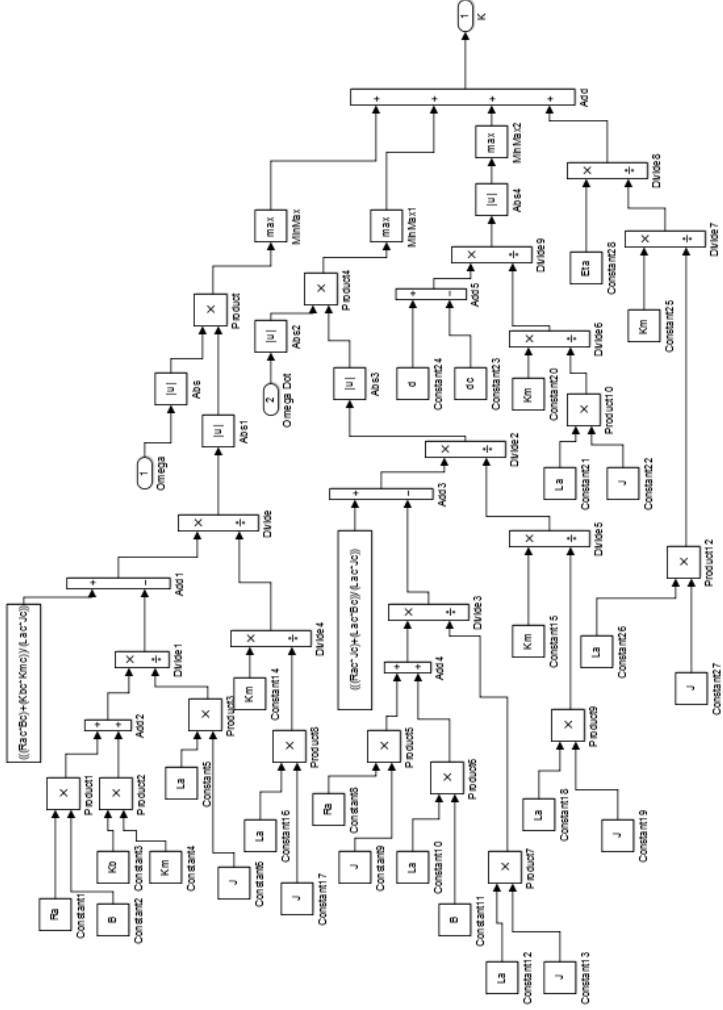


Gambar B.2: Diagram Blok SMC

Dengan *Subsystem uc* dan *K* masing-masing adalah sebagai berikut:



Gambar B.3: *Subsystem uc*

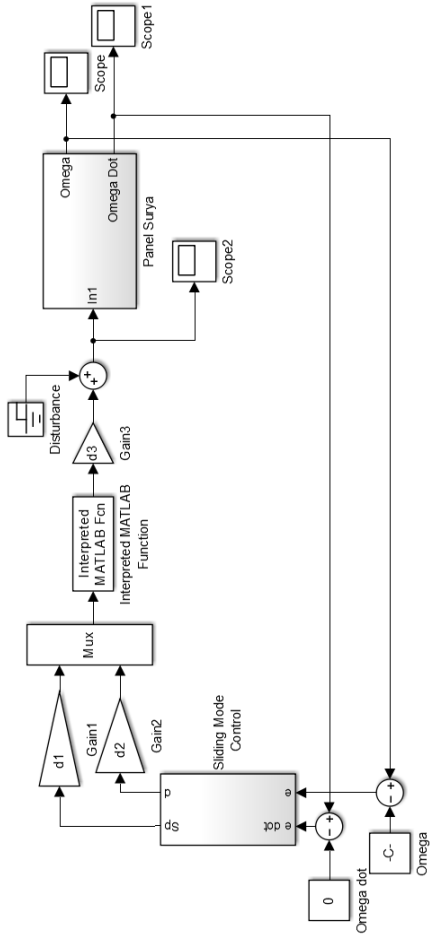


Gambar B.4: Subsystem K

LAMPIRAN C

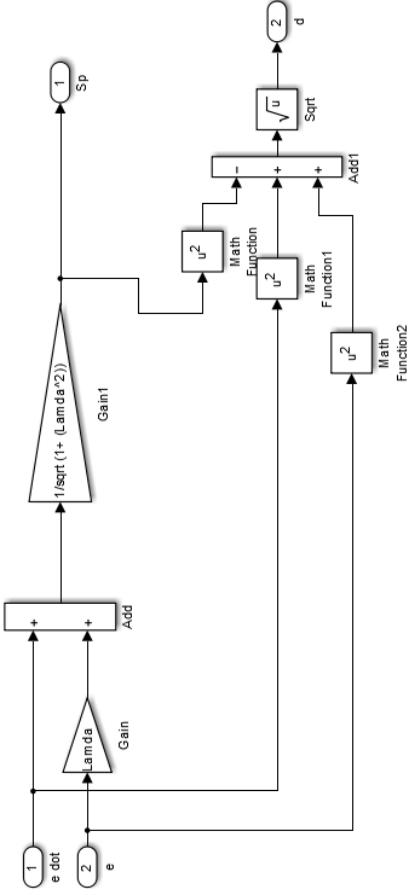
Rancangan Pengendali T2FSMC

Rancangan sistem pengendali T2FSMC (*Type 2 Fuzzy Sliding Mode Controller*) pada Simulink Matlab.



Gambar C.1: Rancangan Pengendali T2FSMC

Dimana bagian *sliding mode control* (SMC) pada rancangan di atas tersusun oleh pembentuk variabel S_p dan d sebagai berikut:



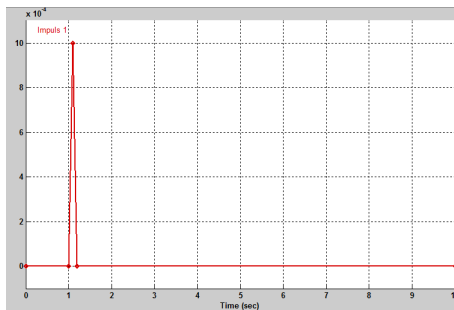
Gambar C.2: Rancangan Pengendali SMC pada T2FSMC

LAMPIRAN D

Sinyal Gangguan

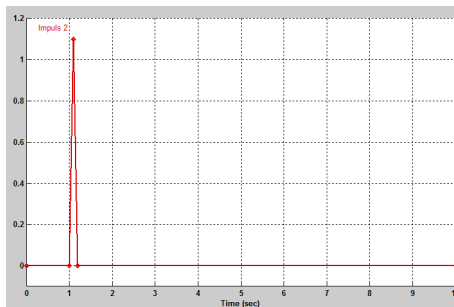
Sinyal gangguan eksternal yang digunakan pada pengujian sistem pengendali dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Sinyal *Impuls* Pada pengujian diberikan dua macam sinyal *impuls*, yaitu:
 - a. Sinyal *impuls* kecil, bernilai 0.001 Volt



Gambar D.1: Sinyal *Impuls* Kecil

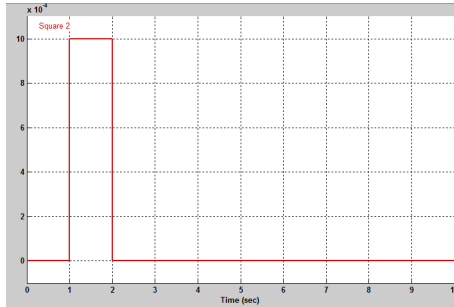
- b. Sinyal *impuls* besar, bernilai 1.1 Volt



Gambar D.2: Sinyal Impuls Besar

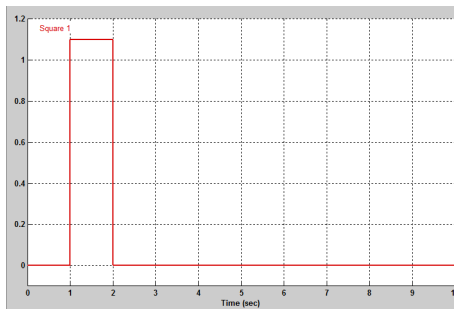
2. Sinyal *Square* Pada pengujian diberikan dua macam sinyal *square*, yaitu:

a. Sinyal *square* kecil, bernilai 0.001 Volt



Gambar D.3: Sinyal *Square* Kecil

b. Sinyal *square* besar, bernilai 1.1 Volt



Gambar D.4: Sinyal *Square* Besar

LAMPIRAN E

Biodata Penulis



Penulis bernama Yahya Efprianto, lahir di Jombang, 13 Februari 1993. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Sueb Hariono dan Sulistiani. Penulis menempuh pendidikan formal dimulai dari TK MI Ma'arif (1998-1999), SDN Tawang Sari II (1999-2005), SMP Ulul Alb@b (2005-2008), dan SMA Negeri 1 Taman (2008-2011). Setelah lulus dari SMA, pada tahun 2011 penulis melanjutkan studi ke jenjang S1 di

Jurusan Matematika ITS Surabaya melalui jalur SNMPTN dengan NRP 1211 100 113. Di Jurusan Matematika, penulis mengambil Bidang Minat Matematika Terapan. Selain aktif kuliah, penulis juga aktif berorganisasi di KM ITS melalui HIMATIKA ITS sebagai staf Depart. Pengabdian Masyarakat (2011-2012) dan Wakil Ketua HIMATIKA ITS (2012-2013).

Informasi lebih lanjut mengenai Tugas Akhir ini dapat ditunjukan ke penulis melalui email: yahyaefprianto@gmail.com