

TESIS - SM 142501

# PENGEMBANGAN TIPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC) PADA KONTROL POSISI PANEL SURYA DENGAN OPTIMASI GAIN SCALE FACTOR MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM

ZAINULLAH ZUHRI NRP 06111650010009

DOSEN PEMBIMBING: Dr. Dra. Mardlijah, M.T.

PROGRAM MAGISTER
DEPARTEMEN MATEMATIKA
FAKULTAS MATEMATIKA, KOMPUTASI, DAN SAINS DATA
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



THESIS - SM 142501

# DEVELOPMENT OF TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC) ON CONTROLLING POSITION OF SOLAR PANEL WITH GAIN SCALE FACTOR OPTIMIZATION USING FIREFLY ALGORITHM

ZAINULLAH ZUHRI NRP 06111650010009

SUPERVISOR:

Dr. Dra. Mardlijah, M.T.

MASTER PROGRAM
DEPARTMENT OF MATHEMATICS
FACULTY OF MATHEMATICS, COMPUTATION, AND SCIENCES DATA
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

# Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister Sains (M.Si.)

di

Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data Institut Teknologi Sepuluh Nopember



ZAINULLAH ZUHRI NRP. 0611 1650 010 009

Tanggal Ujian

: 17 Januari 2018

Periode Wisuda

: Maret 2018

Disetujui oleh:

Dr. Dra. Mardlijah, M.T.

NIP. 19670114 199102 2 001

(Pembimbing)

Prof. Dr. Mohammad Isa Irawan, M.T.

NIP. 19631225 198903 1 001

(Penguji)

Dr. Budi, Setiyono, S.Si., M.T.

NIP. 19720207 199702 1 001

(Penguji)

Endah RM Putri, S.Si., M.T., Ph.D.

NIP. 19761213 200212 2 001

(Penguji)

Dekan FMKSD,

Prof. Dr. Basuki Widodo, M.Sc. MATEMATIKA, KOMPUTASI, 19650605 198903 1 002



## PENGEMBANGAN TIPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC) PADA KONTROL POSISI PANEL SURYA DENGAN OPTIMASI GAIN SCALE FACTOR MENGGUNAKAN FIREFLY ALGORITHM

Nama Mahasiswa : Zainullah Zuhri NRP : 06111650010009

Pembimbing : Dr. Dra. Mardlijah, M.T.

### Abstrak

Panel surya merupakan suatu alat pengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Pada penjajak panel surya terdapat pengendali untuk mengatur gerak panel surya supaya tegak lurus terhadap matahari. Penelitian terdahulu telah berhasil mendesain pengendali Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) untuk mengontrol posisi panel surya terhadap matahari. Namun didalamnya terdapat proses trial and error dalam menentukan gain scale factor sehingga diperlukan pengembangan metode optimasi. Pada tesis ini dirancang kembali pengendali T2FSMC dengan penambahan optimasi pada gain scale factor menggunakan Firefly Algorithm. Hasil simulasi menunjukkan bahwa T2FSMC Firefly mempunyai performa yang lebih baik dari T2FSMC. T2FSMC Firefly menunjukkan penikangkatan performa pada rise time, settling time, dan integral time absolute error.

**Kata-kunci:** Panel Surya, Pengendali, Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC), Firefly Algorithm, gain scale factor



## DEVELOPMENT OF TYPE 2 FUZZY SLIDING MODE CONTROL (T2FSMC) ON CONTROLLING POSITION OF SOLAR PANEL WITH GAIN SCALE FACTOR OPTIMIZATION USING FIREFLY ALGORITHM

Name : Zainullah Zuhri NRP : 06111650010009

Supervisor : Dr. Dra. Mardlijah, M.T.

### Abstract

Solar panel is a solar energy converter to electrical energy. On solar tracker, there is a controller which sets the movement of solar panel such that solar panel is perpendicular with solar rays. Previous research had designed Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) controller to control the position of solar panel. However, there were trial and error process to determine gain scale factor so the development of optimization method is needed. This paper aimed to modify gain scale factor using Firefly algorithm to increase performance of system. The simulations showed that T2FSMC Firefly had better performance than T2FSMC. T2FSMC Firefly showed an increasing performance on rise time, settling time, and integral time absolute error.

**Key-words:** Solar Panel, Controller, Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC), Firefly Algorithm, gain scale factor

## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penelitian yang berjudul "Pengembangan Tipe 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) pada Kontrol Posisi Panel Surya Dengan Optimasi Gain Scale Factor Menggunakan Firefly Algorithm". Dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penyusunan penelitian ini tentunya tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terimaksih disampaikan kepada pihak-pihak tersebut, diantaranya:

- 1. Rektor Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 2. Dekan Fakultas Matematika, Komputasi dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 3. Kepala Departemen Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 4. Kepala Program Studi Strata-2 Departemen Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 5. Ibu Dr. Dra. Mardlijah, M.T. selaku dosen pembimbing dalam pelaksanaan penelitian ini
- 6. Bapak Prof. Dr. Mohammad Isa Irawan, M.T., Bapak Dr. Budi Setiyono, S.Si.,M.T. dan Ibu Endah RM Putri, S.Si.,M.T.,Ph.D., selaku dosen-dosen penguji dalam penelitian ini
- 7. Bapak Dr. Chairul Imron, M.I.Komp. selaku dosen wali selama menempuh program studi Strata-2
- 8. Seluruh dosen dan civitas akademika Departemen Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- 9. Orang tua yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam menyelesaikan penelitian
- 10. Teman-teman yang selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa dalam tesis ini masih terdapat banyak kekurangan, oleh karena itu penulis sangat terbuka menerima saran dan ide demi kesempurnaan penulisan selanjutnya. Penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pembaca, dan semua yang telah dikerjakan ini mendapat ridho dari Allah SWT.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

# DAFTAR ISI

HALAMA	N JUDUL	i
LEMBAR	PENGESAHAN PROPOSAL TESIS	v
ABSTRAŁ	$\langle$	vii
ABSTRAC	CT	ix
KATA PE	NGANTAR	xi
DAFTAR	ISI	xiii
DAFTAR	GAMBAR	XV
DAFTAR	TABEL	xvii
BAB 1	PENDAHULUAN	1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	
1.3	Batasan Masalah	3
1.4	Tujuan Penelitian	3
1.5	Manfaat Penelitian	3
BAB 2	KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1	Penelitian-Penelitian Terkait	5
2.2	Panel Surya	5
2.3	Sistem Penggerak Panel Surya	7
2.4	Type 2 Fuzzy Logic Control	8
	2.4.1 Membership Function	
	2.4.2 Operasi pada Membership Function Type 2	
	2.4.3 Struktur Dasar Pengendali Type 2 Fuzzy	
2.5	Sliding Mode Control	
	2.5.1 Fungsi Switching	
	2.5.2 Kondisi <i>Sliding</i>	
2.6	Pengendali T2FSMC	
2.7	Firefly Algorithm	
	2.7.1 Tarik-menarik (Attractiveness)	
	2.7.2 Jarak ( <i>Distance</i> )	
	2.7.3 Pergerakan	
	2.7.4 Konvergensi dan Perilaku Asymptotic	
	2.7.5 Optimasi Gain Scale Factor menggunakan Firefly	10
	Algorithm	16

BAB 3	METODE PENELITIAN	17
3.1	Bentuk Data	17
3.2	Tahapan Penelitian	17
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	21
4.1	Pemodelan Matematika dan Simulink Matlab	21
4.2	Perancangan Pengendali	23
	4.2.1 Pengendali T2FSMC	23
	4.2.2 Modifikasi Gain Scale Factor dengan Firefly Algorithm.	26
4.3	Simulasi dan Analisis Hasil	27
	4.3.1 Respon sistem T2FSMC	28
	4.3.2 Respon sistem T2FSMC Firefly	29
	4.3.3 Perbandingan T2FSMC dengan T2FSMC Firefly	30
	4.3.4 Respon sistem dengan perubahan $\lambda$	31
	4.3.5 Respon sistem T2FSMC Firefly dengan perubahan	
	parameter Firefly	31
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1	Kesimpulan	39
5.2	Saran	
DAFTAR	PUSTAKA	41

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram sistematik panel surya	7
Gambar 2.2	Diagram blok masukan dan keluaran panel surya	7
Gambar 2.3	Prototype panel surya	7
Gambar 2.4	Model Motor DC	8
Gambar 2.5	Membership function	10
Gambar 2.6	Operasi pada Membership function Type 2	10
Gambar 2.7	Struktur dasar pengandali Type 2 Fuzzy Logic	11
Gambar 2.8	Skema dasar pengendali T2FSMC	13
Gambar 2.9		14
Gambar 3.1	Diagram Alir rancangan T2FSMC	18
Gambar 3.2	Diagram Alir Penyempurnaan T2FSMC Dengan Firefly	
	Algorithm Untuk Menghitung Gain Scale Factor	
		19
Gambar 3.3	Diagram Blok Firefly Algorithm -T2FSMC	20
Gambar 4.1	1 00 1	23
Gambar 4.2	•	24
Gambar 4.3		25
Gambar 4.4	C CC P	25
Gambar 4.5		26
Gambar 4.6	0 00	26
Gambar 4.7	<i>3 0</i>	27
Gambar 4.8		28
Gambar 4.9	<u> </u>	28
	<b>v</b> 0	29
	<i>v v</i>	30
	• •	30
Gambar 4.13	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	1	32
Gambar 4.14	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	pertama setelah diperbesar	32
Gambar 4.15	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
		33
Gambar 4.16	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	1	34
Gambar 4.17	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	$\Theta$	34
Gambar 4.18	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	ketiga setelah diperbesar	35

Gambar 4.19	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	keempat	36
$Gambar \ 4.20$	Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter	
	keempat setelah diperbesar	36
Gambar 4.21	Perbandingan T2FSMC Firefly dan T2FSMC Firefly	
	dengan perubahan nilai parameter	37
Gambar 4.22	Perbandingan ITAE parameter	37

# DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Parameter Motor DC (Anggita, 2015)	9
Tabel 2.2	Aturan Umum Fuzzy untuk Pengendali FSMC	14
Tabel 4.1	Perbandingan Kendali T2FSMC dan T2FSMC Firefly	31



## BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Indonesia dinilai telah mengalami krisis energi listrik yang terus meningkat, krisis energi listrik di Indonesia terjadi karena pasokan listrik yang tersedia dengan jumlah pemakaian listrik dan permintaan pemasangan baru oleh pelanggan tidak seimbang. Saat ini, total daya pembangkit di seluruh Indonesia mencapai 29.705 MW, yang terdiri atas Jawa-Bali 22.302MW, sedangkan luar Jawa-Bali 7.403MW. Sebanyak 24.856MW diantaranya merupakan milik PLN dengan komposisi Jawa-Bali 19.283MW dan luar Jawa-Bali 5.573MW. Sementara itu, sisanya milik swasta. Kebutuhan listrik untuk industri dan masyarakat sebesar 30.943 MW sehingga terjadi defisit 1.238 MW atau 3.99%. Kondisi tersebut diperparah adanya susut jaringan, yang pada tahun 2007 sebesar 15.92 0.579.817 kWh atau 11,68% (Aprianti, 2009). Dari data di atas maka perlu dilakukan pencarian sumber energi alternatif yang tersedia cukup banyak dan mudah diperoleh. Berbagai usaha telah dilakuka untuk mendapatkan sumber energi alternatif ini, mulai dari pemanfaatan mikrohidro, aliran arus laut, tenaga surya dan sumber-sumber lainya.

Indonesia adalah salah satu negara tropis sehingga memungkinkan tersedianya energi matahari yang cukup banyak. Pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi alternatif bisa dimaksimalkan untuk mengatasi krisis energi ini, mengingat jumlahnya yang tidak terbatas, pemanfaatannya juga tidak menimbulkan polusi yang dapat merusak lingkungan. Menurut kementrian ESDM, energi surya di Indonesia sangat besar jumlahnya yakni sekitar 4.8 KWh/m2 atau setara dengan 112.000 GWp, namun yang sudah dimanfaatkan baru sekitar 10 MWp. Saat ini pemerintah telah mengeluarkan roadmap pemanfaatan energi surya yang menargetkan kapasitas PLTS terpasang hingga tahun 2025 adalah sebesar 0.87 GW atau sekitar 50 MWp/tahun. Jumlah ini merupakan gambaran potensi pasar yang cukup besar dalam pengembangan energi surya di masa datang (Kementrian Energi Sumber Daya Mineral, 2014). Fakta ini dapat dijadikan dasar untuk mengatasi krisis energi yang ada.

Dalam memanfaatkan potensi energi surya ada dua macam teknologi yang sudah diterapkan, yaitu energi surya photovoltaic dan energi surya termal. Energi surya termal hanya memanfaatkan energi matahari melalui energi panasnya sedangkan energi surya photovoltaic memanfaatkan sel surya dengan mengubah menjadi energi listrik. Oleh karena itu energi surya photovoltaic lebih banyak dikembangkan dibanding energi surya termal. Panel surya adalah salah satu alat yang dapat digunakan untuk mengubah sel surya menjadi energi listrik.

Masalah yang paling penting dalam merealisasikan sel surya sebagai sumber

energi alternatif adalah efisiensi. Efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara tenaga listrik yang dihasilkan oleh panel surya dibandingkan dengan jumlah energi cahaya yang diterima dari pancaran sinar matahari. (Tomson, 2008) telah merancang dan mengimplementasikan sistem penjajak matahari satu sumbu, hasil dari evaluasinya menunjukkan bahwa intensitas radiasi matahari yang diterima maksimum 20%. Kekurang efisienan panel surya tersebut adalah karena posisi sudut dari panel surya yang tidak selalu tegak lurus dengan posisi matahari sehingga menyebabkan panel surya tidak dapat menyerap energi cahaya secara maksimal.

Agar panel surya dapat mengikuti arah gerak dari matahari maka diperlukan suatu pengendali yang dapat mengontrol posisi sudut panel surya. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mardlijah (2016) mengunakan sistem kendali Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) untuk mengontrol posisi sudut panel surya. Akan tetapi hasil penelitian secara garis besar menunjukkan bahwa sistem kendali T2FSMC masih dapat diperbaiki performanya, karena penentuan gain scale factor masih menggunakan metode trial and error. Hal ini berakibat kepada gain scale factor terbaik yang didapat menyisakan peluang tidak optimal.

Mardlijah (2013) dalam penelitiannya berhasil menyempurnakan sistem kendali T2FSMC dengan menggunakan Firefly Algorithm untuk menentukan gain scale factor dan fungsi keanggotaan fuzzy-nya secara otomatis pada plant Inverted Pendulum on Cart (TWIP). Lebih jelas dalam penelitiannya menunjukkan respon sudut Robot TWIP terhadap sinyal trigger impulse memberikan hasil Firefly-T2FSMC lebih akurat dengan time settling lebih kecil dibanding dengan hasil FSMC dan T2FSMC. Penggunaan Firefly Algorithm didasarkan pada pola dan perilaku cahaya dari kawanan Firefly (kunang-kunang). Firefly algorithm memiliki banyak keunggulan dari algoritma-algoritma yang telah ditemukan sebelumnya. Selain mudah diterapkan, algoritma ini mempunyai kemampuan konvergensi yang cepat dan sangat efektif untuk menghasilkan solusi dari masalah optimasi (Farisi, dkk., 2015).

Berdasarkan pendapat-pendapat yang telah diuraikan di atas, maka peneliti tertarik untuk mengetahui lebih lanjut tentang metode Firefly Algorithm dalam mengoptimalkan gain scale factor pada sistem kendali T2FSMC untuk mengontrol posisi sudut panel surya. Pemilihan Firefly Algorithm disini diharapkan mampu untuk mengatasi kekurangan dari desain T2FSMC yang masih menggunakan trial and error dalam menentukan gain scale factor.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mengimplementasikan desain T2FSMC dengan menggunakan metode *Firefly Algorithm* dalam menentukan *gain scale factor* untuk melihat keefektifannya dan dibandingkan dengan

T2FSMC tanpa metode Firefly Algorithm?

2. Bagaimana performansi sistem kendali posisi pada panel surya dengan menggunakan sistem kendali T2FSMC menggunakan metode Firefly Algorithm dan T2FSMC tanpa menggunakan metode Firefly Algorithm dalam menentukan gain scale factor dan membandingkan hasil simulasinya?

## 1.3 Batasan Masalah

Permasalahan-permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini dibatasi sebagai berikut:

- 1. Arah gerak rotor (rotasion motor) mengikuti single axis pada prototype panel surya
- 2. Penelitian hanya sebatas simulasi
- 3. Parameter yang dipakai berasal dari penelitian sebelumnya dengan mengunakan penambahan intensitas cahaya
- 4. Kondisi cuaca selalu cerah sehingga energi matahari bisa terhitung maksimal

## 1.4 Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah yang dibuat, maka tujuan dilaksanakannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengimplementasikan sistem kendali yang telah didesain ulang T2FSMC untuk menyempurnakan optimasi gain scale factor dan meningkatkan efisiensi sistem panel surya agar dapat menghasilkan listrik yang lebih besar
- 2. Menganalisis performansi sistem kendali posisi pada panel surya dengan menggunakan sistem kendali T2FSMC dengan menggunakan metode Firefly Algorithm dalam menentukan gain scale factor dengan T2FSMC tanpa menggunakan metode Firefly Algorithm dan membandingkan dengan hasil simulasi.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya peneltian ini diharapakan dapat memberikan manfaat:

- 1. Sebagai salah satu bentuk kontribusi dalam pengembangan ilmu matematika di bidang teknologi dan industri.
- 2. Sebagai salah satu bentuk kontribusi mengenai penerapan metode *Firefly Algorithm* untuk mengoptimalkan *gain scale factor* pada sistem kendali T2FSMC untuk mengontrol posisi sudut panel surya.

## BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa penelitian terdahulu, panel surya, sistem penggerak panel surya, Type 2 Fuzzy Logic Control, Sliding Mode Control (SMC), Pengendali T2FSMC, dan Firefly Algorithm.

## 2.1 Penelitian-Penelitian Terkait

Penelitian tentang pengendali panel surya sudah pernah dilakukan sebelumnya, diantaranya adalah Perancanaan dan Simulasi Sistem Pengendali Panel Surya dengan Metode Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) (Efprianto, 2015). Dalam penelitian tersebut dilakukan perbandingan pengendali SMC, FSMC, T2FSMC untuk mengontrol panel surya. Hasil simulasi menunjukkan T2FSMC memiliki performa yang lebih baik dari SMC dan FSMC. Pada penelitan tersebut menggunakan parameter-parameter penyusun sistem yang didapat dari jurnal.

Penelitian tersebut kemudian menjadi acuan pada penelitian selanjutnya yaitu identifikasi parameter model matematika pada penggerak prototype panel surya. Pada penelitian tersebut, desain kendali pada sistem panel surya dengan parameter-parameter penyusun sistemnya didapat dari pengambilan data primer di lapangan (Prandita, 2016). Hasil penelitian menunjukkan bahwa model matematika dan parameter terhadap penggerak prototype panel surya memiliki nilai yang baik. Hal ini terbukti dari tingkat kepercayaan yang diperoleh model matematika dan parameternya dengan menggunakan Absolute Average Relative Deviation (AARD). Seluruh hasil percobaan simulasi memiliki nilai kepercayaan di atas 95% dan nilai parameter yang terbaik diperoleh pada simulasi ketiga.

Pada perkembangannya, penelitian ini (Prandita, 2016) menjadi acuan untuk penelitian yang berjudul perbandingan kontrol PID dan T2FSMC pada prototype panel surya dengan mempertimbangkan intensitas cahaya (Anggita, 2015). Pada penelitian tersebut diberlakukan pengendali T2FSMC dan PID untuk mengontrol panel surya. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini ditambahkan intensitas cahaya mengingat pengambilan data primer di lapangan hanya menggunakan sebuah prototype, sehingga membutuhkan sinar matahari yang seimbang, diharapkan perbedaan dari pengendali T2FSMC dan PID menunjukkan akurasi yang baik. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa sifat kecepatan sudut pada T2FSMC lebih baik dibandingkan dengan PID.

## 2.2 Panel Surya

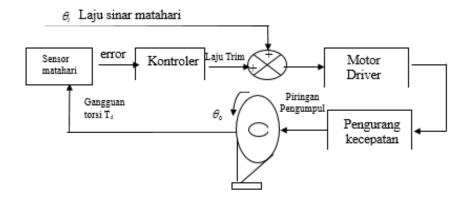
Seperti telah dinyatakan dalam bab sebelumnya bahwa penyerapan energi surya tidak bisa maksimal dikarenakan posisi dari panel surya yang tidak bergerak, karena tidak bergerak maka panel surya tidak mampu selalu menghadap kearah matahari, hanya ada disebagian waktu panel surya mampu menyerap energi matahari secara maksimal, yaitu saat tepat meghadap kearah matahari, sehingga untuk memaksimalkan energi matahari yang didapat maka perlu untuk membuat panel surya selalu bergerak. Pergerakan yang dimaksud adalah bergerak beriringan dengan gerak matahari. Posisi paling baik bagi panel surya dalam menyerap energi matahari adalah saat panel surya berposisi tegak lurus dengan posisi matahari. Dengan panel surya yang dibuat selalu tegak lurus terhadap posisi matahari maka bisa dipastikan panel surya akan selalu menghadap kepada arah datang sinar matahari. Mengikuti arah gerak matahari dalam penelitian ini adalah mengikuti kecepatan matahari bergerak dari waktu terbit sampai waktu terbenam kurang lebih 12 jam. menggerakkan panel surya supaya selalu mobile ini maka dibutuhkan sebuah Motor DC, dan untuk membuat Motor DC ini mampu memberikan kecepatan yang diinginkan yaitu sesuai dengan kecepatan pergerakan matahari maka dibutuhkan sebuah pengendali.

Dari penelitian sebelumnya sudah ada beberapa pengendali yang digunakan untuk mengontrol posisi panel surya ini, contohnya FSMC dan T2FSMC. Pengendali T2FSMC memiliki performa yang lebih baik dari pengendali FSMC, akan tetapi dalam mendisain pengendali T2FSMC terdapat proses yang menggunakan metode trial and error yaitu penentuan gain scale factor salah satunya, maka dalam penelitian ini akan dihilangkan proses trial and error dalam merencanaan pengendalinya. Metode yang digunakan adalah firefly algorithm karena pada penelitian sebelumnya tentang T2FSMC telah digunakan metode optimasi ini untuk menentukan gain scale factor pada Inverted Pendulum (TWIP). Hasil penelitiannya mampu untuk memperbaiki performa pengendali T2FSMC dalam mengatur posisi panel surya sebelum dilakukan optimasi.

Panel surya adalah alat yang mampu mengkonversikan langsung cahaya matahari menjadi suatu energi listrik atau biasa disebut *fotovoltaik*. Panel surya bisa dianalogikan sebagai alat dengan dua terminal, dimana saat kondisi gelap atau tidak cukup cahaya berfungsi sebagai dioda dan saat disinari dengan cahaya matahari dapat menghasilkan tegangan. Berikut merupakan model sederhana dari sebuah panel surya yang telah dimodelkan oleh Kuo (1998).

Prinsip kerja pada gambar diatas adalah bagaimana mengatur posisi kolektor atau piringan pengumpul agar selalu tegak lurus dengan matahari. Dan apabila matahari jatuh ke permukaan panel secara tegak lurus, maka akan didapatkan energi maksimum kurang lebih  $1000 \frac{W}{m^2}$  atau  $1 \frac{kW}{m^2}$  (Mintorogo, 2000).

 $\theta_1$  adalah masukan dari sistem berupa sudut sinar matahari dan diterima oleh dua sensor sistem panel surya. Dan pada saat sensor diarahkan ke sinar matahari, sinar cahaya dari celah akan melingkari kedua sel tersebut. Dan  $\theta_0$  adalah keluaran dari sistem berupa posisi sudut dari motor yang mana nantinya akan digunakan untuk menggerakkan kolektor atau pengumpul supaya dapat berputar mengikuti arah posisi matahari. Pemodelan dari sistem



Gambar 2.1: Diagram sistematik panel surya



Gambar 2.2: Diagram blok masukan dan keluaran panel surya

panel surya yaitu dengan cara menurunkan persamaan matematis dari bagian komponen utama seperti motor DC yang merupakan penggerak dari panel surya.

Berikut merupakan gambar dari sebuah prototype panel surya:

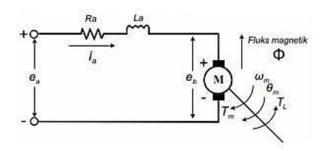


Gambar 2.3: *Prototype* panel surya Sumber: (Mardlijah, 2016)

## 2.3 Sistem Penggerak Panel Surya

Prototype panel surya pada penelitian ini digerakkan suatu sistem yaitu Motor DC. Input dari motor DC berupa listrik dan output-nya berupa

mekanik. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan identifikasi parameter pada sistem motor DC sehingga model matematika motor DC beserta parameter representatif terhadap kondisi motor DC yang digunakan sebagai penggerak pada prototype panel surva. Identifikasi dilakukan pada paremeter resistensi dan induktansi pada motor DC dengan menggunakan uji LCR meter. Selanjutnya konstanta Torsi dan konstanta emf balik menggunakan uji CNC Milling dan Avometer. Momen inersia dan koefisien gesekan viskos diperoleh dengan mengacu pada spesifikasi yang mendekati dengan motor yang sedang diuji. Skema Motor DC disajikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4: Model Motor DC

Model matematika motor DC diberikan pada persamaan berikut (Iswanto, 2010):

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

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \tag{2.2}$$

$$T_M(t) = K_m i_a(t) (2.3)$$

$$e_{a}(t) = R_{a}i_{a}(t) + L_{a}\frac{di_{a}(t)}{dt} + e_{b}(t)$$

$$e_{b}(t) = K_{b}\omega(t)$$

$$T_{M}(t) = K_{m}i_{a}(t)$$

$$T_{m}(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

$$(2.1)$$

$$(2.2)$$

$$(2.3)$$

dengan:

 $e_a(t)$ Besarnya tegangan yang diberikan pada motor (Volt)

: emf balik (Volt)  $e_b(t)$  $T_m(t)$ 

: Torsi motor  $(\frac{N}{m})$ : Tahanan kumparan jangkar (Ohm) $R_a(t)$ 

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

: Induktansi kumparan jangkar (Henry)  $L_a(t)$ : Konstanta emf balik  $(\frac{Volt}{sec}/Ampere)$ : Konstanta torsi  $(\frac{N}{m}/Ampere)$  $K_b$ 

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

Momen inersia motor  $(\frac{kg}{m^2})$ J

Koefisien gesekan viskos  $(\frac{N}{m}/rad/sec)$ 

Selanjutnya parameter motor DC yang diperoleh dari hasil identifikasi parameter ditunjukkan pada tabel sebagai berikut:

#### Type 2 Fuzzy Logic Control 2.4

Prinsip Type 2 Fuzzy Logic merupakan penerapan teori himpunan fuzzy pada bidang pengendalian sistem. Type 2 Fuzzy merupakan pengembangan

Tabel 2.1: Parameter Motor DC (Anggita, 2015)

Parameter	Motor DC
Nilai Tahanan Kumparan Jangkar $(R_a)$	18.2214 <i>Ohm</i>
Induktansi kumparan jangkar $(L_a)$	0.00866 Henry
Konstanta emf balik $(K_b)$	$0.030941093 \frac{Volt}{sec}/rad$
Kontanta torsi $(K_m)$	$0.030941093 \frac{N}{m} / Ampere$
Momen inersia $(J)$	$0.000090 \frac{kg}{m^2}$
Koefisien gesekan viskos (B)	0.000025

dari *Type 1 Fuzzy. Type 2 Fuzzy Logic* seringkali basis pengetahuan yang digunakan untuk membangun *rules* tidak menentu (Abadi, 2016). Adapun mengapa ketidakpastian *rules* dapat terjadi, yaitu:

- 1. Perbedaan dalam menentukan himpunan consequence setiap kaidah.
- 2. Perbedaan kata-kata *antecedent* dan *consequent* dari *rules* bisa mempunyai kaidah yang berbeda pada orang yang berbeda.
- 3. Adanya ganggun (noise) yang menyisipi data.

Sistem logika Type 1 fuzzy yang memiliki fungsi keanggotaan yang tegas, tidak mampu untuk mengatasi ketidakpastian ini. Sedangkan sistem logika Type 2 fuzzy memiliki fungsi keanggotaan berupa interval yang memiliki kemampuan untuk mengatasi ketidakpastian ini (Abadi, 2016). Pengertian dari interval sistem logika Type 2 fuzzy dikenalkan oleh Zadeh pada tahun 1970-an 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.

## 2.4.1 Membership Function

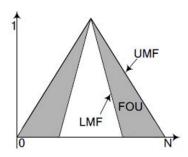
Fungsi keanggotaan Type 2 Fuzzy Logic meliputi The footprint of uncertainty (FOU), upper membership function (UMF) dan lower membership function (LMF). The footprint of uncertainty (FOU) memberikan derajat kebebasan tambahan yang memungkinkan untuk secara langsung memodelkan dan menangani ketidakpastian (Mardlijah, dkk., 2013). Type 2 fuzzy dapat juga mengurangi jumlah rules fuzzy jika dibandingkan dengan type 1 fuzzy (Mardlijah, dkk., 2011). Secara umum himpunan type 2 fuzzy dapat didefinikan sebagai berikut (Mardlijah, dkk., 2013):

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

$$(2.5)$$

Dengan  $J_x \subseteq [0,1]$  representasi dari fungsi keanggotaan utama (primary membership) dari x dan  $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$  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

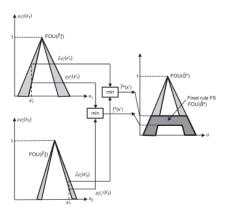
utama (primary membership), dimana FOU gabungan dari semua fungsi keanggotaan utama (Mardlijah, dkk., 2011). FOU dibatasi oleh fungsi keanggotaan sekunder (secondary membership) yang terdiri dari upper membership function (UMF) dan lower membership function (LMF) yang merupakan fungsi keanggotaan dari Type 1 Fuzzy (Mardlijah, dkk., 2013). Membership function type 2 fuzzy logic dapat dilihat pada Gambar 2.5:



Gambar 2.5: Membership function

## 2.4.2 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 FUO, yaitu UMF dan LMF (Mardlijah, dkk., 2011). Operasi Type 2 Fuzzy secara umum terdiri gabungan (union), irisan (intersection), dan komplemen (complement). Operasi gabungan (union) dan irisan (intersection) Type 2 Fuzzy dilakukan dengan operator biner minimum (min) dan maksimum (max)(Mardlijah, dkk., 2013). Operasi pada Membership function type-2 dapat dilihat pada Gambar 2.6 (Mendel, 2014):

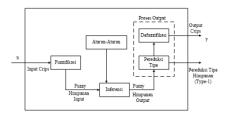


Gambar 2.6: Operasi pada Membership function Type 2

## 2.4.3 Struktur Dasar Pengendali Type 2 Fuzzy

Struktur dasar pengendali *Type 2 Fuzzy* hampir sama dengan struktur dasar *Type 1 Fuzzy*. Perberdaan 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 tipe 1 dan tipe 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 Tipe 1 fuzzy atau sebuah bilangan crisp dari defuzzifier (Abadi, 2016). Struktur Type 2 Fuzzy dapat dilihat pada Gambar 2.7: Komponen utama dapat diuraikan sebagai berikut (Abadi, 2016):



Gambar 2.7: Struktur dasar pengandali Type 2 Fuzzy Logic

- 1. Fuzzifier: proses dimana mengubah masukan (nilai real) sehingga dapat digunakan pada aturan di rulebase dari nilai crisp menjadi nilai fuzzy.
- 2. Rule-base: 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 mentranformasi type 2 fuzzy ke type 1 fuzzy.

## 2.5 Sliding Mode Control

Sliding Mode Control merupakan suatu metode pengendalian yang bekerja secara robust, baik untuk sistem linear maupun non-linear, yang memiliki ketidakpastian model ataupun ketidakpastian parameter, untuk menjaga agar sistem terkendali atau stabil, SMC memakai metode kestabilan yang mirip Lyapunov (Mardlijah, 2013).

## 2.5.1 Fungsi Switching

Pandang suatu sistem dinamis:

$$x^{(n)}(t) = f(x,t) + b(x,t) \cdot u + d(t)$$
(2.6)

dimana u control input, x merupakan vektor keadaan, f(x,t) dan b(x,t) berupa fungsi terbatas, dan dalam penelitian ini adalah berupa tegangan maksimal 12 Volt, d(t) adalah gangguan eksternal. Jika  $x_d$  adalah x yang diinginkan, maka tracking error-nya dapat dinyatakan dengan:

$$e(t) = x(t) - x_d(t) \tag{2.7}$$

Permukaan S(x,t) di dalam ruang keadaan yang disebut juga fungsi switching yang memenuhi persamaan:

$$S(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(n-1)} + (x(t) - x_d(t)) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{(n-1)} + e(t) \quad (2.8)$$

dengan  $\lambda$  suatu konstanta positif. Fungsi *switching* ini digunakan untuk menentukan besarnya nilai u agar memenuhi kondisi *sliding* (Mardlijah, 2013).

## 2.5.2 Kondisi Sliding

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

$$S(x,t) = 0 (2.9)$$

dengan  $\lambda$  suatu konstanta positif yang dipilih agar Persamaan (2.9) menjadi persamaan yang stabil. Garis ini 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 sebagai berikut:

$$0 = (\dot{e}(t) + \lambda e(t)) \tag{2.10}$$

Persamaan (2.10) menunjukkan suatu garis lurus pada bidang  $e\dot{e}$ . 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=0 (Mardlijah, 2013).

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  $control\ law$ . Pertama-tama didefinisikan plan sebagai berikut:

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) 
\dot{x}_2(t) = ax_2(t) + u(t)$$
(2.11)

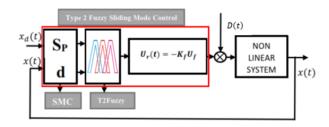
Dari plant tersebut diperoleh Control law sebagai berikut

$$u = -Kx_1(t) \tag{2.12}$$

Selanjutnya dengan mensubstitusikan control law ke dalam plant diperoleh nilai K, dengan mengetahui nilai K dapat ditentukan  $\lambda$  yang memenuhi persamaan sliding (Sami, 2017).

## 2.6 Pengendali T2FSMC

Seperti yang sudah dibahas sebelumnya, pengendali T2FSMC merupakan pengembangan dari pengendali FSMC. Yang mana FSMC adalah gabungan dari SMC dan FLC. Skema pengendalian T2FSMC hampir sama dengan skema pengendalian T1FSMC dimana masukan di IT2FLC adalah dua variabel



Gambar 2.8: Skema dasar pengendali T2FSMC

 $(S_p \text{ dan } d)$  yang ditentukan sebelumnya melalui pengendali SMC. Berikut merupakan skema dasar pengendali T2FSMC (Kuo, 1998):

Cara kerja dari T2FSMC yaitu dengan menginputkan vektor keadaan (x(t)) dan vektor keadaan yang diinginkan  $(x_d(t))$  ke pengendali SMC. Pada masalah ini, vector keadaan yang dimaksud adalah kecepatan sudut  $(\omega(t))$  dan vektor keadan yang diinginkan adalah kecepatan sudut yang dinginkan  $(\omega_d(t))$ . Kemudian hasil keluaran SMC tersebut dimasukkan ke dalam aturan Type 2 Fuzzy sehingga didapatkan sebuah kontrol  $(U_r(t))$ . Kontrol yang dihasilkan akan digunakan pada prototype dan akan menghasilkan error setelah diberi gangguan D(t). Error akan diolah kembali pada T2FSMC dan berulang terus hingga mendapatkan hasil yang optimal atau error mengecil.

Pengendali T2FSMC bertujuan memperbaiki performansi dari sistem SMC. T2FSMC memiliki keuntungan yaitu mengurangi jumlah *rules* secara dramatis dikarenakan T2FSMC mendapatkan warisan sifat dari SMC dan FLC. Pengendali tersebut juga mewarisi sifat dari FLC untuk menangani ketidakpastian dan gangguan.

Skema pengendali T2FSMC dan skema pengendali FSMC berbeda pada fuzzy yang digunakan. T2FSMC menggunakan  $type\ 2\ fuzzy\ logic$  sehingga fungsi keanggotaan menggunakan  $type\ 2\ fuzzy$ . Perancangan T2FSMC menggunakan permukaan sliding sama seperti SMC. Untuk menentukan nilai u yang akan diinputkan pada plant maka diperlukan fungsi switching. Nilai  $input\ u$  didapatkan dari aturan fuzzy seperti berikut.

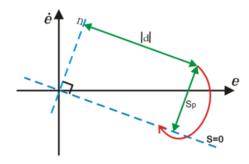
$$R^i: \mathbf{jika} S_p = \tilde{S}^i \operatorname{dan} d = \tilde{D}^i \mathbf{maka} u = \tilde{U}^i, i = 1, \cdots, M$$

 $R^i$  adalah 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  $S_p$  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 yang dapat dilihat pada gambar dibawah dimana e adalah error sistem dan  $\dot{e}$  adalah perubahan dari error (Kuo, 1998):

Nilai  $S_p$  dan d dapat dicari dengan persamaan berikut (Kuo, 1998):

$$S_p = \frac{|\dot{e} + \lambda e|}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \tag{2.13}$$

$$d = \sqrt{e^2 + \dot{e}^2 - S_p^2} \tag{2.14}$$



Gambar 2.9: Interpretasi grafis  $S_p$  dan d

dimana  $S_p$  merupakan jarak antara permukaan sliding dengan vektor keadaan (yang merupakan pasangan terurut dari  $(\dot{e},e)$ ) dan d merupakan jarak antara vektor keadaan dan vektor normal terhadap permukaan sliding. Nilai  $S_p$  dan d adalah output dari SMC yang akan mejadi input untuk type 2 fuzzy logic, dimana fungsi keanggotaan dari  $S_p$  dan d menggunakan type 2 fuzzy. Dari rulebase yang dibangun antara  $S_p$  dan d akan didapat nilai  $U_f$  yang dikalikan dengan gain scale factor  $(K_f)$  sehingga didapat kontrol  $U_r(t) \cdot U_r(t)$  dengan ditambahkan gangguan D(t) akan menjadi input kepada plant (motor DC) untuk menggerakkan prototype.

Pada T2FSMC pengendali diperlukan aturan fuzzy yaitu akan menggunakan aturan fuzzy FSMC. Dapat dilihat aturan fuzzy pada pengendali FSMC sebagai berikut (Mardlijah, dkk., 2013):

Tabel 2.2: Aturan	Umum Fuzzy	r untuk Pengene	dali FSMC
-------------------	------------	-----------------	-----------

		$S_p$							
		NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
d	В	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

dimana NB = negative big, NM = negative medium, NS = negative small, NZ = negative zero, PB = positive big, PM = positive medium, PS = positive small, PZ = positive zero. Aturan tersebut digunakan untuk menentukan range membership function  $S_p$  dan d.

## 2.7 Firefly Algorithm

Firefly Algorithm adalah sebuah algoritma metaheuristik terinspirasi oleh alam, yaitu optimasi yang didasarkan pada perilaku sosial kunang-kunang yang berkedip yang terdapat pada daerah tropis. Algoritma ini dikembangkan oleh Dr. Xin-She Yang di Cambridge University pada tahun 2007, dan didasarkan pada perilaku kawanan (swarm) seperti ikan, serangga, atau burung di alam. Secara khusus, meskipun Firefly Algorithm memiliki

banyak kesamaan dengan algoritma lain yang didasarkan pada kecerdasan berkelompok (swarm intelligence) seperti Particle Swarm Optimization, Artificial Bee Colony Optimization dan Bacterial Foraging Algorithms, memang jauh lebih sederhana baik dalam konsep dan implementasi. Selanjutnya, menurut bibliografi terakhir, algoritma ini sangat efisien serta dapat mengungguli algoritma konvensional lain, seperti Genetic Algorithm untuk memecahkan banyak masalah optimasi, sebuah fakta yang telah dibenarkan dalam penelitian terbaru, dimana statistik kinerja Firefly Algorithm diukur terhadap algoritma optimasi terkenal yang lain menggunakan berbagai fungsi uji stokastik standar. Keuntungan utamanya adalah fakta bahwa ia menggunakan bilangan acak real, dan didasarkan pada komunikasi global antar kumpulan partikel, dalam hal ini adalah kunang-kunang. Firefly Algorithm memiliki tiga aturan ideal tertentu yang didasarkan pada beberapa karakteristik utama kunang-kunang yang berkedip di alam sebagaimana berikut (Yang, 2009):

- 1. Semua kunang-kunang adalah *unisex*, dan kunang-kunang tersebut akan bergerak menuju yang lebih menarik dan cerah
- 2. Tingkat tarik-menarik (attractiveness) kunang-kunang sebanding dengan kecerahan yang menurun sebagai jarak dari kunang-kunang yang lain dengan kecerahan yang meningkat karena fakta bahwa udara menyerap cahaya. Jika tidak ada kunang-kunang terang atau lebih menarik maka kunang-kunang tersebut akan bergerak secara acak
- 3. Kecerahan atau intensitas cahaya kunang-kunang ditentukan oleh nilai dari fungsi tujuan dari masalah yang diberikan.

## 2.7.1 Tarik-menarik (Attractiveness)

Dalam Firefly Algorithm, bentuk fungsi tarik-menarik kunang-kunang adalah fungsi menurun secara monoton sebagaimana berikut (Yuan-bin, 2013):

$$\beta = \beta_{min} + (\beta_0 + \beta_{min})e^{-\gamma r^2} \tag{2.15}$$

dengan r adalah jarak antara dua kunang-kunang,  $\beta_0$  adalah daya tarik awal pada r=0, dan  $\gamma$  adalah koefisien absorbsi yang mengontrol penurunan intensitas cahaya.

## 2.7.2 Jarak (Distance)

Jarak antara dua kunang-kunang i dan j, pada posisi  $x_i$  dan  $x_j$ , masing-masing, dapat didefinisikan sebagai *Cartesian* atau *Euclidean distance* sebagai berikut (Yang, 2009):

$$r_{ij} = ||x_i - x_j|| = \sqrt{\sum_{k=1}^{d} (x_{i,k} - x_{j,k})^2}$$
 (2.16)

di mana  $x_{i,k}$  adalah komponen ke-k dari koordinat spasial  $x_i$  dari kunang-kunang ke-i dan d adalah jumlah dimensi, misalkan untuk d=2, maka didapatkan

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{i,1} - x_{j,1})^2 + (x_{i,2} - x_{j,2})^2}$$

$$r_{ij}^2 = (x_{i,1} - x_{j,1})^2 + (x_{i,2} - x_{j,2})^2$$
(2.17)

## 2.7.3 Pergerakan

Pergerakan kunang-kunang ke-i yang tertarik pada kunang-kunang j yang lebih menarik (lebih cerah) diberikan oleh persamaan berikut (Soto, 2017):

$$x_i = x_i + \beta(x_i - x_i) + \alpha(rand - 1/2)$$
 (2.18)

Koefisien  $\alpha$  adalah parameter pengacakan ditentukan oleh rasio permasalahan,sedangkan rand adalah pembangkit bilangan acak terdistribusi merata dalam suatu ruang.

## 2.7.4 Konvergensi dan Perilaku Asymptotic

Konvergensi dari algoritma dicapai untuk setiap sejumlah besar kunang-kunang (n) jika n >> m, dengan m adalah jumlah lokal optima dalam masalah optimisasi. Dalam hal ini, n adalah lokasi awal kunang-kunang yang terdistribusi secara merata di seluruh ruang pencarian. Konvergensi dari algoritma ke semua lokal dan global optima dicapai melalui iterasi dari algoritma yang berlangsung dengan membandingkan solusi terbaik dari setiap iterasi dengan optimal tersebut. Dalam praktiknya, algoritma mencapai konvergen sangat cepat dalam waktu kurang dari 80 iterasi dan kurang dari 50 kunang-kunang, seperti yang ditunjukkan dalam beberapa makalah penelitian menggunakan beberapa fungsi uji standar.

## 2.7.5 Optimasi Gain Scale Factor menggunakan Firefly Algorithm

Untuk mengoptimasi gain scale factor kita harus menentukan kunang-kunang yang akan digunakan, dalam kasus ini kunang-kunang didefinisikan sebagai kombinasi dari gain scale factor ( $K_s$  dan  $K_f$ ). Input dari Firefly Algorithm adalah kombinasi 3 gain scale factor yang akan menghasilakan nilai ITAE (the integral of time multiply by absolute error). ITAE mengintegrasikan kesalahan mutlak dikalikan dengan waktu dari waktu ke waktu, dalam persamaan matematika ITAE dapat didefinisikan berikut:

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt \tag{2.19}$$

ITAE yang telah didapat akan dibandingkan dengan ITAE dari kombinasi  $(K_s \text{ dan } K_f)$  lainnya, sehingga didapat ITAE yang lebih kecil dari perbandingan tersebut. ITAE yang terkecil akan lanjut kepada proses selanjutnya, yaitu penentuan posisi kunang-kunang oleh Persamaan (2.18). Output yang dihasilkan adalah kombinasi  $(K_s \text{ dan } K_f)$  yang menyebabkan ITAE terkecil.

# BAB 3 METODE PENELITIAN

Bab ini dibahas tempat, data, tahapan, dan jadwal rancangan penelitian tentang sistem kendali penjajak matahari menggunakan T2FSMC dengan optimasi gain scale factor dengan metode Firefly Algorithm.

## 3.1 Bentuk Data

Berikut disajikan data yang akan digunakan dalam penelitian. Data terdiri dari sebuah data, yaitu:

1. Data Sekunder berupa Data parameter mekanik dan elektrik yang terdiri dari Nilai Tahanan Kumparan  $(R_a)$ , induksi kumparan  $(L_a)$ , konstanta emf balik  $(K_b)$ , konstanta torsi  $(K_m)$ , momen inersia (J), dan koefisien gesekan viskos (B)

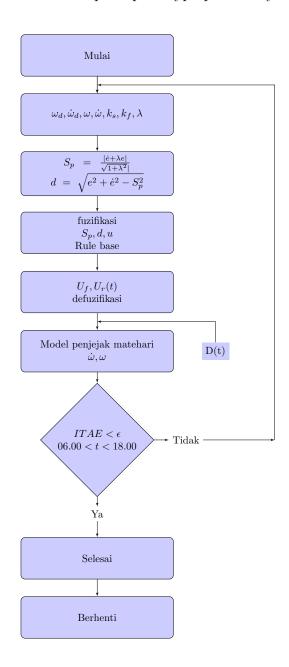
## 3.2 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian adalah:

- 1. Studi Literatur: Pada tahap ini penulis akan melakukan studi literatur pada bidang yang berkaitan dengan penelitian demi terselesaikannya penelitian. Beberapa ilmu yang terkait dengan penelitian ini adalah pengendalian T2FSMC dengan Optimasi gain scale factor menggunakan metode Firefly Algorithm.
- 2. Pengumpulan data: Pada tahap ini akan dilakukan pengambilan data langsung dari prototype panel surya yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya menggunakan penambahan parameter intensitas cahaya. Data yang digunakan adalah data sekunder.
- 3. Desain kendali T2FSMC dengan Optimasi gain scale factor menggunakan Firefly Algorithm: Pada tahap ini penulis mendesain sebuah pengendali T2FSMC untuk mengoptimalkan performansi panel surya. Pengoptimalan dilakukan dengan mencari nilai gain scale factor yang awalnya ditentukan dengan motode trial and error sebagai faktor pengali, didalam sistem terdapat dua gain scale factor untuk faktor pengali dari output Sliding Mode Control dan satu gain scale factor untuk faktor pengali dari output Type 2 Fuzzy. Berikut tahapan dari perancangan pengendali:

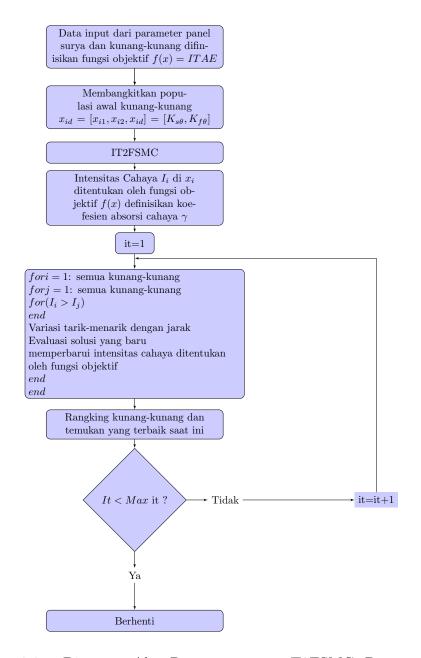
## (a) T2FSMC

Tahap perancangan pengendali panel surya ini akan dirancang sistem pengendali dengan metode SMC dan menentukan fungsi keanggotaan himpunan type 2 fuzzy dari hasil keluaran SMC, membuat aturan type 2 fuzzy untuk menentukan control *input* dari rancangan SMC sebelumnya. Plant yang digunakan adalah model matematika pada prototype panel surya.



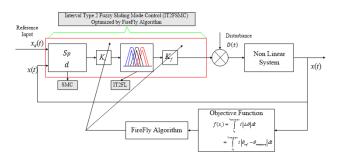
Gambar 3.1: Diagram Alir rancangan T2FSMC

(b) Optimasi gain scale factor menggunakan Firefly Algorithm
Tahap Optimasi disini dilakukan untuk memperbarui metode yang awalnya menggunakan trial and error. Komponen yang dioptimasi adalah gain scale factor pada pengendali T2FSMC pada prototype panel surya. Desain T2FSMC dengan Optimasi gain scale factor menggunakan Firefly Algorithm dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2: Diagram Alir Penyempurnaan T2FSMC Dengan Firefly Algorithm Untuk Menghitung  $Gain\ Scale\ Factor\ Secara\ Otomatis$ 

4. Simulasi: Pada tahap ini akan dibandingkan antara pengendali T2FSMC tanpa menggunakan *Firefly Algorithm* dan pengendali T2FSMC menggunakan *Firefly Algorithm* dengan menggunakan Matlab dan Simulink Matlab 7.10.0(R2010a) pada laptop HP ProoBook 434 RAM 8GB yang nantinya digunakan sebagai acuan pada anailisis performansi panel surya.



Gambar 3.3: Diagram Blok Firefly Algorithm -T2FSMC

- 5. Hasil dan Anasis: Pada tahap ini dilakukan suatu analisa yaitu membandingkan hasil simulasi dari pengendali T2FSMC tanpa menggunakan Firefly Algorithm dan pengendali T2FSMC menggunakan Firefly Algorithm dengan menggunakan Simulink Matlab.
- 6. Kesimpulan: Tahap ini merupakan tahap terakhir, yaitu penarikan kesimpulan terhadap analisis perbandingan dua pengendali yaitu T2FSMC tanpa menggunakan Firefly Algorithm dan pengendali T2FSMC menggunakan Firefly Algorithm, dimana dalam tahap ini diharapkan diperoleh sebuah metode optimasi untuk performansi panel surya yang lebih baik.
- 7. Publikasi: Pada tahap ini, dilakukan publikasi penelitian dengan berpartisipasi pada seminar internasional. Kegiatan ini bertujuan untuk menunjukkan hasil penelitian yang telah dilakukan sebagai bahan rujukan kajian untuk melakukan penelitian selanjutnya
- 8. Penyusunan Laporan Penelitian: Pada tahap ini dilakukan penyusunan laporan yang sistematis. Hal ini dilakukan agar pembaca dapat dengan mudah memahami penelitian yang dilakukan.

### BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dijelaskan tentang perancangan sistem kendali pada panel surya, dengan keluaran yang dikendalikan adalah posisi sudut panel surya. Pada tahap pertama dilakukan pemodelan matematika motor penggerak panel surya. Selanjutnya model akan dikendalikan dengan T2FSMC dan T2FSMC Firefly dengan mengontrol kecepatan sudut. Hasil rancangan tersebut akan diimplementasikan pada Simulink Matlab pada masing-masing pengendali. Langkah terkahir adalah membandingkan kedua hasil simulasi sistem pengendali.

#### 4.1 Pemodelan Matematika dan Simulink Matlab

Pemodelan matematika penggerak motor panel surya dilakukan dengan cara menggunakan parameter-parameter pada motor DC. Pertama dengan mensubstitusi parameter motor DC persamaan 2.3 ke persamaan 2.4, sehingga diperoleh:

$$T_{m}(t) = K_{m}i_{a}(t)$$

$$T_{m}(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

$$J\frac{d\omega(t)}{dt} = T_{m}(t) - B\omega(t)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{I}(K_{m}i_{a}(t) - B\omega(t))$$
(4.1)

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan 2.2 kepada persamaan 2.1, sehingga didapat :

$$e_{b}(t) = K_{b}\omega(t)$$

$$e_{a}(t) = R_{a}i_{a}(t) + L_{a}\frac{di_{a}(t)}{dt} + e_{b}(t)$$

$$L_{a}\frac{di_{a}(t)}{dt} = e_{a}(t) - R_{a}i_{a}(t) - K_{b}\omega(t)$$

$$\frac{di_{a}(t)}{dt} = \frac{1}{L_{a}}(e_{a}(t) - R_{a}i_{a}(t) - K_{b}\omega(t))$$

$$(4.2)$$

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan 2.3 kepada persamaan 2.4, sehingga didapat :

$$K_{m}i_{a}(t) = J\frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$

$$i_{a} = \frac{J}{K_{m}}\frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{B\omega(t)}{K_{m}}$$
(4.3)

Kemudian dengan mensubstitusi persamaan 2.2 dan 4.3 ke persamaan 2.1, sehingga didapat :

$$e_{a}(t) = R_{a} \left( \frac{J}{K_{m}} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{B\omega(t)}{K_{m}} \right) + L_{a} \frac{di_{a}(t)}{dt} + K_{b}\omega_{m}(t)$$

$$= \frac{R_{a}J}{K_{m}} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{R_{a}B\omega(t)}{K_{m}} + \frac{L_{a}J}{K_{m}} \frac{d^{2}\omega(t)}{d^{2}t} + \frac{L_{a}B}{K_{m}} \frac{d\omega(t)}{dt} + K_{b}\omega_{m}(t)$$

$$= \frac{L_{a}J}{K_{m}} \frac{d^{2}\omega(t)}{d^{2}t} + \left( \frac{R_{a}J}{K_{m}} + \frac{L_{a}B}{K_{m}} \right) \frac{d\omega(t)}{dt} + \left( \frac{R_{a}B}{K_{m}} + K_{b} \right) \omega(t) \quad (4.4)$$

Persamaan 4.4 dapat ditulis kembali menjadi:

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

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

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

$$\ddot{\omega} = \frac{K_m}{L_a J} e_a(t) - \left(\frac{R_a B + K_b K_m}{L_a J}\right) \omega - \left(\frac{R_a J + L_a B}{L_a J}\right) \dot{\omega} \quad (4.5)$$

Kemudian dengan memisalkan:

$$u = e_a(t)$$

$$C = \frac{K_m}{L_a J}$$

$$D_1 = \frac{R_a B + K_b K m}{L_a J}$$

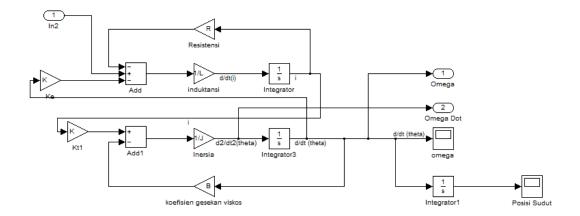
$$D_2 = \frac{R_a J + L_a B}{L_a J}$$

Kemudian dengan menambahkan gangguan (D) maka persamaan 4.5 menjadi :

$$\ddot{\omega} = Cu - D_1\omega - D_2\dot{\omega} + D(t) \tag{4.6}$$

untuk membuat motor mampu bergerak sesuai dengan kecepatan gerak matahari, maka perlu ditentukan tengangan yang digunakan oleh motor sehingga motor mempunyai kecepatan sudut yang sesuai dengan kecepatan gerak matehari. Dalam persamaan 5.6,  $e_a(t)$  yang merupakan masukan sistem berupa tegangan (Volt) dimisalkan u, sedangkan C,  $D_1$ , dan  $D_2$  merupakan konstanta, dan D(t) adalah gangguan. Untuk mendapatkan nilai dari konstanta maupun parameter-parameter, data didapatkan dengan mengambil langsung dari prototype panel surya sesuai dengan Tabel 2.1.

Kemudian model matematika pada persamaan 4.1 dan 4.2 digunakan untuk diimplementasikan dalam bentuk diagram blok menggunakan Simulink Matlab. Berikut merupakan desain simulink dari model plant panel surya:



Gambar 4.1: Plant sistem penggerak panel surya

#### 4.2 Perancangan Pengendali

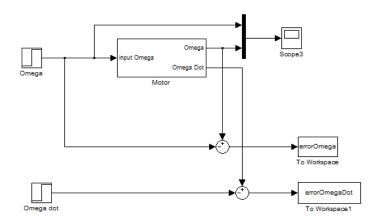
Pada sub bab ini akan dirancang pengendali T2FSMC yang akan dimodifikasi dengan Firefly Algorithm untuk menentukan gain scala factor dengan optimal.

#### 4.2.1 Pengendali T2FSMC

Pada bagian ini akan dirancang pengendali T2FSMC type 2 fuzzy logic control. Untuk menghasilkan sinyal kontrol u pada T2FSMC diperlukan variabel input  $S_p$  dan d dari Sliding Mode Control Sehingga diperlukan fungsi switching yang sama dengan pengendali SMC dengan menggunakan persamaan dengan  $e = \omega - \omega_d$  dan  $\dot{e} = \dot{\omega} - \dot{\omega}_d$ , dengan e adalah error dari hasil keluaran  $\omega$  dan nilai yang diharapkan  $\omega_d$ .

 $\omega_d$  merupakan kecepatan sudut yang diinginkan atau disebut setpoint. Dengan  $\omega_d = 0.000073$  didapatkan dari hasil pembagian jarak yang ditempuh oleh panel dengan waktu tempuhnya, dengan asumsi bahwa panel mampu bergerak sebesar  $180^0$  dengan waktu tempuh 12 jam. Namun untuk memperoleh nilai dari setpoint maka jarak tempuh harus dikonversikan pada satuan radian dan waktu dikonversikan pada satuan detik. Maka  $180^0$  adalah  $\pi$  atau 3,14 dibagi dengan 43.200 detik. Sehingga didapatkan  $7.3x10^{-5}$ .

Loop terbuka menggunakan nilai masukan untuk menjalankan sistem sesuai dengan waktu yang diberikan. Gambar 4.2 menghasilkan kecepatan sudut yang tidak dikontrol. Begitu pula dengan perubahan kecepatan sudut juga tidak dikontrol. Namun karena kecepatan sudut bernilai konstan, maka percepatan



Gambar 4.2: Plan Loop Terbuka

sudut adalah 0. Nilai error kecepatan sudut dan error yang percepatan sudut yang terukur adalah:

$$e \in [7.3 \times 10^{-5}, 1.5 \times 10^{-3}]$$
  
 $\dot{e} \in [8.7173 \times 10^{-6}, 1.4 \times 10^{-3}]$ 

Setelah diperoleh interval e dan  $\dot{e}$  maka selanjutnya mencari nilai maksimum dari  $S_p$  dan d dengan menggunakan Persamaan 2.13 dan 2.14 didapatkan :

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

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

$$= \frac{|1.4x10^{-3} + 10(1.5x10^{-3})|}{\sqrt{1 + 10^2}} = 1.6x10^{-3}$$

$$d = \sqrt{e^2 + \dot{e}^2 - S_p^2}$$

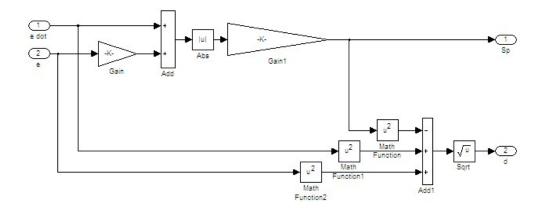
$$= \sqrt{(1.5x10^{-3})^2 + (1.4x10^{-3})^2 - (1.6x10^{-3})^2}$$

$$= 1.3x10^{-3}$$

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

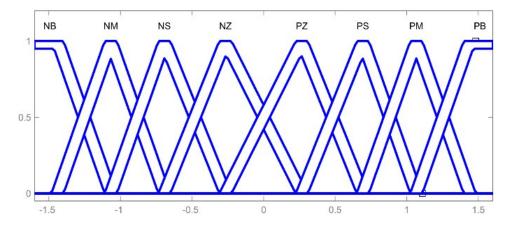
$$S_p \in [-1.6 \times 10^{-3}, 1.6 \times 10^{-3}]$$
  
 $d \in [0, 1.5 \times 10^{-3}]$ 

Desain simulink untuk menentukan nilai  $S_p$  dan d ditunjukkan pada gambar 4.2 dengan menggunakan persamaan 2.13 dan 2.14.

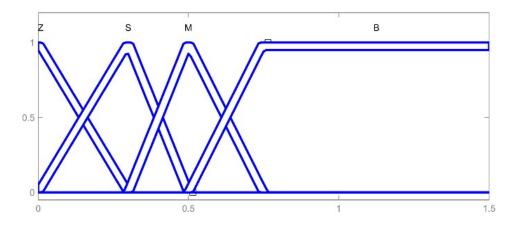


Gambar 4.3: Plan penghitungan  ${\cal S}_p$ dan d

Setelah memperoleh interval  $S_p$  dan d selanjutnya merancang fungsi keanggotaan fuzzy dengan menggeser interval secara trial dan error. Dengan mempertimbangkan interval  $S_p$  dan d pada tahap sebelumnya, maka diperoleh fungsi keanggotaan  $S_p$  dan d sebagai berikut:

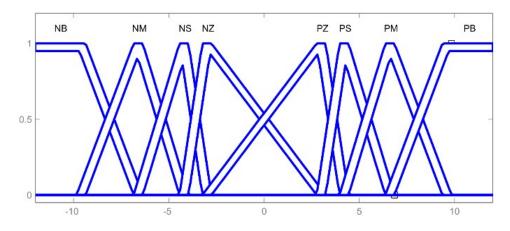


Gambar 4.4: Fungsi keanggotaan  $\mathcal{S}_p$ 



Gambar 4.5: Fungsi keanggotaan d

Fungsi keanggotaan  $S_p$  dan d digunakan sebagai masukan dari kontrol T2FSMC, selanjutnya Nilai control input u secara umum ditentukan dengan menyesuaikan kemampuan dari motor DC. Pada Tesis ini fungsi keanggotaan nilai u dirancang sedemikian sehingga diperoleh seperti pada gambar berikut



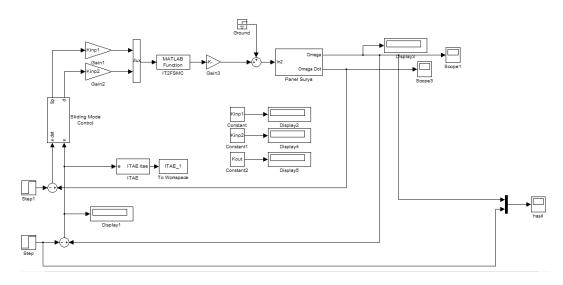
Gambar 4.6: Fungsi keanggotaan u

Selanjutnya setelah mendapatkan fungsi keanggotaan pada T2FSMC akan dilakukan perancangan kendali T2FSMC dengan menggunakan software MATLAB. Pada penelitian ini yang menjadi fokus adalah menentukan nilai gain1, gain2, dan gain 3 yang awalnya dilakukan secara trial dan error. sekarang dilakukan dengan metode optimasi sampai menemukan sinyal kontrol yang mempunyai nilai error yang kecil. Metode optimasi yang digunakan adalah Firefly Algorithm.

#### 4.2.2 Modifikasi Gain Scale Factor dengan Firefly Algorithm

Perancangan desain T2FSMC dengan modifikasi gain scale factor menggunakan metode optimasi Firefly Agorithm mempunyai konsep dasar membandingkan semua kemungkinan gain yang telah dibatasi. Ditinjau dari error, batas-batas tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian sebelumnya. untuk parameter  $\alpha$ ,  $\beta_{min}$ ,  $\gamma$  Firefly Agorithm mengikuti dari

penelitian sebelmnya yaitu  $\alpha = 0.25$ ,  $\beta_{min} = 0.20$ ,  $\gamma = 1$  karena kesamaan pengendali yang digunakan yaitu T2FSMC. Performansi setiap kombinasi gain yang selanjutnya disebut kunang-kunang diukur dengan nilai integral time absolute error. Performansi ITAE tersebut menjadi cahaya kunang-kunang sebagai nilai attractiveness dalam agoritma. ITAE selanjutnya digunakan pada T2FSMC dan ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 4.7: Desain T2FSMC Firefly

Gambar 4.7 menunjukkan performansi kunang-kunang diukur dari error antara kecepatan sudut masukan dan kecepatan sudut keluaran. Nilai gain yang dioptimasi gain1, gain2, dan gain3 masing-masing adalah pengali dari  $S_p$ , d, dan nilai keluaran IT2FSMC. Pada penelitian sebelumnya nilai gain yang digunakan adalah sebagai berikut gain1=  $1 \times 10^{-7}$ , gain2=  $5 \times 10^{-5}$ , dan gain3=  $2.2945 \times 10^{-2}$ , dengan performasi ITAE=9.83330298068067  $\times 10^{-5}$ . Oleh sebab itu, nilai gain yang baru dapat di batasi sebagai berikut:

$$9 \times 10^{-8} \le gain1 \le 1.1 \times 10^{-7}$$

$$4.9 \times 10^{-5} \le gain2 \le 5.1 \times 10^{-5}$$

$$2 \times 10^{-2} < gain3 < 2.5 \times 10^{-2}$$

$$(4.7)$$

#### 4.3 Simulasi dan Analisis Hasil

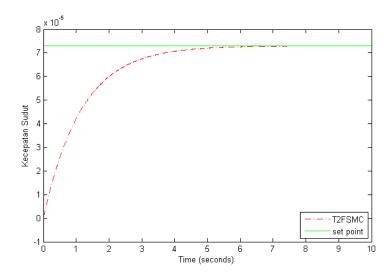
Pada subbab ini akan dilakukan perbandingan hasil kendali T2FSMC dan kendali T2FSMC Firefly dengan menggunakan Simulink MATLAB. Simulasi yang dilakukan akan berhenti pada detik ke 10 dengan nilai setpoint yang diberikan adalah  $7.3 \times 10^{-5}$ . Selanjutnya dari hasil simulasi akan dilakukan analisis untuk membandingkan seberapa cepat respon sistem kendali T2FSMC dan sistem kendali T2FSMC Firefly . Respon sistem yang akan dilihat adalah Rise Time yang merupakan ukuran waktu yang menyatakan keberadaan suatu respon dan di ukur mulai respon 90% dari respon steady state yaitu sebesar  $6.57 \times 10^{-5}$ , overshoot yang merupakan nilai reltif yang menyatakan perbandingan antara nilai maksimum respon dan melampaui nilai steady

state dibanding dengan nilai steady state dan settling time yang merupakan ukuran waktu dan menyatakan respon telah masuk 2% dari respon steady state Nilai steady state error yang digunakan adalah 2% dari setpoint atau  $7.3 \times 10^{-5} \pm (7.3 \times 10^{-5} \times 2\%)$  yiatu  $1.44 \times 10^{-6}$  dengan batas toleransi sebesar  $7.154 \times 10^{-5}$ .

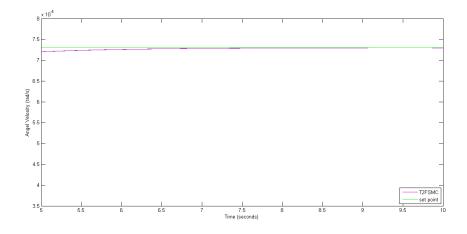
Nilai Rise Time, steady state error dan setpoint akan digunakan pada simulasi-simulasi yang akan dilakukan untuk melihat performansi dari masingmasing sistem.

### 4.3.1 Respon sistem T2FSMC

Nilai gain yang digunakan adalah gain $1=1\times 10^{-7}$ , gain $2=5\times 10^{-5}$ , dan gain $3=2.2945\times 10^{-2}$  dengan simulasi akan berhenti pada detik ke 10. Hasil simulasi ditunjukkan oleh gambar berikut:



Gambar 4.8: Hasil Simulasi T2FSMC



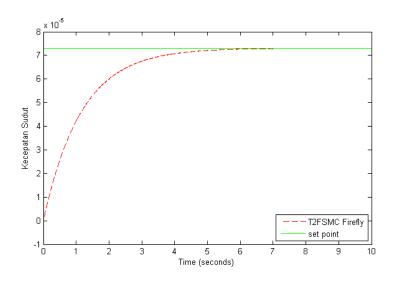
Gambar 4.9: Hasil Simulasi T2FSMC setalah diperbesar

Pada gambar 4.8 dapat dilihat bahwa respon dari kecepatan sudut dengan menggunakan kendali T2FSMC menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu komputasi 38.052069 detik dan mencapai 90% setpoint sebesar 2.533 detik. Kurva sistem terus naik dan mencapai batasan steady state error. Sebelum menuju posisi stabil, sistem tidak memiliki nilai overshoot yang berarti sistem langsung menuju kestabilan. Waktu untuk mencapai posisi stabil settling time adalah pada waktu ke 6.78 detik.

Ditinjau dari performasi ITAE, sistem sebelum modifikasi memiliki performansi yang sangat baik. Nilai ITAE adalah 9.83330298068067  $\times$   $10^{-5}$ yang disebabkan oleh nilai *error* sebelum mencapai kestabilan.

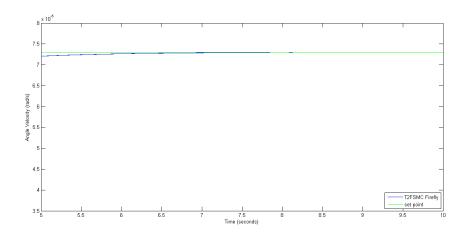
### 4.3.2 Respon sistem T2FSMC Firefly

Selanjutnya hasil simulasi yang kedua adalah dengan menggunakan kendali T2FSMC Firefly. didefinisikan nilai  $\alpha=0.25,\ \beta_{min}=0.20,\ \gamma=1.$  Posisi awal dan akhir dari 10 firefly dengan 5 iterasi akan menghasilkan firefly terbaik. Hasil optimasi gain dengan Firefly diperoleh gain1= 1.0844023248565905 ×  $10^{-7},\ \mathrm{gain2}=4.910932153091892\times10^{-5},\ \mathrm{gain3}=2.2963190116691054\times10^{-2}.$  Simulasi dihentikan pada detik ke 10, hasil simulasi respon kendali T2FSMC Firefly dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.10: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly

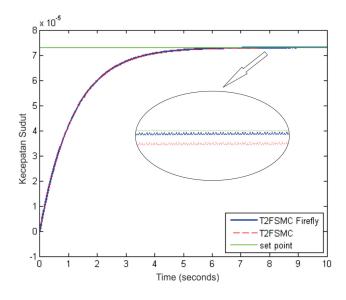
Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa hasil respon T2FSMC Firefly tidak berbeda jauh dengan hasil respon T2FSMC. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 38.271904 detik, Rise time yang dihasilkan adalah 2.504 detik dan settling time terjadi pada waktu ke 4.53 detik tanpa overshoot. Ditinjau dari performasi ITAE, sistem setelah modifikasi memiliki performansi yang sangat baik. Nilai ITAE adalah  $9.63824211077099 \times 10^{-5}$  yang disebabkan oleh nilai error sebelum mencapai kestabilan.



Gambar 4.11: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly setalah diperbesar

### 4.3.3 Perbandingan T2FSMC dengan T2FSMC Firefly

Selanjutnya akan dilakukan simulasi dengan perbandingan antara respon kendali T2FSMC Firefly dan kendali T2FSMC dengan simulasi dihentikan pada detik ke 10 dengan parameter yang sudah dilakukan pada percobaan sebelumnya. Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar Gambar 4.12.



Gambar 4.12: Perbandingan T2FSMC Firefly dan T2FSMC

Dari gambar 4.12 terlihat bahwa sulit sekali menemukan perbedaan performa dari pengendali T2FSMC Firefly dengan T2FSMC, akan tetapi perbedaan ini bisa dilihat dari nilai ITAE dari masing masing pengendali, dan menunjukan bahwa performa dari pengendali T2FSMC Firefly lebih baik dari pengendali T2FSMC. Hasil perbandingan nilai ITAE bisa dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1: Perbandingan Kendali T2FSMC dan T2FSMC Firefly

Perbandingan	ITAE	Rise Time	Settling Time	Overshoot
T2FSMC	$9.83330 \times 10^{-5}$	2.533  s	$6.78 \mathrm{\ s}$	0%
T2FSMC Firefly	$9.63824 \times 10^{-5}$	2.504  s	4.53 s	0%

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa ITAE dari pengendali sebelum dan sesudah modifikasi memiliki perbedaan yang sangat kecil. Hal ini karena T2FSMC sudah sangat baik dalam mengendalikan sistem penggerak motor panel surya. Namun, dasar pengoptimalan Firefly adalah menghilangkan ketidakpastian trial error pengambilan nilai gain scale factor. Firefly menunjukkan peningkatan performansi ITAE sehingga hasil yang didapatkan lebih baik dari sebelumnya, peningkatan performa ini ditandai dengan penurunan nilai ITAE sebesar 1.98%. Peningkatan performansi lainnya adalah penurunan Rise Time sebesar 1.14% dan penurunan Settling time sebesar 33.19%. Hal ini menunjukkan sistem hasil modifikasi memiliki respon sistem yang lebih baik.

### 4.3.4 Respon sistem dengan perubahan $\lambda$

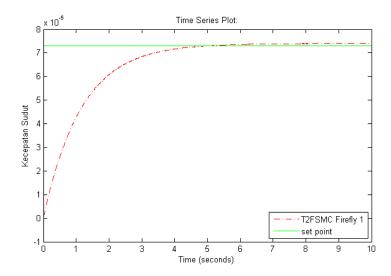
Untuk melihat perubahan respon sistem dengan perubahan  $\lambda$  kita harus mengambil sembarang  $\lambda$  positif tanpa merubah komponen yang lain. dalam hal ini akan diambil beberapa  $\lambda$  yaitu  $\lambda=5$  dan  $\lambda=30$ . Selanjutnya akan dilakunan simulasi untuk melihat respon sistem yang dihasilkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan dari  $\lambda$  tidak mengasilkan peningkatan performa pengendali T2FSMC yang dininginkan, akan tetapi membuat performa pengendali lebih buruk dari pengendali-pengendali sebelumya yaitu FSMC dan T2FSMC, hal ini bisa dilihat dari sistem yang tidak mampu mencapainya setpoint yang dinginkan, baik dari sistem dengan perubahan  $\lambda=5$  dan sistem dengan perubahan  $\lambda=30$ . Karena sistem tidak mampu mencapai setpoit maka sistem tidak mempuyai nilai Rise Time, steady state dan nilai overshoot. Dengan performa sistem seperti dijelaskan diatas maka sistem tidak bisa digunakan pada prototype panel surya.

## 4.3.5 Respon sistem T2FSMC Firefly dengan perubahan parameter Firefly

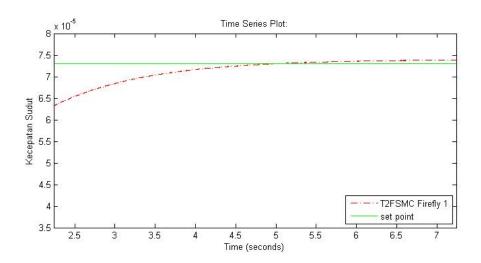
Untuk melihat perubahan respon sistem dengan perubahan parameter Firefly kita harus menentukan nilai  $\alpha$ ,  $\beta_{min}$ ,  $\gamma$  tanpa merubah komponen yang lain. Nilai  $\alpha$ ,  $\beta_{min}$ ,  $\gamma$  diambil dari parameter-parameter dari penelitian yang dilakukan oleh (Soto, 2017) dan (Yuan-bin, 2013) selanjutnya akan diambil 4 kombinasi dari parameter-parameter tersebut sebagai modifikasi parameter Firefly. dalam hal ini diambil nilain  $\alpha$ ,  $\beta_{min}$ ,  $\gamma$  yaitu ( $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_{min} = 0.4$ ,  $\gamma = 0.02$ ), ( $\alpha = 0.5$ ,  $\beta_{min} = 0.6$ ,  $\gamma = 0.01$ ), ( $\alpha = 0.7$ ,  $\beta_{min} = 0.6$ ,  $\gamma = 0.02$ ) dan ( $\alpha = 0.7$ ,  $\beta_{min} = 0.4$ ,  $\gamma = 0.1$ ). Selanjutnya akan dilakunan simulasi untuk melihat respon sitem yang dihasilkan.

### 4.3.5.1 Respon sistem T2FSMC *Firefly* dengan perubahan nilai $\alpha=0.5,\ \beta_{min}=0.4$ dan $\gamma=0.02$

Akan dilihat hasil simulasi menggunakan kendali T2FSMC Firefly dengan  $\lambda=10$ . Didefinisikan nilai  $\alpha=0.5,~\beta_{min}=0.4,~\gamma=0.02$ . Posisi awal dan akhir dari 10 firefly dengan 5 iterasi akan menghasilkan firefly terbaik. Hasil optimasi gain dengan Firefly diperoleh gain1=9.985812512289316×10<sup>-8</sup>, gain2=4.990651640696064×10<sup>-5</sup>, gain3=0.02325882803354261 dengan waktu komputasi untuk menemukan kunang-kunang terbaik adalah 1936.244161 detik. Simulasi dihentikan pada detik ke 10 detik.



Gambar 4.13: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter pertama



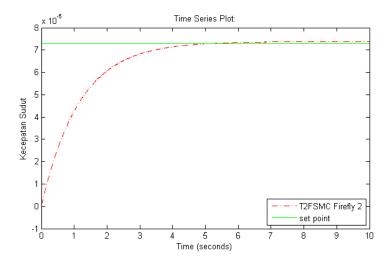
Gambar 4.14: Hasil Simulasi T2FSMC  $\mathit{Firefly}$  perubahan parameter pertama setelah diperbesar

Pada gambar 4.13 dapat dilihat bahwa respon dari kecepatan sudut dengan menggunakan kendali T2FSMC Firefly menunjukkan bahwa sistem memiliki waktu komputasi 122.611980 detik dan mencapai 90% setpoint sebesar 2.540 detik. Kurva sistem terus naik dan mencapai batasan steady state error. Sebelum menuju posisi stabil, sistem tidak memiliki nilai overshoot yang berarti sistem langsung menuju kestabilan. Waktu untuk mencapai posisi stabil settling time adalah pada waktu ke 3.9475 detik.

Ditinjau dari performasi ITAE, sistem sebelum modifikasi memiliki performansi yang sangat baik. Nilai ITAE adalah  $1.10601566941235 \times 10^{-4}$  yang disebabkan oleh nilai *error* karena belum stabil.

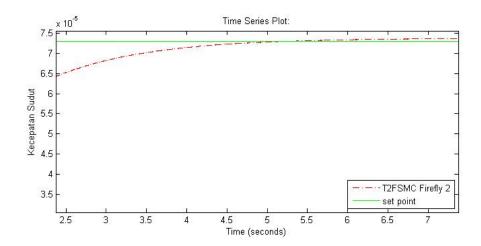
### 4.3.5.2 Respon sistem T2FSMC Firefly dengan perubahan nilai $\alpha=0.5,\ \beta_{min}=0.6$ dan $\gamma=0.01$

Selanjutnya akan dilihat hasil simulasi dengan menggunakan kendali T2FSMC Firefly dengan  $\lambda=10$ . Didefinisikan nilai  $\alpha=0.5,\ \beta_{min}=0.6,\ \gamma=0.01$ . Posisi awal dan akhir dari 10 firefly dengan 5 iterasi akan menghasilkan firefly terbaik. Hasil optimasi gain dengan Firefly diperoleh gain1=9.09892653254465 $E\times10^{-8}$ , gain2=4.9180133456339885 $\times10^{-5}$ , gain3=0.023189010595914435 dengan waktu komputasi untuk menemukan kunangkunang terbaik adalah 1936.244161 detik. Simulasi dihentikan pada detik ke 10.



Gambar 4.15: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter kedua

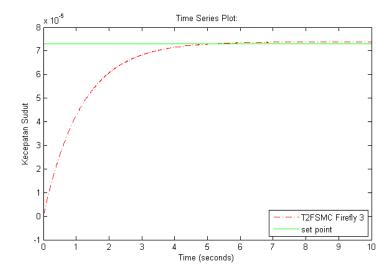
Dari gambar 4.15 dapat dilihat bahwa hasil respon T2FSMC Firefly tidak berbeda jauh dengan hasil respon T2FSMC Firefly pada perubahan parameter Firefly pertama. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 40.974401 detik, Rise time yang dihasilkan adalah 2.567 detik dan settling time terjadi pada waktu ke 4.0581 detik tanpa overshoot. Ditinjau dari performasi ITAE, sistem memiliki performansi yang lebih baik dari sistem pada perubahan parameter pertama. Nilai ITAE adalah  $1.05044501554470 \times 10^{-4}$  yang disebabkan oleh nilai error karena belum stabil.



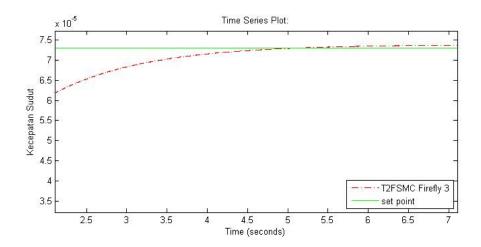
Gambar 4.16: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter kedua setelah diperbesar

## 4.3.5.3 Respon sistem T2FSMC Firefly dengan perubahan nilai $\alpha=0.7,~\beta_{min}=0.6$ dan $\gamma=0.02$

Selanjutnya akan dilihat hasil simulasi dengan menggunakan kendali T2FSMC Firefly dengan  $\lambda=10$ . Didefinisikan nilai  $\alpha=0.7$ ,  $\beta_{min}=0.6$ ,  $\gamma=0.02$ . Posisi awal dan akhir dari 10 firefly dengan 5 iterasi akan menghasilkan firefly terbaik. Hasil optimasi gain dengan Firefly diperoleh gain1=  $1.0560945110719427 \times 10^{-7}$ , gain2=  $5.092564689738123E \times 10^{-5}$ , gain3= 0.023217125012726807 dengan waktu komputasi untuk menemukan kunang-kunang terbaik adalah 1936.244161 detik. Simulasi dihentikan pada detik ke 10.



Gambar 4.17: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter ketiga

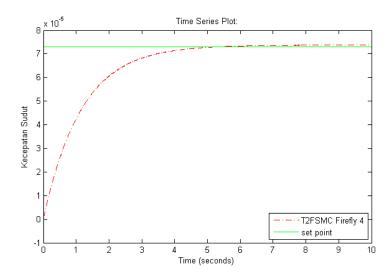


Gambar 4.18: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter ketiga setelah diperbesar

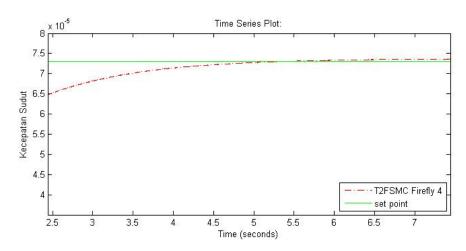
Dari gambar 4.17 dapat dilihat bahwa hasil respon T2FSMC Firefly tidak berbeda jauh dengan hasil respon T2FSMC Firefly pada perubahan parameter Firefly sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 55.180123 detik, Rise time yang dihasilkan adalah 2.557 detik dan settling time terjadi pada waktu ke 4.0108 detik tanpa overshoot. Ditinjau dari performasi ITAE, sistem memiliki performansi yang lebih baik hanya dari sistem pada perubahan parameter pertama. Nilai ITAE adalah 1.07167015392774  $\times$  10<sup>-4</sup> yang disebabkan oleh nilai error karena belum stabil.

### 4.3.5.4 Respon sistem T2FSMC *Firefly* dengan perubahan nilai $\alpha = 0.7, \ \beta_{min} = 0.4 \ \text{dan} \ \gamma = 0.1$

Selanjutnya akan dilihat hasil simulasi dengan menggunakan kendali T2FSMC Firefly dengan  $\lambda=10$ . Didefinisikan nilai  $\alpha=0.7$ ,  $\beta_{min}=0.4$ ,  $\gamma=0.1$ . Posisi awal dan akhir dari 10 firefly dengan 5 iterasi akan menghasilkan firefly terbaik. Hasil optimasi gain dengan Firefly diperoleh gain1=  $9.275417321535657E\times 10^{-8}$ , gain2=  $5.0850430527184584E\times 10^{-5}$ , gain3= 0.023182122464036448 dengan waktu komputasi untuk menemukan kunang-kunang terbaik adalah 1936.244161 detik. Simulasi dihentikan pada detik ke 10.



Gambar 4.19: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter keempat



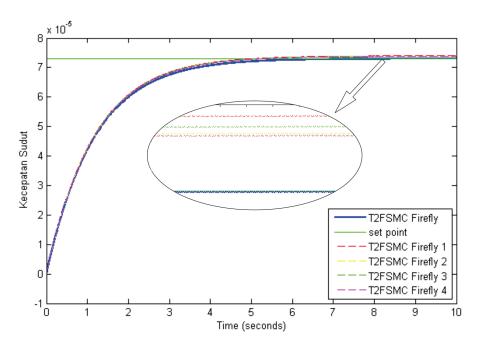
Gambar 4.20: Hasil Simulasi T2FSMC Firefly perubahan parameter keempat setelah diperbesar

Dari gambar 4.19 dapat dilihat bahwa hasil respon T2FSMC Firefly tidak berbeda jauh dengan hasil respon T2FSMC Firefly pada perubahan parameter Firefly sebelumnya. Waktu komputasi yang dibutuhkan adalah 72.043385 detik, Rise time yang dihasilkan adalah 2.5695 detik dan settling time terjadi pada waktu ke 4.0660 detik tanpa overshoot. Ditinjau dari performasi ITAE, sistem memiliki performansi yang lebih baik hanya dari semua sistem pada perubahan parameter sebelumnya. Nilai ITAE adalah 1.04519268117714 $\times$ 10<sup>-4</sup> yang disebabkan oleh nilai error karena belum stabil.

### 4.3.5.5 Perbandingan Perubahan Parameter Firefly pada T2FSMC Firefly

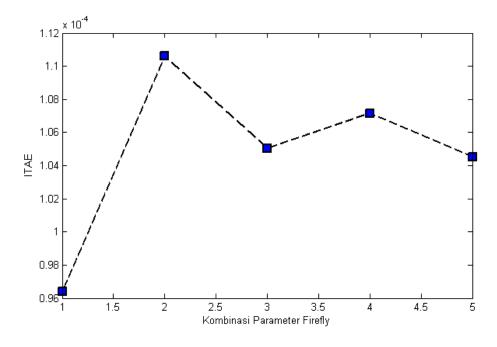
Pada bagian ini akan dibandingkan dan dilihat performasi dari sistem pengendali T2FSMC tanpa perubahan parameter *Firefly* dengan sistem pengendali T2FSMC dengan perubahan nilai parameter *Firefly* dalam

menentukan gain scale factor, Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar 4.21



Gambar 4.21: Perbandingan T2FSMC Firefly dan T2FSMC Firefly dengan perubahan nilai parameter

untuk melihat performansi yang lebih baik maka akan dibandingkan nilai ITAE dari masing-masing pengendali T2FSMC dengan modifikasi *Firefty* pada nilai parameter. Perbandingan nilai ITAE bisa dilihat pada gambar 4.22.



Gambar 4.22: Perbandingan ITAE parameter

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa ITAE dari pengendali sebelum dan sesudah modifikasi parameter Firefly memiliki perbedaan yang sangat jelas. Perbedaan ini dapat dilihat dari nilai ITAE yang dihasilkan masing-masing sistem, baik setelah maupun sebelum modifikasi parameter dilakukan. pada nomer 1 menunjukkan nilai ITAE dari pengendali T2FSMC Firefly sebelum modifikasi yaitu  $9.63824211077099 \times 10^{-5}$ , pada nomer 2 menunjukkan nilai ITAE dari pengendali T2FSMC Firefly setelah modifikasi paramter Firefly pertama yaitu  $1.10601566941235 \times 10^{-4}$ , pada nomer 3 menunjukkan nilai ITAE dari pengendali T2FSMC Firefly setelah modifikasi paramter Firefly kedua yaitu  $1.05044501554470 \times 10^{-4}$ , pada nomer 4 menunjukkan nilai ITAE dari pengendali T2FSMC Firefly setelah modifikasi paramter Firefly ketiga yaitu  $1.07167015392774 \times 10^{-4}$  dan pada nomer 5 menunjukkan nilai ITAE dari pengendali T2FSMC Firefly setelah modifikasi paramter Firefly keempat yaitu  $1.04519268117714 \times 10^{-4}$ . Sehingga bisa disimpulkan bahwa pengendali sebelum modifikasi yaitu T2FSMC Firefly dengan parameter yang telah ada pada sistem sebelumnya memiliki performansi yang lebih baik dari T2FSMC Firefly setelah dilakukan modifikasi parameter Firefly dalam menentukan nilai qain scale factornya. Dalam menentukan nilai parameter memang mengikuti permasalahan yang ada, dalam permasalahan ini, parameter pada T2FSMC Firefly sebelum modifikasi sudah memenuhi kondisi yang diinginkan, yaitu mampu memperbaiki performa dari T2FSMC sebelumnya, dengan kata lain parameter Firefly yang digunakan dari penelitian sebelumnya sudah cocok untuk permasalahan yang ada.

# $\begin{array}{c} \text{BAB 5} \\ \text{KESIMPULAN DAN SARAN} \end{array}$

Dari hasil dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan serta saran untuk pengembangan dan perbaikan penelitian selanjutnya.

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan perbandingan yang telah dilakukan pada dua sistem pengendali yaitu T2FSMC Firefly dan T2FSMC pada *plan* motor pengerak panel surya maka didapatkan hasil:

- 1. Pengendali T2FSMC dengan modifikasi optimasi gain scale factor menggunakan Firefly dapat diterapkan pada sistem motor pengerak panel surya secara simulasi. Efisiensi yang dihasilkan oleh Pengendali T2FSMC Firefly menunjukkan peingkatan dari pengendali T2FSMC tanpa menggunakan Firefly, hal ini bisa dilihat dari settling time yang menurun sebesar 33.19%. Rise Time yang menurun sebesar 1.14% dan nilai ITAE yang lebih kecil 1.98%.
- 2. T2FSMC Firefly mampu memperbaiki performasi dari T2FSMC, dimana sistem kontrol posisi sudut panel surya dengan pengendali T2FSMC Firefly mampu mencapai kestabilan pada waktu ke 4.53 detik dengan ITAE 9.63824211077099x10<sup>-5</sup> dan pengendali T2FSMC mencapai kestabilan pada waktu ke 6.78 detik dengan ITAE 9.83330298068067x10<sup>-5</sup>. Ditinjau dari rise time, T2FSMC Firefly juga menunjukkan peningkatan performansi yaitu dari 2.533 detik ke 2.504 detik.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan analisis data, pembahasan dan kesimpulan yang telah dilakukan, Adapun saran yang diajukan dari Tesis ini, antara lain:

- a. Perlu adanya optimasi di fungsi keanggotaan *Type 2 Fuzzy* karena dalam penelitian ini masih menggunakan metode *trial* dan *error*.
- b. Metode optimasi yang dilakukan juga bisa dengan menggunakan algoritma metaheuristik lainnya.

### DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, I. (2016), Kombinasi *Dual Tracking Method* pada penjejak Matahari Dua Sumbu Dengan Kontrol Logika Fuzzy Berbasis *Particle Swarm Optimization*, Disertasi Jurusan Teknik Elektro, FTI ITS, Surabaya.
- Anggita, F. (2017), Perbandingan kontrol PID dan T2FSMC pada prototype panel surya dengan mempertimbangkan intensitas cahaya, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Aprianti, A. (2009), Energi mikrohidro masih jadi andalan, Alpen Pustaka. Diunduh 20 Agustus 2017. http://www.energi.lipi.go.id.
- Efprianto, Y. (2015), Perancangan dan Simulasi Sistem Pengendali Panel Surya dengan Metode Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Farisi, O. I. R., Setiyono, B. dan Danandjojo, R. I. (2015), A Hybrid Firefly Algorithm Ant Colony Optimization for Traveling Salesman Problem, Jurnal Buana Informatika, Vol. 7, No. 1, hal. 55-64.
- 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.
- Kementrian (2014),Energi Sumber Daya Mineral. Matahari untuk PLTS Indoneisa. tanggal Akses 16 Agustus 2017. http://www3.esdm.go.id/berita/56-artikel/5797-matahari-untuk-plts-diindonesia-.html.
- Kuo, C. (1998), Teknik Kontrol Automatik Jilid 1, Prenhallindo, Jakarta.
- Mardlijah. (2013). Design of T2FSMC Controller with Minimum Gain Scale Factor by Optimizing Membership Function Using FireFly Algorithm on Mobile Inverted Pendulum, IREACO, Vol. 6, No. 4.
- Mardlijah., Abdillah, M., Jazedie, A., Santoso, A. dan Widodo, B. (2011), Performance Enhancement of Inverted Pendulum System by Using Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC), International Conference of Electrical Engineering and Information.
- Mardlijah. (2016), Pengembangan Tipe 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) Pada Kontrol Posisi Panel Surya Untuk Meningkatkan Efisiensi Hasil Sistem Panel Surya. Laporan Penelitian, Surabaya.

- Mardlijah., Jazedie, A., Santoso, A. dan Widodo, B. (2013), A New Combination Method of Firefly Algorithm and T2FSMC for Mobile Inverted Pendulum Robot, Journal of Theoretical and Applied Information Technology Vol.47, No.2.
- Mardlijah. (2013), Penyempurnaan Performansi Mobile Wheeled Inverted Pendulum Menggunakan Kombinasi Sliding Mode Control dan Fuzzy Tipe 2, Disertasi Jurusan Teknik Elektro, FTI ITS, Surabaya.
- Mendel Jerry, dkk (2014), Introduction to Type-2 Fuzzy Logic CONTROL, Jakarta.
- Mintorogo, D.S. (2000), Strategi Aplikasi Sel Surya (Photovoltaic Cells) Pada Perumahan dan Bangunan Komersial, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Sami M F. (2017), Sliding Mode Control, Lecture Notes, the University of Nevada, Reno.
- Soto, C., Valdez, F. and Castillo, O. (2017), A Review of Dynamic Parameter Adaptation Methods for the Firefly Algorithm, Springer International Publishing, hal. 290.
- Prandita, S.B. (2016), Identifikasi parameter model matematika pada penggerak prototype panel surya, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Tomson, T. (2008), Discreat Two-Positional Tracking of Solar Collectors, Renewable Energy, Vol. 33, hal. 49-55.
- Yang, X. S. (2009), Firefly Algorithms for Multimodal Optimization, Lecture Notes: Computer Sciences, the University of Cambridge, Trumping ton Street.
- Yang, X. S. (2010), Firefly algorithm, stochastic test functions and design optimisation, International Journal of Bio-Inspired Computation, Vol. 2, No. 2, hal. 7884.
- Yuan-bin, M., Yan-zhui, M., Qiao-yan, Z. (2013), Optimal Choice of Parameters for Firefly Algorithm, International Conference on Digital Manufacturing and Automation.

### **BIODATA PENULIS**



Penulis bernama Zainullah Zuhri, lahir di Bondowoso, 28 Maret 1985, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Tenggarang 01 Bondowoso, SMP Nurul Jadid Probolinggo dan MA Nurul Jadid Probolinggo. Setelah lulus dari MA Nurul Jadid penulis melanjutkan studi S1 Jurusan Pendidikan Matematika Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya pada tahun 2011-2016, dengan Tugas Akhir bidang Analisis Pendidikan. Suatu kehormatan bisa melanjutkan studi S2 Jurusan Matematika di ITS pada tahun 2016. dan menekuni bidang matematika

terapan dan alhamdulillah lulus pada tahun 2018. Dengan motto "Jangan Pernah Remehkan keajaiban, karena keajaiban adalah milik kita yang tidak pernah menyerah" penulis mengarungi kehidupan ini. Alamat email penulis adalah: zainullah.zuhri@gmail.com.