



TESIS - SM 142501

**SISTEM KENDALI AKTIF PASIF PADA  
MOTOR PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU  
MENGUNAKAN FUZZY LOGIC CONTROL -  
MODEL PREDICTIVE CONTROL**

MUHAMMAD IKHWAN  
NRP 06111650010011

DOSEN PEMBIMBING:  
Dr. Dra. Mardijah, M.T.  
Dr. Chairul Imron, M.I.Komp.

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





THESIS - SM 142501

**ACTIVE PASSIVE CONTROL SYSTEM ON  
DUAL AXIS SOLAR TRACKER MOTORS  
USING FUZZY LOGIC CONTROL - MODEL  
PREDICTIVE CONTROL**

MUHAMMAD IKHWAN  
NRP 06111650010011

SUPERVISORS:  
Dr. Dra. Mardlijah, M.T.  
Dr. Chairul Imron, M.I.Komp.

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



Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat mendapatkan gelar  
Magister Sains (M.Si.)  
di  
Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:  
MUHAMMAD IKHWAN  
NRP. 06111650010011

Tanggal Ujian : 23 Mei 2018  
Periode Wisuda : September 2018

Disetujui oleh



1. Dr. Dra. Mardijah, M.T.  
NIP. 19670114 199102 2 001

(Pembimbing I)



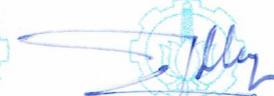
2. Dr. Chairul Imron, M.I.Komp.  
NIP. 19611115 198703 1 003

(Pembimbing II)



3. Dr. Hariyanto, M.Si.  
NIP. 19530414 198203 1 002

(Penguji)



4. Dr. Dwi Ratna Sulistyaningrum, S.Si., M.T.  
NIP. 19690405 199403 2 003

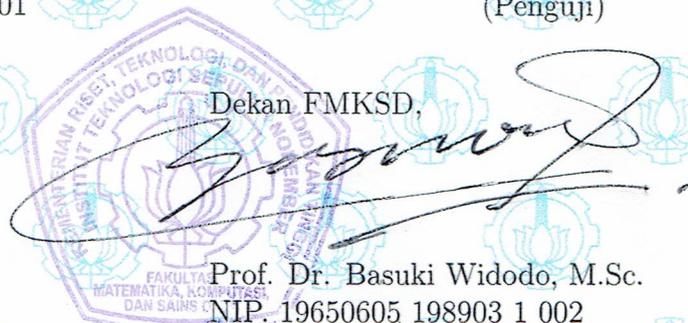
(Penguji)



5. Endah R. M. Putri, S.Si., M.T., Ph.D.  
NIP. 19761213 200212 2 001

(Penguji)

Dekan FMKSD,



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



# SISTEM KENDALI AKTIF PASIF PADA MOTOR PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC CONTROL - MODEL PREDICTIVE CONTROL*

Nama Mahasiswa : Muhammad Ikhwan  
NRP : 06111650010011  
Pembimbing : 1. Dr. Dra. Mardijah, M.T.  
2. Dr. Chairul Imron, M.I.Komp.

## ABSTRAK

Pengembangan teknologi energi surya berusaha memperbaiki efisiensi panel surya dengan memperhatikan posisi matahari. Penelitian ini menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) dan *Model Predictive Control* (MPC) yang diterapkan pada sistem kendali aktif pasif penjejak matahari dua sumbu. Sistem kendali aktif pasif dapat meminimalkan pengaruh gangguan luar yang diberikan pada sistem, gangguan tersebut adalah perubahan posisi sudut, perubahan intensitas cahaya, dan kombinasi kedua gangguan tersebut. Pengendali FLC menggunakan sensor cahaya sebagai referensi untuk menentukan nilai variabel kendali sehingga dapat menghilangkan faktor ketidakpastian pada sistem kendali. Disisi lain, pengendali MPC mampu memberikan nilai variabel kendali dengan tepat sesuai referensi yaitu sudut *altitude* dan *azimuth* matahari. Berdasarkan hasil simulasi, panel surya dengan penjejak pasif MPC memiliki performansi *mean absolute error* paling baik pada kondisi tanpa gangguan. Pada kondisi simulasi dengan gangguan, panel surya dengan penjejak aktif-pasif FLC-MPC dapat menghadapi gangguan dan mampu memulihkan gangguan dengan cepat. Berdasarkan simulasi daya yang dihasilkan, panel surya dengan penjejak aktif-pasif FLC-MPC menghasilkan efisiensi sebesar 42,64%.  
**Kata-kunci:** *fuzzy logic control*, metode aktif-pasif, *model predictive control*, panel surya, penjejak matahari dua sumbu



# ACTIVE PASSIVE CONTROL SYSTEM ON DUAL AXIS SOLAR TRACKER MOTORS USING FUZZY LOGIC CONTROL - MODEL PREDICTIVE CONTROL

Name : Muhammad Ikhwan  
NRP : 06111650010011  
Supervisors : 1. Dr. Dra. Mardlijah, M.T.  
2. Dr. Chairul Imron, M.I.Komp.

## ABSTRACT

The development of solar energy technology tried to improve solar panels by considering position of the Sun. This research used Fuzzy Logic Control (FLC) and Model Predictive Control (MPC) applied to the combination of active-passive methods on dual-axis solar tracking system. An active-passive control system could minimize the effect of external disturbance imposed to the system, such as interference in angular change, light intensity, and a combination of both disturbances. The FLC controller used light sensor as a reference to determine the value of control variable to eliminate the uncertainty factor in the control system. At the other hand, the MPC controller was able to provide the appropriate value of control variable according to the reference of altitude and azimuth solar angles. Based on the simulation results, the solar panel using passive control MPC had the best mean absolute error performance in ideal condition. In simulated conditions with disturbances, solar panel that used active-passive FLC-MPC had a deal with disturbances and able to recover the disturbance quickly. Based on the simulation of power generated, solar panel with FLC-MPC produced the best efficiency about 42.64%. **Key-words:** active-passive method, dual-axis solar tracker, fuzzy logic control, model predictive control, photo voltaic



## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penelitian yang berjudul **SISTEM KENDALI AKTIF PASIF PADA MOTOR PENJEJAK MATAHARI DUA SUMBU MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC CONTROL - MODEL PREDICTIVE CONTROL*** dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Magister Program Strata-2 Departemen Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan penelitian ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, ucapan terima kasih 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. Dr. Dra. Mardijah, M.T. dan Dr. Chairul Imron, M.I.Komp. selaku dosen pembimbing dalam pelaksanaan penelitian.
6. Dr. Hariyanto, M.Si., Dr. Dwi Ratna Sulistyanningrum, S.Si., M.T. dan Endah R.M. Putri, S.Si., M.T., Ph.D. selaku dosen-dosen penguji dalam penelitian ini.
7. Dr. Dra. Mardijah, M.T. 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 dan kedua saudara yang selalu memberikan doa dan dukungan dalam menyelesaikan penelitian
10. Teman-teman yang memberikan semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.

Penyusunan penelitian ini tidak terlepas dari kekurangan, baik dalam hal penulisan maupun pembahasan dari topik penelitian. Oleh sebab itu, diperlukan saran demi penyusunan penelitian yang lebih baik. Semoga penelitian ini dapat memberi manfaat bagi pembaca untuk melaksanakan penelitian selanjutnya.

Surabaya, 31 Mei 2018

Penulis

# DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Penelitian-Penelitian Terkait .....	7
2.2 Lintasan Matahari .....	8
2.2.1 Sudut Deklinasi .....	8
2.2.2 Garis Lintang dan Bujur.....	10
2.2.3 Sudut Jam, <i>Altitude</i> dan <i>Azimuth</i> .....	10
2.3 Penjejak Matahari.....	14
2.3.1 Motor DC .....	14
2.3.2 <i>Light Dependent Resistor</i> .....	14
2.3.3 Panel Surya.....	15
2.4 <i>Model Predictive Control</i> .....	17
2.5 <i>Fuzzy Logic Control</i> .....	19
BAB 3 METODE PENELITIAN	21
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....	21
3.2 Bentuk Data .....	21
3.3 Tahapan Penelitian .....	22

BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1	Lintasan Matahari dari Lokasi Pengamatan	27
4.2	Penjejak Matahari Pasif	29
4.2.1	Perancangan Kendali Penjejak Pasif	30
4.2.2	Penjejak Sudut <i>Altitude</i>	32
4.2.3	Penjejak Sudut <i>Azimuth</i>	35
4.3	Penjejak Matahari Aktif	38
4.3.1	Perancangan Kendali Penjejak Aktif	39
4.3.2	Penjejak Sudut <i>Altitude</i>	45
4.3.3	Penjejak Sudut <i>Azimuth</i>	48
4.4	Penjejak Matahari Kombinasi Aktif - Pasif	51
4.4.1	Perancangan Kendali Penjejak Aktif-Pasif	51
4.4.2	Simulasi	52
4.5	Sistem Penjejak Aktif-Pasif dengan Gangguan	53
4.5.1	Gangguan perubahan posisi sudut	53
4.5.2	Gangguan perubahan intensitas cahaya	55
4.5.3	Gangguan kombinasi perubahan posisi dan intensitas cahaya	56
4.6	Simulasi Daya Panel Surya	57
BAB 5	Kesimpulan dan Saran	61
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	62
	DAFTAR PUSTAKA	63
	LAMPIRAN	65

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Dua sumbu bumi terhadap bidang ekuator dan orbit bumi .....	9
Gambar 2.2 Lintasan bumi pada bidang matahari .....	9
Gambar 2.3 Acuan <i>ecliptic</i> geometri matahari-bumi .....	10
Gambar 2.4 Acuan <i>equatorial</i> geometri matahari-bumi .....	11
Gambar 2.5 Acuan <i>horizon</i> geometri matahari-bumi .....	12
Gambar 2.6 Sudut <i>altitude</i> dan <i>azimuth</i> dalam bidang (E,N,Z) .....	13
Gambar 2.7 Sistem motor DC .....	14
Gambar 2.8 Sirkuit PV <i>single diode</i> .....	15
Gambar 2.9 Strategi MPC .....	17
Gambar 2.10 Skema pengendali FLC .....	19
Gambar 3.1 Perancangan penjejak matahari pasif .....	22
Gambar 3.2 Perancangan penjejak matahari aktif .....	23
Gambar 3.3 Perancangan penjejak matahari aktif-pasif .....	24
Gambar 4.1 Sudut <i>altitude</i> matahari .....	28
Gambar 4.2 Sudut <i>azimuth</i> matahari .....	29
Gambar 4.3 Motor .....	30
Gambar 4.4 Model simulasi penjejak pasif sudut <i>altitude</i> .....	32
Gambar 4.5 <i>Error</i> mutlak penjejak sudut <i>altitude</i> dengan MPC .....	34
Gambar 4.6 Tegangan masukan penjejak sudut <i>altitude</i> dengan MPC .....	34
Gambar 4.7 Uji respon sistem penjejak MPC pada sudut <i>altitude</i> .....	35
Gambar 4.8 Model simulasi penjejak pasif sudut <i>azimuth</i> .....	36
Gambar 4.9 Uji respon sistem penjejak MPC pada sudut <i>azimuth</i> .....	37
Gambar 4.10 <i>Error</i> mutlak penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan MPC .....	37
Gambar 4.11 Tegangan masukan penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan MPC .....	38
Gambar 4.12 Masukan pengendali <i>fuzzy</i> .....	41
Gambar 4.13 Luaran pengendali <i>fuzzy</i> untuk sudut <i>altitude</i> .....	43
Gambar 4.14 Luaran pengendali <i>fuzzy</i> untuk sudut <i>azimuth</i> .....	44
Gambar 4.15 Model simulasi penjejak aktif sudut <i>altitude</i> .....	45
Gambar 4.16 Uji respon sistem penjejak FLC pada sudut <i>altitude</i> .....	46
Gambar 4.17 <i>Error</i> mutlak penjejak sudut <i>altitude</i> dengan FLC .....	46
Gambar 4.18 Tegangan masukan penjejak sudut <i>altitude</i> dengan FLC .....	47
Gambar 4.19 Model simulasi penjejak aktif sudut <i>azimuth</i> .....	48
Gambar 4.20 Uji respon sistem penjejak FLC pada sudut <i>azimuth</i> .....	49
Gambar 4.21 <i>Error</i> mutlak penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan FLC .....	49
Gambar 4.22 Tegangan masukan penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan FLC .....	50
Gambar 4.23 Model simulasi penjejak aktif-pasif .....	52

Gambar 4.24 Strategi <i>switch</i> .....	52
Gambar 4.25 Gangguan perubahan posisi sudut .....	53
Gambar 4.26 Gangguan perubahan posisi sudut .....	54
Gambar 4.27 Gangguan perubahan intensitas cahaya.....	55
Gambar 4.28 Perbandingan daya PV tetap dan PV dengan penjejak .	58
Gambar 4.29 Perbandingan daya awal simulasi .....	58

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Parameter elektrik dan mekanik motor DC .....	21
Tabel 4.1 MAE penjejak sudut <i>altitude</i> dengan MPC .....	33
Tabel 4.2 MAE penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan MPC .....	36
Tabel 4.3 MAE penjejak sudut <i>altitude</i> dengan FLC .....	47
Tabel 4.4 MAE penjejak sudut <i>azimuth</i> dengan FLC .....	51
Tabel 4.5 MAE penjejak sudut <i>altitude</i> dan <i>azimuth</i> dengan gangguan perubahan posisi .....	54
Tabel 4.6 MAE penjejak sudut <i>altitude</i> dan <i>azimuth</i> dengan gangguan perubahan intensitas cahaya .....	56
Tabel 4.7 MAE penjejak sudut <i>altitude</i> dan <i>azimuth</i> dengan gangguan kombinasi .....	56



## DAFTAR SIMBOL

$\alpha_s$	: Sudut <i>altitude</i> matahari
$\delta$	: Sudut deklinasi matahari
$\gamma_s$	: Sudut <i>azimuth</i> matahari
$\lambda$	: Sudut garis bujur <i>longitude</i>
$\mu$	: Derajat keanggotaan <i>fuzzy</i>
$\omega$	: Sudut jam
$\omega(t)$	: Kecepatan sudut motor
$\phi$	: Sudut garis lintang <i>latitude</i>
$\theta(t)$	: Sudut motor DC
$B$	: Gesekan viskos motor DC ( $Nms/rad$ )
$I$	: Kuat arus luaran panel surya
$i(t)$	: Kuat arus motor DC
$I_0$	: Kuat arus dioda saturasi panel surya
$I_d$	: Kuat arus dioda panel surya
$I_m$	: Kuat arus titik daya maksimum panel surya
$I_{ph}$	: Kuat arus <i>photocurrents</i> panel surya
$I_{sc}$	: Kuat arus sirkuit pendek <i>shunt</i> panel surya
$I_{sh}$	: Kuat arus <i>shunt</i> panel surya
$J$	: Momen inersia motor DC ( $Nms^2$ )
$K$	: Konstanta Boltzman $1.38 \times 10^{23}$ J/K
$K_m$	: Torsi gaya gerak listrik motor DC ( $Nm/A$ )
$K_b$	: Torsi belakang gaya gerak listrik motor DC ( $Vs/Rad$ )
$K_I$	: Koefisien temperatur kuat arus
$K_v$	: Koefisien temperatur tegangan
$L$	: Induktansi motor DC ( $H$ )
$n$	: Parameter material panel surya
$P$	: Daya panel surya
$q$	: Pergerakan elektron $1.602 \times 10^{19}$
$R$	: Resistansi motor DC ( $\Omega$ )
$R_{sh}$	: Resistansi <i>shunt</i> panel surya
$R_s$	: Resistansi panel surya
$S$	: Radiasi matahari
$S_{ref}$	: Radiasi matahari referensi ( $1000 W/m^2$ )
$T$	: Temperatur
$T_{ref}$	: Temperatur referensi ( $25^\circ C$ )
$V$	: Tegangan luaran panel surya
$V_d$	: Tegangan dioda panel surya
$V_m$	: Tegangan titik daya maksimum panel surya
$V_{oc}$	: Tegangan sirkuit terbuka panel surya
$V_T$	: Tegangan temperatur



# BAB 1

## PENDAHULUAN

Dalam Bab 1 ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat penelitian.

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara dengan peningkatan konsumsi energi dan elektrifikasi tercepat di dunia. Hal tersebut disebabkan oleh pertumbuhan ekonomi yang cepat, peningkatan urbanisasi dan pertumbuhan populasi. *International Renewable Energy Agency* (2017) melaporkan bahwa pada tahun 2000 - 2014, konsumsi energi di Indonesia meningkat hingga 65%. Pertumbuhan ekonomi juga menyebabkan adanya peningkatan dalam penggunaan listrik untuk kegiatan dasar dan barang rumah tangga lainnya. Hal ini menyebabkan kebutuhan listrik Indonesia dapat tumbuh hingga tiga kali lipat pada tahun 2030. Meskipun lebih dari 10% masyarakat Indonesia masih sulit akses untuk listrik, namun pemerintah mengagendakan untuk 100% elektrifikasi pada tahun 2026.

Kebijakan Energi Nasional yang dituangkan dalam Peraturan Pemerintah No 79 Tahun 2014 menjelaskan bahwa Indonesia memiliki target untuk meningkatkan energi terbarukan dalam Bauran Energi Nasional hingga 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Energi terbarukan juga menjadi salah satu fokus dari program 35.000 MW yang direncanakan oleh pemerintah. Dalam program tersebut, energi terbarukan mencapai 25% nya, yaitu 8.750 MW. Pada kenyataannya, Peraturan Presiden No 22 Tahun 2017 menjelaskan bahwa pada tahun 2015 Indonesia masih bergantung pada energi fosil hingga 95%, sementara energi terbarukan hanya 5%.

Salah satu potensi terbesar untuk percepatan penggunaan energi terbarukan di Indonesia adalah dengan memanfaatkan energi surya. Posisi Indonesia yang berada tepat di garis khatulistiwa menjadi faktor pendukung utama untuk penggunaan panel surya. Rata-rata intensitas radiasi matahari di seluruh wilayah Indonesia cukup tinggi yaitu sekitar 4,8 kWh/m<sup>2</sup> per hari (Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2014). Untuk memanen energi baru terbarukan (EBT) yang berasal dari radiasi matahari, dibutuhkan alat

yang mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik atau disebut *photovoltaic* (PV).

Teknologi konversi PV menjadi salah satu faktor penting dalam pemanenan EBT yang berasal dari radiasi matahari. Pengembangan teknologi ini berusaha memperbaiki efisiensi PV dengan memperhatikan posisi matahari, konfigurasi dan geometri PV, dan pengembangan teknologi material PV. Pengembangan teknologi dengan memperhatikan posisi matahari atau disebut penjejak matahari diawali dengan model sumbu tunggal untuk menjejak arah *altitude* atau *azimuth* matahari. Selanjutnya diikuti dengan penjejak matahari dua sumbu yang melacak posisi matahari berdasarkan *altitude* dan *azimuth* matahari secara bersamaan (Ray dan Tripathi, 2016). Berdasarkan data masukan yang digunakan, penjejak matahari dapat dibagi menjadi dua yaitu metode pasif dan metode aktif. Sistem penjejak aktif menggunakan data sensor sensitifitas radiasi matahari sebagai masukan, sedangkan metode pasif menggunakan pengaturan manual berdasarkan perhitungan trajektori matahari (Ganesh dkk, 2011).

Ditinjau dari posisi matahari, teknologi penjejak matahari melacak posisi matahari berdasarkan sudut *altitude* dan *azimuth* matahari. *Altitude* dan *azimuth* matahari sangat dipengaruhi oleh sudut deklinasi matahari, yaitu sudut datangnya sinar matahari pada waktu tertentu dalam satu tahun. Pada suatu waktu musim panas, matahari akan menyinari sebagian besar belahan bumi utara dan membentuk sudut deklinasi  $+23,5^\circ$  terhadap bidang ekuator. Sebaliknya, pada musim dingin matahari akan menyinari belahan bumi selatan lebih besar dibandingkan bumi utara. Pada daerah khalutistiwa, sudut deklinasi tidak mempengaruhi lama waktu penyinaran matahari sehingga daerah ini akan mendapatkan waktu penyinaran 12 jam setiap hari di sepanjang tahun. Sudut deklinasi memiliki rentang  $-23,5^\circ$  sampai  $+23,5^\circ$  yaitu merentang dari fase penyinaran bumi selatan (musim dingin) hingga fase penyinaran bumi utara (musim panas).

Sistem penjejak matahari memastikan PV mendapatkan radiasi matahari secara menyeluruh. Beberapa metode kendali telah digunakan, mulai dari yang konvensional sampai berbasis kecerdasan buatan. Kajian mengenai pemodelan dan simulasi sistem penjejak matahari dengan menggunakan perancangan konvensional kendali PID dilakukan oleh Ballabel (2013). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa model *plant* yang digunakan tidak dapat mengakomodasi model PV sehingga efisiensi dan analisis kinerja tidak dapat diukur (Ballabel dkk, 2013). Berbeda dengan Ballabel, penelitian

mempbandingkan PID dan T2FSMC menghasilkan informasi tentang posisi sudut motor penggerak yang tepat berdasarkan kecepatan sudut yang konstan (Anggita, 2017). Mardlijah (2017) telah menerapkan T2FSMC pada penjejak matahari satu sumbu secara pasif dengan memperhitungkan intensitas cahaya sebagai salah satu parameter menghitung efisiensi. Tomson (2008) telah merancang dan mengimplementasikan dua buah sistem penjejak matahari aktif yaitu satu sumbu dan dua sumbu dengan menggunakan kendali *on-off*, hasil evaluasi terhadap intensitas radiasi matahari yang diterima oleh dua sistem tersebut adalah sekitar 35%-38% jika dibandingkan dengan PV tetap dan hasil peningkatan efisiensi daya maksimumnya adalah 20%.

Penelitian ini menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) dan *Model Predictive Control* (MPC) yang diterapkan pada sistem kendali aktif-pasif penjejak matahari dua sumbu. FLC menggunakan masukan intensitas cahaya dari sensor cahaya (LDR) sebagai referensi, sedangkan MPC menggunakan perhitungan rumit sudut *altitude* dan *azimuth* matahari sebagai referensi. FLC memiliki kelemahan saat intensitas cahaya memiliki nilai yang kecil disebabkan oleh cuaca yang kurang baik atau terhalang oleh bayangan benda lain, sehingga PV bergerak dengan sudut yang kecil bahkan diam dan menyebabkan terjadi kesalahan penjejukan matahari. Pada kondisi tersebut, MPC bekerja menggantikan FLC sehingga kesalahan penjejukan pada saat intensitas cahaya kecil dapat dihindari.

Penjejak dengan sensor cahaya yang paling sederhana adalah menggunakan kendali dengan logika dasar bergerak maju jika selisih sepasang sensor cahaya bernilai positif, dan bergerak mundur jika selisihnya bernilai negatif. Namun hal ini sangat tidak efisien karena sudut maju dan mundur bersifat konstan. Pengendali yang paling umum digunakan untuk merubah sudut konstan tersebut adalah FLC. FLC memiliki kategori bergerak yang dapat ditentukan oleh pengguna. Misal selisih sepasang LDR yang bersesuaian sangat kecil maka Bergeraknya juga kecil. Penelitian tentang *fuzzy* pada panel surya sudah dilakukan dengan mempertimbangkan nilai selisih LDR dan perubahan selisih LDR (Abadi, 2015), dan pengembangan ke *fuzzy* tipe 2 (Mardlijah dkk, 2017). Hasil penelitian cukup beragam, namun dapat disimpulkan bahwa pengendali *fuzzy* dapat mengendalikan motor penjejak matahari dengan tepat dan mampu mengeliminasi faktor kesalahan peletakan posisi panel surya. Di sisi lain, MPC dapat digunakan pada berbagai tingkat struktur proses kendali dan juga mampu menangani berbagai macam batasan pengendalian secara sistematis (Wang, 2009). Metode

MPC dipilih karena memiliki beberapa kelebihan dibandingkan metode lain. Kelebihan tersebut adalah dapat memprediksi keluaran proses yang akan datang, tidak mengabaikan batasan-batasan yang ada, dapat digunakan untuk mengendalikan berbagai tingkat struktur proses kendali, dapat menyelesaikan kasus multivariabel, dan perluasannya terhadap kendala secara konsep dapat dimasukkan selama proses desain (Camacho, 1995).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, adapun permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana menerapkan metode pasif menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem penjejak matahari dua sumbu sehingga dapat secara akurat menjejak sudut *altitude* matahari?
2. Bagaimana menerapkan metode aktif menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada sistem penjejak matahari dua sumbu sehingga dapat secara akurat menjejak sudut *azimuth* matahari?
3. Bagaimana meningkatkan efisiensi konversi PV dengan menjaga arah PV tegak lurus terhadap arah datangnya radiasi matahari?

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian tesis ini diberikan beberapa batasan masalah dengan rincian sebagai berikut.

1. Simulasi dilakukan tanpa memperhitungkan konsumsi daya yang dibutuhkan peralatan listrik dan proses penyimpanan hasil konversi PV.
2. Penggerak dua buah motor DC tidak menggunakan energi yang dihasilkan PV.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tesis ini adalah sebagai berikut.

1. Menerapkan metode pasif menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) pada sistem penjejak matahari dua sumbu sehingga dapat secara akurat menjejak sudut *altitude* matahari.
2. Menerapkan metode aktif menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) pada sistem penjejak matahari dua sumbu sehingga dapat secara akurat menjejak sudut *azimuth* matahari.

3. Meningkatkan efisiensi konversi PV dengan menjaga arah PV tegak lurus terhadap arah datangnya radiasi matahari, sehingga pada penelitian ini dilakukan simulasi sistem penjejak matahari dua sumbu yang mengikuti sudut-sudut matahari.

### **1.5 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah di bidang pemanfaatan energi yang bersumber dari radiasi matahari. Sistem penjejakan matahari menjadi salah satu teknologi konversi PV, sehingga sistem ini diharapkan mampu bermanfaat mengeliminasi faktor gangguan seperti cuaca berawan, mendung, dan angin yang dapat merubah posisi PV.



## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Dalam bab ini dijelaskan tentang sumber pustaka yang mendukung penelitian. Konsep penjejak matahari yang dijelaskan adalah lintasan matahari berdasarkan sudut deklinasi, garis lintang, garis bujur, dan sudut jam. Konsep elektrik dan mekanik motor penggerak dijelaskan bersamaan dengan alat deteksi cahaya *Light Dependent Resistor* dan alat konversi *Photo Voltaic*. Konsep pengontrolan *Model Predictive Control* dan *Fuzzy Logic Control* dijelaskan pada bagian akhir bab.

#### 2.1 Penelitian-Penelitian Terkait

Wang dan Li (2012) telah melakukan penelitian tentang penerapan *model predictive control* (MPC) pada penjejak matahari dua sumbu. Penelitian tersebut melacak posisi matahari dengan metode MPC berdasarkan kendala PV yang saling terkoneksi. Penjejak matahari dua sumbu menggunakan metode pasif yaitu berdasarkan data astronomi pergerakan matahari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa MPC tidak hanya menjamin keakuratan dan kestabilan pengontrolan, namun juga menemukan batas tetap untuk menyesuaikan dengan kebutuhan lingkungan. Proses membentuk dan merancang pengendali MPC pada penelitian tersebut selanjutnya menjadi acuan pengendalian pasif pada penelitian ini.

Selanjutnya, Abadi (2015) melakukan penelitian penjejak secara aktif menggunakan metode *Fuzzy Logic Control* dan metode metaheuristik *Particle Swarm Optimization* (PSO). Penelitian tersebut merancang dan menjejak matahari dengan penjejak aktif dua sumbu dengan pengendali *fuzzy* berbasis PSO. Sistem yang diusulkan menggunakan sensor cahaya untuk mendeteksi posisi matahari. Luaran dari sensor digunakan sebagai masukan kendali dalam memindahkan PV sesuai dengan posisi matahari. Dua pengendali *fuzzy* berbasis PSO dirancang dan diimplementasikan ke penjejak surya dimana PSO digunakan untuk mengatur parameter pengendali logika *fuzzy* untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik. Pengendali *fuzzy* konvensional juga diterapkan pada sistem untuk mengukur perbaikan yang dicapai. Sebelum sistem diimplementasikan ke dalam *plant* yang sebenarnya, terlebih dahulu

harus dimodelkan menggunakan MATLAB / SIMULINK untuk keperluan simulasi. Oleh karena itu, kinerja pengendali dan penambahan daya PV kemudian diamati, diselidiki dan dianalisis dalam penelitian tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa ada beberapa persamaan antara eksperimen maupun simulasi.

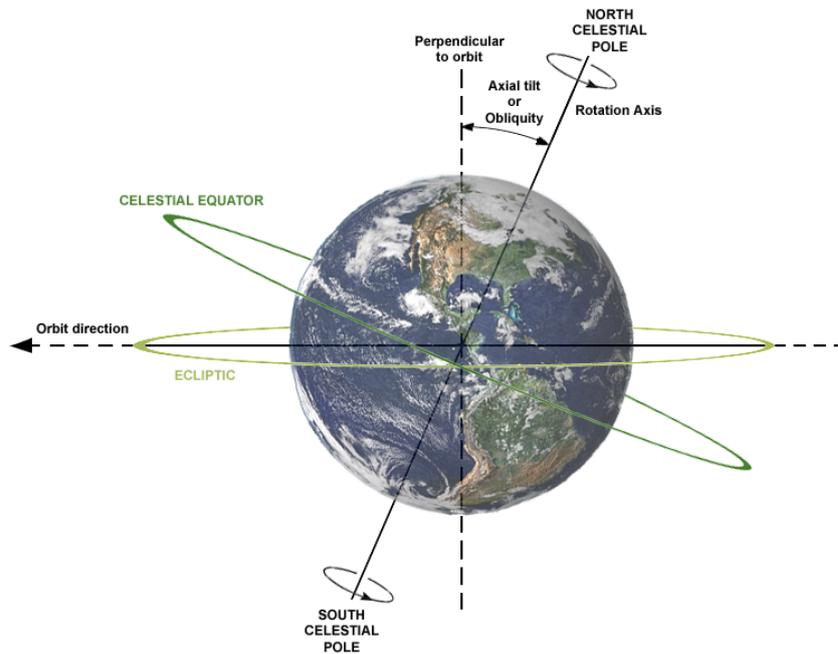
Munna (2015) menggunakan sensor yang diletakkan di permukaan panel dan membandingkan intensitas cahaya secara terus menerus. Kemudian unit kendali mengirimkan sinyal ke unit penggerak untuk memposisikan ulang panel. Sistem ini hemat energi karena unit penggerak tidak menyala dalam cuaca mendung dan menyala dalam cuaca cerah. Mikrokontroler digunakan untuk menghitung dan mengevaluasi sensor intensitas cahaya, kemudian mengirimkan instruksi ke penggerak. Untuk gerakan sudut yang mulus dan akurat, penelitian ini menggunakan sistem penggerak servo. Penelitian ini tidak mempertimbangkan waktu *real time* untuk melacak gerak tahunan dan gerak sehari-hari karena didasarkan pada sistem *loop* tertutup aktif.

## 2.2 Lintasan Matahari

Rotasi harian bumi pada sumbunya melalui dua kutub langit adalah tegak lurus dengan bidang ekuator, akan tetapi tidak tegak lurus dengan bidang orbitnya. Sudut yang dibentuk oleh sumbu kutub dan garis sumbu yang tegak lurus dengan bidang ekuator disebut sudut kemiringan sumbu (*axial tilt angle*) yang besarnya adalah sekitar  $23,5^\circ$  seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Maslanka, 2004). Sudut ini akan berubah sepanjang revolusi bumi terhadap matahari (1 tahun kalender). Selain sudut deklinasi, terdapat beberapa variabel lain dalam menentukan lintasan dan posisi matahari seperti garis lintang dan bujur, sudut jam, *altitude* dan *azimuth*.

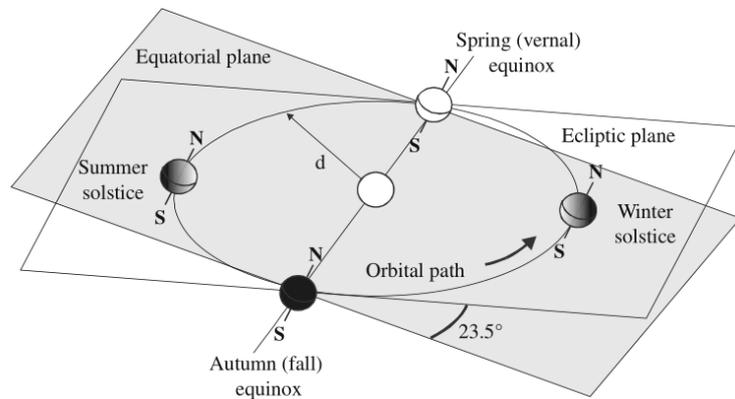
### 2.2.1 Sudut Deklinasi

Pada suatu waktu musim panas, matahari akan menyinari sebagian besar belahan bumi utara dan membentuk sudut deklinasi  $+23,44^\circ$  terhadap bidang ekuator (Sproul, 2006). Sebaliknya, pada musim dingin matahari akan menyinari belahan bumi selatan lebih besar dibandingkan bumi utara. Berdasarkan teori astronomi, sudut ini disebut dengan sudut deklinasi yaitu sebuah sudut yang dibentuk oleh berkas sinar matahari apabila diteruskan menuju pusat bumi dan bidang ekuator. Pada daerah khalutistiwa, sudut deklinasi tidak mempengaruhi lama waktu penyinaran matahari sehingga daerah ini akan mendapatkan waktu penyinaran 12 jam setiap hari sepanjang tahun. Sudut deklinasi memiliki rentang  $-23,5^\circ$  sampai  $+23,5^\circ$  yaitu



Gambar 2.1: Dua sumbu bumi terhadap bidang ekuator dan orbit bumi

merentang dari fase penyinaran bumi selatan hingga fase penyinaran bumi utara atau periode *winter solstice - vernal equinox - summer solstice - autumnal equinox* seperti ditunjukkan pada gambar berikut (Piazza, 2013).



Gambar 2.2: Lintasan bumi pada bidang matahari

Pada Gambar 2.2 ditampilkan sebuah bidang yang terhubung secara paralel dengan bidang ekuator bumi melalui bidang yang memotong pusat matahari disebut bidang matahari (*ecliptic plane*). Bumi melewati bagian atas dan bawah bidang ini ketika berputar mengelilingi matahari dalam bentuk satu lintasan elips penuh selama rentang waktu satu tahun (Braun, 1983). Pemahaman tentang perhitungan deklinasi sangat dibutuhkan untuk

melakukan perancangan *passive solar tracker*. Sudut deklinasi matahari dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Braun, 1983):

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ 360^\circ \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (2.1)$$

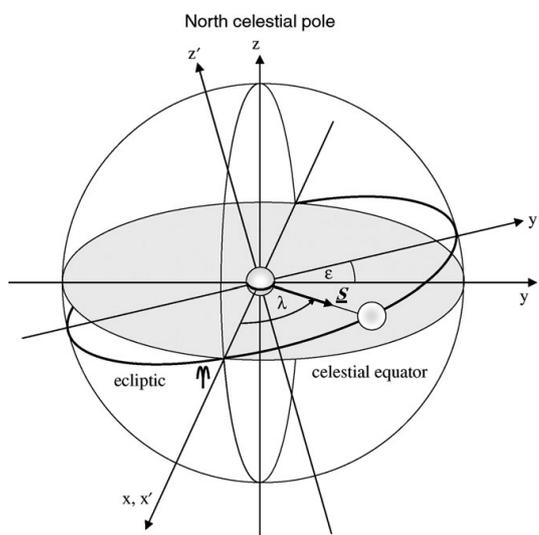
dimana  $n$  adalah hari ke- $n$  dalam tahun tersebut.

### 2.2.2 Garis Lintang dan Bujur

Posisi suatu benda atau tempat di Bumi didefinisikan dalam parameter lintang dan bujur. Lintang dari sebuah titik lokasi di permukaan bumi didefinisikan sebagai sudut yang dibuat oleh garis yang menghubungkan lokasi tersebut dengan pusat bumi dan bidang ekuator, sedangkan bujur adalah garis melingkar di atas permukaan bumi yang menghubungkan kutub utara dan selatan bumi (Sproul, 2006).

### 2.2.3 Sudut Jam, *Altitude* dan *Azimuth*

Terdapat tiga kerangka acuan yang digunakan untuk menurunkan persamaan-persamaan geometri matahari yakni kerangka acuan *ecliptic*, *equatorial* dan *horizon*.



Gambar 2.3: Acuan *ecliptic* geometri matahari-bumi

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 (Sproul, 2006), kerangka acuan *ecliptic* dinyatakan dalam 3 koordinat  $(x', y', z')$  sedangkan posisi angular matahari digambarkan melalui garis bujur *ecliptic* atau *ecliptic longitude*  $\lambda$  yang nilainya bervariasi dari  $0^\circ$  hingga  $360^\circ$  atau satu kali revolusi

peny. Sebuah vektor satuan  $\mathbf{S}$  didefinisikan sebagai vektor yang setiap saat mengarah pada pusat bumi dan dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

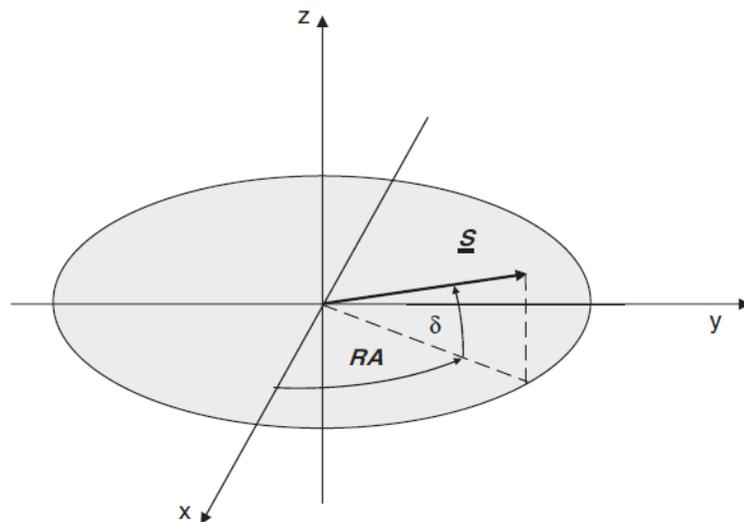
$$\mathbf{S} = \cos(\lambda)\mathbf{i}' + \sin(\lambda)\mathbf{j}' \quad (2.2)$$

dimana  $\mathbf{i}'$  dan  $\mathbf{j}'$  adalah vektor satuan pada arah  $x'$  dan  $y'$ . Pada gambar ini juga ditunjukkan bahwa kerangka acuan *equatorial* yang didefinisikan sebagai sumbu-sumbu  $(x, y, z)$  memiliki keterkaitan dengan kerangka acuan *ecliptic* melalui sebuah rotasi dengan sudut  $\varepsilon$  terhadap sumbu  $x'$ . Hubungan vektor satuan dari dua kerangka acuan dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{i}' \\ \mathbf{j} &= \cos(\varepsilon)\mathbf{j}' - \sin(\varepsilon)\mathbf{k}' \\ \mathbf{k} &= \sin(\varepsilon)\mathbf{j}' + \cos(\varepsilon)\mathbf{k}' \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, vektor  $\mathbf{S}$  dapat didefinisikan pula pada kerangka acuan *equatorial* yaitu melalui perkalian antara vektor  $\mathbf{S}$  dengan vektor satuan  $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$  untuk mendapatkan nilai komponen  $\mathbf{S}(S_x, S_y, S_z)$  pada sumbu koordinat  $(x, y, z)$ , dengan demikian Persamaan (2.2) dalam kerangka acuan *equatorial* dapat dituliskan sebagai berikut:

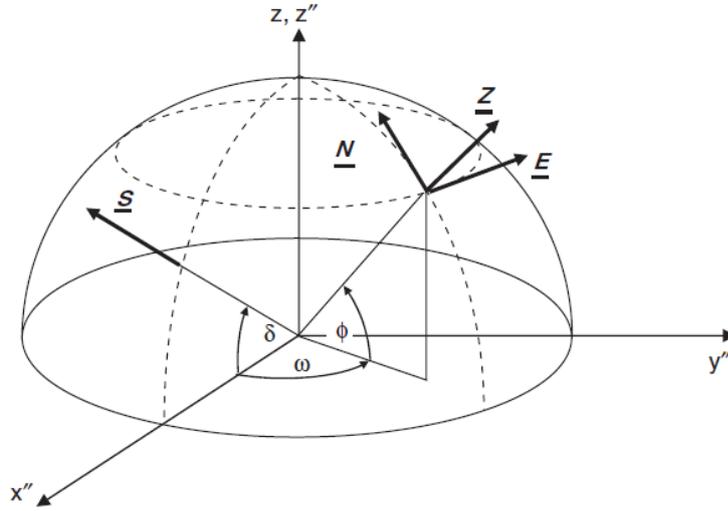
$$\mathbf{S} = \cos(\lambda)\mathbf{i} + \sin(\lambda)\cos(\varepsilon)\mathbf{j} + \sin(\lambda)\sin(\varepsilon)\mathbf{k} \quad (2.4)$$



Gambar 2.4: Acuan *equatorial* geometri matahari-bumi

Secara konvensional, posisi angular matahari pada kerangka acuan *equatorial* dinyatakan sebagai fungsi dari sudut deklinasi dan faktor kenaikan berkala (*right ascension*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 (Sproul, 2006). Oleh karena itu vektor  $\mathbf{S}$  dapat dituliskan kembali dalam bentuk persamaan berikut:

$$\mathbf{S} = \cos(\delta) \cos(RA)\mathbf{i} + \cos(\delta) \sin(RA)\mathbf{j} + \sin(\delta)\mathbf{k} \quad (2.5)$$



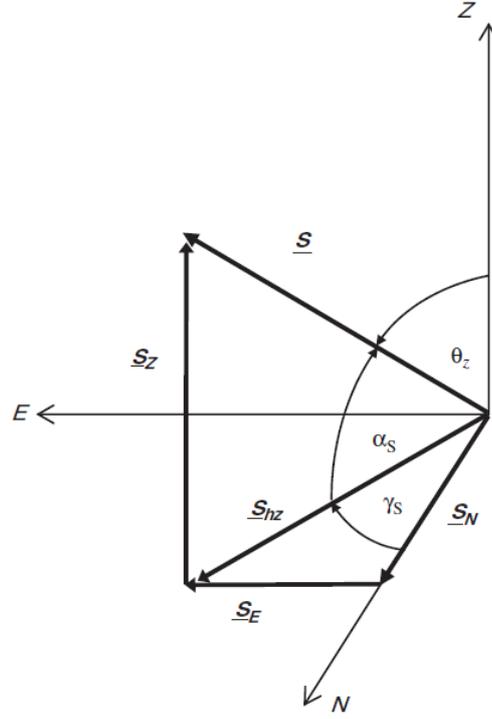
Gambar 2.5: Acuan *horizon* geometri matahari-bumi

Kerangka acuan lainnya yang digunakan untuk menentukan persamaan geometri matahari adalah kerangka acuan *horizon*, yang menggambarkan posisi matahari dari perspektif pengamat di atas permukaan bumi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.5 (Sproul, 2006). Pada kerangka acuan *horizon*, posisi matahari dinyatakan relatif terhadap sumbu-sumbunya ( $E$ ,  $N$ , dan  $Z$ ),  $\phi$  adalah sudut lintang sebuah lokasi dipermukaan bumi,  $\omega$  adalah sudut jam yang menyatakan perputaran bumi sepanjang satu putaran penuh dalam 24 jam, sehingga dapat diturunkan persamaan sudut jam.

$$\omega = (\text{jam lokal} - 12)15^\circ \quad (2.6)$$

$Z$  adalah vektor satuan yang tegak lurus dengan bidang horizontal,  $N$  merupakan vektor satuan yang mengarah pada sumbu kutub utara dan  $E$  adalah vektor satuan yang menuju arah timur. Posisi angular matahari

dinyatakan dengan dua variabel sudut yakni sudut *altitude*  $\alpha_s$  dan sudut *azimuth*  $\gamma_s$ . Selain itu ada variabel lain yang harus ditentukan terlebih dahulu, sebelum sudut *altitude* dihitung yaitu sudut *zenith*  $\theta_z$ . Penentuan sudut *altitude* dan *azimuth* matahari dalam bidang (E,N,Z) dapat dilihat pada gambar berikut (Sproul 2006).



Gambar 2.6: Sudut *altitude* dan *azimuth* dalam bidang (E,N,Z)

Dengan menggunakan sudut deklinasi  $\delta$ , sudut jam  $\omega$ , dan posisi lintang lokasi pengamatan  $\phi$ , Sudut *altitude*  $\alpha_s$  dan sudut *azimuth*  $\gamma_s$  dapat dihitung dengan persamaan berikut (Sproul, 2006):

$$\begin{aligned}\sin(\alpha_s) &= \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta) \\ \alpha_s &= \sin^{-1} (\cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta))\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}\cos(\gamma_s) &= \frac{\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega)}{\cos(\alpha_s)} \\ \gamma_c &= \cos^{-1} \left( \frac{\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega)}{\cos(\alpha_s)} \right)\end{aligned}\quad (2.8)$$

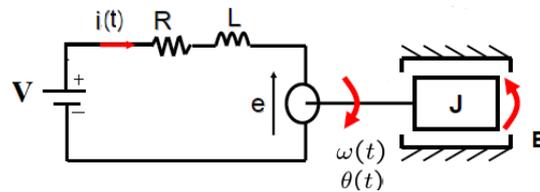
$$\gamma_s = \begin{cases} \gamma_c & , \omega \leq 0 \\ 2\pi - \gamma_c & , \omega > 0 \end{cases}$$

## 2.3 Penjejak Matahari

Pada dasarnya terdapat tiga model dalam penjejakan, yaitu motor DC, *Light Dependent Resistor* (LDR), dan panel surya itu sendiri.

### 2.3.1 Motor DC

Panel surya (PV) digerakkan oleh suatu sistem yaitu sistem motor DC. Masukan dari sistem ini adalah listrik dan luarannya berupa sistem mekanik. Sistem motor DC pada penjejak matahari dua sumbu memiliki dua motor. Motor pertama bertugas menggerakkan PV mengikuti *altitude* matahari, sedangkan motor kedua bergerak mengikuti *azimuth* matahari. Pemodelan sistem motor ini dapat dilihat pada Gambar 2.7 (Abadi, 2015).



Gambar 2.7: Sistem motor DC

dimana tegangan masukan  $V$  dinyatakan sebagai  $E(t)$ ,  $i(t)$  sebagai kuat arus, dan  $\omega(t)$  adalah kecepatan sudut dengan posisi sudut  $\theta(t)$ . Persamaan dinamik model motor DC adalah sebagai berikut (Mardlijah, 2017):

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (E(t) - Ri(t) - K_b\omega(t)) \quad (2.9)$$

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} (K_m i(t) - B\omega(t)) \quad (2.10)$$

dimana:

- R = Resistansi listrik ( $\Omega$ )
- L = Induktansi listrik ( $H$ )
- $K_m$  = Torsi gaya gerak listrik ( $Nm/A$ )
- $K_b$  = Torsi balikan gaya gerak listrik ( $Vs/Rad$ )
- J = Momen inersia ( $Nms^2$ )
- B = Gesekan viskos ( $Nms/rad$ )

### 2.3.2 *Light Dependent Resistor*

Selanjutnya, sistem sensor cahaya bekerja untuk menentukan posisi matahari secara aktif. Sensor *Light Dependent Resistor* (LDR) adalah alat yang dibuat dari *Cadmium disulphide* (CdS). LDR mengubah intensitas cahaya masuk ke dalamnya menjadi nilai resistansi yang bersesuaian. Hubungan

antara masukan dan luaran LDR dapat diekspresikan sebagai berikut (Abadi, 2015):

$$\log R = -\frac{3}{4} \log(I_{eff}) + 5 \quad (2.11)$$

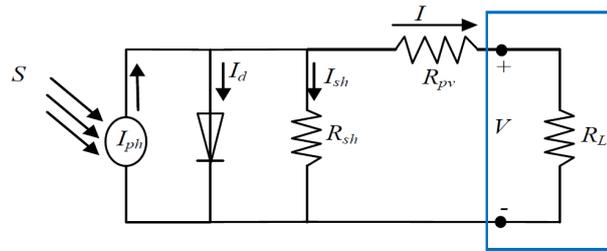
dimana  $I_{eff}$  adalah intensitas cahaya matahari dan  $R$  adalah resistansi listrik. Sedangkan untuk melihat nilai intensitas cahaya efektif yang diperoleh selama satu hari yaitu dengan menggunakan nilai  $I_{max}$  yaitu nilai intensitas maksimum setiap LDR mengikuti formula:

$$I_{eff} = I_{max} \sin(\theta_{eff}) \quad (2.12)$$

dimana  $\theta_{eff}$  adalah sudut datangnya radiasi matahari yang menentukan nilai intensitas cahaya efektif.

### 2.3.3 Panel Surya

Model PV yang sering digunakan untuk simulasi ada dua yaitu *single diode* dan *double diode*. Model dioda tunggal atau model PV yang disederhanakan memiliki empat komponen yaitu sumber arus *photocurrents*, dioda sejajar dengan sumbernya, resistansi internal PV  $R_{pv}$ , dan resistansi *shunt*  $R_{sh}$ .



Gambar 2.8: Sirkuit PV *single diode*

Arus beban dapat dihitung menurut hukum Kirchoff sebagai arus yang masuk dari proses *photocurrents*  $I_{ph}$  dikurangi dengan arus diode  $I_d$  dan arus *shunt*  $I_{sh}$  sebagai berikut:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.13)$$

Arus keluaran dari modul dan persamaan dasar yang menggambarkan karakteristik kuat arus panel surya  $I$  dan tegangan panel surya  $V$  diberikan

dalam persamaan berikut (Li, 2014):

$$\begin{aligned} I &= I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_d}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_{pv}I}{R_{sh}} \\ V_d &= V + IR_{pv} \\ V_T &= \frac{nKT}{q} \end{aligned}$$

dimana:

- $I_0$  : Kuat arus dioda saturasi
- $I_d$  : Kuat arus dioda
- $K$  : Konstanta Boltzman  $1.38 \times 10^{23}$  J/K
- $n$  : Parameter material PV
- $q$  : Pergerakan elektron  $1.602 \times 10^{19}$
- $R_{sh}$  : Resistansi *shunt*
- $T$  : Temperatur
- $V_d$  : Tegangan dioda
- $V_T$  : Tegangan temperatur

Penyederhanaan persamaan diatas menjadi persamaan berikut:

$$I = I_{sc} \left[ 1 - c_1 \left( e^{\frac{V-\Delta V}{c_2 V_{oc}}} - 1 \right) \right] + \Delta I \quad (2.14)$$

$$c_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) e^{\frac{-V_m}{c_2 V_{oc}}} \quad (2.15)$$

$$c_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{oc}} - 1}{\ln \left( 1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right)} \quad (2.16)$$

$$\Delta I = I_{ph} - I_{sc} \quad (2.17)$$

$$I_{ph} = \frac{S}{S_{ref}} (I_{sc} + K_I \Delta T) \quad (2.18)$$

$$\Delta V = R_{pv} \Delta I - K_v \Delta T \quad (2.19)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.20)$$

$$P = IV \quad (2.21)$$

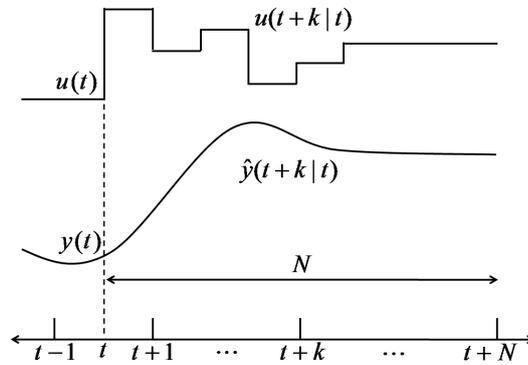
dimana:

- $I_m$  : Kuat arus titik daya maksimum
- $I_{ph}$  : Kuat arus *photocurrents*
- $I_{sc}$  : Kuat arus sirkuit pendek *shunt*
- $I_{sh}$  : Kuat arus *shunt*
- $K_I$  : Koefisien temperatur kuat arus

- $K_v$  : Koefisien temperatur tegangan
- $P$  : Daya PV
- $R_s$  : Resistansi PV
- $S$  : Radiasi matahari
- $S_{ref}$  : Radiasi matahari referensi ( $1000 \text{ W/m}^2$ )
- $T_{ref}$  : Temperatur referensi ( $25^\circ\text{C}$ )
- $V_m$  : Tegangan titik daya maksimum
- $V_{oc}$  : Tegangan sirkuit terbuka

#### 2.4 Model Predictive Control

Metodologi dari MPC ditunjukkan pada gambar berikut (Camacho, 1995).



Gambar 2.9: Strategi MPC

Luaran  $N$  ke depan diprediksi pada setiap waktu  $t$  menggunakan model yang ingin dikendalikan. Prediksi luaran ini bergantung pada nilai yang diketahui pada waktu ke  $t$  (masukan dan luaran sebelumnya) dan sinyal kendali ke depan  $u$  yang dikirim pada sistem dan dihitung kembali. Sinyal kendali  $u$  diperoleh dari hasil optimasi fungsi objektif yang biasanya menyatakan *error* antara sinyal prediksi luaran dan prediksi lintasan referensi.

Model digunakan untuk memprediksi luaran sistem ke depan, berdasarkan nilai yang sebelumnya dan nilai sekarang. Variabel pengoptimalan dinyatakan dengan fungsi objektif yang diminimumkan untuk mendapatkan masukan yang optimal sehingga dapat digunakan kembali pada model untuk perhitungan selanjutnya. Model ruang keadaan waktu diskret diberikan sebagai model prediksi sebagai berikut (Wang dan Li, 2012):

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}(k+1) &= A_d \mathbf{x}(k) + B_d \mathbf{u}(k) \\
 \mathbf{y}(k+1) &= C \mathbf{x}(k)
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

dimana  $A_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$  dan  $B_d \in \mathbb{R}^n$  merupakan matriks ruang keadaan waktu diskret menggunakan metode diskretisasi *exponential hold* sebagai berikut (Ogata, 1995):

$$\begin{aligned} A_d(T) &= e^{AT} \\ B_d(T) &= \left( \int_0^T e^{A\lambda} d\lambda \right) B \end{aligned} \quad (2.23)$$

dimana T adalah waktu sampel untuk diskretisasi,  $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$  dan  $B \in \mathbb{R}^n$  adalah matriks ruang keadaan kontinu dan  $e^{AT}$  dapat ditulis sebagai:

$$e^{AT} = I + AT + \frac{1}{2!}A^2T^2 + \dots + \frac{1}{n!}A^nT^n + \dots \quad (2.24)$$

Selanjutnya, bentuk umum dari fungsi objektif diberikan sebagai jumlahan *error* variabel luaran  $y$  dengan referensi  $y_d$  dan perubahan variabel kendali  $u$  yang berpengaruh:

$$J(k) = \sum_{i=1}^P \|y(k+i|k) - y_d(i)\|_{Q_i}^2 + \sum_{j=1}^M \|u(k+j-1|k)\|_{R_j}^2 \quad (2.25)$$

dimana P prediksi dalam domain waktu, M adalah kendali dalam domain waktu, Q dan R adalah koefisien bobot dimana  $Q > 0$  dan  $R > 0$  atau berupa matriks definit positif yang simetri.

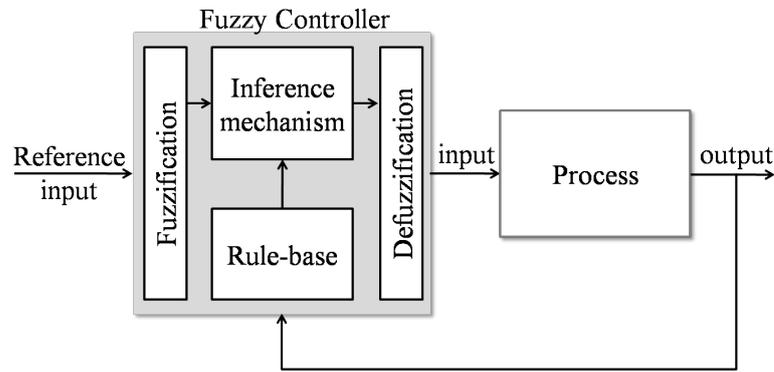
Permasalahan MPC dapat diselesaikan sebagai masalah optimisasi dengan meminimumkan fungsi tujuan J dan kendala  $x$ ,  $y$ , dan  $u$ :

$$\begin{aligned} \min_{U(k)} \quad & J(k) \\ & x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \\ & y(k+1) = C_d x(k) + D_d u(k) \\ & u_{\min} \leq u(k+j-1|k) \leq u_{\max} \\ & x_{\min} \leq x(k+i|k) \leq x_{\max} \\ & i = 1, \dots, P \\ & j = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2.26)$$

dimana  $U(k) = [u(k), u(k+1), \dots, u(k+M-1)]^T$  adalah barisan pengontrol,  $\{u_{\min}, u_{\max}\}$  dan  $\{x_{\min}, x_{\max}\}$  adalah batasan variabel kendali dan variabel keadaan.

## 2.5 Fuzzy Logic Control

Pengendali *fuzzy* adalah pengendali yang menggunakan aturan *rules* untuk memodelkan dan menyelesaikan permasalahan secara eksplisit. Proses desain pengendali *fuzzy* menggunakan aturan yang menghubungkan variabel masukan dan variabel kendali dengan menggunakan variabel verbal atau bahasa (Zimmermann, 1996). Setelah mendefinisikan aturan, proses kendali dimulai dengan perhitungan *rule-consequents* atau konsekuen dari aturan. Kemudian konsekuen-konsekuen tersebut digabungkan menjadi suatu himpunan *fuzzy* yang merepresentasikan kemungkinan kendali yang dilakukan. Proses perhitungan dilanjutkan dengan proses defuzzifikasi yaitu proses menjadikan himpunan *fuzzy* menjadi nilai yang tegas kembali. Proses FLC dapat dilihat pada gambar berikut (Mahmoud, 2018):



Gambar 2.10: Skema pengendali FLC

Parameter keputusan yang memungkinkan adalah sebagai berikut:

- a **Input:** jumlah sinyal masukan, jumlah turunan dari setiap sinyal masukan, penskalaan sinyal masukan.
- b **Fuzzification:** jenis fungsi keanggotaan, rata-rata, sebaran, dan puncak dari fungsi keanggotaan, simetri, titik persimpangan, jumlah fungsi keanggotaan.
- c **Rules:** jumlah aturan, struktur aturan, bobot aturan.
- d **Rule evaluation:** agregat operator, operator kesimpulan.
- e **Aggregation:** agregat operator gabungan dengan hasil dari masing-masing aturan, kesimpulan masing-masing aturan.
- f **Defuzzification:** prosedur merubah *fuzzy* menjadi nilai yang tegas.

g **Output**: jumlah sinyal luaran.

Salah satu jenis FLC adalah pengendali *fuzzy* Mamdani (Zimmermann, 1996). Pengendali ini mendefinisikan proses sebagai variabel verbal dan menggunakan variabel tersebut sebagai masukan untuk aturan kendali. Aturan menghubungkan variabel masukan dengan variabel luaran berdasarkan deskripsi *fuzzy* yaitu definisi secara variabel verbal. Aturan dapat dituliskan sebagai:

rule  $r$ : Jika  $x_1$  adalah  $A_1^{j_1}$  dan  $x_2$  adalah  $A_2^{j_2}$  dan ... dan  $x_n$  adalah  $A_n^{j_n}$ ,  
maka  $u$  adalah  $A^j$

dimana  $A_i^{j_i}$  adalah bentuk ke  $j$  variabel verbal  $i$  sesuai dengan fungsi keanggotaan  $\mu^j(u)$  yang mewakili bentuk variabel kendali. Langkah selanjutnya adalah mengubah masukan menjadi nilai derajat keanggotaan atau disebut sebagai proses fuzzifikasi. Derajat keanggotaan dari masing-masing fungsi keanggotaan selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai aturan yang sesuai dengan data masukan. Dengan menggunakan operator *minimum* sebagai model dari "dan", maka perhitungan nilai tersebut adalah:

$$\alpha_r = \min_{i=1, \dots, n} \{\mu_i^{j_i}(x_i^{input})\} \quad (2.27)$$

*Center of Area* atau *Center of Gravity* adalah metode yang memilih nilai kendali berdasarkan nilai tengah dari luasan dengan nilai keanggotaan lebih besar dari nol. Metode ini mirip dengan rumus untuk menghitung pusat gravitasi dalam fisika. Rata-rata bobot dari fungsi keanggotaan atau pusat gravitasi daerah yang dibatasi oleh kurva fungsi keanggotaan dihitung menjadi nilai paling tegas dari sejumlah *fuzzy*. Nilai kendali dihitung dengan rumus:

$$u^{CoA} = \frac{\sum_U u \mu^{conseq}(u)}{\sum_U \mu^{conseq}(u)} \quad (2.28)$$

atau jika  $u$  variabel kontinu, hasil defuzzifikasi menjadi:

$$u^{CoA} = \frac{\int_U u \mu^{conseq}(u) du}{\int_U \mu^{conseq}(u) du} \quad (2.29)$$

## BAB 3

### METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dibahas tempat dan waktu penelitian, data, dan tahapan penelitian tentang sistem kendali penjejak matahari dua sumbu kombinasi metode aktif-pasif menggunakan *fuzzy logic control* dan *model predictive control*.

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember Sukolilo Surabaya dengan posisi lintang dan bujur adalah  $-7^{\circ}18'49.51''$  LS dan  $112^{\circ}43'5.7''$  BT pada ketinggian 16 m di atas permukaan tanah. Penelitian dilaksanakan pada September 2017 sampai Mei 2018.

#### 3.2 Bentuk Data

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

1. Data Sekunder: data sekunder dalam penelitian ini dibedakan menjadi tiga kategori yaitu parameter astronomi seperti posisi bujur dan lintang lokasi penelitian serta tanggal dan waktu penelitian, parameter mekanik seperti dimensi penjejak matahari, momen inersia, dan torsi beban, dan parameter elektrik seperti spesifikasi PV, motor DC, dan sensor cahaya.

Tabel 3.1: Parameter elektrik dan mekanik motor DC

Parameter	Satuan	Motor I	Motor II
R	Ohm	18.2214	18.2214
L	Henry	0.000866	0.000866
$K_b$	V/(rad/s)	0.030941093	0.030941093
$K_m$	N m/Amphere	0.030941093	0.030941093
J	Kg $m^2$	0.00009	0.00009
B	N m s	0.000025	0.000025

Sumber: Mardlijah (2017)

2. Data Primer : data primer dalam penelitian ini adalah data intensitas cahaya dan data daya hasil PV, baik yang memakai penjejak matahari dua sumbu maupun yang tidak memakai penjejak matahari.

### 3.3 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian adalah:

1. Studi literatur

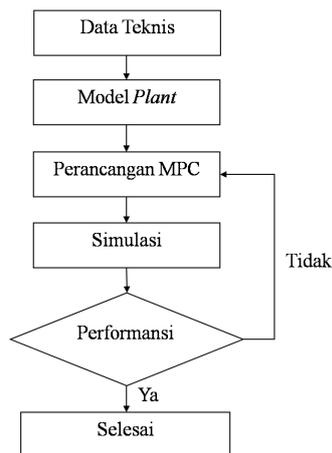
Penelusuran referensi bersumber dari buku teks, modul ajar, prosiding seminar, artikel pemerintah dan jurnal ilmiah. Pencarian referensi menjadi faktor penting dalam menentukan keterbaruan dan keaslian penelitian ini.

2. Pengumpulan data

Data sekunder diperoleh dari penelitian sebelumnya dan spesifikasi peralatan listrik. Data sekunder berupa parameter astronomi diperoleh dari posisi lintang dan bujur lokasi penelitian yaitu Kampus ITS Sukolilo Surabaya, sedangkan data sekunder lainnya diperoleh dari spesifikasi peralatan listrik dan penelitian sebelumnya.

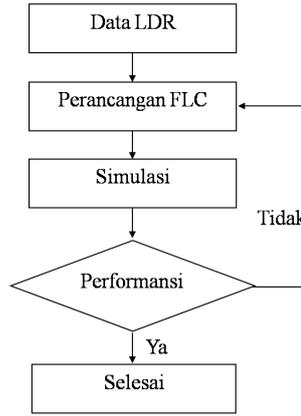
3. Penyusunan sistem

Sistem penjejak matahari dua sumbu disusun dengan menggunakan data teknis yang dikumpulkan. Diagram alir perlakuan pengendali pasif menggunakan MPC adalah:



Gambar 3.1: Perancangan penjejak matahari pasif

Selanjutnya, sistem penjejak matahari aktif dibentuk dengan menggunakan data dari *light dependent resistor* (LDR).



Gambar 3.2: Perancangan penjejak matahari aktif

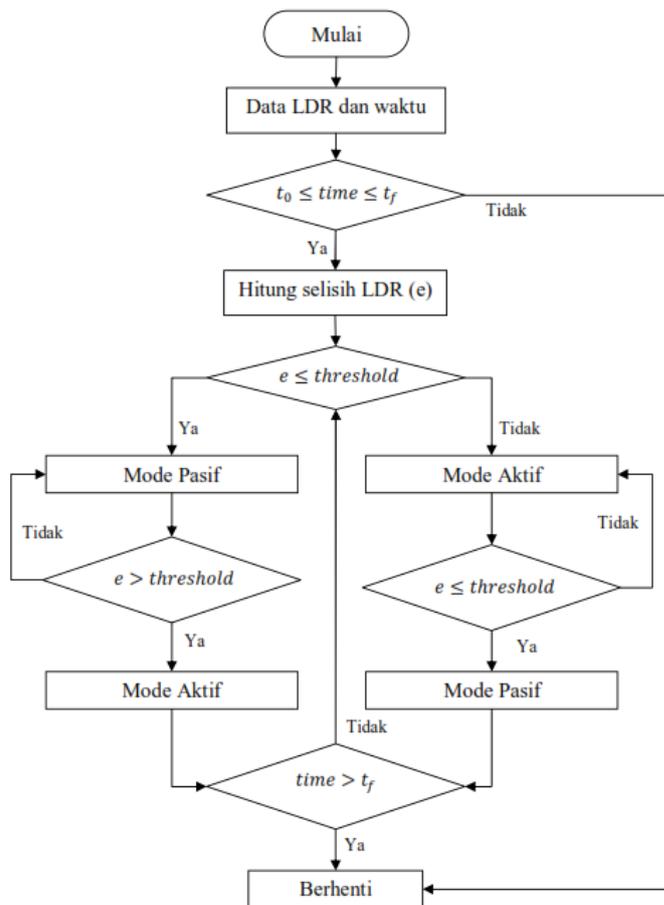
Kombinasi metode aktif-pasif berbasis FLC-MPC dapat diterapkan dengan cara *switch on-off*. Cara kerja sistem dimulai dengan mengambil data luaran sensor LDR untuk menentukan besarnya *error* tegangan antara pasangan LDR yang bersesuaian, bila nilai *error* yang dihasilkan oleh LDR tersebut lebih kecil dari *threshold* (batas ambang yang besarnya ditetapkan berdasarkan hasil eksperimen) maka sistem akan menjalankan mode pasif dan mematikan mode aktif, kondisi ini menunjukkan bahwa cuaca dalam keadaan tidak baik. Kondisi tersebut di atas akan berlangsung sampai dideteksi adanya perubahan nilai tegangan LDR yang besarnya melebihi nilai *threshold* dan secara otomatis terjadi peralihan mode menuju mode aktif. Diagram alir kombinasi aktif-pasif ini dapat dilihat pada Gambar 3.3.

#### 4. Simulasi dan pengujian

Selanjutnya, dilakukan simulasi terhadap program yang telah disusun sebagai landasan pengujian terhadap prototipe. Performansi menjadi tolak ukur perulangan pengujian. Performansi ini dihitung dengan menggunakan *mean absolute error* (MAE) yaitu rata-rata dari selisih antara hasil luaran sudut *pitch* dan *yaw* motor penjejak dengan referensi sudut *altitude* dan *azimuth*. Rumus MAE tersebut dapat ditulis sebagai:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n \|y_i - y_i^d\|}{n} \quad (3.1)$$

dimana  $y$  adalah hasil kendali,  $y^d$  adalah referensi, dan  $n$  adalah jumlah data yang diperoleh. Sedangkan MAE yang diharapkan adalah lebih kecil dari  $1^\circ$ .



Gambar 3.3: Perancangan penjejak matahari aktif-pasif

## 5. Hasil dan analisis

Terdapat dua jenis data hasil simulasi dan pengujian yaitu data luaran sistem kendali terkait dengan akurasi penjejukan dan data PV panel terkait dengan peningkatan efisiensi yang dicapai. Pada rekaman data luaran kendali terdiri atas sudut *altitude* dan *azimuth*, sedangkan data PV yaitu daya yang dihasilkan panel surya.

Terhadap data hasil simulasi dan pengujian sistem kendali pada penjejak matahari, dilakukan analisis *transient response* dalam domain waktu yang direpresentasikan melalui indeks performansi kendali meliputi *rise time* ( $t_r$ ), yaitu waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai posisi 90% dari *setpoint* yang diberikan, *settling time* ( $t_s$ ) yaitu waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi tunak (*steady*), *maximum percentage overshoot* (MO) yaitu lewatan maksimum yang dicapai oleh sistem sebelum menuju keadaan tunak, *error steady state* ( $e_{ss}$ ) yaitu deviasi yang terjadi pada keadaan tunak.

Terhadap data daya yang dihasilkan, dilakukan perhitungan persentase efisiensi antara PV dengan penjejak dan PV tetap. Rumus mencari efisiensi adalah:

$$\text{Efisiensi PV} = \frac{\text{daya PV penjejak} - \text{daya PV tetap}}{\text{daya PV tetap}} \times 100\% \quad (3.2)$$

#### 6. Penarikan Kesimpulan

Setelah simulasi dilakukan, selanjutnya penarikan kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh. Selain kesimpulan, saran juga diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

#### 7. Penyusunan tesis

Semua hasil simulasi dan pengujian dituangkan dalam satu laporan ilmiah berdasarkan aturan dan panduan yang berlaku di Departemen Matematika, Fakultas Matematika, Komputasi, dan Sains Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.



## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam Bab 4 ini dijelaskan tentang hasil yang diperoleh dari penelitian. Hasil penelitian tersebut diklasifikasikan menjadi tiga pengendali yaitu sistem kendali penjejak pasif, sistem kendali penjejak aktif, dan sistem kendali penjejak kombinasi aktif-pasif. Namun sebelum membahas sistem kendali, perlu diamati lintasan matahari di lokasi pengamatan dan saat waktu pengamatan. Selanjutnya hasil yang diperoleh dibaca, diterjemahkan dan dianalisis.

#### 4.1 Lintasan Matahari dari Lokasi Pengamatan

Trajektori atau lintasan matahari akan terus berbeda setiap perubahan posisi dan tanggal pengamatan. Misalkan posisi pengamatan berada di dua tempat berbeda yaitu di ekuator dan di posisi belahan bumi utara secara bersamaan mengamati posisi matahari pada *vernal equinox* atau pada tanggal 21 Maret tahun tersebut. Dua pengamatan tersebut dianggap pada posisi bujur yang sama sehingga tidak ada perbedaan waktu *Coordinated Universal Time* (singkatan resmi: UTC atau lebih dikenal dengan GMT). Tepat pada pukul 12.00 di kedua tempat tersebut akan melihat posisi matahari yang berbeda. Pengamat yang berada di ekuator tidak dapat menemukan bayangan benda karena matahari tepat berada  $90^\circ$  atau tegak lurus dengan permukaan tanah. Berbeda dengan pengamatan di ekuator, pengamat yang berada di belahan bumi utara melihat bayangan benda mengarah ke utara atau dengan kata lain posisi matahari yang terlihat adalah di sebelah selatan benda.

Posisi pengamatan penelitian ini adalah di Kampus Institut Teknologi Sepuluh Nopember Sukolilo Surabaya dengan posisi lintang  $-7^\circ 18' 49.51''$  LS dan bujur  $112^\circ 43' 5.7''$  BT. Posisi lokasi pengamatan berada tidak jauh dari bidang ekuator sehingga sinar matahari yang diterima adalah  $\pm 12$  jam setiap hari sepanjang tahunnya. Namun walaupun berada tidak jauh dari ekuator, posisi matahari tegak lurus terhadap bidang tanah tidak pada tanggal 21 Maret melainkan pada 4 Maret atau hari ke 63 setiap tahunnya. Tanggal tersebut diperoleh dari Persamaan (2.1) dengan memberikan nilai posisi lintang

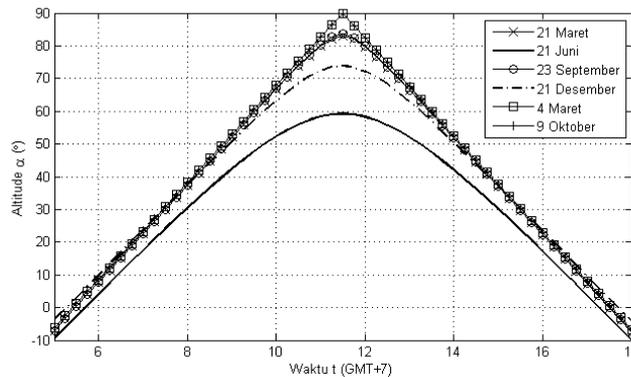
sebagai sudut deklinasi  $\delta = \phi$ . Sebelum menghitung tanggal, terlebih dahulu mengubah posisi lintang ke bentuk derajat.

$$\phi = -(7 + 18 \times \frac{1}{60} + 49.51 \times \frac{1}{3600}) = -7.3138^\circ$$

Setelah memperoleh nilai lintang, selanjutnya menghitung tanggal dengan memberi nilai  $\delta = \phi = -7.3138^\circ$ .

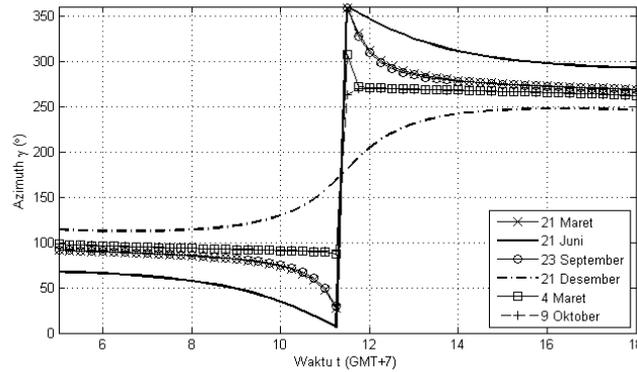
$$n = \frac{365}{360^\circ} \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{23.45^\circ} \right) - 284 = 63$$

dimana nilai  $n = 63$  memiliki jarak 18 hari sebelum *vernal equinox* 21 Maret setiap tahun. Dengan kaidah yang sama dalam menentukan posisi matahari tertinggi, 17 hari setelah *autumnal equinox* 23 September atau tanggal 9 Oktober setiap tahunnya juga memiliki posisi tegak lurus dengan permukaan tanah. Tanggal ini diperoleh dari sudut deklinasi pada tanggal tersebut tepat sama dengan posisi lintang lokasi penelitian. Untuk lebih jelas menunjukkan perbedaan posisi matahari yang diamati dari kampus ITS, selanjutnya diambil enam tanggal sebagai referensi lintasan matahari. Enam tanggal tersebut yaitu *vernal equinox* 21 Maret, *summer solstice* 21 Juni, *autumnal equinox* 23 September, *winter solstice* 21 Desember, *local vernal equinox/ ITS's vernal equinox* 4 Maret, dan *local autumnal equinox/ ITS's autumnal equinox* 9 Oktober. Penyebutan keenam tanggal tersebut tidak diikuti tahun karena lintasan yang terbentuk akan sama setiap tahunnya. Lintasan matahari dibentuk oleh dua posisi sudut yaitu *altitude* dan *azimuth* serta menggunakan sudut jam yang telah dijelaskan dalam bab sebelumnya mengikuti Persamaan (2.6), (2.7), dan (2.8).



Gambar 4.1: Sudut *altitude* matahari

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa pada tanggal 4 Maret, sudut *altitude* mencapai nilai tertinggi yaitu  $90^\circ$ . Berbeda dengan tanggal tersebut, tanggal-tanggal lain memberi gambaran bahwa tidak setiap saat matahari dapat berada tepat tegak lurus dengan bidang tanah. Informasi lain yang diperoleh adalah tanggal 21 Desember merupakan waktu siang yang terpanjang dan tanggal 21 Juni merupakan waktu terpendek penyinaran matahari.



Gambar 4.2: Sudut *azimuth* matahari

Perubahan waktu penyinaran dapat ditunjukkan oleh sudut *azimuth* posisi matahari. Pada Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa matahari akan selalu berada di bumi selatan yaitu berada diantara  $115^\circ \leq \gamma \leq 250^\circ$  pada tanggal 21 Desember. Karena lokasi penelitian berada di lintang selatan, maka waktu siang akan semakin panjang saat tanggal tersebut. Disisi lain, matahari selalu berada di bumi utara pada tanggal 21 Juni yaitu posisi sudut *azimuth*  $\gamma \leq 70^\circ$  dan  $\gamma > 290^\circ$ . Hal ini menyebabkan lokasi penelitian memiliki waktu siang yang pendek. Hal berbeda ditunjukkan pada saat *ITS's vernal equinox*, terlihat sudut terbentuk konstan di  $\gamma \leq 90^\circ$  dan  $\gamma > 270^\circ$ . Hal ini mengisyaratkan bahwa tanpa ada gangguan besar, sudut berputar  $180^\circ$  dan kembali dalam gerak mulus. Lintasan matahari pada tanggal 4 Maret merupakan dasar dalam pembentukan penjejak matahari satu sumbu dengan metode pasif.

Proses pembentukan dan perhitungan posisi sudut *altitude* dan *azimuth* dapat dilihat pada Lampiran A.

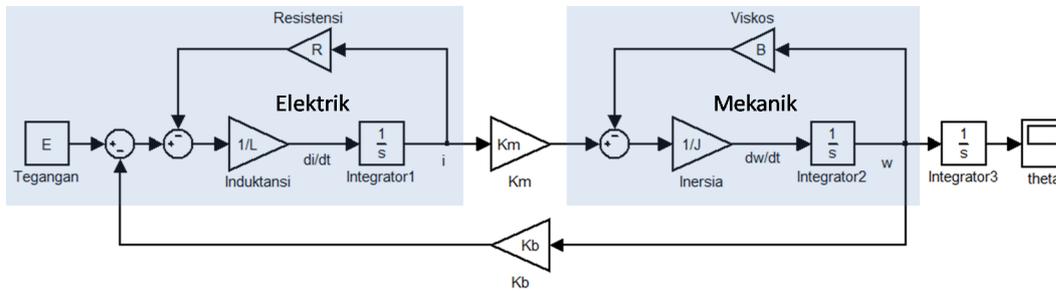
## 4.2 Penjejak Matahari Pasif

Dalam menjejak posisi matahari, *altitude* dan *azimuth* merupakan sudut lintasan referensi untuk pergerakan panel surya. Panel surya dilengkapi dengan dua motor penggerak dimana keduanya menerjemahkan sudut-sudut posisi matahari ke dalam sudut-sudut mekanik alat. Posisi sudut *altitude*

didefinisikan sebagai referensi sudut *pitch* dan posisi sudut *azimuth* sebagai sudut referensi sudut *yaw*. *Model Predictive Control* (MPC) berusaha memberikan nilai pengendali  $u$  yaitu tegangan yang akan diberikan ke masing-masing motor sehingga *pitch* dan *yaw* mampu mendekati sudut *altitude* dan *azimuth*.

#### 4.2.1 Perancangan Kendali Penjejak Pasif

Perancangan kendali penjejak pasif menggunakan dua motor DC sebagai penggerak. Kedua motor ini dapat bekerja secara terpisah, sehingga model dinamis kedua motor adalah sama yaitu Persamaan (2.9) sebagai bagian elektrik dan Persamaan (2.10) sebagai bagian mekanik. Pemodelan persamaan tersebut dapat di lihat pada sistem simulasi berikut.



Gambar 4.3: Motor

Gambar 4.3 menghasilkan nilai akhir berupa sudut motor, baik itu *pitch* maupun *yaw*. Model ini juga digunakan dalam pengendali aktif dengan tambahan alat deteksi cahaya yang disebut LDR. Tetapi, model ini tidak dapat langsung digunakan untuk pengendali MPC. Masukan MPC berupa matriks ruang keadaan yang didiskretkan. Oleh sebab itu, langkah selanjutnya adalah membentuk matriks ruang keadaan dari persamaan diatas.

Persamaan mekanik dan elektrik selanjutnya dibentuk ke dalam matriks ruang keadaan dengan menambahkan persamaan sudut motor. Sistem persamaan baru yang terbentuk adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\theta(t)}{dt} &= \omega(t) \\
 \frac{d\omega(t)}{dt} &= \frac{1}{J} (K_m i(t) - B\omega(t)) \\
 \frac{di(t)}{dt} &= \frac{1}{L} (E(t) - Ri(t) - K_b\omega(t))
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Sistem Persamaan (4.1) dapat dibentuk dalam matriks ruang keadaan dengan  $E(t)$  sebagai tegangan masukan ( $\mathbf{u}$ ) sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta(t)}{dt} \\ \frac{d\omega(t)}{dt} \\ \frac{di(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & \frac{K_m}{J} \\ 0 & -\frac{K_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4.2)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ i \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Sistem matriks ruang keadaan tersebut dapat ditulis ulang sebagai:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_{3 \times 3} \mathbf{x} + \mathbf{B}_{3 \times 1} \mathbf{u} \quad (4.4)$$

$$y = \mathbf{C}_{1 \times 3} \mathbf{x} \quad (4.5)$$

dimana vektor  $\dot{\mathbf{x}}$ ,  $\mathbf{x}$ , dan matriks  $\mathbf{A}_{3 \times 3} \in \mathbb{R}$ ,  $\mathbf{B}_{3 \times 1} \in \mathbb{R}$  pada sistem di Persamaan (4.4) bersesuaian dengan sistem di Persamaan (4.2). Begitu pula nilai  $y$ , matriks  $\mathbf{C}_{1 \times 3} \in \mathbb{R}$  dan vektor  $\mathbf{x}$  pada sistem Persamaan (4.5) bersesuaian dengan sistem Persamaan (4.3).

Setelah memperoleh sistem Persamaan (4.1), selanjutnya MPC didesain dengan menggunakan sistem Persamaan (2.26) dengan parameter *prediction horizon*  $P = 10$ , *control horizon*  $M = 10$ ,  $Q = [100]$ ,  $R = [1]$ ,  $u_{\min} = -12$ ,  $u_{\max} = 12$ , dan tanpa pembatasan nilai variabel keadaan  $\mathbf{x}$ . Namun matriks  $\mathbf{A}$  dan  $\mathbf{B}$  pada Persamaan (4.4) harus didiskretkan terlebih dahulu, dengan menggunakan parameter pada Tabel 3.1, dan waktu sampel sebesar  $T=0.1$  detik diperoleh matriks  $\mathbf{A}_d$  dan  $\mathbf{B}_d$  sesuai prosedur pada Persamaan (2.23) dan Persamaan (2.24).

$$A_d(0.1) = \begin{bmatrix} 1 & 0.0958 & 0.0016 \\ 0 & 0.9175 & 0.0150 \\ 0 & -0.0016 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d(0.1) = \begin{bmatrix} 0.0916 \\ 1.8070 \\ 0.0518 \end{bmatrix}$$

Matriks yang didiskretkan  $A_d$  dan  $B_d$  tersebut selanjutnya disubstitusi ke Persamaan (2.26) menjadi pemrograman non linier dengan fungsi tujuan

meminimumkan selisih antara referensi dan hasil pendekatan  $y$ . Karena variabel keadaan  $\mathbf{x}$  tidak dibatasi, sehingga kendala pada variabel keadaan tidak berlaku dan hanya variabel masukan  $\mathbf{u}$  yang dibatasi.

$$\min_{U(k)} J(k) = \sum_{i=1}^{10} \|y(k+i|k) - y_d(i)\|_Q^2 + \sum_{j=1}^{10} \|u(k+j-1|k)\|_R^2$$

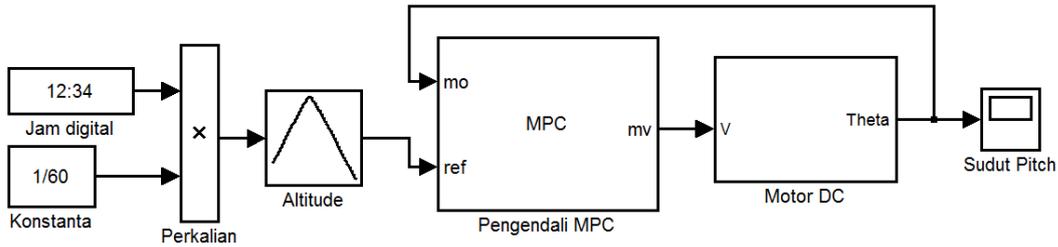
terhadap kendala:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \begin{bmatrix} 1 & 0.0958 & 0.0016 \\ 0 & 0.9175 & 0.0150 \\ 0 & -0.0016 & 0 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.0916 \\ 1.8070 \\ 0.0518 \end{bmatrix} u(k) \\ y(k+1) &= \theta(k) \\ -12 &\leq u(k+j-1|k) \leq 12 \\ j &= 1, \dots, 10 \end{aligned} \quad (4.6)$$

dimana  $y$  adalah sudut *pitch* atau *yaw*,  $y_d$  adalah sudut *altitude* atau *azimuth*,  $k$  adalah banyaknya data referensi. Pada luaran  $y$  hanya menghitung  $\theta(k)$ , dimana  $\theta$  menjadi sudut *pitch* pada penjejak *altitude* dan  $\theta$  menjadi sudut *yaw* pada penjejak *azimuth*.

#### 4.2.2 Penjejak Sudut *Altitude*

Kendali penjejak sudut *altitude* dilakukan pada motor pertama yang menghasilkan sudut *pitch*. Desain simulasi penjejak sudut ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4.4: Model simulasi penjejak pasif sudut *altitude*

Gambar 4.4 memiliki masukan waktu untuk menghitung sudut *altitude* sebagai referensi penjejak matahari. Selain waktu, masukan lain yang dibutuhkan adalah tanggal pengujian. Dalam kasus ini, tanggal pengujian diambil dari pembahasan pada subbab 4.1 yaitu *vernal equinox* 21 Maret, *summer solstice* 21 Juni, *autumnal equinox* 23 September, *winter solstice*

21 Desember, *local vernal equinox/ ITS's vernal equinox* 4 Maret, dan *local autumnal equinox/ ITS's autumnal equinox* 9 Oktober. Sudut *altitude* yang sudah diperoleh, selanjutnya menjadi referensi lintasan untuk metode MPC. MPC menghasilkan nilai masukan vektor  $u$  pada sistem (4.4). Nilai  $u$  yang diperoleh adalah besaran tegangan yang kembali dimasukkan ke dalam sistem motor Gambar 4.3. Hasil akhir dari model simulasi tersebut adalah sudut *pitch*  $\theta_{pitch}$ . Dengan menggunakan enam tanggal pengujian tersebut, hasil simulasi penjejakan sudut *altitude* terlampir pada Lampiran D.

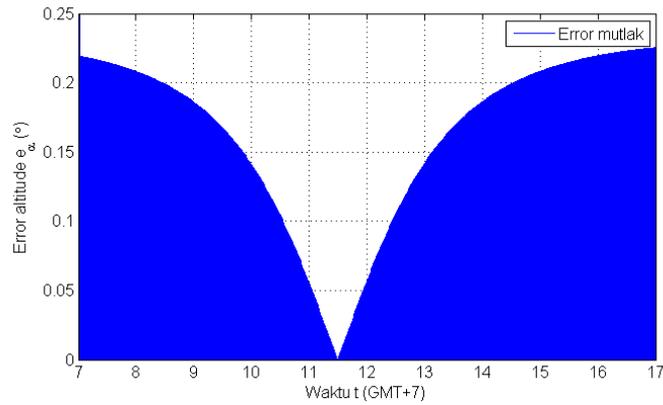
Hasil simulasi Gambar 4.4 dengan enam tanggal pengujian memiliki nilai keakuratan yang berbeda-beda. Nilai keakuratan tersebut dihitung dengan menggunakan *mean absolute error* (MAE) yang dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 4.1: MAE penjejakan sudut *altitude* dengan MPC

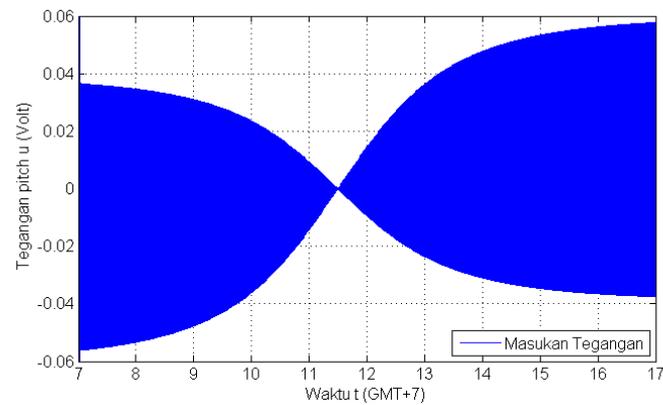
<b>Tanggal Pengujian</b>	<b>MAE</b>
4 Maret	0.0376°
21 Maret	0.0348°
21 Juni	0.0251°
23 September	0.0350°
9 Oktober	0.0376°
21 Desember	0.0302°

Tabel 4.1 menunjukkan bahwa hasil simulasi penjejakan sudut *altitude* dengan menggunakan pengendali MPC mampu mendekati nilai referensi dengan akurasi yang sangat baik yaitu sekitar 4%. MAE terkecil dan terbesar ditunjukkan berturut-turut pada simulasi tanggal 21 Juni dan 4 Maret. Hal ini disebabkan oleh besar sudut *altitude* pada setiap tanggal pengujian. Berdasarkan Gambar 4.1 dapat dilihat bahwa sudut terendah adalah 21 Juni dan sudut tertinggi pada 4 Maret. Sebagai gambaran umum tentang MAE simulasi, *error* mutlak tanggal 21 Juni dapat dilihat pada Gambar 4.5.

Seperti yang telah ditunjukkan oleh Tabel 4.1, nilai *error* Gambar 4.5 sangat kecil yaitu nilai *mean absolute error* MAE=0.0251°. *Error* terjadi sebelum dan setelah melewati waktu puncak tengah hari, namun pernah berada pada nilai yang sangat tepat dengan referensi pada waktu tengah hari. Hal ini dapat disebabkan oleh pengurangan tegangan secara signifikan oleh sistem agar motor dapat bergerak turun setelah mencapai puncak sudut tertinggi pada tanggal tersebut. Tegangan yang dihasilkan oleh pengendali MPC dapat dilihat pada Gambar 4.6.

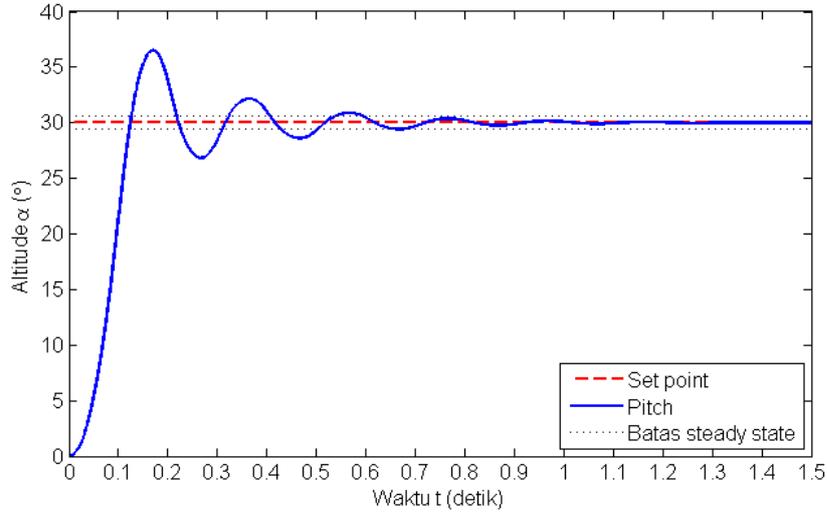


Gambar 4.5: *Error* mutlak penjejak sudut *altitude* dengan MPC



Gambar 4.6: Tegangan masukan penjejak sudut *altitude* dengan MPC

Tegangan yang diberikan untuk sudut *pitch* memiliki nilai dibawah 0 Volt yang berarti terjadi pergerakan berlawanan dengan arah sebelumnya. Pada waktu puncak tengah hari, tegangan yang dihasilkan adalah 0 Volt yang disebabkan oleh *error* yang sangat kecil seperti yang ditampilkan Gambar 4.5. Tegangan masukan bernilai negatif berusaha untuk memperkecil *error* yang disebabkan oleh kelebihan tegangan *overshoot* saat mendekati referensi. Begitu pula dengan masukan tegangan positif yang berusaha menaikkan kembali sudut *pitch* yang mengalami *undershoot*. Proses *overshoot* dan *undershoot* pengendalian sudut *pitch* mengikuti *altitude* dapat dilihat pada proses pengujian nilai *transient response* jika diberi referensi konstan. Referensi konstan atau *set point* untuk sudut *altitude* adalah  $30^\circ$  dengan waktu pengujian 1.5 detik. Hasil pengujian diperlihatkan pada Gambar 4.7.

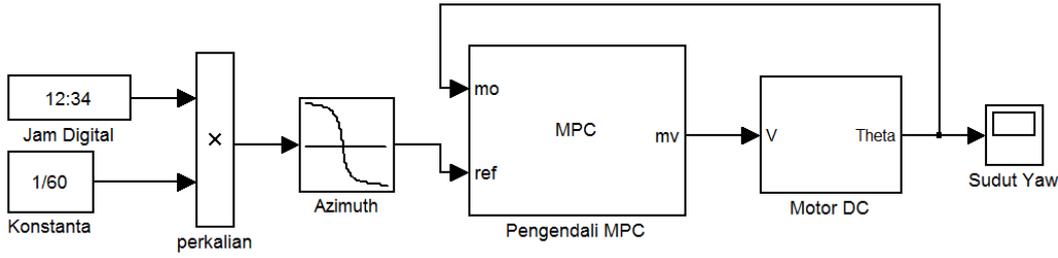


Gambar 4.7: Uji respon sistem penjejak MPC pada sudut *altitude*

Sistem yang terbentuk memiliki respon yang sangat baik, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 90% *set point* (*rise time*)  $t_r$  sekitar 0.1151 detik. Sistem menghasilkan *overshoot* maksimum yang cukup besar pada waktu *peak time*  $t_p = 0.1697$  detik yaitu  $6.5198^\circ$  atau sebesar 21.73% sebagai akibat terlalu kecilnya *rise time*. Waktu mencapai posisi stabil di sekitar *set point* (*settling time*)  $t_s$  juga sangat kecil yaitu sekitar 0.5937 detik dimana setelah waktu tersebut deviasi *error* yang terbentuk berada dalam rentang  $e_{ss} \leq 0.0073^\circ$ . Terlihat sistem ini dapat mencapai posisi stabil atau tunak setelah beberapa kali *overshoot*.

### 4.2.3 Penjejak Sudut *Azimuth*

Dengan menggunakan prinsip yang sama dengan penjejak sudut *altitude*, penjejak sudut *azimuth* hanya merubah sudut referensi untuk mendapatkan sudut *yaw* motor kedua. Berbeda dengan sudut *pitch* yang hanya bergerak  $0^\circ \leq \theta_{pitch} \leq 180^\circ$ , sudut *yaw* dapat bergerak satu putaran penuh yaitu  $0^\circ \leq \theta_{yaw} \leq 360^\circ$ . Walaupun demikian, pada kenyataannya sudut *pitch* hanya bergerak  $0^\circ \leq \theta_{pitch} \leq 90^\circ$ , sudut *yaw* hanya bergerak  $90^\circ \leq \theta_{yaw} \leq 270^\circ$  pada saat matahari berada di bumi bagian selatan (1 Januari - 21 Maret dan 23 September - 31 Desember), dan sudut *yaw* bergerak  $\theta_{yaw} \leq 90^\circ$  dan  $\theta_{yaw} \geq 270^\circ$  pada saat matahari berada di bumi utara (21 Maret - 23 September).



Gambar 4.8: Model simulasi penjejak pasif sudut *azimuth*

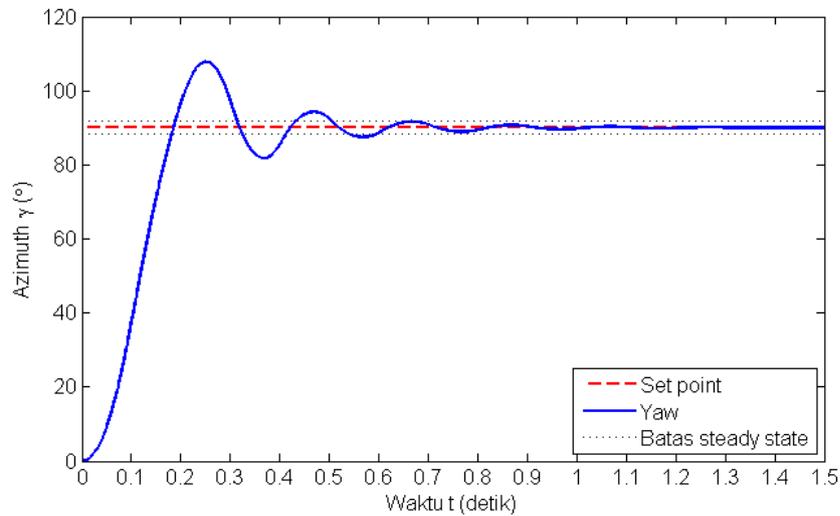
Gambar 4.8 merupakan desain simulasi penjejak sudut *azimuth* menggunakan MPC. Desain ini juga memiliki masukan waktu dan referensi sudut *azimuth* untuk menghasilkan tegangan  $v$  sehingga sudut *yaw* mampu menjejak sudut *azimuth*. Dengan prosedur yang sama pada penjejak sudut *altitude*, hasil simulasi dari Gambar 4.8 dapat dilihat pada Lampiran D dan MAE dari masing-masing tanggal pengujian dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.2: MAE penjejak sudut *azimuth* dengan MPC

Tanggal Pengujian	MAE
4 Maret	0.0587°
21 Maret	0.0589°
21 Juni	0.0410°
23 September	0.0593°
9 Oktober	0.0625°
21 Desember	0.0557°

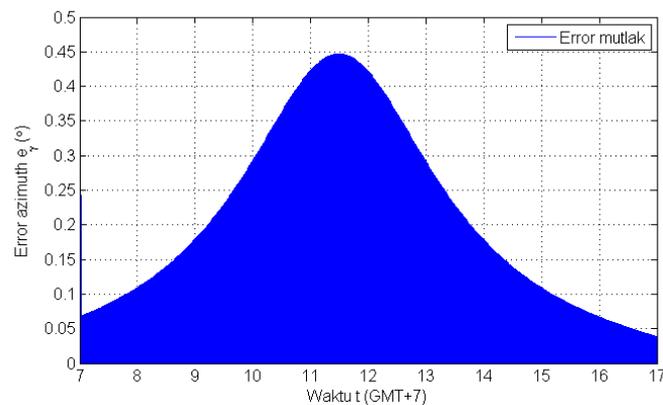
Berdasarkan Tabel 4.2, MAE yang dihasilkan juga memiliki nilai yang sangat kecil yaitu sekitar 6%. MAE yang dihasilkan berbeda 2% dibandingkan dengan MAE yang dihasilkan pada penjejak sudut *altitude*. Hal ini disebabkan oleh nilai pertama referensi sudut *azimuth* lebih besar dari nilai pertama referensi sudut *altitude* sehingga *error* yang terbentuk lebih besar pada penjejak sudut *azimuth*. Pada pengujian *transient response*, nilai pertama sudut referensi tersebut menjadi *set point* yaitu 90°.

Pengujian *transient response* dapat dilihat pada Gambar 4.9. Sistem yang terbentuk memiliki respon yang sangat baik, yaitu *rise time*  $t_r$  sekitar 0.1678 detik. Waktu mencapai posisi tunak (*settling time*)  $t_s$  juga sangat kecil yaitu sekitar 0.5044 detik dimana setelah waktu tersebut deviasi *error* yang terbentuk adalah  $e_{ss} \leq 0.0314^\circ$ . Dilihat dari *overshoot* yang terjadi, sistem ini mencapai overshoot maksimum pada waktu  $t_p = 0.2507$  detik dengan nilai kelebihan dari sudut *yaw* sebesar 17.7673° atau 19.74%. Presentase *overshoot*



Gambar 4.9: Uji respon sistem penjejak MPC pada sudut *azimuth*

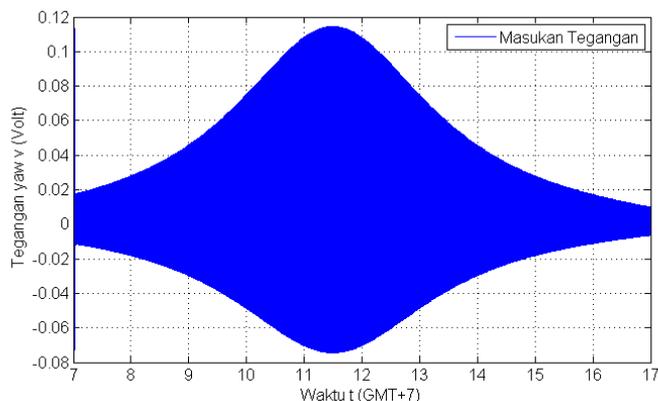
maksimum pada penjejak sudut *azimuth* lebih baik dari penjejak sudut *altitude* karena *rise time* pada sistem ini lebih besar dari sistem penjejak sudut *altitude*. Simulasi tanggal 21 Juni pada Lampiran D digunakan untuk memperlihatkan gambaran umum penjejakan sudut *azimuth* dengan pengendali MPC.



Gambar 4.10: *Error* mutlak penjejak sudut *azimuth* dengan MPC

Gambar 4.10 memberi gambaran tentang besar, waktu dan posisi *error* berada. Sebagian besar *Error* memiliki nilai tertinggi pada saat waktu puncak tengah hari. Hal ini disebabkan oleh pengurangan tegangan agar mencapai sudut *altitude*  $0^\circ$ . Nilai *error* ini akan semakin besar saat terjadi perubahan posisi yang besar seperti pada waktu tengah hari tersebut. Hal ini memperkuat alasan terbentuknya nilai *error*  $0^\circ$  pada penjejakan sudut *altitude*. Pada waktu puncak sudut *altitude* memiliki titik balik sehingga tegangan yang dibutuhkan

0 Volt, sedangkan pada penjejak sudut *azimuth* tidak terdapat titik balik. Tegangan yang dibutuhkan untuk menjejak sudut *azimuth* dapat dijelaskan pada gambar berikut:



Gambar 4.11: Tegangan masukan penjejak sudut *azimuth* dengan MPC

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa masukan tegangan untuk sudut *yaw* dalam menjejak sudut *azimuth* memiliki bentuk tidak simetris antara di atas garis 0 Volt. Hal ini memberi gambaran bahwa sudut *yaw* sering mengalami *undershoot* sehingga tegangan positif harus mampu menghilangkan *undershoot* tersebut. Perubahan posisi sudut *azimuth* cenderung membesar saat mendekati waktu puncak tengah hari dan kembali mengecil saat di penghujung waktu simulasi. Hal ini menyebabkan nilai tegangan juga memiliki sifat yang sama yaitu memiliki tegangan yang kecil di permulaan dan akhir simulasi, namun memiliki tegangan yang besar saat di waktu puncak tengah hari.

### 4.3 Penjejak Matahari Aktif

Penjejak sudut-sudut lintasan matahari menggunakan metode aktif memanfaatkan sensitifitas dari sensor cahaya LDR. Metode aktif secara konvensional dapat diterapkan pada mikrokontroler dengan pemrograman dasar, yaitu motor bergerak maju (*forward step*) jika sepasang sensor memiliki *error*  $e_s$  yang bernilai positif dan akan bergerak mundur (*backward step*) jika nilai *error*  $e_s$  bernilai negatif. Pada penelitian ini, nilai  $e_s$  diperoleh dari selisih antara sepasang pembagi tegangan LDR. Dengan masukan tegangan untuk sensor  $V_{in} = 5$  Volt dan resistor  $R = 1000$  Ohm, perhitungan sebaran nilai  $e_s$  sepasang LDR mengikuti rumus sebagai berikut:

$$V_{out} = \frac{R}{R + R_{LDR}} V_{in} \quad (4.7)$$

dimana  $R_{LDR}$  diperoleh dari Persamaan (2.11). Nilai  $R_{LDR}$  sangat dipeengaruhi oleh intensitas cahaya pada waktu tertentu. Pendekatan nilai  $R_{LDR}$  dengan 0 dan  $\infty$  bertujuan agar hasil tegangan sensor cahaya selalu berada dalam rentang pembagi tegangan. Batas-batas pembagi tegangan dirumuskan sebagai berikut:

$$R_{LDR} \rightarrow \infty, \quad V_{out} = 0 \quad (4.8)$$

$$R_{LDR} \rightarrow 0, \quad V_{out} = V_{in} \quad (4.9)$$

Berdasarkan (4.8) dan (4.9), ada beberapa kemungkinan yang dapat terjadi dengan perubahan pembagi tegangan setiap LDR, yaitu:

1. Jika LDR pertama mencapai tahanan yang sangat besar karena cahaya yang didapat sangat kecil dan LDR kedua memperoleh cahaya maksimum, maka selisih  $V_{out}$  yang diperoleh mendekati -5 Volt.
2. Jika LDR kedua mencapai tahanan yang sangat besar karena cahaya yang didapat sangat kecil dan LDR pertama memperoleh cahaya maksimum, maka selisih  $V_{out}$  yang diperoleh mendekati 5 Volt.
3. Jika kedua LDR memiliki tahanan yang sama karena cahaya yang didapat memiliki intensitas yang sama, maka selisih  $V_{out}$  yang diperoleh 0 Volt.

Simulasi kendali aktif membutuhkan data intensitas cahaya untuk menentukan besar  $V_{out}$ . Intensitas cahaya yang digunakan adalah intensitas cahaya yang ideal dalam satu hari pengujian yaitu mengikuti Persamaan (2.12).

#### 4.3.1 Perancangan Kendali Penjejak Aktif

Berdasarkan Persamaan (4.8) dan Persamaan (4.9) dapat dikembangkan pergerakan motor tidak hanya bergerak satu langkah maju atau mundur, namun dapat dibentuk dengan nilai masukan tegangan lebih beragam menggunakan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy*. Fungsi keanggotaan yang digunakan untuk masukan adalah *error* sepasang LDR yang bersesuaian. Sebaran nilai *error* yang mungkin terjadi adalah  $-5 \leq e_s \leq 5$  dalam satuan Volt. Dengan membagi secara proporsional nilai  $e_s$  diperoleh

fungsi keanggotaan masukan sebagai berikut:

$$\mu_{NB}(e_s) = \begin{cases} 1 & , e_s < -5 \\ \frac{e_s + 3.33}{-5 + 3.33} & , -5 \leq e_s \leq -3.33 \\ 0 & , e_s > -3.33 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\mu_{NM}(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < -5 \\ \frac{e_s + 5}{-3.33 + 5} & , -5 \leq e_s \leq -3.33 \\ \frac{e_s + 1.667}{-3.33 + 1.667} & , -3.33 \leq e_s \leq -1.667 \\ 0 & , e_s > -1.667 \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\mu_{NS}(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < -3.33 \\ \frac{e_s + 3.33}{-1.667 + 3.33} & , -3.33 \leq e_s \leq -1.667 \\ \frac{e_s}{-1.667} & , -1.667 \leq e_s \leq 0 \\ 0 & , e_s > 0 \end{cases} \quad (4.12)$$

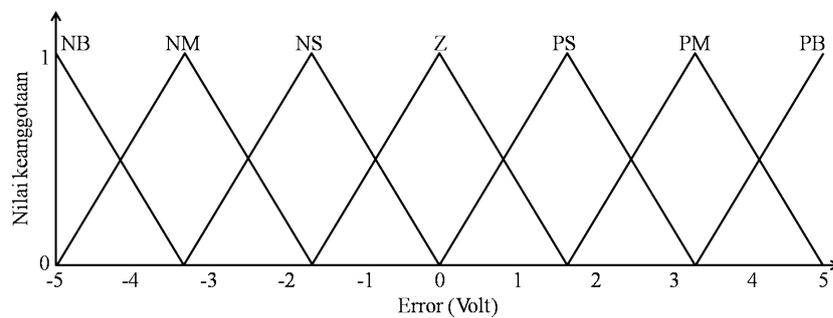
$$\mu_Z(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < -1.667 \\ \frac{e_s + 1.667}{1.667} & , -1.667 \leq e_s \leq 0 \\ \frac{e_s - 1.667}{-1.667} & , 0 \leq e_s \leq 1.667 \\ 0 & , e_s > 1.667 \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\mu_{PS}(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < 0 \\ \frac{e_s}{1.667} & , 0 \leq e_s \leq 1.667 \\ \frac{e_s - 3.33}{1.667 - 3.33} & , 1.667 \leq e_s \leq 3.33 \\ 0 & , e_s > 3.33 \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\mu_{PM}(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < 1.667 \\ \frac{e_s - 1.667}{3.33 - 1.667} & , 1.667 \leq e_s \leq 3.33 \\ \frac{e_s - 5}{1.667 - 5} & , 3.33 \leq e_s \leq 5 \\ 0 & , e_s > 5 \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\mu_{PB}(e_s) = \begin{cases} 0 & , e_s < 3.33 \\ \frac{e_s - 3.33}{5 - 3.33} & , 3.33 \leq e_s \leq 5 \\ 1 & , e_s > 5 \end{cases} \quad (4.16)$$

dimana fungsi keanggotaan dapat dibagi menjadi tujuh kategori yaitu: *Negative Big* NB, *Negative Medium* NM, *Negative Small* NS, *Zero* Z, *Positive Small* PS, *Positive Medium* PM, dan *Positive Big* PB. Pembagian fungsi keanggotaan masukan *fuzzy* secara proporsional didasarkan pada penggunaannya yang dapat digunakan untuk kedua masukan *fuzzy* dalam menjejak sudut *altitude* dan *azimuth*. Hal ini dianggap lebih efisien dibandingkan dengan memodifikasi masukan dan luaran di kedua pengendali *fuzzy*. Fungsi keanggotaan masing-masing kategori masukan pengendali *fuzzy* dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.12: Masukan pengendali *fuzzy*

Langkah selanjutnya adalah menentukan luaran dari pengendali *fuzzy*. Berbeda dengan tegangan maksimum dan minimum pada MPC, tegangan yang menjadi luaran pada pengendali *fuzzy* tidak dapat diberikan nilai rentang yang sangat besar. Hal ini disebabkan oleh proses defuzzifikasi yang dapat menerjemahkan nilai yang sangat besar pula. Fungsi keanggotaan juga dibagi menjadi tujuh kategori yaitu: *Counter Clockwise Fast* CCWF, *Counter Clockwise Medium* CCWF, *Counter Clockwise Slow* CCWS, *Stop* S, *Clockwise Slow* CWS, *Clockwise Medium* CWM, dan *Clockwise Fast* CWF. Dengan menggunakan metode *trial and error* diperoleh fungsi keanggotaan luaran untuk penjejak *altitude* dan *azimuth* yang berbeda. Nilai rentang tegangan masukan yang digunakan juga berbeda karena lintasan referensi juga berbeda.

Lintasan *altitude* cenderung memiliki bentuk yang sama di setiap tanggal pengujian, sedangkan lintasan *azimuth* memiliki perbedaan yang cukup besar di setiap tanggal pengujian. Pada referensi lintasan *altitude*, nilai pertamanya memiliki perbedaan yang tidak terlalu besar dari posisi  $0^\circ$  sehingga  $e_s$  juga dipastikan tidak terlalu besar. Posisi sudut tertinggi *altitude* adalah  $90^\circ$  sehingga sudut tempuh pengendali *fuzzy* adalah  $0^\circ-90^\circ$ . Dengan menggunakan *trial and error* diperoleh luaran pengendali *fuzzy* untuk penjejak

sudut *altitude* sebagai berikut:

$$\mu_{CCWF}(u) = \begin{cases} 1 & , u < -1.707 \\ \frac{u + 1.286}{-1.707 + 1.286} & , -1.707 \leq u \leq -1.286 \\ 0 & , u > -1.286 \end{cases} \quad (4.17)$$

$$\mu_{CCWM}(u) = \begin{cases} 0 & , u < -1.707 \\ \frac{u + 1.707}{-1.286 + 1.707} & , -1.707 \leq u \leq -1.286 \\ \frac{u + 0.4645}{-1.286 + 0.4645} & , -1.286 \leq u \leq -0.4645 \\ 0 & , u > -0.4645 \end{cases} \quad (4.18)$$

$$\mu_{CCWS}(u) = \begin{cases} 0 & , u < -1.286 \\ \frac{u + 1.286}{-0.4645 + 1.286} & , -1.286 \leq u \leq -0.4645 \\ \frac{u}{-0.4645} & , -0.4645 \leq u \leq 0 \\ 0 & , u > 0 \end{cases} \quad (4.19)$$

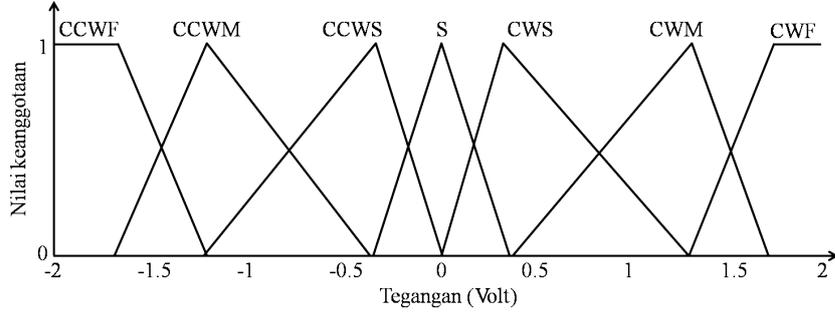
$$\mu_S(u) = \begin{cases} 0 & , u < -0.4645 \\ \frac{u + 0.4645}{0.4645} & , 0.4645 \leq u \leq 0 \\ \frac{0.4645}{u - 0.4645} & , 0 \leq u \leq 0.4645 \\ \frac{0.4645}{-0.4645} & , 0 \leq u \leq 0.4645 \\ 0 & , u > 0.4645 \end{cases} \quad (4.20)$$

$$\mu_{CWS}(u) = \begin{cases} 0 & , u < 0 \\ \frac{u}{0.4645} & , 0 \leq u \leq 0.4645 \\ \frac{0.4645}{u - 1.286} & , 0.4645 \leq u \leq 1.286 \\ \frac{0.4645 - 1.2826}{0.4645 - 1.2826} & , 0.4645 \leq u \leq 1.286 \\ 0 & , u > 1.286 \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\mu_{CWM}(u) = \begin{cases} 0 & , u < 0.4645 \\ \frac{u - 0.4645}{1.286 - 0.4645} & , 0.4645 \leq u \leq 1.286 \\ \frac{u - 1.707}{1.286 - 1.707} & , 1.286 \leq u \leq 1.707 \\ 0 & , u > 1.707 \end{cases} \quad (4.22)$$

$$\mu_{CWF}(u) = \begin{cases} 0 & , u < 1.286 \\ \frac{u - 1.286}{1.707 - 1.286} & , 1.286 \leq u \leq 1.707 \\ 1 & , u > 1.707 \end{cases} \quad (4.23)$$

dimana masing-masing fungsi keanggotaan *fuzzy* tersebut dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.13: Luaran pengendali *fuzzy* untuk sudut *altitude*

Berbeda dengan penjejak sudut *altitude*, pengendali *fuzzy* pada penjejak sudut *azimuth* memiliki rentang yang lebih besar yaitu mulai dari  $\pi/2$  sampai  $-\pi/2$  pada fase matahari di bumi utara dan  $\pi/2$  sampai  $3/2 \pi$  pada fase matahari di bumi selatan. Dengan menggunakan *trial and error* diperoleh luaran pengendali *fuzzy* untuk penjejak sudut *azimuth* dimana setiap fungsi keanggotaan pengendali *fuzzy* untuk sudut *azimuth* adalah:

$$\mu_{CCWF}(v) = \begin{cases} 1 & , v < -3.543 \\ \frac{v + 2.296}{-3.543 + 2.296} & , -3.543 \leq v \leq -2.296 \\ 0 & , v > -2.296 \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\mu_{CCWM}(v) = \begin{cases} 0 & , v < -3.543 \\ \frac{v + 3.543}{-2.296 + 0.0491} & , -3.543 \leq v \leq -2.296 \\ \frac{v + 0.0491}{-2.296 + 0.0491} & , -2.296 \leq v \leq -0.0491 \\ 0 & , v > -0.0491 \end{cases} \quad (4.25)$$

$$\mu_{CCWS}(v) = \begin{cases} 0 & , v < -2.296 \\ \frac{v + 2.296}{-0.0491 + 2.296} & , -2.296 \leq v \leq -0.0491 \\ \frac{v}{-0.0491} & , -0.0491 \leq v \leq 0 \\ 0 & , v > 0 \end{cases} \quad (4.26)$$

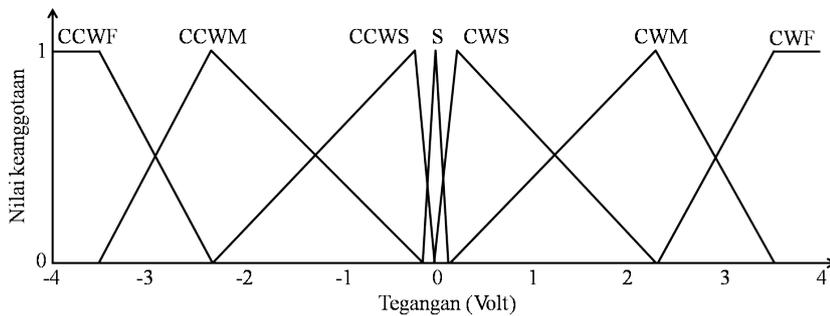
$$\mu_S(v) = \begin{cases} 0 & , v < -0.0491 \\ \frac{v + 0.0491}{\frac{0.0491}{v - 0.0491}} & , -0.0491 \leq v \leq 0 \\ \frac{0.0491}{-0.0491} & , 0 \leq v \leq 0.0491 \\ 0 & , v > 0.0491 \end{cases} \quad (4.27)$$

$$\mu_{CWS}(v) = \begin{cases} 0 & , v < 0 \\ \frac{v}{0.0491} & , 0 \leq v \leq 0.0491 \\ \frac{0.0491}{v - 2.296} & , 0.0491 \leq v \leq 2.296 \\ \frac{0.0491 - 2.296}{0.0491 - 2.296} & , v > 2.296 \\ 0 & , v > 2.296 \end{cases} \quad (4.28)$$

$$\mu_{CWM}(v) = \begin{cases} 0 & , v < 0.0491 \\ \frac{v - 0.0491}{2.296 - 0.0491} & , 0.0491 \leq v \leq 2.296 \\ \frac{v - 3.543}{2.296 - 3.543} & , 2.296 \leq v \leq 3.543 \\ 0 & , v > 3.543 \end{cases} \quad (4.29)$$

$$\mu_{CWF}(v) = \begin{cases} 0 & , v < 2.296 \\ \frac{v - 2.296}{3.543 - 2.296} & , 2.296 \leq v \leq 3.543 \\ 1 & , v > 3.543 \end{cases} \quad (4.30)$$

Fungsi keanggotaan di atas dapat dibentuk gambar fungsi keanggotaan sebagai berikut:



Gambar 4.14: Luaran pengendali *fuzzy* untuk sudut *azimuth*

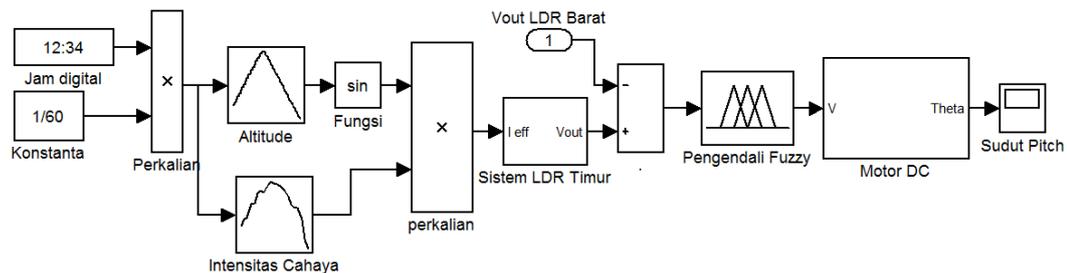
Pengendali *fuzzy* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki aturan dengan hubungan satu-satu antara masukan dan luaran sebagai berikut:

1. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah NB maka tegangan masukan adalah CCWF

2. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah NM maka tegangan masukan adalah CCWM
3. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah NS maka tegangan masukan adalah CCW
4. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah Z maka tegangan masukan adalah S
5. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah PS maka tegangan masukan adalah CWS
6. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah PM maka tegangan masukan adalah CWM
7. Jika *error* sensor  $e_s$  adalah PB maka tegangan masukan adalah CWF

### 4.3.2 Penjejak Sudut *Altitude*

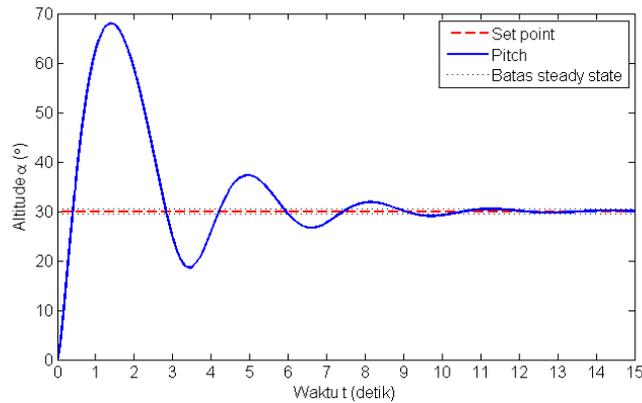
Berbeda dengan penjejak secara pasif, pengendalian aktif hanya menggunakan data dari sepasang sensor LDR untuk menentukan tegangan masukan. Namun dalam simulasi, data LDR didekati dengan model LDR dan sudut *altitude* agar dapat dibandingkan nilai ketepatan pengendaliannya. Rancangan pengendalian yang dimodelkan dalam simulasi adalah sebagai berikut:



Gambar 4.15: Model simulasi penjejak aktif sudut *altitude*

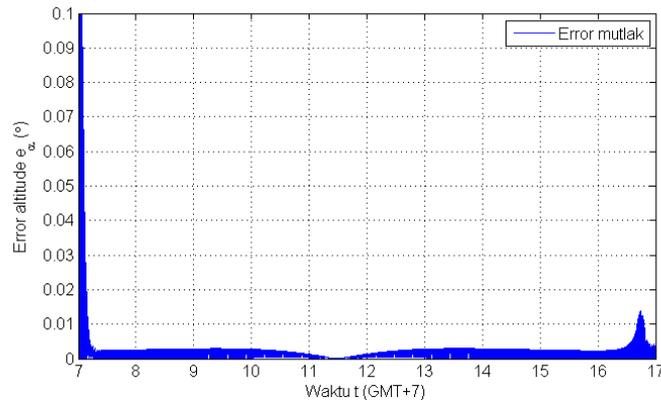
Gambar 4.15 memiliki masukan  $V_{out}$  dari LDR Timur dan  $V_{out}$  dari LDR Barat. Data intensitas cahaya dibutuhkan untuk mendapatkan nilai pembagi tegangan  $V_{out}$ . *Error*  $e_s$  dari kedua sensor selanjutnya masuk ke proses pengendalian *fuzzy*. Pengendalian *fuzzy* menghasilkan tegangan yang dapat menggerakkan motor tepat sesuai sudut yang diinginkan. Sebelum melakukan simulasi pada enam tanggal pengujian, sebelumnya dapat dilakukan uji *transient response* yang ditunjukkan oleh gambar berikut.

Sistem yang terbentuk memiliki respon yang cukup baik, yaitu *rise time*  $t_r$  sekitar 0.3725 detik. Waktu mencapai posisi tunak (*settling time*)  $t_s$  yaitu sekitar 8.8127 detik dimana setelah waktu tersebut deviasi *error* yang terbentuk berada dalam rentang  $e_{ss} \leq 0.2125^\circ$ . Puncak tertinggi yang dicapai adalah  $68.3932^\circ$  atau 127.9% lebih besar dari *set point* pada waktu



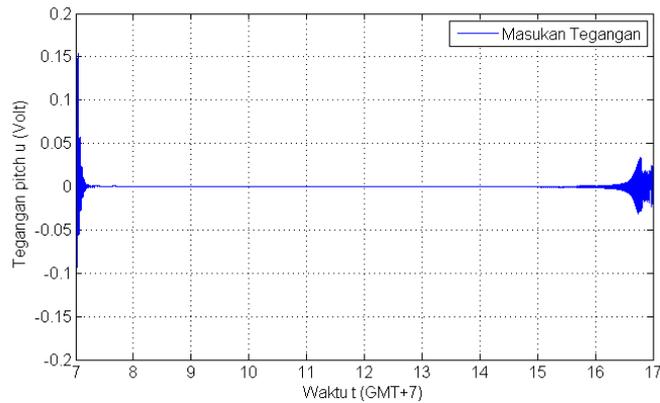
Gambar 4.16: Uji respon sistem penjejak FLC pada sudut *altitude*

$t_p = 1.3965$  detik. Simulasi tanggal 21 Juni pada Lampiran E digunakan untuk memperlihatkan gambaran umum penjejakan sudut *altitude* dengan pengendali *fuzzy*. *Error* mutlak yang terbentuk dari hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.17: *Error* mutlak penjejak sudut *altitude* dengan FLC

*Error* mutlak yang terbentuk dari pengendali *fuzzy* untuk *pitch* motor memiliki beberapa fase. Fase pertama adalah penjejak dengan perbedaan sudut yang sangat besar membuat *error* juga sangat besar. *Error* yang terjadi terlihat mulai bergerak naik setelah lonjakan pertama kemudian terlihat stabil sebelum akhirnya tidak terjadi *error* pada waktu tengah hari. Fase terakhir adalah kejadian yang sama yang berlaku saat proses pengendalian setelah waktu tengah hari. *Error* yang terjadi pada gambar tersebut disebabkan oleh tegangan yang diberikan oleh pengendali *fuzzy*. Tegangan yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.18: Tegangan masukan penjejak sudut *altitude* dengan FLC

Gambar 4.18 menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan pengendali *fuzzy* memiliki nilai yang sangat fluktuatif di awal dan akhir pengendalian. Perubahan sudut yang sangat besar memang terjadi di awal pengendalian yang menyebabkan terjadi naik turun tegangan yang besar. Namun penyebab kurang mulusnya tegangan di akhir pengendalian adalah nilai yang diberikan oleh LDR saat sore hari sudah sangat besar, artinya LDR mendapatkan cahaya yang sangat minim dan membuat nilai resistansi LDR sangat besar. Perubahan dari terang ke gelap juga mempengaruhi masukan tegangan oleh pengendali. Nilai MAE dari keenam tanggal pengujian sesuai dengan Lampiran E dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 4.3: MAE penjejak sudut *altitude* dengan FLC

Tanggal Pengujian	MAE
4 Maret	0.4724°
21 Maret	0.3277°
21 Juni	0.1601°
23 September	0.3374°
9 Oktober	0.4728°
21 Desember	0.2395°

Berdasarkan Tabel 4.3, MAE yang dihasilkan memiliki nilai yang cukup baik yaitu lebih kecil dari 5%. Walaupun penjelasan diatas mengarahkan bahwa pengendali *fuzzy* memiliki waktu yang lama untuk mencapai kestabilan, namun hasil MAE tetap menjadi parameter baik atau tidaknya pengendali. Nilai MAE yang ditunjukkan tabel diatas dianggap sudah baik dalam menjejak sudut *altitude* dengan menggunakan pengendali *fuzzy*.

### 4.3.3 Penjejak Sudut *Azimuth*

Penjejak aktif sudut *azimuth* memiliki prinsip yang sama dengan penjejak aktif sudut *altitude* yaitu menggunakan sepasang sensor LDR untuk menentukan besar tegangan motor *yaw*. Hal yang berbeda adalah pada penggunaan Persamaan (2.12) untuk menghitung intensitas cahaya yang efisien. Pada persamaan tersebut menggunakan fungsi sinus sebagai bobot intensitas maksimum cahaya, hal ini hanya berlaku jika lintasan yang diikuti berupa pendekatan fungsi sinus, sedangkan lintasan sudut *azimuth* tidak dapat menggunakan fungsi sinus seperti biasanya karena terdapat batasan pada Persamaan (2.11). Pada persamaan resistensi LDR tersebut, nilai R hanya dapat dihitung dengan syarat masukan nilai intensitas cahaya efisien bernilai positif yaitu berpengaruh pada hasil fungsi logaritma. Oleh sebab itu, modifikasi blok dilakukan dengan pembentukan fungsi baru sebagai berikut:

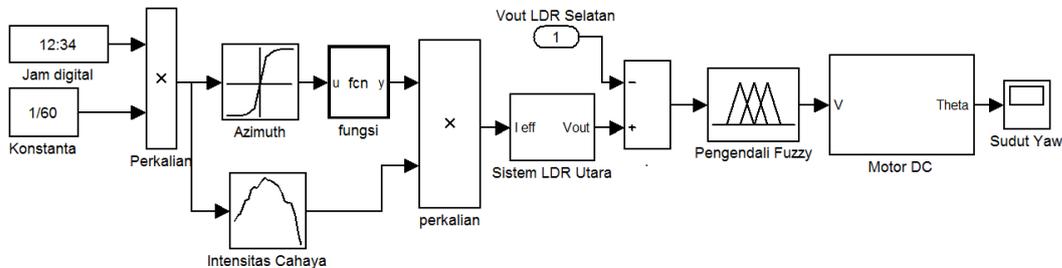
Fase bumi utara

$$y = \begin{cases} \sin(u + \pi) & u < -\frac{\pi}{2} \\ 2 + \sin(u) & -\frac{\pi}{2} \leq u \leq \frac{\pi}{2} \\ 4 + \sin(u - \pi) & u > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4.31)$$

Fase bumi selatan

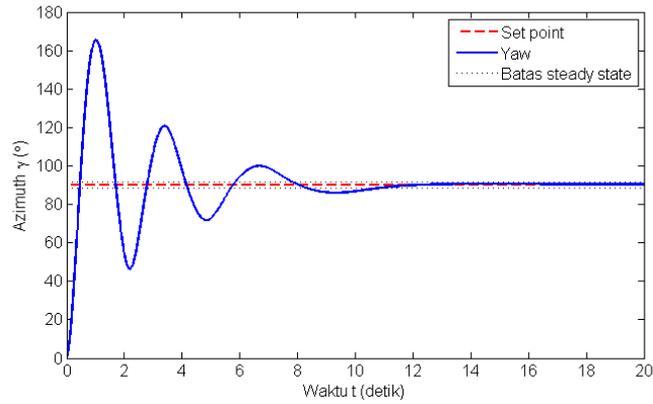
$$y = \begin{cases} \sin(u) & u < \frac{3\pi}{2} \\ 2 + \sin(u - \pi) & \frac{\pi}{2} \leq u \leq \frac{3\pi}{2} \\ 4 + \sin(u) & u > \frac{3\pi}{2} \end{cases} \quad (4.32)$$

Berdasarkan Persamaan (4.31) dan Persamaan (4.32), blok simulasi modifikasi dapat dibentuk sebagai berikut:



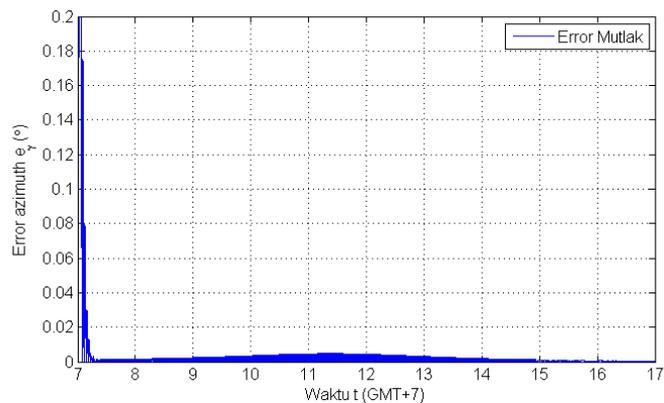
Gambar 4.19: Model simulasi penjejak aktif sudut *azimuth*

Gambar 4.19 memiliki masukan  $V_{out}$  dari LDR Utara dan  $V_{out}$  dari LDR Selatan.  $Error\ e_s$  dari kedua sensor selanjutnya masuk ke proses pengendalian *fuzzy*. Sistem yang terbentuk memiliki respon yang juga cukup



Gambar 4.20: Uji respon sistem penjejak FLC pada sudut *azimuth*

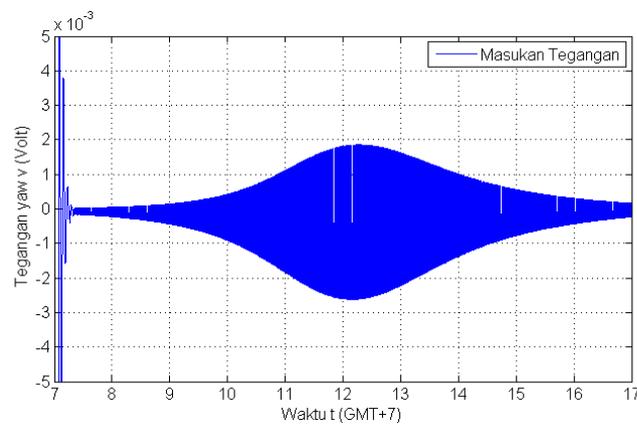
baik, yaitu *rise time*  $t_r$  sekitar 0.4273 detik. Sebelum mencapai posisi tunak, sistem membentuk *overshoot* tertinggi sebesar  $75.5124^\circ$  atau 83.9% pada waktu  $t_p = 1.0179$  detik. Waktu mencapai posisi tunak (*settling time*)  $t_s$  yaitu sekitar 7.7893 detik dimana setelah waktu tersebut deviasi *error* yang terbentuk berada dalam rentang  $e_{ss} \leq 1.1297^\circ$ . Simulasi tanggal 21 Juni pada Lampiran E digunakan untuk memperlihatkan gambaran umum penjejakan sudut *azimuth* dengan pengendali *fuzzy*. *Error* mutlak yang terbentuk dari hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.21: *Error* mutlak penjejak sudut *azimuth* dengan FLC

*Error* terbesar terjadi di awal dan di tengah simulasi. Hal ini disebabkan pengendali *fuzzy* memang memiliki waktu mencapai kestabilan yang

panjang sesuai penjelasan Gambar 4.20. Selain waktu yang lama dalam mencapai kestabilan, sistem ini juga mencapai *overshoot* hampir mendekati dua kali referensi. Hal tersebut yang mendasari terjadinya *error* di awal pengendalian. *Error* yang terjadi di tengah simulasi disebabkan oleh bentuk lintasan *azimuth* yang tidak memiliki titik balik sebagai mana telah dijelaskan pula pada pengendalian MPC untuk sudut *azimuth*. Hal yang sama berlaku untuk pengendalian dengan *fuzzy*, *error* tersebut disebabkan oleh tegangan yang diberikan oleh pengendali *fuzzy*. Tegangan yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 4.22: Tegangan masukan penjejak sudut *azimuth* dengan FLC

Gambar 4.22 menunjukkan bahwa tegangan yang dihasilkan pengendali *fuzzy* memiliki nilai yang sangat fluktuatif ditengah simulasi. Jika dihubungkan dengan referensi pada tanggal 21 Juni, sudut *azimuth* mengalami perubahan secara kontinue dari awal hingga akhir waktu pengujian. Perubahan yang cukup besar terjadi saat mendekati waktu puncak tengah hari hingga beberapa saat setelah waktu puncak tersebut. Pengendali *fuzzy* merespon perubahan tersebut dengan memberikan tegangan yang besar saat perubahan bernilai positif dan besar sesuai aturan yang telah dibahas pada perancangan pengendali FLC. Setelah menghasilkan tegangan yang besar, pada kondisi tersebut dapat terjadi *overshoot* yang selanjutnya ditangani kembali FLC dengan memberikan nilai tegangan negatif yang sangat kecil (dalam aturan disebut *Negative Big*).

Berdasarkan Tabel 4.4, tanggal 21 Juni menjadi tanggal dengan MAE terkecil sedangkan tanggal 4 Maret memiliki MAE paling besar. Secara umum, MAE pengendali *fuzzy* untuk penjejak sudut *azimuth* memiliki nilai lebih kecil dari 7%. Hal ini berarti pengendali *fuzzy* tidak hanya baik dalam menjejak

Tabel 4.4: MAE penjejak sudut *azimuth* dengan FLC

Tanggal Pengujian	MAE
4 Maret	0.6825°
21 Maret	0.4133°
21 Juni	0.3311°
23 September	0.4239°
9 Oktober	0.8162°
21 Desember	0.3821°

sudut *altitude*, namun juga masih cukup baik dalam menjejak sudut *azimuth*. Perbedaan dari kedua penjejak tersebut terletak dari bentuk referensi lintasan yang diikuti. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, lintasan sudut *azimuth* memiliki bentuk yang lebih variatif dibandingkan sudut *altitude*. Di sisi lain, sudut *azimuth* memiliki nilai pertama *referensi* yang besar yaitu 90°.

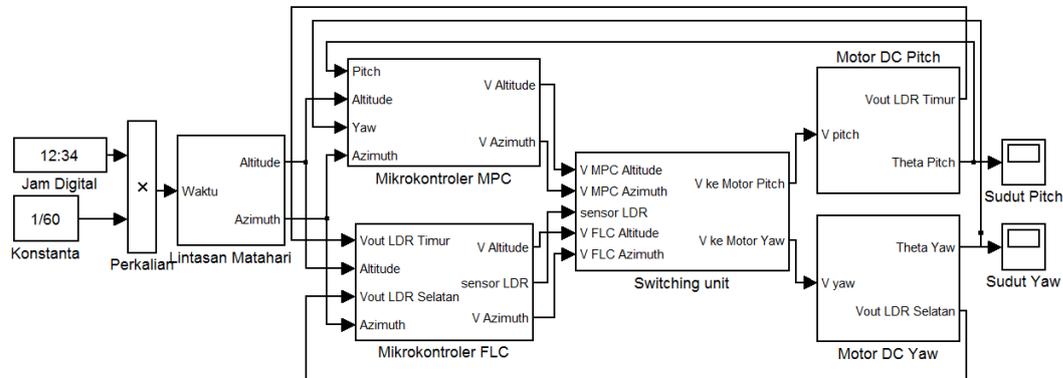
#### 4.4 Penjejak Matahari Kombinasi Aktif - Pasif

Penjejak matahari metode kombinasi aktif dan pasif adalah menjejak sudut lintasan matahari dengan menggunakan mode pasif pada saat cuaca sedang tidak cerah dan menggunakan mode aktif pada saat cuaca cerah. Keunggulan dari metode ini adalah saat cahaya matahari dapat langsung meradiasi panel surya maka mode aktif dapat dengan akurat menjejak lintasan matahari. Model lintasan matahari dapat memiliki ketidakpastian saat dilakukan simulasi, hal ini dapat diperbaiki dengan menggunakan sensor cahaya yang terpasang pada panel surya. Keunggulan lain dari metode kombinasi adalah saat radiasi matahari terhalang oleh faktor pengganggu. Pengganggu yang dimaksud seperti perubahan cuaca atau lokasi penempatan panel surya yang mungkin dapat terdapat bayangan benda lain sehingga panel surya tidak dapat bekerja maksimal. Pada saat posisi matahari sudah dapat dijangkau kembali oleh panel surya, maka akan terjadi perubahan sudut yang besar. Untuk mengatasi hal tersebut, pengendali pasif dapat bekerja pada waktu radiasi matahari tidak secara langsung meradiasi panel surya.

##### 4.4.1 Perancangan Kendali Penjejak Aktif-Pasif

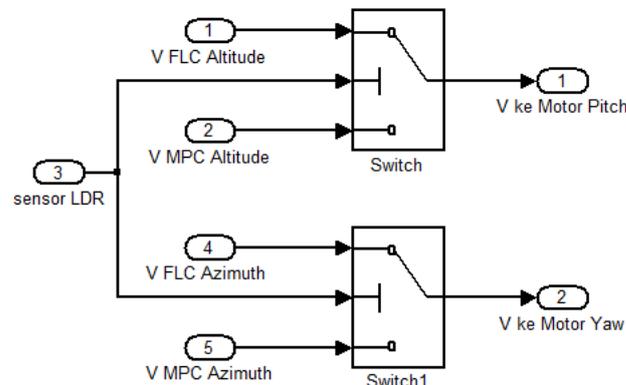
Perancangan kendali penjejak metode aktif-pasif merupakan penggabungan dari dua rancangan sebelumnya yaitu Gambar 4.4 dan Gambar 4.15 untuk penjejak sudut *altitude* dan Gambar 4.8 dan Gambar 4.19 untuk penjejak sudut *azimuth*. Penggunaan *switch* dibutuhkan untuk membuat mode dapat berpindah secara otomatis berdasarkan intensitas

cahaya yang diperoleh. Batas ambang *threshold* yang digunakan sebesar 3.75 dimana bentuk model simulasi sebagai berikut: dimana fungsi blok



Gambar 4.23: Model simulasi penjejak aktif-pasif

*switch* berperan penting dalam menentukan masukan tegangan pengendali yang digunakan untuk menggerakkan motor. Model simulasi blok *switch* digambarkan sebagai berikut:



Gambar 4.24: Strategi *switch*

Untuk penjejakan *altitude* maupun *azimuth*, masukan *switch* adalah tegangan hasil pengendali MPC, sensor LDR, dan tegangan hasil pengendali FLC. Pada saat sensor LDR menghasilkan nilai lebih besar dari *threshold* maka yang dipilih adalah tegangan yang dihasilkan oleh pengendali FLC, dan saat nilai sensor LDR lebih kecil dari *threshold* maka tegangan yang dihasilkan oleh pengendali MPC masuk ke motor penggerak.

#### 4.4.2 Simulasi

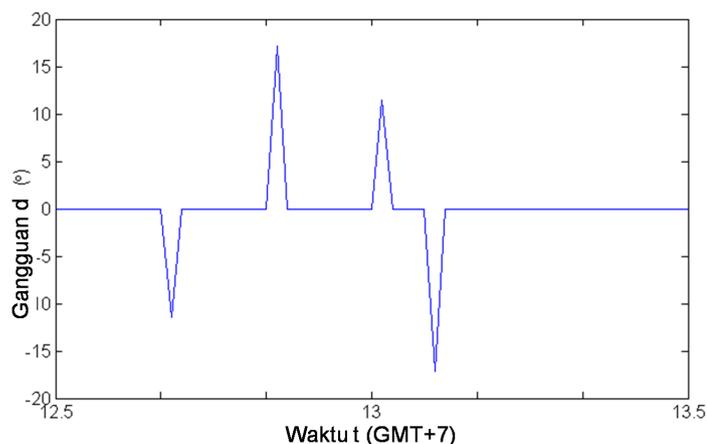
Simulasi simulasi menghasilkan lintasan penjejak terbaik dari kedua pengendali. Hasil yang diperoleh berupa sudut *pitch* yang menjejak sudut

*altitude* dan sudut *yaw* yang menjejak sudut *azimuth*. Hasil simulasi dengan menggunakan enam tanggal pengujian dapat dilihat pada Lampiran F. Nilai *mean absolute error* dari keenam tanggal pengujian tersebut memiliki kesamaan dengan nilai MAE pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4. Hal ini disebabkan oleh kondisi cahaya untuk simulasi dianggap ideal dan semua syarat switch tidak dipenuhi yaitu intensitas cahaya  $\leq \textit{threshold}$  atas dengan kata lain intensitas cahaya yang diterima selalu lebih besar dari *threshold*. Oleh sebab itu, pengujian dengan menggunakan gangguan intensitas cahaya dibutuhkan untuk melihat seberapa baik sistem kendali MPC-FLC yang terbentuk. Tidak hanya menggunakan gangguan intensitas cahaya, gangguan posisi juga dikenakan pada sistem sehingga diketahui seberapa cepat sistem dapat memulihkan gangguan. Kedua gangguan tersebut disajikan dalam subbab berikutnya.

## 4.5 Sistem Penjejak Aktif-Pasif dengan Gangguan

### 4.5.1 Gangguan perubahan posisi sudut

Gangguan perubahan posisi adalah gangguan yang berupa gaya luar yang menyebabkan posisi sudut panel surya tidak tepat dengan nilai sudut referensi. Gangguan ini dalam keadaan riil dapat disebabkan oleh angin atau kontak langsung dengan benda sekitar yang dapat bergerak. Cakupan gangguan hanya perubahan posisi sudut panel surya karena hanya *pitch* dan *yaw* yang dapat bergerak, sedangkan struktur dari alat tidak dapat bergerak. Contoh perubahan yang tidak termasuk dalam cakupan gangguan adalah posisi alat panel surya diletakkan pada bidang miring dan perubahan posisi Timur-Barat panel surya. Pembentukan gangguan sendiri dapat dipisahkan antara penjejak sudut *altitude* dan penjejak sudut *azimuth*.



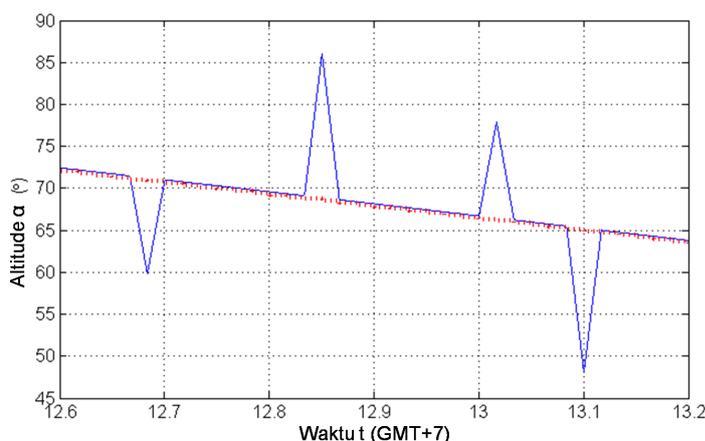
Gambar 4.25: Gangguan perubahan posisi sudut

Gambar 4.25 memberikan gangguan positif sebanyak dua kali pada menit ke 351 sebesar  $17.18^\circ$  dan menit ke 561 sebesar  $11.45^\circ$ . Gangguan ini juga diberikan pada menit ke 341 dan 366 berturut-turut sebesar  $-11.45^\circ$  dan  $-17.18^\circ$ . Hasil simulasi penjejak sudut *altitude* dan *azimuth* menggunakan kombinasi aktif-pasif FLC-MPC pada enam tanggal pengujian dapat dilihat pada Lampiran G. Hasil MAE simulasi dengan menggunakan gangguan Gambar 4.25 ditampilkan pada tabel berikut:

Tabel 4.5: MAE penjejak sudut *altitude* dan *azimuth* dengan gangguan perubahan posisi

Tanggal Pengujian	MAE <i>pitch</i>	MAE <i>yaw</i>
4 Maret	$0.5406^\circ$	$0.7435^\circ$
21 Maret	$0.4040^\circ$	$0.5052^\circ$
21 Juni	$0.2511^\circ$	$0.4239^\circ$
23 September	$0.4128^\circ$	$0.5161^\circ$
9 Oktober	$0.5410^\circ$	$0.9249^\circ$
21 Desember	$0.3227^\circ$	$0.4748^\circ$

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa nilai MAE untuk setiap pengujian masih dapat dikatakan sangat baik. Pada penjejak sudut *altitude*, peningkatan nilai MAE antara  $0.0682^\circ$  hingga  $0.0910^\circ$  dari MAE awal pada Tabel 4.3. Hal yang sama juga terjadi pada penjejak sudut *azimuth* yang meningkat antara  $0.0610^\circ$  hingga  $0.0928^\circ$  dari MAE awal pada Tabel 4.4. Dengan kata lain pengaruh dari gangguan tidak terlalu berarti pada sistem kendali aktif-pasif yang sudah terbentuk.



Gambar 4.26: Gangguan perubahan posisi sudut

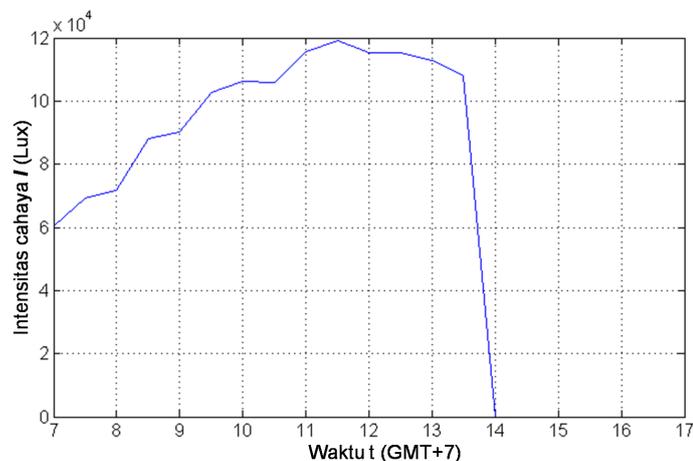
Ditinjau dari waktu memulihkan gangguan, sistem aktif pasif ini

sudah sangat baik karena waktu yang dibutuhkan sangat singkat yaitu 1.98 detik untuk gangguan  $\pm 11.45^\circ$  dan waktu 2.01 detik untuk gangguan sebesar  $\pm 17.18^\circ$ .

#### 4.5.2 Gangguan perubahan intensitas cahaya

Gangguan perubahan intensitas cahaya menjadi gangguan yang paling penting dalam pengujian sistem kendali ini. Gangguan ini dapat disebabkan oleh perubahan cuaca seperti mendung, terhalangnya radiasi matahari terhadap panel surya oleh benda lain, atau peningkatan dan penurunan intensitas cahaya yang cukup besar saat pagi dan sore hari. Perubahan intensitas cahaya di kedua LDR yang terpasang dapat menghasilkan nilai *error*  $e_{ss}$  menjadi 0 Volt. Hal ini menyebabkan luaran dari pengendali *fuzzy*  $u=0$  Volt, artinya panel surya akan berhenti bergerak. Namun jika intensitas cahaya kembali terang, akan terjadi lonjakan masukan tegangan  $u$  sehingga proses fluktuatif seperti di awal pengendalian terjadi kembali. Pengaruh terjadinya fluktuasi sudut *pitch* atau *yaw* dapat meningkatkan nilai MAE dan membuat sistem tersebut gagal mengendalikan motor panel surya pada kondisi cuaca tidak baik. Pada saat intensitas cahaya berkurang, mode pasif bekerja dengan menggunakan data sudut *altitude* dan *azimuth*, sehingga dalam keadaan apapun motor panel surya akan tetap bergerak.

Pembentukan gangguan intensitas cahaya adalah menciptakan keadaan dimana maksimum cahaya yang diterima oleh dua pasang LDR yang bersesuaian harus kurang dari *threshold*, sehingga mode pengendalian berubah menjadi mode pasif. Gangguan intensitas cahaya yang digunakan pada penelitian ini adalah:



Gambar 4.27: Gangguan perubahan intensitas cahaya

Gangguan perubahan intensitas cahaya mulai terjadi pada pukul 13.30 WIB hingga akhir pengujian pada pukul 17.00 WIB. Pengujian terhadap enam tanggal yang telah ditentukan (Lampiran H) menghasilkan nilai MAE sebagai berikut:

Tabel 4.6: MAE penjejak sudut *altitude* dan *azimuth* dengan gangguan perubahan intensitas cahaya

<b>Tanggal Pengujian</b>	<b>MAE <i>pitch</i></b>	<b>MAE <i>yaw</i></b>
4 Maret	0.4497°	0.6488°
21 Maret	0.3125°	0.4106°
21 Juni	0.1567°	0.3300°
23 September	0.3214°	0.4214°
9 Oktober	0.4501°	0.8316°
21 Desember	0.2299°	0.3808°

Tabel 4.6 menunjukkan perbaikan MAE untuk setiap tanggal pengujian. Penurunan nilai MAE disebabkan oleh lamanya waktu pengendalian yang dilakukan oleh mode pasif yaitu 3 jam 30 menit. Penurunan MAE pada penjejak *altitude* adalah antara 0.0034° hingga 0.0227°, begitu pula pada MAE penjejak *azimuth* yang menurun antara 0.0011° hingga 0.0337°.

#### 4.5.3 Gangguan kombinasi perubahan posisi dan intensitas cahaya

Kondisi perubahan posisi dan intensitas cahaya biasanya terjadi pada cuaca buruk dimana terdapat gaya luar yang dapat mempengaruhi posisi sudut penjejak disertai dengan intensitas cahaya yang sangat kecil. Cuaca buruk yang dimaksud dapat terjadi pada cuaca hujan disertai dengan angin, namun kondisi ini tidak dikategorikan ke dalam badai. Berbeda dengan gangguan perubahan posisi pada subbab 4.5.1, frekuensi munculnya perubahan posisi sudut pada gangguan ini lebih banyak yaitu sebanyak delapan *peak*. Untuk perubahan intensitas cahaya, skenario yang digunakan sama dengan subbab 4.5.2 yaitu pada Gambar 4.27.

Tabel 4.7: MAE penjejak sudut *altitude* dan *azimuth* dengan gangguan kombinasi

<b>Tanggal Pengujian</b>	<b>MAE <i>pitch</i></b>	<b>MAE <i>yaw</i></b>
4 Maret	0.6335°	0.8388°
21 Maret	0.4972°	0.6002°
21 Juni	0.3454°	0.5183°
23 September	0.5061°	0.6111°
9 Oktober	0.6340°	0.8488°
21 Desember	0.4169°	0.5704°

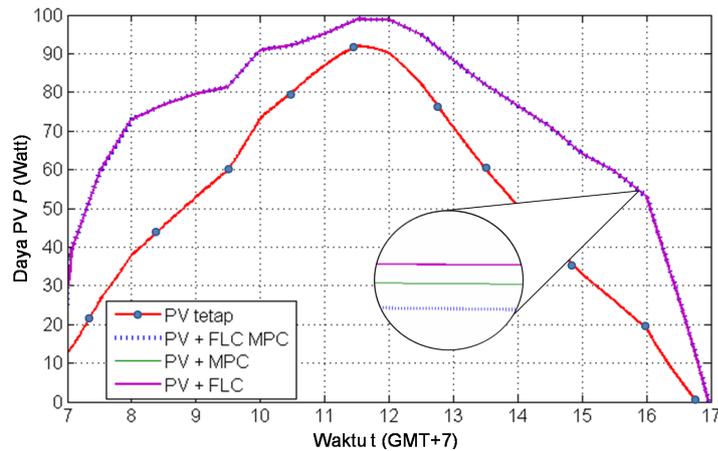
Tabel 4.7 menunjukkan adanya peningkatan nilai MAE dibandingkan dengan kondisi idealnya. Peningkatan pada penjejak sudut *altitude* adalah  $0.1611^\circ$  hingga  $0.1853^\circ$ , sedangkan penjejak sudut *azimuth* meningkat antara  $0.1563^\circ$  hingga  $0.1883^\circ$ . Peningkatan yang terjadi masih dapat dikatakan dalam kondisi baik karena MAE masih dibawah  $1^\circ$ . Pertimbangan nilai baik pada angka di bawah  $1^\circ$  adalah karena jarak antara titik pusat struktur motor penggerak dengan panel surya sangat kecil. Nilai MAE pada tabel diatas diperoleh dari hasil simulasi menggunakan enam tanggal pengujian yang terlampir pada Lampiran I.

#### 4.6 Simulasi Daya Panel Surya

Panel surya dengan motor penjejak matahari memastikan proses konversi energi dari radiasi matahari dapat dilakukan secara maksimal. Berdasarkan simulasi motor penggerak, selanjutnya model panel surya yang dijelaskan pada pada BAB 2 dapat menghitung jumlah daya yang diproduksi. Persamaan (2.15) hingga Persamaan (2.21) hanya menghitung daya yang dapat dihasilkan oleh panel surya, dan daya tersebut bukan daya yang dapat tersimpan dalam baterai atau media penyimpanan yang lain.

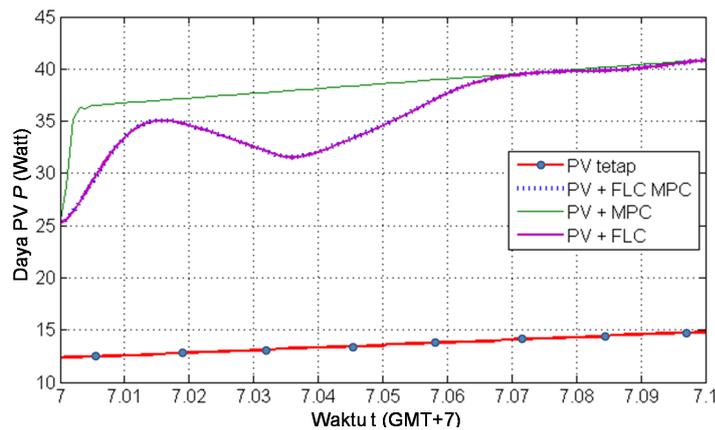
Sistem kendali yang telah diuji dan disimulasi pada subbab sebelumnya adalah sistem kendali pasif menggunakan MPC, sistem kendali aktif menggunakan FLC, dan sistem kendali aktif-pasif menggunakan FLC-MPC. Tidak hanya sistem yang menggunakan penjejak, panel surya tanpa penjejak juga ditinjau jumlah daya yang dapat dihasilkan (selanjutnya disebut PV tetap). Daya yang dihasilkan oleh PV tetap menjadi dasar dari perhitungan efisiensi PV dengan penjejak mengikuti Persamaan (3.2). PV tetap diarahkan secara manual pada sudut *azimuth*  $0^\circ$  dan posisi permukaan panel surya menghadap ke atas dapat dituliskan sudut *altitude*  $90^\circ$ . Pengujian dilakukan dengan menggunakan data referensi lintasan pada tanggal 21 Juni, data temperatur, dan data radiasi matahari pada tanggal pengujian tersebut. Sedangkan PV dengan penjejak diatur dengan posisi awal sudut *altitude*  $0^\circ$  dan sudut *azimuth*  $0^\circ$ .

Gambar 4.28 menunjukkan hasil simulasi daya yang dihasilkan oleh sistem panel surya, baik dengan penjejak maupun tanpa penjejak. Panel surya tanpa penjejak menghasilkan 519,41 kW dalam jangka waktu 10 jam pengujian, sedangkan sistem dengan penjejak dapat menghasilkan daya lebih besar. PV dengan penjejak MPC mampu menghasilkan 740,63 kW dalam waktu 10 jam pengujian, begitu pula dengan PV dengan penjejak FLC yang



Gambar 4.28: Perbandingan daya PV tetap dan PV dengan penjejak

menghasilkan 740,88 kW. PV dengan penjejak aktif-pasif juga menghasilkan 740.88 kW, dimana terdapat kesamaan hasil PV FLC-MPC dengan hasil PV FLC. Walaupun hasil simulasi menunjukkan angka yang sama pada penjejak FLC dan FLC-MPC, namun Gambar 4.28 juga memperlihatkan bahwa pada sekitar pukul 16.00 WIB, daya yang dihasilkan oleh FLC lebih besar dari dua pengendali lainnya. Daya yang dihasilkan FLC-MPC bahkan lebih kecil dari daya yang dihasilkan pengendali MPC, namun tetap lebih besar dari daya yang dihasilkan oleh PV tetap. Dilihat dari awal simulasi, gambar berikut dapat menjelaskan seberapa besar daya yang dihasilkan oleh empat panel surya tersebut.



Gambar 4.29: Perbandingan daya awal simulasi

Gambar 4.29 memperlihatkan sejauh mana pengendali FLC memiliki kemiripan dengan FLC-MPC. Di awal simulasi, PV MPC dapat dengan mudah mencapai referensi sehingga daya yang dihasilkan juga maksimal. Di sisi lain,

pengendali yang berbasis FLC dapat menghasilkan daya lebih banyak dari semua sistem yang diuji. Berdasarkan penjelasan diatas, maka dapat dihitung peningkatan daya yang dihasilkan oleh panel surya dengan penjejak terhadap panel surya tetap. Peningkatan daya tersebut dianggap sebagai efisiensi panel surya dengan penjejak. Panel surya dengan penjejak pasif MPC memiliki efisiensi 42.5923%, sedangkan panel surya FLC dan panel surya FLC-MPC menghasilkan efisiensi sebesar 42.6397%.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi motor penggerak panel surya untuk menjejak sudut *altitude* dan *azimuth* matahari dan simulasi daya panel surya, dapat disimpulkan bahwa:

1. Penjejak pasif menggunakan *Model Predictive Control* (MPC) mampu menjejak sudut *altitude* dan *azimuth* matahari dengan sangat baik. Berdasarkan nilai *mean absolute error* (MAE), sudut *pitch* yang menjejak sudut *altitude* memiliki performansi diantara  $0.0251^\circ \leq MAE \leq 0.0376^\circ$  pada kondisi tanpa gangguan. Sudut *yaw* yang menjejak sudut *azimuth* menunjukkan nilai  $0.0410^\circ \leq MAE \leq 0.0593^\circ$
2. Penjejak aktif menggunakan *Fuzzy Logic Control* (FLC) juga mampu menjejak sudut-sudut matahari dengan akurasi yang baik. Performansi yang ditunjukkan oleh pengendali ini adalah  $0.1601^\circ \leq MAE \leq 0.4724^\circ$  pada *pitch* dan  $0.3311^\circ \leq MAE \leq 0.6825^\circ$  pada *yaw*.
3. Penjejak aktif-pasif dapat menjejak sudut-sudut matahari baik dalam kondisi ideal maupun pada kondisi cuaca tidak cerah. Pada pengujian kondisi ideal, penjejak ini menunjukkan performansi yang sama dengan penjejak aktif menggunakan FLC. Performansi yang baik juga ditunjukkan saat diberikan gangguan, yaitu gangguan perubahan posisi sudut, gangguan perubahan intensitas cahaya, dan kombinasi kedua gangguan tersebut. Berdasarkan hasil yang diperoleh, sistem kendali aktif pasif dapat menghadapi gangguan dan mampu memulihkan gangguan dengan cepat.
4. Berdasarkan simulasi daya panel surya, kendali motor penjejak matahari berhasil menjaga panel surya tegak lurus dengan arah radiasi matahari. Panel surya dengan penjejak MPC menghasilkan efisiensi 42.59% terhadap panel surya tanpa penjejak. Sedangkan panel surya dengan penjejak FLC memiliki efisiensi yang sama dengan penjejak FLC-MPC yaitu 42.64%.

## 5.2 Saran

Proses pengendalian motor panel surya merupakan salah satu pengembangan teknologi untuk memanfaatkan energi yang berasal dari radiasi matahari. Pada penelitian ini telah dilakukan penjejakan secara aktif-pasif agar mampu menghilangkan pengaruh gangguan. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah penggunaan metode optimasi untuk menentukan parameter R dan Q pada penjejak MPC, dan penggunaan optimasi pula pada penentuan fungsi keanggotaan masukan dan luaran pengendali FLC.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abadi, I., Musyafa A. dan Soeprijanto A. (2015), Design and Implementation of Active Two Axes Solar Tracking System Using Particle Swarm Optimization Based Fuzzy Logic Controller, *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S.)*, Vol. 8, No. 6, hal. 640-652.
- Anggita, F. (2017), *Perbandingan kontrol PID dan T2FSMC pada prototype panel surya dengan mempertimbangkan intensitas cahaya*, Tugas Akhir Jurusan Matematika, FMIPA ITS, Surabaya.
- Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (2014), *Indonesia Energy Outlook 2014: Energy development in supporting energy substitution program*, BPPT, Jakarta.
- Ballabel, A, Mahfouz, A. dan Salem, F.A. (2013), Design and Performance of Solar Tracking Photo-Voltaic System, *International Journal of Control, Automation and Systems*, Vol. 1, No. 2, hal. 49-55.
- Braun, J.E, and Mitchell, J.C. (1983), Solar Geometry for Fixed and Tracking Surfaces, *Solar Energy* , Vol.31, No.5, hal. 439-444.
- Camacho, E. F. dan Bordous, C. (1995), *Model Predictive Control in the Process Industry*, Springer, Verlag London.
- Ganesh, N.J, Maniprakash, S, Chandrasekaran, L, Srinivasan, S.M. dan Srinivasan, A.R. (2011), Design and Development of A Sun Tracking Mechanism Using the Direct SMA Actuation, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Mechanical Design*, Vol. 133, hal. 1-14.
- International Renewable Energy Agency (2017), *Executive Summary, Renewable Energy Prospect: Indonesia*, [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).
- Kaur, T., Mahajan, S., Verma, S., Priyanka dan Gambhir, J. (2016), Arduino based Low Cost Active Dual Axis Solar Tracker, *First IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, Delhi-India, hal. 1-5.
- Krismadinata, A.R., Nasrudin, H., Woo, P., dan Jeyraj, S. (2013), Photovoltaic module modeling using simulink/mathlab, *Procedia Environmental Sciences*, Vol 17, hal. 537-546.

- Li, Y, dkk (2013), Evaluation of Methods to Extract Parameters from Current-Voltage Characteristics of Solar Cells, *Solar enegy*, Vol. 90, hal. 51-57.
- Mahardika, L., dkk. (2018), Optimization of Light Tracker Movement using Fuzzy Logic Control, *International Conference on Information and Communications Technology*, Yogyakarta-Indonesia, hal. 385-389.
- Mahmoud, M. S. (2018), *Fuzzy Control, Estimation and Diagnosis Single and Interconnected Systems*, Springer, Switzerland.
- Mardlijah, Rinanto, N., dan Soemarsono, A.R. (2017), Type 2 Fuzzy Sliding Mode Control (T2FSMC) Controller on Solar Panel Prototype using The Most Representative Parameters, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 95, No. 20, hal. 5562-5570.
- Maslanka, D. (2004), *Solar Geometry*, Lecture handout: Applied Mathematics, Illinois Institute of Technology, Illinois.
- Munna, M.S., Bhuyan, M.A.I, Rahman, K.M, and Hoque, M.A. (2015), Design, Implementation and Performance Analysis of A Dual-Axis Autonomous Solar Tracker, *International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*, Dhaka-Bangladesh, hal. 1-5.
- Ogata, K. (1995), *Discrete-Time Control System:Second Edition*, Prentice Hall, New Jersey.
- Piazza, M.C.D., Vitale, G. (2013), *From the Nuclear Fusion to the Radiated Energy on the Earth. In: Photovoltaic Sources. Green Energy and Technology*, Springer, London
- Ray, S., dan Tripathi, AK. (2016), Design and Development of Tilted Single Axis and Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracking Systems, *First IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, Delhi-India, hal. 1-6.
- Sproul, AB (2006), Derivation of the solar geometric relationships using vector analysis, *Renewable Energy* Vol. 32, hal. 1187-1205.
- Tomson, T. (2008), Discrete Two-Positional Tracking of Solar Collectors, *Renewable Energy*, Vol.33, hal. 400-405.
- Wang, L. (2009), *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*, Springer, Verlag London.
- Wang, W. dan Li, S. (2012), Model Predictive Control of 2-Axis Solar Tracker for Solar Energy System, *Proceedings of 31st China Control Conference*, China, hal. 4177-4182.
- Zimmermann, H.J. (1996), *Fuzzy Set Theory and Its Application*, Kluwer Academic Publisher, Boston.

## LAMPIRAN A

### Lintasan Matahari

```
%simpan nama file: trajectory.m
%mencari hari ke n dalam satu tahun
n=datenum(2017,12,31)-datenum(2016,12,31);
waktu=[7 1/60 7]; %waktu pengujian

delta=23.45*sin(2*pi/365*(284+n)); %sudut deklinasi pada hari ke n

%mencari latitude (phi) = -7 derajat -18 menit -49.51 detik
lat=[-7 -18 -49.51];
phi=lat(1)+lat(2)/60+lat(3)/3600;

%mencari longitude (longi) = 112 derajat 43 menit 5.7 detik
long=[112 43 5.70];
longi=long(1)+long(2)/60+long(3)/3600;
UTC=7; %UTC WIB
i=0;
for j=waktu(1):waktu(2):waktu(3)
i=i+1; pukul(i)=j;

%mencari sudut jam (omega)
omega(i)=(pukul(i)-(12-(longi-UTC*15)/15))*15; %dalam derajat
%mencari altitude (alpha)
alpa(i) =asin(cos(deg2rad(delta))*cos(deg2rad(phi))*cos(deg2rad(omega(i)))+...
sin(deg2rad(phi))*sin(deg2rad(delta))); %dalam radian

%mencari azimuth
gammac=acos((sin(deg2rad(delta))*cos(deg2rad(phi))-cos(deg2rad(delta))*...
sin(deg2rad(phi))*cos(deg2rad(omega(i))))/cos(alpa(i))); %dalam radian
if deg2rad(omega(i))<0
gama(i)=gammac;
else
```

```
if n>=63 && n<=365-63
gama(i)=-gammac;
else
gama(i)=2*pi-gammac;
end
end
end
save(trajjectory.mat,alpa,gama,waktu) %menyimpan data
```

## LAMPIRAN B

### Pengerjaan Iterasi FLC

Contoh penjejakan pada tanggal 21 Juni setiap tahunnya, pengendalian selama 2 detik dimulai pukul 7.00 WIB (GMT+7).

#### Mencari referensi

1. Tentukan sudut deklinasi menggunakan Persamaan (2.1)

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ 360^\circ \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

dimana  $n=172$ , sehingga diperoleh  $\delta = 23.4498^\circ$

2. Tentukan koordinat lintang  $-7^\circ 18' 49.51''$  LS dan bujur  $112^\circ 43' 5.7''$  BT

$$\phi = -7 + \frac{-18}{60} + \frac{49.51}{3600} = -7.3138^\circ$$

$$\lambda = 112 + \frac{43}{60} + \frac{5.7}{3600} = 112.71825^\circ$$

3. Tentukan sudut jam menggunakan Persamaan (2.6) pada pukul 7.00 WIB dan 7.01 WIB.

$$\omega = (jam_{lokal} - 12)15^\circ$$

$$jam_{lokal} = pukul - \frac{\lambda - UTC * 15}{15}$$

$$\omega_1 = \left( 7 - \frac{112.71825^\circ - 7 * 15}{15} - 12 \right) 15^\circ = -67.28175^\circ$$

$$\omega_2 = -67.03175^\circ$$

4. Mencari *altitude* dengan Persamaan (2.7) dan *azimuth* dengan Persamaan (2.8).

$$\alpha_1 = \sin^{-1} (\cos(\delta) \cos(\phi) \cos(\omega_1) + \sin(\phi) \sin(\delta)) = 0.30549rad$$

$$\alpha_2 = 0.30932rad$$

$$\gamma_1 = \cos^{-1} \left( \frac{\sin(\delta) \cos(\phi) - \cos(\delta) \sin(\phi) \cos(\omega_1)}{\cos(\alpha_1)} \right) = 1.09149rad$$

$$\gamma_2 = 1.0903rad$$

### Proses penjejak matahari dengan *Fuzzy Logic Control*

1. Data intensitas cahaya matahari pada waktu penjejakan yaitu  $I_1 = 60350$  dan  $I_2 = 60351$  dalam satuan lux.
2. Tentukan  $I_{eff}$  dengan Persamaan (2.12)

$$\begin{aligned} I_{eff,1} &= I_1 \sin \alpha_1 = 18150.9376 \\ I_{eff,2} &= 18372.0618 \end{aligned}$$

3. Tentukan Resistansi LDR Timur dengan Persamaan (2.11)

$$\begin{aligned} R_1 &= 10^{-\frac{3}{4} \log I_{eff,1} + 5} = 63.9478 \\ R_2 &= 63.3696 \end{aligned}$$

4. Tentukan pembagi tegangan menggunakan Persamaan (4.7) pada LDR Timur

$$\begin{aligned} V_{outT,1} &= \frac{1000 \times 5}{1000 + R_1} = 4.6994 \\ V_{outT,2} &= 4.702 \end{aligned}$$

5. Iterasi pertama penjejak FLC dimulai dengan pembagi tegangan dari LDR Barat  $V_{outB,1} = 0$ . Selanjutnya tentukan setiap nilai derajat keanggotaan menggunakan Persamaan (4.10) hingga Persamaan (4.16).

$$\begin{aligned} e_{s,1} &= V_{out,1} - V_{outB,1} = 4.6994 \\ \mu_{NB}(e_{s,1}) &= 0 \\ \mu_{NM}(e_{s,1}) &= 0 \\ \mu_{NS}(e_{s,1}) &= 0 \\ \mu_Z(e_{s,1}) &= 0 \\ \mu_{PS}(e_{s,1}) &= 0 \\ \mu_{PM}(e_{s,1}) &= 0.0901 \\ \mu_{PB}(e_{s,1}) &= 0.82 \end{aligned}$$

Karena masukan *fuzzy* hanya satu, maka Persamaan (2.27) tidak berlaku dan menjadi  $\mu(e_s) = \mu(u)$  dan  $\mu(e_s) = \mu(v)$ .  $\mu$  yang dipilih adalah yang bernilai lebih besar dari 0.

$$\begin{aligned}
\mu_{CWM1}(u_{CWM1,1}) &= 0.0901 \\
u_{CWM1,1} &= 0.5385 \\
\mu_{CWM2}(u_{CWM2,1}) &= 0.0901 \\
u_{CWM2,1} &= 1.6691 \\
\mu_{CWF}(u_{CWF,1}) &= 0.82 \\
u_{CWF,1} &= 1.6312
\end{aligned}$$

Proses defuzzifikasi menggunakan Persamaan (2.28)

$$\begin{aligned}
u_1 &= \frac{\sum_U u \mu^{conseq}(u)}{\sum_U \mu^{conseq}(u)} \\
u_1 &= 1.54Volt
\end{aligned}$$

Nilai  $u_1$  disubstitusikan ke sistem Persamaan (4.1) dan diperoleh nilai  $\theta_{pitch,1} = 0.1407$  rad. Langkah selanjutnya adalah menentukan pembagi tegangan dari LDR Barat  $V_{outB,2}$ .

$$\begin{aligned}
I_{effB,2} &= I_1 \sin \theta_{pitch,1} = 8463.2565 \\
R_2 &= 10^{-\frac{3}{4} \log I_{effB,2} + 5} = 113.3305 \\
V_{outT,2} &= \frac{1000 \times 5}{1000 + R_2} = 4.491
\end{aligned}$$

## 6. Iterasi kedua penjejak FLC

$$\begin{aligned}
e_{s,2} &= V_{out,2} - V_{outB,2} = 0.211 \\
\mu_{NB}(e_{s,2}) &= 0 \\
\mu_{NM}(e_{s,2}) &= 0 \\
\mu_{NS}(e_{s,2}) &= 0 \\
\mu_Z(e_{s,2}) &= 0.8734 \\
\mu_{PS}(e_{s,2}) &= 0.1265 \\
\mu_{PM}(e_{s,2}) &= 0 \\
\mu_{PB}(e_{s,2}) &= 0
\end{aligned}$$

$\mu$  yang dipilih adalah yang bernilai lebih besar dari 0.

$$\begin{aligned}
\mu_{S1}(u_{S1,2}) &= 0.8734 \\
u_{S1,2} &= -0.0588 \\
\mu_{S2}(u_{S2,2}) &= 0.8734 \\
u_{S2,2} &= 0.0588 \\
\mu_{CWS1}(u_{CWS1,2}) &= 0.1265 \\
u_{CWS1,2} &= 0.0587 \\
\mu_{CWS2}(u_{CWS2,2}) &= 0.1265 \\
u_{CWS2,2} &= 1.182
\end{aligned}$$

Proses defuzzifikasi menggunakan Persamaan (2.28)

$$\begin{aligned}
u_2 &= \frac{\sum_U u \mu^{conseq}(u)}{\sum_U \mu^{conseq}(u)} \\
u_2 &= 0.151
\end{aligned}$$

Nilai  $u_2$  disubstitusikan ke sistem Persamaan (4.1) dan diperoleh nilai  $\theta_{pitch,2} = 0.0072$  rad. Langkah selanjutnya adalah menentukan pembagi tegangan dari LDR Barat  $V_{outB,3}$ .

$$\begin{aligned}
I_{effB,3} &= I_2 \sin \theta_{pitch,2} = 434.5234 \\
R_3 &= 10^{-\frac{3}{4} \log I_{effB,3} + 5} = 1050.7274 \\
V_{outT,2} &= \frac{1000 \times 5}{1000 + R_2} = 2.4381
\end{aligned}$$

## LAMPIRAN C

### *Model Predictive Control* pada Motor DC

```
tra=load(trajectory.mat);
% definisikan waktu komputasi
Ts=tra.waktu(2); t=tra.waktu(3)-tra.waktu(1);
N=t/Ts; time=tra.waktu(1):Ts:tra.waktu(3)-Ts; tic;
Np=10; % prediction horizon dan control horizon

%parameter
J =0.00009;
B=0.000025;
R=18.2214;
L=0.000866;
Km=0.030941093;
Kb=0.030941093;

%state space
A = [0 1 0; 0 -B/J Km/J; 0 -Kb/L -R/L];
B = [0 ; 0 ; 1/L];
C=[1 0 0];
D=0;

% Diskritisasi ss dengan time sampling delta t =0.1
[AA BB CC D]=c2dm(A,B,C,D,0.1);

%reference
ref=tra.alpa;

% definisikan syarat awal state x(k)
x1=ref(1); x2=0; x3=0;
xlt=[x1;x2;x3];
delu(1)=0;
u(1)=0;

% Uji keterkontrolan
co=ctrb(AA,BB);
yes=rank(co); % cek keterkontrolan

% definisikan kendala increment input
u_max=20;
u_min=-10;
```

```

delu_max=1;
delu_min=-1;

%definisikan nilai Q dan R
R=1*eye(1,1);
Q=100*eye(1,1);

%definisikan matriks E
nul1=zeros(1,3);
nul2=zeros(3,1);
K=[R,nul1;nul2,CC'*Q*CC];
H=K;
for i=2:Np
p=size(H);
H=[H,zeros(p(1),4);zeros(4,p(2)),K];
end
E=2*H;

%definisikan matriks P
%kendala delta u
M11=[-1;1];
M1=zeros(2*Np,4*Np);
for i=1:Np
M1(2*i-1:2*i,4*i-3)=M11;
end

N11=[-delu_min;delu_max];
for i=1:Np
N1(2*i-1:2*i,1)=N11;
end

%kendala u
C2=zeros(Np,4*Np);
C21=ones(Np,1);
C22=zeros(Np,4);
C23=[C21 C22];
for i=1:Np
C2(i:Np,4*i-3:4*i)=C23(1:Np-(i-1),1:4);
end
M2=[-C2;C2];

U_min=u_min*ones(Np,1);
U_max=u_max*ones(Np,1);
C1=ones(Np,1);
N21=-U_min+C1*u(1);

```

```

N22=U_max-C1*u(1);
N2=[N21;N22];

%sehingga P dan h menjadi:
P=[M1;M2];
h=[N1;N2];

%definisikan matriks Y
I=eye(3,3);
Y1=zeros(2*Np,4*Np);
X=[-BB,I;zeros(3,1),-AA];
for i=1:Np
Y1((3*i-2):(3*i+3),(4*i-3):(4*i))=X;
for j=1:i
Y1(3*(i+1)-2:3*(i+1),4*j-3)=-BB;
end
end
Y=Y1(1:3*Np,:);

for k=2:N
%definisikan matriks g
g=zeros(4*Np,1);
for i=1:Np-1
g(4*i-2:4*i,1)=-2*CC'*Q*ref(k-1);
end

%update N2
N21=-U_min+C1*u(k-1);
N22=U_max-C1*u(k-1);
N2=[N21;N22];

% definisikan matriks h
h=[N1,N2];

% definisikan matriks b
for i=1:Np
if i==1
b(3*i-2:3*i,1)=AA*xlt+BB*u(k-1);
else
b(3*i-2:3*i,1)=BB*u(k-1);
end
end
options=optimset('largescale','off');
du=quadprog(E,g,P,h,Y,b,[],[],[],options);

```

```

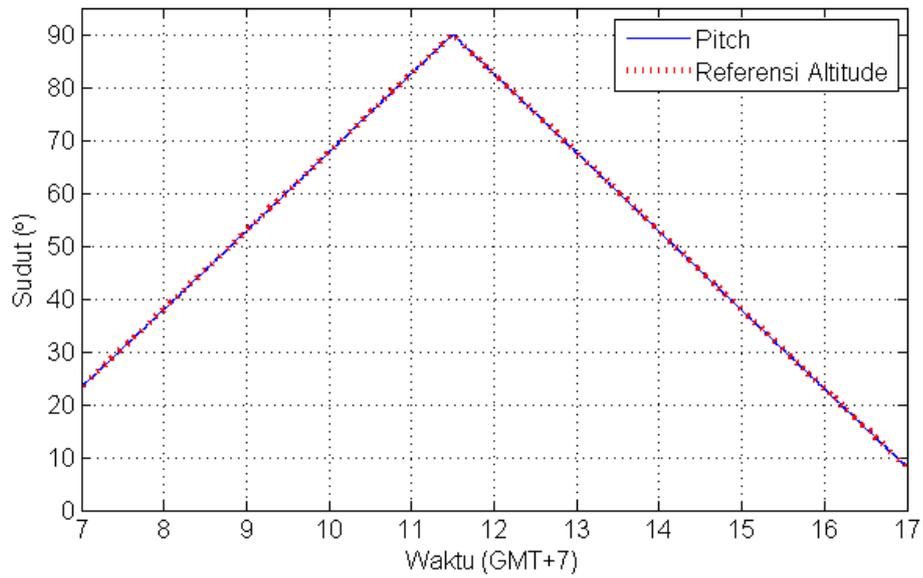
% ubah du menjadi u
duk=du(1,1);
usb(k)=duk+u(k-1);
xlt=AA*xlt+BB*usb(k);
x1(k)=xlt(1);
x2(k)=xlt(2);
x3(k)=xlt(3);
u(k)=usb(k);
end
save('hasil1.mat','x1','x2','x3','u','ref')
x1=rad2deg(x1);
ref=rad2deg(ref);
mae=mad(ref(2:N)-x1(2:N));
error=abs(ref(1:N)-x1(1:N));
figure(1)
plot(time,error,'LineWidth',2)
xlabel('Time (Hour)');
ylabel('Altitude Angle (\circ)');
legend 'Absolute Error'
grid on
figure(2)
plot(time,x1,'LineWidth',2)
hold on
plot(time,ref(1:N),'-r','LineStyle','--','LineWidth',2)
hold off
xlabel('Time (Hour)');
ylabel('Altitude Angle (\circ)');
grid on
legend 'Pitch Angle with MPC' 'Reference'
figure(3)
plot(time,u,'LineWidth',2)
xlabel('Time (Hour)');
ylabel('Voltage (Volt)');
grid on
legend 'Altitude Voltage Input'

```

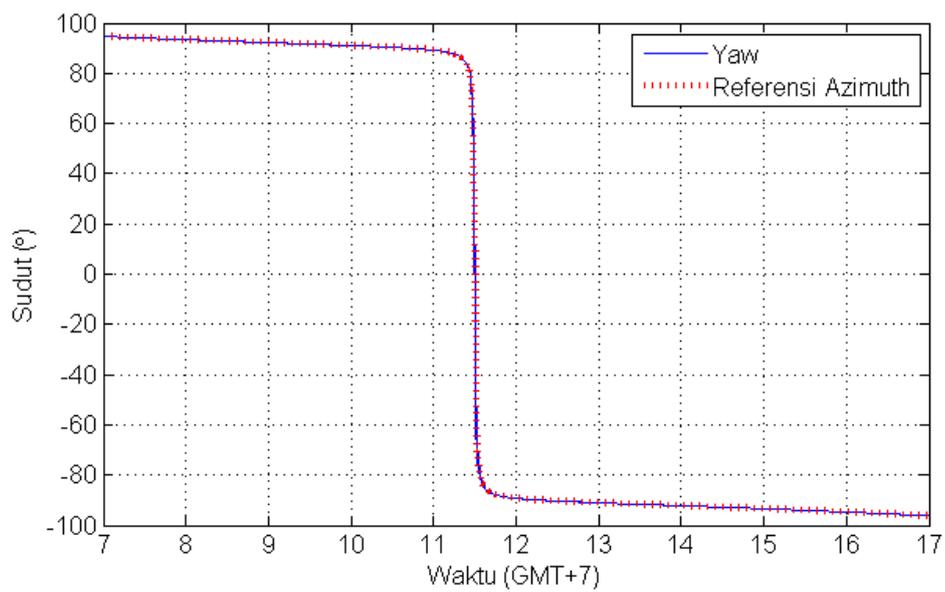
## LAMPIRAN D

### Hasil penjejak pasif menggunakan MPC

4 Maret

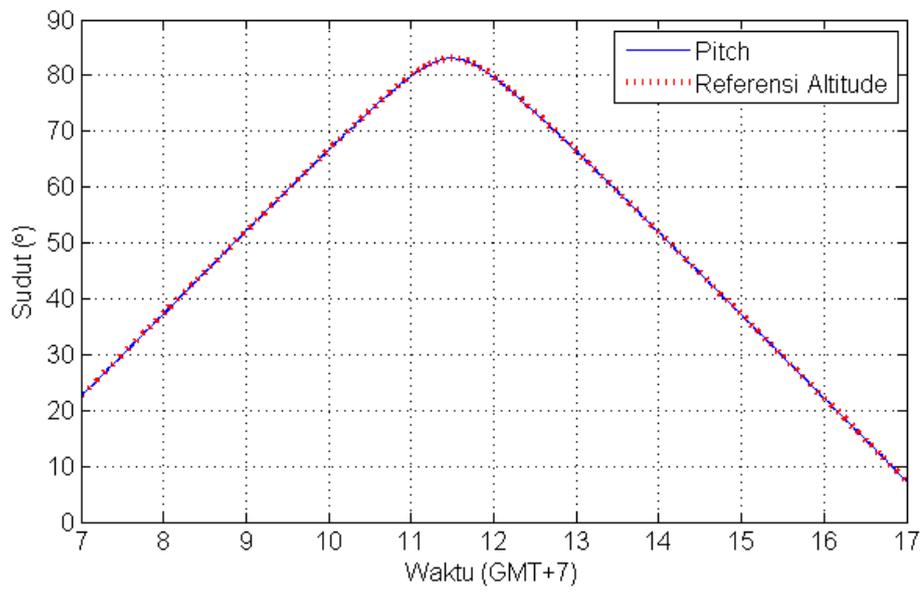


*Altitude*

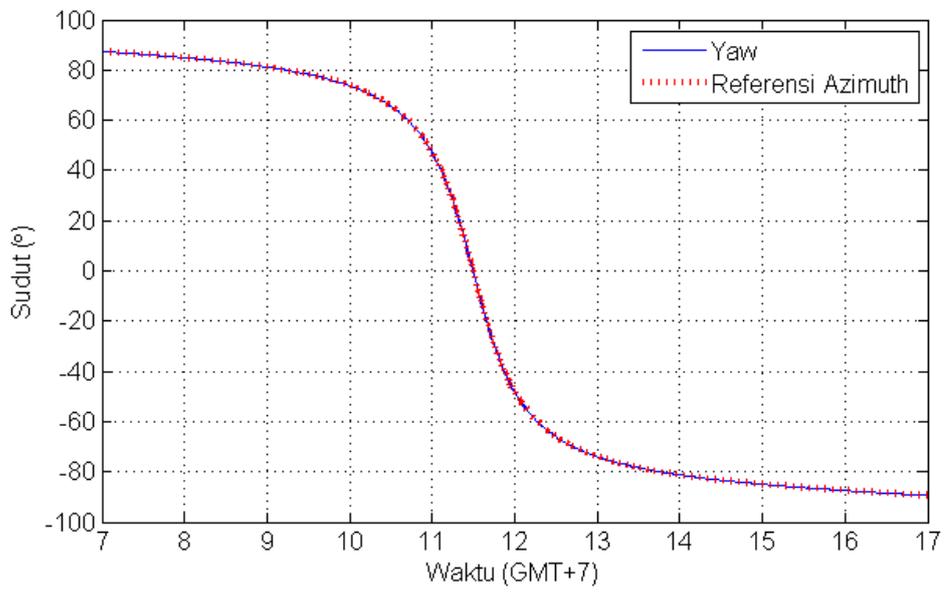


*Azimuth*

21 Maret

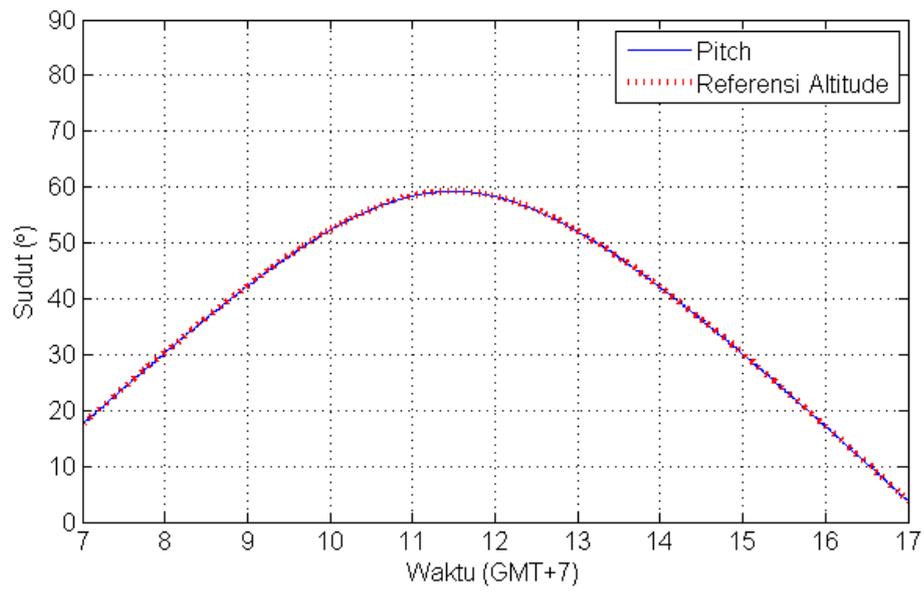


*Altitude*

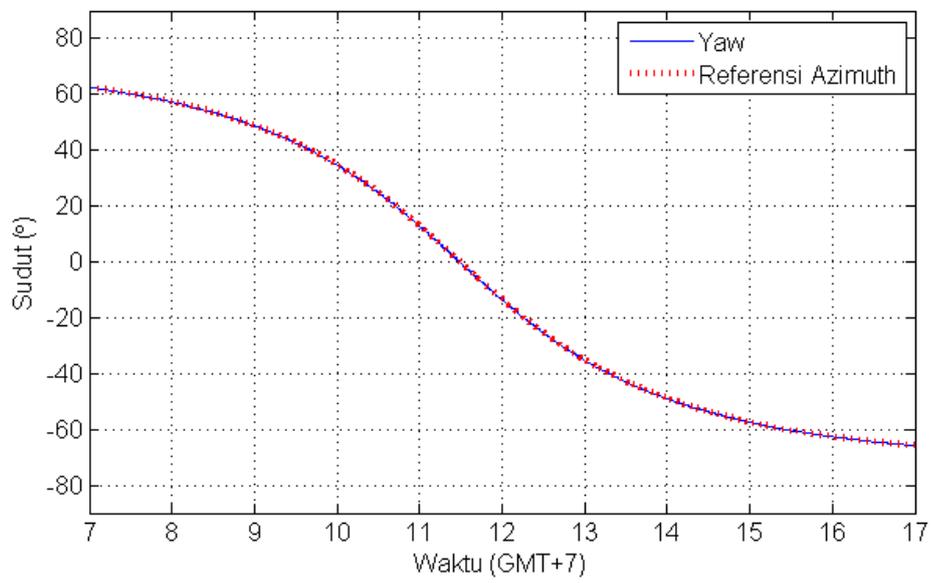


*Azimuth*

21 Juni

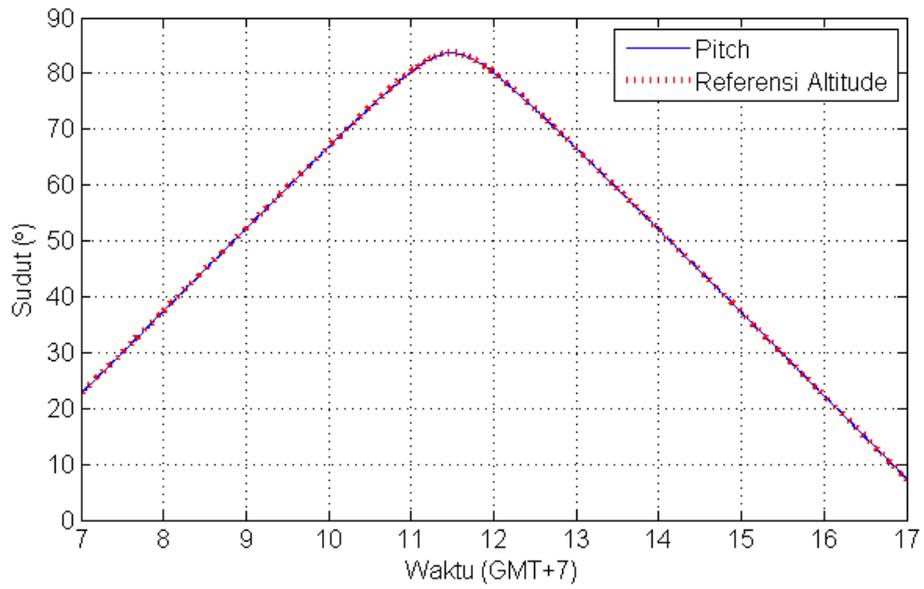


*Altitude*

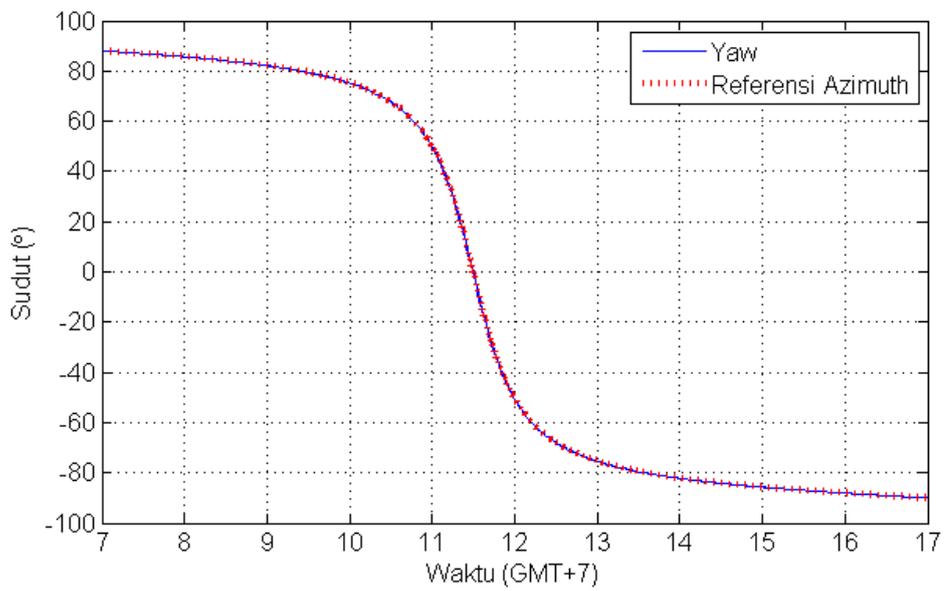


*Azimuth*

23 September

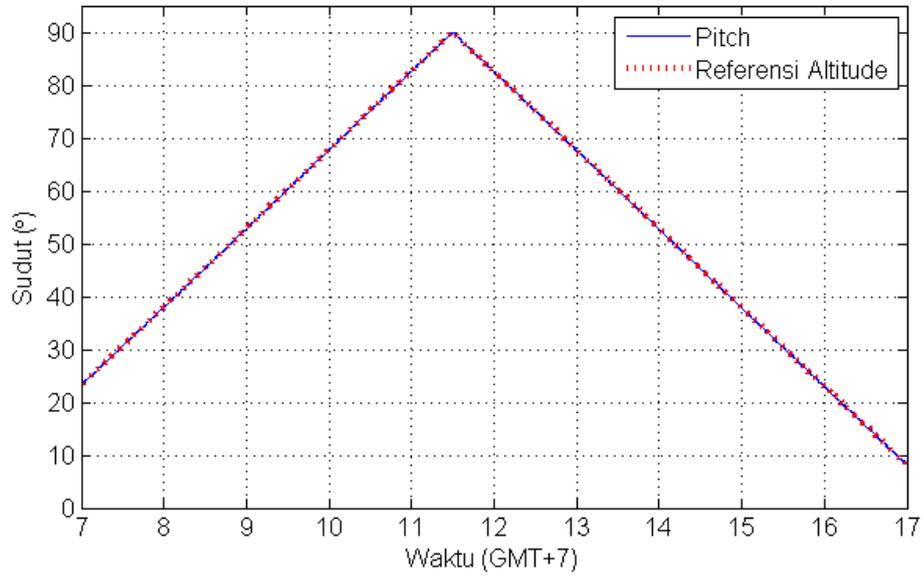


*Altitude*

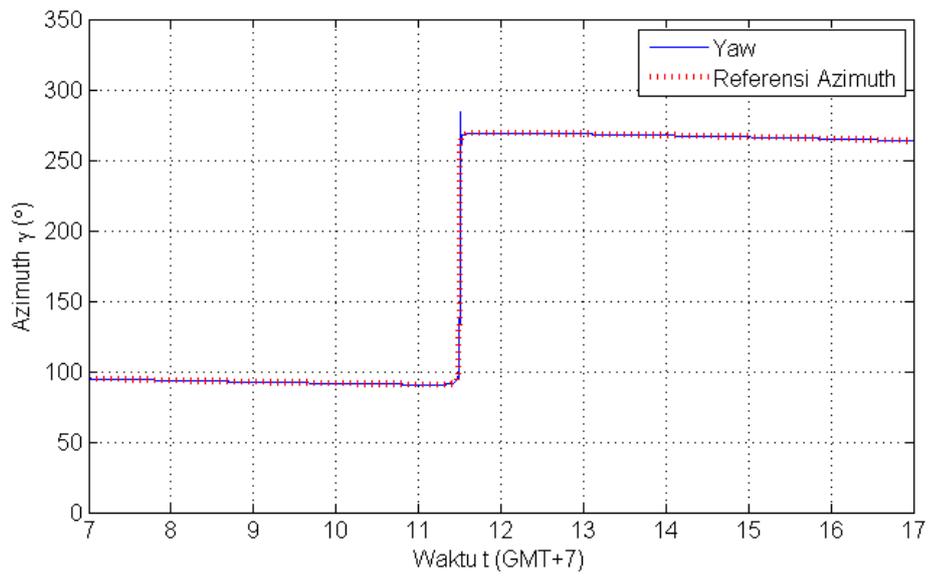


*Azimuth*

9 Oktober

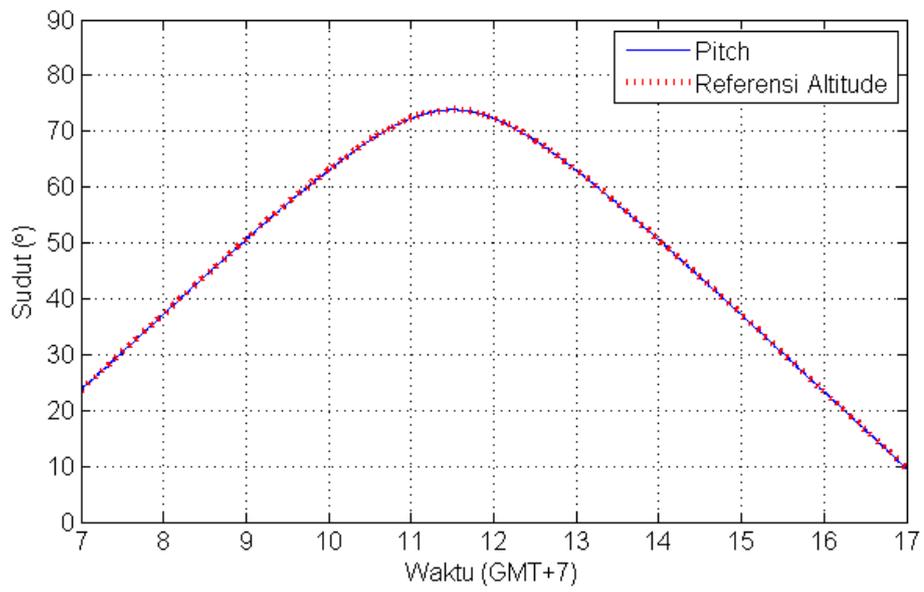


*Altitude*

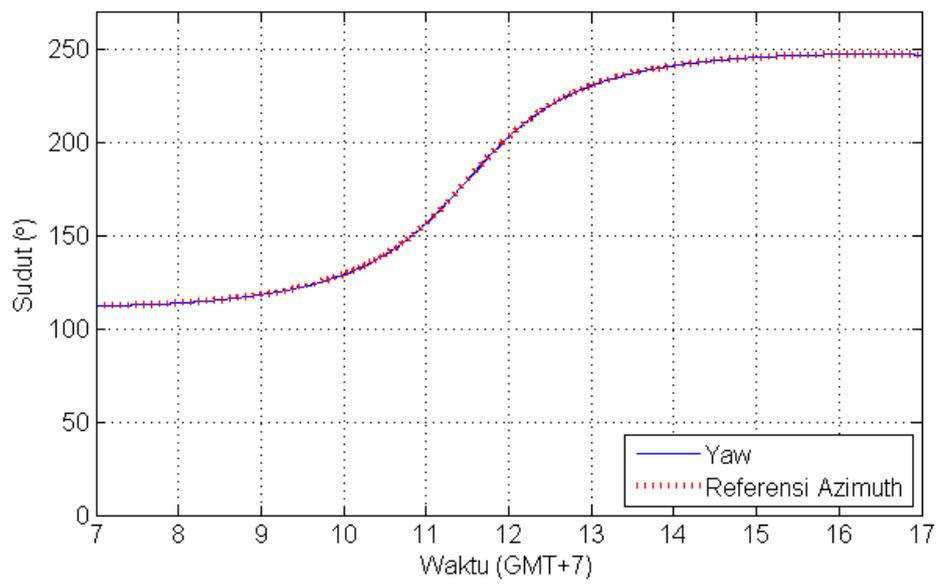


*Azimuth*

21 Desember



*Altitude*

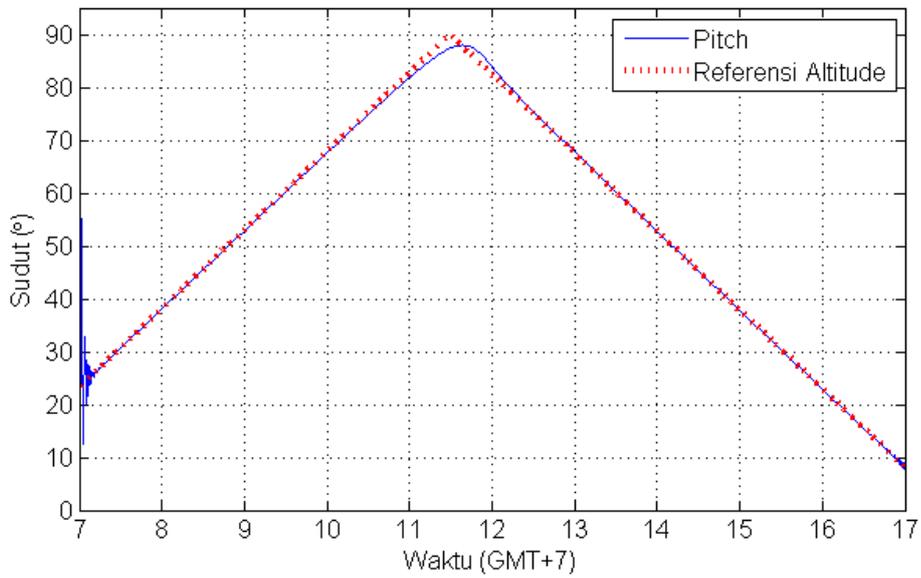


*Azimuth*

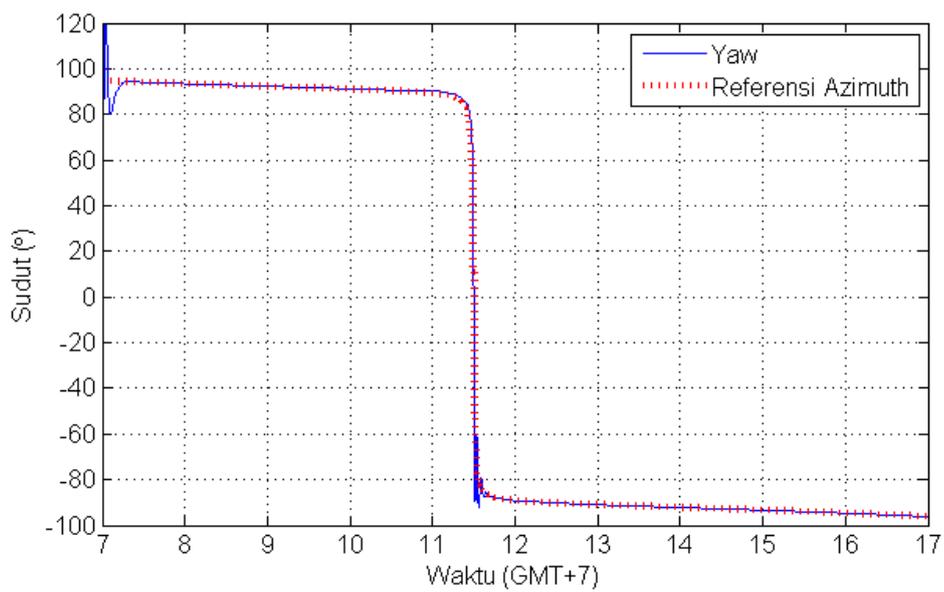
# LAMPIRAN E

## Hasil penjejak aktif menggunakan FLC

4 Maret

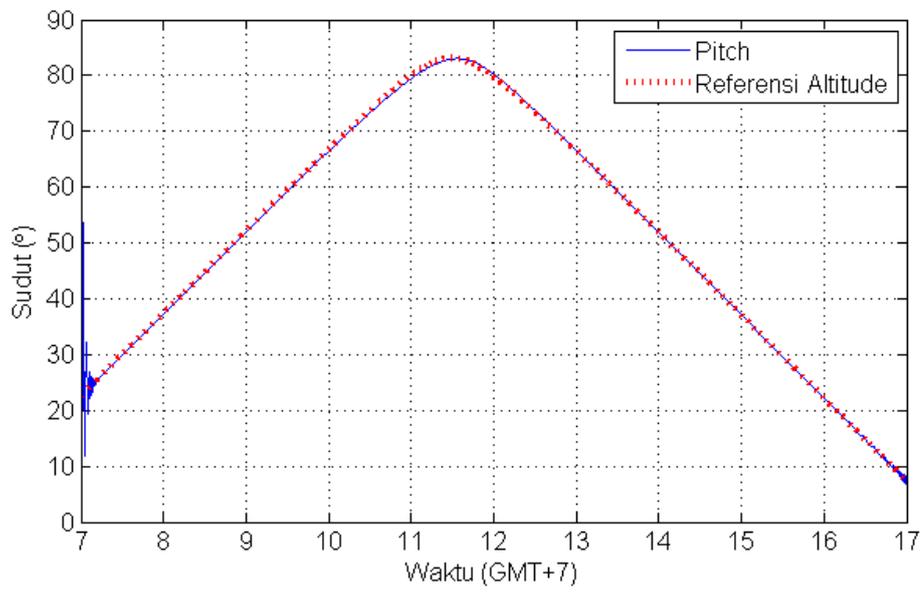


*Altitude*

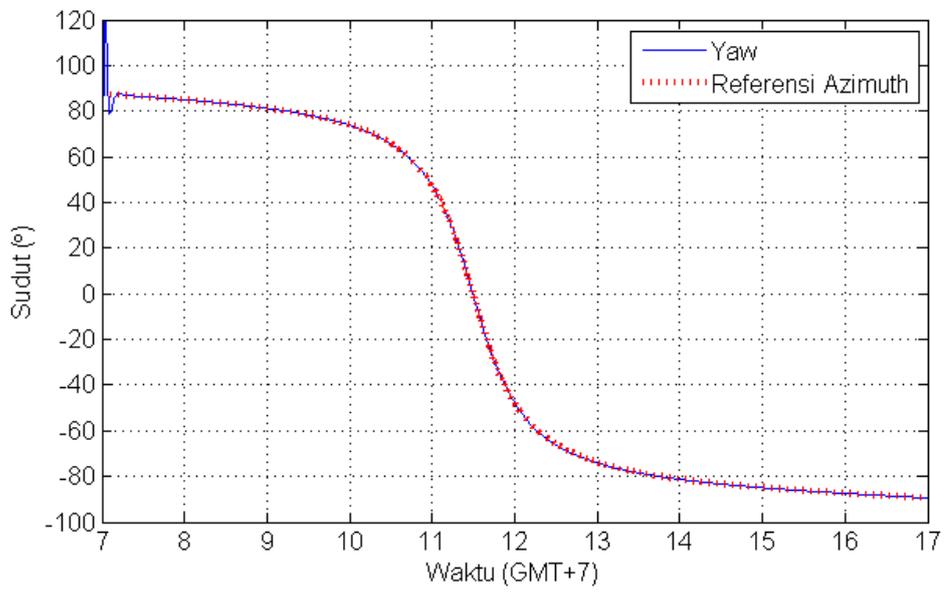


*Azimuth*

21 Maret

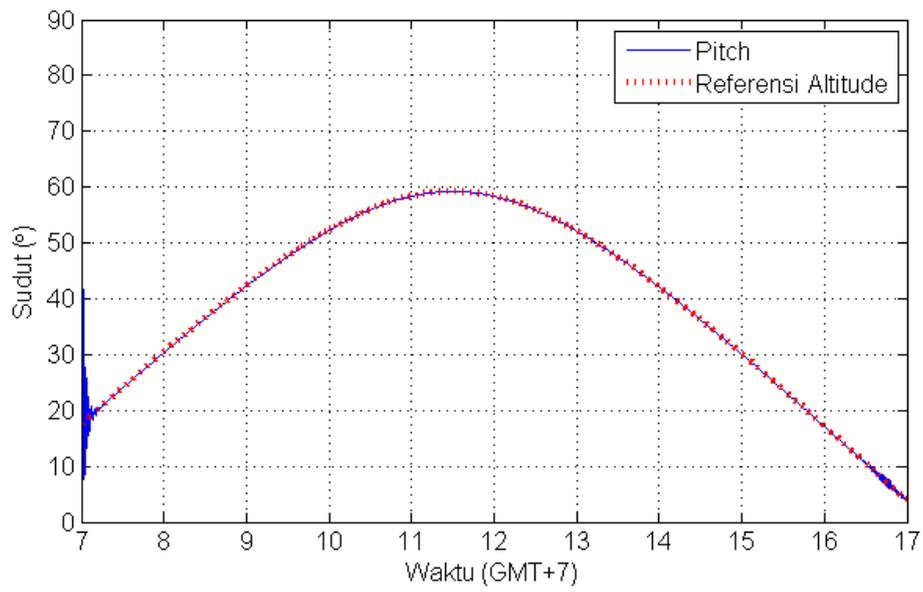


*Altitude*

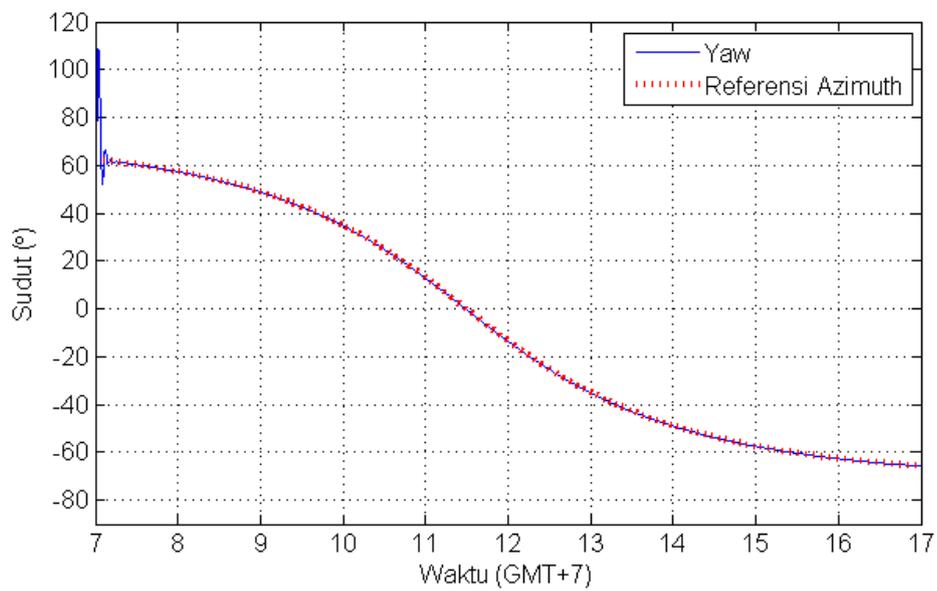


*Azimuth*

21 Juni

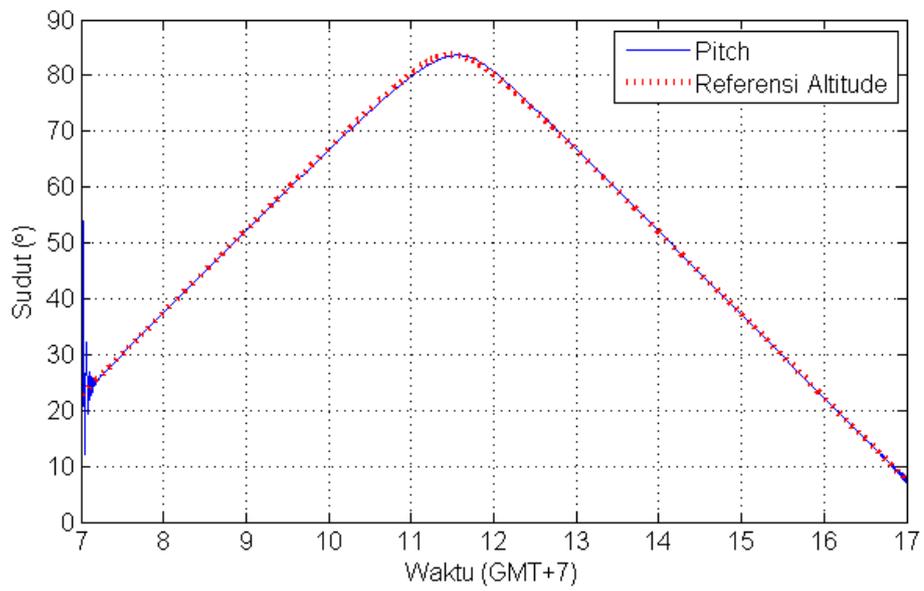


*Altitude*

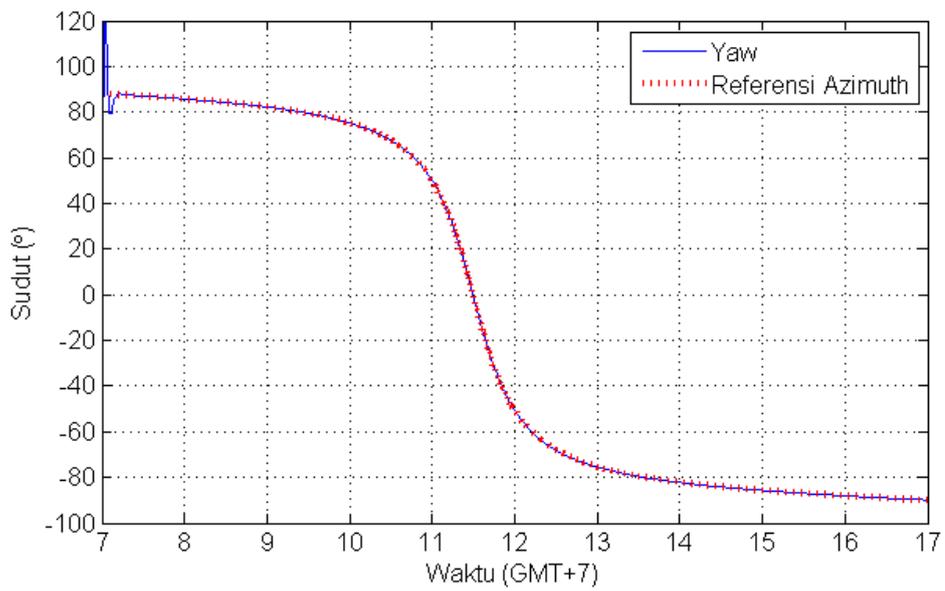


*Azimuth*

23 September

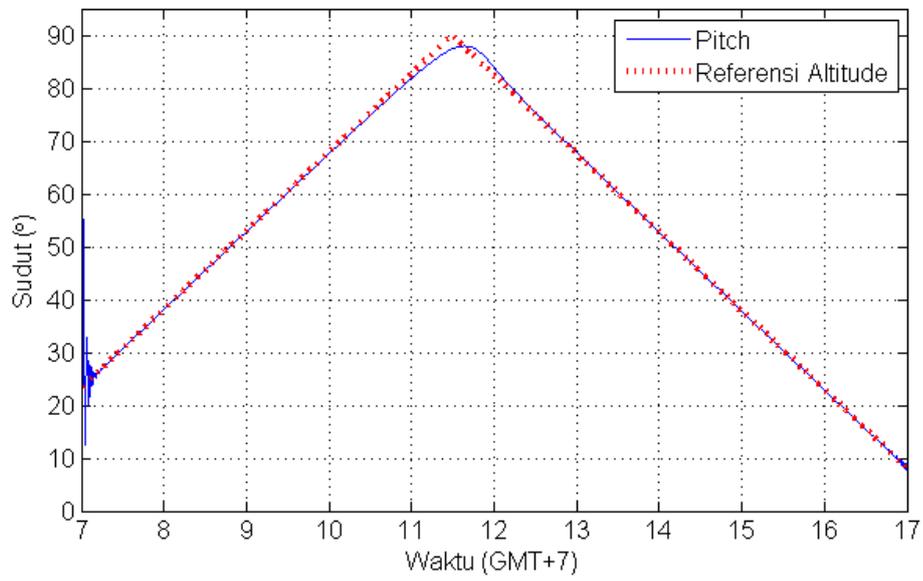


*Altitude*

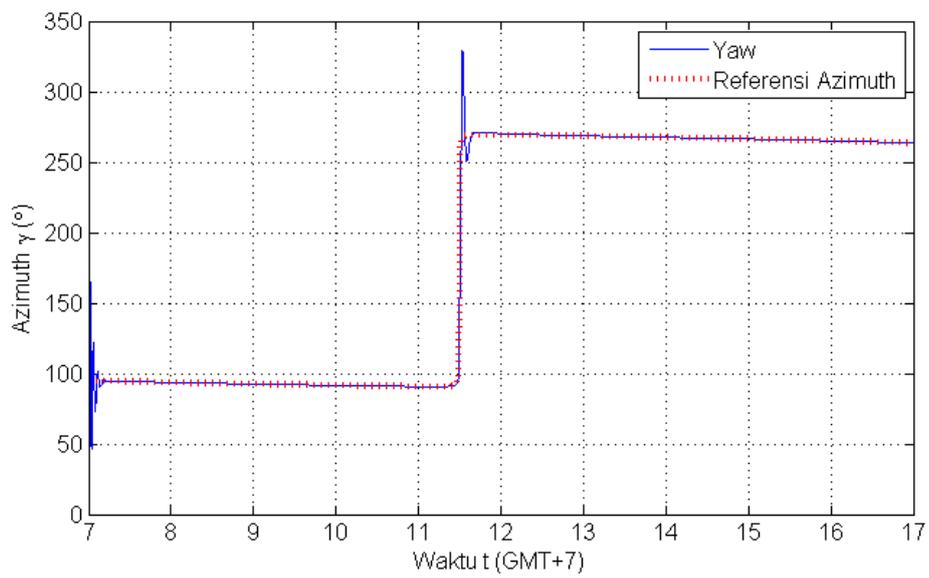


*Azimuth*

9 Oktober

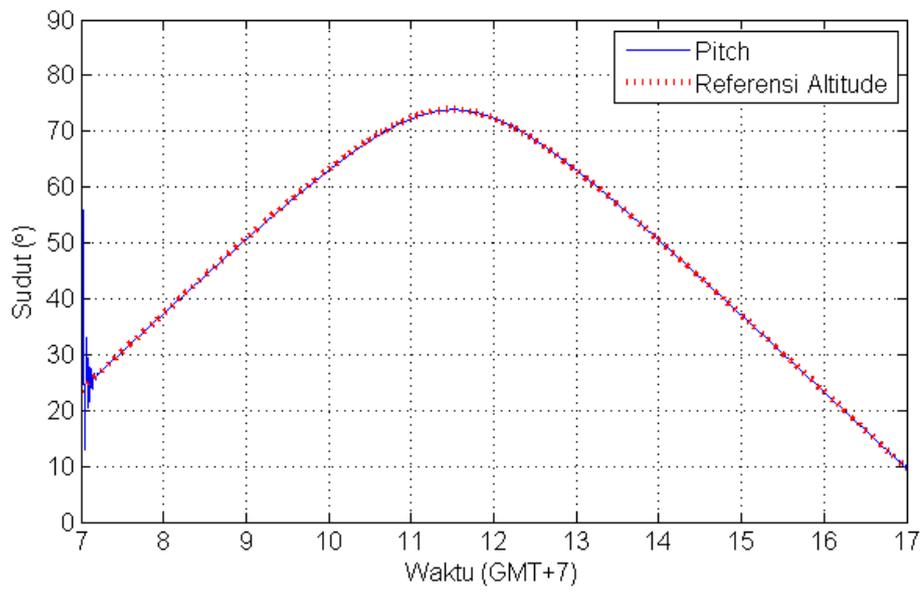


*Altitude*

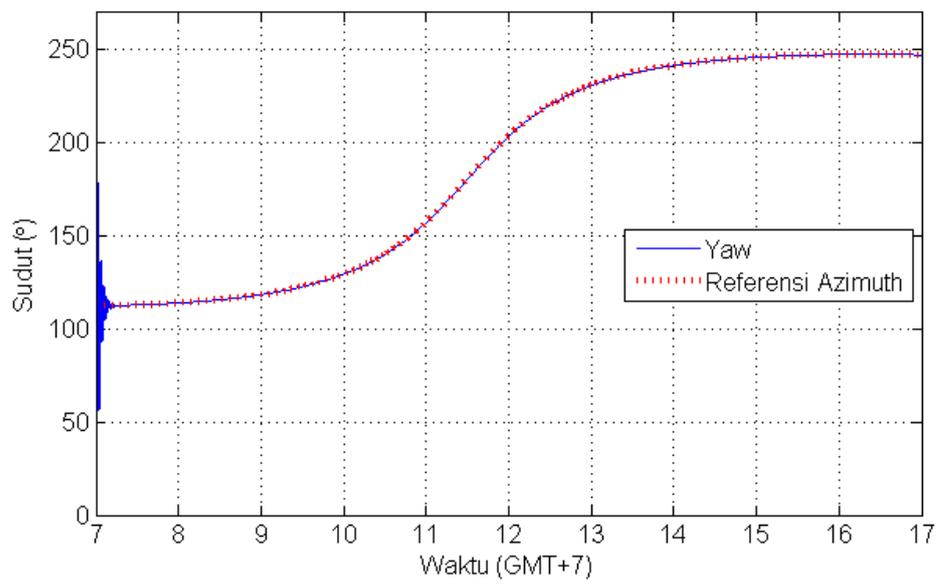


*Azimuth*

21 Desember



*Altitude*

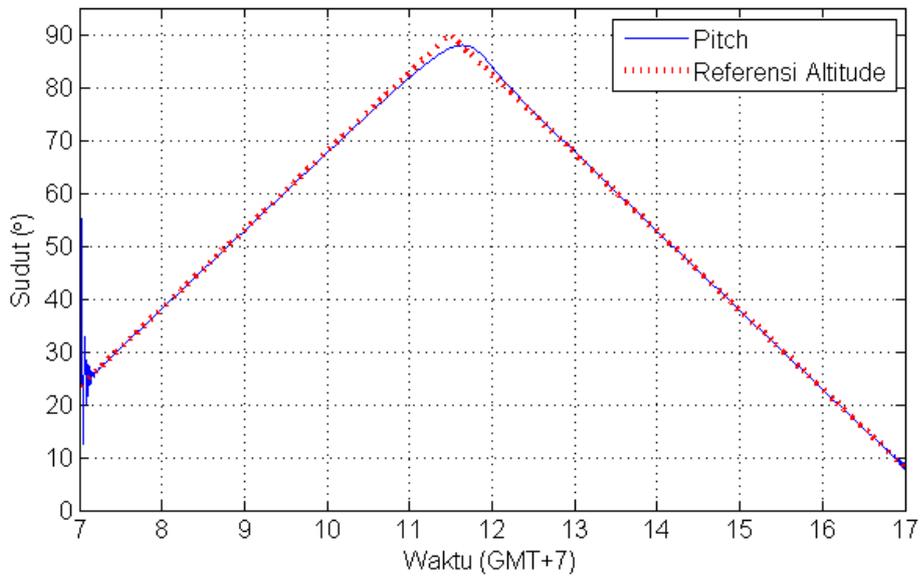


*Azimuth*

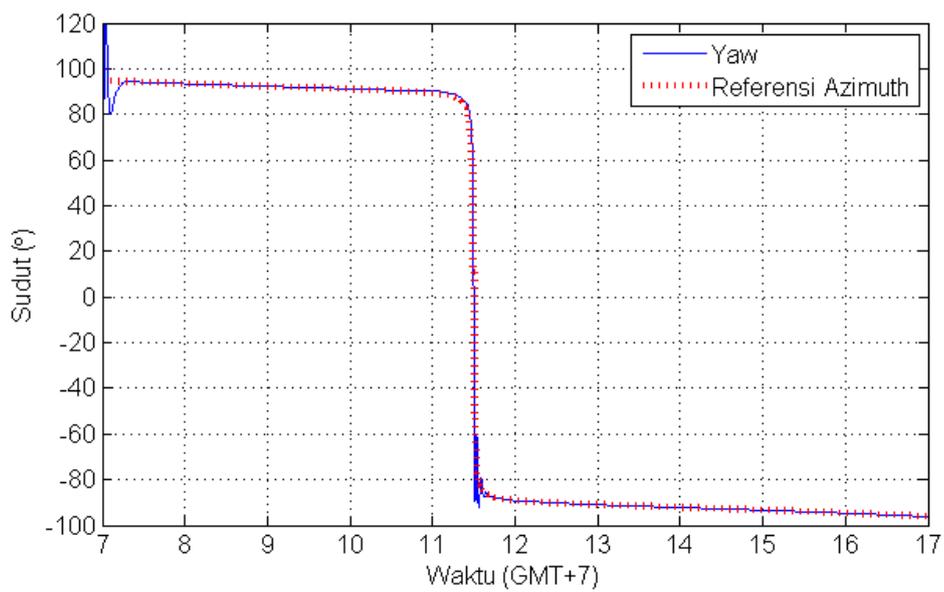
# LAMPIRAN F

## Hasil penjejak aktif-pasif menggunakan MPC-FLC

4 Maret

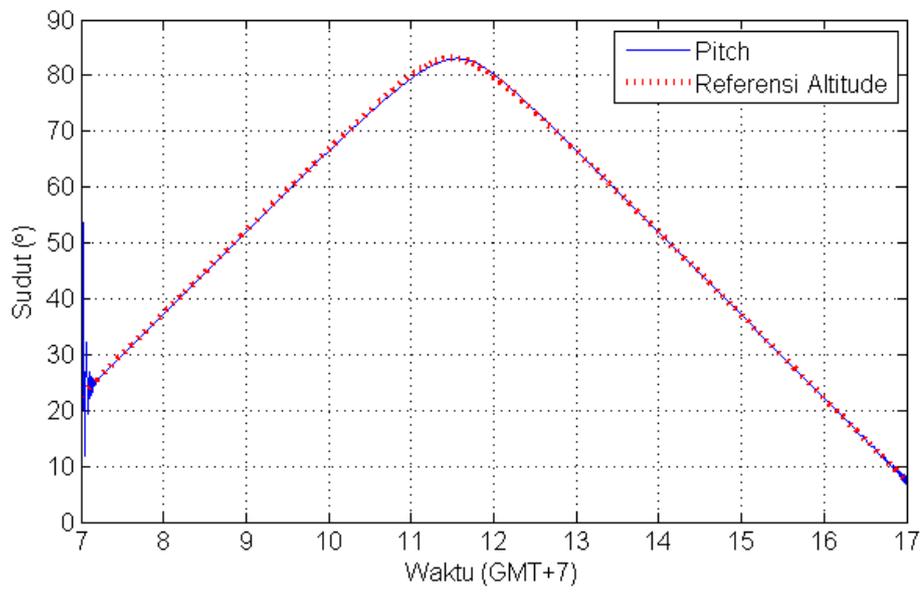


*Altitude*

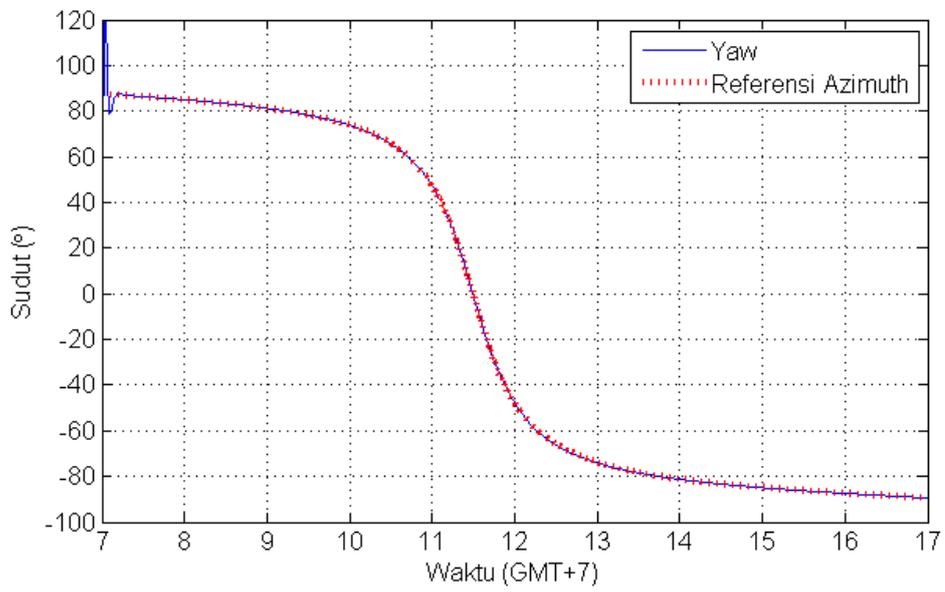


*Azimuth*

21 Maret

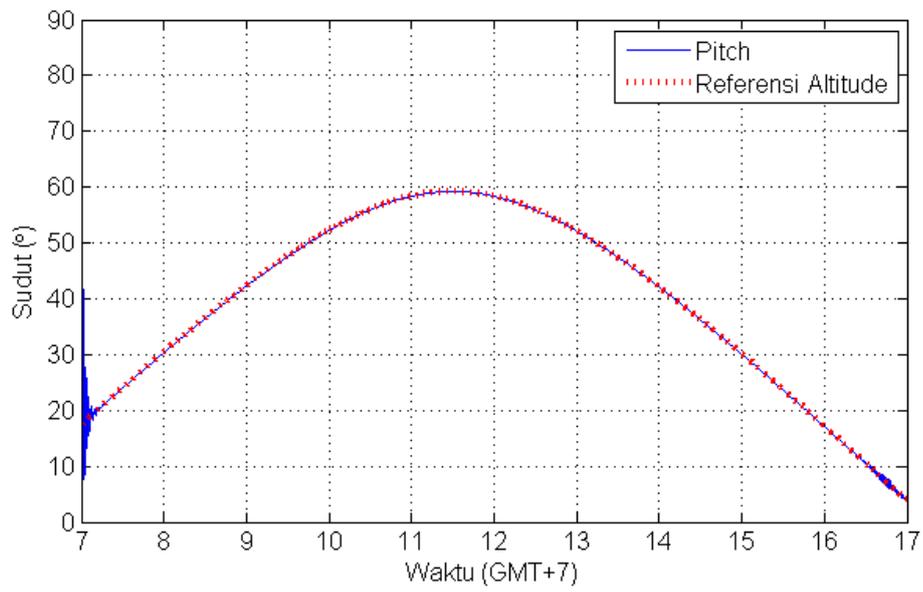


*Altitude*

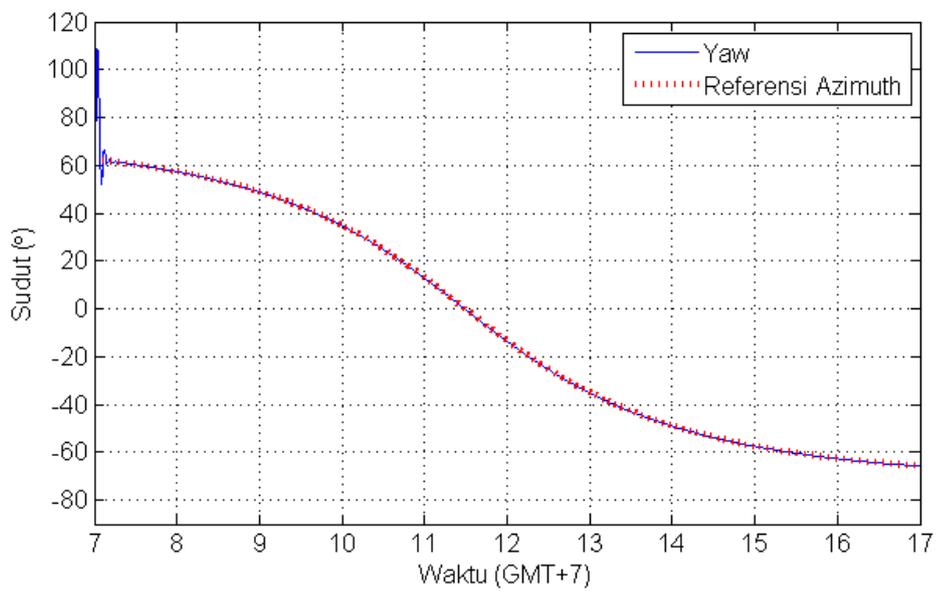


*Azimuth*

21 Juni

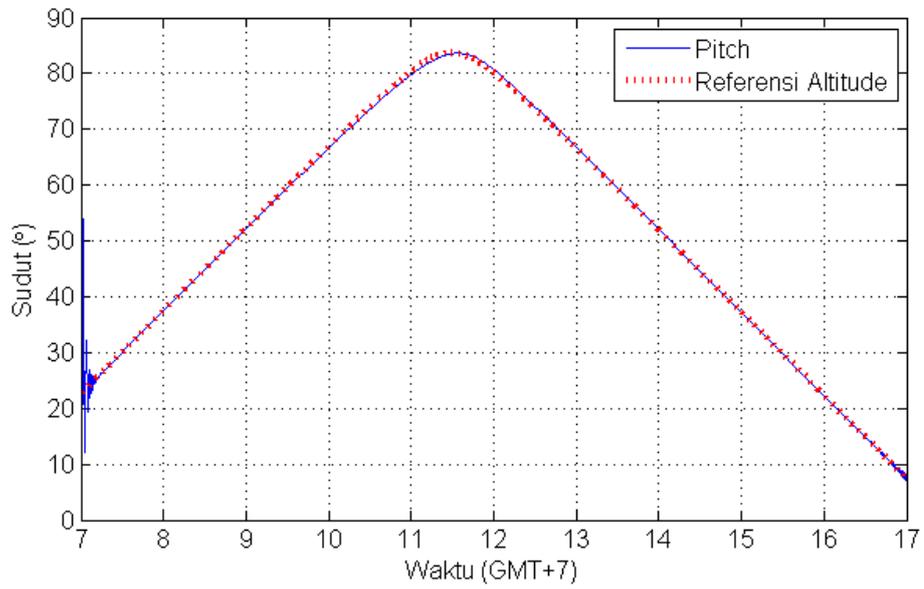


*Altitude*

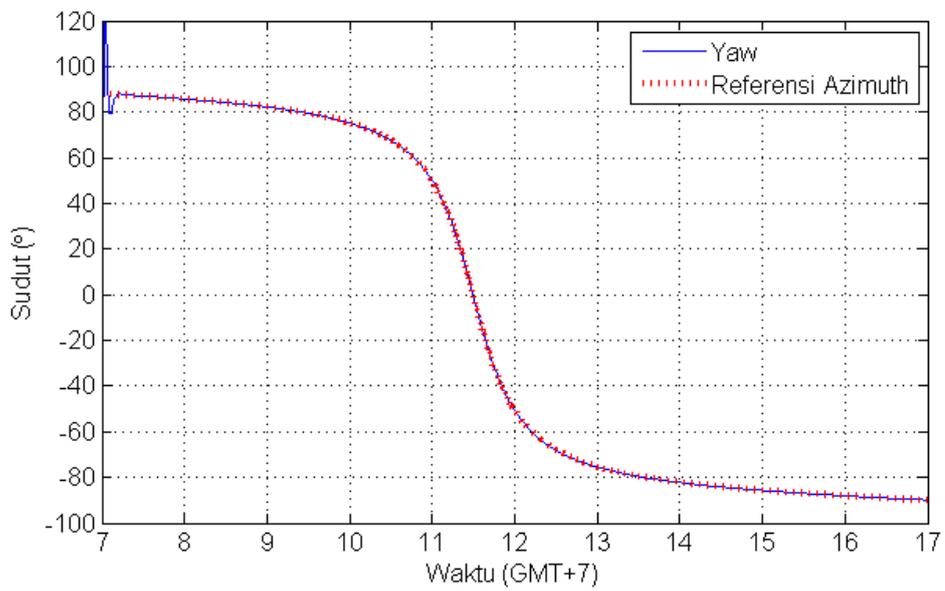


*Azimuth*

23 September

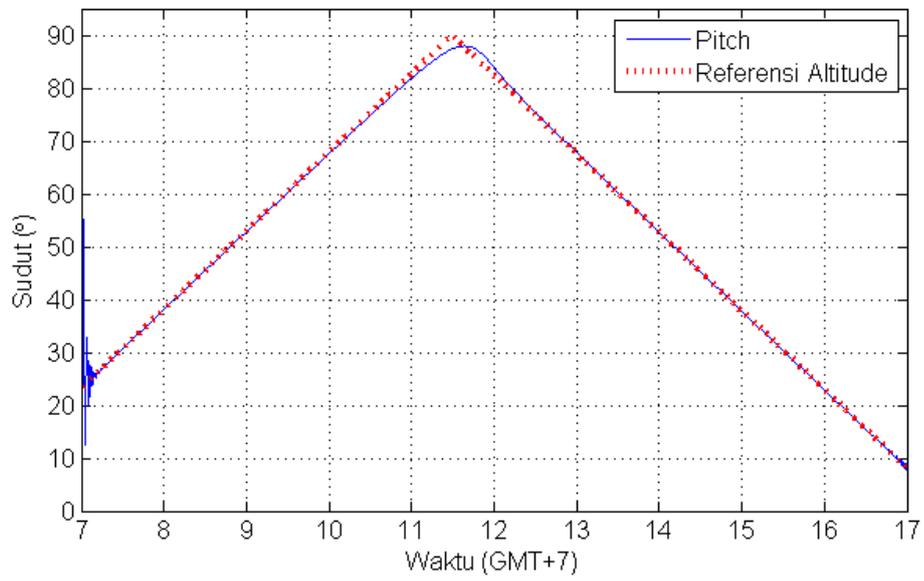


*Altitude*

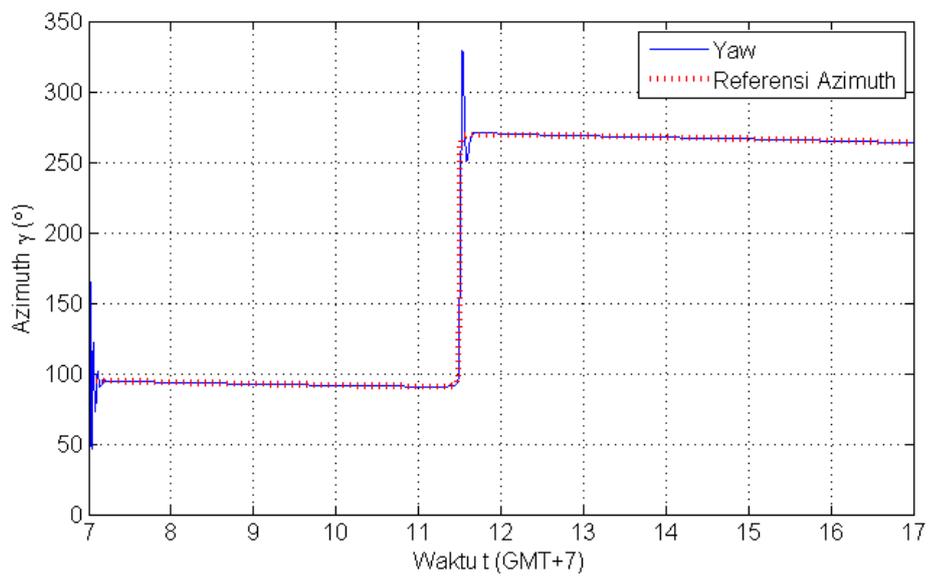


*Azimuth*

9 Oktober

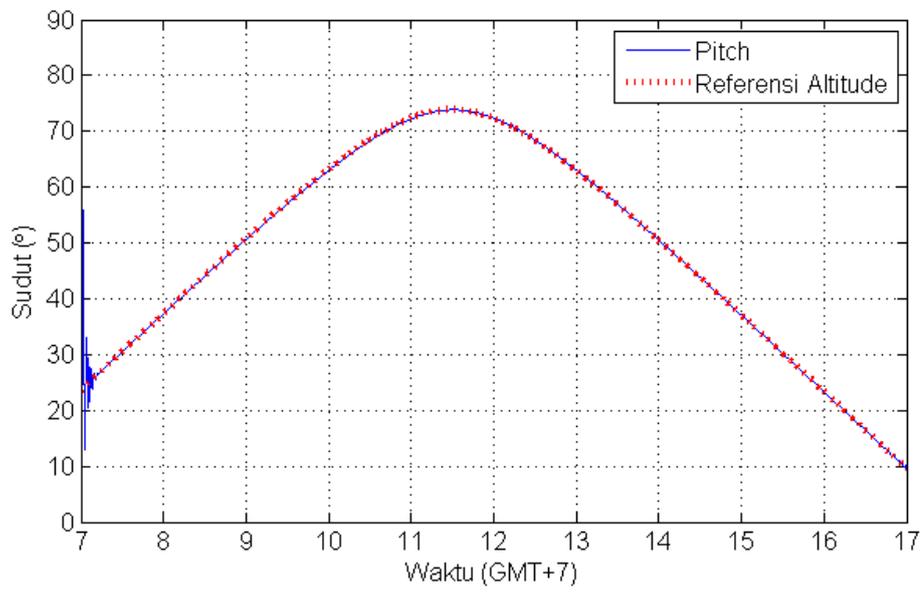


*Altitude*

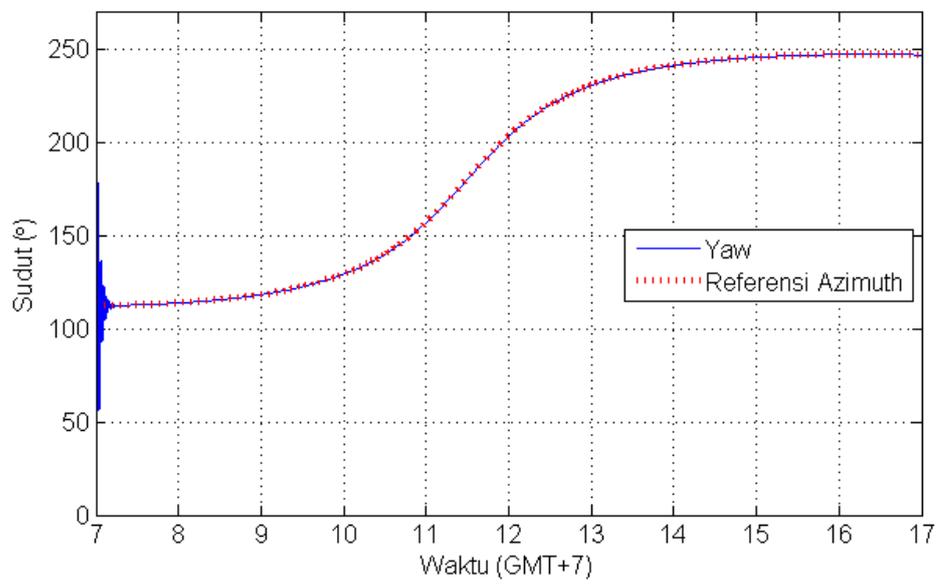


*Azimuth*

21 Desember



*Altitude*

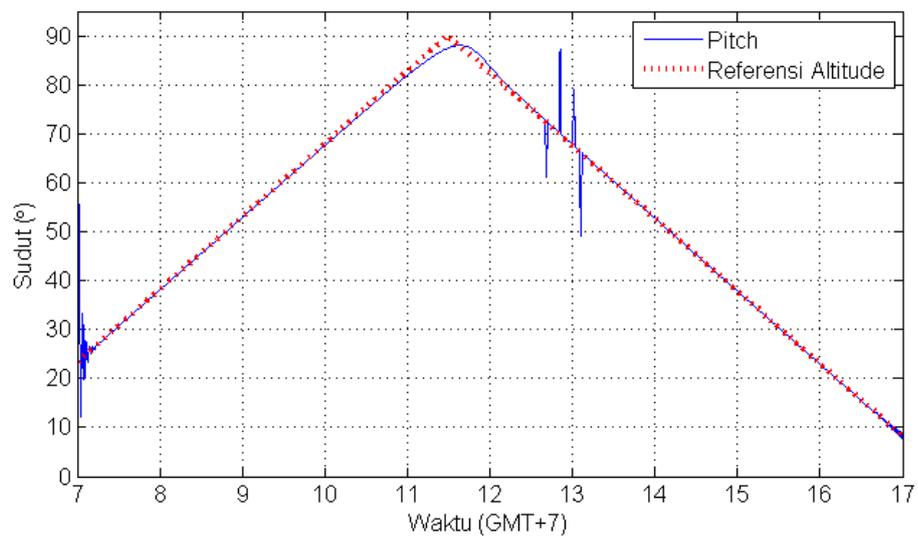


*Azimuth*

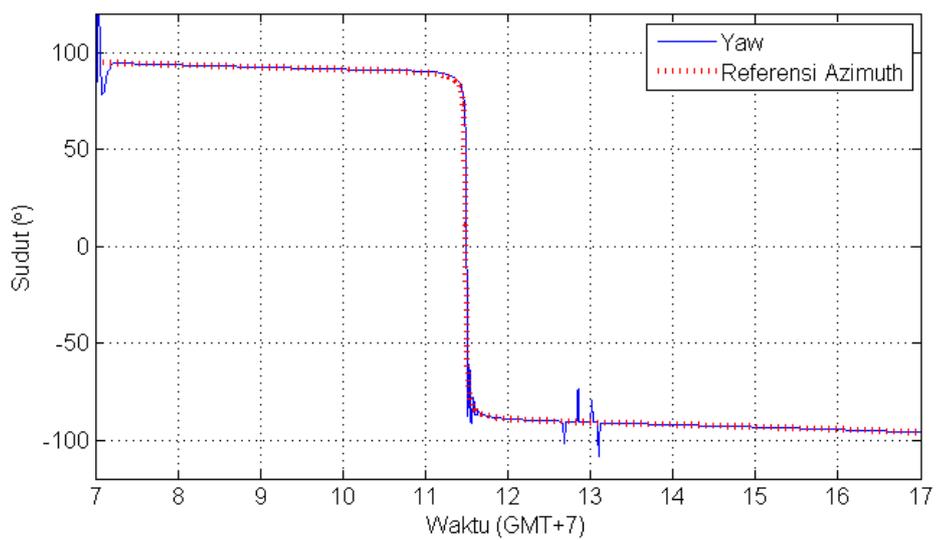
# LAMPIRAN G

## Hasil penjejak MPC-FLC dengan gangguan perubahan posisi

4 Maret

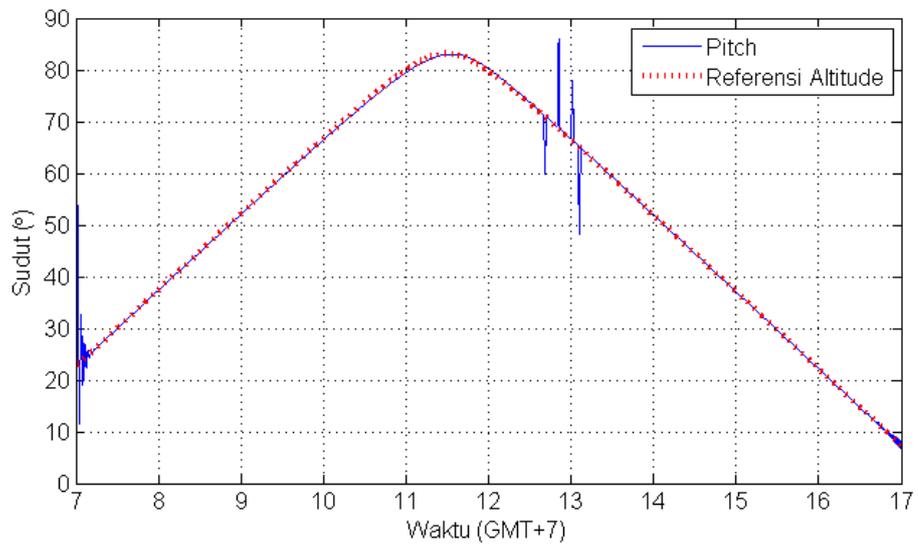


*Altitude*

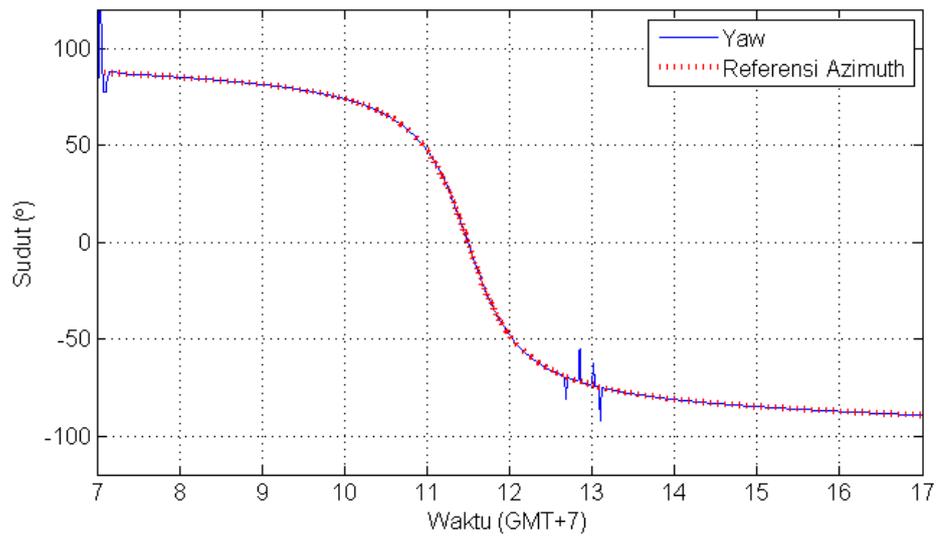


*Azimuth*

21 Maret

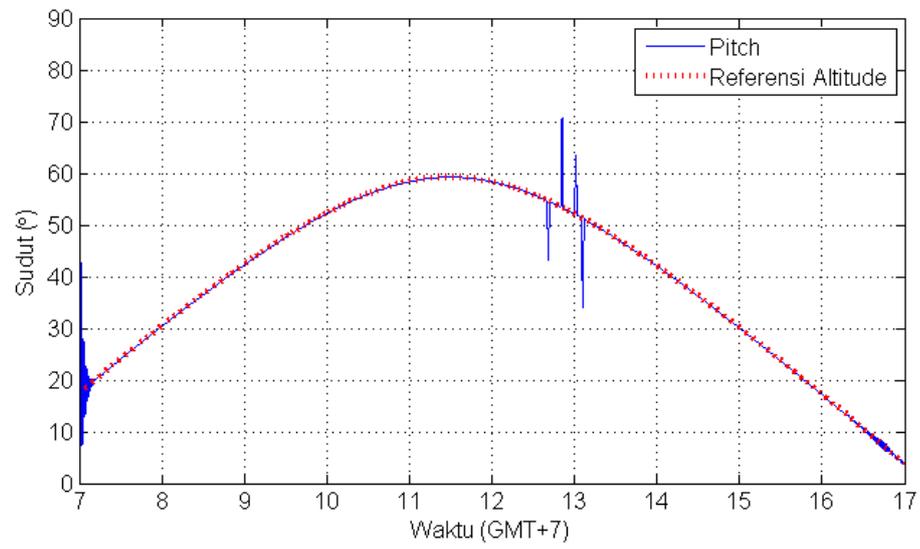


*Altitude*

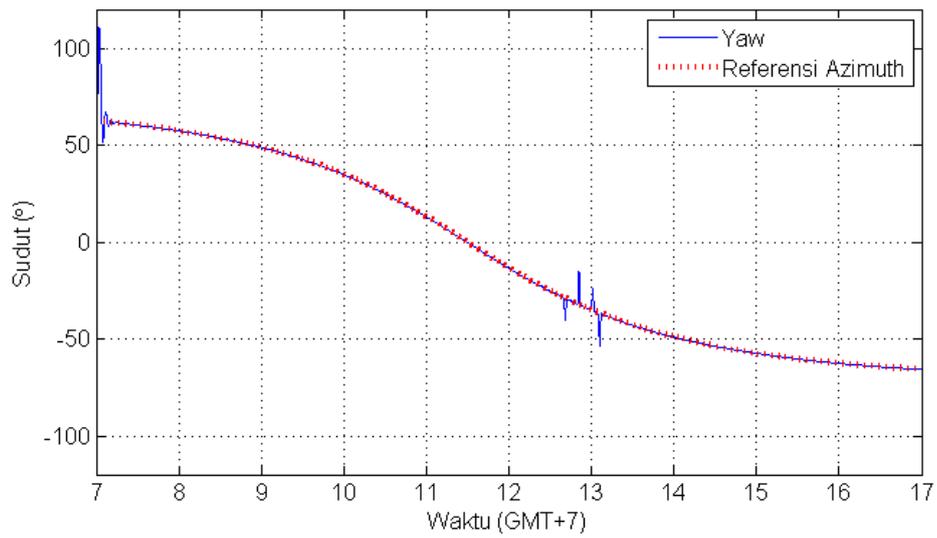


*Azimuth*

21 Juni

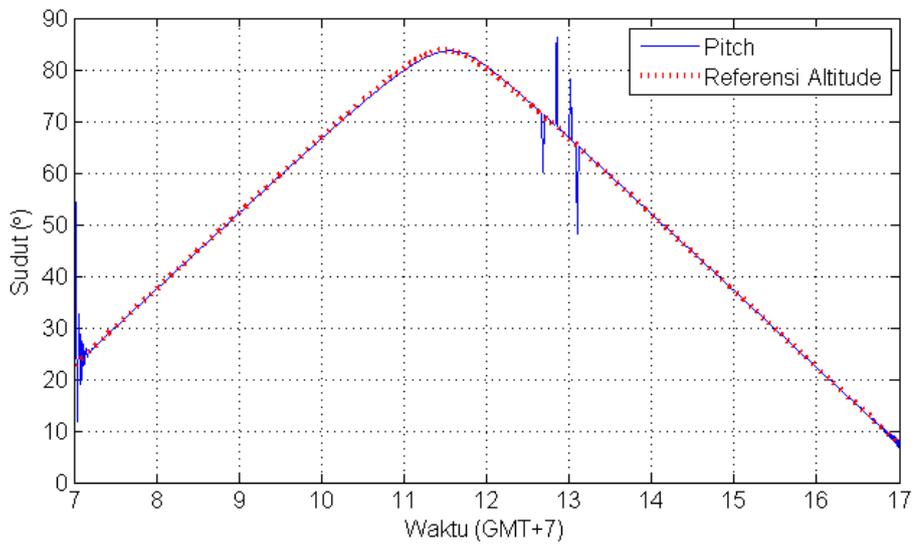


*Altitude*

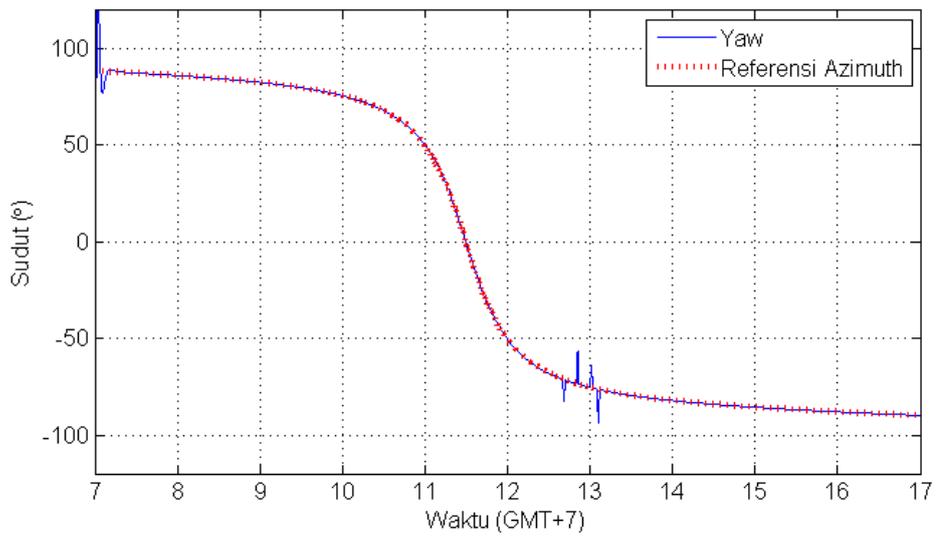


*Azimuth*

23 September

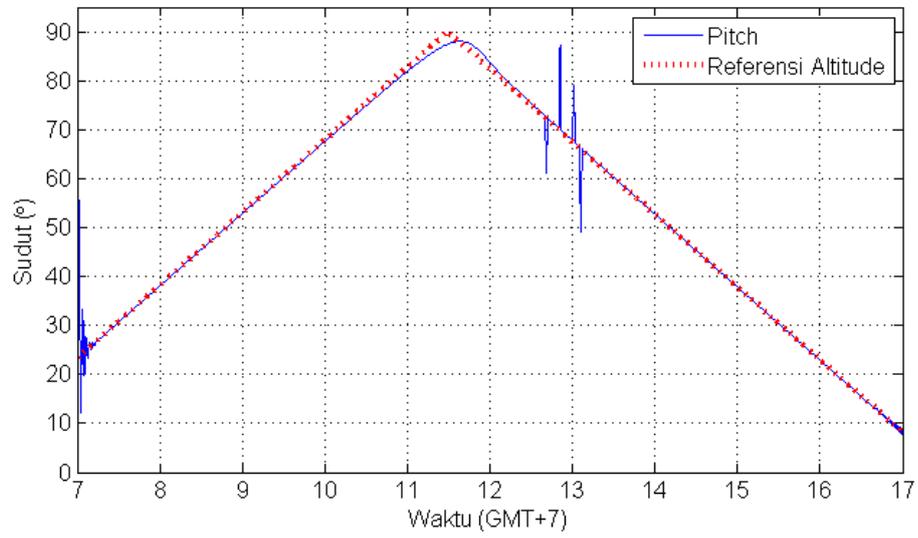


*Altitude*

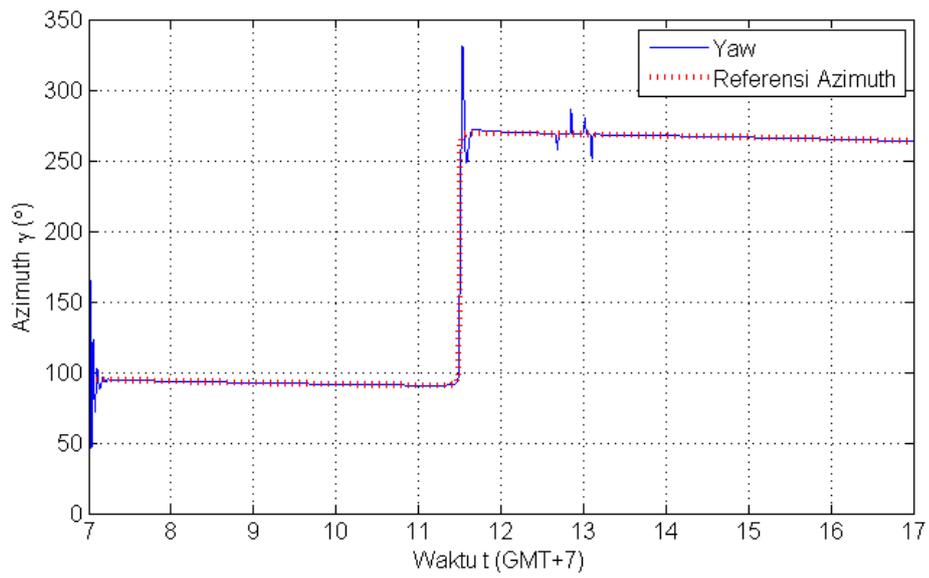


*Azimuth*

9 Oktober

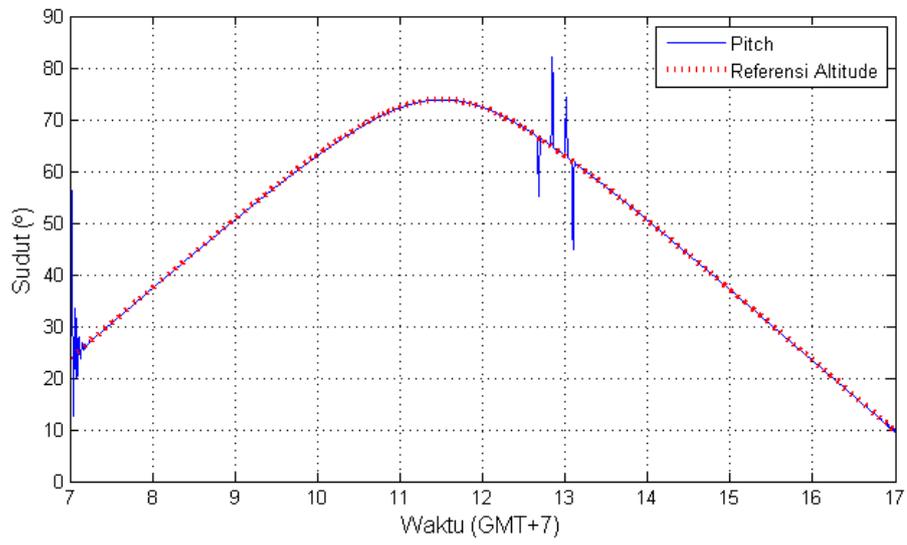


*Altitude*

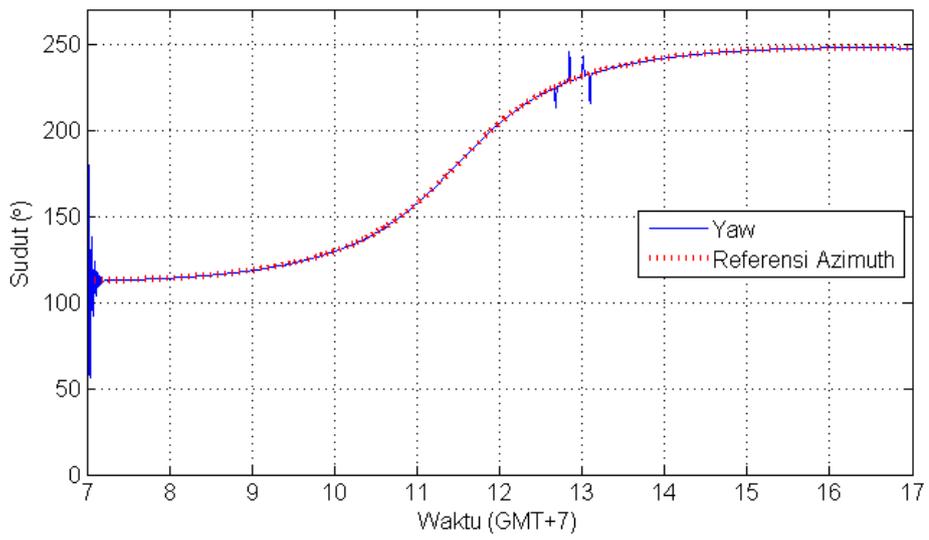


*Azimuth*

21 Desember



*Altitude*

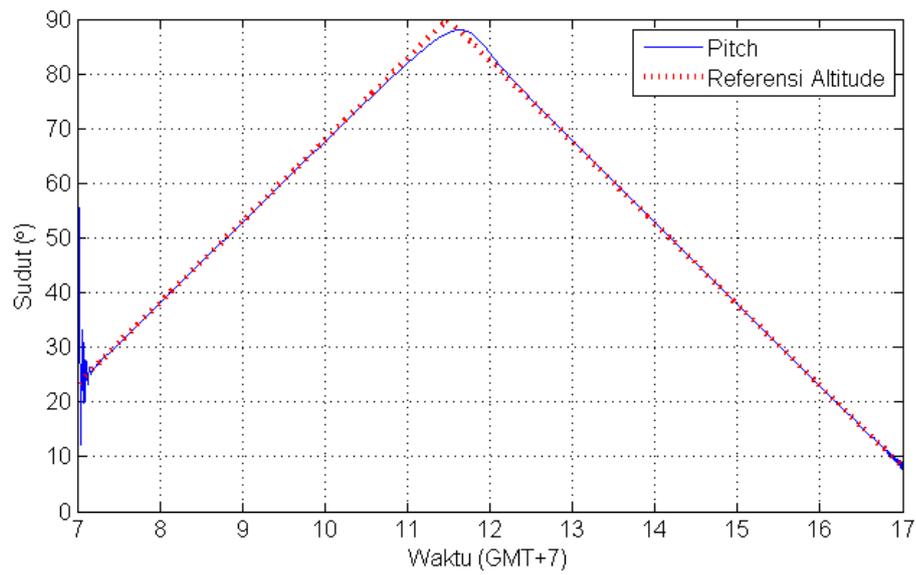


*Azimuth*

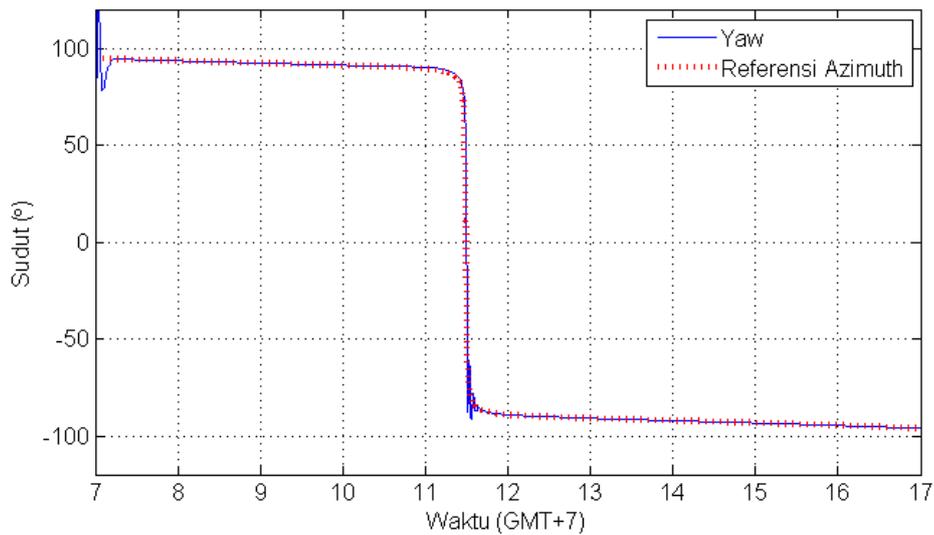
# LAMPIRAN H

## Hasil penjejak MPC-FLC dengan gangguan perubahan intensitas cahaya

4 Maret

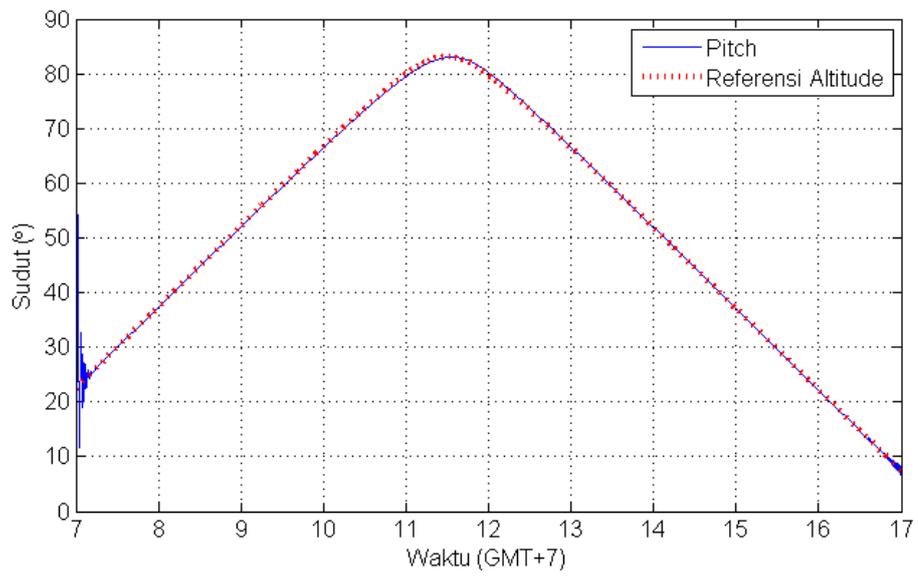


*Altitude*

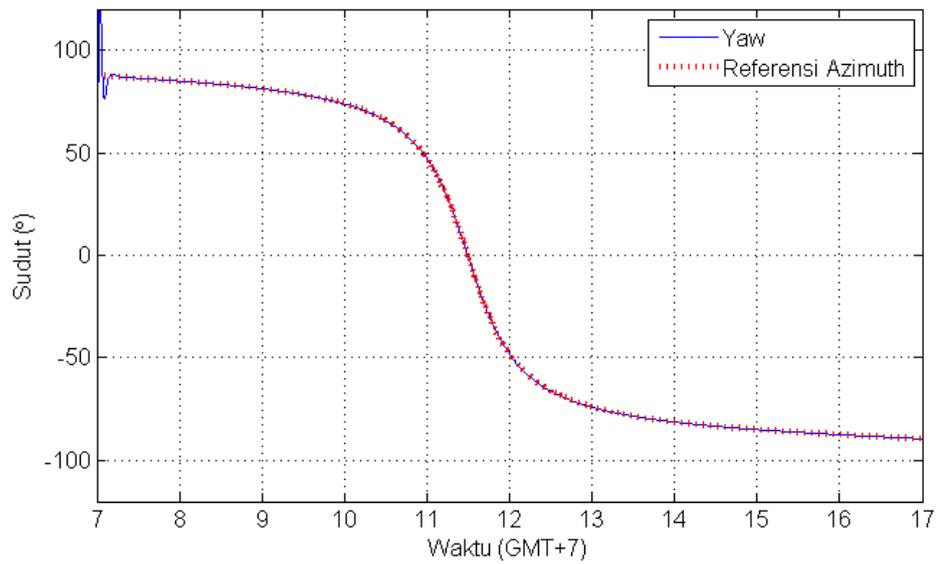


*Azimuth*

21 Maret

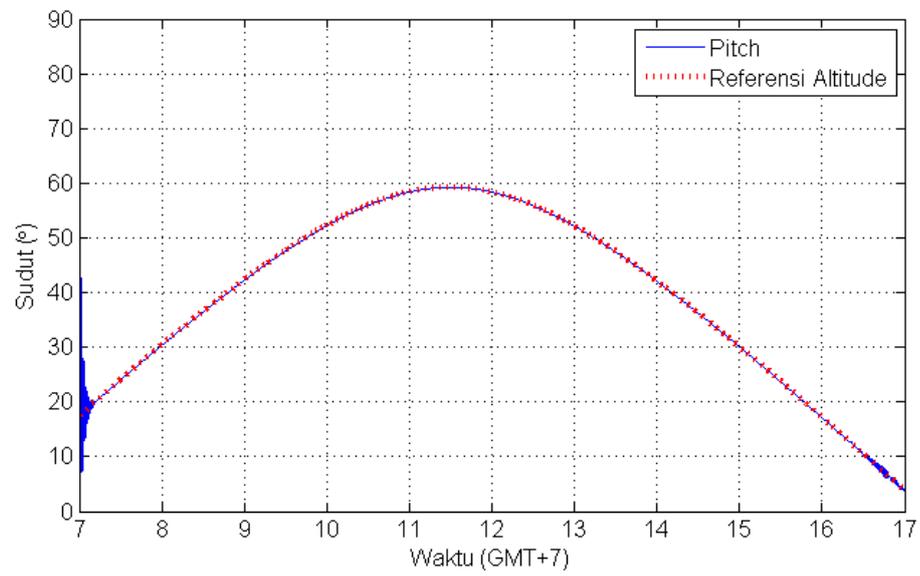


*Altitude*

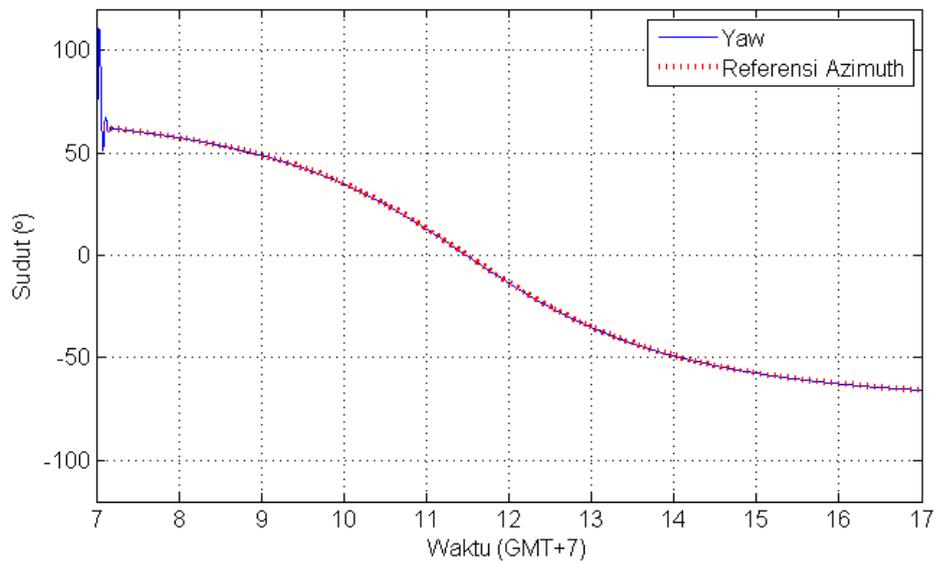


*Azimuth*

21 Juni

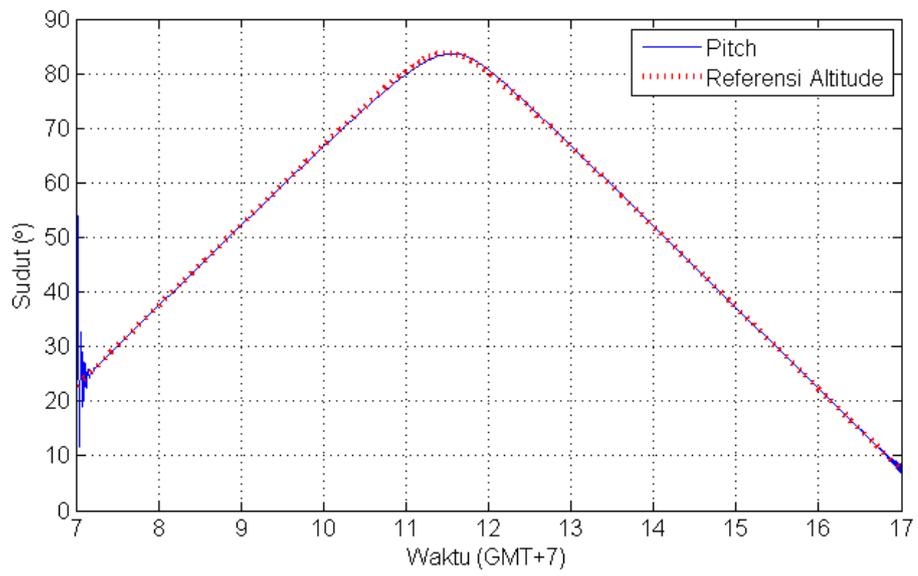


*Altitude*

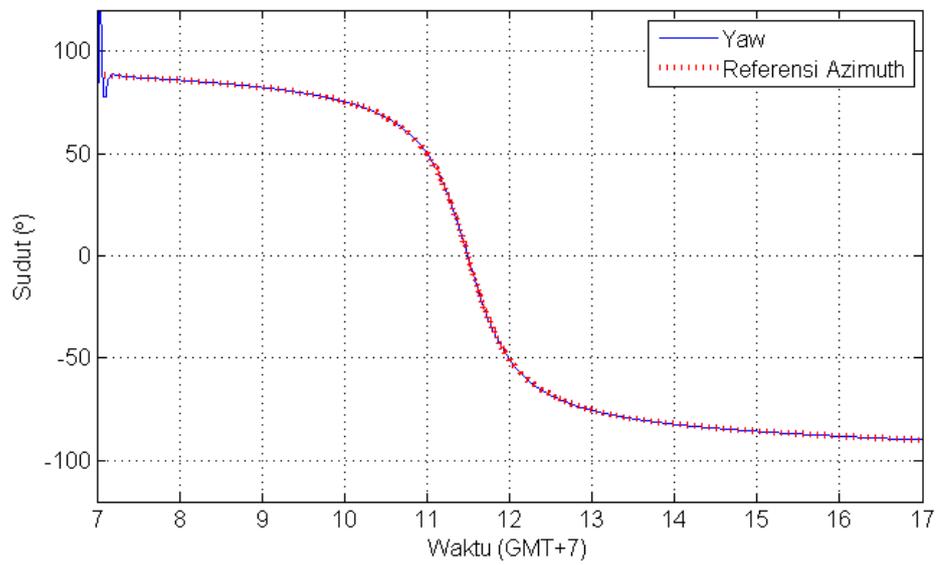


*Azimuth*

23 September

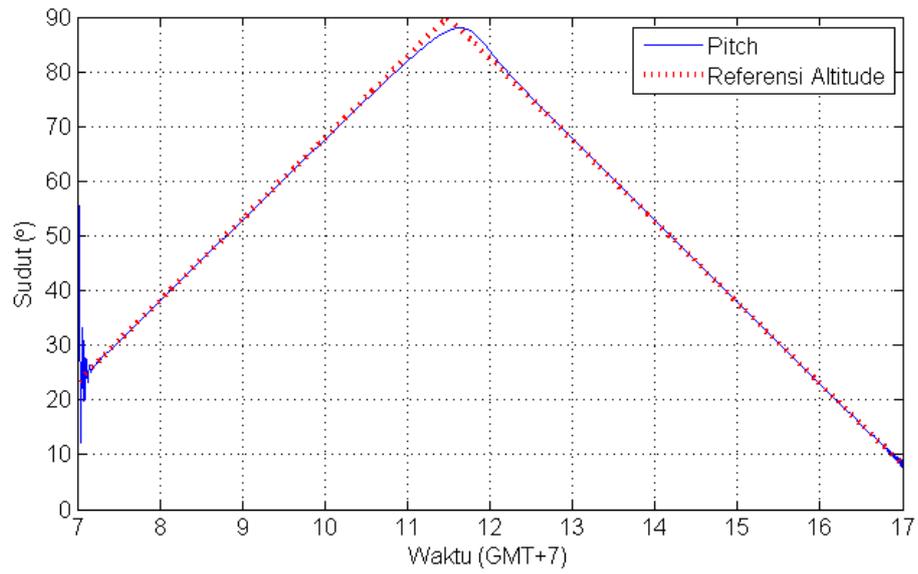


*Altitude*

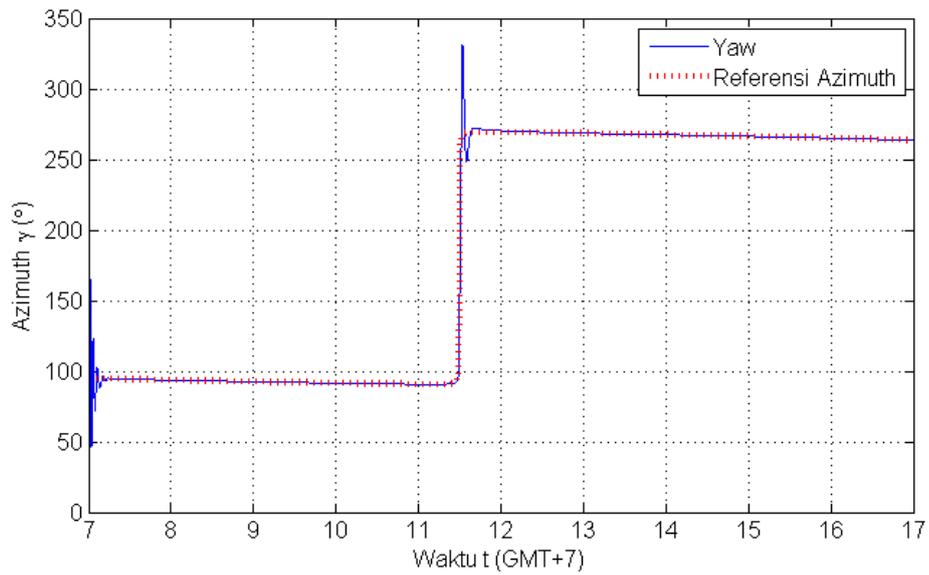


*Azimuth*

9 Oktober

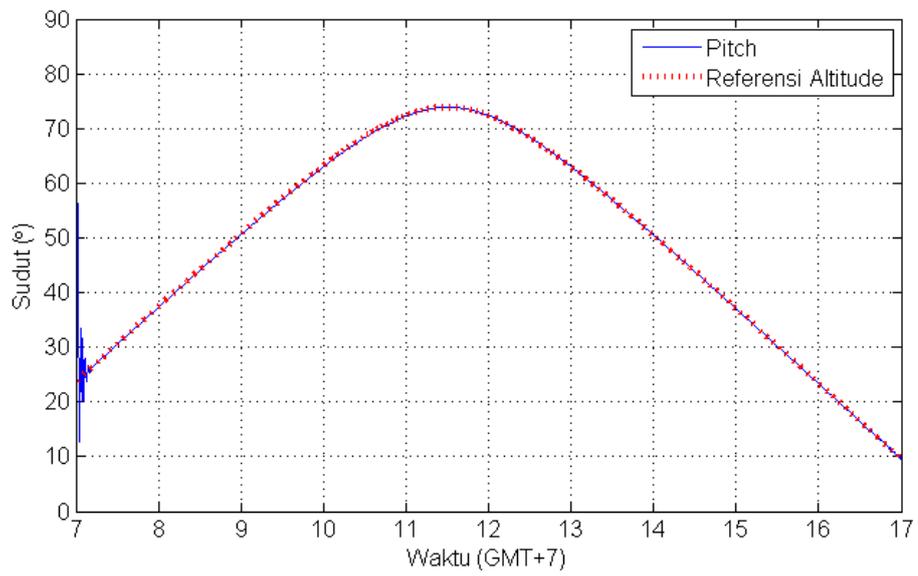


*Altitude*

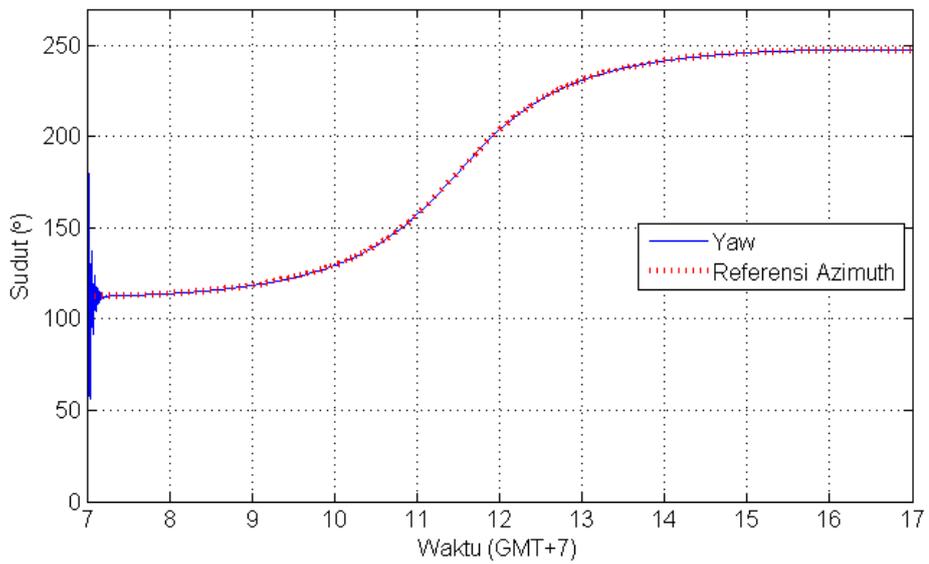


*Azimuth*

21 Desember



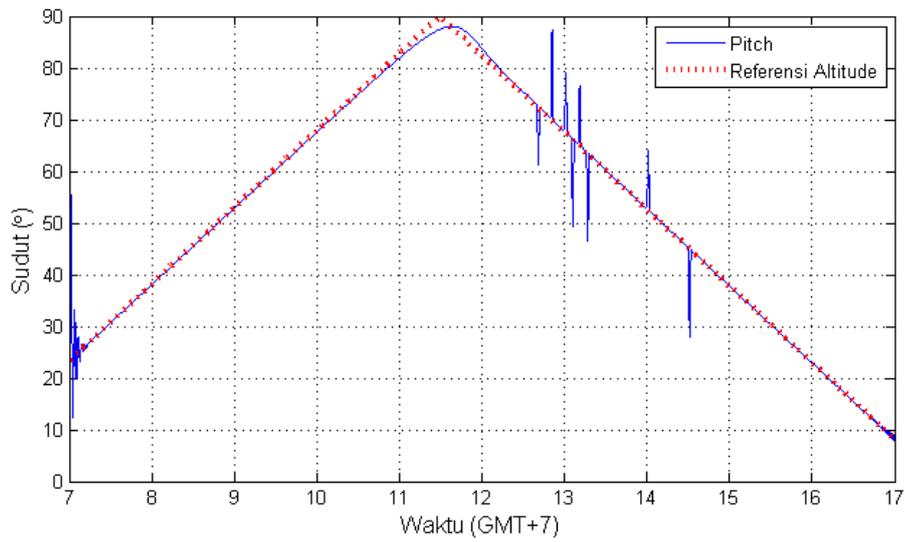
*Altitude*



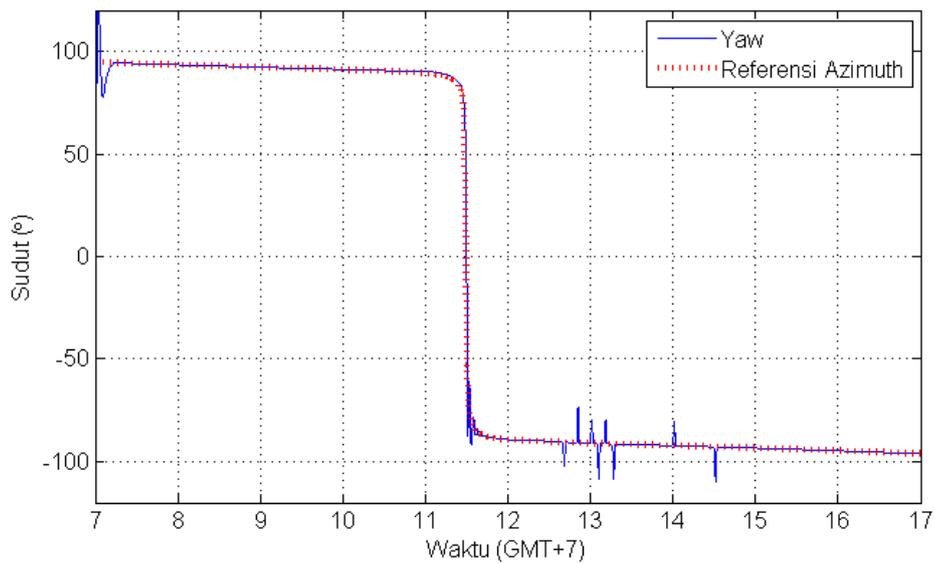
*Azimuth*

**LAMPIRAN I**  
**Hasil penjejak MPC-FLC dengan gangguan kombinasi perubahan posisi dan intensitas cahaya**

4 Maret

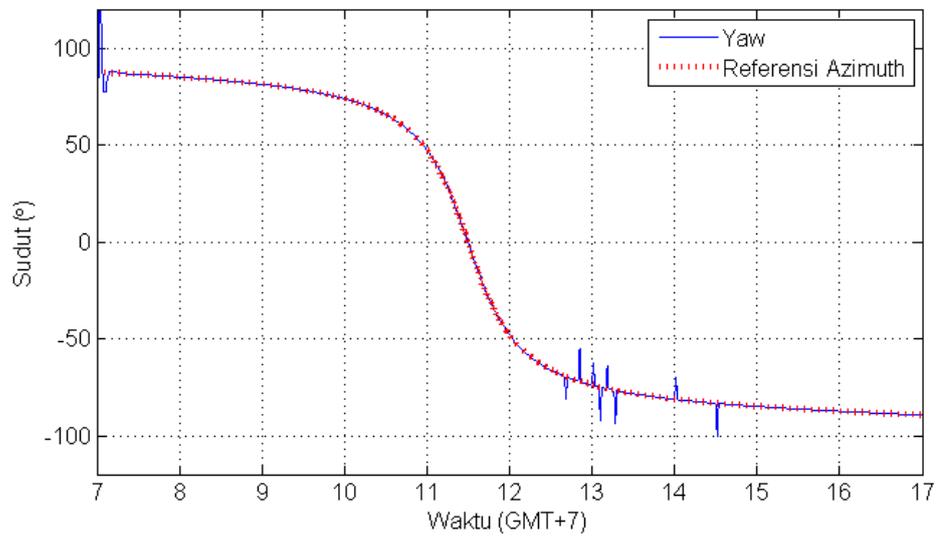


*Altitude*

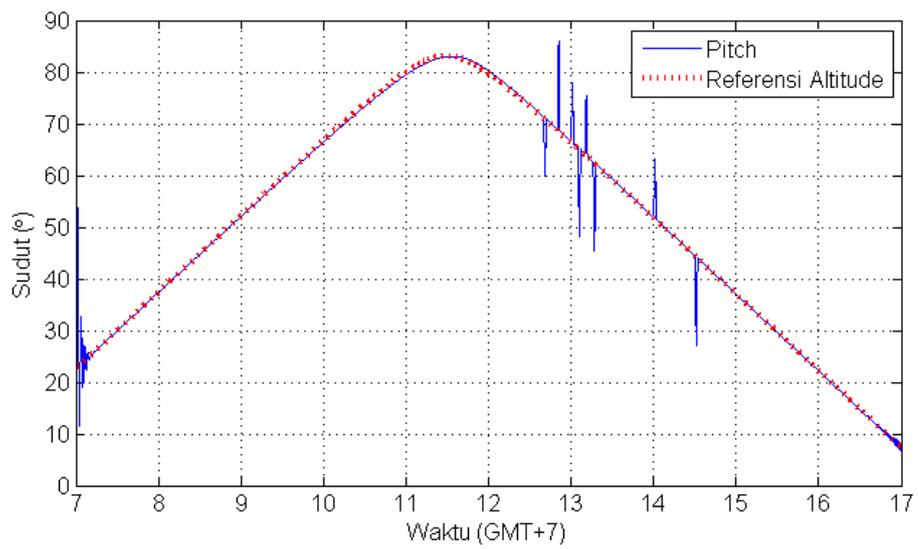


*Azimuth*

21 Maret

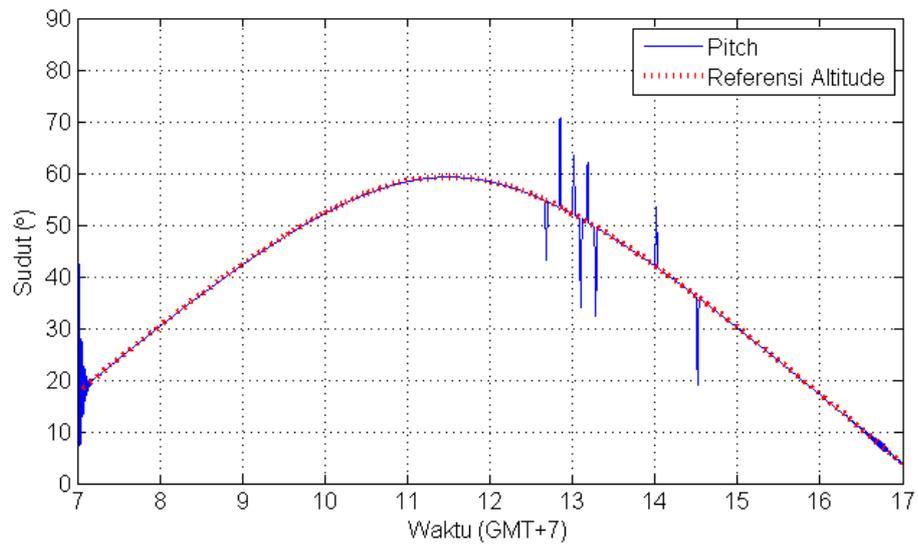


*Altitude*

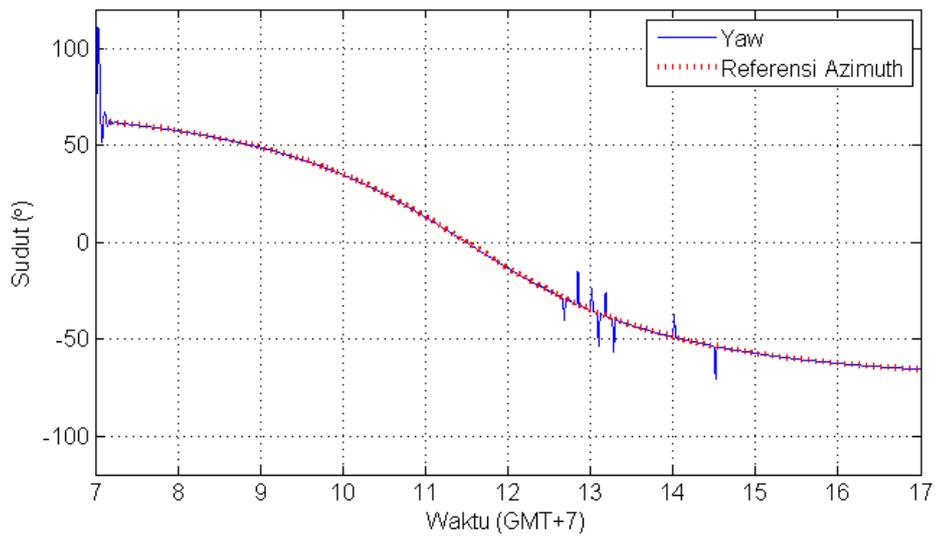


*Azimuth*

21 Juni

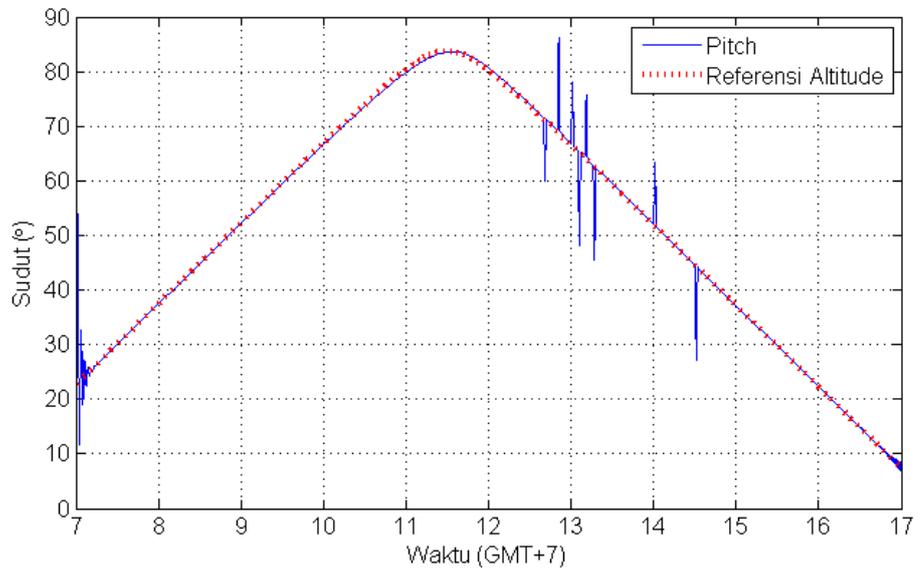


*Altitude*

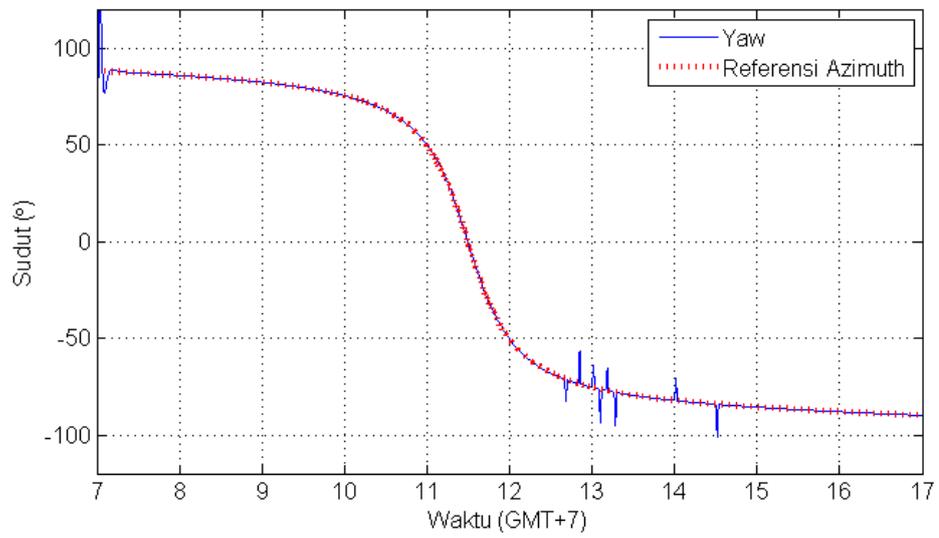


*Azimuth*

23 September

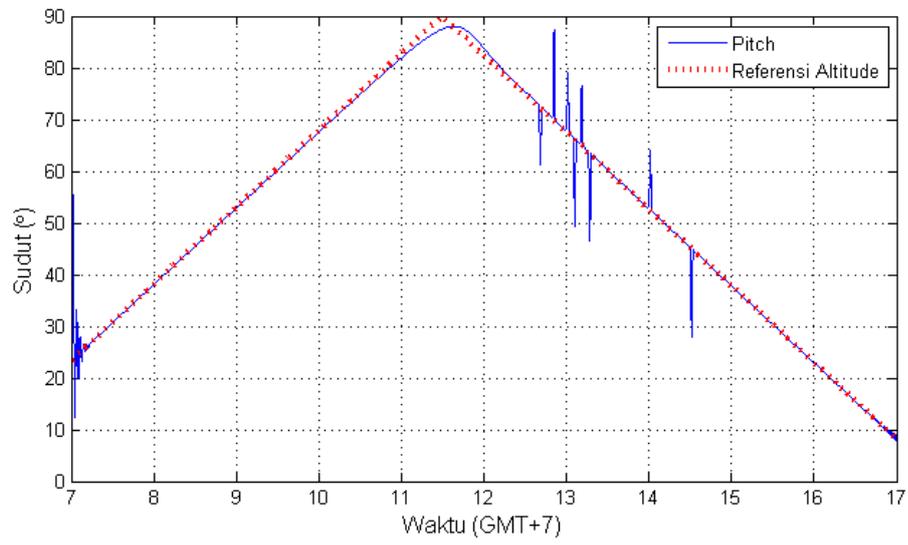


*Altitude*

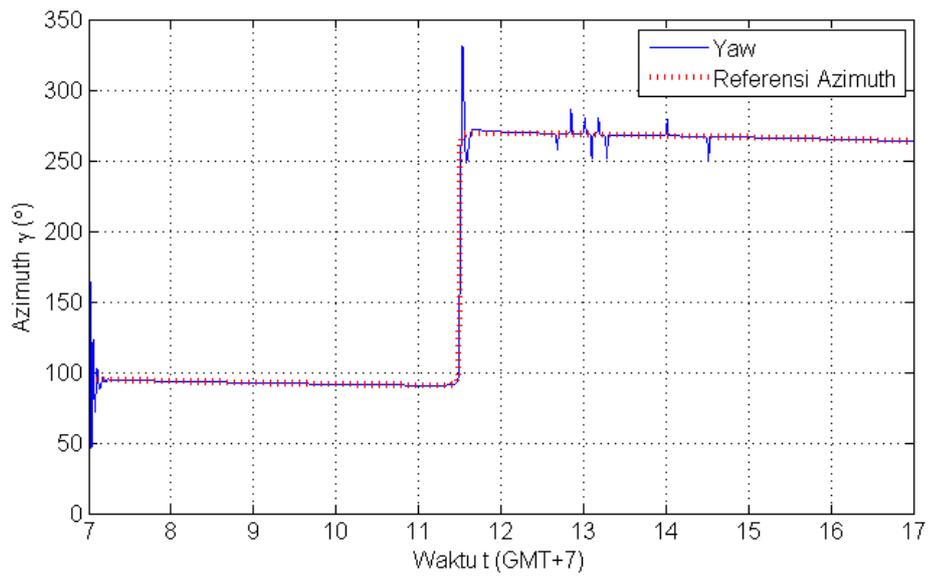


*Azimuth*

9 Oktober

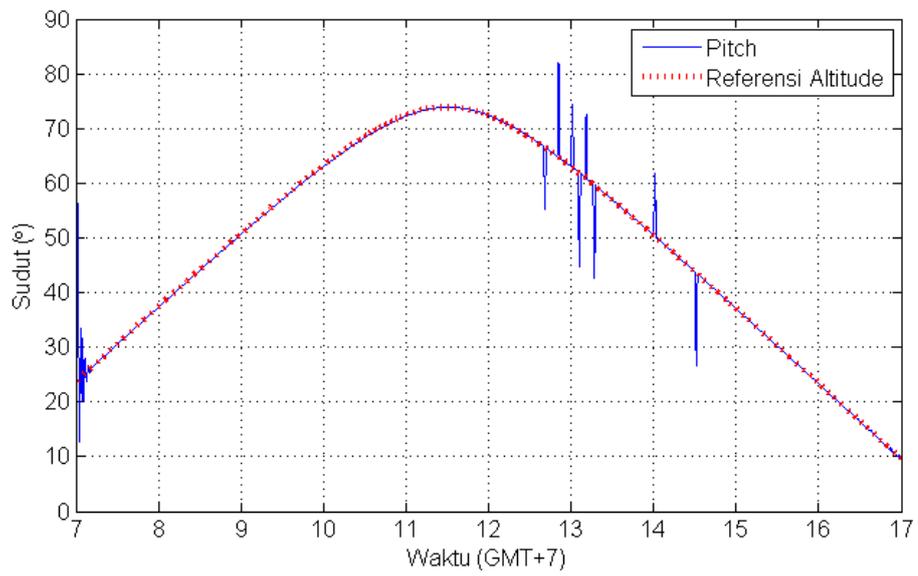


*Altitude*

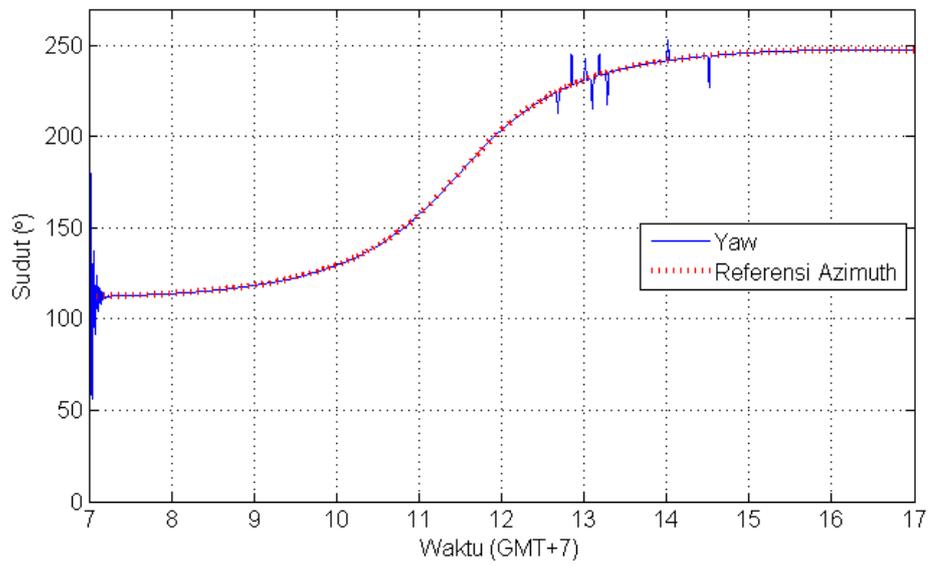


*Azimuth*

21 Desember



*Altitude*



*Azimuth*

## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Ikhwan, lahir 15 Oktober 1991 di Kampung Baroh, salah satu desa di Kecamatan Montasik Kabupaten Aceh Besar Provinsi Aceh. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari Ibu Suryani,S.Pd. dan Ayah M. Kasim. Pendidikan formal penulis tempuh di SDN 1 Lampaseh Aceh Besar, SMPN 1 Montasik Aceh Besar, SMAN 1 Montasik Aceh Besar, dan Program Sarjana Jurusan Matematika FMIPA Universitas Syiah Kuala Banda Aceh pada tahun 2010-2014. Saat berkuliah di Jurusan Matematika, penulis mengambil bidang perminatan Matematika Terapan dengan fokus penelitian tugas akhir Sistem dan Kontrol. Penulis diterima di Program Pascasarjana Matematika Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2016 semester ganjil melalui jalur beasiswa LPDP dari Kementerian Keuangan. Jika terdapat pertanyaan dan masukan untuk tesis ini, penulis dengan senang hati menerimanya melalui surat elektronik *email*: [muhammad.ikhwan10@gmail.com](mailto:muhammad.ikhwan10@gmail.com).