



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALIAN
SISTEM *ATTITUDE* INERSIAL SATU SUMBU
MENGUNAKAN *REACTION WHEEL* DAN GIROSKOP
MEMS**

TESIS

**HASAN MAYDITIA
0906577886**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 2011**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALIAN
SISTEM *ATTITUDE* INERSIAL SATU SUMBU
MENGUNAKAN *REACTION WHEEL* DAN GIROSKOP
MEMS**

TESIS

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
MAGISTER TEKNIK**

**HASAN MAYDITIA
0906577886**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TEKNIK KONTROL INDUSTRI
DEPOK
JULI 2011**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Hasan Mayditia
NPM : 0906577886
Tanda Tangan : 
Tanggal : 1 Juli 2011

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Hasan Mayditia
NPM : 0906577886
Program Studi : Pasca Sarjana Teknik Elektro
Judul Tesis : Perancangan Dan Implementasi Pengendalian Sistem *Attitude* Inersial Satu Sumbu Menggunakan *Reaction Wheel* Dan Gyroskop MEMS

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Studi Pasca Sarjana Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Muis S.T. M.Eng
Penguji : Ir. Wahidin Wahab, M.Sc, PhD
Penguji : Dr. Ir. Feri Yusivar, M. Eng
Penguji : Ir. Aries Subiantoro, M.SEE

()
()
()
()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 1 Juli 2011

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena atas rahmat, dan ridho-Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Penulis menyadari bahwa Tesis ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

- Bapak Dr. Abdul Muis, S.T. M.Eng selaku pembimbing yang memberikan arahan dan nasihat sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
- Bapak Dr. Wahidin Wahab M.Sc, Dr. Feri Yusivar M.Eng, dan Ir. Aries Subiantoro M.SEE, selaku penguji yang memberikan saran dan perbaikan penting terhadap penulisan dari Tesis ini.
- Program Karyasiswa RISTEK yang telah memberi dukungan materil dan moral sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini.
- Ibu, istri dan anakku yang selalu memberikan dukungan moral, kasih sayang dan doa.
- Teman-teman, khususnya rekan-rekan Kontrol Industri, Teknik Elektro UI 2009 yang telah memberikan dukungan, semangat, serta kebersamaan selama dua tahun ini.
- Pihak-pihak lain yang juga telah membantu penyelesaian Tesis ini namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat bagi semua pihak yang membacanya.

Depok, 1 Juli 2011

Penulis

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
TESIS UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Hasan Mayditia
NPM : 0906577886
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI PENGENDALIAN SISTEM
ATTITUDE INERSIAL SATU SUMBU MENGGUNAKAN *REACTION*
WHEEL DAN GYROSKOP MEMS**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan Tesis saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok
Pada tanggal : 1 Juli 2011
Yang menyatakan


(Hasan Mayditia)

ABSTRAK

Nama : Hasan Mayditia
Program Studi : Pasca Sarjana Teknik Elektro
Judul : Perancangan Dan Implementasi Pengendalian Sistem *Attitude* Inersial Satu Sumbu Menggunakan *Reaction Wheel* dan Giroskop MEMS

Salah satu sub-sistem penting pada satelit adalah sistem determinasi dan kendali *attitude* (ADCS). Bagian ini berperan penting dalam pengendalian sikap satelit di orbit yang fungsi utamanya adalah untuk mendukung misi (seperti komunikasi atau inderaja) dan menghindari terjadinya kerusakan pada komponen satelit akibat lingkungan antariksa yang ekstrim. Salah satu aktuator yang sering digunakan pada sub-sistem ini adalah *reaction wheel* (RW).

Pada tesis ini dibahas tentang hasil perancangan dan implementasi pengendalian sistem *attitude* inersial satelit satu sumbu berbiaya rendah menggunakan desain lingkaran-tertutup antara aktuator RW dan sensor giroskop pada *platform* meja rotasi. Sensor giroskop yang digunakan adalah jenis MEMS yang umum ditemui di pasaran dan murah. Model dari aktuator dan sensor tersebut masing-masing dirancang dan digunakan dalam simulasi pengendalian sistem *attitude* inersial satu sumbu dengan kendali PID menggunakan SIMULINK-MATLAB. Hasil rancangan dan nilai-nilai parameter pengendali yang diperoleh dari simulasi, selanjutnya digunakan sebagai nilai referensi pada penalaan di implementasi sistem yang sebenarnya. Algoritma filter digital eksponensial orde dua diterapkan pada sensor giroskop untuk mengurangi *noise* pada pengukurannya.

Dari hasil pengujian pada meja rotasi diperoleh bahwa sistem *attitude* inersial satu sumbu berbiaya rendah ini memiliki torsi gesekan (*friction torque*) yang cukup signifikan, sehingga sistem memiliki sifat teredam. Namun sistem tetap dapat dikendalikan dengan baik, sehingga bisa digunakan untuk aplikasi-aplikasi pengendalian *attitude* lainnya seperti robotika ataupun sistem navigasi di darat.

Kata kunci :

Attitude Inersial, *Reaction Wheel*, Giroskop, Meja Rotasi, Kendali Inersial

ABSTRACT

Name : Hasan Mayditia
Study Program : Electrical Engineering (Graduate Student)
Judul : Design And Implementation of One-Axis Inertial Attitude Control System Using Reaction Wheel And MEMS Gyroscope

One of the important sub-systems in satellite is attitude determination and control system (ADCS). This unit plays an important role in controlling the satellite attitude in orbit whose the main functions are to support the mission (such as communication or remote sensing) and avoid damage to the satellite components due to the extreme environment of space. One of actuator that is used often in this sub-system is reaction wheel (RW).

In this thesis discussed the results of design and implementation of a low cost one-axis inertial attitude control system using a closed-loop between a reaction wheel and MEMS gyroscope on the rotary table platform. The gyroscope sensor used in this research is MEMS type that available in the market with a low price. Each of actuator and sensor are modeled and used in one-axis attitude control simulation using SIMULINK-MATLAB. The design and controller parameter values that obtained from simulations are used as references value for tuning in the real implementation system. The second order digital exponential filter is applied to gyroscope data to eliminate random noise.

From the real test on rotary table platform, this low cost system have a significant frictional torque. It causes the system to be underdamped condition. But the system still can be controlled well, so it can be used for others attitude control applications such as robotics or land navigation system.

Kata kunci :

Inertial Attitude, Reaction Wheel, Gyroscope, Rotary Table, Inertial Control

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
KATA PENGANTAR	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	4
1.4. Pembatasan Masalah	4
1.5. Metodologi Penelitian	5
1.6. Sistematika Penulisan	7
2. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Sistem Determinasi Dan Kontrol Sikap (ADCS) Satelit	9
2.2. <i>Reaction Wheel</i>	12
2.2.1. Motor Brushless (BLDC)	14
2.2.2. Model Matematik Motor BLDC	17
2.2.3. Desain Mekanik <i>Flywheel</i>	18
2.2.4. Desain <i>Wheel Drive Electronics</i>	20
2.2.5. Desain Komutasi Motor BLDC RW	21
2.2.5.1 Regulator Arus Dengan PWM	21
2.2.5.2 Pengukuran Kecepatan Sudut <i>Flywheel</i>	23
2.3. Model Gesekan Rotasi Pada SIMULINK-MATLAB	23
2.4. Sensor Giroskop (MicroGyro100)	25
2.5. Algoritma Double Exponential Smoothing	27
2.6. Radio Frekuensi (RF) Transceiver	29
2.6.1. RF Transceiver 315 MHz	29
2.6.2. RF Transceiver 433.92 MHz	30
2.7. Algoritma Pengendali PID	30
2.7.1. Metode Penalaan Grafik Ciancone	31
2.7.2. Metode Penalaan Ziegler-Nichols	33
3. PEMODELAN AKTUATOR - SENSOR DAN SISTEM MEJA ROTASI	35
3.1. Pemodelan Aktuator <i>Reaction Wheel</i> (Fungsi Transfer)	35
3.1.1. Desain Eksperimen	35
3.1.2. Pelaksanaan Eksperimen	37
3.1.3. Penentuan Struktur Model	38

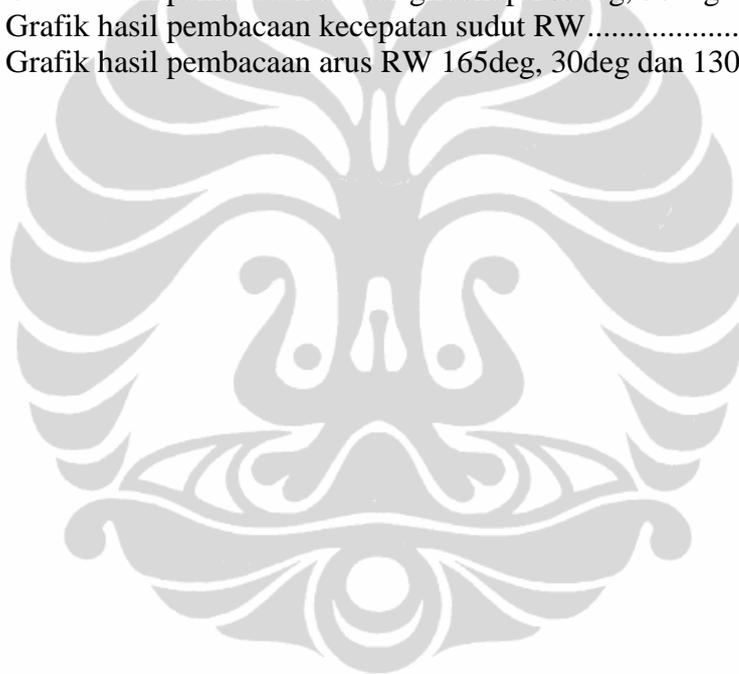
3.1.4. Estimasi Parameter Model	38
3.1.5. Evaluasi Model	40
3.2. Pemodelan Sensor Girooskop MG100.....	41
3.2.1. Akuisisi Data Sensor Girooskop MG100	41
3.2.2. Penerapan Double Exponential Filtering Pada Sensor MG100	44
3.2.3. Pemodelan Girooskop Dan Algoritma Digital Exponential Filtering	45
3.3. Pemodelan Sistem Meja Rotasi	46
3.3.1. Arah Rotasi Sistem	48
3.3.2. Pengujian Lingkaran Terbuka Sistem Meja Rotasi	48
3.4. Simulasi Sistem Meja Rotasi Ideal	55
4. PERANCANGAN DAN SIMULASI PENGENDALIAN	57
4.1. Perancangan	57
4.1.1. Kendali Kecepatan Sudut Sistem Meja Rotasi Satu Sumbu	57
4.1.2. Kendali Posisi Sudut Sistem Meja Rotasi.....	60
4.2. Hasil Simulasi Dan Pengujian	65
4.2.1. Hasil Uji Lingkaran Tertutup Kendali Kecepatan Sudut Meja Rotasi ...	65
4.2.2. Hasil Uji Lingkaran Tertutup Kendali Posisi Sudut Meja Rotasi.....	71
5. INTEGRASI DAN PENGUJIAN KENDALI SISTEM MEJA ROTASI.....	75
5.1. Perangkat Penyusun Sistem Meja Rotasi.....	75
5.1.1. Baterai Dan Sistem Distribusi Daya Listrik.....	75
5.1.2. Girooskop MG100 Dan Perangkat Akuisisi Data.....	77
5.1.3. RF Transceiver	78
5.1.4. Wheel Drive Elektronik (WDE).....	78
5.2. Mekanisme Pengambilan Data	79
5.3. Hasil Pengujian Pengendalian Sikap Meja Rotasi	80
5.3.1. Implementasi Algoritma Pengendalian Kecepatan Sudut Sistem.....	80
5.3.2. Hasil Pengujian Pengendalian Kecepatan Sudut Sistem.....	81
5.3.3. Implementasi Algoritma Pengendalian Posisi Sudut Sistem	87
5.3.4. Hasil Pengujian Pengendalian Posisi Sudut Sistem.....	87
6. KESIMPULAN.....	90
DAFTAR REFERENSI	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Diagram Alir Metodologi Penelitian.....	6
Gambar 2.1. Penerapan <i>feedback control</i> pada kendali <i>attitude</i>	11
Gambar 2.2. Kerangka acuan sederhana.....	12
Gambar 2.3. Prinsip kerja <i>reaction wheel</i>	13
Gambar 2.4. Kontruksi Motor DC <i>Brush</i> dan <i>Brushless</i> (BLDC).....	15
Gambar 2.5. Motor BLDC 2444 048B dari FAULHABER.....	16
Gambar 2.6. Model Motor BLDC.....	17
Gambar 2.7. <i>flywheel</i>	19
Gambar 2.8. Blok diagram WDE dengan Motor.....	20
Gambar 2.9. Sinyal keluaran tiga Hall-sensor (kiri). Diagram internal BLDC.....	21
Gambar 2.10. Blok diagram WDE dengan motor.....	23
Gambar 2.11. Blok gesekan rotasi pada Simscape-SIMULINK.....	24
Gambar 2.12. Grafik karakteristik torsi gesekan.....	24
Gambar 2.13. Antarmuka penyetingan parameter untuk blok gesekan rotasi.....	25
Gambar 2.14. Bentuk fisik sensor MicroGyro100.....	26
Gambar 2.15. Orientasi sumbu-sumbu rotasi MicroGyro100.....	27
Gambar 2.16. Modul transmiter dan Modul receiver untuk uplink data.....	29
Gambar 2.17. Modul transceiver untuk downlink data.....	30
Gambar 2.18. Desain pengendali PID.....	32
Gambar 2.19. Diagram Ciancone untuk system servo.....	32
Gambar 2.20. Desain pengendali PID.....	33
Gambar 2.21. Sistem lingkaran tertutup dengan pengendali proposional.....	33
Gambar 3.1. <i>Reaction wheel</i> ditempatkan pada permukaan rata dan stabil.....	35
Gambar 3.2. Tampilan program antarmuka WDE.....	36
Gambar 3.3. Blok loop-terbuka dari aktuator RW.....	36
Gambar 3.4. Kurva Hasil eksperimen.....	37
Gambar 3.5. Kurva reaksi proses – Metode II.....	38
Gambar 3.6. Desain model sistem aktuator <i>reaction wheel</i>	39
Gambar 3.7. Kurva keluaran model untuk masukan fungsi step yang sama.....	39
Gambar 3.8. Grafik hasil eksperimen dan model untuk RW.....	40
Gambar 3.9. Modul AVR M100 buatan sendiri.....	41
Gambar 3.10. Tampilan fisik akuisisi data sensor giroskop.....	42
Gambar 3.11. Ilustrasi sistem akuisisi data giroskop AVR M100.....	42
Gambar 3.12. Data mentah MG100 pada saat diam (tanpa filter).....	43
Gambar 3.13. Sinyal keluaran Giroskop untuk rotasi berlawanan arah jarum jam.....	43
Gambar 3.14. Sinyal keluaran Giroskop untuk rotasi searah jarum jam.....	43
Gambar 3.15. Data MG100 dengan filter double exponential pada saat diam.....	44
Gambar 3.16. Data mentah (biru) dan terfilter (merah) berlawanan arah jarum jam.....	45
Gambar 3.17. Data mentah (biru) dan terfilter (merah) searah jarum jam.....	45
Gambar 3.18. Model noise sensor giroskop MG100.....	46
Gambar 3.19. Keluaran model white noise sensor giroskop MG100.....	46
Gambar 3.20. Meja rotasi sebagai platform uji pengendalian sikap satu sumbu.....	47

Gambar 3.21. Enkoder optik tipe E40S6-3600-3-1-24	47
Gambar 3.22. Skema penempatan modul-modul mekanik dan elektronik	48
Gambar 3.23. Implementasi sistem meja rotasi	48
Gambar 3.24. Respon sistem meja rotasi terhadap masukan unit-step PWM	49
Gambar 3.25. Grafik data kecepatan sudut sistem meja rotasi dan sudut RW	50
Gambar 3.26. Skema lingkaran terbuka sistem meja rotasi	51
Gambar 3.27. Konstruksi internal aktuator RW	51
Gambar 3.28. Konstruksi internal sistem meja rotasi	52
Gambar 3.29. Hasil keluaran kecepatan sudut	53
Gambar 3.30. Grafik keluaran torsi-torsi model dan hasil eksperimen	54
Gambar 3.31. Hasil keluaran posisi sudut untuk uji lingkaran terbuka	55
Gambar 3.32. Grafik keluaran kecepatan sudut dari model sistem ideal	55
Gambar 4.1. Fungsi step yang diberikan pada masukan PWM	57
Gambar 4.2. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem dan friksi meja rotasi	58
Gambar 4.3. Skema model untuk penentuan K_{cr} dan P_{cr}	59
Gambar 4.4. Grafik keluaran kecepatan sudut	59
Gambar 4.5. Simulasi model lingkaran terbuka sudut sistem meja rotasi	60
Gambar 4.6. Fungsi step dan hasil keluaran posisi sudut sistem meja rotasi	60
Gambar 4.7. Model sistem meja rotasi untuk selang posisi sudut ± 360 derajat	61
Gambar 4.8. Konstruksi internal sistem meja rotasi	61
Gambar 4.9. Keluaran posisi sudut sistem meja rotasi	62
Gambar 4.10. Model sistem meja rotasi dan pendekatan fungsi transfer	63
Gambar 4.11. Hasil keluaran simulasi model sistem meja rotasi	63
Gambar 4.12. Keluaran grafik Ciancone untuk nilai FDT = 0.543	64
Gambar 4.13. Simulasi lingkaran tertutup model pengendalian kecepatan sudut	65
Gambar 4.14. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut	66
Gambar 4.15. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut 7deg/s	66
Gambar 4.16. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW	67
Gambar 4.17. Grafik hasil keluaran torsi RW	67
Gambar 4.18. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut -30deg/s	68
Gambar 4.19. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW nilai target -30deg/s	69
Gambar 4.20. Grafik hasil keluaran torsi RW nilai target -30deg/s	69
Gambar 4.21. Grafik hasil simulasi kecepatan sudut dengan target -30deg/s	70
Gambar 4.22. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW dengan target -30deg/s	70
Gambar 4.23. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem meja rotasi dan torsi friksi	71
Gambar 4.24. Simulasi lingkaran tertutup mode kendali posisi sistem meja rotasi	72
Gambar 4.25. Grafik hasil penalaan pada pengendalian posisi sudut meja rotasi	72
Gambar 4.26. Grafik hasil simulasi model pengendalian posisi sudut meja rotasi	73
Gambar 4.27. Grafik hasil simulasi model pengendalian nilai target 165 derajat	74
Gambar 4.28. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW nilai target 165 derajat	74
Gambar 4.29. Grafik hasil keluaran torsi RW nilai target 165 derajat	74
Gambar 5.1. Distribusi daya pada sistem meja rotasi	76
Gambar 5.2. Rangkaian regulator tegangan 10 volt	76
Gambar 5.3. Rangkaian regulator tegangan 5 volt	77

Gambar 5.4. Perangkat sensor giroskop dan system akuisisinya.....	77
Gambar 5.5. Perbandingan hasil pengukuran kecepatan sudut.....	77
Gambar 5.6. (a) Transceiver sisi computer PC (b) Transciever sisi meja rotasi.....	78
Gambar 5.7. Grafik hasil pembacaan sensor Gyroskop untuk target 7deg/s	81
Gambar 5.8. Grafik hasil pembacaan sensor Gyroskop untuk beberapa nilai target	82
Gambar 5.9. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop 7deg/s	82
Gambar 5.10. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW untuk target 7deg/s	83
Gambar 5.11. Grafik hasil pembacaan arus RW untuk target 7deg/s	83
Gambar 5.12. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop -30deg/s ..	84
Gambar 5.13. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW untuk target -30deg/s.	84
Gambar 5.14. Grafik hasil pembacaan arus RW untuk nilai target -30deg/s.....	85
Gambar 5.15. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop -25deg/s ..	85
Gambar 5.16. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW nilai target -25deg/s...	86
Gambar 5.17. Grafik hasil pembacaan arus RW nilai target -25deg/s.....	86
Gambar 5.18. Grafik hasil pembacaan sensor giroskop 165deg, 30deg dan 130deg	88
Gambar 5.19. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW	88
Gambar 5.20. Grafik hasil pembacaan arus RW 165deg, 30deg dan 130deg.....	89



DAFTAR TABEL

Tabel 1.1.	Klasifikasi Satelit Berdasarkan Ukuran Massa.....	1
Tabel 2.1.	Sumber-sumber acuan untuk determinasi attitude.....	10
Tabel 2.2.	Metode-metode kontrol sikap satelit (ACS).....	11
Tabel 2.3.	Perbandingan Motor BDC dan BLDC.....	15
Tabel 2.4.	Spesifikasi teknis dari motor BLDC (2444 048B).....	16
Tabel 2.5.	Spesifikasi teknis dari <i>flywheel</i>	19
Tabel 2.6.	Aturan penalaan Ziegler-Nichols.....	34
Tabel 3.1.	Spesifikasi mekanik enkoder optik tipe E40S.....	47
Tabel 5.1.	Daftar perangkat dan fungsinya.....	75
Tabel 5.2.	Kebutuhan daya listrik dari masing-masing perangkat.....	75
Tabel 5.3.	Daftar byte data telemetri.....	79

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kondisi geografis Indonesia yang berbentuk kepulauan dimana sebagian besar merupakan lautan memberikan tantangan tersendiri bagi negara untuk dapat memonitor dan menjaga wilayah kedaulatan dari ancaman baik dalam maupun luar wilayah. Ancaman dari dalam dapat berupa bencana alam seperti gunung meletus, tsunami, dan kebakaran hutan. Ancaman dari luar dapat berupa perompakan, pelanggaran batas wilayah maupun pencurian ikan. Permasalahan-permasalahan tersebut membutuhkan infrastruktur jaringan komunikasi yang baik untuk mendukung komunikasi antar wilayah pulau yang terpisah oleh lautan. Selain itu, guna mendukung program pemerintah dalam hal ketahanan pangan, dimana pemanfaatan hasil citra satelit *remote sensing* (penginderaan jauh atau inderaja) komersil banyak digunakan, memberikan tuntutan bagi Indonesia untuk melakukan penguasaan teknologi satelit sehingga dapat memenuhi kebutuhan-kebutuhan tersebut secara mandiri.

Ada berbagai kriteria dalam pengklasifikasian satelit, seperti berdasarkan pada massa, fungsi, jenis orbit, biaya, dimensi, dan lain-lain. Klasifikasi satelit berdasarkan ukuran massanya lebih banyak digunakan, karena tidak hanya terkait dengan ketersediaan slot peluncurnya (biaya peluncuran), tetapi juga dapat merepresentasikan kebutuhan daya listrik dan kebutuhan pengendalian *attitude* atau sikapnya di orbit. Pada tabel 1.1 diberikan klasifikasi satelit berdasarkan ukuran massa [1].

Tabel 1.1 Klasifikasi satelit berdasarkan ukuran massa [1]

Kategori	Rentang Massa (kg)
Satelit Femto	< 0.1
Satelit Piko	0.1 – 1
Satelit Nano	1 – 10
Satelit Mikro	10 – 100
Satelit Mini	100 – 500
Satelit ukuran medium	500 – 1000
Satelit besar	> 1000

Tingginya kebutuhan Indonesia akan hasil teknologi satelit mendorong pada usaha pengembangannya. Tingginya biaya yang dibutuhkan untuk memperoleh data hasil satelit (seperti citra satelit) maupun biaya pembuatan satelit menuntut kemandirian dan penguasaan teknologinya. Pengembangan satelit berukuran mikro atau nano sering menjadi pilihan, karena beberapa alasan antara lain: keterbutuhan biaya yang rendah, waktu pengembangan yang relatif singkat, keterbutuhan sumber daya manusia yang sedikit, dan kemungkinan digunakannya komponen-komponen yang tersedia dipasaran sebagai pilihan komponen penyusun sub-sistem satelit. Dengan pertimbangan-pertimbangan tersebut resiko financial yang besar dapat dihindarkan [2].

Salah satu sub-sistem yang penting baik pada sistem satelit inderaja maupun komunikasi adalah sistem ADCS (*Attitude Determination and Control System*) atau sistem determinasi dan kontrol sikap satelit. Dengan adanya sub-sistem ini, sebuah satelit dapat digunakan untuk menjalankan misi operasinya dengan baik. Pada satelit inderaja atau *surveillance, imager* (kamera) yang terpasang pada satelit membutuhkan arah dan tingkat kestabilan tertentu untuk dapat memperoleh gambar target dengan hasil yang diharapkan. Pada satelit komunikasi, sistem ADCS dibutuhkan untuk mengarahkan antena, sehingga wilayah target tertentu di permukaan bumi dapat tercakup dan jaringan komunikasi satelit dapat digunakan dengan baik. Selain itu, sistem ADCS dapat digunakan untuk menghindari terjadinya kerusakan pada komponen-komponen satelit akibat kondisi lingkungan antariksa yang ekstrim (seperti perubahan temperatur, tekanan, dan radiasi yang ekstrim) dengan memanfaatkan mode-mode kendali sikap yang ada.

Untuk memenuhi kebutuhan-kebutuhan tersebut, seringkali satelit membutuhkan sistem ADCS dengan tingkat akurasi tertentu, dimana pemilihan aktuator dan sensor yang digunakan menjadi perhatian utama. Salah satu aktuator aktif yang sering digunakan untuk kebutuhan tersebut adalah *Reaction Wheel* (RW). Bersama dengan sensor rotasi inersial seperti giroskop, RW dapat menyesuaikan posisi dan kecepatan sudut satelit di ruang orbit terhadap acuan inersial tertentu, seperti bumi.

Dari hasil penelitian sebelumnya telah dirancang sebuah RW yang dibuat menggunakan motor-servo *brushless* (BLDC). Penelitian tersebut difokuskan pada rancangan dan pembuatan sub-sistem mekanik, elektronik dan perangkat lunak. Adapun penelitian yang dilakukan dalam tugas akhir ini antara lain membuat rancangan model aktuator RW, perancangan dan simulasi serta implementasi pengendalian sikap satu sumbu pada sistem nyata menggunakan sistem meja rotasi.

Perancangan model aktuator RW ini menggunakan metode empirik (*Empirical Model Identification*) dari kurva reaksi proses loop-terbuka [5]. Fungsi alih dari model RW tersebut selanjutnya digunakan dalam perancangan sistem kendali sikap menggunakan *Proportional Integral Derivative* (PID). Terdapat dua mode pengendalian sikap yang dirancang, disimulasi dan diimplementasikan pada sistem meja rotasi, dimana keberadaan torsi gesekan (*frictional torque*) sistem ikut dipertimbangkan. Kedua mode pengendalian sikap tersebut antara lain: pengendalian kecepatan dan posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu. Pada implementasi kedua mode pengendalian tersebut, digunakan sebuah sensor inersial giroskop MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) sebagai sensor *feedback*. Jenis sensor ini umum ditemui di pasaran dan murah sehingga diharapkan dapat menghasilkan sebuah sistem ADCS yang murah (*low cost*) namun tetap dengan akurasi yang baik. Untuk itu perlu diperhatikan ketidakidealan yang ada pada sensor, sehingga diperlukan suatu algoritma khusus untuk memperbaiki data hasil pengukurannya, terutama untuk mengurangi *random noise* agar diperoleh pengendalian kecepatan dan posisi sudut satu sumbu yang akurat.

1.2. Perumusan Masalah

Untuk merealisasikan simulator sistem ADCS inersial satu sumbu berbiaya rendah digunakan sebuah sistem meja rotasi. Sistem meja rotasi ini dapat mewakili satu sumbu dari sistem satelit di ruang angkasa, yakni untuk rotasi *yaw* atau sumbu yang mengarah ke nadir atau pusat bumi. Pada pengendalian sikap dari sistem ini, akan digunakan pengendali PID. Inersia sistem meja rotasi sangat penting diketahui untuk digunakan pada perancangan simulasi dan penentuan

parameter-parameter pengendali. Selain itu keberadaan torsi gesekan yang ada pada sumbu kontak meja rotasi akan ikut diperhitungkan dalam simulasi karena sangat mempengaruhi kestabilan dari pengendalian sikap sistem. Nilai-nilai parameter kendali yang diperoleh dari perancangan dan simulasi, selanjutnya digunakan sebagai referensi awal pada penalaan kendali sikap meja rotasi secara nyata.

1.3. Tujuan Penelitian

Pada tesis ini akan dibahas perancangan, simulasi dan implementasi simulator sistem kendali sikap inersial satu sumbu berbiaya rendah menggunakan aktuator *reaction wheel* dan sensor giroskop MEMS pada sistem meja rotasi. Sistem meja rotasi ini dapat mewakili sistem satelit di ruang angkasa untuk rotasi sumbu *yaw*. Penentuan inersia sistem meja rotasi dilakukan dengan eksperimen memanfaatkan prinsip konservasi momentum sudut. Nilai inersia tersebut selanjutnya akan digunakan pada perancangan dan simulasi pengendalian kecepatan dan posisi sudut dari sistem. Nilai-nilai parameter kendali yang diperoleh dari hasil perancangan dan simulasi, akan digunakan sebagai referensi pada penalaan di sistem nyata.

1.4. Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini, ruang lingkup permasalahan dibatasi sebagai berikut:

1. Platform uji yang digunakan sebagai simulator sistem kendali sikap inersial satu sumbu adalah berupa sistem meja rotasi.
2. Sumbu putar yang dikendalikan dari sistem ini adalah sumbu rotasi *yaw*, dengan asumsi rotasi pada sumbu putar lainnya (*pitch* dan *roll*) sangat kecil sehingga dapat diabaikan.
3. Aktuator yang digunakan adalah aktuator RW.
4. Sensor inersial yang digunakan adalah sensor giroskop jenis MEMS yaitu *MicroGyro100* [7].
5. *Flywheel* yang digunakan untuk aktuator RW memiliki inersia sebesar $912.6 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$.

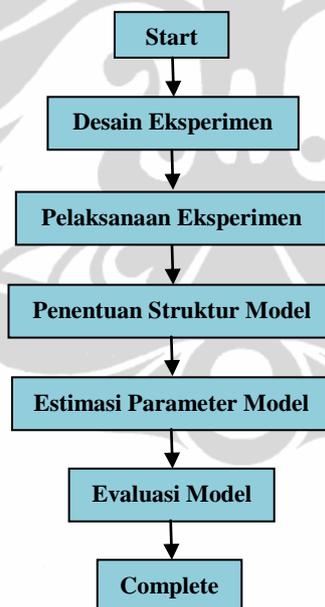
6. Model dari aktuator RW direpresentasikan dalam bentuk fungsi transfer orde satu dengan waktu tunda yang disintesa menggunakan metode empirik (*Empirical Model Identification*).
7. Algoritma pengendali PID diimplementasikan dalam prosesor dari aktuator RW untuk beberapa mode pengendalian, antara lain:
 - a. kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu (dengan giroskop sebagai *feedback*).
 - b. posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu (dengan giroskop sebagai *feedback*).
8. Data-data telemetri aktual (seperti kecepatan motor, perubahan sudut giroskop, arus motor, dll) dikirimkan dari prosesor RW ke komputer PC menggunakan komunikasi radio (RF *wireless transceiver*) pada frekuensi 433.92 MHz. Pada komputer, data-data tersebut kemudian ditampilkan dan disimpan dalam bentuk teks (*.txt) menggunakan program yang dikembangkan dari Visual Basic 6.0 untuk selanjutnya diplot dalam bentuk grafik dan dianalisa menggunakan MATLAB.
9. Nilai-nilai set-poin (target kecepatan dan posisi sudut) dan parameter-parameter pengendali (K_c , T_i dan T_d) dikirimkan dari komputer PC ke prosesor RW menggunakan komunikasi radio (RF *wireless transceiver*) pada frekuensi 315 MHz.

1.5. Metodologi Penelitian

Secara umum penelitian ini dapat dibagi menjadi beberapa bagian. Pertama, perancangan dan simulasi model aktuator RW. Kedua, pengukuran inersia dan identifikasi sistem meja rotasi. Ketiga, perancangan simulasi model dan pengendalian sikap dari sistem meja rotasi. Keempat, implementasi pengendalian sikap dari sistem meja rotasi secara aktual.

Pada perancangan model aktuator RW digunakan metode empirik (*Empirical Model Identification*) [5] dari kurva proses loop-terbuka (metode grafik) untuk memperoleh fungsi transfer dari aktuator RW. Tahapan dari metode ini diberikan pada diagram alir gambar 1.1, yang meliputi hal-hal sebagai berikut:

- 1 **Desain Eksperimen**, menentukan kondisi saat pengambilan data, mengurangi kemungkinan gangguan eksternal dan menentukan mekanisme serta durasi pengukuran.
- 2 **Pelaksanaan Ekperimen**, diberikan sebuah fungsi *step* pada masukan sinyal PWM dari aktuator RW secara loop-terbuka, kemudian data-data keluaran waktu, kecepatan rotasi *flywheel* dan arus dibaca dan direkam menggunakan program antarmuka aplikasi yang telah disiapkan.
- 3 **Penentuan Struktur Model**, akan digunakan sebuah sistem linear orde satu dengan waktu tunda (*first order with dead time*) untuk model aktuator RW
- 4 **Estimasi Parameter Model**, dilakukan estimasi dengan menggunakan grafik proses reaksi untuk nilai parameter-parameter model seperti konstanta penguatan proses (K_p), konstanta waktu (τ) dan waktu tunda (θ).



Gambar 1.1. Diagram alir metodologi penelitian

- 5 **Evaluasi Model**, dilakukan evaluasi terhadap nilai-nilai parameter dengan membandingkan hasil keluaran model dengan data eksperimen yang digunakan untuk estimasi parameter-parameter model. Evaluasi pada model RW yang diperoleh dilakukan dengan cara membandingkan hasil keluarannya

dengan data eksperimen yang digunakan untuk mengestimasi parameter-parameter model.

- 6 Complete.** Diperoleh model yang akurat sehingga dapat merepresentasikan aktuator RW dengan baik, dan juga dapat dikontrol.

Pada pengukuran inersia dan identifikasi sistem meja rotasi, dilakukan integrasi modul-modul elektronik dan mekanik pada meja rotasi, kemudian masukan fungsi *step* diberikan pada aktuator RW, sehingga *flywheel* akan mengalami percepatan. Percepatan *flywheel* akan memberikan torsi aksi kepada sistem meja rotasi sehingga meja rotasi akan dipercepat dengan arah rotasi yang berlawanan dengan arah rotasi *flywheel*. Dari prinsip konservasi momentum sudut, inersia dari sistem meja rotasi dapat diketahui jika inersia diketahui dan percepatan sudut *flywheel* serta sistem meja rotasi dapat diukur. Pada tahapan ini juga akan diketahui seberapa besar pengaruh torsi gesekan yang ada pada sistem meja rotasi terhadap keluaran kecepatan sudutnya. Setelah estimasi nilai inersia dan torsi gesekan sistem diketahui, selanjutnya dilakukan perancangan dan simulasi model sistem meja rotasi dan pengendalian sikapnya menggunakan pengendali PID.

Pada implementasi pengendalian sikap sistem meja rotasi yang tersusun dari modul-modul antara lain aktuator RW, *Wheel Drive Electronic* (WDE), sensor giroskop, baterai dan RF *transceiver*, dilakukan pengendalian kecepatan dan posisi sudut. Nilai target diberikan melalui program antarmuka PC yang akan dikirimkan ke WDE melalui komunikasi tanpa kabel (RF *wireless transceiver*) pada frekuensi radio 315 MHz. Nilai tersebut akan digunakan oleh aktuator sebagai nilai target baru dalam pengendalian sikap sistem meja rotasi. Adapun data-data telemetri aktual yang dibutuhkan untuk keperluan analisa sistem, dikirimkan oleh prosesor WDE ke komputer PC menggunakan komunikasi tanpa kabel pada frekuensi radio 433.92 MHz.

1.6. Sistematika Penulisan

Tesis ini terdiri dari enam Bab, yang mana pokok bahasan masing-masing Bab adalah sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II Tinjauan Pustaka

Berisikan tentang teori-teori dan referensi penunjang dalam penelitian ini, antara lain: sistem determinasi dan kontrol sikap (ADCS), aktuator *reaction wheel*, model gesekan rotasi pada SIMULINK-MATLAB, sensor giroskop, algoritma *double exponential filtering*, RF *transceiver* dan algoritma pengendali PID.

BAB III Pemodelan Aktuator-Sensor Dan Sistem Meja Rotasi

Menjelaskan mengenai pemodelan aktuator *reaction wheel* (fungsi transfer), pemodelan sensor giroskop, penerapan algoritma *double exponential smoothing* pada sensor giroskop, pemodelan sistem ideal dan pemodelan sistem meja rotasi.

BAB IV Perancangan Dan Simulasi Pengendalian

Menjelaskan tentang hasil-hasil perancangan dan simulasi pengendalian sikap satu sumbu sistem meja rotasi.

BAB V Integrasi Dan Pengujian Sistem Meja Rotasi

Menjelaskan tentang rancangan perangkat keras dan perangkat lunak, serta integrasinya. Selain itu pada Bab ini juga diberikan hasil-hasil pengujian sistem kendali sikap inersial satu sumbu menggunakan *platform* meja rotasi.

BAB VI Kesimpulan Dan Saran

Merupakan kesimpulan dari seluruh isi pembahasan yang diberikan dan saran penelitian lebih lanjut.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Determinasi Dan Kontrol Sikap (ADCS) Satelit

Attitude (sikap) satelit adalah orientasi satelit (*spacecraft*) dalam ruang yang mewakili gerak rotasi sebenarnya dari benda tersebut terhadap pusat massanya. Sedangkan determinasi sikap satelit merupakan proses perhitungan dari orientasi satelit tersebut relatif terhadap kerangka acuan yang lebih inersial, seperti bumi. Terdapat beberapa sumber acuan (referensi) yang dapat dimanfaatkan untuk determinasi sikap, yang dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu [1] :

1. Sumber acuan yang berdasarkan pada vektor-vektor referensi eksternal, seperti matahari, bumi atau pusat massa lainnya, medan magnetik bumi, dan bintang-bintang (termasuk jarak terhadap planet-planet),
2. Sumber acuan yang berasal dari hasil pengukuran gaya-gaya sentrifugal atau pun koriolis yang timbul ketika benda berotasi untuk mengetahui perubahan orientasi terhadap pusat massa (sensor inersia).

Kedua kelompok sumber referensi tersebut disajikan dalam tabel 2.1 yang disertakan dengan keunggulan dan kelemahannya. Pada penelitian ini hanya akan digunakan sensor inersial giroskop untuk membuat sebuah sistem kontrol inersial.

Kendali *Attitude* (sikap) satelit adalah proses penyesuaian orientasi satelit ke arah tertentu yang telah ditentukan sebelumnya. Bersama dengan sistem determinasi satelit, keduanya membangun suatu sistem ADCS, yang sangat dibutuhkan oleh satelit antara lain untuk menghindari kerusakan pada komponen yang sensitif dari pengaruh radiasi matahari, mengontrol disipasi panas, mengarahkan antena, panel surya maupun kamera ke arah yang diinginkan [1]. Sistem kendali ini meliputi kendali kecepatan dan posisi sudut satelit.

Secara umum, metode kontrol sikap satelit dapat dibagi menjadi dua, yaitu kontrol pasif dan aktif. Adapun macam-macam metode kontrolnya diberikan pada tabel 2.2.

Tabel 2.1. Sumber-sumber acuan untuk determinasi *attitude*

No.	Sumber Acuan	Keunggulan	Kelemahan
1	Matahari	Terang, tidak ada sumber lain yang membuat ambigu, daya yang di butuhkan dan bobot sensor kecil. Sering kali diperlukan untuk referensi solar sel dan peralatan pelindung	Sulit terdeteksi oleh sensor ketika mengorbit pada pusat massa yang besar, seperti bumi pada setengah orbit. Nilai akurasi terbatas pada ~ 1 Arc menit
2	Bumi atau pusat massa lainnya	Sangat sesuai untuk satelit dengan altitude yang rendah. Terang, tidak ada sumber lain yang membuat ambigu (sedikit interferensi dari bulan), analisis relatif mudah, koverage antena luas	Pada umumnya dibutuhkan sensor gerak untuk mengetahui perubahan horizon, sensor harus dilindungi dari matahari, resolusi terbatas pada $\sim 0.1^0$ karena <i>attitude</i> sangat dipengaruhi horizon dari orbit
3	Bintang (termasuk jarak terhadap planet-planet)	Akurasi tinggi ($\sim 10^{-3}$ derajat), dapat digunakan dimana saja di luar angkasa, tidak dipengaruhi oleh orbit	Sensor berat, kompleks, dan mahal. Identifikasi dari bintang-bintang untuk beberapa target gambar kompleks dan waktu lama. Sensor harus dilindungi dari matahari, seringkali dibutuhkan sistem <i>attitude</i> kedua untuk inisialisasi
4	Medan Magnet bumi	Ekonomis, daya yang dibutuhkan rendah, <i>reliable</i> , ringan, rentang temperatur operasi besar, <i>have no moving parts</i> , sangat sesuai untuk satelit dengan altitude yang rendah	Resolusi rendah ($> 0.5^0$), hanya baik digunakan di dekat permukaan bumi, terbatas pada kuat medan dan akurasi hasil modeling, <i>attitude</i> sangat dipengaruhi oleh orbit, satelit harus bersih secara magnetik (kalibrasi internal satelit harus dilakukan), sensitif terhadap bias
5	Sensor-sensor inersial (giroskop atau akselerometer)	Tidak membutuhkan sensor eksternal lain, tidak bergantung orbit, akurasi yang tinggi untuk jangka waktu terbatas, bekerja dengan mudah dalam sistem satelit. Akurasi $\sim 0.01^0$	Hanya mendeteksi perubahan orientasi, tidak ada pengukuran yang absolut, dipengaruhi drift dan gesekan, daya dan massa yang dibutuhkan besar

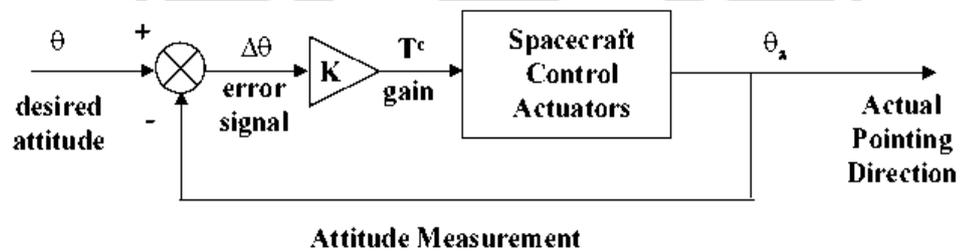
Dalam sistem dengan kontrol aktif seperti pada gambar 2.1, *attitude* satelit (θ_a) dapat diketahui dari pengukuran sensor yang kemudian untuk mencapai target *attitude* (θ_{target}) yang diberikan, aktuator akan mengerahkan torsi kendali T^C yang sesuai dengan sinyal *error attitude*-nya. Hal ini tidak lain adalah penerapan dari konsep dasar kontrol dengan umpan balik (*feedback control*).

Pada sistem ADCS, terdapat tiga sumbu rotasi yaitu sumbu *roll*, *pitch* dan *yaw*. Ketiga sumbu tersebut merupakan referensi untuk masukan sensor-sensor dan keluaran aktuator, dimana untuk membentuk sistem ADCS yang lengkap ketiganya harus ditransformasikan ke dalam kerangka acuan eksternal yang sesuai, seperti terhadap bumi atau matahari. Kerangka orbit bumi sering kali

menjadi acuan dalam menggambarkan orientasi satelit seperti diberikan pada gambar 2.2.

Tabel 2.2. Metode-metode kontrol sikap satelit (ACS)

No.	Metode	Tingkat Akurasi dan Karakteristik	Jenis Kontrol	
			Pasif	Aktif
1	Spin Stabilized	0.1^0 Sederhana, inersia dominan pada satu sumbu, murah,	√	
2	Gravity Gradient	$(1 - 3)^0$ Sederhana, berorientasi pada pusat massa, murah	√	
3	Jets	0.1^0 Membutuhkan bahan bakar, cepat, mahal		√
4	Magnetic	1^0 Dekat bumi, lambat, ringan, murah		√
5	Reaction Wheels	0.01^0 Torsi internal, cepat, sangat presisi, sering digunakan untuk stabilisasi 3 sumbu, mahal		√



Gambar 2.1. Penerapan *feedback control* pada kendali *attitude*

Dari gambar 2.1 dapat dituliskan sebagai berikut:

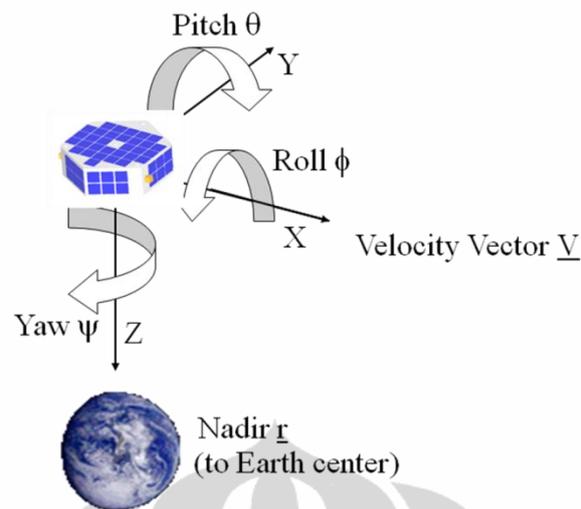
$$T^c = K \cdot \Delta\theta \quad (2.1)$$

dimana:

T^c : torsi koreksi,

K : gain

$\Delta\theta$: error *attitude* = θ_a (dari sensor) - θ_{target} (yang diharapkan)



Gambar 2.2. Kerangka acuan sederhana

Pada penelitian ini pengendalian hanya dilakukan pada satu sumbu inersial sistem meja rotasi yang bebas berotasi yakni sumbu Z yang mengarah ke nadir atau pusat bumi (rotasi *yaw*), dengan nilai kecepatan dan posisi sudut diukur secara aktual menggunakan sensor giroskop.

2.2. Reaction Wheel

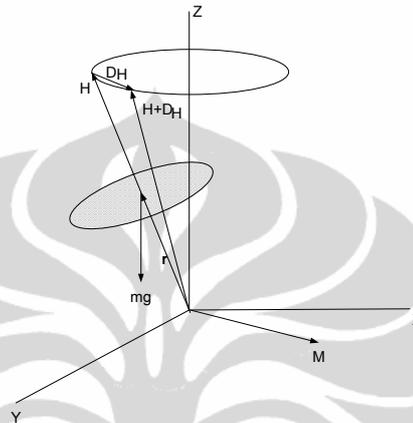
Reaction wheel (RW) merupakan aktuator aktif yang digunakan untuk mengatur gerak rotasi satelit. Aktuator ini bekerja berdasarkan prinsip konservasi momentum sudut, dimana pada saat kecepatan rotasi dari RW berubah maka torsi yang dihasilkan akan mempengaruhi gerak rotasi dari satelit. Dalam sistem yang terisolasi jumlah total dari momentum sudut adalah tetap. Jika RW yang berotasi berada di dalam sebuah sistem yang bebas berotasi maka sistem tersebut akan berotasi berlawanan arah dengan arah rotasi RW. Prinsip ini diperlihatkan secara sederhana pada gambar 2.3. Sebuah benda berbentuk cakram atau *disk* (bagian yang diarsir) berputar dengan kecepatan ω akan menghasilkan momentum sudut \mathbf{H} pada satelit. Perubahan momentum sudut $D\mathbf{H}$ dari RW akan memberikan torsi pada sistem sehingga sistem akan dipercepat.

Pada sistem ideal (tanpa gesekan) seperti kondisi hampa di luar angkasa, nilai perbandingan antara percepatan sudut RW dan sistem satelit sebanding

dengan nilai rasio momen inersia keduanya [3], seperti dituliskan dalam persamaan (2.2)

$$\frac{\alpha_{RW}}{\alpha_S} = \frac{I_S}{I_{RW}} \quad (2.2)$$

Dimana I_{RW} dan I_S adalah momen inersia dari RW dan sistem satelit, α_{RW} dan α_S adalah percepatan sudut RW dan sistem satelit [3].



Gambar 2.3. Prinsip kerja *reaction wheel*

Dari persamaan (2.2) dapat dilihat bahwa, kecepatan ataupun percepatan sudut dari satelit tidak akan sama dengan kecepatan atau percepatan rotasi dari RW. Hal ini disebabkan karena konservasi hanya berlaku pada momentum sudut, dan tidak pada kecepatan sudut. Perbandingan kecepatan sudut satelit dan RW sebanding dengan inersia keduanya, sehingga satelit akan berotasi lebih lambat karena nilai inersianya yang jauh lebih besar.

Pada sistem nyata seperti pada sistem meja rotasi satu sumbu, torsi gesekan sistem yang ditimbulkan oleh permukaan kontak *ball-bearing* tidak dapat diabaikan dalam perancangan pengendali, sehingga perlu diperhitungkan untuk dapat memperoleh hasil pengendalian sikap yang akurat. Untuk sistem dimana torsi gesekan ikut diperhitungkan, persamaan (2.2) dapat ditulis kembali menjadi

$$I_{RW}\alpha_{RW} = I_S\alpha_S + \tau_{fric} \quad (2.3)$$

Dengan τ_{fric} adalah torsi gesekan yang ada pada sistem. Penjelasan lebih lanjut tentang torsi gesekan dan pemodelannya pada SIMULINK-MATLAB akan diberikan pada sub-Bab berikutnya.

Aktuator RW tersusun atas beberapa bagian, sebagai berikut:

- 1). Motor DC *Brushless* (BLDC), berfungsi sebagai penghasil torsi pada *Flywheel* untuk melawan torsi gangguan yang bekerja pada sistem satelit,
- 2). *Flywheel* atau roda inersia, berfungsi sebagai penyimpan dan penghasil momentum sudut,
- 3). *Wheel Drive Electronic* (WDE), merupakan inti dari sistem RW, dimana terdapat mikrokontroler yang mengatur semua operasi. WDE berupa rangkaian elektronik yang terintegrasi dengan perangkat lunak pada papan *printed circuit board* (PCB).

2.2.1. Motor Brushless (BLDC)

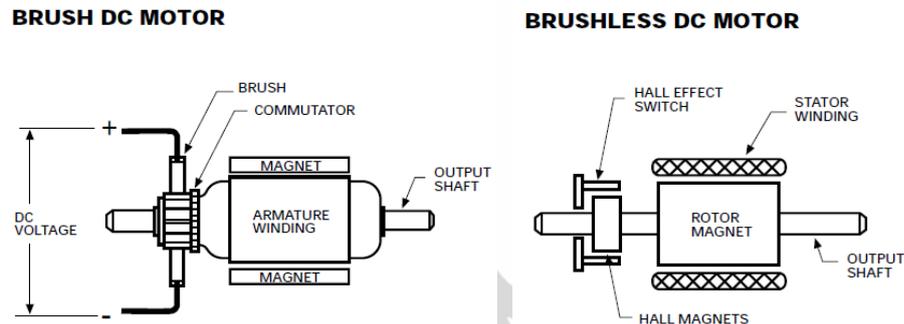
Salah satu komponen terpenting dari aktuator RW adalah motor penggerak. Motor berfungsi untuk menghasilkan percepatan sudut pada muatan yang diberikan (*flywheel*), sehingga dihasilkan torsi dan momentum sudut yang dapat mengubah orientasi sudut dari sistem.

Dari beberapa motor yang ada di pasaran dipilih motor yang paling mungkin digunakan untuk keperluan di luar angkasa. Jenis motor dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar, yaitu motor konvensional, dengan magnet permanen yang ditempatkan sebagai stator dan *brushes* yang berfungsi sebagai penghasil komutasi (pengatur arus DC) dari kumparan yang berfungsi sebagai rotor. Jenis ini biasanya disebut sebagai *brush direct current* (BDC). Jenis kedua adalah jenis yang menggunakan magnet permanen pada rotornya (sama seperti pada AC motor) dan tidak menggunakan brush (*brushless*), jenis ini sering disebut sebagai BLDC. Adapun konstruksi kedua jenis motor tersebut ditampilkan pada gambar 2.4.

Ada dua jenis motor BLDC, tipe trapezoidal dan sinusoidal. Pada motor trapezoidal tegangan *back-emf* yang dihasilkan pada lilitan stator memiliki bentuk trapezoid sehingga tiap fasanya harus diberikan arus berbentuk kotak untuk menghilangkan *ripple* pada torsi yang dihasilkan.

Pada tabel 2.3, diberikan perbandingan antara motor DC brush dan motor BLDC. Dari tabel 2.3 tersebut diketahui bahwa kelemahan utama dari motor BDC adalah dibutuhkan perawatan rutin pada *brush* rotor akibat adanya gesekan

mekanis antara *brush* dan bagian logam pada rotor saat *brush* mengalirkan arus pada koil. Hal ini menyebabkan motor BDC tidak cocok untuk diterapkan pada satelit.



Gambar 2.4. Kontruksi Motor DC *Brush* dan *Brushless* (BLDC)

Tabel 2.3. Perbandingan Motor BDC dan BLDC

Sifat/keadaan/cara yang diamati	Motor BDC (konvensional)	Motor BLDC (non konvensional)
Struktur Mekanik	Magnet permanent pada statornya	Magnet permanent pada rotornya (sama seperti pada AC motor)
Perbedaan paling menonjol	Mudah dikontrol dan butuh perawatan	Respon yang cepat, Bertahan lama, dan tidak membutuhkan perawatan
Lilitan	Terhubung Δ	Terhubung Δ , Y dan dua fasa
Teknik komutasinya	Kontak mekanik antara <i>brushes</i> dan komutator	Saklar elektronik memanfaatkan transistor, Sulit
Cara mendeteksi posisi rotor	Terdeteksi melalui <i>brushes</i>	Hall element, encoder optic, dll
Teknik mengubah arah putaran	Membalik polaritas sumber tegangan DC	Pengaturan susunan logika (komutasi)

Keunggulan lainnya dari motor BLDC, antara lain:

- Karena tidak memiliki brush, maka gesekan yang terjadi lebih kecil dan tidak terjadi “debu” brush;
- Karena tidak ada brush, maka tidak perlu adanya perawatan rutin untuk brush tersebut
- Torsi yang dihasilkan lebih besar.

Dengan pertimbangan-pertimbangan tersebut, maka dipilih motor BLDC untuk aktuator RW. Oleh karena desain RW ini menggunakan komponen-komponen yang tersedia di pasaran, maka digunakan satu jenis motor BLDC

komersil, namun dengan ketahanan dan performa yang baik. Untuk aplikasi satelit dibutuhkan sistem motor yang memiliki reliabilitas tinggi, *long-life*, bebas perawatan, dan juga sistem yang dilengkapi dengan sensor enkoder (Hall sensor) untuk aplikasi mekanisme-servo. Motor BLDC yang digunakan adalah tipe 2444048B dari FAULHABER [4], seperti ditampilkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Motor BLDC 2444 048B dari FAULHABER

Nilai torsi yang dihasilkan oleh motor tersebut sebanding dengan besar arus yang diberikan, dengan nilai konstanta kesebandingannya didefinisikan sebagai K_M . Ketika salah satu lilitan induktor (fasa) di dalam motor diberikan tegangan, dengan seketika rotor yang merupakan magnet permanen akan mengalami gaya dorongan akibat gaya induksi magnetik yang dihasilkan. Jika tegangan diberikan secara bergantian dan kontinu pada ketiga fasa (A, B dan C), maka rotor akan berotasi pada arah tertentu secara kontinu.

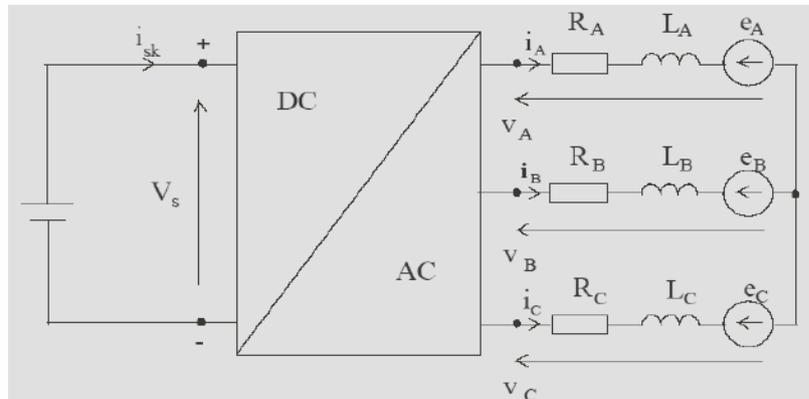
Tabel 2.4. Spesifikasi teknis dari motor BLDC (2444 048B)

Jumlah Fasa	3 x 120 ⁰ (Tipe Δ)
Jumlah Hall sensor	3 x 120 ⁰
Hambatan terminal fasa-fasa (R_P)	8.4 Ω
Konstanta Back-EMF (K_e)	2.115 x 10 ⁻³ V/RPM
Konstanta Torsi (K_M)	20.2 x 10 ⁻³ Nm/A
Konstanta Kecepatan (k_n)	473 RPM/V
Inersia Rotor (I_{Rotor})	6.5 g.cm ²

Nilai kecepatan maksimum dari rotor bergantung pada besar tegangan yang diberikan, dengan nilai konstanta kesebandingannya didefinisikan sebagai K_e . Detail dari spesifikasi teknis motor ini diberikan pada tabel 2.4.

2.2.2. Model Matematik Motor BLDC

Pada gambar 2.6, motor BLDC terhubung dengan keluaran dari inverter (AC), sedangkan terminal masukan dari inverter terhubung dengan tegangan konstan (DC). Asumsi lainnya adalah tidak ada daya yang hilang pada inverter maupun lilitan stator motor tiga fasa.



Gambar 2.6. Model motor BLDC

Dengan asumsi lilitan stator dalam keadaan simetris dan rotor dalam kondisi *balance*, maka tegangan yang melewati tiap lilitan motor dapat dituliskan sebagai berikut:

dari hukum Kirchoff untuk tegangan, diterapkan pada loop lilitan stator motor tiga fasa, diperoleh

$$\begin{aligned} v_a &= R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + e_a \\ v_b &= R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + e_b \\ v_c &= R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + e_c \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dengan *back-emf* e_a , e_b , dan e_c adalah fungsi dari kecepatan sudut dari sumbu rotor, sehingga

$$e = K_e \omega_m \quad (2.5)$$

dengan K_e adalah nilai konstanta *back-emf*.

Dengan demikian model matematik dari motor BLDC dapat direpresentasikan dalam bentuk persamaan matriks berikut

$$\begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Jika diasumsikan rotor dalam keadaan ideal, maka induktansi masing-masing fasa dapat dituliskan

$$L_a = L_b = L_c = L \quad (2.7)$$

dan induktansi antar fasa dapat dituliskan menjadi

$$M_{ab} = M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M_{ca} = M_{cb} = M \quad (2.8)$$

Asumsi berikutnya adalah resistansi ketiga fasa adalah sama, sehingga

$$R_a = R_b = R_c = R \quad (2.9)$$

Dengan menulis ulang persamaan (2.5), diperoleh

$$\begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Torsi mekanik yang dihasilkan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (2.11)$$

Sedangkan torsi elektromagnetik dari motor BLDC tiga fasa bergantung pada arus, kecepatan sudut, dan bentuk tegangan *back-emf*, sehingga torsi elektromagnetik dapat dituliskan sebagai berikut

$$T_{em} = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2.12)$$

2.2.3. Desain Mekanik *Flywheel*

Pertimbangan utama dari desain mekanik *flywheel* adalah nilai inersia yang harus dipenuhi untuk dapat memberikan pengaruh kontrol yang signifikan terhadap sistem satelit.

Flywheel harus mampu menyimpan setengah kali momentum sudut total sistem satelit. Hal ini diperlukan agar RW mampu memutar dari keadaan statik menuju keadaan tunak (*steady state*) [3].

$$h_{\text{flywheel}} = \frac{1}{2} h_{\text{sistem}} \quad (2.13)$$

dimana:

h_{flywheel} = momentum sudut *flywheel* dan

h_{sistem} = momentum sudut sistem.

Secara matematis momentum sudut merupakan perkalian antara momen inersia I dengan kecepatan sudut rotasi.

$$h = I \cdot \omega \quad (2.14)$$

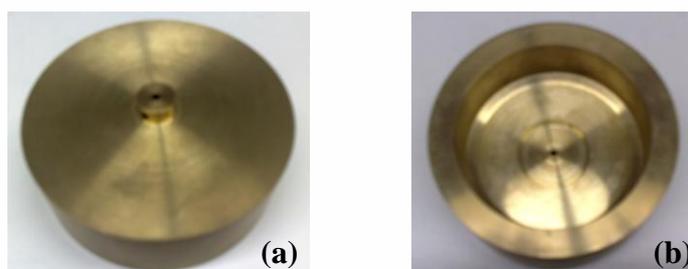
Nilai-nilai parameter yang diperlukan untuk perhitungan antara lain sebagai berikut:

- Satelit mikro dengan massa <100kg, dengan inersia maksimum < 3 kg.m²
- Kecepatan sudut satelit maksimum sebesar 8⁰/s;
- Kecepatan sudut maksimal dari *reaction wheel* (berdasarkan kemampuan motor pada tegangan nominal 15 Volt) adalah 6000 rpm;
- Kebutuhan torsi maksimum < 12 mNm

Berdasarkan nilai-nilai tersebut agar memenuhi persyaratan kebutuhan momentum sudut pada persamaan (2.13), diperoleh momen inersia *flywheel* minimum adalah $333.3 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$. Adapun inersia *flywheel* dari RW yang dikembangkan adalah sebesar $912.6 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$. Nilai ini dikatakan sudah cukup untuk kebutuhan pengendalian satelit mikro.

Tabel 2.5. Spesifikasi teknis dari *flywheel*

Massa <i>flywheel</i> m_R	652 g
Inersia <i>flywheel</i> I_R	$912.6 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$



Gambar 2.7. *Flywheel*. (a) sisi atas; (b) sisi bawah.

Bentuk fisik dari *flywheel* ditampilkan pada Gambar 2.7. *Flywheel* ini terbuat dari bahan kuningan dengan nilai inersia akhir diperoleh dengan bantuan perangkat lunak *Solid-Edge V15*. Adapun nilai massa dan inersia *flywheel* diberikan pada tabel 2.5.

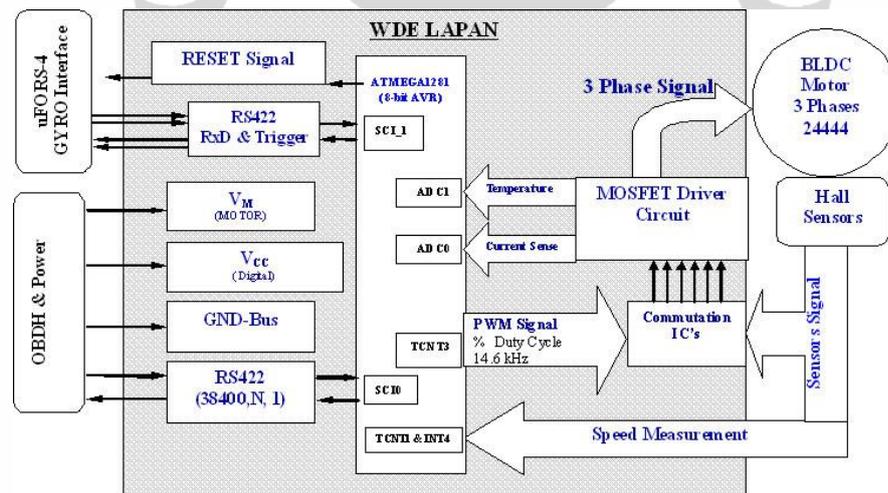
2.2.4. Desain Wheel Drive Elektronik (WDE)

Konstruksi desain dari WDE diberikan pada gambar 2.8. Dalam konstruksi tersebut dapat dilihat bahwa setiap unit WDE dapat menangani satu motor yang terintegrasi dengan *flywheel* dan satu sensor giroskop, untuk operasi kontrol satu sumbu satelit. Sehingga akan terdapat sekurangnya tiga WDE untuk dapat menjalankan operasi stabilisasi 3-sumbu satelit.

WDE ini tersusun atas beberapa bagian penting, yang antara lain:

Interface komunikasi. Terdapat dua interface RS422, yaitu komunikasi serial dengan giroskop dan kontroler utama (seperti komputer PC).

Interface daya. WDE membutuhkan dua sumber daya, yaitu $V_{CC} = +5$ Volt untuk catu rangkaian digital dan $V_M = (+10 \text{ s.d } +20)$ Volt untuk catu motor dan driver mosfet.

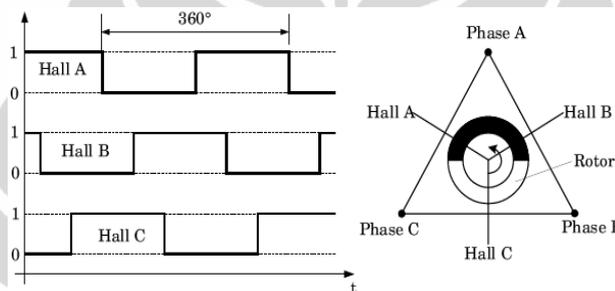


Gambar 2.8. Blok diagram WDE dengan Motor

Mikrokontroler. Digunakan mikrokontroler 8-bit AVR seri ATMega1281 dari ATMEL. Keunggulannya utamanya adalah sistem COTS. Keunggulan lainnya antara lain, 128 kByte internal flash, 4 kByte EEPROM, 8 kByte internal SRAM, 4 unit Timer/Counter 16-bit, 2 serial UART, PWM generator dengan resolusi 2–16 bit, *Analog to Digital Converter* (ADC) 10-bit internal, *programmable*

Watchdog Timer dan *Brown-Out Detection* untuk *reset supervisor*. Mikrokontroler ini menjadi inti dari sistem WDE, yang menjalankan fungsi antara lain

- 1) menerima dan mengeksekusi (*Command*) dari komputer utama (PC)
- 2) akuisisi data sensor giroskop
- 3) membaca dan mengkalkulasi data kecepatan sudut dari *flywheel*
- 4) mengatur sinyal PWM, yang pada akhirnya mengatur nilai arus, torsi dan kecepatan dari *flywheel*
- 5) melakukan proses kontrol kecepatan dan posisi sudut satelit (platform) pada satu sumbu



Gambar 2.9. Sinyal keluaran tiga Hall-sensor (kiri). Diagram internal dari motor dengan posisi rotor, lilitan fasa dan Hall-sensor

2.2.5. Desain Komutasi Motor BLDC RW

2.2.5.1. Regulator Arus Dengan Sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM)

WDE menggunakan Sinyal PWM untuk pengaturan/regulasi arus yang masuk ke motor. PWM dibangkitkan langsung dari salah satu pin mikrokontroler dengan menggunakan Timer/Counter 16-bit. Frekuensi sinyal PWM yang digunakan didefinisikan dalam persamaan berikut

$$f_{PWM} = \frac{f_{CLK_{I/O}}}{N \cdot (1 + TOP)} \quad (2.15)$$

dengan $f_{CLK_{I/O}}$ merupakan nilai frekuensi operasi mikrokontroler yaitu pada 14.7456 MHz, $N = 1$ adalah nilai pembagi (prescaler) clock I/O yang digunakan dan $TOP = 0x3FF$ (1023) yaitu PWM pada saat *Duty Cycle* (DC) maksimum (PWM = 100%). Sehingga diperoleh $f_{PWM} = 14.4$ kHz.

Adapun nilai resolusi bit (R_{PWM}) yang digunakan bergantung dari nilai TOP

$$R_{PWM} = \frac{\text{Log}(TOP+1)}{\text{Log}(2)} \quad (2.16)$$

sehingga nilai resolusi bit (R_{PWM}) yang diperoleh adalah 10-bit. Dengan demikian, nilai resolusi maksimum DC yang dapat diperoleh adalah

$$\Delta_{Min} \% DC = \frac{1}{TOP+1} \quad (2.17)$$

yaitu sebesar 0.0001 atau 0.01% DC.

Hubungan antara % DC dengan arus yang diberikan kepada motor dapat dituliskan sebagai berikut

$$I = \frac{V_M \cdot \% DC}{R_{Load}} \quad (2.18)$$

dengan V_M adalah nilai tegangan yang diberikan pada motor (umumnya +15 Volt) dan R_{Load} merupakan nilai hambatan total yang dilalui oleh arus, didefinisikan sebagai

$$R_{Load} = R_P + R_{MB} + R_{MA} + R_S \quad (2.19)$$

dengan

R_P : nilai hambatan fasa motor (tabel 2.4)

R_{MB} : nilai R_{DS} pada mosfet bawah (28 m Ω)

R_{MA} : nilai R_{DS} pada mosfet atas (13.5 m Ω)

R_S : nilai resistor sense (0.051 Ω)

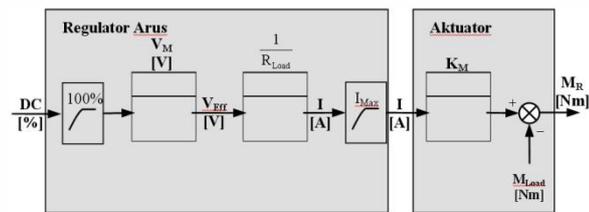
Dengan menggabungkan persamaan (2.17) dan (2.18) akan diperoleh nilai resolusi dari regulator arusnya sebesar

$$\Delta I_{Min} = \frac{15 \times 0.0001}{8.49} = 0.177 \text{ mA} \quad (2.20)$$

Pada gambar 2.10 diberikan konstruksi dari regulator arus WDE dan juga karakteristik dari motor sebagai aktuatur. Masukan sinyal dari blok regulator arus adalah %DC yang didefinisikan dengan

$$\% DC = \frac{\text{Timer}_1}{1023} \quad (2.21)$$

dengan nilai interval timer_1 adalah 0 s.d 1023.



Gambar 2.10 Blok diagram WDE dengan motor

Nilai I_{Max} adalah 1.6 A sebagai nilai maksimum arus yang dapat diberikan pada motor. Nilai tersebut disertakan dalam program mikrokontroler untuk membatasi arus dari motor. Karakteristik internal motor dan *flywheel* yang memiliki kelembaman sebagai representasi dari Hk. Newton 1 diberikan dengan nilai M_{Load} dari karakteristik motor dan *flywheel*.

2.2.5.2. Pengukuran Kecepatan Sudut *Flywheel*

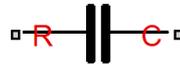
Pengukuran kecepatan RW dilakukan oleh mikrokontroler dengan memanfaatkan sinyal Hall sensor (A, B dan C). Sinyal Hall sensor akan membangkitkan *interrupt external* pada mikrokontroler yang pada akhirnya akan mengaktifkan counter 16-bit yang telah disediakan untuk melakukan penghitungan kecepatan sudut RW tiap satu rotasi.

2.3. Model Gesekan Rotasi Pada SIMULINK-MATLAB

Gesekan (friksi) adalah gaya yang melawan perpindahan relatif suatu permukaan benda terhadap permukaan benda lainnya. Gesekan ini dapat mengurangi pergerakan suatu benda dan mentransformasikan energi kinetiknya ke bentuk energi lain, seperti energi panas. Hal ini dapat mengurangi keidealan dari suatu sistem.

Pada gerak rotasi, torsi gesekan (τ_{fric}) yang ada pada *ball-bearing* yang digunakan sebagai medium kontak antara sistem yang berotasi dan yang diam, dapat mengganggu konservasi momentum sudut sistem seperti diberikan pada persamaan (2.3). Gesekan pada gerak rotasi ini dapat dimodelkan dalam SIMULINK-MATLAB, sehingga dapat digunakan sebagai elemen pelengkap dalam pemodelan sistem meja rotasi.

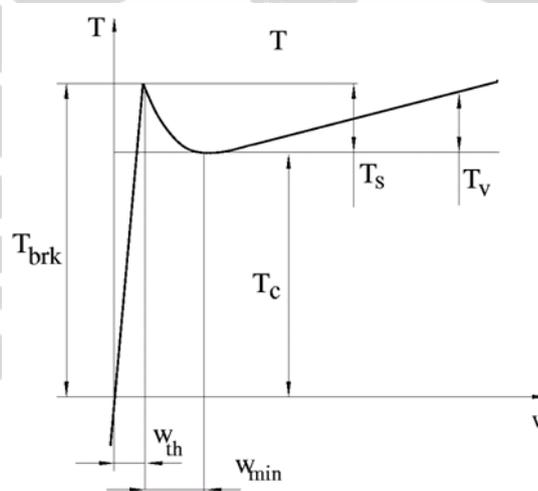
Blok gesekan rotasi (*rotational friction*) seperti diberikan pada gambar 2.11 merupakan salah satu elemen Simscape (modul tambahan dari SIMULINK-MATLAB) yang dapat digunakan untuk memodelkan sistem fisis, dalam hal ini adalah untuk mensimulasikan gesekan yang terjadi pada permukaan kontak benda yang berotasi, seperti pada *ball-bearing*. Blok ini masuk ke dalam kelompok elemen rotasi mekanik dalam Simscape.



Rotational Friction

Gambar 2.11. Blok gesekan rotasi pada Simscape-SIMULINK

Dalam blok ini torsi gesekan dimodelkan sebagai fungsi kontinu dari kecepatan sudut dan diasumsikan sebagai gabungan antara komponen gesekan Stribeck, Coulomb, and viscous seperti diberikan pada gambar 2.12.

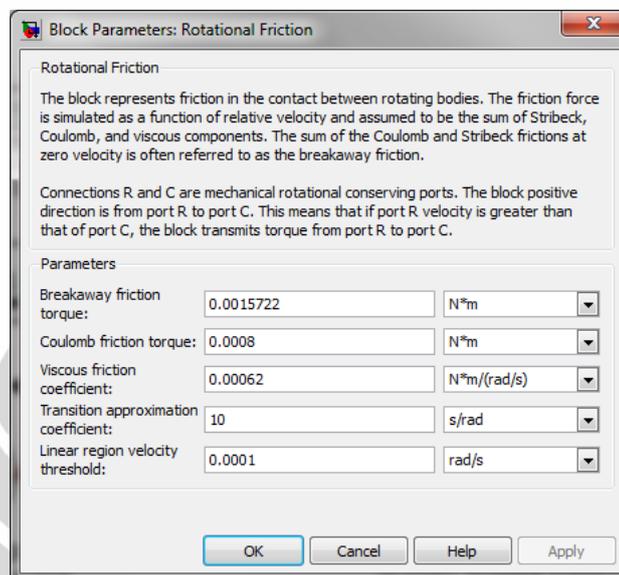


Gambar 2.12. Grafik karakteristik torsi gesekan (T) terhadap kecepatan sudut relatif (w) dari gerak rotasi sistem

Gesekan Stribeck (T_S) memiliki *slope* negatif terhadap kecepatan sistem dan muncul pada kecepatan rendah. Gesekan Coulomb (T_C) memiliki nilai konstan pada semua kecepatan. Sedangkan gesekan *viscous* (T_V) merupakan torsi perlawanan yang dikenakan pada sistem dan sebanding dengan kecepatan sudut rotasinya. Jumlah dari T_C dan T_S pada kecepatan sudut nol disebut sebagai torsi gesekan *breakaway* T_{brk} . Pada gambar tersebut diberikan pula w_{th} , yaitu kecepatan *threshold* dimana torsi friksi diasumsikan linear terhadap kecepatan sudut sistem. Dari hasil eksperimen nilai w_{th} ini berada dalam selang 10^{-3} rad/s sampai dengan

10^{-5} rad/s untuk dapat menghasilkan akurasi dan komputasi model yang baik. Arah positif dari blok 2.11 adalah dari R ke C. Ini berarti bahwa jika kecepatan sudut port R lebih besar dibandingkan port C, blok ini akan memberikan torsi dari R ke C [12].

Pada gambar 2.13 diberikan tampilan antarmuka untuk penyetingan parameter-parameter dari blok gesekan rotasi gambar 2.11.



Gambar 2.13. Antarmuka penyetingan parameter untuk blok gesekan rotasi

2.4. Sensor Giroskop (MicroGyro100)

Giroskop merupakan sensor yang dapat mengukur kecepatan sudut dari sistem dimana sensor itu berada. Elemen sensor ini dapat berupa sistem mekanik ataupun optik. Teknologi giroskop ini terus berkembang, hingga kemudian ditemukanlah giroskop *Micro Electro Mechanical Systems* (MEMS) pada tahun 1995 [6].

Prinsip kerja giroskop secara umum adalah berdasarkan gaya Coriolis [6]. Jika suatu benda yang berotasi secara sinusoidal pada sebuah bidang diputar dengan kecepatan putar sebesar ω , maka benda tersebut akan terkena gaya Coriolis. Gaya ini akan mengakibatkan adanya getaran tegak lurus pada bidang dengan amplitudo yang proporsional dengan ω tersebut. Sehingga pengukuran terhadap nilai amplitudo tersebut akan memberikan nilai kecepatan sudut ω yang bersesuaian.

Karakteristik yang perlu diperhatikan dari giroskop adalah adanya bias. Bias ini akan mengakibatkan error yang direpresentasikan oleh (2.22)

$$e_i = B_i t \quad (2.22)$$

dimana i adalah sumbu perputaran.

Selain itu giroskop juga mengandung *random noise* yang dapat mengganggu keakurasian pemrosesan data, sehingga algoritma filtering tertentu harus diimplementasikan.

Sensor giroskop model MicroGyro100 (MG100) merupakan giroskop mini dengan harga murah (*low cost*) dan mampu mengukur arah dan besar kecepatan sudut (ω) pada dua sumbu rotasi (misalnya *yaw* dan *pitch*). Sensor ini dapat beroperasi dengan tegangan eksternal minimum VCC 2.2 volt (selang 2.2 – 5.5 Volt) dan konsumsi arus yang sangat kecil (dengan adanya *sleep mode*). Material sensor terbuat dari bahan *piezoelectric* yang dilengkapi dengan sistem peredam yang dapat mengurangi *noise* akibat vibrasi pada elemen, sensor temperatur sebagai kompensasi arus drift akibat perubahan temperatur, dan meningkatkan daya tahan terhadap *shock*. MG100 dapat langsung diintegrasikan dengan *printed circuit board* (PCB) tanpa pelindung tambahan terhadap *shock*.

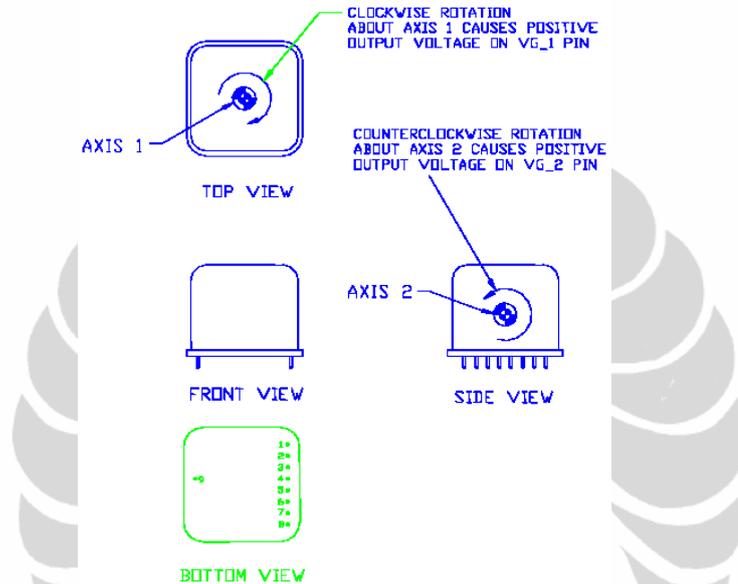
Sensor ini memanfaatkan efek gaya *coriolis* yang muncul saat berotasi. Gaya tersebut menimbulkan percepatan yang arahnya bergantung dari arah rotasi dan besarnya sebanding dengan nilai kecepatan sudut (ω). Pada MG100, efek ini diterjemahkan ke dalam kuantitas listrik (tegangan analog).



Gambar 2.14. Bentuk fisik sensor MicroGyro100

Masing-masing sumbu rotasi MG100 akan memberikan nilai tegangan analog yang sebanding dengan kecepatan rotasi masing-masing sumbu. Konstanta kesebandingan ini dikenal sebagai nilai sensitivitas (**SE**). MG100 memiliki sensitivitas $\sim 1.11 \text{ mV}/(^{\circ}/\text{s})$, yang berarti tegangan analog sensor untuk masing-masing sumbunya akan berubah 1.1 mV ketika giroskop berotasi terhadap sumbu tersebut dengan *rate* sebesar 1 derajat tiap 1 sekon [7].

Dari gambar 2.15 dapat dilihat bahwa ketika MG100 diletakkan pada bidang horizontal (bidang kertas/pin-pin menghadap ke bawah dan akan tampak *top view*), sumbu 1 akan mendeteksi *yaw* dan sumbu 2 akan mendeteksi *Pitch* atau *Roll* bergantung dari orientasi. Jika MG100 diletakkan secara vertikal (tampak *front view*), sumbu 1 akan mendeteksi *Pitch*, dan sumbu 2 akan mendeteksi *yaw* atau *Roll* bergantung dari orientasi (dengan asumsi PCB sumbu normal kertas parallel dengan sumbu z).



Gambar 2.15. Orientasi sumbu-sumbu rotasi MicroGyro100

2.5. Algoritma *Double Exponential Smoothing*

Exponential smoothing biasa digunakan untuk memprediksi dalam dunia statistik, akan tetapi juga dapat digunakan untuk filtering signal dan dapat diproses secara cepat. Keluaran sensor giroskop mengandung *random noise* yang dapat mengganggu keakurasian pemrosesan data. Sehingga perlu diaplikasikan metoda *digital filtering* yang dapat diimplementasikan pada mikroprosesor kecil sekelas mikrokontroler 8-bit.

Sinyal analog dari sensor giroskop, setelah diubah ke nilai digital oleh data akuisi mengandung *random noise* baik yang berasal dari sensor maupun sistem elektronik, sehingga perlu dilakukan proses filtering secara digital. *Noise* pada data signal digital $x_{(n)}$ dapat diproses dengan *single exponential filtering* secara sederhana dengan persamaan berikut ini

$$y_{(n)} = ax_{(n)} + (1-a)y_{(n-1)} \quad (2.23)$$

Hasil filtering sinyal adalah $y_{(n)}$ dengan parameter exponential adalah a . Nilai a adalah antara nol dan satu ($0 < a < 1$). Bila *noise* terlalu dominan maka nilai parameter a yang optimal adalah mendekati nol, jika sebaliknya maka nilai a lebih baik dekat ke satu. Penentuan parameter ini dapat secara langsung dicari sesuai dengan kondisi sinyal. Hasil filter pada persamaan (2.23) ini mempunyai performa yang sama dengan filter analog RC satu pole. Persamaan (2.23) di atas dapat ditulis menjadi *double exponential filtering* sebagai berikut

$$y_{(n)}^{[2]} = ay_{(n)} + (1-a)y_{(n-1)}^{[2]} \quad (2.24)$$

Superskrip [2], menandakan hasil filter tahap kedua. Persamaan (2.23) akan memperhalus sinyal keluaran sensor secara langsung, sedangkan persamaan (2.24) akan memperhalus hasil keluaran sinyal $y_{(n)}$. Dengan *double exponential filtering* seperti persamaan (2.24), hasil yang didapat semakin baik. Hanya saja kecepatan proses menjadi sedikit menurun atau waktunya menjadi dua kali lipat. Hal ini perlu disesuaikan dengan kemampuan processor. Prosesor seperti mikrokontroler 8-bit cukup dengan *double exponential filtering*. Selain itu, oleh karena algoritma filtering di atas hanya perkalian dan penjumlahan sederhana maka sangat mudah diimplementasikan pada bahasa *Assembler* atau bahasa interpreter seperti *Basic* atau C pada mikrokontroler.

Implementasi algoritma di atas dapat ditulis dalam bahasa C diberikan pada persamaan (2.23). Nilai awal data stabil diambil dari nilai rata-rata dalam beberapa detik. Kemudian setiap data dari ADC (*analog to digital converter*) diproses pada filter pertama, dan hasilnya dilanjutkan untuk filter kedua. Untuk filter dengan orde lebih tinggi, proses ini dapat diulang-ulang sampai orde tersebut.

```

a = 0.1 ' nilai parameter exponential
b = 1 - a
while(1)
{
' single exponential filtering
Y1 = a * ADC(0)
Y2 = b * Ym
Y = Y1 + Y2
Ym = Y
'double exponential filtering
Y12 = a * Y
Y22 = b * Ym2
Yy = Y12 + Y22
Ym2 = Yy
}

```

(2.25)

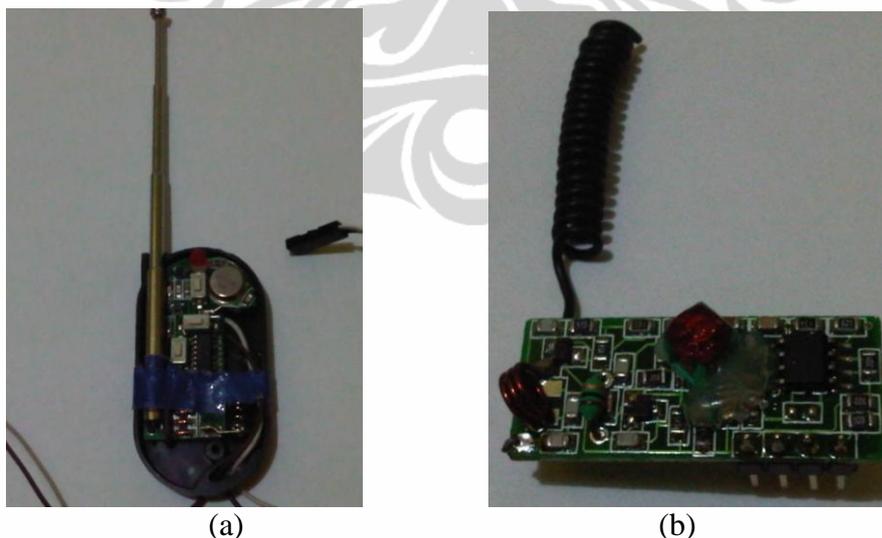
2.6. Radio Frekuensi (RF) Transceiver

Radio frekuensi *transceiver* terdiri dari *transmitter* dan *receiver*. Modul ini berfungsi penting dalam pengendalian sistem meja rotasi, yakni untuk memungkinkan komunikasi tanpa kabel (*wireless*) antara komputer utama dengan pemroses mikro di WDE. Sistem meja rotasi harus bebas dari gangguan eksternal untuk memperoleh hasil pengendalian yang optimal.

Pada tesis ini digunakan dua jenis transceiver yang berbeda. Kedua transceiver tersebut juga memiliki frekuensi operasi berbeda yakni 315 MHz digunakan sebagai frekuensi *uplink* dan 433.92 MHz digunakan sebagai frekuensi *downlink*. Perbedaan ini dilakukan untuk mengurangi interferensi aliran data yang tidak, selain juga memungkinkan sistem berkomunikasi secara *full-duplex* (dua arah secara bersamaan).

2.6.1. RF Transceiver 315 MHz

Modul ini digunakan untuk mengirim data dari komputer utama (Tx) ke prosesor WDE (Rx). Modul yang digunakan berasal dari *universal remote control* yang biasa digunakan sistem pengaman rumah atau garasi. Tampilan fisis dari modul *transmitter* dan *receiver* ini diberikan pada gambar 2.16.



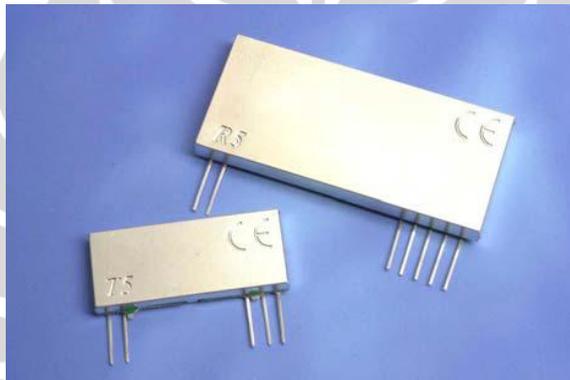
Gambar 2.16. (a) Modul transmitter (Tx) dan (b) Modul *receiver* untuk *uplink* data

Modul ini memiliki modulasi ASK (*Amplitude-Shift Keying*), yang merupakan jenis modulasi yang paling sederhana, dimana sinyal informasi digital

dimodulasi berdasarkan *amplitude carrier*. Modul ini dapat digunakan untuk komunikasi *wireless* dengan jarak hingga 100m dengan kecepatan transfer data maksimum 4800 bps.

2.6.2. RF Transceiver 433.92 MHz

Modul RF dengan frekuensi ini digunakan untuk *downlink* data dari prosesor WDE ke komputer utama (PC). Modul *transmitter* memiliki kode produksi T5-434-5V dapat digunakan pada jarak hingga 300 meter dan dengan kecepatan transfer data hingga 128 Kbps. Sedangkan modul *receiver* memiliki kode produksi R4-434-5-20 memiliki jangkauan jarak yang sama namun dengan kecepatan transfer data yang lebih rendah, yaitu 20Kbps maksimum.



Gambar 2.17. Modul transceiver untuk *downlink* data

2.7. Algoritma Pengendali PID

Pengendali *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan pengendali yang telah demikian luas dan mapan digunakan dalam sistem kendali di banyak proses. Adapun kehandalan sistem pengendali ini sangat ditentukan oleh bentuk desain pengendali, metode panalaan dan parameter-parameter kendalinya. Bila parameter-parameter tersebut cukup akurat untuk meningkatkan *rise time* (t_r), mengatasi *overshoot*, serta memperkecil kesalahan tunak (*steady state error*) maka pengendalian proses yang digunakan ini dapat dikatakan memuaskan.

Dalam hal ini *rise time* (t_r) merupakan waktu yang diperlukan respon untuk naik dari 10% sampai 90% dari nilai akhir. *Peak time* (t_p) merupakan waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali. *Settling time* (t_s) adalah waktu yang diperlukan kurva respon untuk *seattle* atau menetap dalam daerah di sekitar harga akhir. *Percent overshoot* (pos) adalah harga puncak

lewatan maksimum dari kurva respon dan *error steady state* (ess) adalah kesalahan yang terjadi antara nilai akhir dari respon dengan nilai masukan acuan.

Penalaan (*tuning*) adalah prosedur untuk menyetel parameter pengendali berumpan-balik untuk mendapatkan respon lingkaran tertutup yang diharapkan. Pada tulisan ini digunakan dua metode penalaan berbeda untuk pengendali PID. Pertama, dengan menggunakan metode penalaan Ziegler-Nichols [11] yang akan diterapkan pada pengendalian kecepatan sudut meja rotasi satu sumbu. Kedua, dengan metode penalaan grafik (*tuning charts*) Ciancone [5] yang akan diterapkan pada pengendalian posisi sudut meja rotasi satu sumbu. Perbedaan metode penalaan ini disebabkan karena model dari kecepatan sudut meja rotasi satu sumbu tidak dapat direpresentasikan ke dalam bentuk fungsi orde satu dengan waktu tunda ataupun fungsi S, sehingga metode penalaan grafik Ciancone tidak dapat digunakan. Penjelasan lebih lengkap tentang model sistem ini akan diberikan pada bagian selanjutnya dari Bab ini.

2.7.1. Metode Penalaan Grafik Ciancone

Secara matematis, algoritma kendali dengan metode penalaan grafik Ciancone [5] dapat dinyatakan dalam bentuk keluaran kendalinya dengan persamaan berikut

$$MV(s) = K_c \left(E(s) + \frac{1}{T_i s} E(s) - s T_d CV(s) \right) \quad (2.26)$$

dimana:

$MV(s)$ = *Manipulated Variable* (keluaran kendali)

$E(s)$ = *Error* = $SP(s) - CV(s)$

$SP(s)$ = *Set Point*

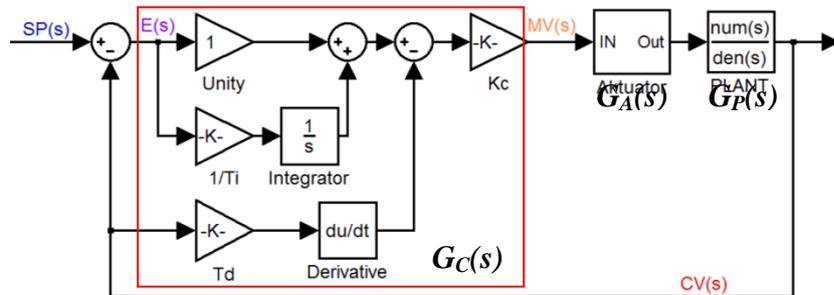
$CV(s)$ = *Controlled Variable* (keluaran proses / *plant*)

K_c = Konstanta Proporsional

T_i = Konstanta Integral

T_d = Konstanta Derivatif

Gambar 2.18 menunjukkan desain pengendali PID $G_C(s)$ dengan grafik Ciancone dari persamaan (2.26) dalam SIMULINK MATLAB. Pada gambar desain tersebut aktuator $G_A(s)$ adalah model sistem *reaction wheel* yang akan dibahas pada bagian 2.4.4 dan akan digunakan pada setiap desain kendali pada penelitian ini. Sedangkan $G_P(s)$ adalah model sistem meja rotasi satu sumbu yang akan dikendalikan.

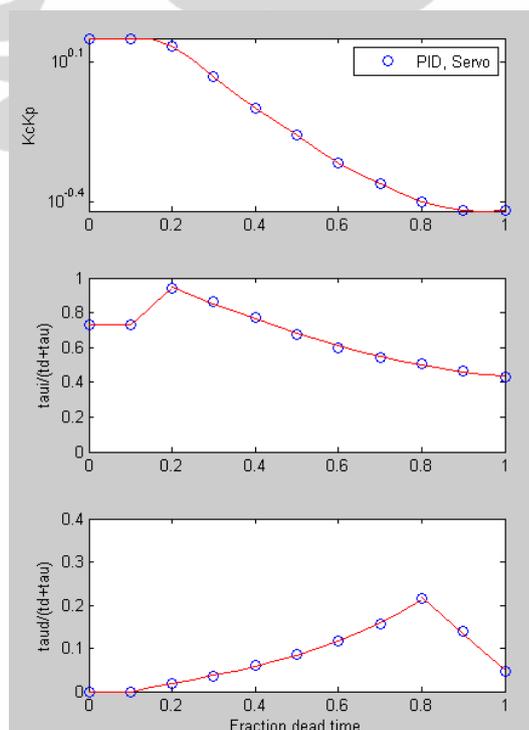


Gambar 2.18. Desain pengendali PID dengan metode penalaan grafik Ciancone dalam SIMULINK MATLAB

Metode penalaan ini diawali dengan penentuan parameter-parameter proses dari sistem proses (*plant*). Parameter-parameter proses itu antara lain nilai K_P , τ , dan θ seperti dijelaskan pada bagian 2.4.4. Dengan menggunakan nilai-nilai parameter ini selanjutnya ditentukan nilai *fraction dead time* (FDT) seperti ditunjukkan pada persamaan (2.27).

$$FDT = \left(\frac{\theta}{\theta + \tau} \right) \quad (2.27)$$

Setelah nilai FDT diperoleh maka nilai-nilai parameter kendali, K_C , T_i dan T_d dapat ditentukan dengan menggunakan grafik Ciancone yang diberikan pada gambar 2.19.



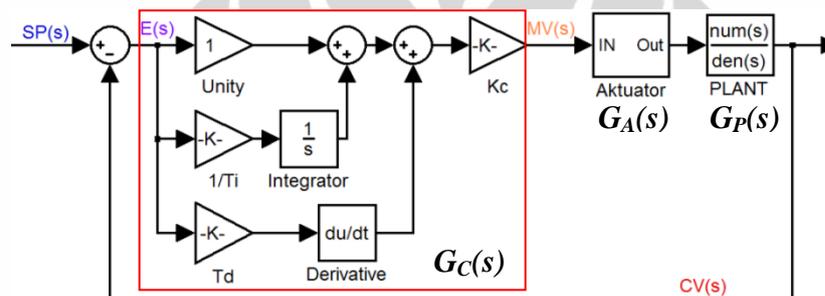
Gambar. 2.19. Diagram Ciancone untuk sistem servo

2.7.2. Metode Penalaan Ziegler-Nichols

Secara matematis, algoritma kendali dengan metode Ziegler-Nichols [11] dapat dinyatakan dalam bentuk fungsi transfernya dengan persamaan berikut

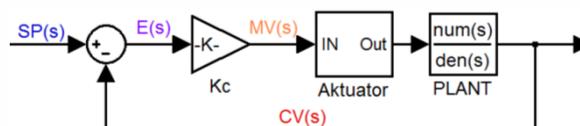
$$G_C(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} + sT_d \right) \quad (2.28)$$

Pada gambar 2.20 diberikan desain pengendali PID dari persamaan (2.28) dalam SIMULINK MATLAB. Perbedaan utamanya jika dibandingkan dengan desain pengendali Ciancone terletak pada masukan fungsi *Derivative*. Pada Ciancone, masukannya adalah nilai variabel $CV(s)$ sedangkan pada Ziegler-Nichols, masukannya adalah nilai variabel $E(s)$ seperti tampak pada gambar.



Gambar 2.20. Desain pengendali PID dengan metode penalaan Ziegler-Nichols dalam SIMULINK MATLAB

Metode penalaan ini diawali dengan memberikan nilai $T_i = \infty$ dan $T_d = 0$. Dengan hanya menggunakan komponen proporsional seperti tampak pada gambar 2.19, atur nilai K_c secara bertahap dari 0 sampai dengan nilai kritis K_{cr} , yaitu nilai dimana keluaran sistem di saat pertama mengalami osilasi. Adapun perioda osilasinya merepresentasikan nilai P_{cr} yang selanjutnya akan digunakan untuk menentukan parameter-parameter waktu dari kendali. Ziegler dan Nichols menyarankan nilai-nilai parameter kendali diset pada persamaan-persamaan yang diberikan pada persamaan dalam tabel 2.6 [11].



Gambar 2.21. Sistem lingkaran tertutup dengan pengendali proporsional

Dengan metode penalaan ini akan diperoleh sebuah kutub pada titik pusat sumbu dan dua buah *zeros* pada $s = 4/P_{cr}$. Sehingga dengan demikian diperoleh sebuah sistem yang dapat terkendali.

Tabel 2.6. Aturan penalaan Ziegler-Nichols berdasarkan penguatan kritis K_{cr} dan perioda kritis P_{cr} (metode kedua) untuk pengendali PID [11].

K_c	T_i	T_d
$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$



BAB III

PEMODELAN AKTUATOR - SENSOR DAN SISTEM MEJA ROTASI

3.1. Pemodelan Aktuator *Reaction Wheel* (Fungsi Transfer)

Selain dengan penurunan matematik, model suatu sistem dapat juga diperoleh secara empirik (*Empirical Model Identification*) [5]. Hal ini dapat dilakukan jika semua data untuk pembentukan kurva proses *loop* terbuka dapat diperoleh baik secara eksperimen langsung maupun dari penurunan persamaan matematik.

Adapun tahapan metode empirik ini diberikan pada diagram alir gambar 1.1. Tahapan tersebut akan digunakan untuk sintesa model fungsi transfer dari aktuator *reaction wheel*.

3.1.1. Desain Eksperimen

Aktuator *reaction wheel* ditempatkan di atas permukaan yang rata dan stabil seperti pada gambar 3.1. Tegangan DC yang diberikan pada motor BLDC sebesar 15 volt sehingga diperoleh nilai kecepatan maksimum ketika PWM 100% sebagai berikut

$$n_{max} = k_n \cdot 15 = 473 \text{rpm/V} \times 15 \text{V} = 7095 \text{rpm} \quad (3.1)$$

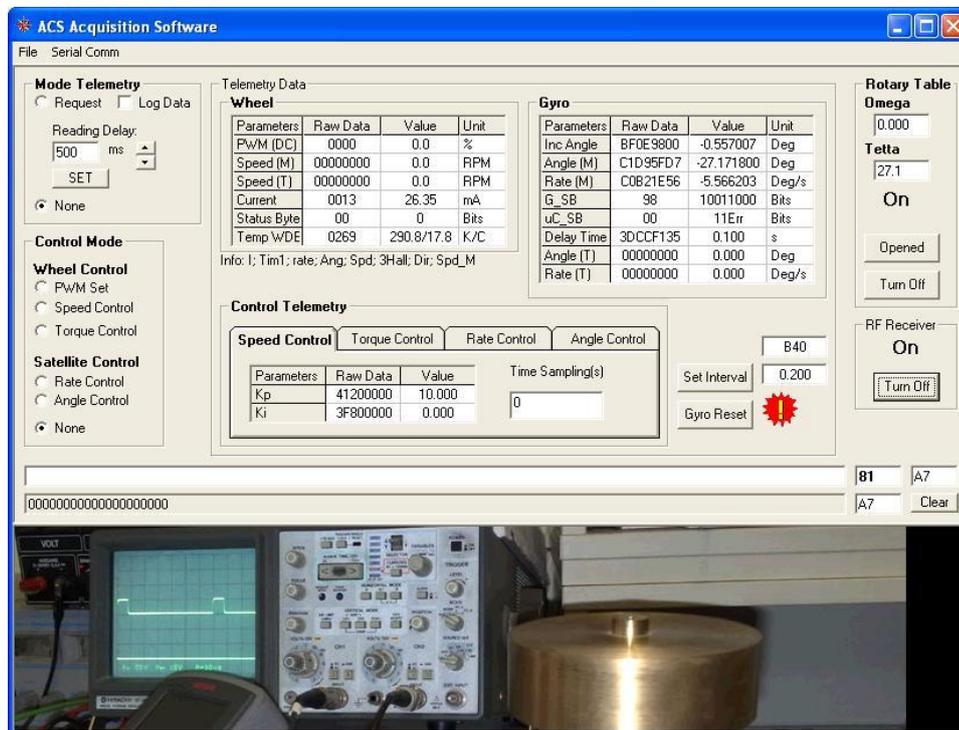
dengan k_n adalah konstanta kecepatan motor seperti diberikan pada tabel 2.4.

Kecepatan aktual motor diperoleh dari hasil pembacaan ketiga sensor Hall yang terintegrasi dengan motor. Pembacaan dan perhitungan nilai rotasi per menit dari rotor, dilakukan pada mikrokontroler WDE.



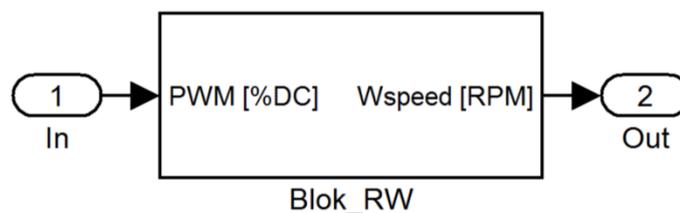
Gambar 3.1. *Reaction wheel* ditempatkan pada permukaan rata dan stabil

Selanjutnya data dikirimkan ke komputer PC melalui jalur komunikasi serial UART, lalu ditampilkan dan disimpan pada program yang telah dibangun menggunakan Visual Basic 6.0 yang dibuat, seperti ditampilkan pada gambar 3.2. Data-data eksperimen yang diperoleh tersebut selanjutnya diolah dan diplot ke dalam bentuk grafik menggunakan MATLAB.



Gambar 3.2. Tampilan program antarmuka WDE

Dengan perangkat lunak pada gambar 3.2 yang terhubung dengan aktuator RW, diberikan masukan berupa sinyal PWM dengan variasi persen *duty cycle* (%DC) yang akan memberikan keluaran berupa kecepatan sudut putar *flywheel* (*Wspeed*) yang sesuai dalam satuan Rotasi Per Menit (RPM). Adapun blok loop-terbuka dari sistem ini diberikan pada gambar 3.3.

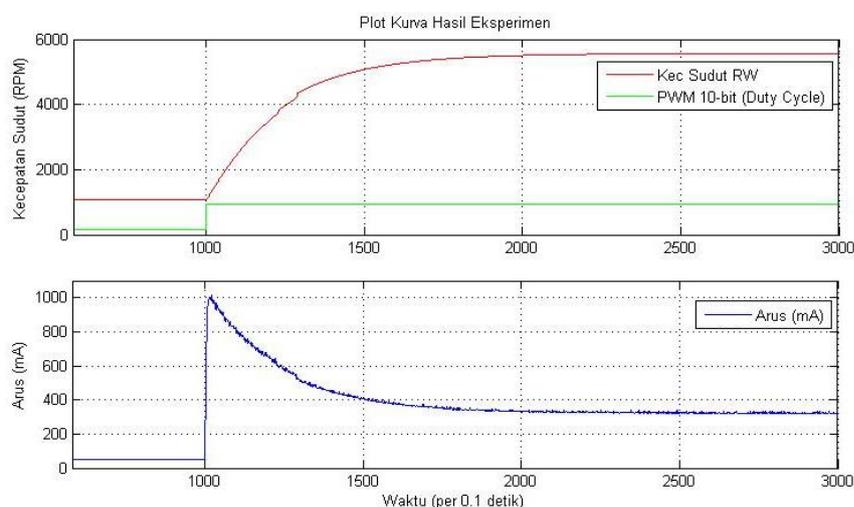


Gambar 3.3. Blok loop-terbuka dari aktuator RW dengan masukan sinyal PWM dan keluaran kecepatan sudut putar *flywheel*.

3.1.2. Pelaksanaan Eksperimen

Setelah desain eksperimen siap, dilanjutkan dengan proses pengambilan data untuk pembuatan kurva reaksi proses dengan tahapan sebagai berikut:

- Reaction Wheel* dan program antarmuka PC diaktifkan.
- Lakukan pembacaan awal terhadap data-data telemetri dari *reaction wheel* dan set selang pembacaan untuk setiap 0.1 detik. Jika komunikasi dan semua data pembacaan tidak ada masalah, maka setup dikatakan telah siap.
- Melalui mode pengesetan nilai PWM, dimasukan nilai *duty cycle* awal sebesar 15% atau setara dengan desimal 153, maka *flywheel* akan mulai berputar dan kecepatannya bertambah secara perlahan. Tunggu beberapa saat hingga kecepatan *flywheel* relatif konstan (*steady state*), kemudian catat nilai kecepatan rotasinya dan mulai *me-logging* data.
- Dengan tetap *me-logging* data, tunggu hingga *time counter* menunjukkan detik ke 100, kemudian berikan fungsi step pada masukan PWM dengan mengubah set poin PWM menjadi 90% atau setara dengan decimal 921, maka *flywheel* akan dipercepat hingga akhirnya diperoleh kondisi dimana kecepatan *flywheel* konstan (*steady state*), kemudian catat nilai kecepatan sudut dan hentikan logging data.
- Hasil data logging (kecepatan sudut dan arus RW) diplot dalam bentuk grafik menggunakan aplikasi *plot-tools* di MATLAB, seperti ditampilkan pada gambar 3.4. Kemudian grafik tersebut akan digunakan untuk mengkalkulasi model yang sesuai dengan aktuator RW.



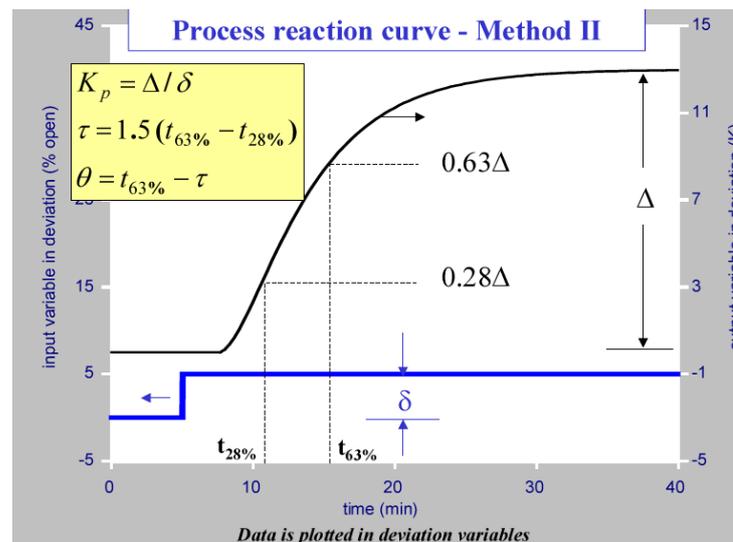
Gambar 3.4. Kurva Hasil eksperimen. Pengaruh fungsi step pada masukan PWM terhadap keluaran kecepatan sudut *flywheel* dan arus RW

3.1.3. Penentuan Struktur Model

Dalam perancangan ini digunakan fungsi linear orde satu dengan waktu tunda (*first order with dead time*).

3.1.4. Estimasi Parameter Model

Untuk estimasi parameter-parameter model dengan metode empirik ini akan digunakan kurva reaksi proses - metode II, seperti ditunjukkan pada gambar 3.5. Dalam diagram tersebut dapat dilihat bahwa parameter model berbentuk orde satu dengan waktu tunda, antara lain penguatan proses (K_p), konstanta waktu proses (τ) dan konstanta waktu tunda (θ) dapat ditentukan menggunakan metode grafik [5].



Gambar 3.5. Kurva reaksi proses – Metode II [5].

Dari grafik pada gambar 3.5 di atas diperoleh parameter-parameter model sebagai berikut:

- a. Menentukan Gain Proses (K_p):

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{5571.7 - 1071.7}{921 - 153} = \frac{4500}{768} = 5.8651 \quad (3.2)$$

- b. Menentukan nilai τ dan θ :

$$\begin{aligned} 63\% \Delta &= 0.63 \times 4500 + 1071.7 = 3906.7 \text{ RPM} \rightarrow t_{63\%} = 31.1 - 9.9 = 21.2 \text{ s} \\ 28\% \Delta &= 0.28 \times 4500 + 1071.7 = 2331.7 \text{ RPM} \rightarrow t_{28\%} = 18.5 - 9.9 = 8.6 \text{ s} \end{aligned}$$

Sehingga diperoleh:

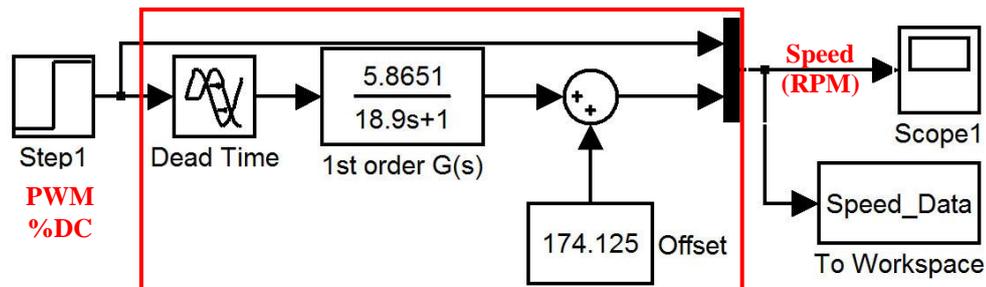
$$\begin{aligned} \tau &= 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) = 1.5(21.2 - 8.6) = 18.9 \text{ s} \\ \theta &= t_{63\%} - \tau = (21.2 - 18.9) \text{ s} = 2.3 \text{ s} \end{aligned}$$

Dari nilai K_p , τ dan θ tersebut dapat disusun model sistem (fungsi transfer) yang sesuai untuk aktuator RW sebagai berikut:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3.3)$$

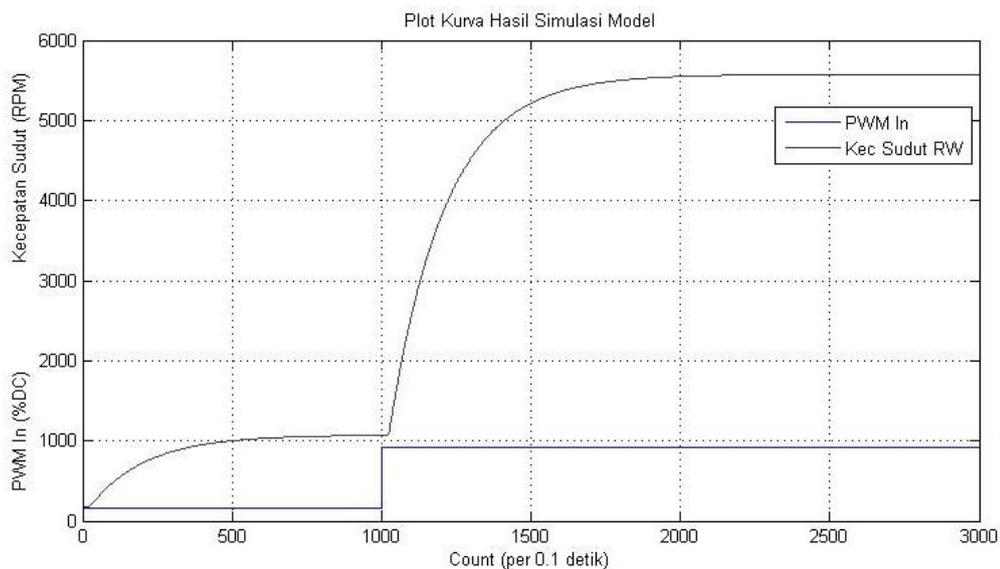
$$G(s) = \frac{5.8651 e^{-2.3s}}{18.9s + 1}$$

Ada pun desain fungsi transfer aktuator *reaction wheel* dari persamaan (3.3) dalam MATLAB SIMULINK diberikan pada gambar 3.6.



Gambar 3.6. Desain model sistem aktuator *reaction wheel* dengan fungsi alih $G(s)$ (dalam area kotak merah)

Adapun hasil keluaran dari model pada gambar 3.6 diberikan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7. Kurva keluaran model untuk masukan fungsi step yang sama dengan masukan pada gambar 3.4.

Pada gambar 3.6 dapat dilihat bahwa model aktuator RW tersusun oleh blok *dead-time* dan fungsi orde satu. Fungsi alih $G(s)$ dengan *dead-time*

merepresentasikan respon dinamik dan penguatan sistem proses, sedangkan konstanta *offset* digunakan untuk menyesuaikan selang nilai keluarannya.

Gambar 3.6 dapat dianalogikan dengan gambar 3.3, dimana Blok_RW merupakan bagian yang berada di dalam kotak merah. Pada tulisan ini, untuk selanjutnya model RW ini akan direpresentasikan dengan Blok_RW.

3.1.5. Evaluasi Model

Evaluasi terhadap model aktuator RW yang dirancang dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran simulasi model gambar 3.7 dengan kurva reaksi eksperimen nyata, gambar 3.4. Hasil keluaran simulasi model disimpan dalam *workspace* MATLAB dengan waktu pencuplikan disesuaikan dengan pengukuran eksperimen nyata, yakni 0.1 detik.



Gambar 3.8. Grafik hasil ekperimen (merah) dan model (hitam) untuk RW.

Hasil data percobaan (eksperimen) dan keluaran model diplotkan bersama menggunakan *plot-tools* MATLAB, seperti tampak pada gambar 3.8. Dapat dilihat bahwa kedua grafik tersebut saling berhimpit dengan hasil keluaran model (grafik berwarna hitam) mampu mengikuti respon dinamik (transisi) dan penguatan dari keluaran sistem nyata aktuator RW dengan baik. Selanjutnya, model aktuator RW yang direpresentasikan oleh persamaan (3.3) dan gambar 3.6, akan digunakan dalam rancangan pengendalian sikap sistem meja rotasi satu sumbu.

3.2. Pemodelan Sensor Girooskop MG100

3.2.1. Akuisisi Data Sensor Girooskop MG100

Desain elektronik rangkaian analog akuisisi sensor girooskop MG100 dilengkapi dengan rangkaian *summing amplifier* sebagai pengkondisi sinyal analog sehingga diperoleh nilai sensitivitas sebesar $50 \text{ mV}/(^{\circ}/\text{s})$ dengan tegangan *steady state* (giroskop diam) sebagai referensi sebesar 2.5 Volt. Dengan demikian jika digunakan ADC 10-bit dan tegangan referensi 5 Volt maka akan diperoleh resolusi pengukuran sebesar $0.1 (^{\circ}/\text{s})/\text{bit}$ dan rentang pengukuran sekitar $\pm 50 ^{\circ}/\text{s}$.

Akuisisi data dan pengujian sensor girooskop MG100 digunakan sebuah modul AVR M100 berbasis mikrokontroler AVR 8-bit AT Mega16 buatan sendiri. Tampilan fisik dari modul tersebut diberikan pada gambar 3.9.



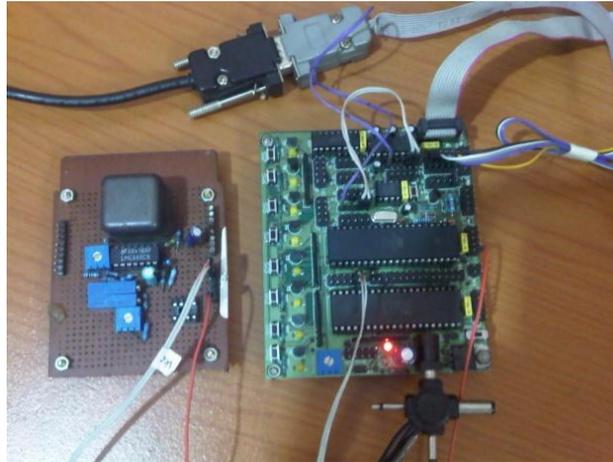
Gambar 3.9. Modul AVR M100 buatan sendiri

Keluaran sinyal analog dikonversi ke bentuk digital menggunakan ADC internal yang ada pada AT Mega16. AT Mega16 memiliki delapan kanal ADC 10-bit yang dapat digunakan pada beberapa pilihan level tegangan referensi. Pada desain ini, digunakan level tegangan referensi yang sama dengan tegangan catu daya $V_{cc}=5 \text{ Volt DC}$.

Pemilihan mikrokontroler ini, selain karena ketersediaan ADC pertimbangan lainnya adalah ketersediaan *interface* komunikasi serial UART yang digunakan untuk mengirim data ke komputer PC. Pada pengujian ini digunakan kecepatan transfer data pada 115.2 kbps.

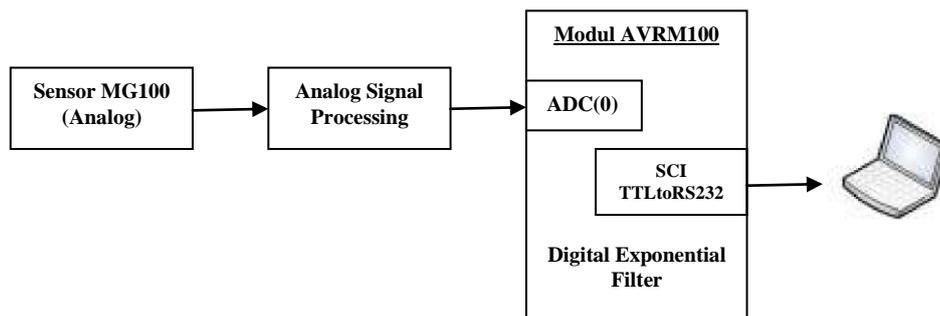
Posisi sensor juga termasuk dalam hal yang harus dipertimbangkan. Dalam hal ini sensor girooskop diletakkan di atas permukaan datar dengan sumbu putar

yang diukur adalah pada sumbu Z atau pada rotasi Yaw seperti tampak pada gambar 3.10.

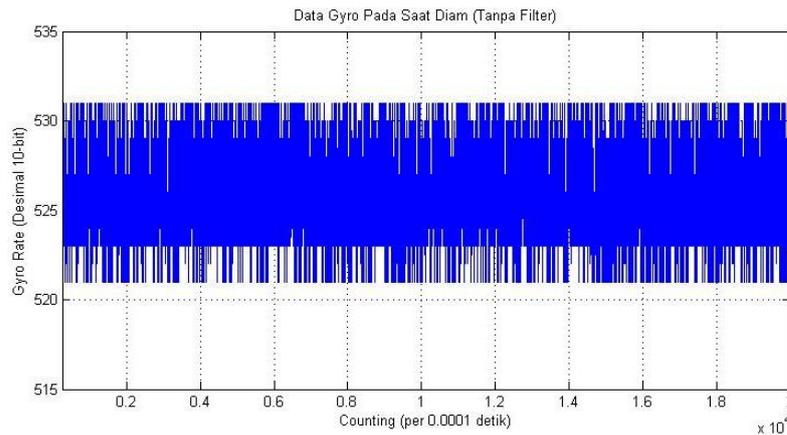


Gambar 3.10. Tampilan fisik akuisisi data sensor giroskop

Data mentah dari sensor yang diakuisisi oleh AVR M100 ini kemudian dikirimkan ke komputer melalui jalur komunikasi serial. Komputer disini berperan sebagai *logger* dan penampil data-data ke dalam bentuk grafik menggunakan MATLAB, sehingga lebih representatif dan memudahkan analisis. Sistem akuisisi ini diilustrasikan pada gambar 3.11.

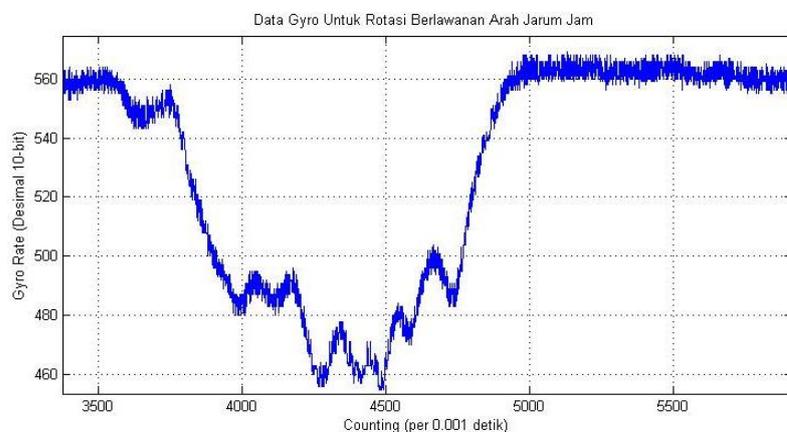


Gambar 3.11. Ilustrasi sistem akuisisi data giroskop menggunakan AVR M100

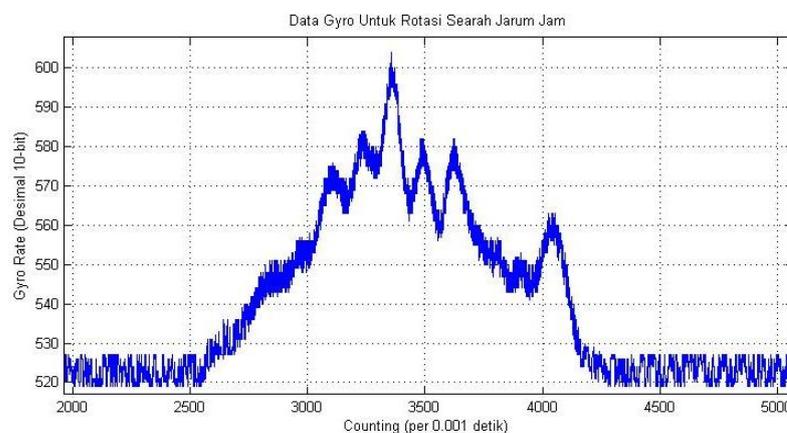


Gambar 3.12. Data mentah MG100 pada saat diam (tanpa filter)

Dari akuisisi data ini diperoleh data mentah sensor giroskop, seperti ditampilkan pada gambar 3.12. Dari gambar tersebut diperoleh bahwa *noise* acak memiliki besar amplitudo *peak to peak* sebesar ± 6 desimal.



Gambar 3.13. Sinyal keluaran dari akuisisi data Giroskop MG100 untuk rotasi berlawanan arah jarum jam



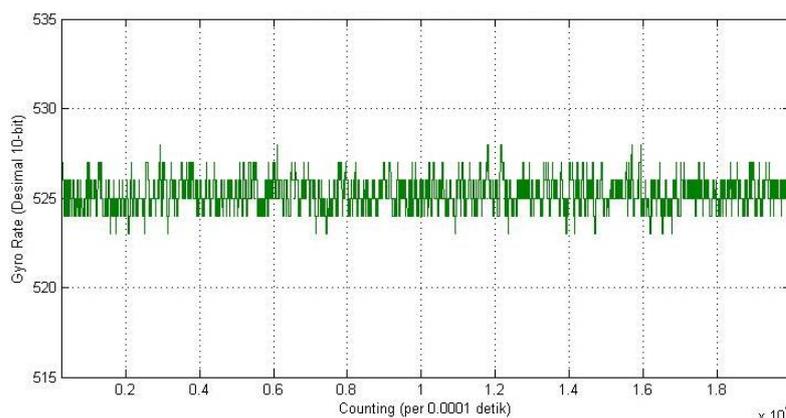
Gambar 3.14. Sinyal keluaran dari akuisisi data Giroskop MG100 untuk rotasi searah jarum jam

Selain itu pada gambar 3.13 dan 3.14 diberikan hasil pengukuran data untuk gerak rotasi berlawanan arah jarum jam dan searah jarum jam. Tampak bahwa sinyal mentah dari giroskop didominasi oleh *noise*, sehingga ini akan mempengaruhi pengendalian.

3.2.2. Penerapan Double Exponential Filtering Pada Sensor MG100

Pengolahan data menggunakan *double exponential smoothing* dilakukan pada mikrokontroler pada modul AVR M100, oleh karena algoritmanya sederhana sehingga dapat diproses dengan cepat menggunakan mikrokontroler 8-bit, dengan hasil filtering yang baik. Kemudian data tersebut dikirimkan ke komputer melalui jalur komunikasi serial bersama dengan data mentah.

Akuisisi dilakukan setiap $100 \mu\text{s}$, sehingga frekuensi pencuplikan yang digunakan adalah 10 kHz, sedangkan nilai parameter yang digunakan adalah $a = 0.1$. Nilai ini diambil dengan pertimbangan *noise* yang ada tidak terlalu dominan jika dibandingkan dengan sinyal yang diukur, yakni hanya sekitar 1% dari rentang pengukuran total. *Frequency cut-off* yang digunakan adalah 5 Hz berdasarkan pertimbangan kebutuhan dinamika satelit di orbit.

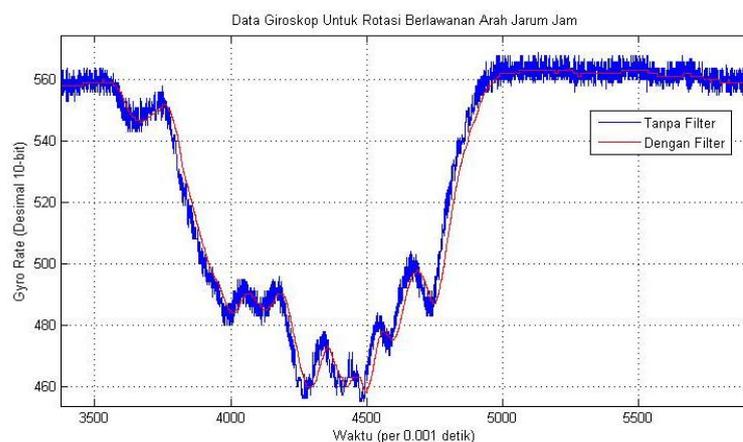


Gambar 3.15. Data MG100 difilter dengan *double exponential* pada saat diam

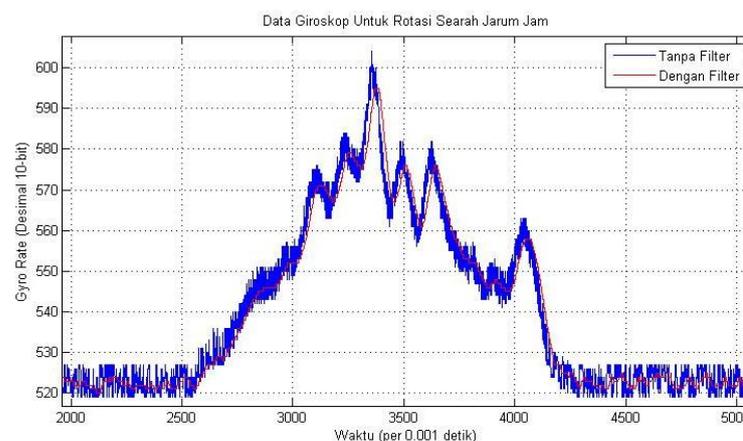
Pada gambar 3.15 dapat dilihat bahwa amplitudo *noise* turun menjadi kira-kira ± 3 desimal maksimum. Selain itu variasi frekuensi *noise* pun berkurang, dapat dilihat dengan semakin renggangnya variasi *noise* yang muncul jika dibandingkan dengan data mentahnya dari gambar 3.12.

Pada gambar 3.16 dan 3.17 diberikan hasil pengukuran data untuk gerak rotasi berlawanan arah jarum jam dan searah jarum jam. Grafik berwarna merah

yang merupakan data hasil *filtering*. Tampak bahwa grafik tersebut mampu mengikuti variasi perubahan dinamis dari tiap perubahan gerak rotasi sensor dengan data mentah (grafik berwarna biru), namun dengan sinyal yang lebih bersih.



Gambar 3.16. Data mentah (biru) dan dengan filter (merah) dari Giroskop MG100 untuk rotasi berlawanan arah jarum jam

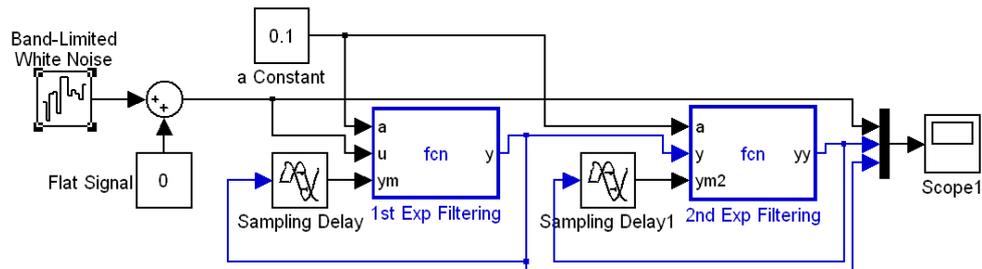


Gambar 3.17. Data mentah (biru) dan terfilter (merah) dari Giroskop MG100 untuk rotasi searah jarum jam.

3.2.3. Pemodelan Giroskop Dan Algoritma Digital Exponensial Filtering

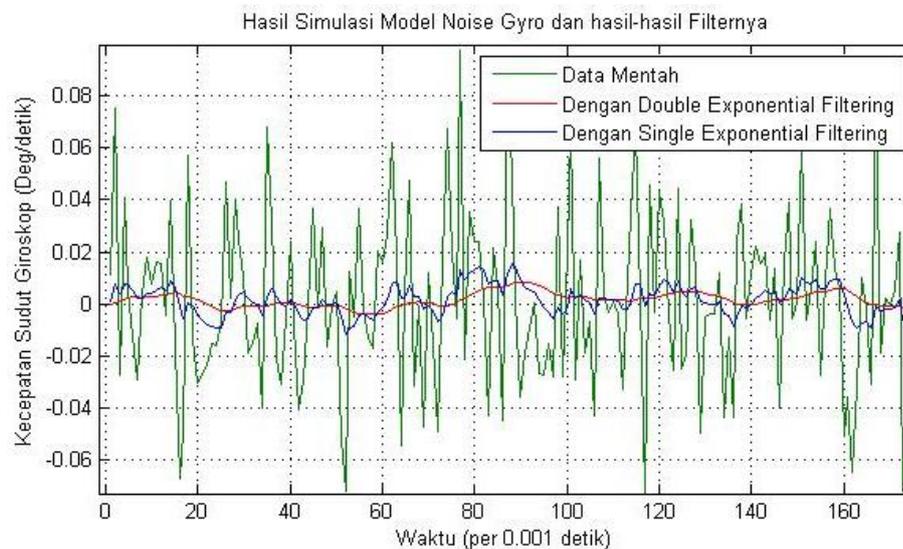
Sensor giroskop MG100 mengandung *noise* seperti yang diberikan dari hasil pengukuran pada gambar 3.12 sampai dengan 3.14. Dengan menggunakan pembangkit sinyal *white noise* yang ada pada SIMULINK-MATLAB dapat diperoleh sinyal *noise* dengan karakteristik yang sesuai seperti dijelaskan pada sub-Bab 3.2.1. Gambar 3.18 merupakan rancangan model untuk sensor MG100

yang dilengkapi dengan algoritma *single* dan *double exponential filtering* seperti diberikan pada persamaan (2.23).



Gambar 3.18. Model *noise* sensor giroskop MG100 dengan algoritma filter eksponensial

Keluaran dari sinyal *white noise* (hijau) yang dibangkitkan diberikan pada gambar 3.19. Selain itu pada gambar tersebut diberikan pula hasil keluaran dari *single* (biru) dan *double* (merah) *exponential filtering*.



Gambar 3.19. Keluaran model *white noise* sensor giroskop MG100 (hijau) dan hasil keluaran dari *single* (biru) dan *double* (merah) *exponential filtering*.

3.3. Pemodelan Sistem Meja Rotasi

Meja rotasi yang digunakan diberikan pada gambar 3.20, tersusun atas sebuah lempengan aluminium berdiameter 28 cm dan tebal 0.4 cm. Lempengan ini terhubung dengan alas berbentuk silinder melalui sumbu dari sebuah enkoder optik tipe E40S6-3600-3-1-24 seperti ditampilkan pada gambar 3.21. Enkoder ini memiliki resolusi 3600 pulsa per rotasi, sehingga enkoder ini mampu memberikan informasi perubahan sudut dengan akurasi 0.1 derajat.



Gambar 3.20. Meja rotasi sebagai platform uji pengendalian sikap satu sumbu

Enkoder optik tersebut memiliki spesifikasi mekanik seperti diberikan pada tabel 3.1. Hal yang perlu diperhatikan dari karakteristik enkoder tersebut adalah keberadaan torsi gesekan, yang akan sangat mempengaruhi pengendalian sistem meja rotasi. Selain itu, kapasitas maksimum pada arah sumbu aksial sangat perlu untuk diperhatikan untuk menghindari kerusakan pada enkoder akibat beban yang berlebih.

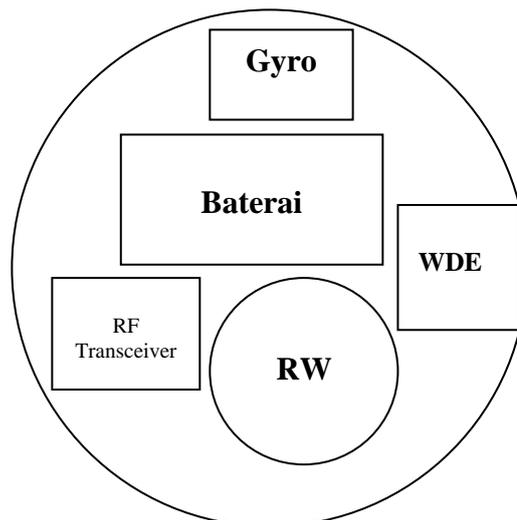


Gambar 3.21. Enkoder optik tipe E40S6-3600-3-1-24

Tabel 3.1. Spesifikasi mekanik enkoder optik tipe E40S

Torsi gesek statik	0.004 Nm (Max 0.02 Nm)
Momen Inersia	$4 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$
Kapasitas sumbu	Radial: 5 kg; aksial: 2.5 kg

Skema penempatan modul-modul mekanik dan elektronik pada meja rotasi diberikan pada gambar 3.22. Skema tersebut diimplementasikan secara nyata seperti diberikan pada gambar 3.23. Gambar tersebut merupakan sistem meja rotasi yang akan digunakan pada perancangan kendali kecepatan sudut dan posisi sudut satu sumbu.



Gambar 3.22. Skema penempatan modul-modul mekanik dan elektronik pada meja rotasi



Gambar 3.23. Implementasi sistem meja rotasi

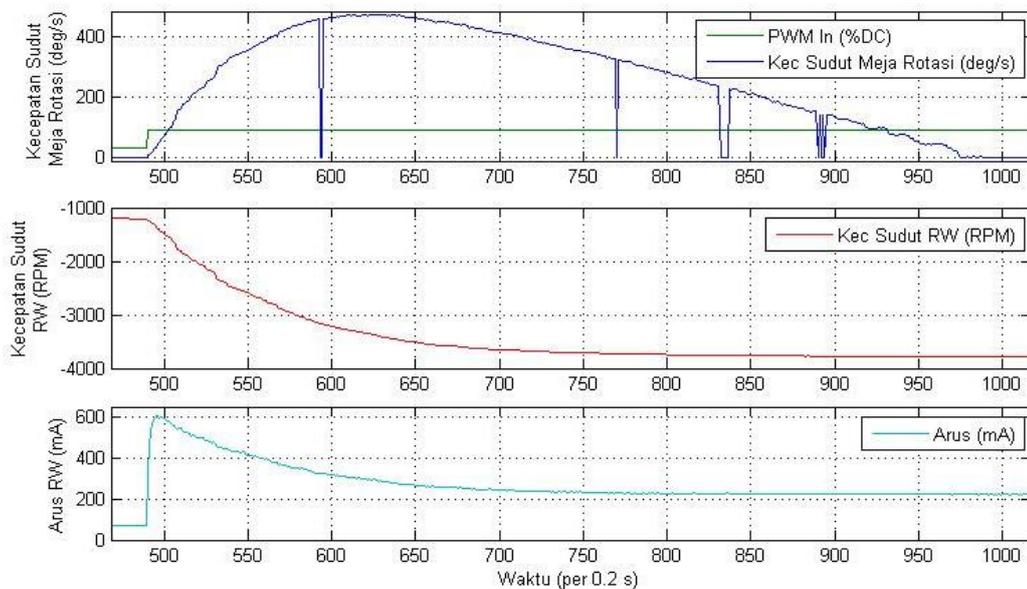
3.3.1. Arah Rotasi Sistem

Dari gambar 3.20 dan 3.23 dapat dilihat, ketika sistem meja rotasi diputar searah jarum jam maka pengukuran kecepatan sudut dari sensor giroskop akan bernilai negatif, sebaliknya akan bernilai positif untuk putaran berlawanan arah jarum jam. Hal ini juga berlaku untuk rotasi pada aktuator RW. Hal ini penting untuk diketahui untuk dapat memahami hasil keluaran dari pengukuran kecepatan sudut aktuator RW maupun sensor giroskop.

3.3.2. Pengujian Lingkar Terbuka Sistem Meja Rotasi

Untuk mengetahui karakteristik dari sistem meja rotasi, seperti inersia sistem, dilakukan pengukuran terhadap respon sistem terhadap masukan fungsi step yang

diberikan pada aktuator RW. Adapun hasil keluaran kecepatan sudut lingkaran terbuka dari sistem meja rotasi terhadap masukan fungsi step PWM diberikan pada gambar 3.24. Pada gambar tersebut tampak masukan fungsi step PWM (hijau) diberikan dari nilai awal 30% ke 90% pada detik ke 97,8. Seketika sistem meja rotasi mengalami percepatan sudut dengan nilai variasi kecepatan sudut terhadap waktu diberikan dalam grafik warna biru. Pada grafik tersebut tampak bahwa sistem mengalami percepatan hingga detik ke 124 dengan kecepatan sudut maksimum sebesar 472 derajat/detik. Setelah detik ke 124, sistem mengalami perlambatan hingga akhirnya dalam kondisi diam pada detik ke 198. Hal ini menandakan bahwa sistem meja rotasi memiliki torsi hambatan (gesekan) yang cukup besar, sehingga sistem dapat dikatakan dalam keadaan teredam.



Gambar 3.24. Respon sistem meja rotasi terhadap masukan unit-step PWM yang diberikan pada aktuator RW

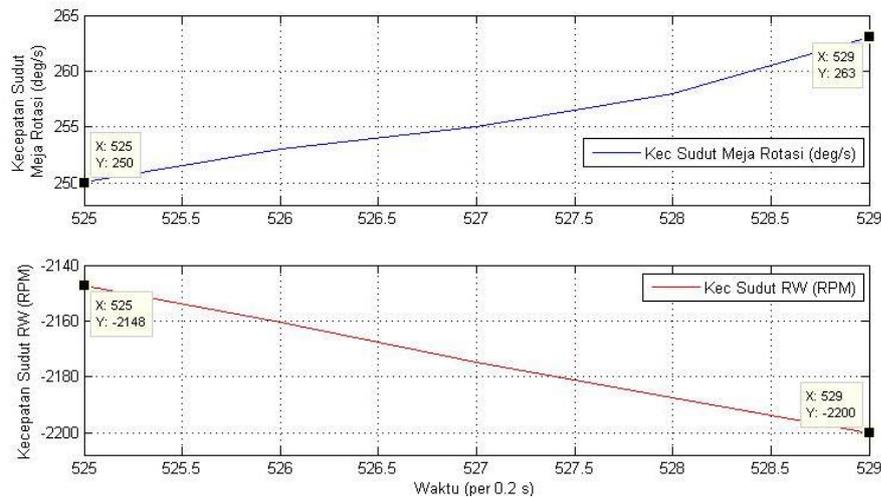
Dari hasil tersebut diperoleh bahwa torsi gesekan sistem selayaknya diperhitungkan dalam perancangan pengendalian sistem, untuk memperoleh hasil pengendalian yang akurat.

Inersia dari sistem meja rotasi ini ditentukan melalui pengukuran. Dari persamaan (2.3), diperoleh persamaan sebagai berikut

$$I_{RW} \alpha_{RW} = I_{MR} \alpha_{MR} + T_{fric} \quad (3.4)$$

dengan T_{fric} di abaikan. Sehingga diperoleh

$$I_{RW} \frac{d\omega_{RW}}{dt} = I_{MR} \frac{d\omega_{MR}}{dt} \quad (3.5)$$



Gambar 3.25. Grafik data kecepatan sudut sistem meja rotasi dan kecepatan sudut RW dari gambar 3.24

Dari hasil keluaran variasi kecepatan sudut sistem meja rotasi gambar 3.24, diperoleh grafik untuk selang yang diperkecil seperti diberikan pada gambar 3.25. Dari gambar tersebut diperoleh nilai-nilai kecepatan sudut sistem meja rotasi maupun aktuator RW pada detik ke $t_1 = 105$ s dan $t_2 = 105.8$ s, sebagai berikut:

Aktuator RW:

Kecepatan sudut pada saat t_1 : $\omega_{RW}(t_1) = -2148 \text{ RPM} = -224.938 \text{ rad/s}$

Kecepatan sudut pada saat t_2 : $\omega_{RW}(t_2) = -2200 \text{ RPM} = -230.383 \text{ rad/s}$

Sistem Meja Rotasi:

Kecepatan sudut pada saat t_1 : $\omega_{MR}(t_1) = 250 \text{ Deg/s} = 4.363 \text{ rad/s}$

Kecepatan sudut pada saat t_2 : $\omega_{MR}(t_2) = 263 \text{ Deg/s} = 4.590 \text{ rad/s}$

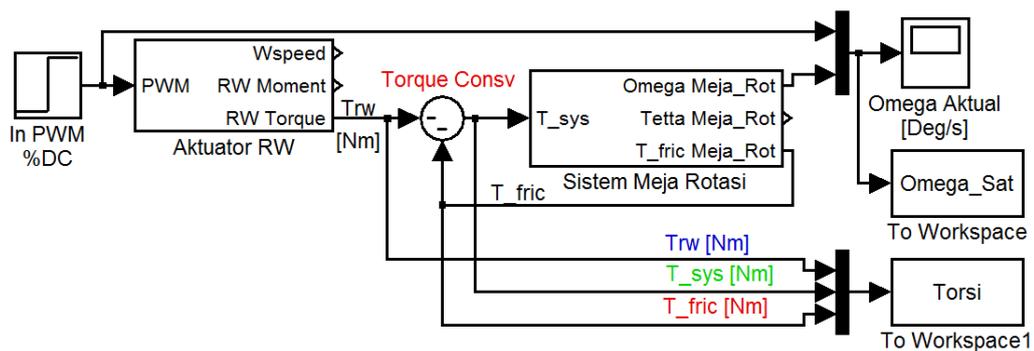
Dari persamaan (3.5) dan tabel 2.5 untuk inersia RW (I_{RW}) diperoleh inersia sistem meja rotasi sebagai berikut

$$I_{MR} = \frac{I_{RW} \times \Delta\omega_{RW}}{\Delta\omega_{MR}} = \frac{912.6 \times 10^{-6} \times (230.383 - 224.938)}{4.590 - 4.363} = 0,02187 \text{ kg.m}^2 \quad (3.6)$$

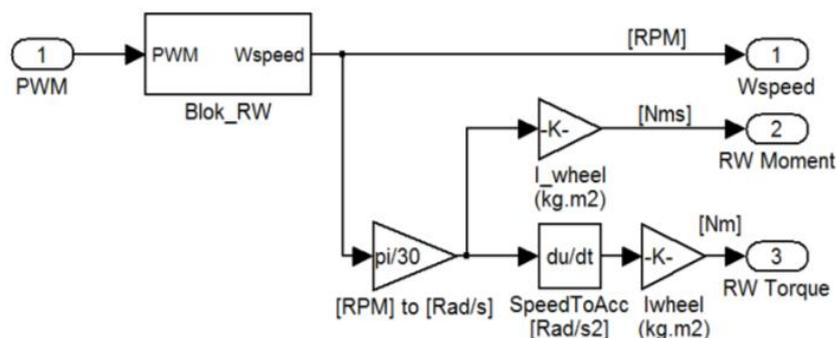
Nilai inersia ini selanjutnya akan digunakan dalam perancangan model sistem meja rotasi.

Skema lingkaran terbuka pada SIMULINK-MATLAB dari sistem meja rotasi ini diberikan pada gambar 3.26. Blok “Aktuator RW” mewakili model dari aktuator RW yang diperoleh dari sub-Bab 3.1. Sedangkan blok “Sistem Meja Rotasi” mewakili inersia dan torsi gesekan sistem. Kedua blok tersebut dihubungkan dengan sebuah elemen penjumlahan (*summing*) “Torque Consv” yang merepresentasikan prinsip konservasi momentum sudut dari persamaan (2.3) dimana keberadaan torsi gesekan sistem ikut dipertimbangkan. Tanda negatif pada masukan torsi RW (T_{rw}) terhadap torsi sistem (T_{sys}), menandakan bahwa untuk setiap aksi positif pada T_{rw} akan menghasilkan reaksi negatif pada T_{sys} (arah reaksi berlawanan dengan arah aksi). Sedangkan tanda negatif dari masukan torsi gesekan (T_{fric}) terhadap T_{sys} , menandakan bahwa T_{fric} akan selalu melawan T_{sys} , sebagai hasilnya T_{fric} akan selalu meredam gerak rotasi dari sistem.

Konstruksi internal dari model aktuator RW tersebut diberikan pada gambar 3.27, dimana Blok_RW adalah model dari RW yang diperoleh dari gambar 3.3 dan 3.6. Dari gambar tersebut tampak bahwa keluaran torsi RW (T_{rw}) berasal dari hasil perkalian antara percepatan sudut RW (dalam rad/s^2) dengan inersia *flywheel* (dalam kg.m^2) yang memenuhi persamaan (3.7).



Gambar 3.26. Skema lingkaran terbuka sistem meja rotasi



Gambar 3.27. Kontruksi internal aktuator RW

$$Trw = I_{RW} \times \alpha_{RW} = I_R \frac{d\omega_{RW}}{dt} \quad (3.7)$$

dengan:

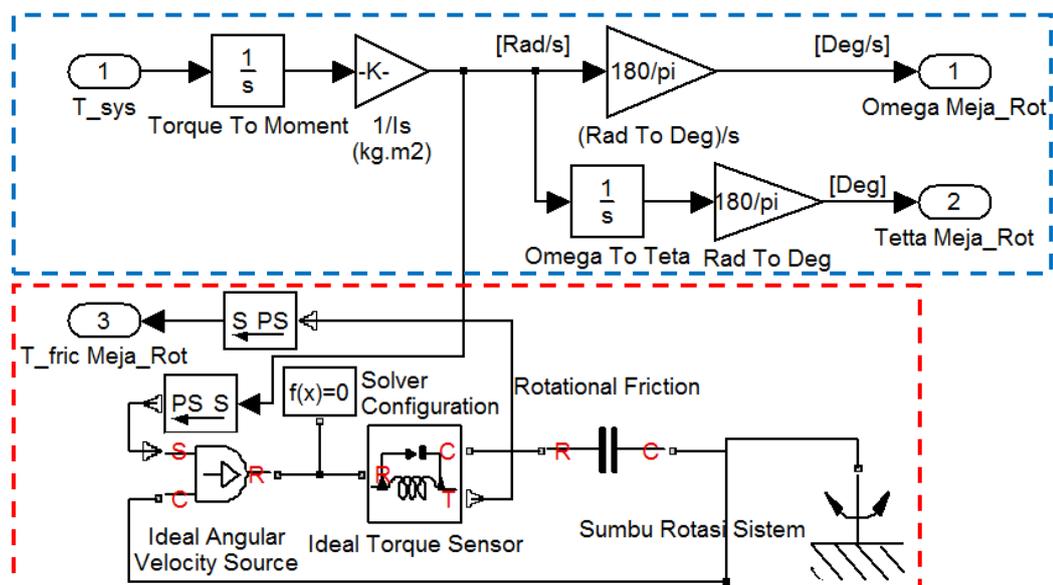
I_{RW} = inersia *flywheel* (I_R dari tabel 2.5) dalam kg.m^2

α_{RW} = percepatan sudut *reaction wheel* dalam rad/s^2

ω_{RW} = kecepatan sudut *reaction wheel* dalam rad/s

Konstruksi internal dari blok sistem meja rotasi diberikan pada gambar 3.28. Pada gambar tersebut, bagian dengan kotak berwarna biru merupakan sistem ideal dari meja rotasi, dimana hanya terdapat inersia dari sistem dan tidak menyertakan gesekan dari sistem. Sedangkan pada bagian kotak merah merepresentasikan gesekan rotasi pada sistem.

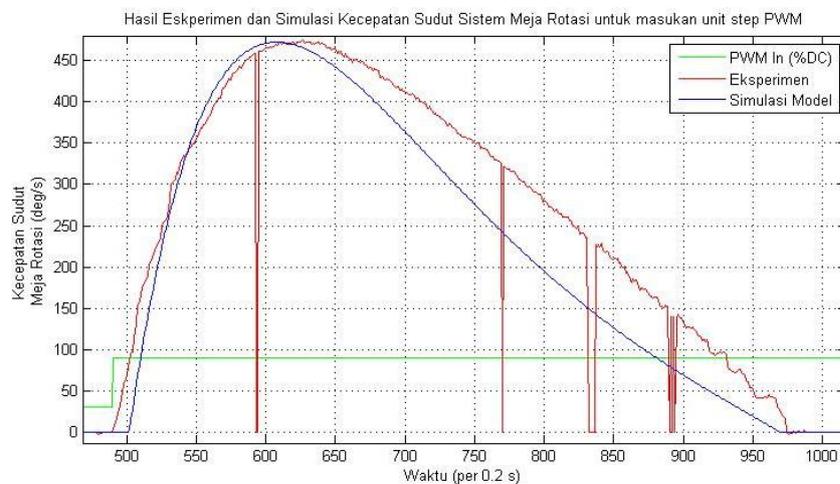
Seperti dijelaskan sebelumnya T_{sys} torsi reaksi dari sistem yang merupakan hasil penjumlahan antara torsi aksi aktuator RW (Trw) dan T_{fric} . I_s merupakan inersia sistem meja rotasi yang diperoleh dari persamaan (3.6). Adapun T_{fric} merupakan torsi gesekan (*frictional torque*) yang muncul akibat gesekan pada permukaan kontak *ball-bearing* dari enkoder optik yang digunakan sebagai sumbu utama rotasi.



Gambar 3.28. Konstruksi internal sistem meja rotasi

Torsi gesekan (T_{fric}) tersebut dimodelkan menggunakan “blok friksi untuk gerak rotasi” (*rotational friction*) yang tersedia dalam *library* sistem “rotasi

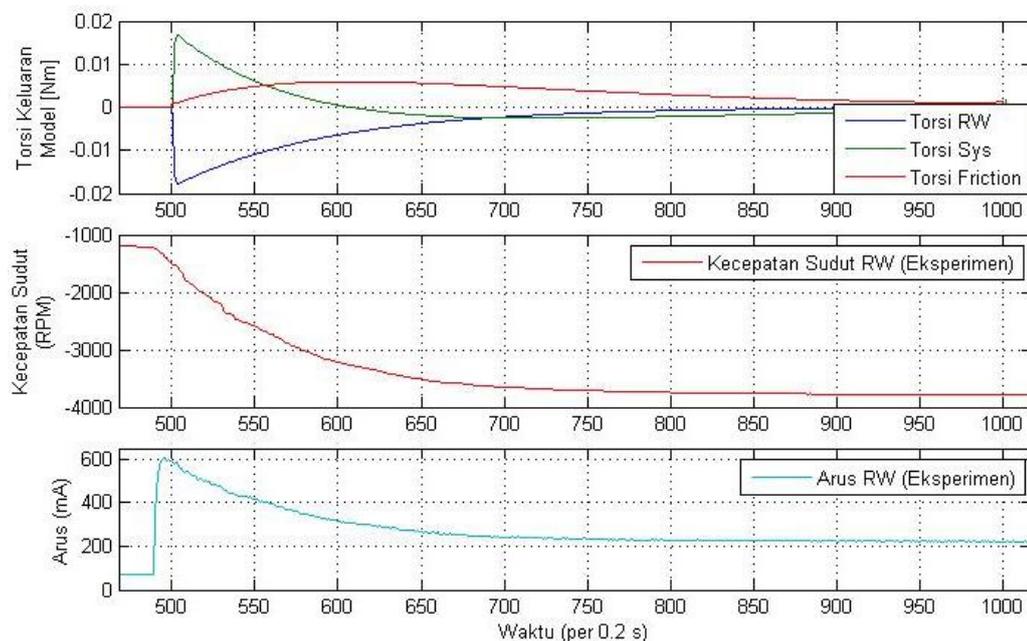
mekanik” di Simscape – MATLAB seperti telah dijelaskan paada sub-Bab 2.3. Blok friksi rotasi ini dapat mensimulasikan gesekan yang ditimbulkan oleh sistem yang berotasi pada suatu sumbu putar. Torsi gesekan disimulasikan sebagai fungsi kecepatan rotasi sistem, relatif terhadap sumbunya. Pada bagian tersebut keluaran kecepatan sudut meja rotasi (dalam rad/s) menjadi masukan bagi blok *rotational friction* untuk menghasilkan nilai torsi gesekan yang sesuai. Selanjutnya, torsi gesekan tersebut menjadi umpan balik negatif bagi masukan torsi sistem (T_{sys}). Kecepatan sudut yang muncul pada sistem meja rotasi merupakan hasil reaksi dari torsi aksi yang diberikan oleh aktuator RW dikurangi dengan torsi gesekannya. Nilai kecepatan sudut ini mengalami penurunan (redaman) akibat torsi gesekan yang ada pada sistem, sehingga sistem akan berhenti berotasi (kecepatan sudut nol) pada saat aktuator RW tidak lagi memberikan torsi aksi.



Gambar 3.29. Hasil keluaran kecepatan sudut, eksperimen (merah) dan hasil keluaran model (biru) untuk uji lingkaran terbuka sistem meja rotasi

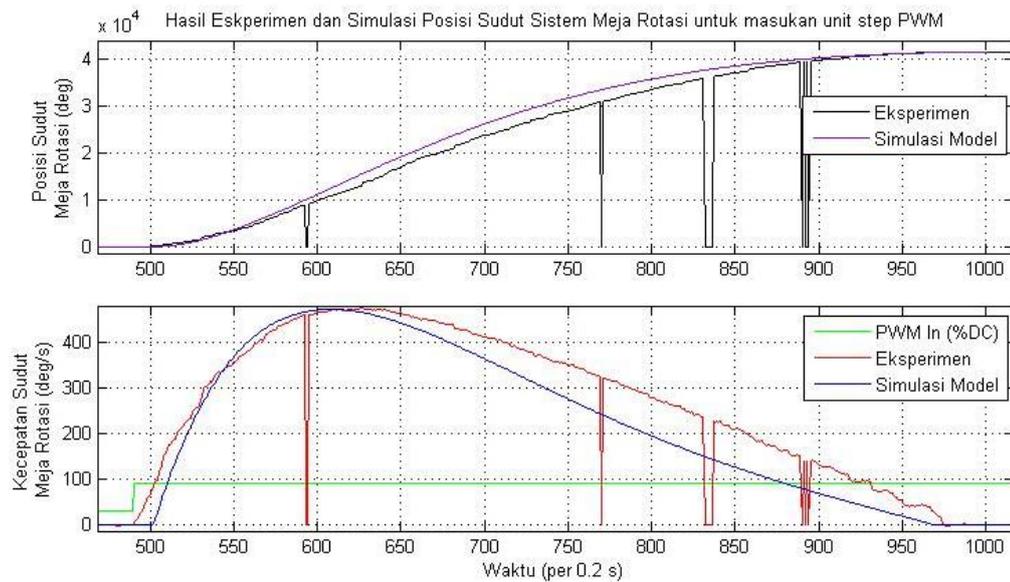
Pada gambar 3.29 diberikan grafik hasil keluaran kecepatan sudut hasil simulasi model sistem meja rotasi. Grafik ini diplotkan bersama dengan hasil eksperimen dari gambar 3.24 sebagai perbandingan diantara keduanya. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa hasil keluaran model (biru) dapat mengikuti hasil eksperimen (merah) lingkaran terbuka dari sistem meja rotasi untuk masukan unit step yang sama. Grafik keluaran ini dihasilkan dengan nilai-nilai parameter blok gesekan rotasi seperti pada gambar 2.13. Model ini selanjutnya akan digunakan dalam perancangan dan simulasi pengendalian kecepatan dan posisi sudut sistem meja rotasi.

Pada gambar 3.30 diberikan grafik hasil keluaran simulasi torsi RW, friksi dan sistem meja rotasi dari model. Selain itu diberikan juga kecepatan sudut dan arus RW untuk waktu yang bersesuaian. Dari hasil simulasi tampak bahwa torsi RW sebanding dengan arusnya dan juga sebanding dengan perubahan kecepatan sudutnya. Torsi RW (biru) akan memberikan torsi aksi pada sistem (hijau), sehingga sistem berotasi dengan arah yang berlawanan (gambar 3.29) dengan RW (gambar 3.30). Ketika sistem mulai berotasi pada sekitar detik ke 100, muncul torsi perlawanan berupa torsi gesekan (merah) dari sistem, yang sebanding dengan nilai kecepatan sudutnya, sehingga torsi sistem akan selalu lebih kecil dibandingkan dengan torsi aksi dari RW yang diberikan. Ketika torsi RW mulai menurun (perubahan kecepatan sudut RW mendekati nol), sistem tidak lagi menerima torsi aksi dari RW, sehingga torsi gesekan akan lebih dominan, hal ini menyebabkan sistem akan diperlambat dan berhenti berotasi pada detik ke 195.



Gambar 3.30. Grafik keluaran torsi-torsi model dan hasil eksperimen untuk kecepatan sudut dan arus RW

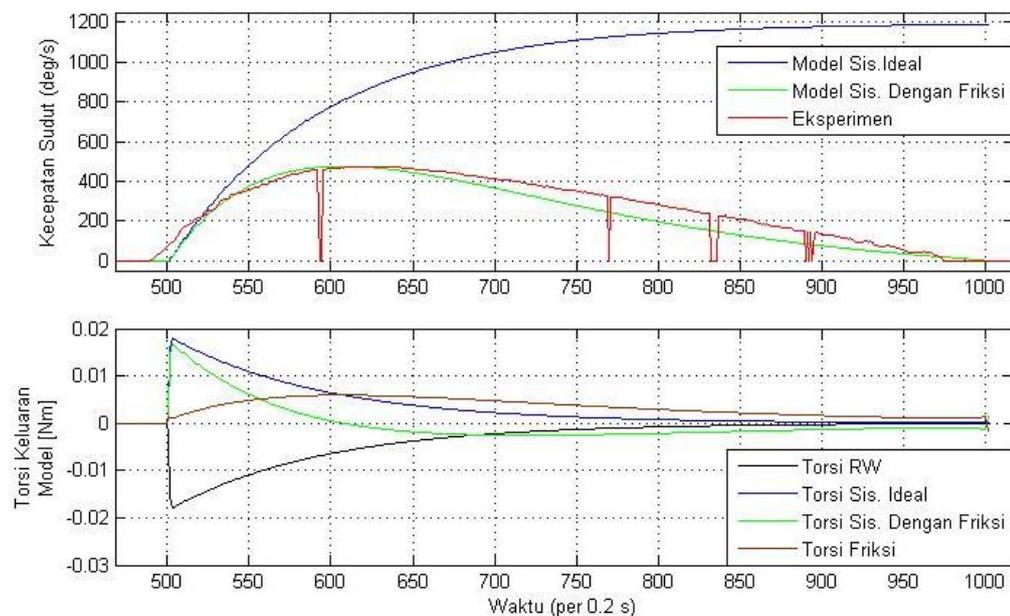
Selain keluaran kecepatan sudut sistem, dilakukan juga simulasi terhadap respon lingkaran terbuka dari perubahan posisi sudut sistem meja rotasi terhadap masukan unit-step PWM seperti diberikan pada gambar 3.31. Pada gambar tersebut tampak bahwa hasil keluaran model mampu mengikuti hasil keluaran eksperimen. Model ini selanjutnya akan digunakan dalam perancangan kendali PID untuk pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi.



Gambar 3.31. Hasil keluaran posisi sudut, eksperimen (hitam) dan hasil keluaran model (jingga) untuk uji lingkaran terbuka sistem meja rotasi

3.4. Simulasi Sistem Meja Rotasi Ideal

Sebagai perbandingan, dilakukan pula simulasi terhadap sistem ideal dari inersia meja rotasi, dengan asumsi gesekan sistem nol. Skema model dari sistem ini diberikan pada gambar 3.28 dengan bagian yang berkotak biru. Sebagai hasil perbandingan grafik keluarannya diberikan pada gambar 3.32.



Gambar 3.32. Grafik keluaran kecepatan sudut dari model sistem ideal, sistem dengan gesekan dan hasil eksperimen serta torsi-torsi keluaran model

Pada gambar tersebut tampak keluaran kecepatan sudut untuk sistem ideal tanpa friksi untuk inersia meja rotasi (biru) mampu mencapai kecepatan sudut sekitar 1200 deg/s. Pada saat RW tidak lagi memberikan torsi aksi pada sistem, kecepatan sudut sistem akan konstan pada nilai maksimumnya tanpa redaman. Grafik torsi keluaran sistem ideal pun tepat sama dengan torsi aksi dari RW, hanya saja dengan arah yang berlawanan (prinsip konservasi momentum sudut). Berbeda dengan sistem ideal, pada model sistem nyata dengan torsi gesekan, memiliki sifat teredam seperti telah dijelaskan sebelumnya.

BAB IV

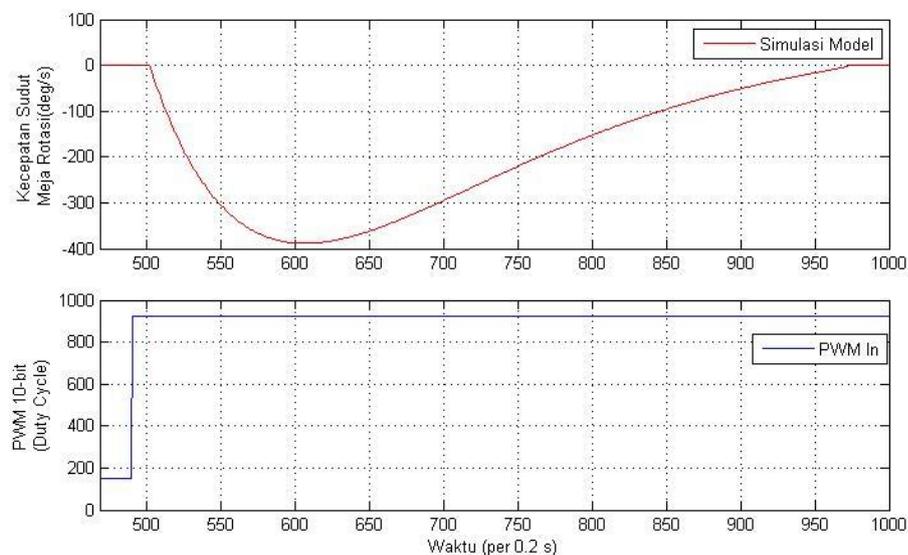
PERANCANGAN DAN SIMULASI PENGENDALIAN

Terdapat beberapa mode kendali yang dirancang untuk pengendalian sikap inersial satu sumbu menggunakan sistem meja rotasi, antara lain pengendalian kecepatan sudut dan posisi sudut. Sistem kendali yang digunakan adalah PID yang telah banyak digunakan dan teruji. Metode penalaan yang digunakan untuk memperoleh parameter-parameter kendali, bergantung pada karakteristik keluaran lingkaran terbuka dari model sistem. Pada pengendalian kecepatan sudut, digunakan metode penalaan Ziegler-Nichols, sedangkan pada pengendalian posisi sudut, digunakan metode penalaan grafik Ciancone. Penalaan secara halus (*fine tuning*) juga digunakan untuk memperbaiki tanggapan waktu dan stabilitas dari sistem.

4.1. Perancangan

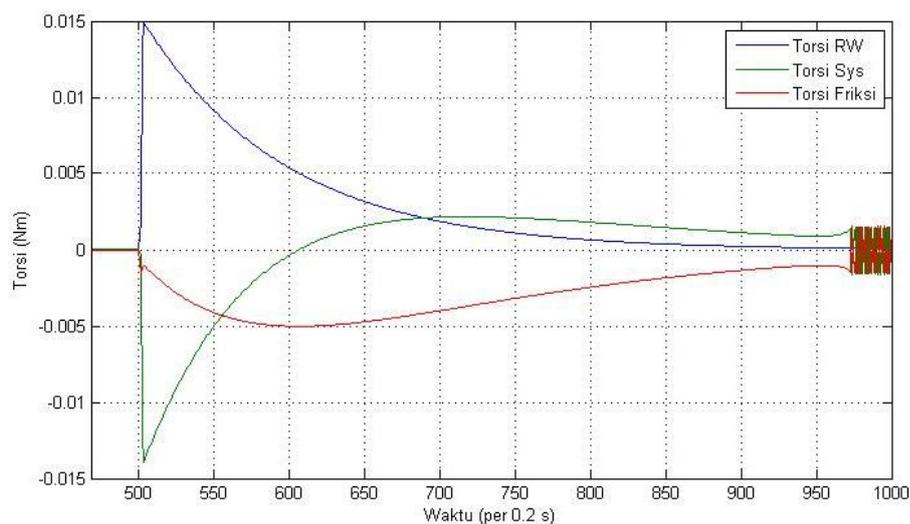
4.1.1. Kendali Kecepatan Sudut Sistem Meja Rotasi Satu Sumbu

Salah satu komponen pengendalian sikap sistem meja rotasi yang akan dirancang adalah kendali kecepatan sudut. Dalam hal ini desain mekanik dan penempatan modul-modul pendukung pada meja rotasi menjadi penting untuk diperhatikan, terutama properti inersia sistem sebagai *plant* yang akan dikendalikan.



Gambar 4.1. Fungsi step yang diberikan pada masukan PWM dan hasil keluaran simulasi kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu

Desain model lingkaran terbuka gambar 3.26 untuk keluaran kecepatan sudut sistem, menggambarkan interaksi antara aktuator RW dengan sistem meja rotasi satu sumbu. Model ini memiliki masukan sinyal PWM untuk RW dengan keluaran kecepatan sudut meja rotasi. Pada desain model tersebut, masukan diberi fungsi step dengan mengubah set poin sinyal PWM dari 15% (setara dengan desimal 153) menjadi 90% (setara dengan desimal 921) pada detik ke 97.8, seperti tampak pada gambar 4.1 (grafik berwarna biru). Adapun hasil keluaran simulasi berupa kecepatan sudut sistem meja rotasi (grafik berwarna merah).

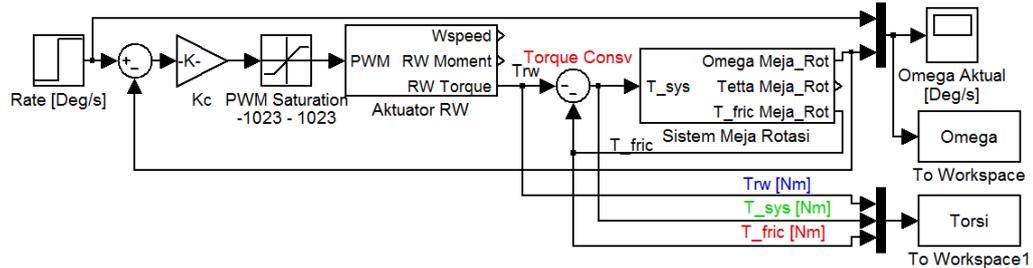


Gambar 4.2. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem dan friksi meja rotasi

Hasil keluaran torsi-torsi yang bekerja pada sistem meja rotasi untuk simulasi lingkaran terbuka dari model gambar 3.26 diberikan pada gambar 4.2. Pada gambar tersebut dapat dilihat, ketika aktuator RW diberikan masukan fungsi step positif pada masukan PWMnya, dihasilkan torsi positif pada aktuator RW. Torsi aksi positif ini membuat meja rotasi bereaksi dengan menghasilkan torsi negatif yang lebih kecil, oleh karena keberadaan torsi gesekan pada sistem. Selain itu, keberadaan torsi friksi pada sistem membuat kecepatan sudut sistem teredam dan bernilai nol saat torsi RW mendekati nol.

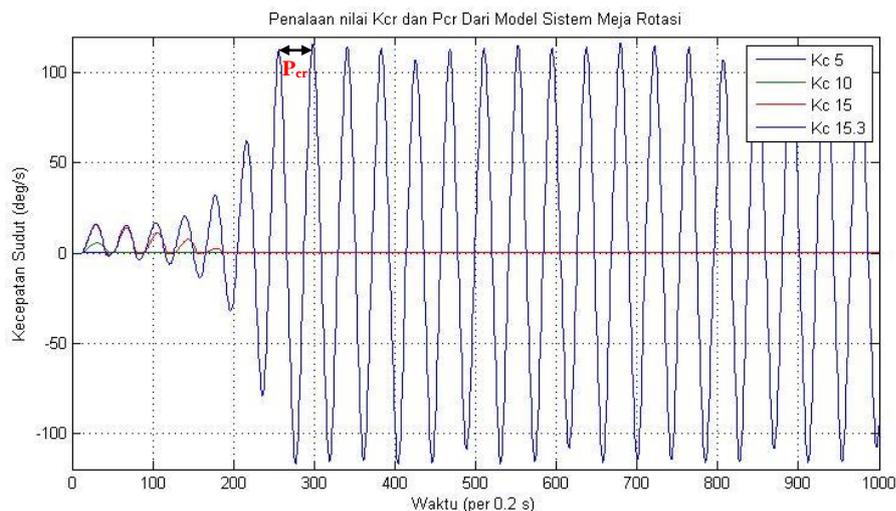
Perancangan kendali dan penalaan parameter PID untuk simulasi pengendalian kecepatan sudut meja rotasi ini ditentukan menggunakan metode Ziegler-Nichols dengan tahapan yang dijelaskan pada sub-bab 2.7.2. Pada Gambar

4.3 diberikan skema model untuk penentuan nilai penguatan kritis (K_{cr}) dan periode kritis (P_{cr}) dari sistem.



Gambar 4.3. Skema model untuk penentuan K_{cr} dan P_{cr}

Pada gambar 4.4 diberikan hasil keluaran kecepatan sudut model sistem meja rotasi satu sumbu untuk beberapa nilai penguatan K_c . Pada gambar tersebut tampak nilai K_c ditingkatkan secara bertahap hingga keluaran sistem berosilasi. Sistem mulai berosilasi secara konstan pada nilai $K_c = 15.3$. Nilai ini diambil sebagai nilai penguatan kritis K_{cr} yang selanjutnya akan digunakan untuk menentukan nilai konstanta proporsional.

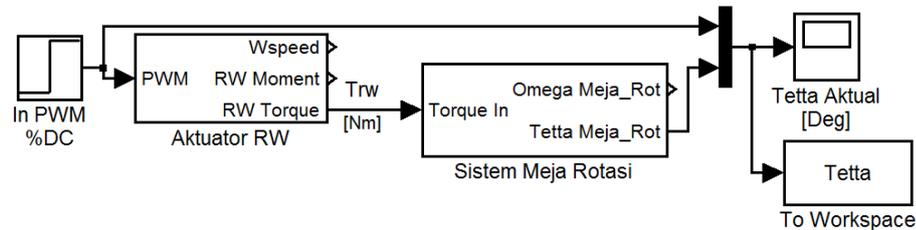


Gambar 4.4. Grafik keluaran kecepatan sudut dari model meja rotasi satu sumbu untuk penentuan nilai penguatan K_{cr}

Nilai periode kritis P_{cr} ditentukan dari perioda osilasi dari keluaran grafik gambar 4.4. Dari hasil pengukuran grafik tersebut diperoleh nilai $P_{cr} = 8.4$. Dari tabel 2.6 diperoleh nilai-nilai parameter kendali PID adalah $K_c = 9.18$, $T_i = 4.2$ dan $T_d = 1.05$. Parameter-parameter kendali tersebut selanjutnya akan digunakan pada perancangan pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu.

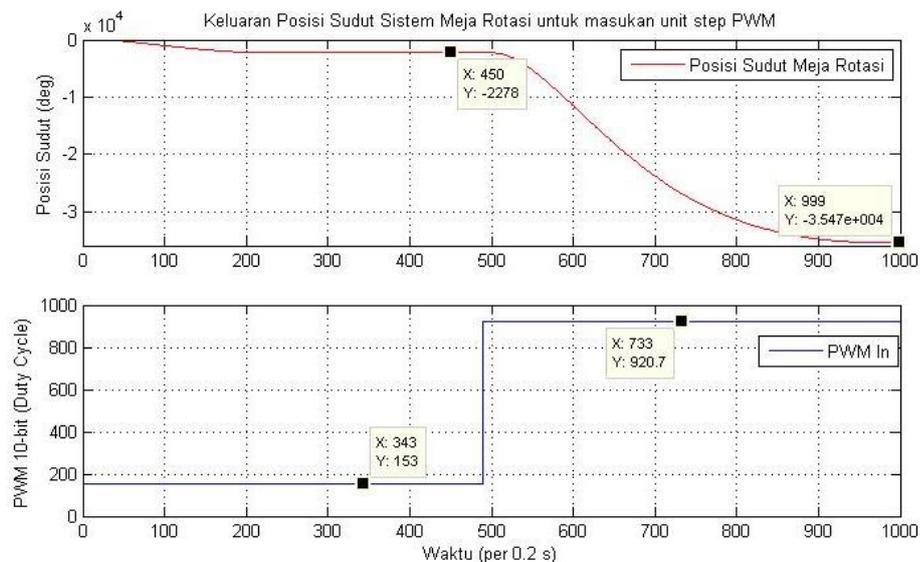
4.1.2. Kendali Posisi Sudut Sistem Meja Rotasi

Seperti halnya model kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu yang dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, simulasi lingkaran terbuka untuk mode posisi sudut pun menggunakan desain simulasi yang diberikan pada gambar 3.26. Hanya saja keluaran yang digunakan pada blok sistem meja rotasi berbeda, yaitu menggunakan keluaran *Tetta Meja_Rot* seperti tampak pada gambar 4.5.



Gambar 4.5. Simulasi model lingkaran terbuka untuk posisi sudut sistem meja rotasi.

Masukan PWM dari desain model tersebut diberikan fungsi step dengan mengubah set poin dari 15% (setara dengan desimal 153) menjadi 90% (setara dengan desimal 921) pada detik ke 97.8, seperti tampak pada gambar 4.6 dengan grafik berwarna biru. Adapun hasil keluaran simulasi posisi sudut sistem meja rotasi diberikan dengan grafik berwarna merah.

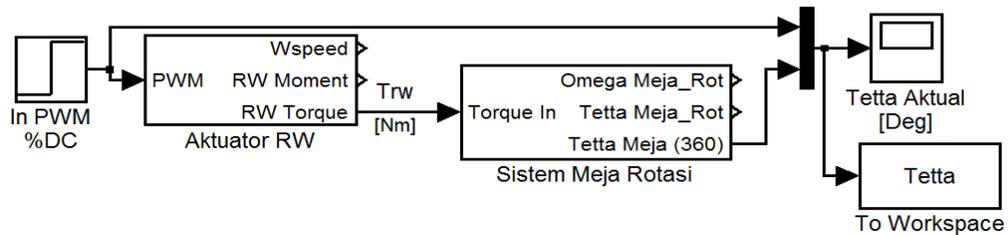


Gambar 4.6. Fungsi step yang diberikan pada masukan PWM dan hasil keluaran simulasi posisi sudut dari model sistem meja rotasi satu sumbu

Pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa respon keluarannya adalah negatif, namun tetap dapat diestimasi menggunakan fungsi orde satu dengan waktu tunda.

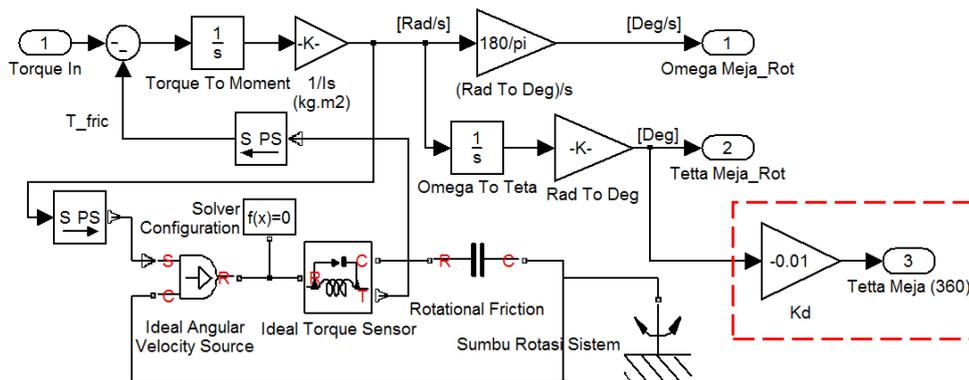
Untuk memudahkan perancangan, respon keluaran sistem yang akan dikendalikan dipositifkan terlebih dahulu. Selain itu dilakukan kuantisasi terhadap selang pengukuran posisi sudut menjadi selang nilai 0–360 derajat untuk merepresentasikan posisi sudut antara ± 360 derajat. Hal ini dapat dilakukan dengan menambahkan sebuah penguat negatif dengan nilai yang sesuai sebagai berikut:

$$K_d = \frac{\text{rentang akhir}}{\text{rentang awal}} = \frac{360-0}{-35470-(-2278)} = \frac{360}{-33192} = -0.01 \quad (4.1)$$



Gambar 4.7. Model sistem meja rotasi untuk selang posisi sudut ± 360 derajat

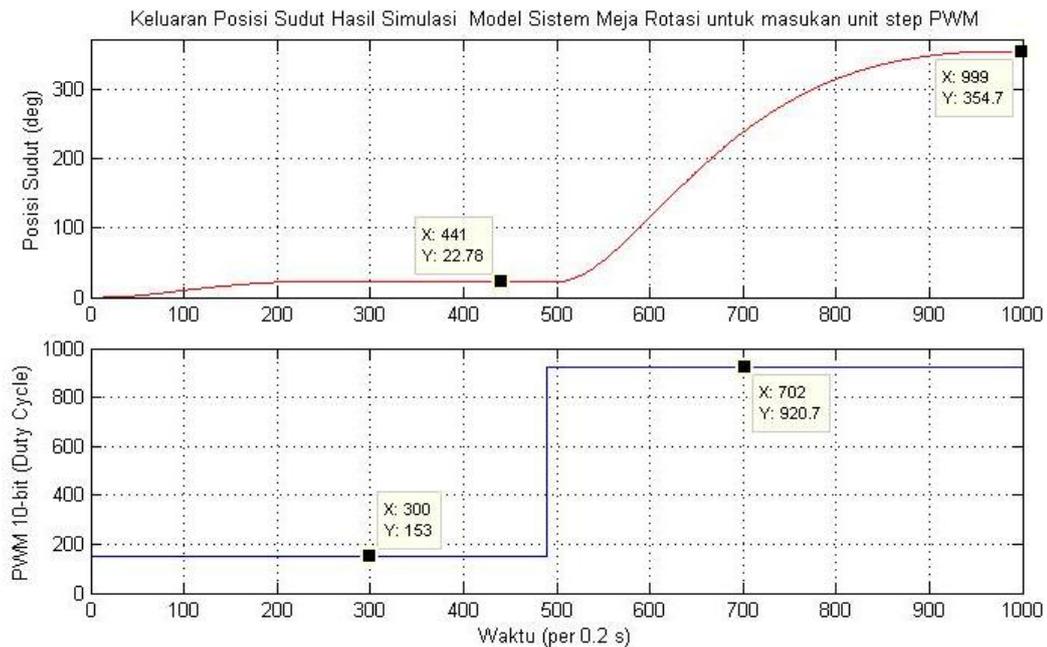
Nilai K_d ditambahkan pada model posisi sudut sistem meja rotasi. Sehingga konstruksi internal dari blok sistem meja rotasi ini menjadi seperti gambar 4.8. Pada gambar tersebut bagian yang diberi kotak merah merupakan bagian yang merepresentasikan nilai penyesuaian K_d untuk menghasilkan kuantisasi selang posisi sudut ± 360 derajat.



Gambar 4.8. Konstruksi internal sistem meja rotasi untuk kuantisasi posisi sudut ± 360 derajat

Grafik hasil keluaran simulasi model gambar 4.7 untuk masukan unit step diberikan pada gambar 4.9. Pada gambar tersebut dapat dilihat untuk masukan unit step yang diberikan pada masukan PWM, nilai keluaran posisi sudut dari model sistem memiliki nilai maksimum mendekati 360 derajat. Model dan grafik hasil simulasi ini akan digunakan pada perancangan pengendali posisi sudut

sistem menggunakan kendali PID dengan metode penalaan grafik Ciancone dengan tahapan yang dijelaskan seperti pada sub-bab 2.7.1.



Gambar 4.9. Keluaran posisi sudut sistem meja rotasi dari model gambar 4.7

Dari grafik keluaran gambar 4.9 akan dicari nilai-nilai parameter model dengan tahapan sebagai berikut:

- a. penentuan Gain Proses (K_p), dari gambar 4.9 :

$$K_p = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{354.7 - 22.78}{921 - 153} = \frac{331.92}{768} = 0.432 \quad (4.2)$$

- b. penentuan nilai τ dan θ :

$$63\% \Delta = 0.63 \times 331.92 + 22.78 = 231.89 \rightarrow t_{63\%} = (694.2 \times 0.2) - 97.8 = 41.04 \text{ s}$$

$$28\% \Delta = 0.28 \times 331.92 + 22.78 = 115.72 \rightarrow t_{28\%} = (600.5 \times 0.2) - 97.8 = 22.30 \text{ s}$$

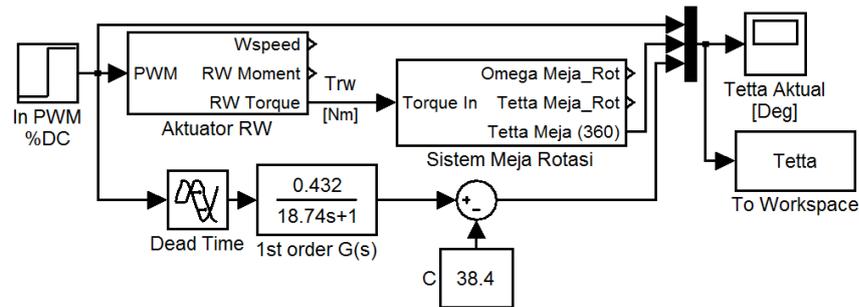
Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} \tau &= 1.5(t_{63\%} - t_{28\%}) = 1.5(41.04 - 22.30) \text{ s} = 18.74 \text{ s} \\ \theta &= t_{63\%} - \tau = (41.04 - 18.74) \text{ s} = 22.3 \text{ s} \end{aligned} \quad (4.3)$$

- c. fungsi transfer dan desain model

Dengan demikian diperoleh fungsi transfer hasil pendekatan orde satu dengan waktu tunda yang sesuai untuk model sistem gambar 4.7 sebagai berikut:

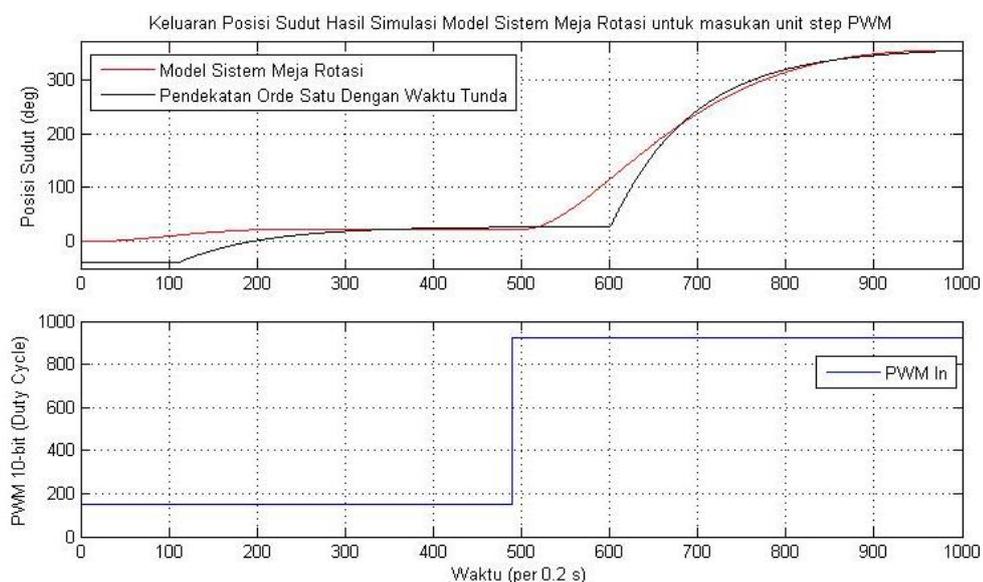
$$G(s) = \frac{0.432e^{-22.3s}}{18.74s + 1} \quad (4.4)$$



Gambar 4.10. Model Sistem meja rotasi dan pendekatan fungsi transfer orde satu dengan waktu tunda

Untuk mengetahui seberapa jauh keluaran fungsi transfer ini mampu mengikuti respon dinamik dari model sistem meja rotasi, maka keduanya digabungkan bersama seperti diberikan pada gambar 4.10.

Hasil keluaran simulasi model gambar 4.10 diberikan pada gambar 4.11. Pada hasil plot keluaran posisi sudut dari kedua desain model tersebut tampak pada saat awal setelah masukan unit-step diberikan, keluaran fungsi $G(s)$ tertinggal dari respon model sistem oleh karena waktu tunda yang cukup besar, namun lama-kelamaan keluaran $G(s)$ mampu mengikuti transisi dari keluaran modelnya. Selain itu nilai penguatan yang diperoleh dari hasil pendekatan terbukti mampu mengikuti penguatan model, dimana nilai awal dan akhir sangat mendekati keluaran dari sistem model. Selanjutnya, parameter-parameter model dari fungsi transfer $G(s)$ ini akan digunakan untuk menentukan parameter-parameter pengendali PID dengan metode penalaan grafik Ciancone.



Gambar 4.11. Hasil keluaran simulasi model Sistem meja rotasi dan pendekatan fungsi transfer orde satu dengan waktu tunda

d. penentuan parameter-parameter pengendali:

Untuk menentukan parameter-parameter pengendali, tentukan dahulu nilai *fraction of dead time* (FDT) dengan menggunakan hasil dari persamaan (4.3) sebagai berikut:

$$FDT = \left(\frac{\theta}{\theta + \tau} \right) = \frac{22.3}{22.3 + 18.74} = 0.543 \quad (4.5)$$

Dari nilai FDT tersebut dengan menggunakan diagram Ciancone pada gambar 2.19 atau 4.12, diperoleh nilai-nilai parameter kendali K_c , T_i dan T_d sebagai berikut:

$$K_c K_p = 0.6204 \rightarrow K_c = \frac{0.6204}{0.432} = 1.4361$$

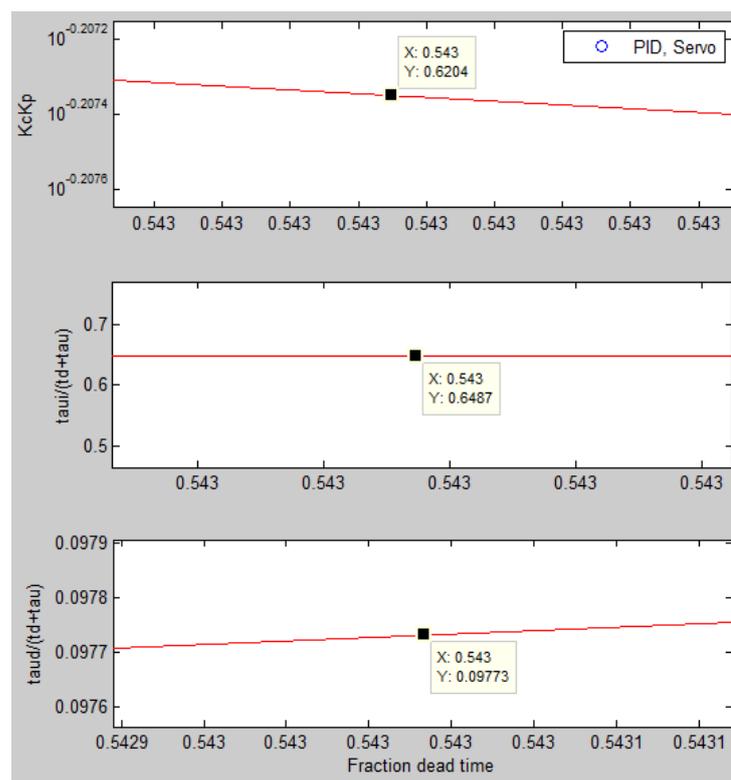
$$K_c = 1.4361 \quad (4.6)$$

$$\left(\frac{T_i}{\theta + \tau} \right) = 0.6487 \rightarrow T_i = 0.6487 \times 41.04 = 26.62$$

$$T_i = 26.62 \quad (4.7)$$

$$\left(\frac{T_d}{\theta + \tau} \right) = 0.09773 \rightarrow T_d = 0.09773 \times 41.04 = 4.01$$

$$T_d = 4.01 \quad (4.8)$$



Gambar 4.12. Keluaran grafik Ciancone untuk nilai FDT = 0.543

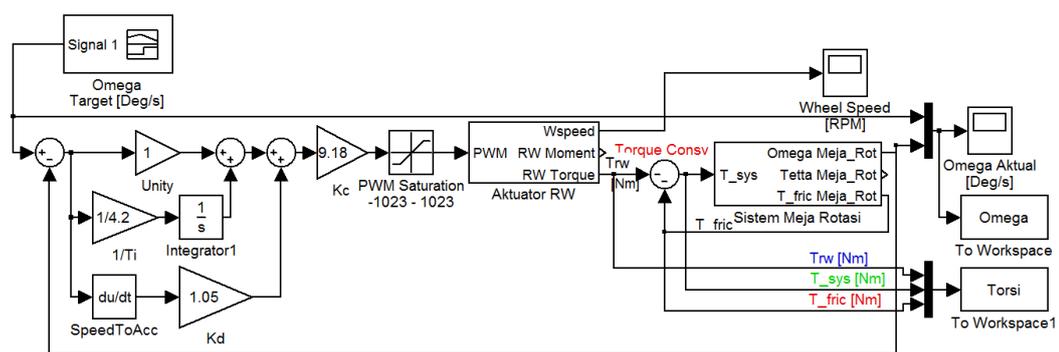
Sehingga diperoleh nilai-nilai parameter pengendali $K_c = 1.4361$, $T_i = 26.62$ dan $T_d = 4.01$. Parameter-parameter kendali tersebut selanjutnya akan digunakan dalam desain pengendalian posisi sudut dari sistem meja rotasi satu sumbu.

4.2. Hasil Simulasi Dan Pengujian

Hasil simulasi dan pengujian sistem pengendalian meja rotasi satu sumbu dilakukan pada uji lingkaran terbuka dan uji lingkaran tertutup. Simulasi dan pengujian lingkaran terbuka dilakukan terhadap model-model sistem meja rotasi satu sumbu diberikan pada sub-Bab 3.3.2. Sedangkan pengujian lingkaran tertutup dilakukan terhadap model pengendalian kecepatan dan posisi sudut meja rotasi sebagai berikut.

4.2.1. Hasil Uji Lingkaran Tertutup Pengendalian Kecepatan Sudut Sistem Meja Rotasi Satu Sumbu

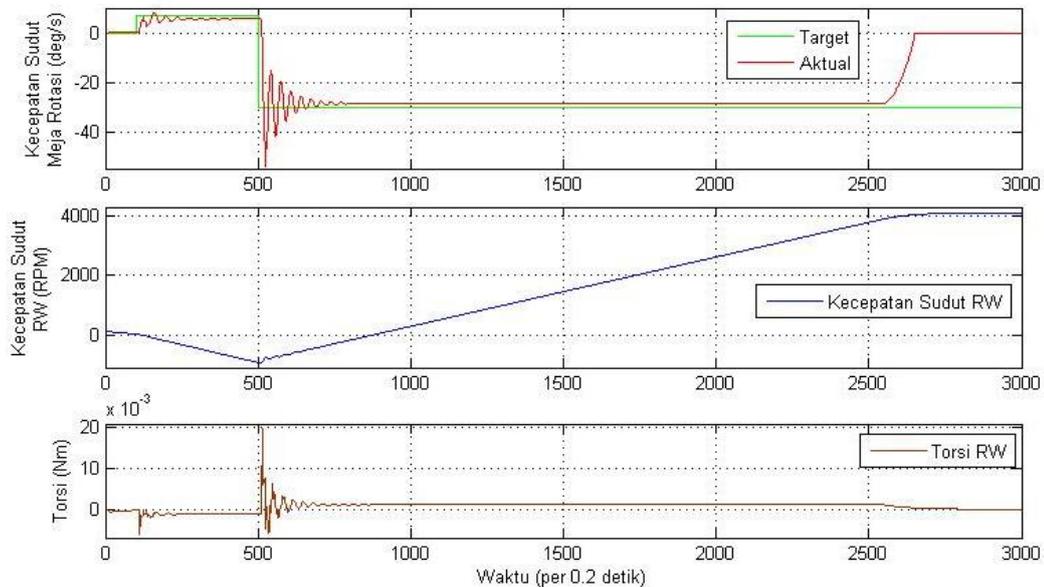
Desain model pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu menggunakan kendali PID dengan metode penalaan Ziegler-Nichols diberikan pada gambar 4.13. Parameter-parameter pengendali diperoleh dari hasil perancangan pengendali pada sub-bab 4.1.1, dimana diperoleh $K_c = 9.18$, $T_i = 4.2$ dan $T_d = 1.05$.



Gambar 4.13. Simulasi lingkaran tertutup model pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu dengan pengendali PID

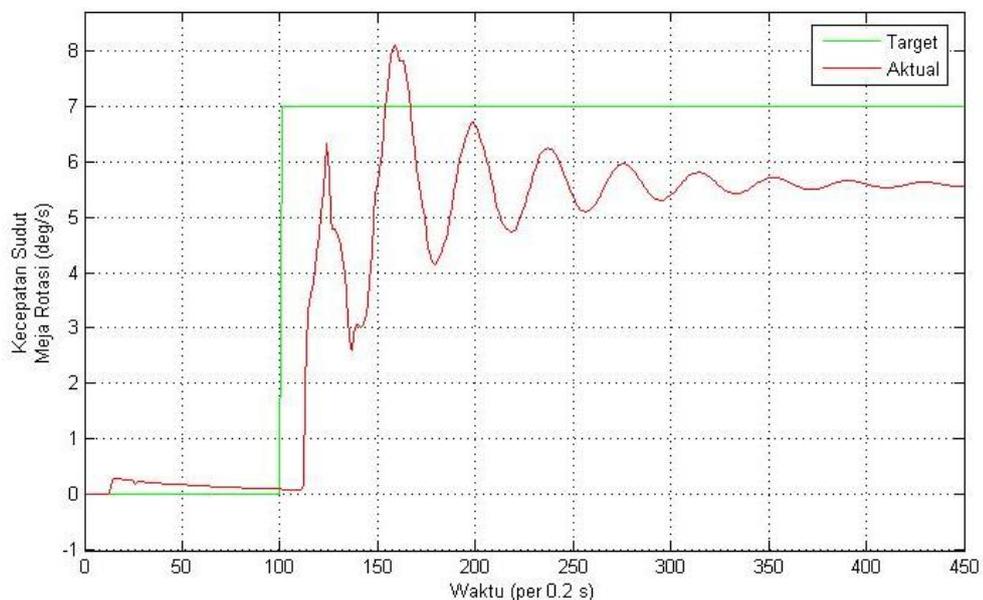
Hasil simulasi pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu ini diberikan pada gambar 4.14. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa keluaran pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu mampu mengikuti nilai target yang diberikan, namun masih terdapat *error steady state* sekitar 4.53%. Pada gambar tersebut dapat dianalisa hubungan antara kecepatan sudut

dan torsi dari aktuator RW terhadap kecepatan sudut sistem meja rotasi. Dalam hal ini akan dilakukan analisa terhadap dinamika sistem pengendalian untuk setiap perubahan kondisi target yang diberikan. Selain itu, keterbatasan aktuator RW dalam melakukan pengendalian sikap sistem meja rotasi pun akan dianalisa.



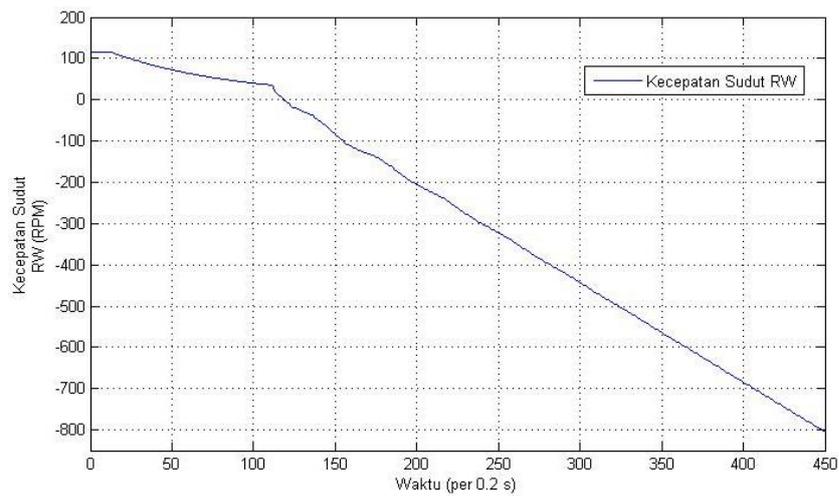
Gambar 4.14. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu.

Pada gambar 4.15, sistem diberikan nilai target kecepatan sudut positif (7 derajat/detik saat detik ke 20, sistem pengendali mampu mengikuti nilai target, namun masih terdapat *error steady state* pada keluarannya.

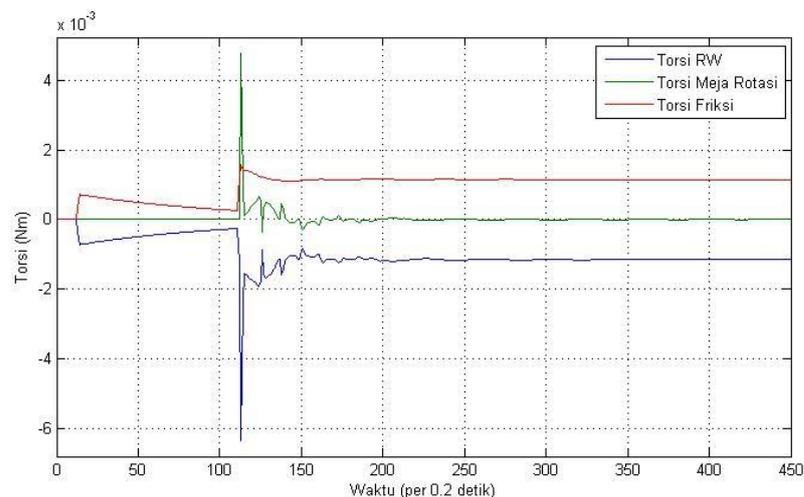


Gambar 4.15. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target 7 deg/s

Pada gambar 4.16 dapat dilihat, untuk dapat menghasilkan perubahan nilai kecepatan sudut meja rotasi seperti grafik gambar 4.15, aktuator RW dipercepat pada arah negatif sehingga dihasilkan nilai torsi kendali negatif (grafik warna biru) seperti dapat dilihat pada grafik keluaran torsi gambar 4.17. Torsi kendali ini menimbulkan torsi reaksi positif pada meja rotasi, sehingga meja rotasi dipercepat pada arah positif atau kecepatan meningkat pada arah positif seperti diberikan pada gambar 4.15.



Gambar 4.16. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan nilai target 7 deg/s

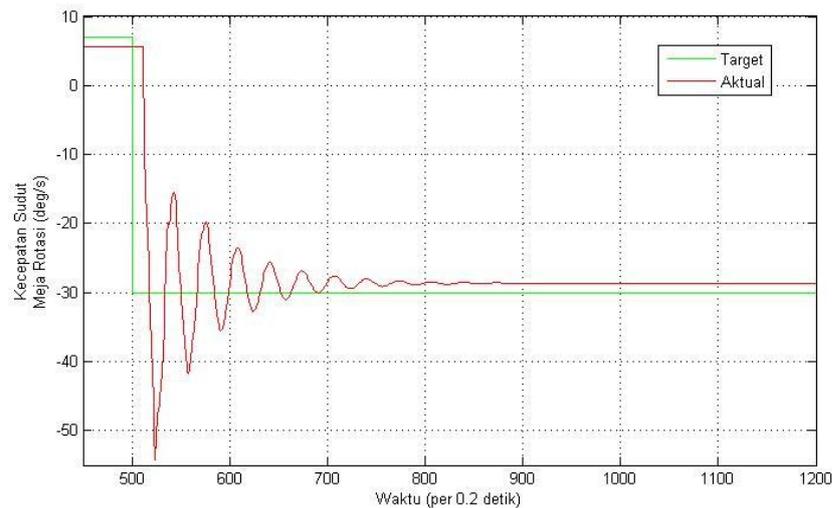


Gambar 4.17. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem meja rotasi dan torsi friksi untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan nilai target 7 deg/s

Dari gambar 4.17 dapat dilihat pula, torsi reaksi yang muncul pada sistem meja rotasi lebih kecil jika dibandingkan dengan torsi kendali yang diberikan oleh aktuator RW. Hal ini disebabkan oleh adanya torsi friksi pada meja rotasi. Pada

saat kecepatan sudut sistem naik untuk mencapai nilai target, torsi friksi pun meningkat, hingga akhirnya nilai torsi friksi ini akan konstan saat kecepatan sudut sistem konstan. Hal ini membuktikan bahwa torsi friksi adalah fungsi dari kecepatan sudut, yang dalam hal ini adalah fungsi dari kecepatan sudut sistem meja rotasi.

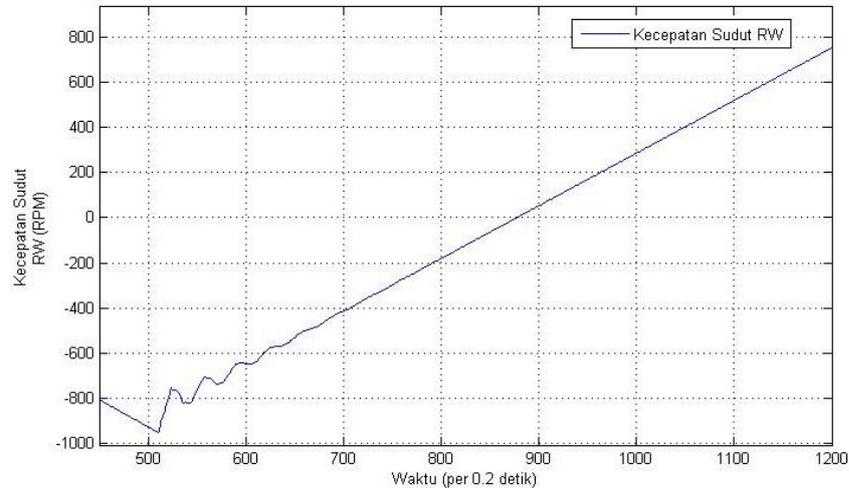
Torsi kendali RW akan berupaya membuat kecepatan sudut sistem meja rotasi mencapai target dan menjaganya agar tetap konstan atau dengan kata lain membuat torsi sistem meja rotasi agar sama dengan nol, seperti tampak pada gambar 4.17 untuk grafik warna hijau. Pada saat kondisi ini tercapai, nilai torsi kendali yang diberikan oleh aktuator RW akan sama dengan nilai torsi friksi dari sistem meja rotasi, yang berarti torsi kendali RW hanya digunakan untuk melawan torsi friksi yang ada pada sistem, seperti dapat dilihat pada gambar 4.17 dimulai pada detik ke 50. Oleh karena torsi kendali (percepatan) RW harus di jaga konstan, maka kecepatan aktuator RW akan terus meningkat pada arah negatif dengan percepatan yang sebanding dengan torsi friksi meja rotasi seperti terlihat pada gambar 4.16.



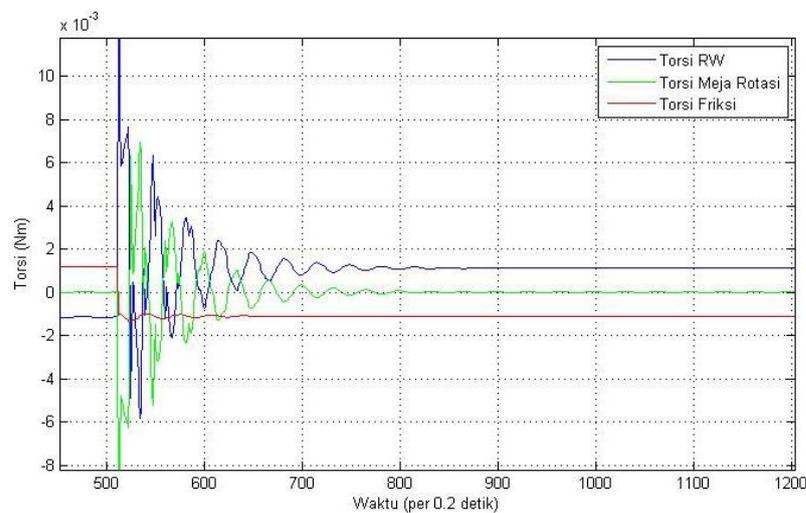
Gambar 4.18. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -30 deg/s

Prinsip yang sama pun dapat digunakan untuk menjelaskan nilai target kedua. Pada saat sistem diberikan nilai target -30deg/s, aktuator RW akan berupaya memberikan torsi kendali dan melawan torsi friksi untuk dapat mencapai nilai target yang diberikan, hanya saja dengan arah kecepatan sudut dan torsi-torsi yang berkebalikan dengan kondisi sebelumnya. Untuk dapat menghasilkan torsi kendali

positif (gambar 4.20), aktuator RW harus menghasilkan percepatan sudut positif dengan nilai konstan, sehingga kecepatan aktuator RW akan terus meningkat pada arah positif seperti tampak pada gambar 4.19.



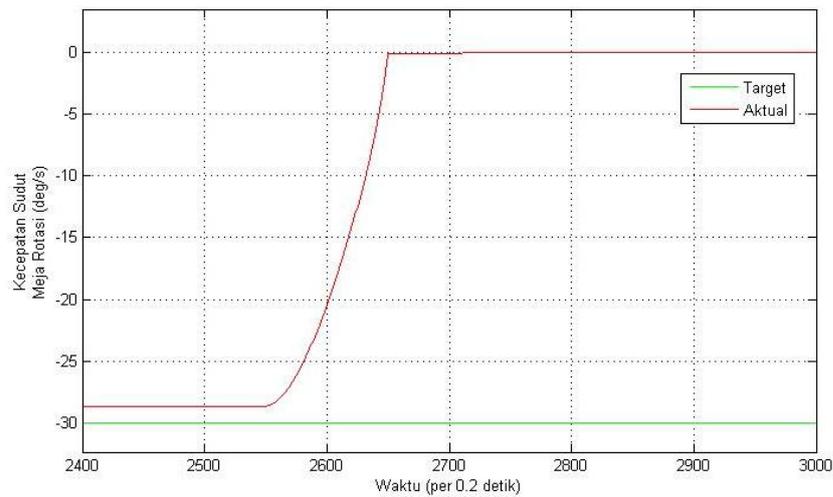
Gambar 4.19. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan nilai target -30 deg/s



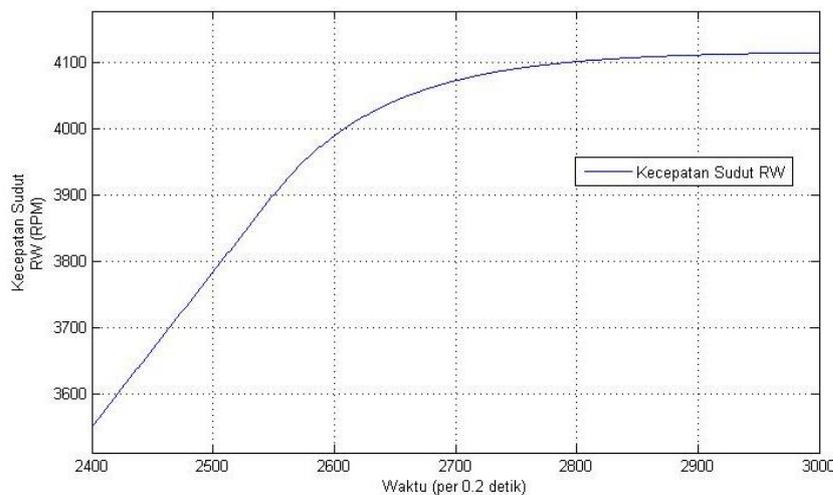
Gambar 4.20. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem meja rotasi dan torsi friksi untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan nilai target -30 deg/s

Pada saat nilai target kecepatan sudut sistem meja rotasi tidak diubah dalam jangka waktu lebih lama, torsi kendali RW akan selalu dibutuhkan pada saat itu untuk mempertahankan nilai kecepatan sudut aktual sehingga tetap sama dengan nilai target. Torsi ini dibutuhkan untuk melawan torsi gangguan dari eksternal sistem, seperti gesekan meja rotasi. Hingga suatu saat aktuator RW akan mencapai nilai kecepatan maksimumnya, seperti tampak pada gambar 4.22. Pada saat tersebut, aktuator RW tidak lagi bisa memberikan torsi kendali kepada sistem

meja rotasi, oleh karena torsi RW turun hingga nol, seperti tampak pada gambar 4.23.



Gambar 4.21. Grafik hasil simulasi model pengendalian kecepatan sudut dengan target -30 deg/s pada saat aktuator RW mengalami saturasi

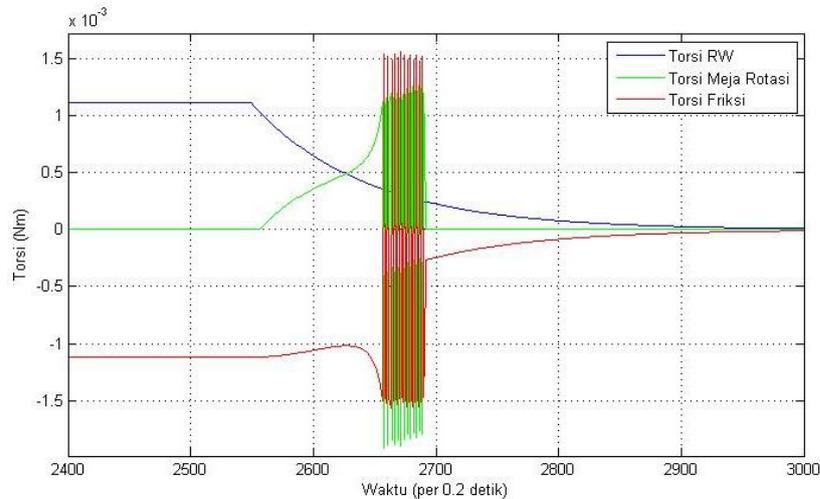


Gambar 4.22. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan target -30 deg/s pada saat aktuator RW

Hal ini akan menyebabkan nilai aktual kecepatan sudut sistem tidak lagi bisa dipertahankan, hingga pada pada detik ke 510 sistem meja rotasi akan kehilangan kecepatan sudutnya, seperti terlihat pada gambar 4.21. Pada kondisi ini, aktuator RW dikatakan mengalami saturasi.

Pada sistem satelit, torsi gangguan eksternal dapat berupa variasi tekanan atmosfer (*atmosferic drag*), medan magnet bumi maupun angin matahari (*solar wind*). Kondisi saturasi ini menjadi keterbatasan dari aktuator RW dan kondisi ini tidak dapat dihindarkan, bahkan dalam sistem satelit sekalipun. Oleh sebab itu

seringkali dibutuhkan aktuator lain sebagai pelengkap yang dapat digunakan untuk membuang momentum (*momentum dumping*) dari aktuator RW. Aktuator pelengkap tersebut dapat berupa *magnetic torque*, *air coil*, atau yang lainnya.



Gambar 4.23. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem meja rotasi dan torsi friksi untuk pengendalian kecepatan sudut meja rotasi dengan target -30 deg/s pada saat aktuator RW mengalami saturasi

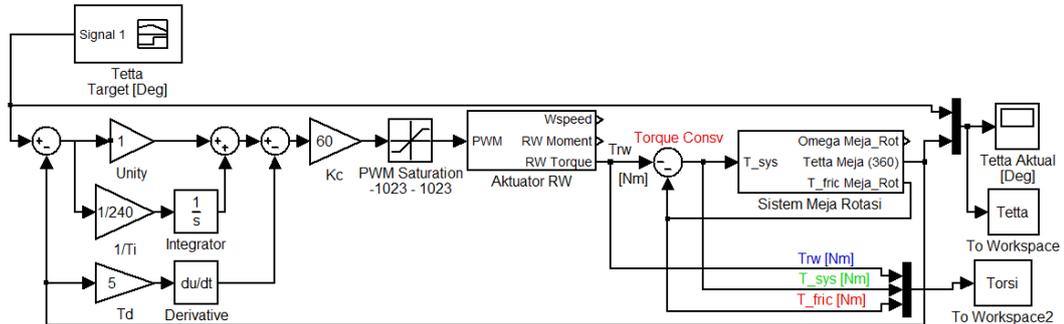
Pada gambar 4.23, pada saat aktuator RW kehilangan torsi kendali, maka torsi sistem meja rotasi tidak dapat dipertahankan lagi pada nilai nol, sehingga kecepatan sudut sistem akan menurun dan menjadi nol. Adapun *ripple* atau osilasi yang muncul pada torsi sistem dan torsi friksi pada selang waktu antara detik ke 530 dan 540, disebabkan oleh diskontinuitas dari komputasi model yang merupakan keterbatasan dari blok rotasi gesekan, hal ini dapat diabaikan dalam analisa sistem.

4.2.2. Hasil Uji Lingkar Tertutup Pengendalian Posisi Sudut Sistem Meja Rotasi Satu Sumbu

Desain sistem pengendalian posisi sudut meja rotasi satu sumbu ini menggunakan kendali PID dengan metode penalaan grafik Ciancone diberikan pada gambar 4.24. Parameter-parameter pengendali diperoleh dari hasil perancangan pengendali pada sub-bab 4.1.2, dimana diperoleh $K_c = 1.4361$, $T_i = 26.62$ dan $T_d = 4.01$.

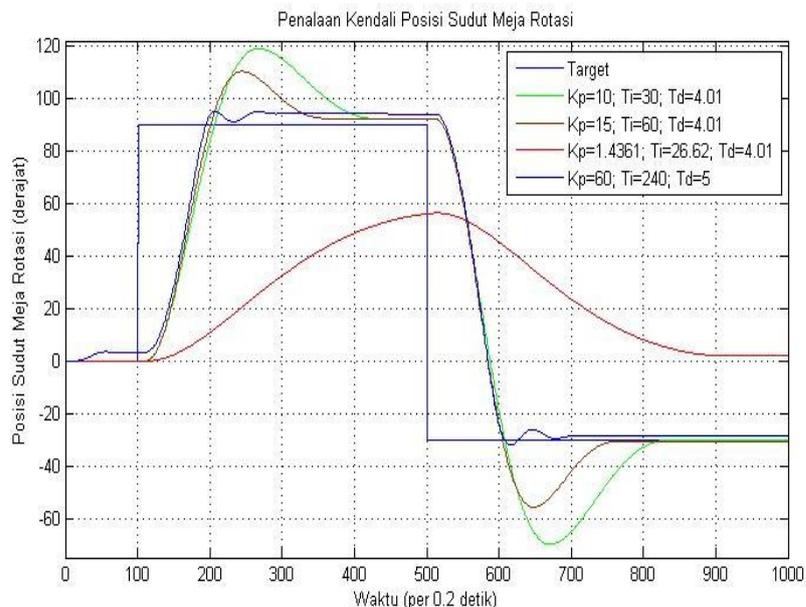
Dari gambar 4.25, diperoleh bahwa pengendalian dengan nilai-nilai parameter kendali $K_c = 1.4361$, $T_i = 26.62$ dan $T_d = 4.01$ terlalu lemah untuk digunakan. Hal

ini disebabkan karena besarnya nilai waktu tunda dari fungsi transfer hasil pendekatan model, seperti diberikan pada gambar 4.11. Oleh sebab itu penalaan lebih lanjut dibutuhkan untuk memperoleh nilai-nilai parameter pengendali yang lebih baik.



Gambar 4.24. Simulasi lingkaran tertutup mode kendali posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu dengan pengendali PID

Hasil simulasi dan penalaan dari pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu ini diberikan pada gambar 4.25. Dapat dilihat bahwa hasil keluaran pengendalian untuk nilai $K_c = 60$, $T_i = 240$ dan $T_d = 5$ memberikan hasil keluaran yang paling baik, dengan persen *overshoot* yang kecil dan *settling-time* serta *rise-time* yang cepat. Oleh sebab itu, nilai parameter ini akan digunakan pada sistem pengendalian posisi sudut meja rotasi.

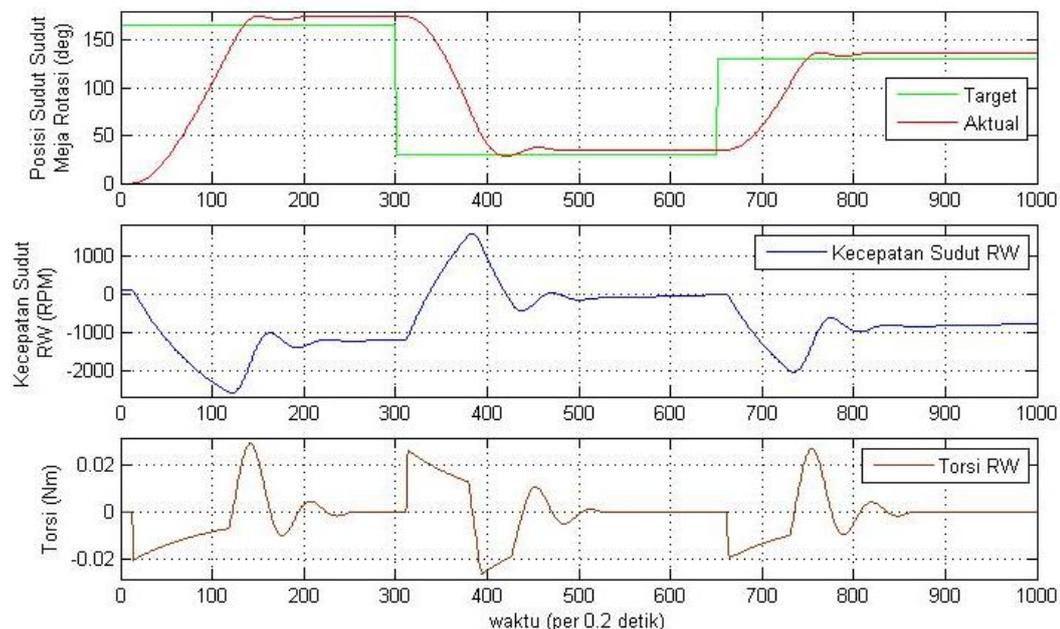


Gambar 4.25. Grafik hasil penalaan pada pengendalian posisi sudut meja rotasi

Pada gambar 4.26 diberikan hasil simulasi pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa keluaran

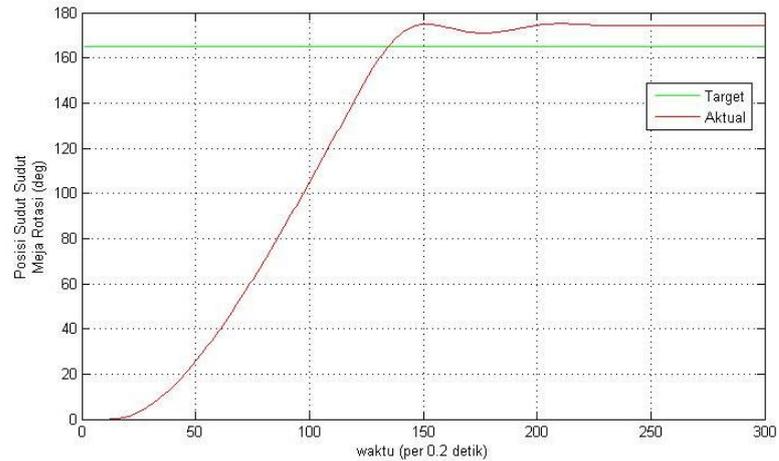
pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu mampu mengikuti nilai target yang diberikan, namun masih terdapat *error steady state* sekitar 5.57%. Dari gambar tersebut dapat dianalisa hubungan antara kecepatan sudut dan torsi dari aktuator RW terhadap posisi sudut sistem meja rotasi. Dalam hal ini akan dilakukan analisa terhadap dinamika sistem pengendalian untuk setiap perubahan kondisi target yang diberikan.

Pada gambar 4.27, sistem diberikan nilai target posisi sudut positif (165 derajat saat detik ke 0), aktuator RW dipercepat (kecepatan sudut RW meningkat) pada arah negatif sehingga dihasilkan nilai torsi kendali negatif (grafik warna biru) seperti dapat dilihat pada grafik keluaran torsi gambar 4.29. Torsi kendali ini menimbulkan torsi reaksi positif pada meja rotasi, sehingga sudut meja rotasi akan bertambah pada arah positif seperti diberikan pada gambar 4.27.

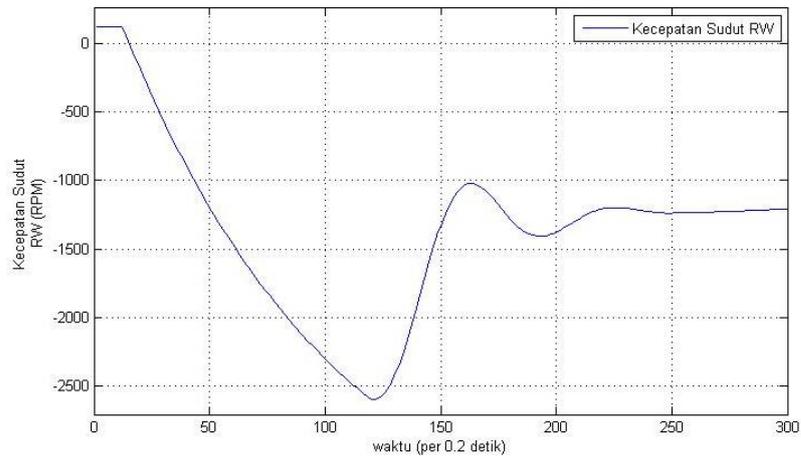


Gambar 4.26. Grafik hasil simulasi model pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu untuk nilai $K_c = 60$, $T_i = 240$ dan $T_d = 5$.

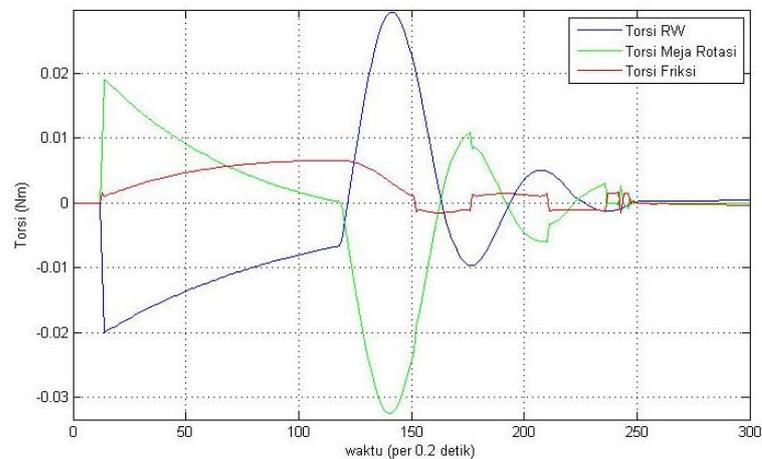
Setelah target posisi sudut meja rotasi tercapai, aktuator RW akan berupaya menjaga posisi sudut sistem tersebut agar tetap pada nilai target, dengan melawan torsi sistem hingga akhirnya torsi sistem sama dengan nol seperti tampak pada gambar 4.29, yang berarti sistem meja rotasi dalam keadaan diam. Hal ini menyebabkan kecepatan sudut RW akan relatif konstan (gambar 4.28) sampai akhirnya nilai target posisi sudut baru diberikan.



Gambar 4.27. Grafik hasil simulasi model pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi untuk nilai target 165 derajat



Gambar 4.28. Grafik hasil keluaran kecepatan sudut RW untuk pengendalian posisi sudut meja rotasi dengan nilai target 165 derajat



Gambar 4.29. Grafik hasil keluaran torsi RW, sistem meja rotasi dan torsi friksi untuk pengendalian posisi sudut meja rotasi dengan nilai target 165 derajat

BAB V

INTEGRASI DAN PENGUJIAN KENDALI SISTEM MEJA ROTASI

Pada Bab ini akan dijelaskan hasil perancangan elektronik dan perangkat lunak dari perangkat-perangkat penyusun sistem meja rotasi. Selain itu dijelaskan pula hasil integrasi sistem dan mekanisme pengambilan data serta pengujiannya. Analisa dilakukan terhadap data-data hasil pengujian untuk mengetahui tingkat keberhasilan dari sistem kendali sikap meja rotasi satu sumbu.

5.1. Perangkat Penyusun Sistem Meja Rotasi

Terdapat beberapa perangkat elektronik yang menyusun sistem meja rotasi. Semuanya dimanfaatkan untuk mendukung kerja dari sistem pengendalian sikap satu sumbu dari meja rotasi. Pada tabel 5.1 diberikan daftar perangkat elektronik yang digunakan, disertai dengan fungsinya masing-masing.

Tabel 5.1. Daftar perangkat dan fungsinya yang digunakan pada sistem meja rotasi

No	Modul Elektronik	Fungsi
1	Baterai dan sistem distribusi daya listrik	Sumber daya listrik untuk sistem meja rotasi
2	Sensor Girokop MG100 dan perangkat akuisisi data	Sensor inersial untuk mengukur kecepatan dan posisi sudut sistem
3	<i>Wheel Drive Electronic</i> (WDE)	Kontroler utama dalam sistem pengendalian sikap meja rotasi
4	<i>Reaction Wheel</i> (RW)	Aktuator penghasil torsi kendali
5	RF Tranceiver	Komunikasi dua arah (<i>full-duplex</i>) tanpa kabel Uplink 315 MHz pada 2400 bps Downlink 433.92 MHz pada 2400 bps

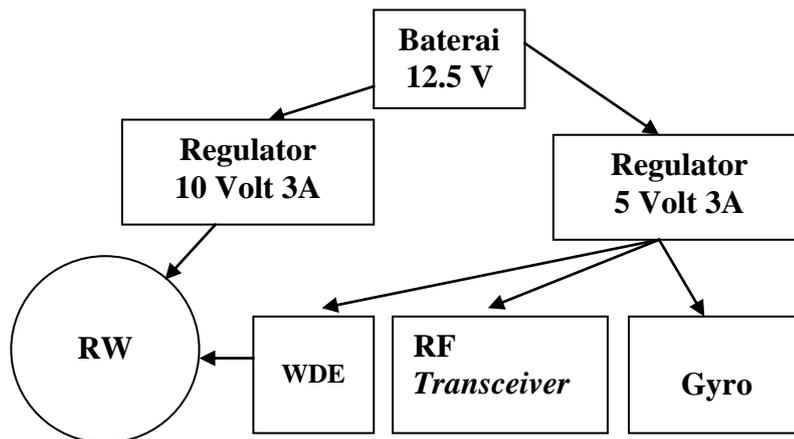
5.1.1. Baterai Dan Sistem Distribusi Daya Listrik

Kebutuhan daya listrik dari sistem meja rotasi, dipenuhi oleh sebuah baterai *lead-acid* dengan tegangan keluaran 12.5 volt dan daya 3.5 Ah.

Tabel 5.2. Kebutuhan daya listrik dari masing-masing perangkat

No	Modul Elektronik	Tegangan (Volt)	Arus (A)
1	Girokop MG100	5	0.05
2	WDE	5	0.09
3	RW (motor)	10	0.5 (Max)
4	RF <i>Tranceiver</i>	5	0.07
5	Baterai dan sistem distribusi daya listrik	12.5 Volt (3.5 Ah)	

Daya listrik didistribusikan dari baterai seperti pada skema gambar 5.1. pada skema tersebut terdapat dua unit regulator tegangan, yang antara lain regulator tegangan 10 volt dan 5 volt. Keluaran tegangan 10 volt digunakan untuk memberikan daya pada motor dari aktuator RW, sedangkan keluaran tegangan 5 volt digunakan untuk *supply* tegangan perangkat-perangkat analog dan digital seperti sensor giroskop, RF *transceiver* dan WDE. Motor RW memiliki arus maksimum sekitar 0.5 Ampere, sehingga regulator ini sudah mencukupi kebutuhan dayanya.



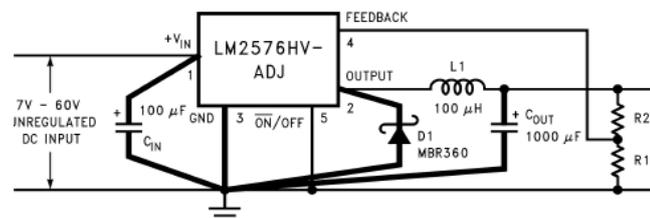
Gambar 5.1. Distribusi daya pada sistem meja rotasi

Rangkaian regulator 10 volt diberikan pada gambar 5.2, dengan nilai R_1 dan R_2 dari rangkaian tersebut memenuhi persamaan

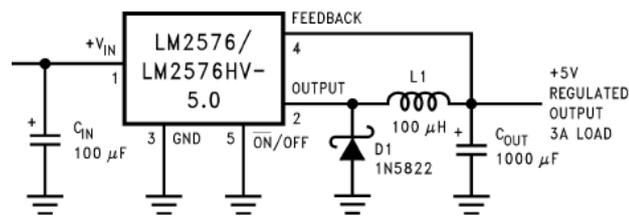
$$R_2 = R_1 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \quad (5.1)$$

dengan:

- V_{Out} : tegangan keluaran regulator adalah 10 volt
- V_{REF} : tegangan referensi, 1.23 volt
- R_1 : digunakan 4.7 kOhm, sehingga R_2 yang digunakan adalah 33 kOhm



Gambar 5.2. Rangkaian regulator tegangan 10 volt



Gambar 5.3. Rangkaian regulator tegangan 5 volt

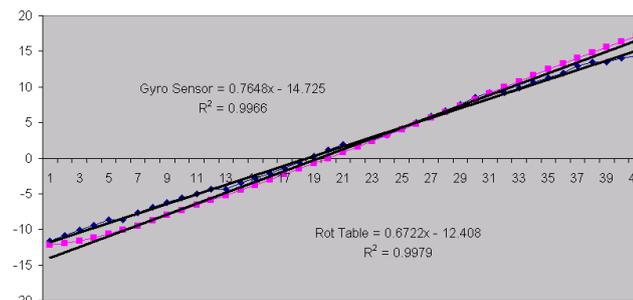
5.1.2. Giroskop MG100 Dan Perangkat Akuisisi Data

Rangkaian akuisisi data sensor giroskop menggunakan mikrokontroler AVR ATmega16, yang telah dilengkapi dengan fitur-fitur yang dibutuhkan, seperti ADC 10-bit dan komunikasi serial UART. Bentuk fisik dari perangkat ini diberikan pada gambar 5.4.



Gambar 5.4. Perangkat sensor giroskop dan sistem akuisisinya

Kalibrasi sensor giroskop dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor giroskop dengan hasil pengukuran enkoder optik. Adapun hasil perbandingan data kecepatan sudut keduanya diberikan pada gambar 5.5. Kalibrasi ini perlu dilakukan, untuk memperoleh hasil pengukuran sensor yang akurat. Selain itu, penempatan sensor giroskop yang tidak tepat di tengah sumbu rotasi meja dan ketidakseragaman nilai sensitivitas sensor, dapat dikompensasi dengan kalibrasi ini.



Gambar 5.5. Perbandingan hasil pengukuran kecepatan sudut antara sensor giroskop MG100 (merah muda) dengan enkoder optik (biru)

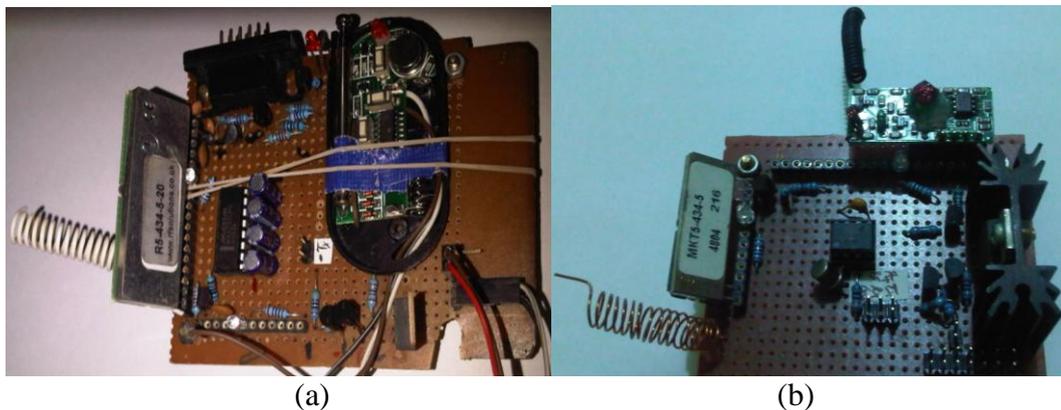
Dari gambar tersebut tampak bahwa penguatan sensor giroskop sedikit lebih besar, sehingga perlu disesuaikan sebesar 0.8789 kali. Nilai penyesuaian ini selanjutnya akan dimasukkan dalam perhitungan pengukuran kecepatan sudut pada sensor giroskop MG100.

5.1.3. RF Transceiver

Terdapat dua frekuensi berbeda yang digunakan untuk berkomunikasi antara sistem meja rotasi dan komputer PC seperti dijelaskan pada sub-Bab 2.6. Frekuensi ini antara lain frekuensi *uplink* pada 315 MHz dan frekuensi *downlink* 433.92 MHz. Perbedaan ini dilakukan untuk menghindari terjadinya interferensi data yang tidak di harapkan.

Frekuensi *uplink* adalah frekuensi yang digunakan untuk mentransfer data/perintah dari komputer PC ke sistem meja rotasi. Kecepatan transfer yang digunakan untuk *uplink* adalah 2400 bps. Frekuensi *downlink* adalah frekuensi yang digunakan untuk mentransfer data-data telemetri/informasi dari sistem meja rotasi ke komputer PC. Kecepatan transfer yang digunakan untuk *downlink* adalah 2400bps.

Pada gambar 5.6 ditampilkan perangkat *transceiver* terintegrasi yang digunakan sebagai media komunikasi tanpa kabel antara komputer PC dengan sistem meja rotasi.



Gambar 5.6. (a) Transceiver pada sisi komputer PC. (b) Transceiver pada sisi meja rotasi

5.1.4. Wheel Drive Elektronik (WDE)

Selain fungsi-fungsi yang telah di jelaskan pada sub-Bab 2.2.4, pada sistem pengendalian meja rotasi ini, WDE memiliki peranan yang sangat penting, yaitu

sebagai kontroler utama dari sistem meja rotasi satu sumbu. Di dalam prosesor WDE ditanamkan algoritma pengendalian kecepatan dan posisi sudut. Fungsi penting lainnya dari modul WDE ini adalah melakukan pemaketan data-data telemetri dengan penambahan byte *checksum* pada paket data yang dikirim ke komputer PC. *Checksum* ini sangat penting untuk mengenali data masuk ke receiver sekaligus sebagai pengecekan jika terjadi error pada daya. Adapun format data yang digunakan untuk pengiriman paket telemetri dari WDE ke komputer PC adalah sebagai berikut:

\$WDE D0 D1 D2 ... D21 D22 D23 **ChkSum**
 Byte Header Data 24 byte Error Checking

Byte CheckSum ditentukan melalui persamaan sebagai berikut

$$\text{Checksum} = 0xFF - (\sum (24 \text{ Data Byte}))_{8 \text{ bits}}$$

Jika terjadi perbedaan antara hasil perhitungan *checksum* di PC dengan nilai *checksum* yang dikirimkan oleh WDE, maka berarti paket data telah rusak dan tidak akan digunakan untuk analisa. Jumlah 24 byte data tersebut dirinci pada tabel 5.3 berikut ini.

Tabel 5.3. Daftar byte data telemetri

No	Modul Elektronik	Tipe Data	Jumlah Byte
1	Real-Time Counter (per 0.2 detik)	Integer	2
2	PWM Duty-Cycle (%)	Integer	2
3	Kecepatan Sudut RW (RPM)	Floating Point	4
4	Arus Motor (mA)	Floating Point	4
5	Pertambahan Sudut Girokop (derajat)	Floating Point	4
6	Sudut Girokop (derajat)	Floating Point	4
7	Kecepatan Sudut Girokop (derajat/s)	Floating Point	4
Total Byte			24

5.2. Mekanisme Pengambilan Data

Khusus data-data telemetri yang terdiri dari 24 byte (tabel 5.3), sinyalnya dikirimkan secara otomatis (terus menerus) dari WDE ke komputer PC dengan selang waktu setiap 0.2 detik, pada frekuensi *downlink* 933.92 MHz dengan kecepatan transfer 2400 bps. Data telemetri ini selanjutnya ditampilkan pada program antarmuka PC, seperti pada gambar 3.2. Selain itu, data-data telemetri ini

disimpan (*logging*) dalam bentuk file dengan ekstensi (*.txt), untuk selanjutnya diolah dan ditampilkan dalam bentuk grafik.

Kata perintah atau *command word* untuk pengesetan nilai target ataupun nilai-nilai parameter pengendali, dikirimkan dari komputer PC ke WDE menggunakan frekuensi *uplink* 315 MHz dengan kecepatan transfer data 2400 bps. Oleh karena frekuensi yang digunakan berbeda dari frekuensi *downlink*, maka dimungkinkan kata perintah dikirimkan bersamaan dengan diterimanya data telemetri dari WDE.

5.3. Hasil Pengujian Pengendalian Sikap Meja Rotasi

Dari hasil-hasil perancangan dan simulasi pengendalian sikap yang telah dijelaskan pada Bab 4 sebelumnya, diperoleh rancangan dan nilai-nilai parameter pengendali yang sesuai untuk model sistem meja rotasi. Adapun algoritma dari sistem-sistem pengendalian tersebut, diimplementasikan pada perangkat lunak mikrokontroler WDE secara *embedded*. Kemudian dilakukan pengujian terhadap performa dari sistem pengendalian tersebut pada meja rotasi secara nyata. Hasil-hasil pengujian berupa grafik keluaran kecepatan dan posisi sudut sistem meja rotasi yang merupakan hasil pengukuran dari sensor giroskop.

5.3.1. Implementasi Algoritma Pengendalian Kecepatan Sudut Sistem

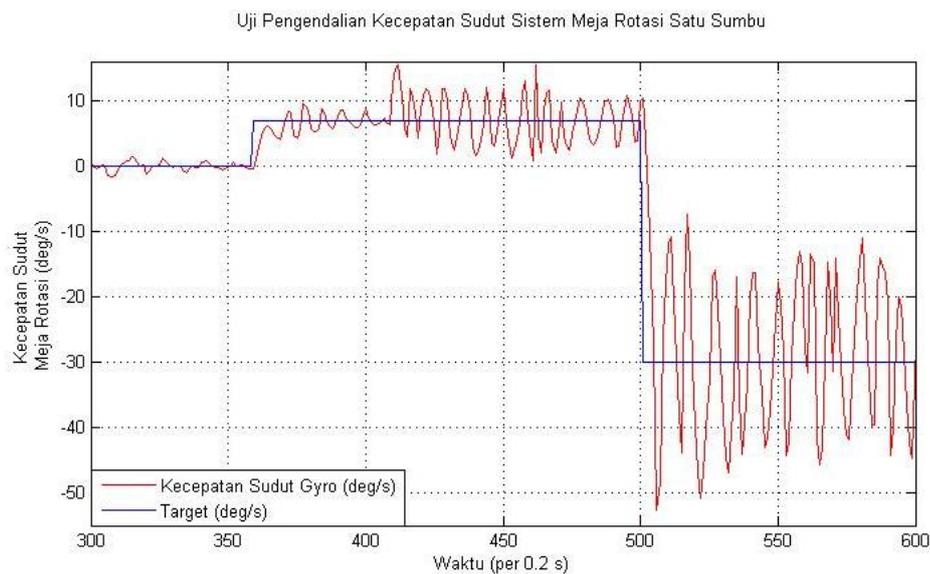
Seperti telah dijelaskan pada sub-Bab 4.1.1, bahwa untuk pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu digunakan metode Ziegler-Nichols. Adapun pemrograman mikrokontroler WDE menggunakan bahasa C-ANSI, dengan compiler dan editor CodeVisionAVR V2.05.3. Algoritma kendali tersebut diimplementasikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{delta_rate} &= \text{gyro_rate} - \text{rate_target}; \\ \text{rate_sum} &= \text{rate_sum} + (\text{delta_rate} * \text{gyro_delay_Act}) / i_rate_const; \\ d_ctrl &= (d_rate_const * \text{delta_rate}) / \text{gyro_delay_Act}; \\ \text{pwm_target} &= p_rate_const * (\text{delta_rate} + \text{rate_sum} + d_ctrl); \end{aligned}$$

dengan konstanta p_rate_const , i_rate_const dan d_rate_const merupakan parameter-parameter pengendali PID dengan $K_c = 9.18$, $T_i = 4.2$ dan $T_d = 1.05$.

5.3.2. Hasil Pengujian Pengendalian Kecepatan Sudut Sistem

Setelah *listing* pengendalian tersebut diprogramkan pada memori *flash* mikrokontroler WDE, selanjutnya dilakukan pengujian terhadap sistem pengendalian ini. Pada saat pengujian, data-data telemetri secara terus-menerus dibaca dari sistem meja rotasi dan disimpan untuk dianalisa. Dengan memberikan beberapa masukan nilai target kecepatan sudut berbeda melalui kata perintah yang dikirimkan melalui frekuensi *uplink*, diperoleh hasil seperti ditampilkan pada gambar 5.7.

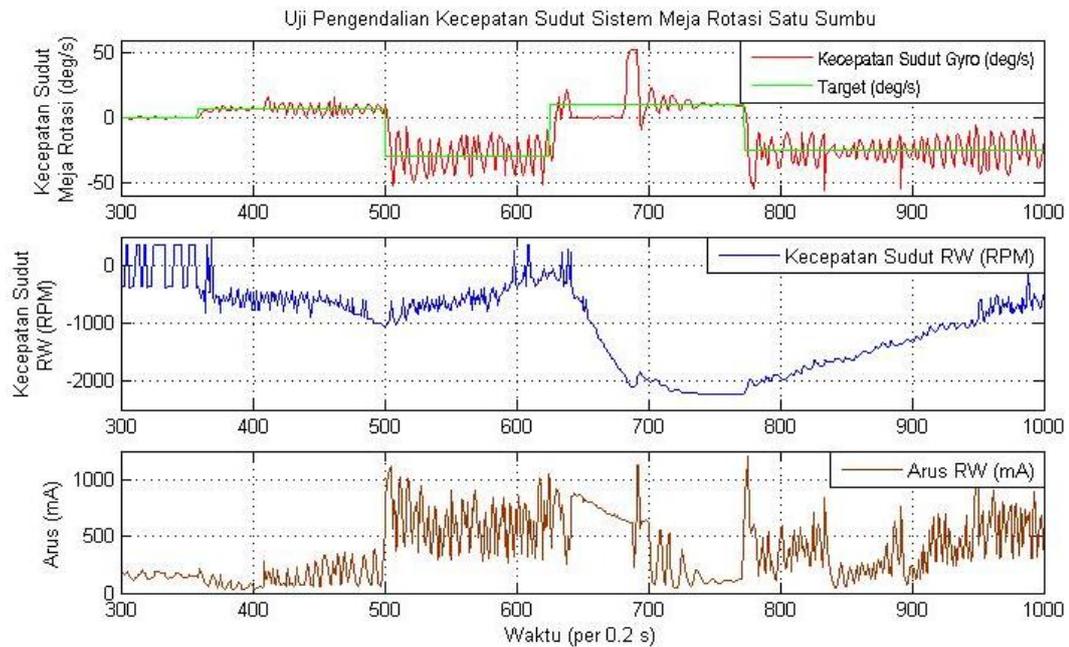


Gambar 5.7. Grafik hasil pembacaan sensor giroskop untuk pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi untuk target 7 deg/s dan -30 deg/s.

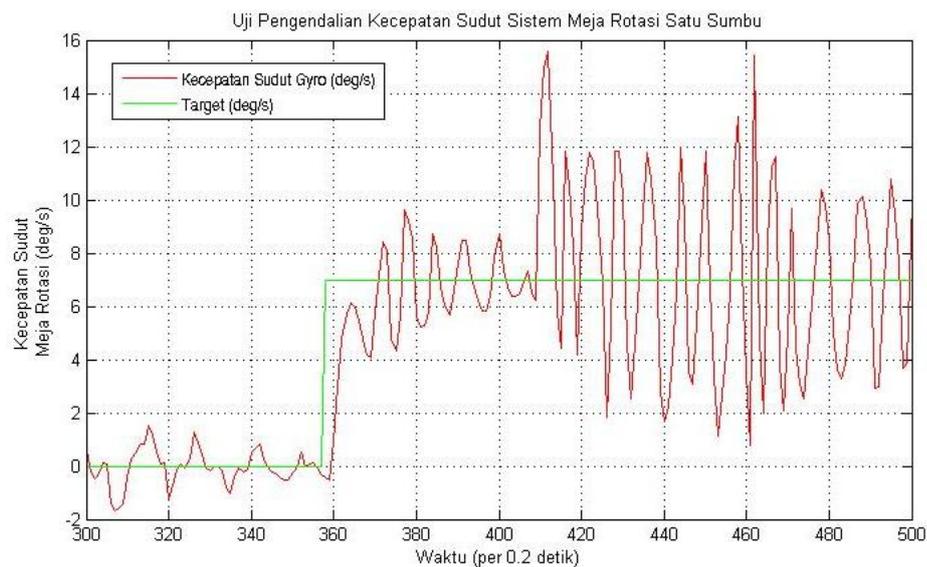
Dari hasil keluaran kecepatan sudut sistem meja rotasi gambar 5.7, tampak bahwa keluaran pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi satu sumbu mampu mengikuti nilai target yang diberikan, namun masih terdapat osilasi pada hasil keluaran pengendalian. Hal ini mungkin disebabkan oleh adanya variasi perpindahan posisi sudut sistem meja rotasi pada arah sumbu lainnya (*pitch* dan atau *roll*) sehingga meja rotasi berosilasi pada arah aksialnya. Osilasi pada arah aksial ini membuat torsi friksi dari meja rotasi menjadi tidak homogen dan ikut berosilasi terhadap perubahan posisi sudutnya, sehingga menyebabkan torsi kendali yang dihasilkan aktuator RW pun ikut berosilasi.

Pada gambar 5.8 diberikan variasi target kecepatan sudut dan hasil pengukuran sensor giroskop secara nyata. Selain itu diberikan juga hasil keluaran

kecepatan sudut dan arus dari aktuator RW, sehingga hubungan di antara ketiganya dapat dianalisa.



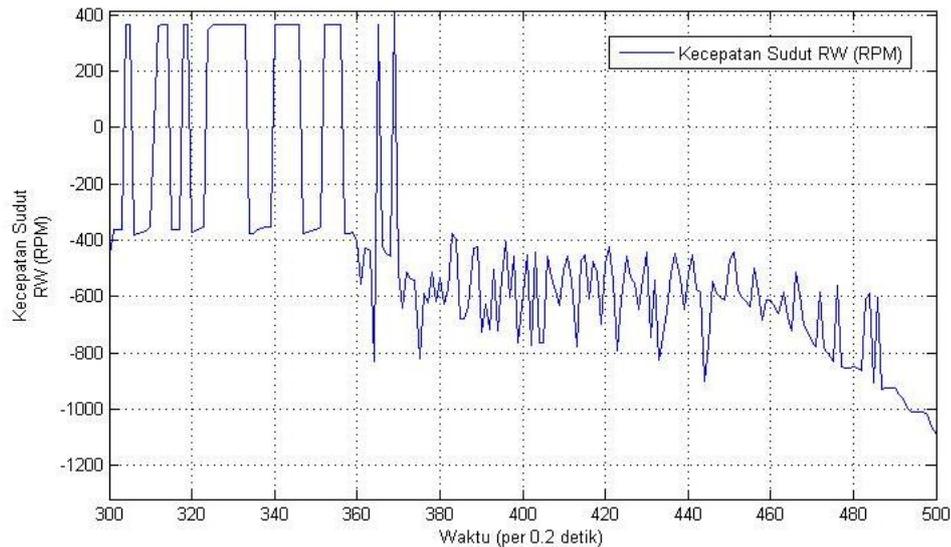
Gambar 5.8. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop pada pengendalian kecepatan sudut sistem meja rotasi untuk beberapa nilai target.



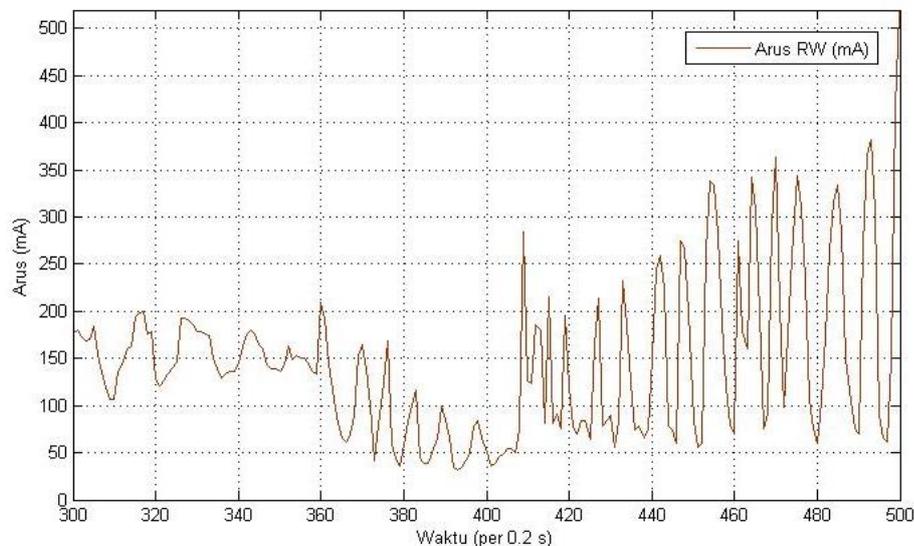
Gambar 5.9. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target 7 deg/s

Pada gambar 5.9, sistem diberikan nilai target kecepatan sudut positif 7 derajat/detik saat detik ke 71.6, sistem pengendali mampu mengikuti nilai target. Pada gambar 5.10 dapat dilihat, untuk dapat menghasilkan perubahan nilai kecepatan sudut meja rotasi seperti grafik gambar 5.9, aktuator RW dipercepat

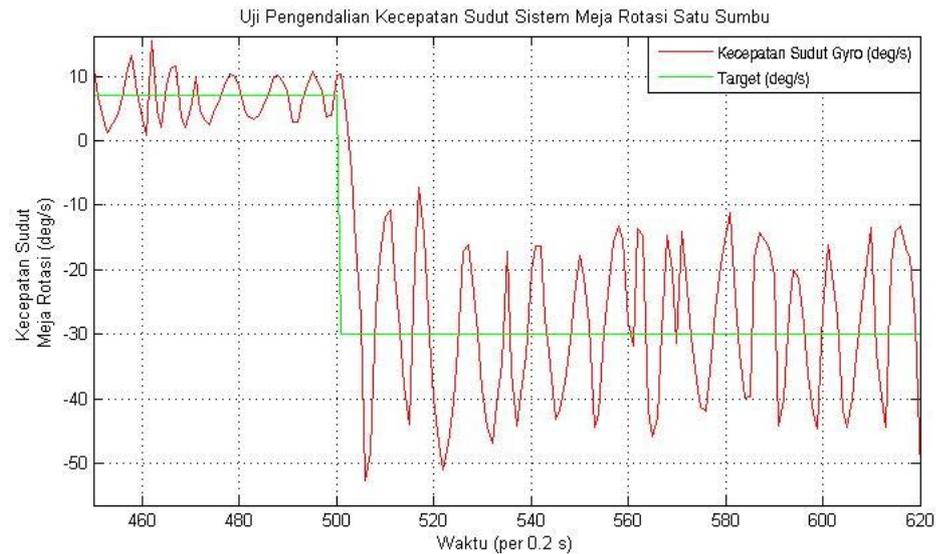
pada arah negatif. Percepatan pada RW ini menimbulkan kecenderungan peningkatan arus yang terukur seperti pada gambar 5.11. Setelah nilai target kecepatan sudut meja rotasi tercapai, aktuator RW akan berupaya menjaga kecepatan sudut sistem tersebut agar tetap pada nilai target, dengan tetap melawan torsi eksternal (berupa torsi gesekan pada sumbu meja rotasi atau yang lainnya). Hal ini menyebabkan kecepatan sudut RW akan terus meningkat.



Gambar 5.10. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target 7 deg/s

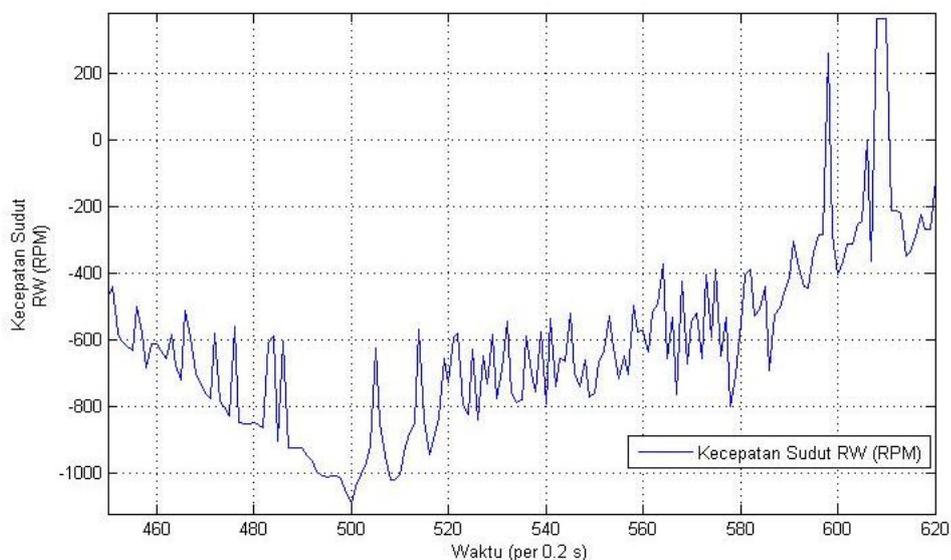


Gambar 5.11. Grafik hasil pembacaan arus RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target 7 deg/s



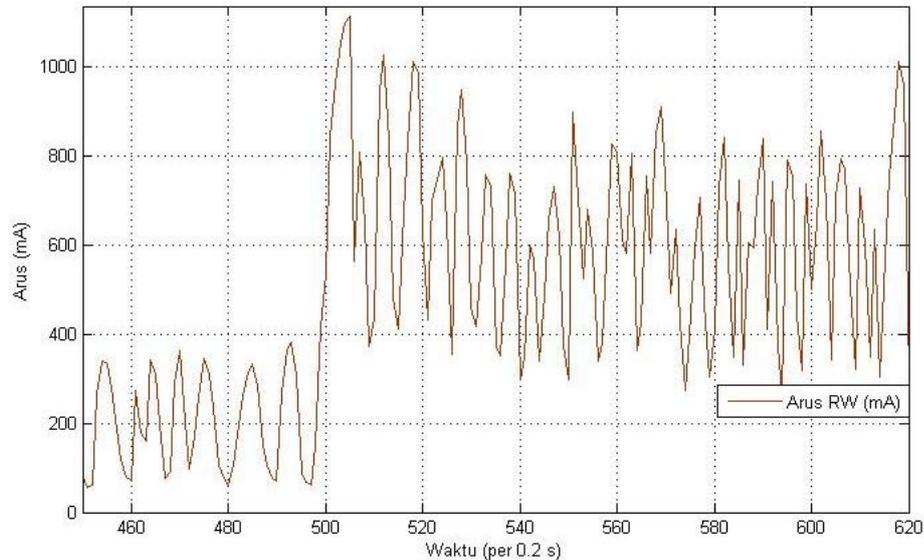
Gambar 5.12. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -30 deg/s

Prinsip yang sama pun berlaku untuk nilai target kedua, yaitu -30 deg/s seperti pada gambar 5.12. Pada saat sistem diberikan nilai target -30 deg/s, aktuator RW akan berupaya memberikan torsi kendali dan melawan torsi friksi untuk dapat mencapai nilai target yang diberikan, hanya saja dengan arah kecepatan sudut dan torsi-torsi yang berkebalikan dengan kondisi sebelumnya. Untuk dapat menghasilkan torsi kendali positif, aktuator RW harus menghasilkan percepatan sudut positif dengan nilai konstan, seperti tampak pada gambar 5.13.

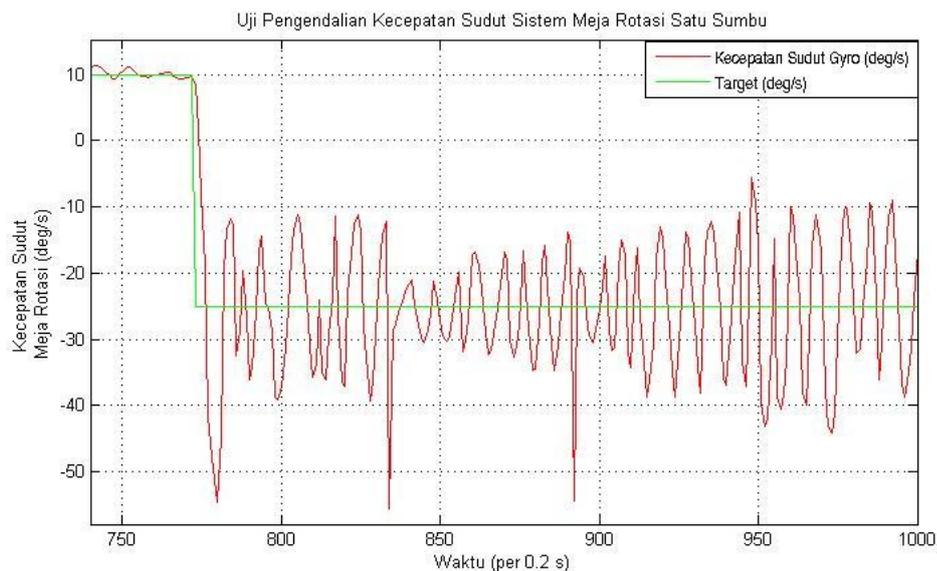


Gambar 5.13. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -30 deg/s

Percepatan sudut pada aktuator RW akan mengakibatkan arus meningkat dan memiliki nilai yang cenderung konstan pada saat nilai target yang diberikan telah tercapai, seperti tampak pada gambar 5.14. Nilai arus ini akan sebanding dengan nilai percepatan sudut yang dihasilkan pada aktuator RW.



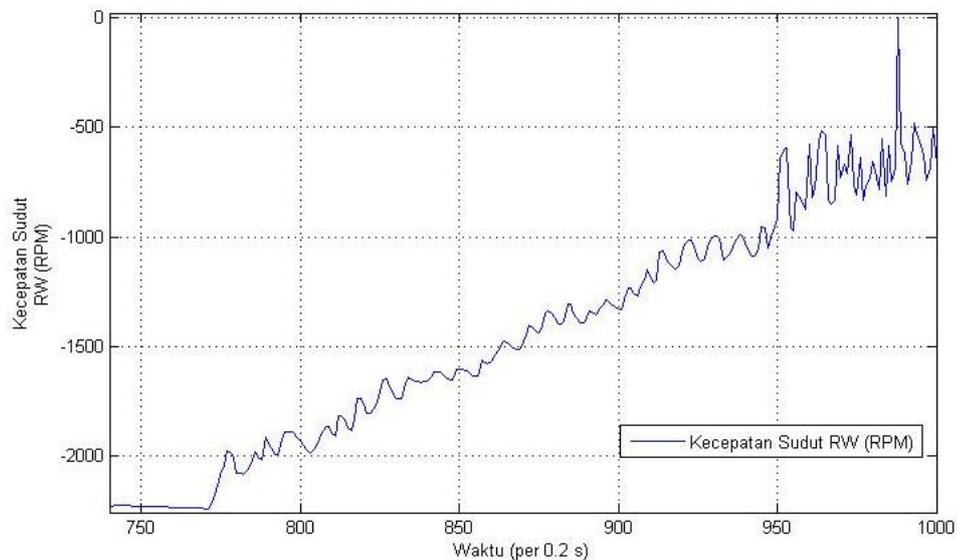
Gambar 5.14. Grafik hasil pembacaan arus RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -30 deg/s



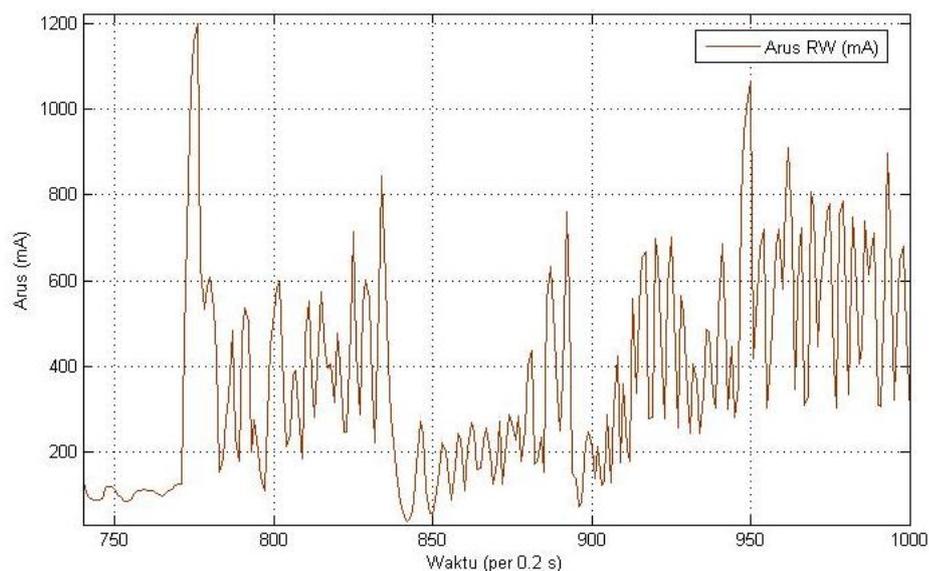
Gambar 5.15. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut sensor giroskop pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -25 deg/s

Kondisi perubahan yang sama diperoleh ketika nilai target kecepatan sudut diubah dari nilai 10 deg/s ke -25 deg/s seperti tampak pada gambar 5.15. Kecepatan RW akan terus meningkat untuk menghasilkan torsi kendali yang

dibutuhkan untuk melawan torsi gesekan meja rotasi, guna mempertahankan kecepatan sudut aktual sistem tetap pada nilai targetnya, seperti tampak pada gambar 5.16.



Gambar 5.16. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -25 deg/s



Gambar 5.17. Grafik hasil pembacaan arus RW pada pengendalian kecepatan sudut untuk nilai target -25 deg/s

Dari hasil-hasil pengujian nyata sistem pengendalian meja rotasi tersebut, terdapat perbedaan dengan hasil keluaran simulasi model, dimana pada sistem nyata, terdapat osilasi pada hasil keluarannya. Hal ini mungkin disebabkan oleh

ketidakidealan sistem meja rotasi yang menghasilkan variasi perpindahan posisi sudut pada arah sumbu lainnya (*pitch* dan atau *roll*) sehingga meja rotasi berosilasi pada arah aksialnya, dimana pada pemodelan hal ini tidak ikut dipertimbangkan. Osilasi pada arah aksial ini membuat torsi friksi dari meja rotasi menjadi tidak homogen dan ikut berosilasi terhadap perubahan posisi sudutnya, sehingga menyebabkan torsi kendali yang dihasilkan aktuator RW pun ikut berosilasi. Selain itu, pada pengukuran inersia sistem meja rotasi pun, terdapat asumsi untuk mengabaikan torsi gesekan sistem, sehingga pendekatan model yang dihasilkan sedikit berbeda dengan sistem nyatanya.

5.3.3. Implementasi Algoritma Pengendalian Posisi Sudut Sistem

Seperti telah dijelaskan pada sub-bab 4.1.2, bahwa untuk pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu digunakan metode Ciancone. Adapun pemrograman mikrokontroler WDE dalam bahasa C-ANSI, untuk algoritma kendali tersebut diimplementasikan sebagai berikut

```
delta_angle = gyro_angle - angle_target;
angle_sum = angle_sum + (delta_angle * gyro_delay_Act) / i_angle_const;
pwm_target = p_angle_const * (delta_angle + angle_sum - (gyro_rate * d_angle_const));
```

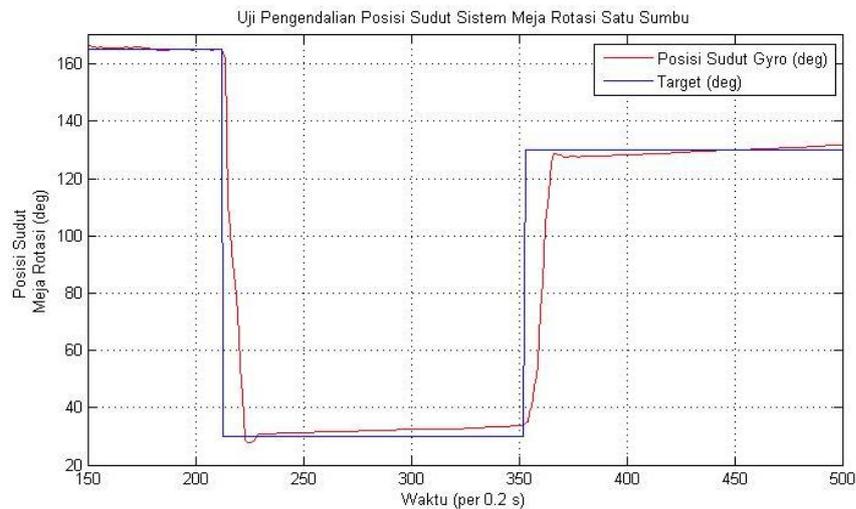
dengan konstanta p_angle_const , i_angle_const dan d_angle_const merupakan parameter-parameter pengendali PID yang sesuai dengan $K_c = 60$, $T_i = 240$ dan $T_d = 5$ yang diperoleh dari pemodelan pengendali.

5.3.4. Hasil Pengujian Pengendalian Posisi Sudut Sistem

Setelah *listing* program pengendalian tersebut ditanamkan pada memori *flash* mikrokontroler WDE, selanjutnya dilakukan pengujian terhadap sistem pengendalian ini. Pada pengujian, data-data telemetri secara terus-menerus dikirimkan oleh WDE pada sistem meja rotasi, yang kemudian disimpan untuk dianalisa. Dengan memberikan beberapa masukan nilai target posisi sudut berbeda melalui *command* yang dikirimkan melalui frekuensi *uplink*, diperoleh hasil seperti ditampilkan pada gambar 5.18.

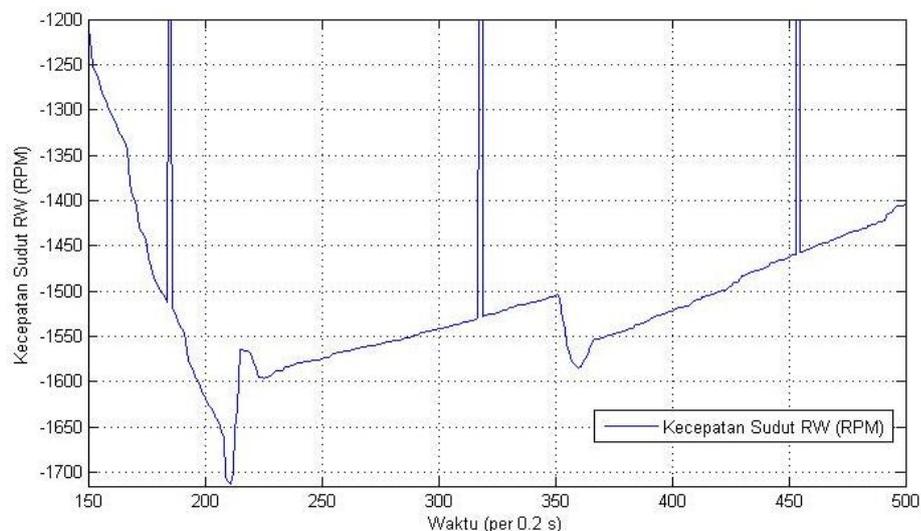
Dari hasil keluaran posisi sudut sistem meja rotasi gambar 5.18, tampak bahwa keluaran pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi satu sumbu mampu

mengikuti nilai target yang diberikan, namun masih terdapat *error steady state* pada keluaran sistem.



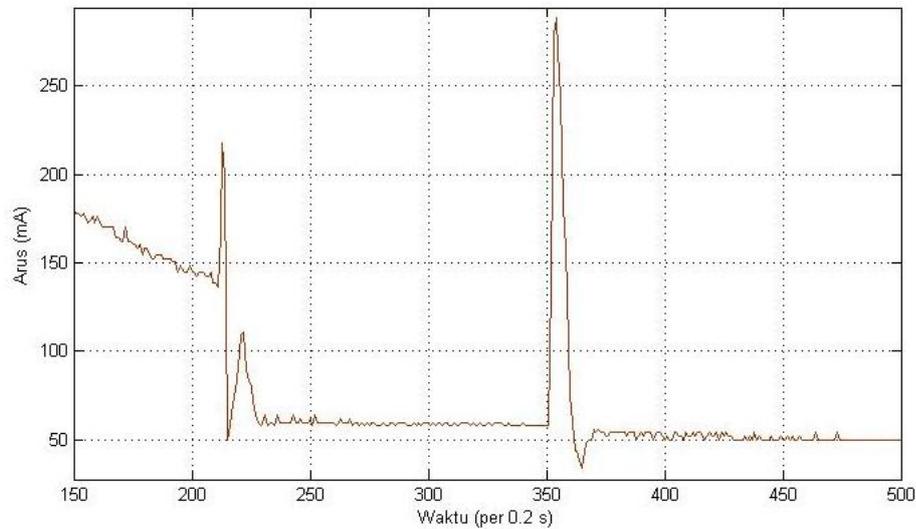
Gambar 5.18. Grafik hasil pembacaan sensor giroskop pada pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi untuk nilai target 165 deg, 30 deg dan 130 deg

Pada gambar 5.18, nilai target yang diberikan pada sistem diubah dari 165 derajat ke 30 derajat pada detik ke 42.4, aktuator RW yang sebelumnya dipercepat pada arah negatif (percepatan negatif) mengubah arah percepatan pada detik tersebut, dengan sedikit osilasi untuk menyesuaikan nilai aktual dari posisi sudut sistem.



Gambar 5.19. Grafik hasil pembacaan kecepatan sudut RW pada pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi untuk nilai target 165 deg, 30 deg dan 130 deg

Osilasi ini disebabkan karena fluktuasi pada arus, yang berarti torsi kendali bekerja pada sistem untuk menyesuaikan keluaran posisi sudut sistem. Setelah posisi sudut target tercapai, arus atau torsi dari RW cenderung konstan untuk mempertahankan posisi sudut sistem agar tetap sesuai dengan nilai target.



Gambar 5.20. Grafik hasil pembacaan arus RW pada pengendalian posisi sudut sistem meja rotasi untuk nilai target 165 deg, 30 deg dan 130 deg

Selanjutnya, nilai target posisi sudut diubah dari 30 derajat ke 130 derajat pada detik ke 70.4, aktuator RW akan memberikan torsi kendali yang direpresentasikan dengan fluktuasi keluaran arus pada detik tersebut. Setelah posisi sudut target tercapai, arus atau torsi dari RW akan cenderung konstan untuk mempertahankan posisi sudut sistem agar tetap sesuai dengan nilai target.

BAB VI

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dan pembahasan yang diuraikan dalam bab-bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi dan implementasi nyata dari pengendalian kecepatan sudut, sistem meja rotasi berhasil dikendalikan dengan baik menggunakan pengendali PID, dengan parameter pengendali $K_c = 9.18$, $T_i = 4.2$ dan $T_d = 1.05$.
2. Berdasarkan hasil simulasi dan implementasi nyata dari pengendalian posisi sudut, sistem meja rotasi berhasil dikendalikan dengan baik menggunakan pengendali PID, dengan parameter pengendali $K_c = 60$, $T_i = 240$ dan $T_d = 5$.
3. Berdasarkan hasil pengujian eksperimen sistem meja rotasi satu sumbu memiliki torsi gesekan yang cukup signifikan, sehingga karakteristik redamannya perlu untuk dipertimbangkan dalam perancangan model sistem.
4. Berdasarkan hasil perancangan dan simulasi sistem meja rotasi, model dapat mewakili sistem nyata dengan baik, sehingga parameter-parameter model dan pengendali yang diperoleh dari simulasi model dapat digunakan pada implementasi pengendalian sikap meja rotasi secara nyata.
5. Dari hasil simulasi dan penerapan algoritma *double exponential smoothing* pada sensor giroskop, algoritma ini terbukti dapat digunakan untuk mengurangi *noise* acak dari pengukuran sensor dan dapat diterapkan pada prosesor sekelas 8-bit.
6. Berdasarkan hasil pengujian eksperimen diperoleh bahwa, aktuator *reaction wheel* dan sensor giroskop MEMS dapat digunakan sebagai *feedback control* dalam pengendalian sikap sistem meja rotasi satu sumbu.
7. Sistem meja rotasi memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan kondisi orbit ruang angkasa, oleh karena keberadaan torsi gesekan yang cukup signifikan. Namun sistem tetap dapat dikendalikan dengan baik, sehingga dapat digunakan untuk aplikasi-aplikasi pengendalian *attitude* lainnya seperti robotika ataupun sistem navigasi darat.

DAFTAR REFERENSI

- [1] J. Wertz. 1999. *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Kluwers Academic Publisher, USA.
- [2] P. Butz, U. Renner. 1996. *TUBSAT-C, A MICROSAT-BUS FOR EARTH OBSERVATION PAYLOADS*. 3rd International Symposium “Small Satellites Systems and Services“, Annecy, France.
- [3] Space Systems Product Development, “*Reaction Wheel Design*”. Dept. of Aeronautics and Astronautics, MIT University, 2003.
- [4] FAULHABER. 2009. *BLDC Motor type 2444 B*. www.faulhaber.com., diakses tanggal 21 Juli 2009.
- [5] T.E. Marlin. 2000. *Process Control*. 2nd Ed. McGraw-Hill Higher Education, USA
- [6] N. M. Barbour. 2010. *Inertial Navigation Sensors*. RTO-EN-SET-116 (2010)
- [7] Gyration. *Microgyro 100 Spesification*. DE00019-001 Rev. 1.20
- [8] Widada, Wahyu. 2010. ” *Metoda Digital Exponential Filtering Untuk Sensor Embedded Inertial Measurements Unit Payload Roke?*”, Jurnal Teknologi LAPAN.
- [9] Stefan Schulz, U. Renner. *DLR-TUBSAT: A Microsatellite for Interactive Earth Observation*.
- [10] S. Schulz. 2001. *Interaktive Lageregelung zur Erdbeobachtung mit Mikrosatelliten am Beispiel DLR-TUBSAT*. Doctoral Thesis.
- [11] K. Ogata. 2002. *Modern Control Engineering*. 4th Ed. Prentice Hall, USA
- [12] MATLAB. 2008. Help – Rotational Friction Block, Simscape Library. Version 7.6.0.324