



TESIS – TE 142599

IMPLEMENTASI KONTROL BILATERAL UNTUK 1 DOF *HAPTIC MANIPULATOR*

VITA PERMATASARI
NRP. 2212204201

DOSEN PEMBIMBING
Ir. Djoko Purwanto, M.Eng, Ph.D.
Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK ELEKTRONIKA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS – TE 142599

IMPLEMENTATION OF BILATERAL CONTROL FOR 1 DOF HAPTIC MANIPULATOR

VITA PERMATASARI
NRP. 2212204201

SUPERVISOR
Ir. Djoko Purwanto, M.Eng, Ph.D.
Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.

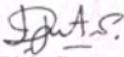
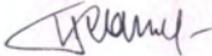
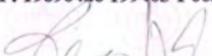
MAGISTER PROGRAM
FIELD STUDY OF ELECTRONIC ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
Vita Permatasari
Nrp. 2212204201

Tanggal Ujian : 22 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh:

- 
1. Ir. Djoko Purwanto, M. Eng., Ph.D (Pembimbing I)
NIP: 19651211 199002 1 002
- 
2. Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT (Pembimbing II)
NIP: 19700212 199512 1 001
- 
3. Dr. Muhammad Rivai, ST., MT (Penguji)
NIP: 19690426 199403 1 003
- 
4. Achmad Arifin, ST., M.Eng., Ph.D (Penguji)
NIP: 19710314 199702 1 001
- 
5. Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D (Penguji)
NIP: 19810118 200312 1 003



Direktur Program Pascasarjana,

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.
NIP: 19640405 199002 1 001

IMPLEMENTASI KONTROL BILATERAL UNTUK 1 DOF *HAPTIC MANIPULATOR*

Nama Mahasiswa : Vita Permatasari
NRP : 2212204201
Dosen Pembimbing : 1. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng, Ph.D.
2. Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.

ABSTRAK

Dalam melaksanakan pekerjaannya, manusia seringkali menemui kendala antara lain kendala jarak dan tingkat keamanan kondisi lingkungan kerja. Teknologi telerobotik yang memiliki fungsi *haptic* menjadi salah satu solusi permasalahan tersebut. Pada penelitian ini dibuat rancang bangun sistem 1 DOF *haptic manipulator* dengan konfigurasi master slave menggunakan kontrol bilateral *haptic* manipulator. Pada kontrol bilateral posisi dan informasi ditransmisikan secara dua arah antara dua manipulator. Informasi posisi didapatkan menggunakan potensiometer dan informasi gaya didapatkan dengan merepresentasikan gaya dengan arus menggunakan sensor WCS2702. Terdapat tiga metode kontrol yang digunakan, yaitu kontrol bilateral posisi simetris, kontrol bilateral refleksi gaya dan kontrol bilateral umpan balik gaya. Metode kontrol dengan hasil terbaik yaitu kontrol bilateral umpan balik gaya. Pada sistem kontrol bilateral umpan balik gaya, slave dapat bergerak mengikuti pergerakan master dengan error posisi $\pm 2^\circ$. Ketika lengan slave ditahan obyek keras, lengan master juga tertahan dengan error posisi $\pm 11^\circ$. Sedangkan ketika lengan slave ditahan obyek lunak, pantulan obyek dirasakan lengan master dengan error posisi $\pm 10^\circ$. Pergerakan lengan master dan slave lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris dan kontrol bilateral refleksi gaya.

Kata kunci: Kontrol Bilateral, *Haptic*, Posisi Simetris, Refleksi Gaya, Umpan Balik Gaya.

IMPLEMENTATION OF BILATERAL CONTROL FOR 1 DOF *HAPTIC* MANIPULATOR

By : Vita Permatasari
Student Identity Number : 2212204201
Supervisor : 1. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng, Ph.D.
2. Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT.

ABSTRACT

In daily life, human come across various problems in their works, such as far distance between workplaces, and the safety level of the working environment. One of the solution for those problems is telerobotic technology with *haptic* function. In this research, the design of 1 DOF *haptic* manipulator is realized using bilateral control. Master slave configuration is used in the manipulator. For the bilateral control, position and information are transmitted bidirectionally between two manipulators. The position is measured using a potentiometer and force is measured by electrical current representing the force using WCS2702 sensor. Three control methods are applied, namely simetriscal position bilateral control, force reflection bilateral control, and force feedback bilateral control. Among the three, force feedback bilateral control produces the best result of which slave is able to copy the movement of the master with position error of $\pm 2^\circ$. Moreover when the arm of the slave is obstructed by a solid object, the arm of the master is also stop with a position error of $\pm 11^\circ$. Furthermore when the arm of the slave is obstructed by a soft object, stiffness of the object is also sensed by user operating the master with a position error of $\pm 10^\circ$. Last, but not least, the arm movement of both manipulators are lighter than when simetriscal position bilateral control and force reflection bilateral control are employed.

Keywords: Bilateral Control, *Haptic*, Simetriscal Position, Force Reflection, Force Feedback.

KATA PENGANTAR

Laa haula wa laa quwwata illaa billah. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Dua kalimat yang sangat luar biasa. Alhamdulillah, Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena hanya dengan kuasa dan nikmat-Nya lah tesis ini dapat diselesaikan. Tesis berjudul “*Implementasi Kontrol Bilateral untuk 1 DOF Haptic Manipulator*” ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik (MT) pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan ketulusan dan kerendahan hati penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibunda Lilik Seyowati dan Ayahanda Supariyanto tercinta. Karena dukungan dan doa kalian menjadi motivasi dan kekuatan hingga terselesaikannya tesis ini.
2. Mama Hanunah Achmad dan Ayah Bahrul Ulum atas segala dukungan dan doanya hingga terselesaikannya tesis ini.
3. Suami tercinta Ahmad Fahriannur yang senantiasa memberikan dukungan dan doa serta selalu menemani selama suka duka perjuangan tesis.
4. Mbak Fera, Mas Gunawan dan keponakan tersayang M. Asyraf yang senantiasa memberikan semangat.
5. Adek Syakib, Ashni dan Ifur, atas semua dukungan dan doanya.
6. Bapak Ir. Djoko Purwanto, M.Eng., Ph.D dan Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran, bantuan, bimbingan dan ilmu.
7. Bapak Dr. Muhammad Rivai, ST, MT., Bapak Achmad Arifin, ST., M.Eng., Ph.D, dan Bapak Ronny Mardiyanto, ST., MT., Ph.D selaku dosen penguji yang telah banyak memberikan saran dan ilmu.

8. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Elektro yang telah banyak memberikan ilmu selama penulis menempuh kuliah.
9. Rekan–rekan seperjuangan elka, mas Bayu, mas Oky, mas Riki, pak Dadang, mas Dwi, pak Edi, Riza, pak Tukadi, mas Adam, Karisma, mas Himawan, suhu Fauzan, mas Hepi, Gusdur, pak Ribut, Yanti, Eva, Puput, Nada, Sulfan, Rendy, bang Dedi, mas Roy, pak Joko Subur, mas Hadid, mas Rizal, mas Bakti, Wahyu, Bagus, Nita, Dina, Alfian, Mamat serta teman-teman lainnya atas segala bantuan dan sumbangan pikiran dan tenaga dalam menyelesaikan tesis ini.

Pada akhirnya, penulis menyadari bahwa tesis ini masih belum sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta bagi masyarakat.

Surabaya, 03 Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| ABSTRAK | iii |
| KATA PENGANTAR | vii |
| DAFTAR ISI..... | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL..... | xvii |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian..... | 2 |
| BAB 2 DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA..... | 3 |
| 2.1 Sensasi Sentuhan | 3 |
| 2.2 <i>Haptic</i> | 4 |
| 2.3 Sistem Kontrol Bilateral | 9 |
| 2.4 Modul Sensor WCS2702..... | 10 |
| 2.5 Motor DC | 12 |
| 2.6 Penelitian Sebelumnya | 13 |
| BAB 3 METODA PENELITIAN | 15 |
| 3.1 Perancangan Perangkat Keras | 16 |
| 3.2 Perancangan Perangkat Lunak | 18 |
| 3.2.1 Kontrol Bilateral Posisi Simetris..... | 18 |
| 3.2.2 Kontrol Bilateral Refleksi Gaya..... | 19 |
| 3.2.3 Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya..... | 20 |
| BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA SISTEM | 25 |
| 4.1 Pengujian Performansi Motor | 25 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| 4.2 | Pengujian Sensor Arus..... | 27 |
| 4.2.1 | Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Tangan..... | 28 |
| 4.2.2 | Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor..... | 29 |
| 4.2.3 | Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor kemudian Lengan Slave Ditahan..... | 32 |
| 4.2.4 | Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya | 35 |
| 4.3 | Pengujian Sensor Posisi | 37 |
| 4.4 | Pengujian Kontrol Bilateral Posisi Simetris | 38 |
| 4.4.1 | Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas | 39 |
| 4.4.2 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras..... | 40 |
| 4.4.3 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak..... | 41 |
| 4.5 | Pengujian Kontrol Bilateral Refleksi Gaya | 43 |
| 4.5.1 | Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas | 43 |
| 4.5.2 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras..... | 45 |
| 4.5.3 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak..... | 47 |
| 4.6 | Pengujian Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya | 49 |
| 4.6.1 | Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas | 49 |
| 4.6.2 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras..... | 51 |
| 4.6.3 | Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak..... | 53 |
| 4.6.4 | Kondisi saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave | 54 |
| BAB 5 PENUTUP | | 57 |
| 6.1 | Kesimpulan | 57 |
| 6.2 | Saran | 57 |
| DAFTAR PUSTAKA..... | | 59 |

| | |
|-----------------------------|----|
| DAFTAR PUBLIKASI..... | 61 |
| LAMPIRAN..... | 63 |
| RIWAYAT HIDUP PENULIS | 69 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 4. 1 Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya..... | 36 |
| Tabel 4. 2 Pengujian sensor posisi | 37 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2. 1 Haptic Manipulator | 4 |
| Gambar 2. 2 <i>Telesurgery Vision</i> | 8 |
| Gambar 2. 3 <i>Telemaintenance</i> | 8 |
| Gambar 2. 4 Konsep Kontrol Bilateral | 9 |
| Gambar 2. 5 Diagram Blok Sensor WCS2702..... | 10 |
| Gambar 2. 6 Modul Sensor WCS2702..... | 11 |
| Gambar 2. 7 Grafik Kerja Sensor WCS2702..... | 12 |
| Gambar 2. 8 Rangkaian Listrik Pada <i>Armeture</i> dan Body Diagram Rotor Motor DC | 12 |
| Gambar 3. 1. Diagram Blok Alat secara Umum | 15 |
| Gambar 3. 2. Tahapan Penelitian | 16 |
| Gambar 3. 3. Diagram Blok Alat | 17 |
| Gambar 3. 4. Realisasi Sistem Keseluruhan | 17 |
| Gambar 3. 5. Diagram Blok Kontrol Bilateral Posisi Simetris..... | 19 |
| Gambar 3. 6. Diagram Blok Kontrol Bilateral Dengan Refleksi Gaya..... | 20 |
| Gambar 3. 7. Diagram Blok Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya..... | 21 |
| Gambar 3. 8. <i>Flowchart</i> Algoritma Kontrol Bilateral Posisi Simetris..... | 22 |
| Gambar 3. 9. <i>Flowchart</i> Algoritma Kontrol Bilateral Refleksi Gaya..... | 23 |
| Gambar 3. 10. <i>Flowchart</i> Algoritma Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya..... | 24 |
| Gambar 4. 1 Mekanisme Pengujian Karakteristik Motor | 26 |
| Gambar 4. 2 Karakteristik Motor Master | 26 |
| Gambar 4. 3 Karakteristik Motor Slave | 27 |
| Gambar 4. 4 Pemasangan Sensor Arus | 27 |
| Gambar 4. 5 Mekanisme Pengujian Karakteristik Arus saat Lengan Motor Digerakkan Menggunakan Tangan | 28 |
| Gambar 4. 6. Data Posisi saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Tangan | 28 |
| Gambar 4. 7. Data Arus saat Lengan Manipulator Digerakkan oleh Tangan..... | 29 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 8. M ekanisme Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor..... | 30 |
| Gambar 4. 9. Data Posisi ketika Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor | 31 |
| Gambar 4. 10. Data Arus ketika Lengan Manipulator Digerakkan oleh Motor... | 31 |
| Gambar 4. 11. P engujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan (a) Lengan Master Dapat Bergerak, (b) Lengan Master Tidak Dapat Bergerak..... | 33 |
| Gambar 4. 12. D ata Posisi saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan..... | 34 |
| Gambar 4. 13. D ata Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan..... | 34 |
| Gambar 4. 14. G rafik Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya | 36 |
| Gambar 4. 15. G rafik Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya | 37 |
| Gambar 4. 16. G rafik Perubahan Nilai ADC terhadap Perubahan Sudut..... | 38 |
| Gambar 4. 17 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Lengan Slave Bergerak Bebas..... | 38 |
| Gambar 4. 18. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Bergerak Bebas..... | 39 |
| Gambar 4. 19 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras | 40 |
| Gambar 4. 20. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras..... | 41 |
| Gambar 4. 21 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Pergerakan Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak..... | 41 |
| Gambar 4. 22. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak..... | 42 |
| Gambar 4. 23. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas..... | 43 |
| Gambar 4. 24. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas..... | 44 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 25. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya Saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras..... | 45 |
| Gambar 4. 26. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras | 46 |
| Gambar 4. 27. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak | 47 |
| Gambar 4. 28. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak | 48 |
| Gambar 4. 29. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas | 49 |
| Gambar 4. 30. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas | 50 |
| Gambar 4. 31. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras | 51 |
| Gambar 4. 32. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras | 52 |
| Gambar 4. 33. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak | 53 |
| Gambar 4. 34. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak | 54 |
| Gambar 4. 35. G rafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave ... | 55 |
| Gambar 4. 36. G rafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave ... | 56 |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam melakukan aktivitas atau pekerjaannya, manusia seringkali menemui berbagai kendala. Kendala-kendala tersebut antara lain waktu, jarak dan tingkat keamanan pekerjaan. Waktu menjadi sangat penting dalam situasi darurat yang membutuhkan penanganan cepat dan tepat terutama jika menyangkut keselamatan hidup manusia. Jarak yang jauh atau jalur perjalanan yang kurang lancar menyebabkan penyelesaian suatu pekerjaan menjadi tidak optimal. Hal ini sesuai dengan geografis Indonesia yang merupakan negara kepulauan dengan tenaga ahli yang tersebar kurang merata atau situasi kota-kota besar di Indonesia yang rawan terjadi kemacetan. Selain itu, tingkat keamanan sebuah pekerjaan harus menjadi prioritas perusahaan untuk menjamin keselamatan kerja para pekerjanya. Teknologi telerobotik diciptakan sebagai salah satu solusi untuk permasalahan tersebut. Teknologi ini memungkinkan manusia sebagai operator mengontrol suatu robot untuk melakukan tindakan pada suatu obyek. Sistem telerobotik umumnya terdiri dari dua buah manipulator yaitu manipulator master yang dikendalikan oleh operator dan manipulator slave yang menyentuh obyek (*environment*). Gerakan manipulator slave mengikuti gerakan manipulator master yang dikendalikan operator. Teknologi ini membuat pekerjaan dapat diselesaikan dengan cepat dan tepat oleh operator tanpa harus menuju lokasi obyek (*environment*) atau menyentuh obyek secara langsung.

Umumnya sistem telerobotik hanya memberikan informasi visual kondisi obyek (umpan balik visual) kepada operator. Sehingga keputusan diambil operator hanya berdasarkan informasi visual. Sensasi sentuhan sangat penting untuk dalam berbagai macam kegiatan. (Katsura dkk, 2005). Sistem telerobotik yang tidak memiliki fungsi *haptic* memiliki banyak resiko. Teknologi *haptic* memungkinkan operator merasakan sensasi sentuhan. Dengan adanya sensasi sentuhan, operator merasakan seolah-olah menyentuh obyek secara langsung sehingga keputusan yang diambil lebih tepat dan akurat. Dengan adanya teknologi

haptic, pengembangan telerobotik menjadi lebih luas mencakup berbagai bidang. Dalam bidang medis antara lain robot bedah, pelatihan medis, visualisasi ilmiah, teknologi bantu untuk tunanetra. *Haptic* juga digunakan untuk aplikasi industri seperti *maintenance* dan *manufacturing*. Aplikasi lainnya antara lain robot penyelamat, militer, *museum display*, dan hiburan

Salah satu metode untuk menghasilkan sensasi sentuhan adalah kontrol bilateral. Hasil penelitian ini diharapkan mampu merealisasikan sistem manipulator yang dapat merasakan sentuhan.

1.2 Perumusan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa permasalahan yang harus diselesaikan, yaitu :

- 1 Rancang bangun 1 DOF *haptic* manipulator dengan konfigurasi master slave
- 2 Implementasi kontrol bilateral posisi simetris
- 3 Implementasi kontrol bilateral refleksi gaya
- 4 Implementasi kontrol bilateral umpan balik gaya
- 5 Evaluasi kemampuan sistem untuk merasakan sensasi sentuhan

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah rancang bangun sistem 1 DOF *haptic* manipulator dengan konfigurasi master slave menggunakan kontrol bilateral *haptic* manipulator untuk merasakan sensasi sentuhan.

Manfaat dari penelitian ini adalah adanya sistem manipulator yang mampu merasakan sensasi sentuhan

BAB 2

DASAR TEORI DAN KAJIAN PUSTAKA

Pada bab ini membahas mengenai teori penunjang sistem dan metoda-metoda yang dipakai serta membahas mengenai kajian pustaka berisi penelitian sebelumnya yang dijadikan sebagai referensi dalam membangun penelitian ini. Teori penunjang dimaksud diantaranya adalah sensasi sentuhan, *haptic*, kontrol bilateral, modul sensor WCS2702 dan motor DC.

2.1 Sensasi Sentuhan

Indra kita adalah alat fisiologis untuk mengamati informasi lingkungan. Manusia memiliki setidaknya lima indera (seperti yang didefinisikan dan diklasifikasikan oleh Aristoteles) yaitu indera penglihatan, pendengaran, penciuman, sentuhan atau peraba, dan perasa. Indra tersebut merasakan ketika neuron sensorik bereaksi terhadap rangsangan dan mengirim pesan ke sistem saraf pusat. Setiap rasa ditandai oleh banyak faktor, seperti jenis-jenis data yang diterima dan diterima, kepekaan terhadap data dalam hal resolusi temporal dan spasial, informasi tingkat pengolahan atau bandwidth, dan kemampuan reseptor untuk beradaptasi dengan data yang diterima (El Saddik,2011).

Indra peraba terdistribusi di semua bagian tubuh, tidak seperti keempat indera lainnya yang terpusat di bagian tubuh tertentu. Indra peraba disusun oleh sensor taktil aktif seperti tangan yang mempunyai hubungan dengan kinestetik. Setiap bagian tubuh memiliki tingkat sensitivitas yang berbeda. Variasi ini dikarenakan kulit adalah antarmuka yang membagi empat modalitas sensasi, yaitu sentuhan (termasuk sentuhan ringan dan tekanan), dingin, panas, dan nyeri. Selain itu, kombinasi dari dua atau lebih modalitas dapat digunakan untuk mengkarakterisasi sensasi seperti kekasaran, basah, dan getaran. Seorang manusia tidak akan mampu merasakan dan merespon lingkungan fisik tanpa reseptor taktil terletak di seluruh tubuh (El Saddik,2011).

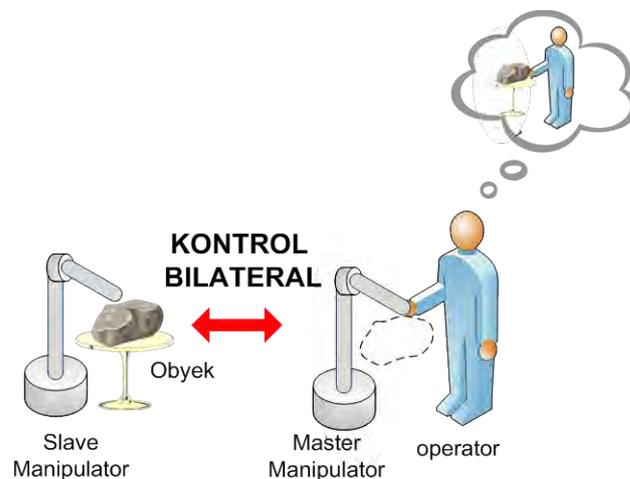
Robles de la Torre menyatakan bahwa kehilangan rasa sentuh memiliki efek negatif seperti gangguan ketangkasan tangan, hilangnya persepsi posisi, dan ketidakmampuan untuk berjalan. Setiap hari manusia menggunakan antarmuka

manusia-komputer untuk berinteraksi, berkomunikasi, atau melakukan berbagai tugas. Teknologi *haptic* memungkinkan sentuhan interaksi dengan lingkungan semu (El Saddik,2011).

Pada penelitian ini sensasi sentuhan yang dimaksud berkaitan dengan kinestetik yaitu merasakan pergerakan. Sistem menerapkan gaya untuk menggerakkan atau menghambat pergerakan tubuh. Dengan menerapkan umpan balik gaya sebagai reaksi obyek yang disentuh, diharapkan sistem mampu merasakan kekakuan obyek, apakah obyek tersebut lunak atau keras.

2.2 Haptic

Haptics, sebuah istilah yang berasal dari kata Yunani "haptesthai" yang berarti "of or relating to the sense of touch," mengacu pada ilmu penginderaan manual (eksplorasi untuk ekstraksi informasi) dan manipulasi (untuk memodifikasi lingkungan) melalui sentuhan. Hal ini juga telah digambarkan sebagai "the sensibility of the individual to the world adjacent to his body by the use of his body". Kata ini diperkenalkan pada awal abad kedua puluh oleh para peneliti di bidang psikologi eksperimental untuk merujuk pada sentuhan aktif benda nyata oleh manusia. Pada akhir 1980-an, istilah didefinisikan kembali untuk memperbesar ruang lingkup untuk mencakup semua aspek *machine touch* dan *human-machine touch interaction*. Menyentuh obyek dapat dilakukan oleh manusia, mesin, atau kombinasi keduanya, dengan lingkungan yang nyata, semu,



Gambar 2. 1 Haptic Manipulator

atau kombinasi keduanya. Interaksi tersebut dapat disertai dengan modalitas sensorik lain seperti penglihatan atau audisi. Berbagai disiplin ilmu, seperti biomekanik, psikologi, neurofisiologi, teknik, dan ilmu komputer, menggunakan istilah ini untuk merujuk pada studi tentang sentuhan manusia dan umpan balik gaya dengan lingkungan eksternal.(El Saddik,2011)

Konsep penting dan terminologi yang berhubungan dengan *haptics* :

- *Haptic*: ilmu menerapkan taktil, kinestetik, atau sensasi keduanya untuk interaksi manusia-komputer . Hal ini mengacu pada kemampuan merasakan dan memanipulasi objek dalam lingkungan alam atau sintetis menggunakan antarmuka *haptic* .
- *Cutaneous*: berkaitan dengan atau melibatkan kulit. Ini termasuk sensasi tekanan, suhu, dan nyeri .
- *Tactile*: berkaitan dengan *cutaneous*, tetapi lebih khusus sensasi tekanan daripada suhu atau rasa sakit. Informasi taktil antara lain: tekstur, getaran, dan benjolan
- *Kinesthetic*: berkaitan dengan merasakan pergerakan. Hal ini terkait dengan sensasi yang berasal dari otot, tendon, dan sendi. Informasi kinestetik antara lain berat,
- *Force feedback*: berkaitan dengan produksi mekanik informasi yang dapat dirasakan oleh sistem kinestetik manusia.
- *Haptics* atau teknologi *haptic*: bidang interdisipliner yang muncul yang berkaitan dengan pemahaman sentuhan manusia (*haptic* manusia), karakteristik motorik (*haptics* mesin), dan dengan pengembangan sistem yang dikendalikan komputer (*haptics* komputer) yang memungkinkan interaksi fisik dengan nyata atau semu lingkungan melalui sentuhan .
- Komunikasi *Haptic*: sarana yang manusia dan mesin berkomunikasi melalui sentuhan
- Perangkat *haptic*: adalah manipulator dengan sensor, aktuator, atau keduanya. Berbagai perangkat *haptic* telah dikembangkan untuk tujuan mereka sendiri. Yang paling populer adalah berbasis taktil, berbasis pena,mdan umpan balik gaya 3 DOF

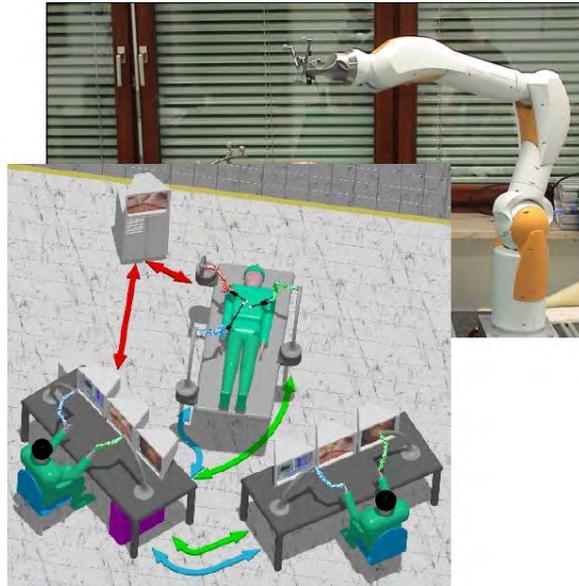
- Antarmuka *Haptic*: terdiri dari perangkat *haptic* dan mekanisme kontrol komputer berbasis software. Hal ini memungkinkan komunikasi manusia-mesin melalui indera peraba. Dengan menggunakan antarmuka *haptic*, seseorang tidak hanya dapat memberi informasi ke komputer tetapi juga dapat menerima informasi atau umpan balik berupa sensasi fisik pada beberapa bagian tubuh.
- Persepsi *Haptic (Haptic Perception)*: proses memahami karakteristik benda melalui sentuhan.
- *Haptic rendering*: proses menghitung rasa sentuhan, terutama *force*. Ini melibatkan sampling sensor posisi pada perangkat *haptic* untuk mendapatkan posisi pengguna dalam lingkungan semu. Informasi posisi yang diterima digunakan untuk memeriksa apakah ada tabrakan antara pengguna dan setiap objek dalam lingkungan semu. Jika tabrakan terdeteksi, modul render *haptic* akan menghitung kekuatan umpan balik yang sesuai yang akhirnya akan diterapkan ke pengguna melalui aktuator. Render *Haptic* yang terdiri dari tiga bagian, algoritma deteksi tabrakan, algoritma respon tabrakan, dan algoritma kontrol .
- Sensor dan Aktuator: sensor berfungsi untuk merasakan informasi *haptic* yang diberikan oleh pengguna pada objek tertentu dan mengirimkan pembacaan gaya ini ke modul render *haptic*. Aktuator berfungsi untuk membaca data *haptic* dikirim oleh modul render *haptic* dan mengubah informasi ini menjadi bentuk dipahami oleh manusia.
- *Tele-haptics*: ilmu transmisi sensasi *haptic* object/lingkungan, dengan menggunakan jaringan seperti internet ke operator manusia. Dengan kata lain, itu adalah perluasan dari manusia menyentuh sensasi/kemampuan melampaui batas jarak fisik .
- *Tele-presence*: situasi penginderaan informasi yang cukup tentang lingkungan *remote worksite* dan mengkomunikasikan hal ini kepada operator manusia sehingga operator merasa secara fisik hadir di lokasi remote. Suara, gerakan, tindakan pengguna, dll dapat dirasakan,

ditransmisikan, dan digandakan di lokasi remote. Informasi dapat bersifat dua arah antara pengguna dan lokasi remote.

- *Semu Reality (VR)*: digambarkan sebagai simulasi komputer dunia nyata atau semu di mana pengguna dapat berinteraksi dengannya secara real time dan mengubah bagiannya untuk meningkatkan realisme. Interaksi tersebut kadang-kadang dilakukan dengan bantuan antarmuka *haptic*, yang memungkinkan peserta untuk bertukar informasi taktil dan kinestetik dengan lingkungan semu.
- *Semu Environment (VE)*: sebuah realitas semu immersive yang disimulasikan oleh komputer dan terutama melibatkan pengalaman audiovisual. Hal ini berkaitan dengan tampilan gambar semu dan interaktif.
- *Collaborative Semu Environment (CVE)*: salah satu bidang VR karena simulasi didistribusikan di antara geografis komputer. Potensi aplikasi CVE bervariasi dari aplikasi medis maupun game.
- *Simulation Engine*: bertanggung jawab untuk menghitung perilaku lingkungan semu dari waktu ke waktu.
- *Collaborative haptic audio visual environment (C -HAVE)*: selain media tradisional, seperti gambar, audio, dan video, *haptics* (sebagai media baru) memainkan peran penting dalam membuat benda-benda semu atau dunia nyata secara fisik teraba dalam CVE. C -HAVE memungkinkan lebih dari satu pengguna, dengan atau antarmuka *haptic* masing-masing, untuk bersama-sama dan atau jarak jauh memanipulasi objek bersama dalam lingkungan semu atau nyata. (El Saddik,2011)

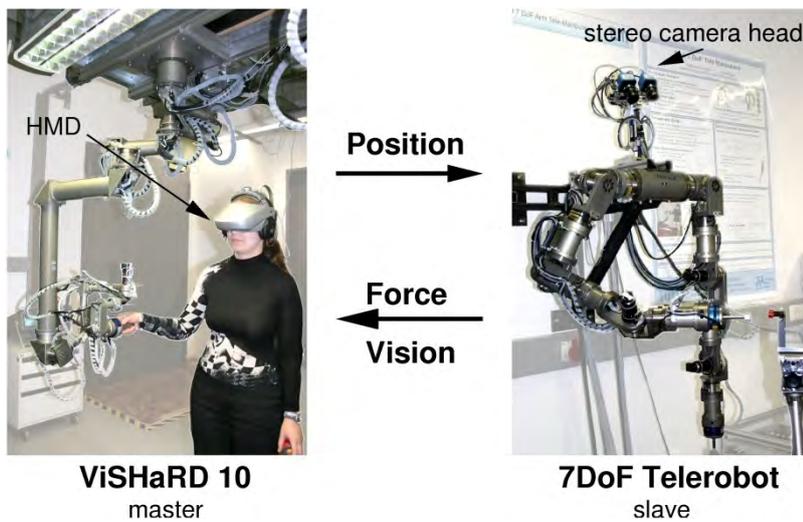
Untuk melakukan tugas-tugas sehari-hari kita bergantung pada informasi taktil dan kinestetik kita terima dari lingkungan atau obyek. Tipe perangkat *haptic* antara lain: perangkat taktil yaitu perangkat yang menstimulasi kulit untuk measakan sensasi sentuhan, perangkat kinestetik yaitu perangkat yang menerapkan gaya untuk menggerakkan atau menghambat pergerakan tubuh, dan perangkat *hybrid* yang merupakan kombinasi keduanya (Okumura,2012).

Para peneliti melakukan pengembangan, pengujian, perangkat taktil dan umpan balik gaya serta software pendukung yang memungkinkan pengguna untuk



Gambar 2. 2 *Telesurgery Vision* (Preusche, 2006)

merasakan "*feel*" dan memanipulasi obyek semu tiga dimensi sehubungan dengan fitur seperti bentuk, berat, tekstur permukaan, dan suhu. Disamping penelitian psikofisik dasar tentang *haptics* manusia, dan isu-isu dalam *haptics* mesin seperti deteksi tabrakan, umpan balik kekuatan, dan kompresi data *haptic*, *haptic* dikembangkan untuk aplikasi seperti simulasi bedah, pelatihan medis, visualisasi ilmiah, teknologi bantu untuk tunanetra.



Gambar 2. 3 *Telemaintenance* (Preusche. 2006)

Selain aplikasi medis, *haptic* digunakan untuk aplikasi industri militer, *museum display*, dan hiburan. Penelitian ini berfokus pada perangkat kinestetik.

2.3 Sistem Kontrol Bilateral

Pada sistem manipulasi, operator tidak hanya membutuhkan representasi visual, melainkan juga representasi gaya suatu sistem di *remote worksite*. Hal ini akan membantu operator untuk mengambil keputusan. (Kudomi,2000).

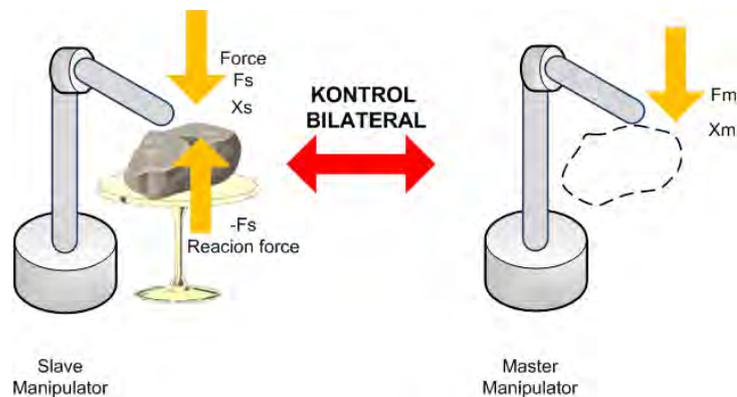
Sistem kontrol Bilateral adalah aksi interaktif informasi gaya dan perpindahan antara master dan slave. (Kudomi, 1999; Matshusira,1994; Sato:1993)

Sistem kontrol bilateral adalah sistem kontrol untuk teleoperasi dengan umpan balik *haptic*. Pada kontrol bilateral, informasi posisi dan gaya master dan slave ditransmisikan ke dua robot secara dua arah (Tanaka,2009)

Sistem kontrol bilateral dikembangkan untuk menghasilkan umpan balik taktil atau rasa sentuhan dari *remote environment*. (Katsura,2005)

Informasi gaya yang diperoleh sesuai hukum Newton III. Hukum ini menyatakan apabila kita memberikan gaya aksi kepada suatu benda maka benda itu akan memberikan gaya reaksi yang besarnya sama dan arahnya berlawanan. Persamaan hukum Newton III ditunjukkan dalam Persamaan (1)

$$F_{aksi} = -F_{reaksi} \tag{2.1}$$



Gambar 2. 4 Konsep Kontrol Bilateral

Gambar 2.4 menunjukkan F_m merepresentasikan gaya yang diberikan operator ke lengan robot master, F_s merepresentasikan gaya yang diberikan lengan slave ke obyek. X_m dan X_s secara berturut-turut merepresentasikan posisi lengan robot master dan slave.

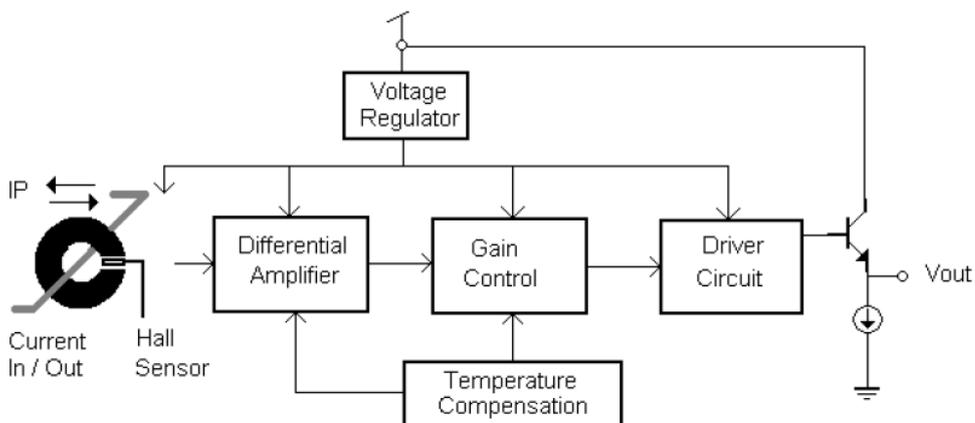
$$X_m - X_s = 0 \quad (2.2)$$

$$F_m + F_s = 0 \quad (2.3)$$

Persamaan (2) menunjukkan bahwa eror posisi antara master dan slave harus nol. Artinya pergerakan master dan slave harus sama, sehingga posisi master dan slave selalu sama. dan Persamaan (3) menunjukkan penjumlahan antara gaya aksi dan gaya reaksi harus sama dengan nol. Hal ini sesuai dengan hukum aksi reaksi Newton.

2.4 Modul Sensor WCS2702

Sensor arus merupakan perangkat yang berfungsi untuk mengukur arus dalam suatu rangkaian listrik. WCS2702 merupakan sensor arus yang didalamnya terdapat *hall effect sensor*. Keluaran sensor berupa tegangan analog yang merepresentasikan nilai arus pada rangkaian tersebut. Diagram blok WCS2702 ditunjukkan Gambar 2.5. Arus dilewatkan melalui jalur konduksi sehingga membangkitkan medan magnet yang kemudian dideteksi oleh *Hall IC sensor* untuk dikonversi ke tegangan. Lalu tegangan dilewatkan *differential amplifier*



Gambar 2. 5 Diagram Blok Sensor WCS2702 (Winson, 2015)

untuk dikurangkan dengan tegangan *supply* sensor dari *voltage regulator* dan dikuatkan. Didalam perangkat ini juga terdapat rangkaian untuk mengkompensasi suhu sehingga memiliki resistansi yang rendah.

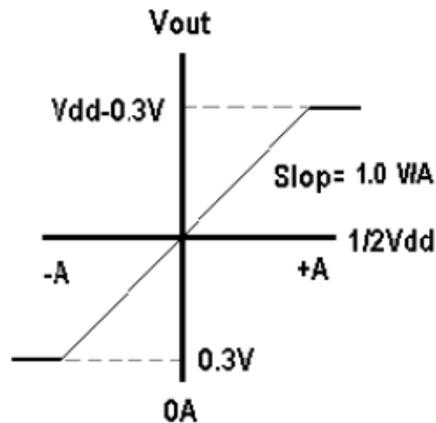
Sensor arus yang digunakan berupa modul terintegrasi yang didalamnya terdiri dari WCS2702, dan rangkaian op-amp sebagai penguat output sensor. Bentuk fisik modul sensor WCS2702 ditunjukkan Gambar 2.6. Sensor dapat mengukur arus DC dengan maksimum pengukuran 2 A dan mengukur arus AC dengan maksimum pengukuran sebesar $\pm 1,4$ A. Fitur dan spesifikasi lain sensor dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Ukuran : 37 mm x 31 mm x 16,5 mm (Panjang x Lebar x Tinggi)
- Tipe penguat: LM393
- Bekerja pada tegangan 5 volt
- Resolusi : 1 V / A
- Tegangan *zero current* : 2.5 volt
- *Output* sinyal: analog *output* dan on-off sinyal
- Resistansi konduktor : 98 m Ω
- Bekerja pada suhu : -25°C + 125°C

Tegangan output yang terukur sebesar 0,3 volt sampai $V_{dd}-0,3$ volt seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.7. Dimana V_{dd} adalah tegangan *supply* sensor dengan nilai maksimum sebesar 14 volt.



Gambar 2. 6 Modul Sensor WCS2702 (Winson, 2015)



Gambar 2. 7 Grafik Kerja Sensor WCS2702 (Winson, 2015)

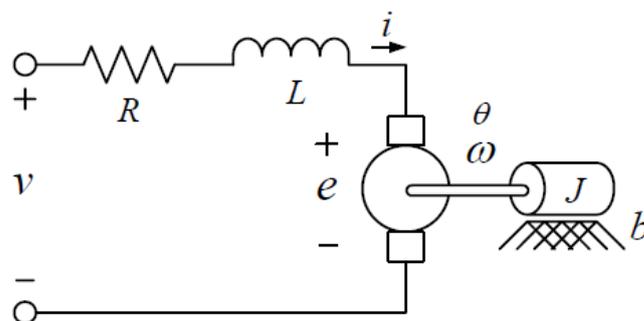
Terdapat beberapa langkah-langkah penggunaan sensor arus WCS2702 sebagai berikut.

1. Ukur *zero current* (V_{0G}) sensor dengan cara input sensor tidak dihubungkan rangkaian, namun *supply* sensor tetap dipasang. Kemudian ukur output sensor (V_{out}).
2. Arus dapat diukur dengan cara melakukan kalibrasi sensor, yaitu

$$\text{Arus terukur} = (V_{out} - V_{0G}) / \text{Sensitivitas}$$

2.5 Motor DC

Motor DC merupakan aktuator yang umum digunakan dalam sistem kontrol. Rangkaian listrik pada *armature* dan body diagram rotor motor DC ditunjukkan Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Rangkaian Listrik Pada *Armature* dan Body Diagram Rotor Motor DC (Purwanto, 2012)

dimana:

$$J = \text{momen inersia motor} \left(\frac{\text{kg m}^2}{\text{s}^2} \right)$$

$$b = \text{damping ratio sistem mekanik} \text{ (Nms)}$$

$$\omega = \text{kecepatan sudut shaft} \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

$$R = \text{resistansi elektrik} \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$L = \text{induktansi elektrik} \text{ (H)}$$

$$v = \text{tegangan input} \text{ (V)}$$

$$K_t = K_e = K = \text{electromotive force constant} \left(\frac{\text{Nm}}{\text{A}} \right)$$

Persamaan (4) menunjukkan torsi motor berhubungan dengan arus *armature* dengan konstanta sebesar K_t . Persamaan (5) menunjukkan emf balik berhubungan dengan kecepatan torsi dengan konstanta sebesar K_e . K_t merupakan konstanta *armature* dan K_e merupakan konstanta motor.

$$T = K_t i \tag{2.4}$$

$$e = K_e \omega \tag{2.5}$$

Dengan menggabungkan hukum Newton dan Kirchoff, dan $K_t = K_e = K$ maka didapatkan persamaan (6)

$$J \frac{d\omega}{dt} + b\omega = K i$$

$$L \frac{di}{dt} + Ri = v - K\omega \tag{2.6}$$

Dengan melakukan transformasi laplace diperoleh

$$(Js + b)\Omega(s) = KI(s)$$

$$(Ls + R)I(s) = V - K\Omega(s) \tag{2.7}$$

2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian terkait sistem kontrol bilateral telah banyak dilakukan dalam berbagai aplikasi antara lain pembersihan tambang (A. Kron & G. Schmidt. 2005) dan *Steer by wire system* (Ozawa dkk, 2007). Untuk mendeteksi gaya eksternal,

ada berbagai macam metode, antara lain dengan menggunakan sensor strain gage (Li & Chen, 1998). Penelitian lain menggunakan *disturbance observer* yang dimodifikasi sebagai *reaction force observer* untuk mengestimasi reaksi gaya lingkungan tanpa sensor gaya (Murakami dkk, 1993).

Penelitian di Indonesia terkait kontrol bilateral antara lain dilakukan Abdul Muis (2009) yang membahas kontrol bilateral menggunakan mikrokontroler. Namun ketika menyentuh obyek, master tidak stabil. Terkadang tidak dapat dirasakan master terkadang mampu dirasakan master dengan error posisi tinggi yaitu lebih dari 50° .

Wicaksono (2012) mengimplementasikan kontrol bilateral robot 1 D OF dengan menggunakan potensiometer untuk mendapatkan informasi posisi dan sensor arus untuk mendapatkan informasi gaya. Namun untuk menggerakkan master masih terasa berat. Saat menyentuh benda,, error posisi saat kontrol bilateral posisi to posisi mencapai $\pm 30^\circ$

Deniprasetyo (2014) merancang hibrid kontrol posisi-gaya pada sistem *master-slave* yang dikendalikan secara real-time melalui program Matlab/Simulink dengan Arduino sebagai *Interface* dan Servomotor Dynamixel AX-12+ sebagai aktuatornya. Saat menyentuh benda, error posisi mencapai $\pm 20^\circ$

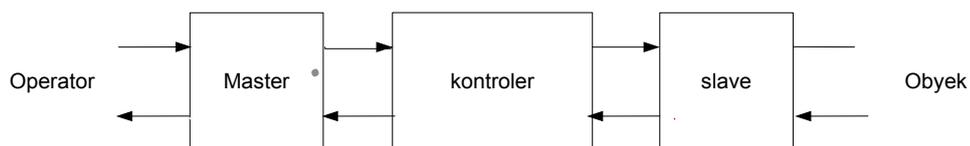
Penelitian ini akan mengimplementasikan kontrol bilateral 1 DOF manipulator menggunakan sensor arus WCS2702 untuk mendapatkan informasi gaya dan potensiometer untuk mendapatkan informasi posisi.

BAB 3

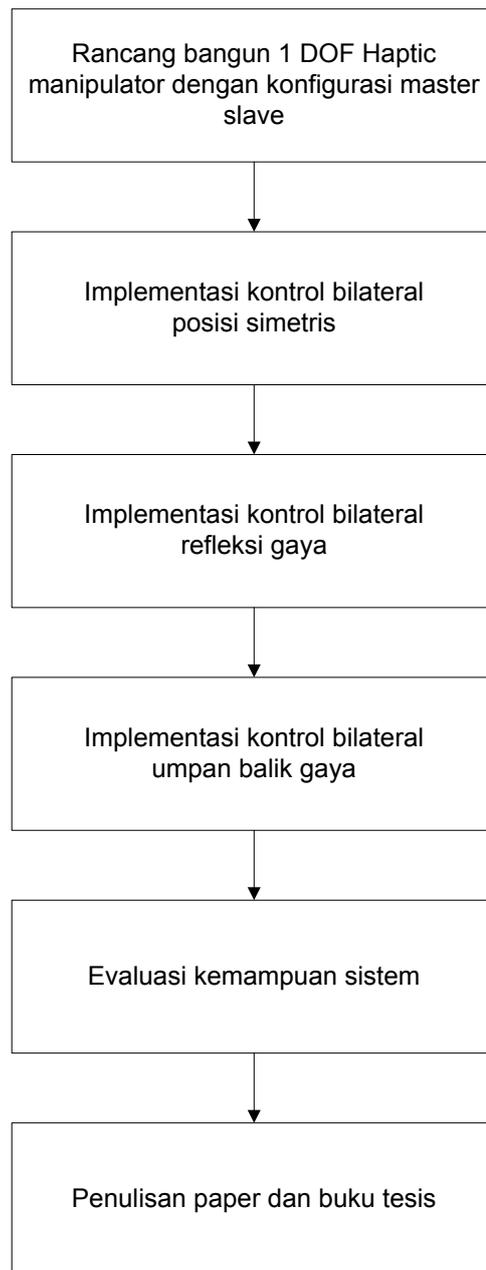
METODA PENELITIAN

Pada proses pengerjaan penelitian ini terdapat beberapa tahap yang dilakukan, meliputi perancangan algoritma kontrol bilateral posisi simetris, perancangan algoritma kontrol bilateral refleksi gaya, algoritma kontrol bilateral umpan balik gaya. Dari pembuatan algoritma tersebut didapatkan informasi posisi sudut motor DC dan gaya ditampilkan melalui LCD 16 x 2 karakter yang terdapat pada rangkaian minimum sistem mikrokontroller, dan yang terakhir adalah penulisan paper dan buku tesis yang berisi laporan dari hasil pengerjaan sistem. Realisasi sistem berupa modul terintegrasi yang didalamnya terdapat motor master dan slave, driver motor, sensor arus, dan rangkaian minimum sistem mikrokontroller. Berikut adalah diagram blok sistem yang ditunjukkan dalam Gambar 3.1 dan tahapan-tahapan penelitian ditunjukkan dalam Gambar 3.2

Diagram blok sistem Gambar 3.1 menunjukkan bahwa terjadi komunikasi dua arah antara master dan slave. Komunikasi tersebut diatur oleh kontroler. Ketika operator akan menggerakkan master, maka slave bergerak mengikuti gerakan master. Ketika slave mengenai obyek, maka obyek tersebut juga akan dirasakan oleh operator. Blok master dan slave merupakan sebuah sistem yang masing-masing terdiri atas motor DC yang terintegrasi dengan sensor potensiometer dan lengan penggerak. Blok kontroler adalah rangkaian sistem mikrokontroller yang menerima informasi arus dan posisi sudut motor master/slave kemudian diolah untuk menggerakkan motor master /slave melalui driver.



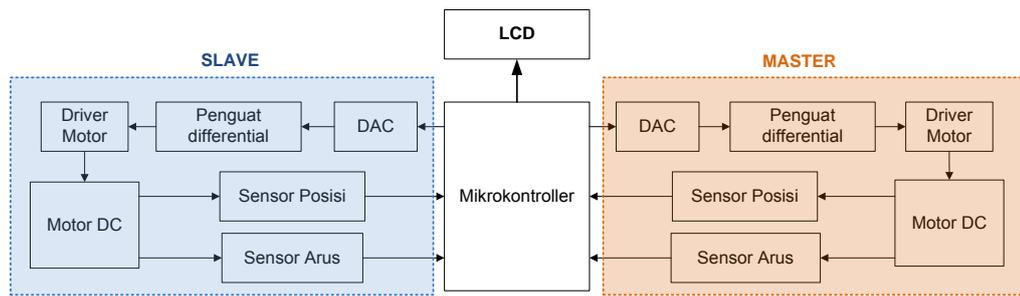
Gambar 3. 1. Diagram Blok Alat secara Umum



Gambar 3. 2. Tahapan Penelitian

3.1 Perancangan Perangkat Keras

Perangkat keras meliputi sistem elektrik dan mekanik dibuat dengan mengembangkan alat yang telah dibuat oleh peneliti sebelumnya. Sistem berukuran 50 x 30 cm tersusun atas dua buah manipulator dan kontroler. Masing-masing manipulator terdiri atas motor DC tipe FH6-1637 yang terintegrasi dengan



Gambar 3. 3. Diagram Blok Alat

sensor potensiometer dan gear box, sensor arus, dan driver motor sebagai penggerak motor yang tersusun atas rangkaian DAC, penguat differential, rangkaian push-pull. Kontroler yang digunakan adalah rangkaian minimum sistem mikrokontroller yang dilengkapi LCD 16 x 2 sebagai output. *Power supply* menggunakan adaptor yang diletakkan terpisah. Diagram blok prinsip kerja alat yang ditunjukkan dalam Gambar 3.3.

Potensiometer digunakan sebagai sensor posisi yang mampu mengukur sudut 0° hingga 150° . Sensor arus yang diukur WCS2702 digunakan untuk merepresentasikan informasi gaya. Nilai posisi dan gaya merupakan input mikrokontroller yang direpresentasikan dalam tegangan dan kemudian diubah dalam bentuk biner melalui ADC. Output mikrokontroller berupa biner dan diubah



Gambar 3. 4. Realisasi Sistem Keseluruhan

menjadi analog menggunakan DAC 0808 untuk mengontrol kecepatan motor. Untuk dapat berputar dengan arah yang berbeda, tegangan yang memiliki rentang antara 0-12V diubah menjadi -6 sampai 6V melalui rangkaian penguat differential dengan tegangan referensi 6 V. Realisasi sistem keseluruhan ditunjukkan Gambar 3.4.

3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Pada tahap ini dilakukan perancangan algoritma sistem kontrol yang kemudian direalisasikan dalam bentuk program. Terdapat 3 macam algoritma yang dibangun, yaitu kontrol bilateral posisi simetris, kontrol bilateral refleksi gaya dan kontrol bilateral umpan balik gaya.

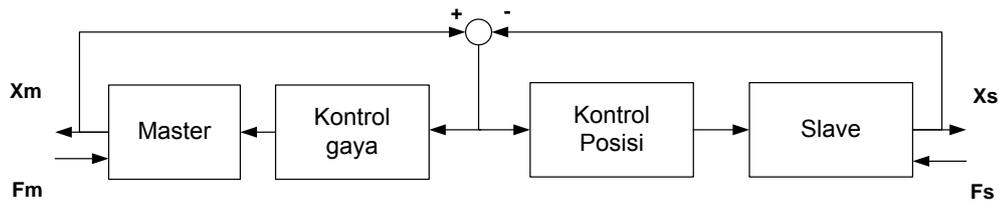
3.2.1 Kontrol Bilateral Posisi Simetris

Sistem kontrol ini hanya membutuhkan informasi posisi master dan slave tanpa membutuhkan informasi gaya. Posisi master sebagai set poin posisi slave. Semakin jauh jarak slave terhadap master akan semakin besar error posisi. Jika nilai posisi master lebih besar dari slave, maka slave akan bergerak ke kiri dan master akan bergerak ke kanan. Sebaliknya, jika posisi master lebih kecil dari slave, maka slave akan bergerak ke kanan dan master akan bergerak ke kiri.

Pada pengujian sistem kontrol posisi simetris, master akan digerakkan oleh tangan operator hingga mencapai suatu posisi tertentu. Slave akan bergerak mengikuti posisi master, namun master tidak bergerak mendekati posisi slave karena tertahan oleh tangan operator. Tegangan yang digunakan untuk menggerakkan motor sebanding dengan kecepatan motor. Tegangan tersebut ditentukan oleh besarnya error posisi antara master dan slave. Sehingga semakin besar error posisi, maka motor akan berputar semakin cepat, sebaliknya, semakin kecil error posisi, maka motor akan berputar semakin lambat. Hal ini ditunjukkan Persamaan (3.1).

$$\Delta\theta = \theta_m - \theta_s$$

$$V = C_p \times \Delta\theta \tag{3.1}$$



Gambar 3. 5. Diagram Blok Kontrol Bilateral Posisi Simetris

dimana:

θ = posisi ($^{\circ}$)

C_p = kontrol posisi

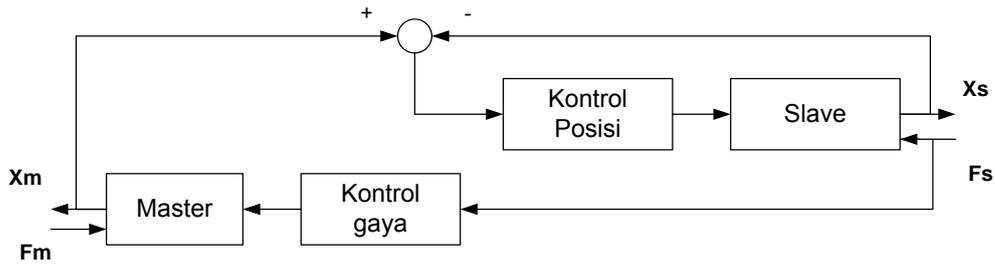
V = tegangan motor (V)

Diagram blok sistem kontrol posisi simetris ditunjukkan dalam gambar 3.5. Algoritma program dijelaskan dalam *flowchart* yang ditunjukkan Gambar 3.8.

3.2.2 Kontrol Bilateral Refleksi Gaya

Sistem kontrol refleksi memiliki kontrol berbeda untuk menggerakkan motor master dan slave. Jika pada sistem kontrol posisi simetris error posisi dengan set poin posisi master sama-sama digunakan untuk menggerakkan motor master dan slave, maka pada sistem kontrol ini error posisi hanya digunakan untuk menggerakkan motor slave saja. Sedangkan untuk menggerakkan motor master yaitu dengan menggunakan gaya. Sensor arus dipasang pada bagian slave untuk merepresentasikan gaya pada slave.

Posisi master sebagai set poin posisi slave. Semakin jauh jarak slave terhadap master akan semakin besar error posisi. Jika nilai posisi master lebih besar dari slave, maka slave akan bergerak ke kiri dan master akan bergerak ke kanan. Sebaliknya, jika posisi master lebih kecil dari slave, maka slave akan bergerak ke kanan dan master akan bergerak ke kiri. Tegangan yang digunakan untuk menggerakkan motor slave sebanding dengan kecepatan motor slave. Tegangan untuk mencatu motor slave tersebut ditentukan oleh besarnya error posisi antara master dan slave. Sehingga semakin besar error posisi, maka motor slave akan berputar semakin cepat, sebaliknya, semakin kecil error posisi, maka motor slave akan berputar semakin lambat. Hal ini ditunjukkan Persamaan (3.1).



Gambar 3. 6. Diagram Blok Kontrol Bilateral Dengan Refleksi Gaya

Tegangan yang merepresentasikan arus slave digunakan untuk mengontrol master. Jika arus bernilai positif, master akan bergerak ke kiri. Sebaliknya jika arus bernilai negatif, master akan bergerak ke kanan. Semakin besar nilai arus baik positif maupun negatif, maka motor master akan berputar semakin cepat, sebaliknya, semakin kecil arus, maka motor master akan berputar semakin lambat. Hal ini ditunjukkan Persamaan (3.2).

$$V = C_f \times i_s \quad (3.2)$$

dimana:

i = arus (A)

C_p = kontrol posisi

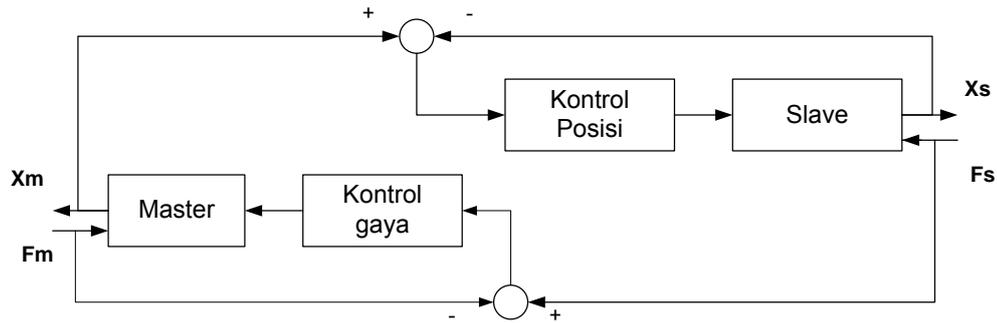
V = tegangan motor (V)

Diagram blok kontrol bilateral dengan refleksi gaya ditunjukkan pada Gambar 3.6. Algoritma program dijelaskan dalam *flowchart* yang ditunjukkan Gambar 3.9.

3.2.3 Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya

Pada sistem kontrol bilateral umpan balik gaya, selisih posisi antara master dan slave digunakan untuk mengontrol posisi master. Sensor arus dipasang pada bagian slave untuk merepresentasikan gaya pada master dan slave.

Posisi master sebagai set poin posisi slave. Semakin jauh jarak slave terhadap master akan semakin besar error posisi. Jika nilai posisi master lebih besar dari slave, maka slave akan bergerak ke kiri dan master akan bergerak ke kanan. Sebaliknya, jika posisi master lebih kecil dari slave, maka slave akan bergerak ke kanan dan master akan bergerak ke kiri. Tegangan yang digunakan



Gambar 3. 7. Diagram Blok Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya

untuk menggerakkan motor slave sebanding dengan kecepatan motor slave. Tegangan untuk mencatu motor slave tersebut ditentukan oleh besarnya error posisi antara master dan slave. Sehingga semakin besar error posisi, maka motor slave akan berputar semakin cepat, sebaliknya, semakin kecil error posisi, maka motor slave akan berputar semakin lambat. Hal ini ditunjukkan Persamaan (3.1).

Arus slave sebagai set poin arus master. Semakin jauh jarak slave terhadap master akan semakin besar error arus. Tegangan untuk mencatu motor master tersebut ditentukan oleh besarnya error arus antara master dan slave. Jika error arus bernilai positif, master akan bergerak ke kiri. Sebaliknya jika error arus bernilai negatif, master akan bergerak ke kanan. Sehingga semakin besar error arus, maka motor slave akan berputar semakin cepat, sebaliknya, semakin kecil error arus, maka motor slave akan berputar semakin lambat. Hal ini ditunjukkan Persamaan (3.3).

$$\Delta i = i_s - i_m$$

$$V = C_f \times \Delta \theta \tag{3.3}$$

dimana:

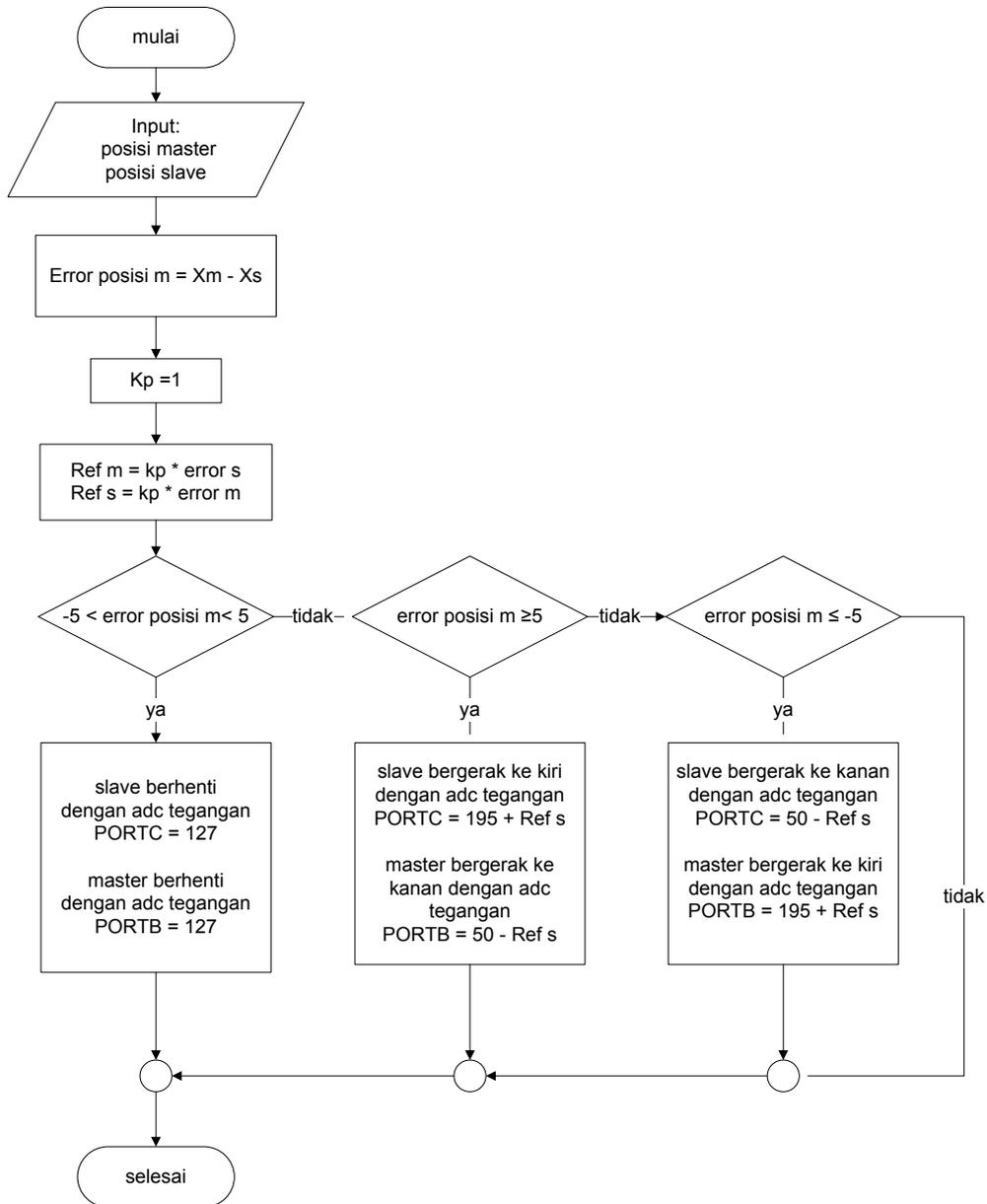
i_s = arus slave (A)

i_m = arus master (A)

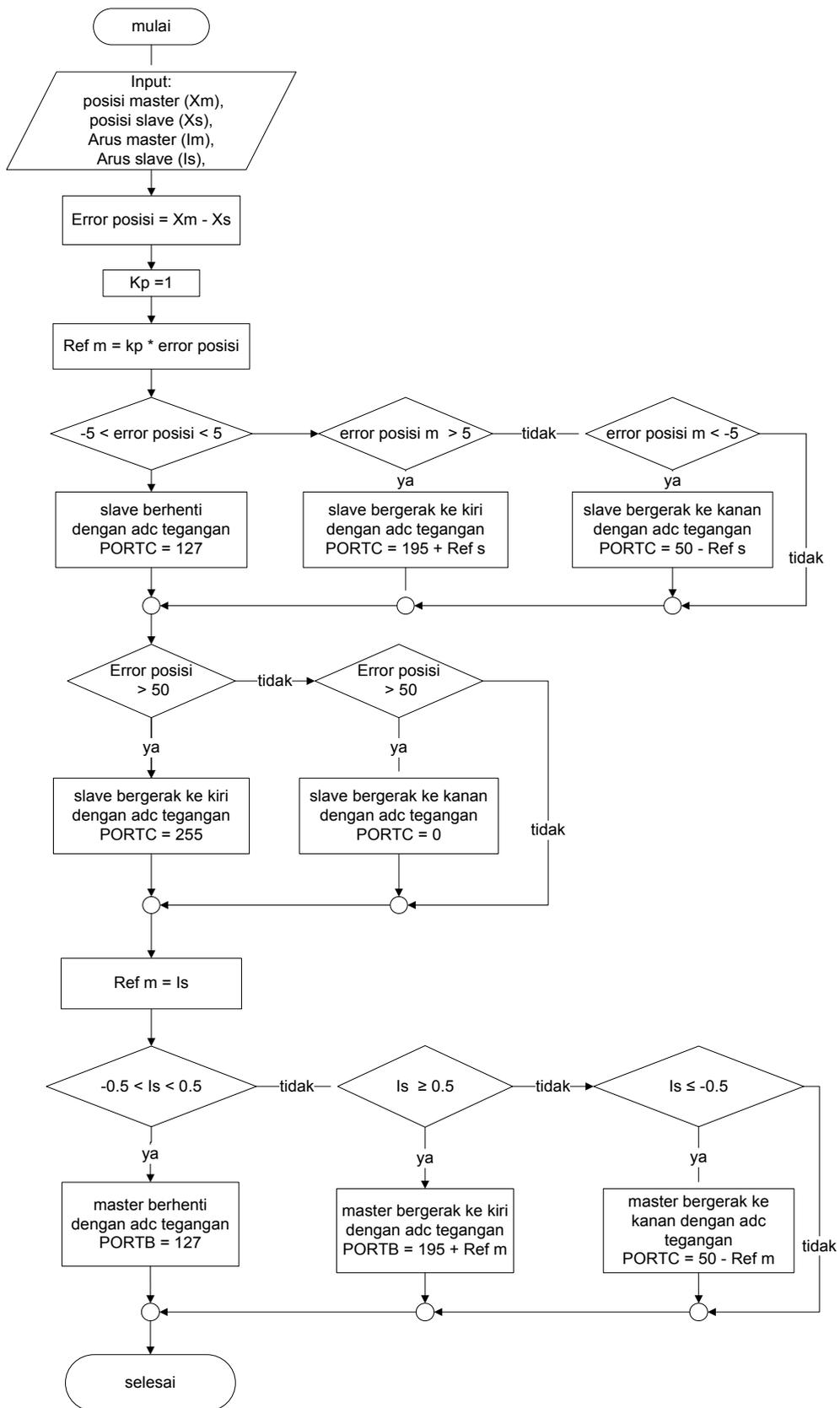
C_p = kontrol posisi

V_m = tegangan motor master (V)

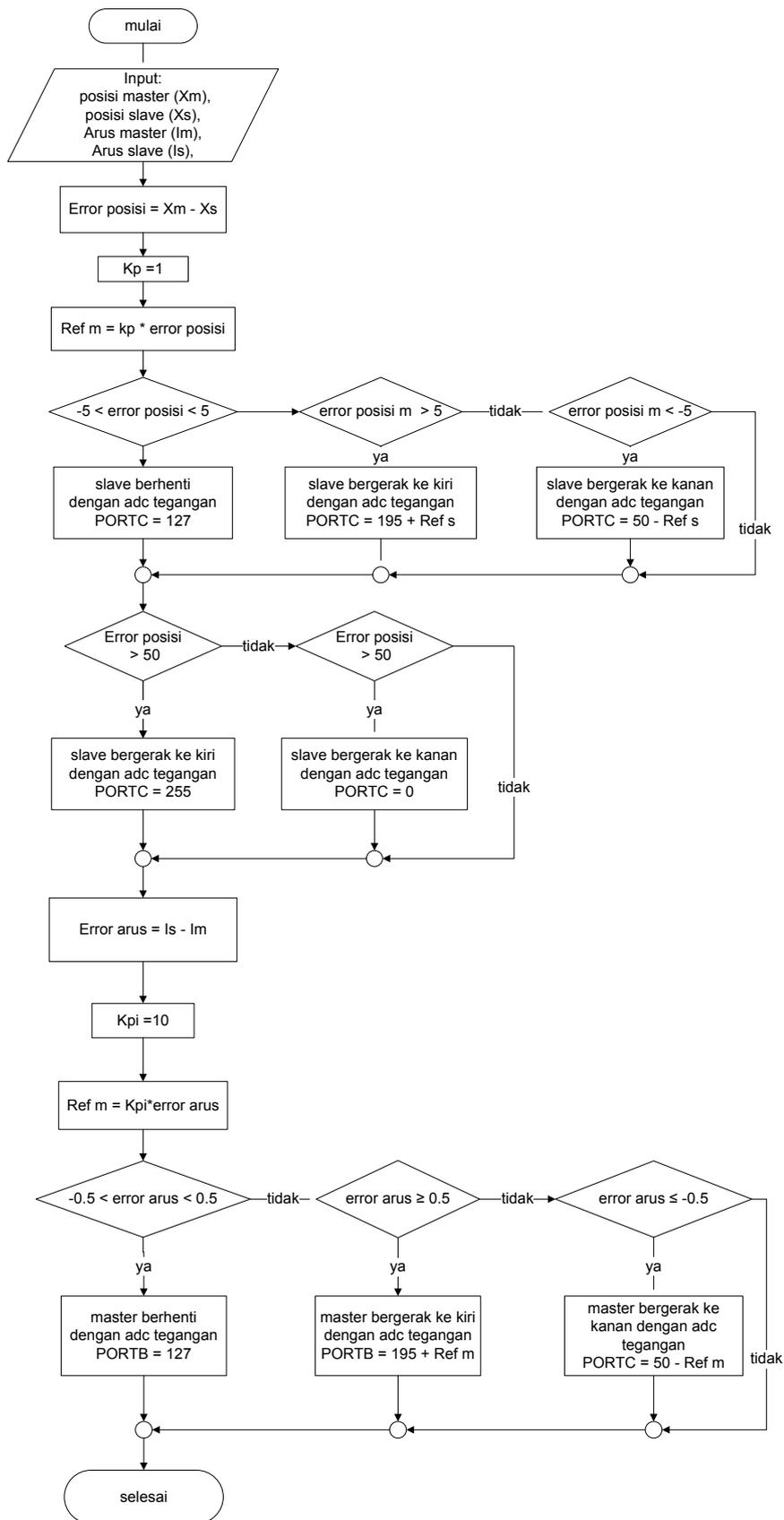
Diagram blok sistem ini ditunjukkan dalam Gambar 3.7. Algoritma program dijelaskan dalam *flowchart* yang ditunjukkan Gambar 3.10.



Gambar 3. 8. *Flowchart* Algoritma Kontrol Bilateral Posisi Simetris



Gambar 3. 9. Flowchart Algoritma Kontrol Bilateral Refleksi Gaya



Gambar 3. 10. Flowchart Algoritma Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA SISTEM

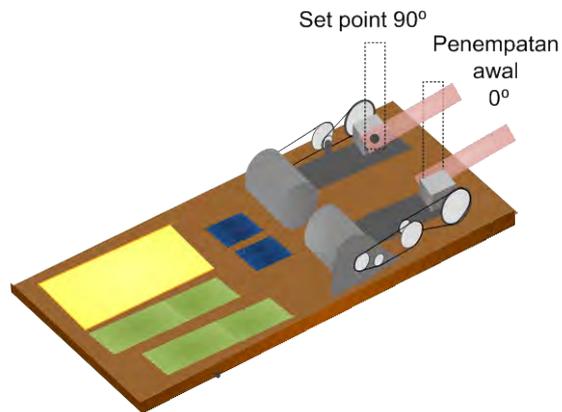
Pengujian dan analisa dilakukan untuk mengetahui fungsional tiap-tiap sub sistem yang telah dibuat. Pengujian yang dilakukan terdiri dari :

1. Pengujian karakteristik motor
2. Pengujian sensor arus
3. Pengujian sensor posisi
4. Pengujian kontrol bilateral posisi simetris saat bergerak bebas
5. Pengujian kontrol bilateral posisi simetris saat menyentuh obyek
6. Pengujian kontrol bilateral refleksi gaya saat bergerak bebas
7. Pengujian kontrol bilateral refleksi gaya saat menyentuh obyek
8. Pengujian kontrol bilateral umpan balik gaya saat bergerak bebas
9. Pengujian kontrol bilateral umpan balik gaya saat menyentuh obyek

4.1 Pengujian Performansi Motor

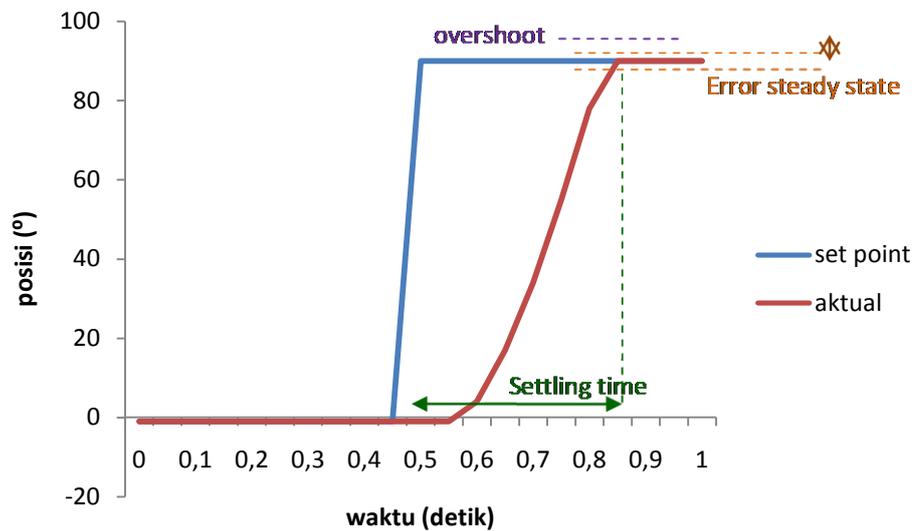
Pengujian performansi motor ini digunakan untuk mengetahui performansi motor master dan motor slave saat bergerak menuju posisi set poin yang diinginkan. Tahapan pengujian:

1. Menentukan parameter performansi yang diinginkan
Overshoot = 5°
Settling time = 0.4 s
Steady state error = $\pm 2^\circ$
2. Menentukan set poin yaitu sebesar 90°
3. Menempatkan masing-masing lengan master dan slave pada 0°
4. Memprogram mikrokontroler agar mengontrol pergerakan masing-masing motor master dan slave hingga menuju set poin.
5. Menggunakan kontrol PID menggunakan metode Zigler-Nicols
6. Mengukur posisi motor master dan slave

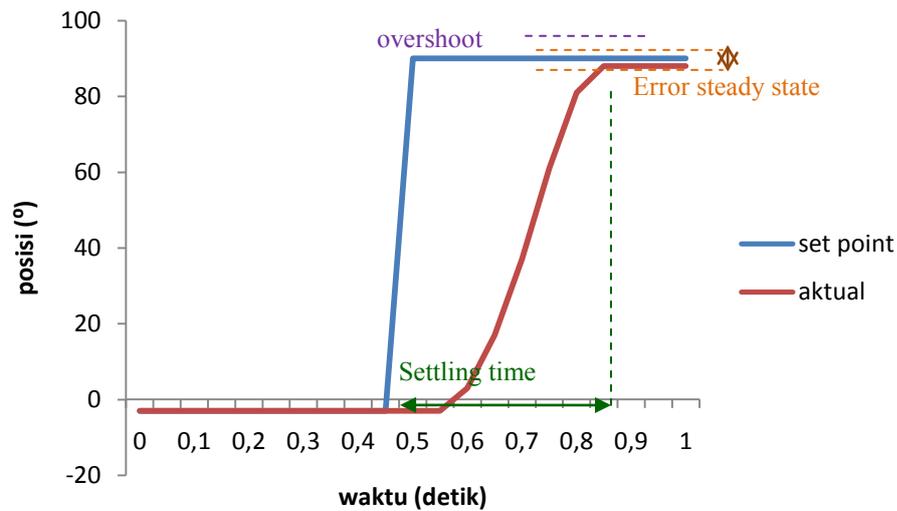


Gambar 4. 1 Mekanisme Pengujian Karakteristik Motor

Mekanisme pengujian motor ditunjukkan Gambar 4.1. Hasil pengujian motor master ditunjukkan Gambar 4.2. Hasil pengujian motor slave ditunjukkan Gambar 4.3. Tampak bahwa dari hasil pengujian, motor master dan slave telah bekerja sesuai dengan perancangan yaitu mencapai keadaan *steady state* dalam waktu 0.35 detik tanpa terjadi *overshoot*.



Gambar 4. 2 Karakteristik Motor Master



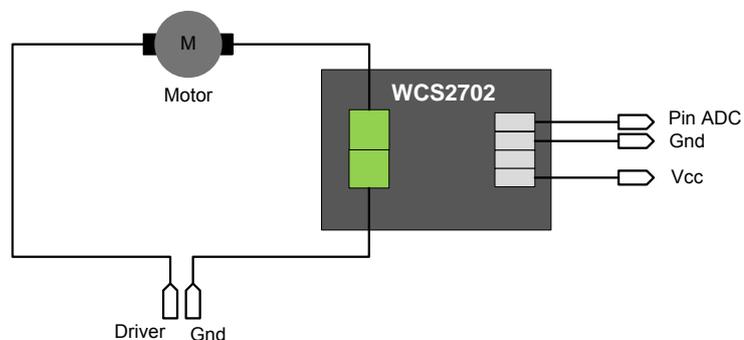
Gambar 4. 3 Karakteristik Motor Slave

4.2 Pengujian Sensor Arus

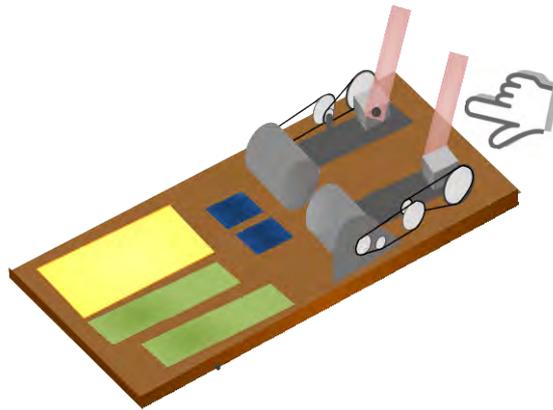
Tipe sensor arus yang digunakan adalah WCS2702 yang memiliki resolusi 1 mV/mA. Modul sensor arus dipasang seri terhadap motor dan driver. Mekanisme pemasangan sensor arus ditunjukkan Gambar 4.4. *Output* sensor adalah tegangan analog yang dihubungkan ke pin ADC mikrokontroler. Untuk mengetahui kinerja dari modul sensor arus WCS2702 dan karakteristik arus ketika motor diberikan tegangan kemudian ditahan dilakukan beberapa tahapan.

Tahapan:

1. Pengujian arus saat lengan digerakkan tangan
2. Pengujian arus saat motor diberi tegangan
3. Pengujian arus saat motor diberi tegangan kemudian ditahan



Gambar 4. 4 Pemasangan Sensor Arus



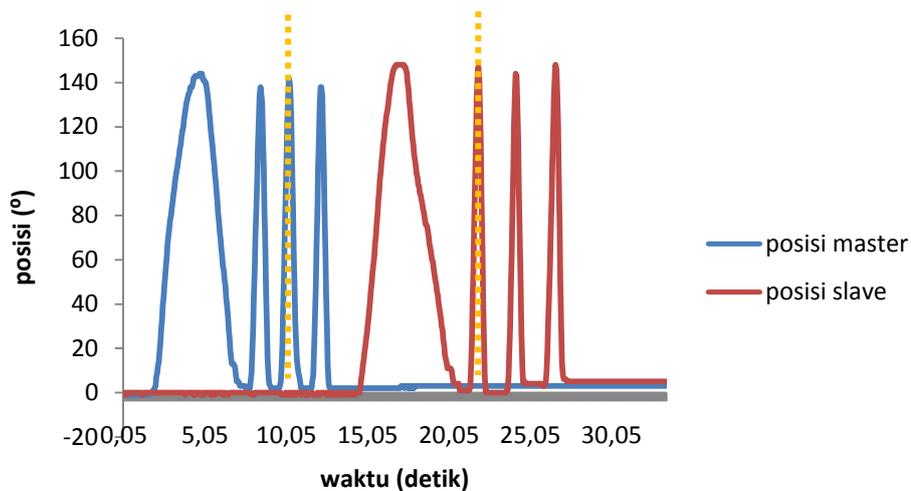
Gambar 4. 5 Mekanisme Pengujian Karakteristik Arus saat Lengan Motor Digerakkan Menggunakan Tangan

4.2.1 Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Tangan

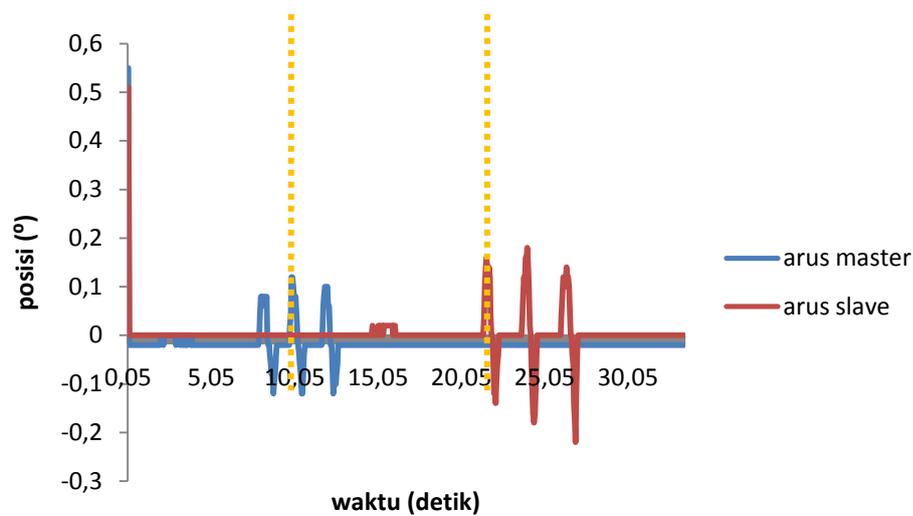
Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik arus saat lengan motor digerakkan tangan. Pengujian ini dilakukan dengan memberikan tegangan pada motor sebesar 0V. Untuk menggerakkan motor, dilakukan secara manual yaitu menggunakan tangan. Mekanisme pengujian ditunjukkan Gambar 4.5

Tahapan pengujian:

1. Menggerakkan lengan master ke kanan dan kiri, lengan slave diam.
2. Menggerakkan lengan slave ke kanan dan kiri, lengan master diam.
3. Mengukur posisi dan arus motor master dan slave



Gambar 4. 6. Data Posisi saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Tangan



Gambar 4. 7. Data Arus saat Lengan Manipulator Digerakkan oleh Tangan

Hasil pengujian karakteristik arus saat lengan motor digerakkan tangan ditunjukkan Gambar 4.6 dan Gambar 4.7. Nampak saat lengan master digerakkan ke kiri kemudian ke kanan secara perlahan pada detik ke 2 hingga detik ke 7, arus tidak terdeteksi, namun saat pergerakan serupa dilakukan secara cepat, maka arus terdeteksi. Arus slave tampak lebih besar dibandingkan master karena perubahan posisi slave lebih cepat dibandingkan master. Ketika motor digerakkan dari titik awal ke kiri (menuju sudut yang lebih positif) selama beberapa milidetik kemudian berhenti, maka arus akan mengalami perubahan nilai positif kemudian turun kembali ke nol. Ketika motor digerakkan dari titik awal ke kanan (menuju sudut yang lebih negatif) selama beberapa milidetik kemudian berhenti, maka arus akan mengalami perubahan nilai negatif kemudian naik kembali ke nol.

4.2.2 Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik arus saat diberikan tegangan. Jika tegangan driver positif maka motor akan berputar ke kanan dan jika tegangan driver negatif maka motor akan berputar ke kiri.

Tahapan pengujian:

1. Menentukan rise time motor, hal ini berguna untuk mencegah motor membentur saat melakukan pergerakan maksimum. Gambar 4.2 dan

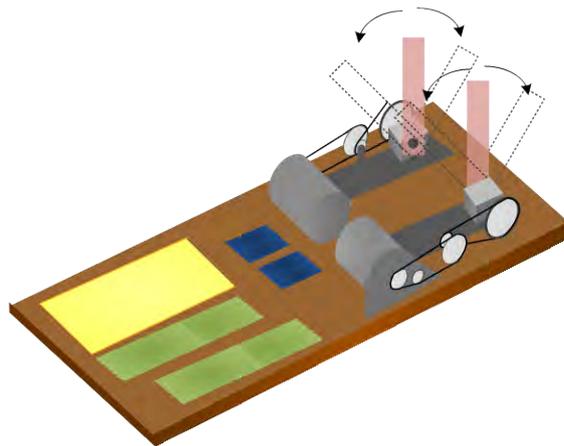
Gambar 4.3 menunjukkan bahwa rise time motor master dan slave ± 0.35 detik

2. Menempatkan masing-masing lengan master dan slave pada 45°
3. Memprogram mikrokontroler sesuai dengan listing program di bawah ini

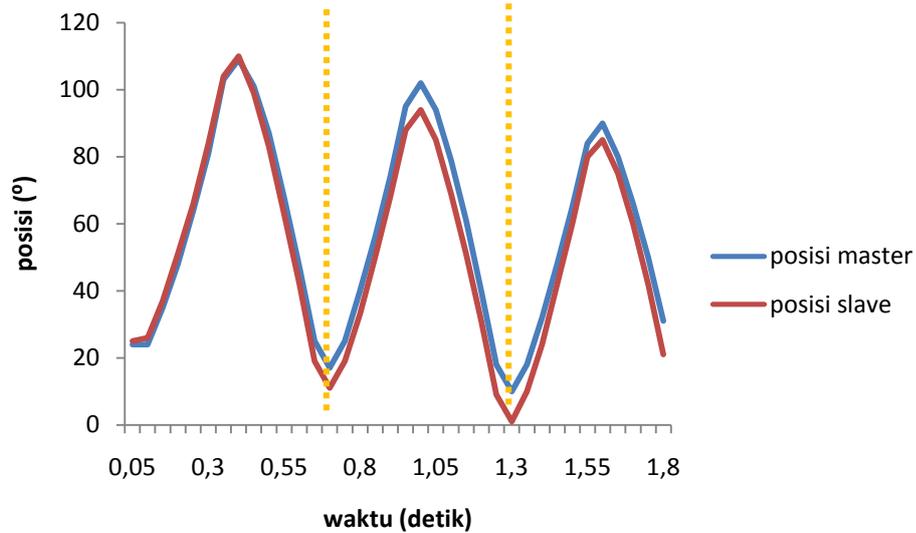
```
t=t+0.05;  
if((t > 0)&&(t <= 0.3))      {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}  
else if((t > 0.3)&&(t <= 0.6))  {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}  
else if((t > 0.6)&&(t <= 0.9))  {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}  
else if((t > 0.9)&&(t <= 1.2))  {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}  
else if((t > 1.2)&&(t <= 1.5))  {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}  
else if((t > 1.5)&&(t <= 1.8))  {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}  
else if(t > 1.8)              {t       = 0;}  
}
```

4. Mengukur posisi dan arus motor master dan slave

PORTB adalah nilai yang akan diubah menjadi analog menggunakan DAC sebagai input driver untuk menggerakkan motor master, sedangkan PORTC nilai yang akan diubah menjadi analog menggunakan DAC sebagai input driver untuk menggerakkan motor slave. Mekanisme pengujian ditunjukkan Gambar 4.8. Data posisi ketika lengan hasil pengujian ditunjukkan Gambar 4.9. Data arus hasil pengujian ditunjukkan Gambar 4.10

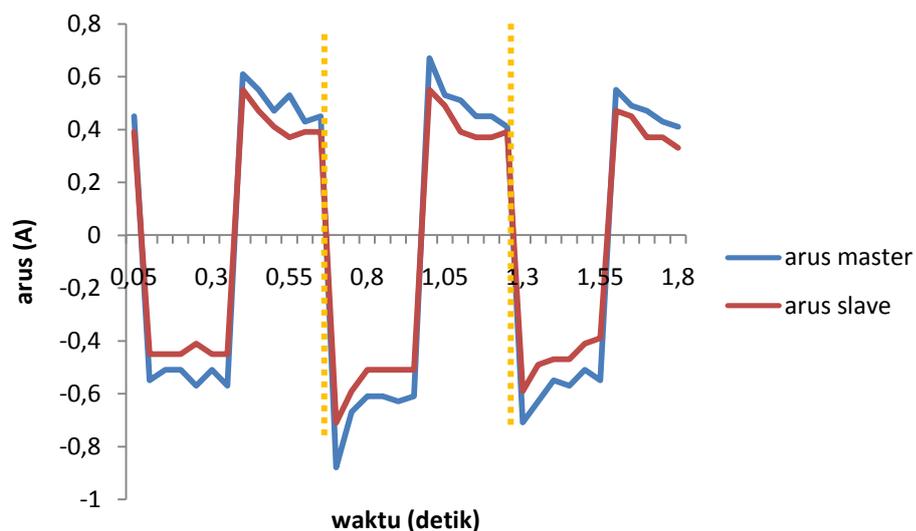


Gambar 4. 8. Mekanisme Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor



Gambar 4. 9. Data Posisi ketika Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor

Dari hasil pengujian tampak bahwa peningkatan arus baik positif maupun negatif terjadi saat lengan master maupun slave berbelok arah. Nilai arus lebih besar jika dibandingkan saat lengan digerakkan tanpa motor. Namun karakteristik arus berbeda dengan saat lengan digerakkan tanpa motor. Pada pengujian ini arus berkebalikan dengan posisi.



Gambar 4. 10. Data Arus ketika Lengan Manipulator Digerakkan oleh Motor

Saat lengan berbelok berlawanan menuju sudut yang lebih positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat lengan berbelok berlawanan menuju sudut yang lebih negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3 pada persamaan 2.1. Dimana benda cenderung mempertahankan posisi dengan melawan gaya yang dikenakan pada benda tersebut. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa gaya reaksi dapat direpresentasikan sebagai arus.

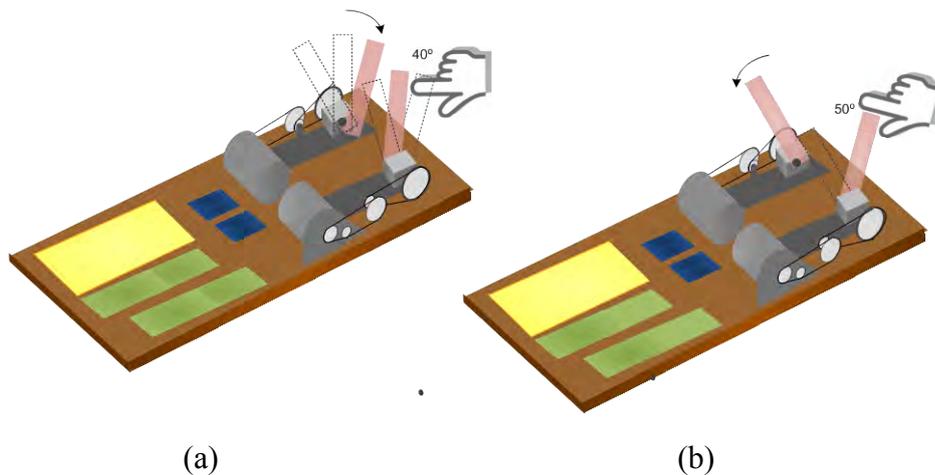
4.2.3 Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan oleh Motor kemudian Lengan Slave Ditahan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik arus saat motor diberi tegangan kemudian putarannya ditahan. Jika tegangan output driver bernilai positif maka motor akan berputar ke kanan dan jika tegangan output driver bernilai negatif maka motor akan berputar ke kiri.

Tahapan pengujian:

1. Menentukan rise time motor, hal ini berguna untuk mencegah motor membentur saat melakukan pergerakan maksimum. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa rise time motor master dan slave ± 0.3 detik
2. Menempatkan masing-masing lengan master dan slave pada 45°
3. Memprogram mikrokontroler sesuai dengan listing program berikut agar motor master dan slave melakukan gerakan sinusoida setiap 0.3 detik. Kecuali antara detik 1.5 hingga 3 yaitu dengan memberikan kecepatan motor maksimum ke kanan dan setelah detik ke 3 yaitu mencatu motor dengan 0V.

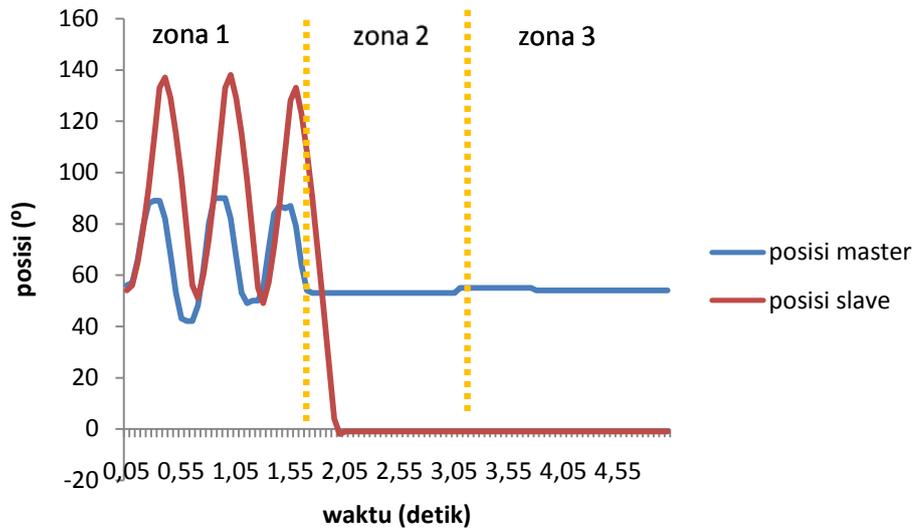
```
t=t+0.05;
if((t > 0)&&(t <= 0.3))      {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}
else if((t > 0.3)&&(t <= 0.6))  {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}
else if((t > 0.6)&&(t <= 0.9))  {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}
else if((t > 0.9)&&(t <= 1.2))  {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}
else if((t > 1.2)&&(t <= 1.5))  {PORTB   = 255; PORTC   = 255;}
else if((t > 1.5)&&(t <= 3))    {PORTB   = 0;  PORTC   = 0;}
else if(t > 3)                {PORTB   = 127; PORTC   = 127;}
```



Gambar 4. 11. Pengujian Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan (a) Lengan Master Dapat Bergerak, (b) Lengan Master Tidak Dapat Bergerak

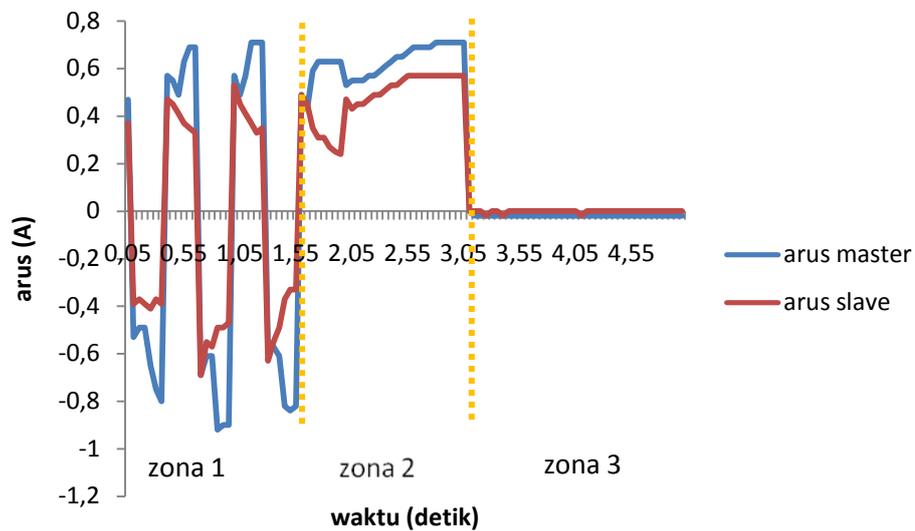
4. Meletakkan obyek pada sebelah kanan master sehingga master tidak mampu bergerak ke kanan melebihi sudut $\pm 40^\circ$ dan sebelah kiri master sehingga master tidak mampu bergerak ke kiri melebihi sudut $\pm 90^\circ$ seperti ditunjukkan Gambar 4.11 (a)
5. Menahan master pada posisi $\pm 50^\circ$ sehingga master tidak dapat bergerak ke kanan seperti ditunjukkan Gambar 4.11 (b)
6. Mengukur posisi dan arus motor master dan slave

Hasil pengujian ditunjukkan Gambar 4.12 dan 4.13. Zona satu merupakan zona dimana dilakukan tahapan 4, zona dua merupakan zona dimana dilakukan tahapan 5, dan zona tiga adalah zona dimana motor dicatu 0V. Pada pengujian ini arus berkebalikan dengan posisi. Saat posisi mengalami perubahan positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat posisi mengalami perubahan negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3. Pada zona 1, pada detik ke 0.35 arus master dan slave sama-sama naik. Perbedaan terlihat jelas pada kemiringan puncak. Arus slave kembali turun hingga lengan berbalik arah sehingga nilai arus menjadi negatif. Sedangkan arus master turun sedikit selama master bergerak kemudian semakin meningkat dikarenakan menyentuh obyek. Gaya reaksi ketika menyentuh obyek lebih besar dibandingkan ketika hanya berbelok arah. Pada zona dua yaitu zona dimana zona ketika master dan



Gambar 4. 12. Data Posisi saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan

slave sama-sama tertahan. Perbedaan antara master dan slave adalah obyek yang menahan. Jika master ditahan oleh benda sehingga tidak mampu bergerak ke kanan. Sedangkan slave tidak tertahan sehingga terus bergerak menuju 0°.



Gambar 4. 13. Data Arus saat Lengan Master dan Slave Digerakkan Motor kemudian Pergerakan Lengan Master Ditahan

Namun pada detik ke 1.8 slave tertahan meja dikarenakan telah mencapai batas maksimum. Sehingga arus kembali meningkat sefasa dengan master. Gaya reaksi ketika menyentuh obyek lebih besar dibandingkan ketika hanya berbelok arah. Pada zona dua yaitu zona dimana zona ketika master dan slave sama-sama tertahan. Perbedaan antara master dan slave adalah obyek yang menahan. Jika master ditahan oleh benda sehingga tidak mampu bergerak ke kanan. Sedangkan slave tidak tertahan sehingga terus bergerak menuju 0°. Namun pada detik ke 1.8 slave tertahan meja dikarenakan telah mencapai batas maksimum. Sehingga arus kembali meningkat sefasa dengan master. Karena itulah meskipun posisi slave telah stabil di 0°, namun arus tetap meningkat. Pada zona tiga arus master dan slave 0 karena tegangan yang diberikan 0V dengan posisi akhir yang berbeda.

4.2.4 Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya

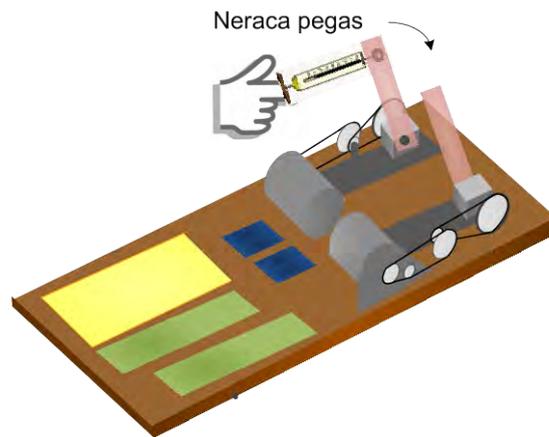
Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui nilai gaya untuk setiap arus yang dihasilkan sensor arus. Tahapan pengujian ini sebagai berikut:

1. Menggerakkan motor dengan variasi nilai tegangan. Nilai variasi tegangan bergantung pada nilai DAC yang diberikan mikrokontroler.
2. Menahan lengan menggunakan neraca pegas sehingga motor tidak dapat berputar
3. Memperbesar tegangan secara perlahan-lahan
4. Menahan pergerakan lengan menggunakan neraca pegas hingga lengan berhenti
5. Mencatat besarnya gaya yang terukur oleh neraca pegas dan arus yang terukur oleh sensor arus untuk setiap kenaikan tegangan.
6. Menghitung persamaan arus terhadap gaya

Dari perhitungan didapatkan nilai gaya sebesar:

$$F = 2.9679 \times i - 0.7366$$

Untuk nilai DAC antara 70 s ampai 194, motor tidak bergerak sehingga arus maupun ganyanya nol. Kecepatan maksimal saat motor bergerak ke kanan adalah saat diberikan nilai DAC 0 sedangkan kecepatan maksimal saat motor bergerak ke kiri adalah saat diberikan nilai DAC 255.

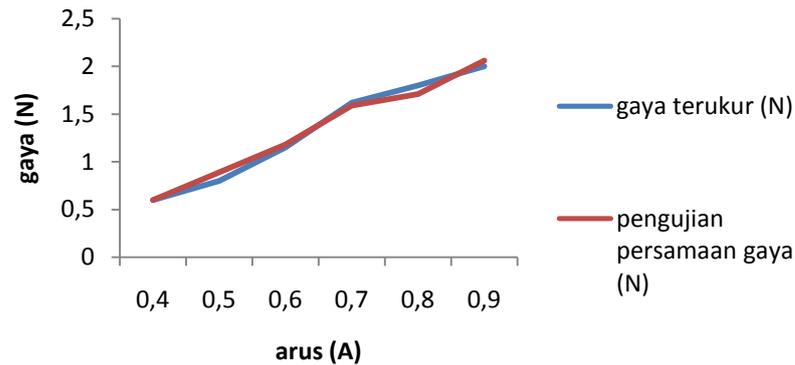


Gambar 4. 14. Grafik Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya

Gaya minimal untuk menahan lengan hingga berhenti bergerak saat diberikan kecepatan maksimal ke kanan adalah sebesar 1.1 N dengan arus terukur sebesar 0.6 A. Gaya minimal untuk menahan lengan hingga berhenti bergerak saat diberikan kecepatan maksimal ke kiri adalah sebesar 2 N dengan arus terukur sebesar -0.94 A. Nilai negatif menandakan adanya perbedaan arah. Grafik pengujian sensitifitas arus terhadap gaya ditunjukkan Gambar 4.15. Dari grafik tersebut dapat diambil kesimpulan bahwa arus linier terhadap gaya.

Tabel 4. 1 Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya

| Arah | DAC | Arus (A) | Gaya terukur (N) | Pengujian Persamaan Gaya |
|-------|-----|----------|------------------|--------------------------|
| Kanan | 0 | 0.61 | 1.1 | 1.07 |
| | 10 | 0.61 | 1.1 | 1.07 |
| | 20 | 0.61 | 1 | 1.07 |
| | 30 | 0.61 | 1 | 1.07 |
| | 40 | 0.55 | 0.8 | 0.89 |
| | 50 | 0.47 | 0.7 | 0.66 |
| | 60 | 0.43 | 0.5 | 0.54 |
| | 70 | 0.33 | 0.1 | 0.25 |
| Kiri | 195 | -0.45 | 0.6 | 0.6 |
| | 205 | -0.55 | 0.8 | 0.89 |
| | 215 | -0.64 | 1.15 | 1.18 |
| | 225 | -0.78 | 1.62 | 1.59 |
| | 235 | -0.82 | 1.8 | 1.71 |
| | 245 | -0.88 | 1.9 | 1.88 |
| | 255 | -0.94 | 2 | 2.05 |



Gambar 4. 15. Grafik Pengujian Sensitifitas Arus terhadap Gaya

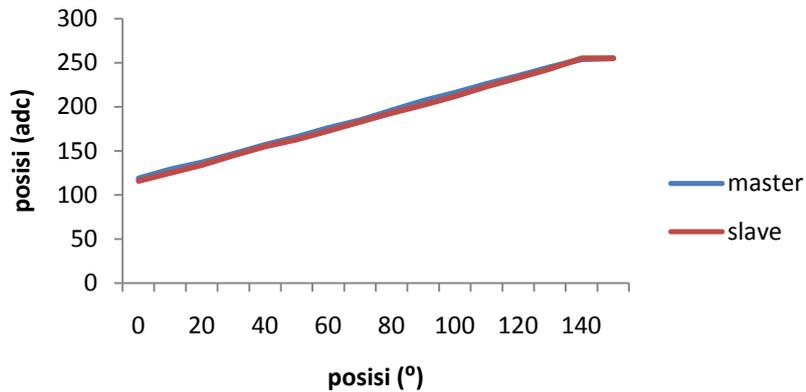
4.3 Pengujian Sensor Posisi

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik tegangan yang dihasilkan potensiometer sebagai sensor posisi. Tahapan pengujian ini sebagai berikut:

1. Menghubungkan potensiometer paralel dengan Vcc 5V
2. Menggerakkan lengan master dan slave yang telah tercouple dengan potensiometer dengan sudut tertentu
3. Mencatat nilai posisi dalam derajat terhadap posisi dalam ADC

Tabel 4. 2 Pengujian sensor posisi

| Posisi (°) | Posisi Master (ADC) | Posisi Slave (ADC) |
|------------|---------------------|--------------------|
| 0 | 119 | 116 |
| 10 | 129 | 125 |
| 20 | 137 | 134 |
| 30 | 147 | 145 |
| 40 | 157 | 155 |
| 50 | 166 | 163 |
| 60 | 176 | 176 |
| 70 | 185 | 183 |
| 80 | 196 | 193 |
| 90 | 207 | 202 |
| 100 | 216 | 212 |
| 110 | 226 | 223 |
| 120 | 235 | 233 |
| 130 | 245 | 243 |
| 140 | 254 | 255 |
| 150 | 255 | 255 |

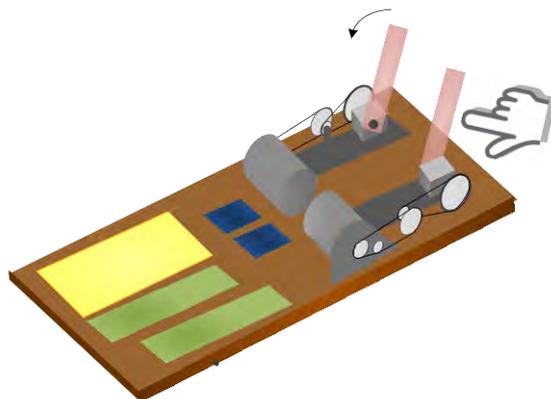


Gambar 4. 16. Grafik Perubahan Nilai ADC terhadap Perubahan Sudut

Gambar 4.16 menunjukkan bahwa saat lengan berada pada sudut minimal yaitu 0° nilai ADC yang terbaca ± 118 dan meningkat secara linier hingga mencapai sudut 140° nilai yang terbaca ± 254 . Saat sudut lengan master atau slave digerakkan lebih dari 140° , ADC yang terbaca tetap sama karena telah mencapai nilai ADC maksimal yaitu 255. Pembacaan posisi master dan slave tidak identik, terdapat perbedaan sebesar ± 2 .

4.4 Pengujian Kontrol Bilateral Posisi Simetris

Pada sistem kontrol bilateral posisi simetris, selisih posisi antara master dan slave digunakan untuk mengontrol posisi slave dan gaya master.



Gambar 4. 17 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Lengan Slave Bergerak Bebas

Sistem ini tidak membutuhkan sensor gaya. Pengujian ini dilakukan dengan tiga cara yaitu pengujian ketika lengan bergerak bebas, pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek keras, dan pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek lunak.

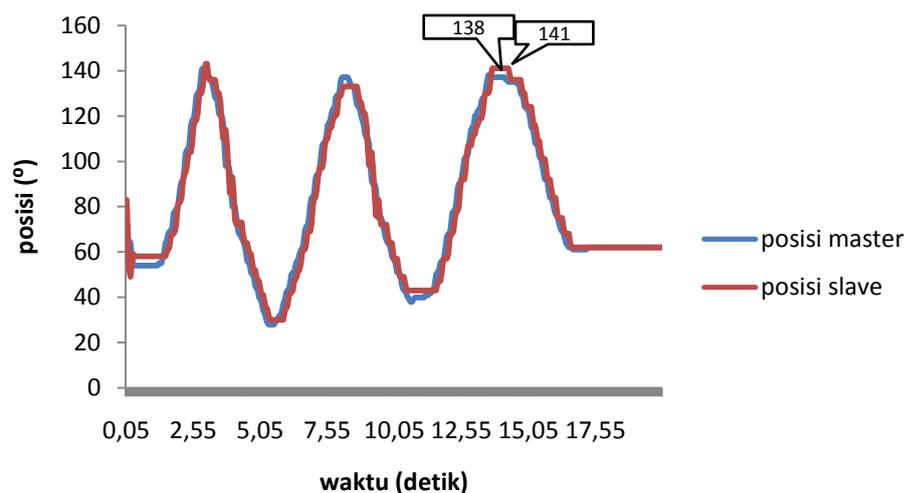
4.4.1 Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan lengan slave mengikuti pergerakan lengan master dengan metode kontrol bilateral posisi simetris melalui perubahan posisi lengan master dan slave.

Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan lengan slave menyamakan posisi dengan lengan master.
2. Menggerak-gerakkan lengan master dan slave bergerak bebas mengikuti gerakan master seperti ditunjukkan Gambar 4.17
3. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.18 slave mampu mengikuti master dengan error posisi sebesar $\pm 3^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave. Pergerakan lengan master dan slave terasa berat.



Gambar 4. 18. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Bergerak Bebas

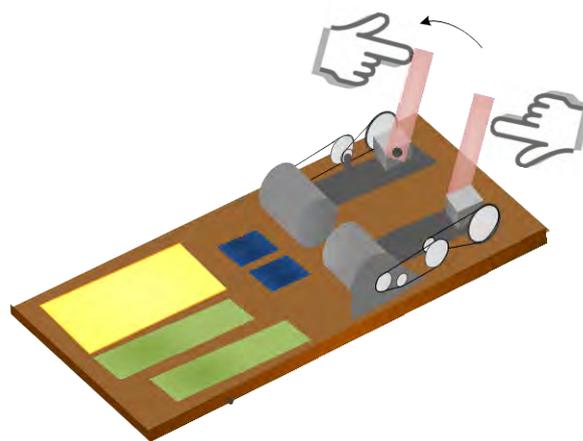
4.4.2 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek keras menggunakan mode kontrol bilateral posisi simetris melalui perubahan posisi lengan master dan slave. Obyek keras yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah tangan.

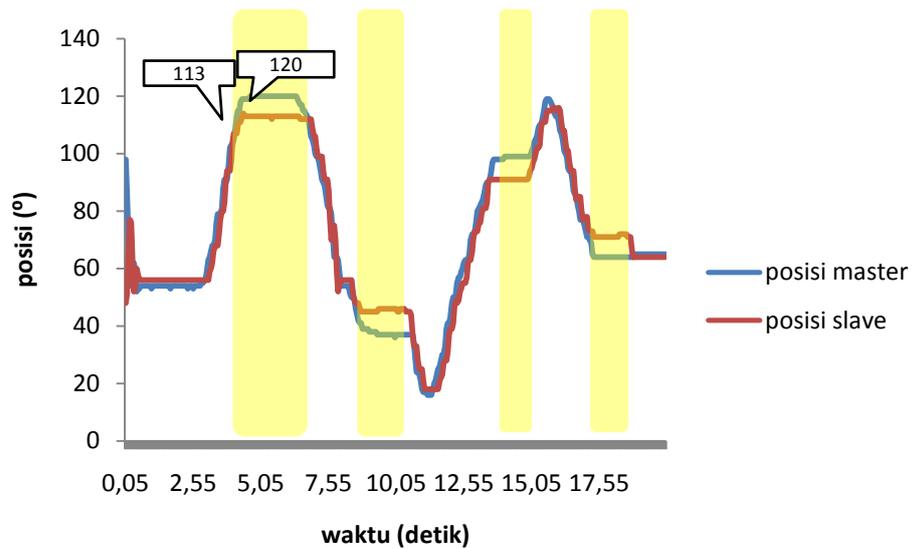
Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda.
2. Menggerak-gerakkan lengan master.
3. Menahan pergerakan lengan slave menggunakan tangan seperti Gambar 4.19
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.20 slave mampu mengikuti pergerakan master. Pada pengujian slave menyentuh obyek sebanyak empat kali yaitu pada daerah yang berwarna kuning. Ketika lengan slave menyentuh obyek operator merasakan lengan master juga tertahan. Namun posisi master saat berhenti tidak sama ketika saat slave menyentuh obyek. Terdapat error posisi sebesar $\pm 7^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave. Semakin besar delay, semakin besar error posisi ketika lengan master dan slave sama-sama berhenti. Pergerakan lengan master dan slave terputus-putus dan terasa berat.



Gambar 4. 19 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras



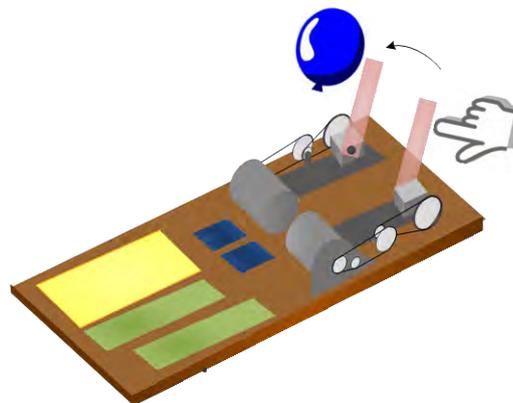
Gambar 4. 20. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

4.4.3 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

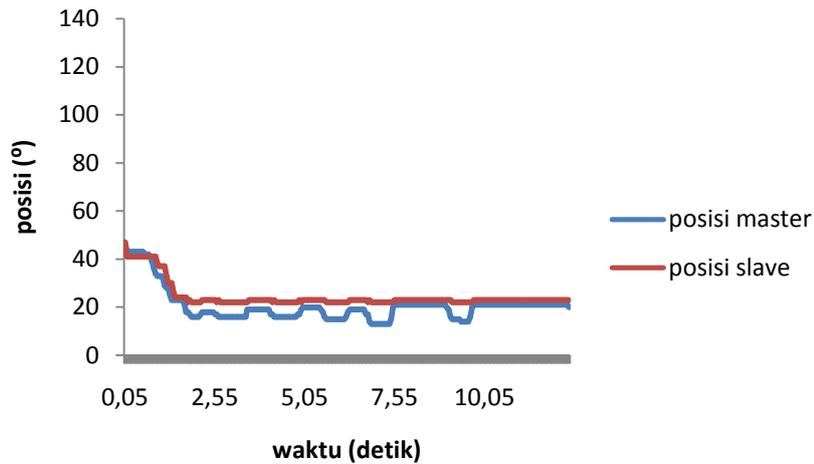
Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek lunak menggunakan metode kontrol bilateral posisi simetris melalui perubahan posisi lengan master dan slave. Obyek lunak yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah balon.

Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master



Gambar 4. 21 Mekanisme Pengujian Kontrol Bilateral saat Pergerakan Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak



Gambar 4. 22. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Posisi Simetris saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

3. Menahan pergerakan lengan slave dengan balon seperti Gambar 4.21
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.22 pantulan ketika slave menyentuh balon dapat dirasakan master dengan cukup baik. Namun terdapat error posisi $\pm 10^\circ$. Error terjadi karena delay antara master dan slave. Karena itu, saat lengan master menyentuh obyek, obyek tidak dapat langsung dirasakan oleh master saat itu juga. Sehingga saat lengan slave menyentuh obyek lunak hingga kedalaman beberapa cm yang menyebabkan lengan tersebut bergerak sejauh n° dari permukaan obyek, maka posisi lengan master menjadi $\text{error} + n^\circ$. Besar error umumnya lebih besar dari perpindahan slave. Dan jika tekanan pada lengan master dilepaskan, lengan tersebut akan bergerak hingga posisinya sama dengan posisi lengan slave. Sehingga perpindahan lengan master lebih besar dibandingkan dengan perpindahan lengan slave.

Kelemahan metode kontrol bilateral posisi simetris adalah pergerakan berat dan terputus putus. Saat menyentuh obyek, terdapat delay yang menyebabkan perbedaan posisi sebesar $\pm 7^\circ$ untuk obyek keras dan $\pm 10^\circ$ untuk obyek lunak. Tidak semua benda lunak dapat terdeteksi sebagai benda lunak. Hal ini dikarenakan kontrol gaya tidak adaptif terhadap impedansi obyek.

4.5 Pengujian Kontrol Bilateral Refleksi Gaya

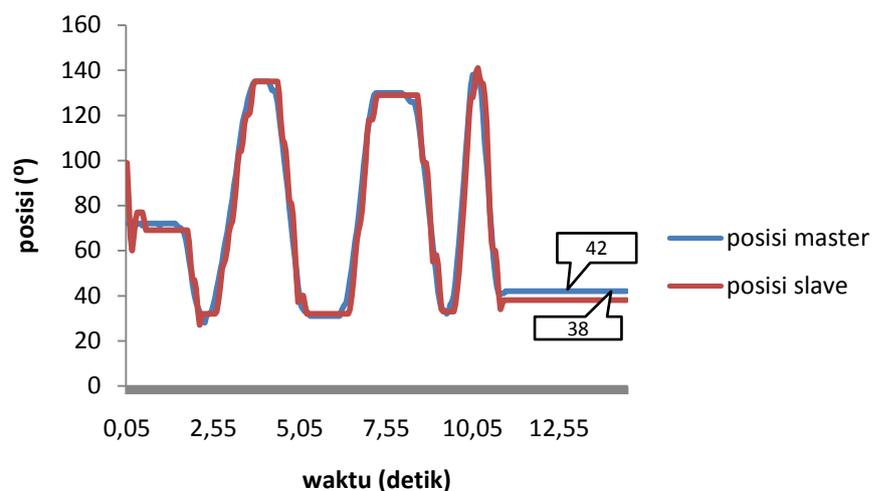
Pada sistem kontrol bilateral refleksi gaya, selisih posisi antara master dan slave digunakan untuk mengontrol posisi master. Sensor arus dipasang pada bagian slave untuk merepresentasikan gaya pada slave. Pengujian ini dilakukan dengan tiga cara yaitu pengujian ketika lengan bergerak bebas, pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek keras, dan pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek lunak.

4.5.1 Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas

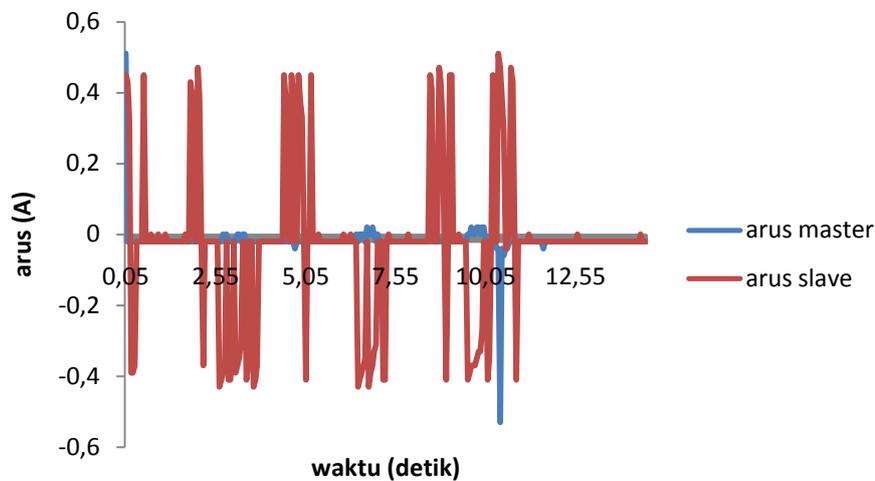
Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan lengan slave mengikuti pergerakan lengan master dengan metode kontrol bilateral refleksi gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave.

Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda. Hal ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan lengan slave menyamakan posisi dengan lengan master.
2. Menggerak-gerakkan lengan master dan slave bergerak bebas mengikuti gerakan master seperti ditunjukkan Gambar 4.17
3. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.



Gambar 4. 23. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas



Gambar 4. 24. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.23 saat power pertama kali lengan slave bergerak mendekati lengan master sehingga pada detik ke 0.3 posisi lengan master dan lengan slave telah sama Setelah itu, slave mampu mengikuti master dengan baik. Namun masih terdapat error posisi yaitu $\pm 4^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave.

Gambar 4.24 menunjukkan grafik arus bahwa terjadi lonjakan arus ketika master dan slave berubah posisi dari diam menjadi bergerak. Sehingga nampak lonjakan terjadi setiap master dan slave berpindah arah. Lonjakan arus ini hanya terjadi sesaat. Nilai arus berkebalikan dengan nilai posisi. Saat lengan berbelok arah menuju sudut yang lebih positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat lengan berbelok arah menuju sudut yang lebih negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3. Dimana suatu benda cenderung mempertahankan keadaan semula. Pada saat satu kali bergerak dalam satu arah terjadi beberapa lonjakan arus. Hal ini dikarenakan error yang menghambat pergerakan master. Pergerakan lengan master terasa lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris.

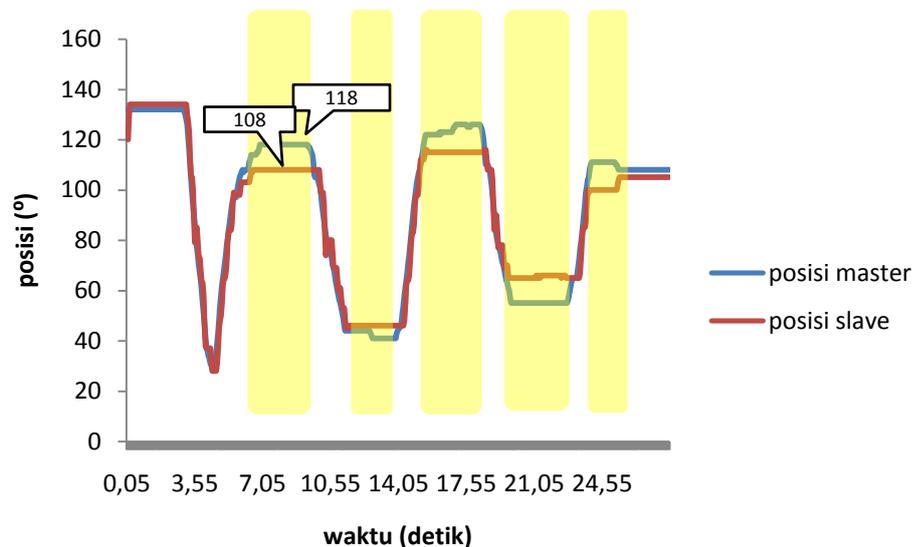
4.5.2 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek keras menggunakan metode kontrol bilateral refleksi gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave. Obyek keras yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah tangan.

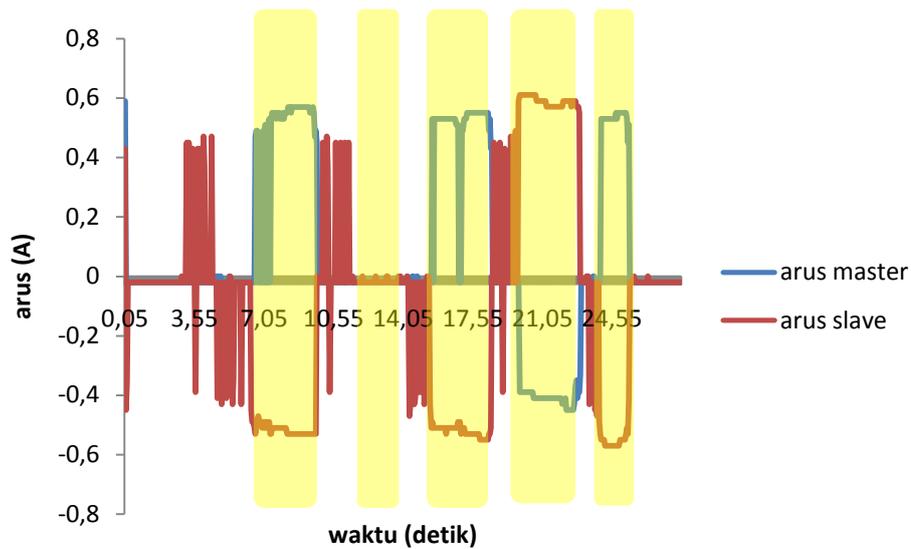
Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan lengan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master
3. Menahan pergerakan lengan slave dengan tangan seperti Gambar 4.19
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.25 slave mampu mengikuti pergerakan master. Pada pengujian slave menyentuh obyek sebanyak lima kali yaitu pada daerah yang berwarna kuning. Ketika lengan slave menyentuh obyek operator merasakan lengan master juga tertahan. Namun posisi master saat berhenti tidak sama ketika saat slave menyentuh obyek. Terdapat error posisi sebesar $\pm 10^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave.



Gambar 4. 25. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya Saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras



Gambar 4. 26. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

Semakin besar delay, semakin besar error posisi ketika lengan master dan slave sama-sama berhenti.

Gambar 4.26 menunjukkan grafik arus bahwa terjadi lonjakan arus ketika master dan slave berubah posisi dari diam menjadi bergerak. Sehingga nampak lonjakan terjadi setiap master dan slave berpindah arah. Lonjakan arus ini hanya terjadi sesaat. Nilai arus berkebalikan dengan nilai posisi. Saat posisi mengalami perubahan positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat posisi mengalami perubahan negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3. Pada saat satu kali bergerak dalam satu arah terjadi beberapa lonjakan arus. Hal ini dikarenakan error yang menghambat pergerakan master. Terlihat perbedaan saat arus yang muncul karena perpindahan arah dengan arus yang muncul ketika slave tertahan obyek. Arus yang muncul karena perpindahan arah bersifat sesaat. Sedangkan arus saat slave terhalang benda muncul selama masih ada benda yang menahan slave. Nilai arus nya pun lebih besar. Pergerakan lengan master dan slave lebih halus dan lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris.

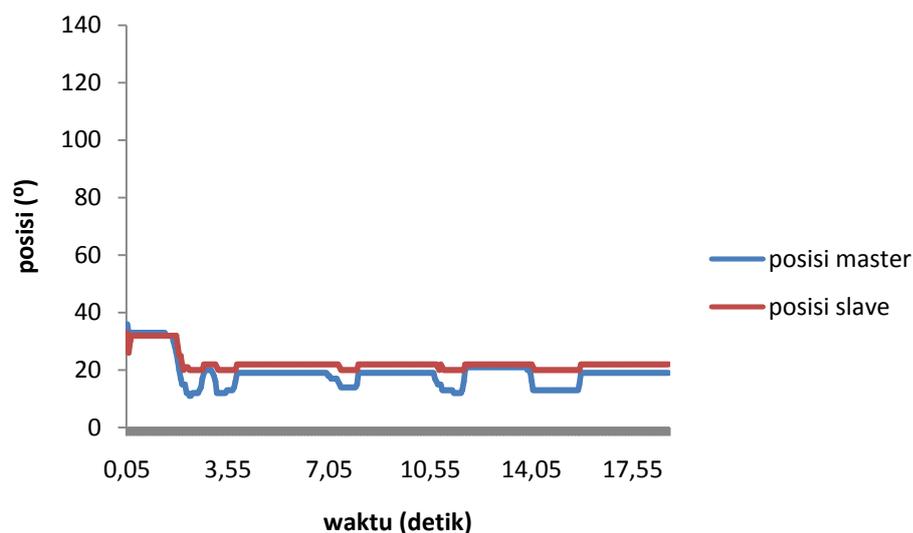
4.5.3 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek lunak menggunakan metode kontrol bilateral refleksi gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave. Obyek lunak yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah balon.

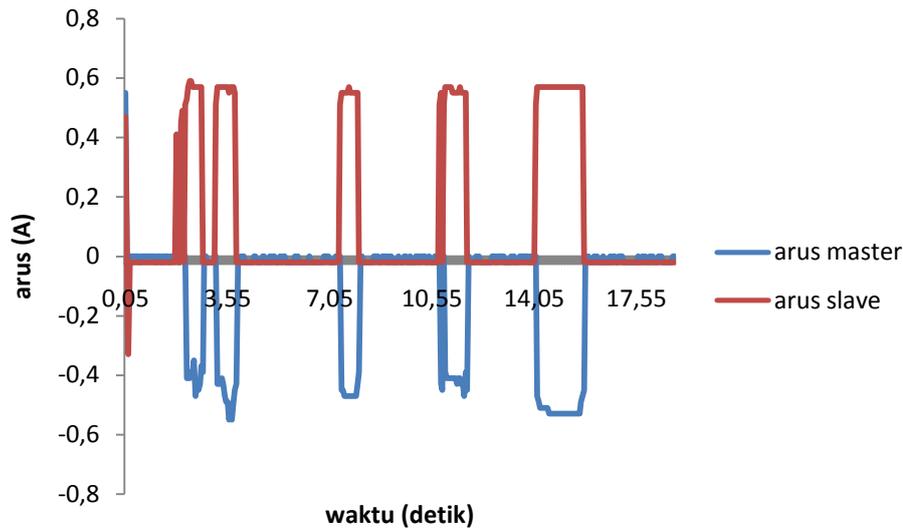
Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master
3. Menahan pergerakan lengan slave dengan balon seperti Gambar 4.21
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.27 pantulan ketika slave menyentuh balon dapat dirasakan master dengan cukup baik. Namun terdapat error posisi $\pm 10^\circ$. Terjadi peningkatan arus ketika slave menekan balon seperti ditunjukkan Gambar 4.28. Error terjadi karena delay antara master dan slave. Saat lengan master menyentuh obyek, obyek tidak dapat langsung dirasakan oleh master saat itu juga. Sehingga saat lengan slave menyentuh obyek lunak hingga kedalaman beberapa cm yang menyebabkan lengan tersebut bergerak



Gambar 4. 27. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak



Gambar 4. 28. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Refleksi Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

sejauh n° dari permukaan obyek, maka posisi lengan master menjadi $error+ n^\circ$. Besar error umumnya lebih besar dari perpindahan slave. Dan jika tekanan pada lengan master dilepaskan, lengan tersebut akan bergerak hingga posisinya sama dengan posisi lengan slave. Sehingga perpindahan lengan master lebih besar dibandingkan dengan perpindahan lengan slave.

Kelebihan metode kontrol bilateral refleksi gaya ini adalah sistem telah mampu bekerja dengan baik saat lengan slave bergerak bebas maupun saat lengan slave menyentuh obyek keras. Pergerakan lengan saat menggunakan kontrol bilateral refleksi gaya lebih ringan dibandingkan pergerakan lengan saat menggunakan kontrol bilateral posisi simetris.

Kelemahan metode kontrol bilateral refleksi gaya adalah jika sistem menyentuh obyek keras, terjadi perbedaan posisi ketika lengan slave dan master sama-sama berhenti sebesar $\pm 10^\circ$ sedangkan jika sistem menyentuh obyek lunak terdapat error posisi sebesar $\pm 10^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave. Tidak semua benda lunak dapat terdeteksi sebagai benda lunak. Hal ini dikarenakan kontrol gaya tidak adaptif terhadap impedansi obyek.

4.6 Pengujian Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya

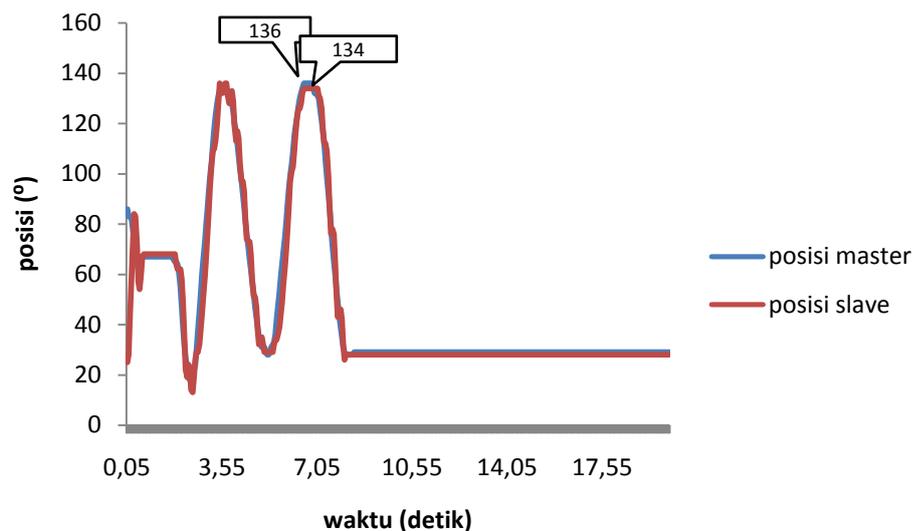
Pada sistem kontrol bilateral umpan balik gaya, selisih posisi antara master dan slave digunakan untuk mengontrol posisi master. Sensor arus dipasang pada bagian slave untuk merepresentasikan gaya pada master dan slave. Selisih arus pada slave dan master inilah yang digunakan untuk mengontrol gaya master. Pengujian ini dilakukan dengan tiga cara yaitu pengujian ketika lengan bergerak bebas, pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek keras, dan pengujian ketika pergerakan lengan tertahan obyek lunak.

4.6.1 Kondisi saat Lengan Slave Bergerak Bebas

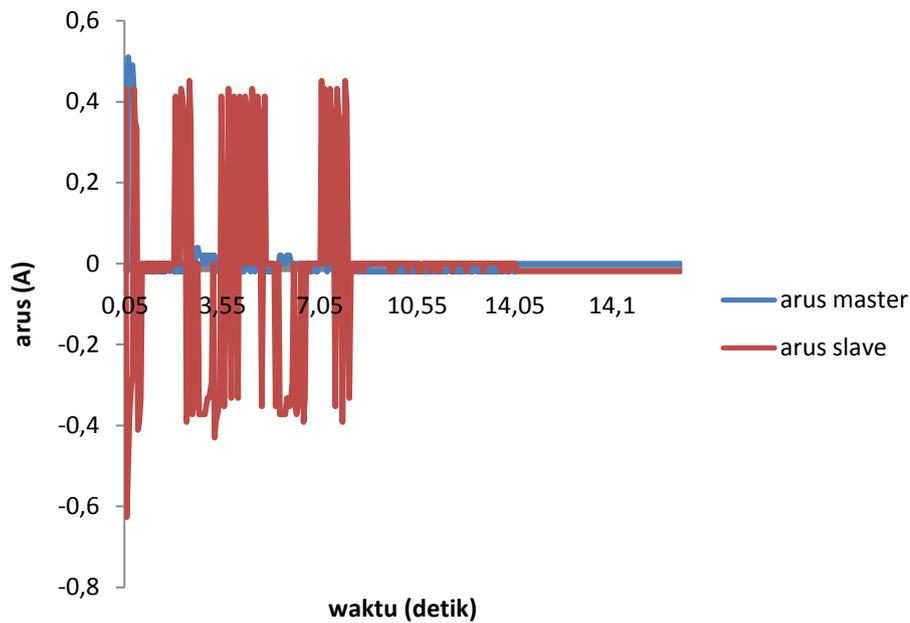
Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan lengan slave mengikuti pergerakan lengan master dengan metode kontrol bilateral umpan balik gaya melalui perubahan posisi lengan master dan slave.

Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master dan slave bergerak bebas mengikuti gerakan master seperti ditunjukkan Gambar 4.17
3. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.



Gambar 4. 29. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas



Gambar 4. 30. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Bergerak Bebas

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.29 saat power pertama kali dinyalakan, lengan slave bergerak mendekati lengan master sehingga pada detik ke 0.65 posisi lengan master dan lengan slave telah sama. Setelah itu slave mampu mengikuti master dengan baik. Namun masih terdapat error posisi yaitu $\pm 2^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave.

Gambar 4.30 menunjukkan grafik arus bahwa terjadi lonjakan arus ketika master dan slave berubah posisi dari diam menjadi bergerak. Sehingga nampak lonjakan terjadi setiap master dan slave berpindah arah. Lonjakan arus ini hanya terjadi sesaat. Nilai arus berkebalikan dengan nilai posisi. Saat lengan berbelok arah menuju sudut yang lebih positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat lengan berbelok arah menuju sudut yang lebih negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3. Dimana suatu benda cenderung mempertahankan keadaan semula. Pada saat satu kali bergerak dalam satu arah terjadi beberapa lonjakan arus. Hal ini dikarenakan error yang menghambat pergerakan master. Pergerakan Lengan master terasa lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris dan kontrol bilateral refleksi gaya.

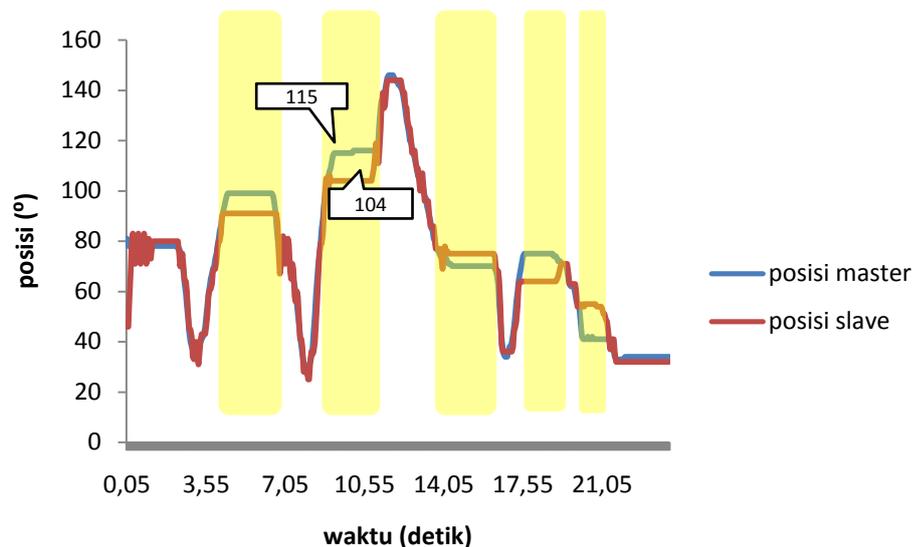
4.6.2 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek keras menggunakan metode kontrol bilateral umpan balik gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave. Obyek keras yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah tangan.

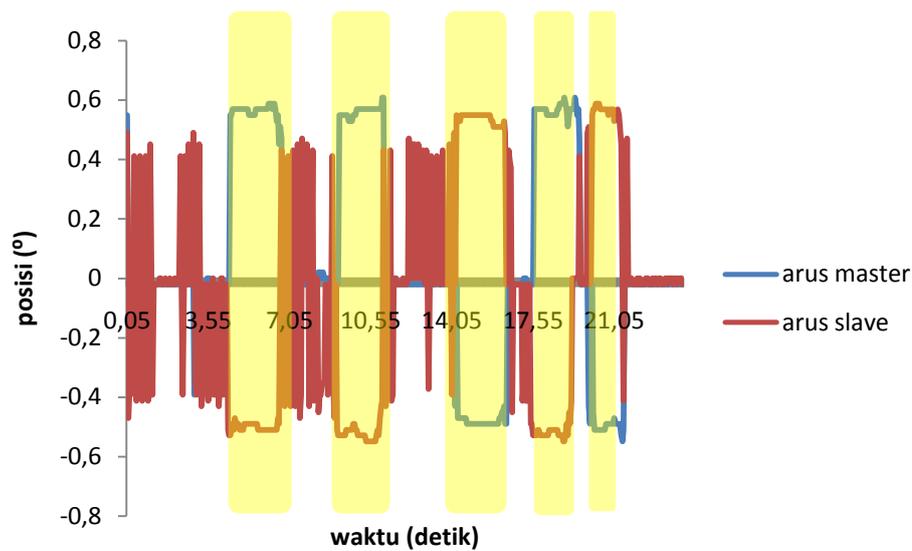
Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi yang berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master dengan bebas seperti
3. Menahan pergerakan lengan slave dengan tangan seperti Gambar 4.19
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4. 31 lengan master dan slave saling mendekat menyamakan posisi pada detik ke 0.5. Selanjutnya slave mampu mengikuti master. Pada pengujian slave menyentuh obyek sebanyak lima kali yaitu pada daerah yang berwarna kuning. Ketika lengan slave menyentuh obyek operator merasakan lengan master juga tertahan. Namun posisi master saat berhenti tidak sama ketika saat slave menyentuh obyek.



Gambar 4. 31. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras



Gambar 4. 32. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Keras

Terdapat error posisi sebesar $\pm 11^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave.

Gambar 4.32 menunjukkan grafik arus bahwa terjadi lonjakan arus ketika master dan slave berubah posisi dari diam menjadi bergerak. Sehingga nampak lonjakan terjadi setiap master dan slave berpindah arah. Lonjakan arus ini hanya terjadi sesaat. Nilai arus berkebalikan dengan nilai posisi. Saat posisi mengalami perubahan positif, maka arus bernilai negatif, sebaliknya saat posisi mengalami perubahan negatif, maka arus bernilai positif. Hal ini dikarenakan berlakunya hukum Newton 3. Pada saat satu kali bergerak dalam satu arah terjadi beberapa lonjakan arus. Hal ini dikarenakan error yang menghambat pergerakan master. Terlihat perbedaan saat arus yang muncul karena perpindahan arah dengan arus yang muncul ketika slave tertahan obyek. Arus yang muncul karena perpindahan arah bersifat sesaat. Sedangkan arus saat slave terhalang benda muncul selama masih ada benda yang menahan slave. Nilai arus nya pun lebih besar. Pergerakan lengan master dan slave lebih halus dan lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris dan kontrol bilateral refleksi gaya.

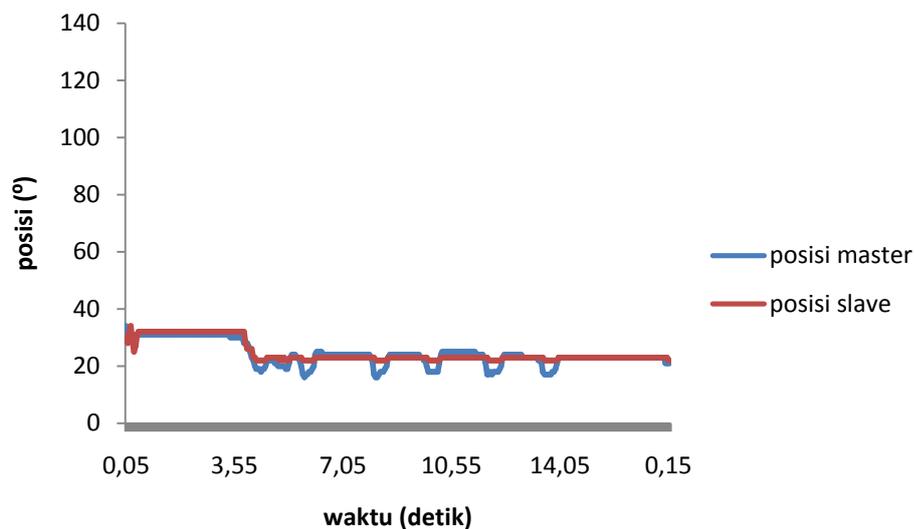
4.6.3 Kondisi saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek lunak menggunakan metode kontrol bilateral umpan balik gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave. Obyek lunak yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah balon.

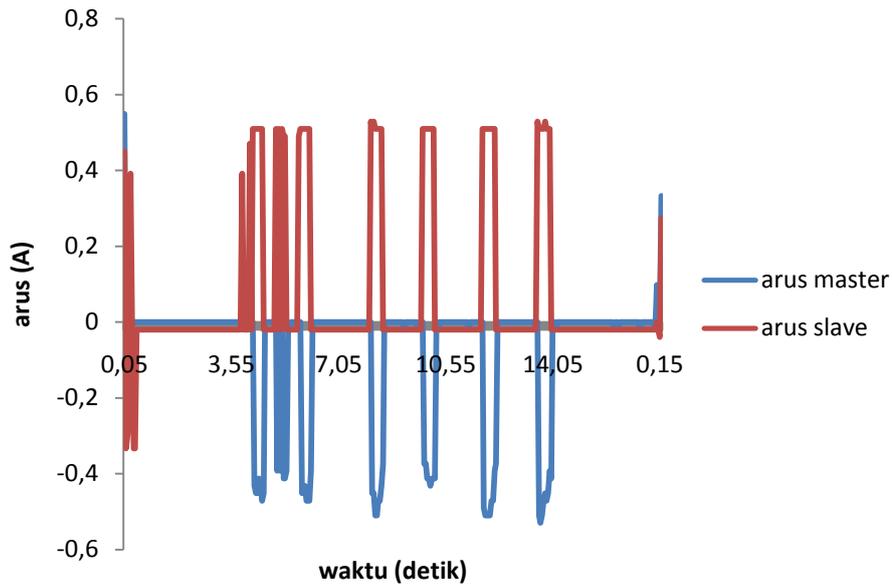
Tahapan pengujian:

1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master
3. Menahan pergerakan lengan slave dengan balon seperti Gambar 4.19
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.33 pantulan ketika slave menyentuh balon dapat dirasakan master dengan cukup baik. Namun terdapat error posisi $\pm 10^\circ$. Terjadi peningkatan arus ketika slave menekan balon seperti ditunjukkan Gambar 4.28. Error terjadi karena delay antara master dan slave. Saat lengan master menyentuh obyek, obyek tidak dapat langsung dirasakan oleh master saat itu juga. Sehingga saat lengan slave menyentuh obyek lunak hingga kedalaman beberapa cm yang menyebabkan lengan tersebut bergerak



Gambar 4. 33. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak



Gambar 4. 34. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Lengan Slave Ditahan Obyek Lunak

sejauh n° dari permukaan obyek, maka posisi lengan master menjadi $error+ n^\circ$. Besar error umumnya lebih besar dari perpindahan slave. Dan jika tekanan pada lengan master dilepaskan, lengan tersebut akan bergerak hingga posisinya sama dengan posisi lengan slave. Sehingga perpindahan lengan master lebih besar dibandingkan dengan perpindahan lengan slave.

4.6.4 Kondisi saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave

Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui kemampuan sistem dalam merasakan obyek yang menghambat pergerakan slave menggunakan metode kontrol bilateral umpan balik gaya melalui perubahan posisi dan arus lengan master dan slave. Obyek yang digunakan untuk menahan pergerakan slave adalah tangan. Namun berbeda dengan sebelumnya, tangan hanya memperlambat bukan menghentikan atau menahan pergerakan slave.

Tahapan pengujian:

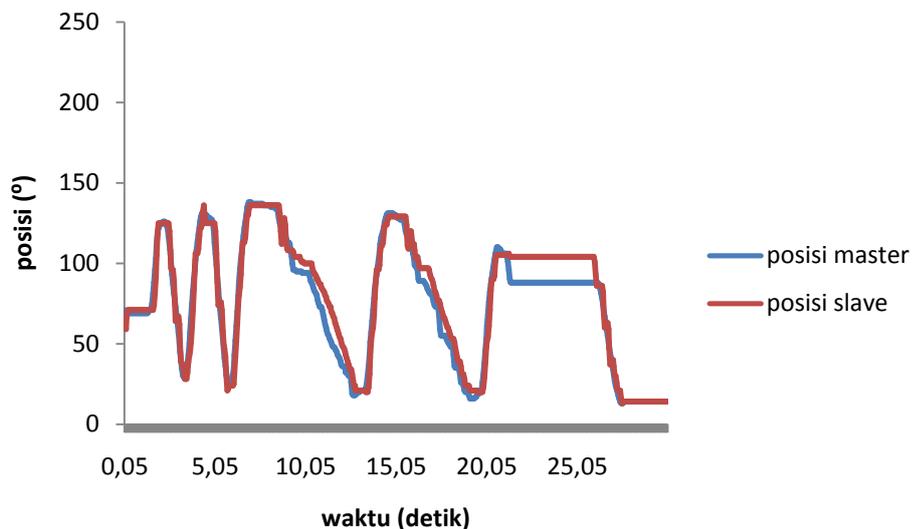
1. Menempatkan posisi awal lengan master dan slave pada posisi berbeda
2. Menggerak-gerakkan lengan master

3. Menghambat pergerakan lengan slave dengan tangan sehingga pergerakan slave tidak sampai berhenti
4. Mengamati dan mencatat perubahan posisi dan arus master dan slave.

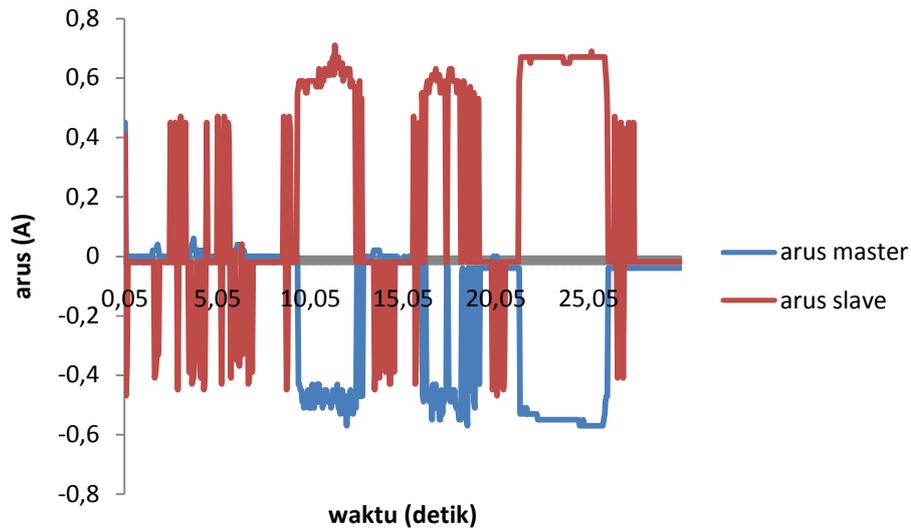
Hasil dari pengujian, tampak pada Gambar 4.35 setelah detik ke 9.35 pergerakan slave tertahan sehingga posisi slave tertinggal oleh master, namun masih mampu bergerak mengikuti master. Karena pergerakan slave terhambat, maka pergerakan master pun semakin lebih berat. Pada detik ke 21.75, slave tertahan sehingga berhenti, karenanya master juga tertahan dan berhenti.

Untuk nilai arus, dapat dilihat pada Grafik 4.36 di mana saat slave terhambat dan slave tertahan sama-sama terjadi peningkatan arus. Namun peningkatan arus ketika slave terhambat lebih kecil dibandingkan ketika slave tertahan.

Kelebihan metode kontrol ini adalah sistem telah mampu bekerja dengan baik saat lengan slave bergerak bebas maupun saat lengan slave menyentuh obyek keras. Pergerakan lengan saat menggunakan kontrol bilateral umpan balik gaya lebih ringan dibandingkan pergerakan lengan saat menggunakan kontrol bilateral posisi simetris dan kontrol bilateral refleksi gaya.



Gambar 4. 35. Grafik Posisi Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave



Gambar 4. 36. Grafik Arus Master dan Slave Menggunakan Kontrol Bilateral Umpan Balik Gaya saat Obyek Menghambat Kecepatan Gerak Lengan Slave

Kelemahan metode kontrol bilateral umpan balik gaya adalah jika sistem menyentuh obyek keras, terjadi perbedaan posisi ketika lengan slave dan master sama-sama berhenti sebesar $\pm 11^\circ$ sedangkan jika sistem menyentuh obyek lunak terdapat error posisi sebesar $\pm 10^\circ$. Hal ini dikarenakan pengaruh delay antara master dan slave. Tidak semua benda lunak dapat terdeteksi sebagai benda lunak. Hal ini dikarenakan kontrol gaya tidak adaptif terhadap impedansi obyek.

BAB 5

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini didapatkan kesimpulan bahwa pada kontrol bilateral posisi simetris, slave dapat bergerak mengikuti pergerakan master dengan error posisi $\pm 3^\circ$. Ketika lengan slave ditahan obyek keras, lengan master juga tertahan dengan error posisi $\pm 7^\circ$. Sedangkan ketika lengan slave ditahan obyek lunak, pantulan obyek dirasakan lengan master dengan error posisi $\pm 10^\circ$. Pergerakan lengan master dan slave berat

Pada sistem kontrol bilateral refleksi gaya, slave dapat bergerak mengikuti pergerakan master dengan error posisi $\pm 4^\circ$. Ketika lengan slave ditahan obyek keras, lengan master juga tertahan dengan error posisi $\pm 10^\circ$. Sedangkan ketika lengan slave ditahan obyek lunak, pantulan obyek dirasakan lengan master dengan error posisi $\pm 10^\circ$. Pergerakan lengan master dan slave lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris

Pada sistem kontrol bilateral umpan balik gaya, slave dapat bergerak mengikuti pergerakan master dengan error posisi $\pm 2^\circ$. Ketika lengan slave ditahan obyek keras, lengan master juga tertahan dengan error posisi $\pm 11^\circ$. Sedangkan ketika lengan slave ditahan obyek lunak, pantulan obyek dirasakan lengan master dengan error posisi $\pm 10^\circ$. Pergerakan lengan master dan slave lebih ringan dibandingkan menggunakan kontrol bilateral posisi simetris dan kontrol bilateral refleksi gaya.

6.2 Saran

Untuk dapat merealisasikan seperti teknologi *haptic* yang telah diproduksi komersial, antara lain dengan menambahkan komunikasi tanpa kabel antara master dan slave. Selain itu perlu ditambahkan kontrol gaya yang bersifat adaptif terhadap impedansi obyek sehingga sistem mampu merasakan berbagai sentuhan terhadap obyek lunak.

Untuk mendapatkan sistem kontrol bilateral yang robust sebaiknya pengontrolannya berbasis percepatan dan menggunakan *reaction force observer* untuk mendapatkan informasi gaya. Namun hendaknya menggunakan motor DC yang jelas spesifikasinya. Dan untuk mendapatkan informasi posisi sebaiknya menggunakan encoder yang memiliki sensitifitas tinggi.

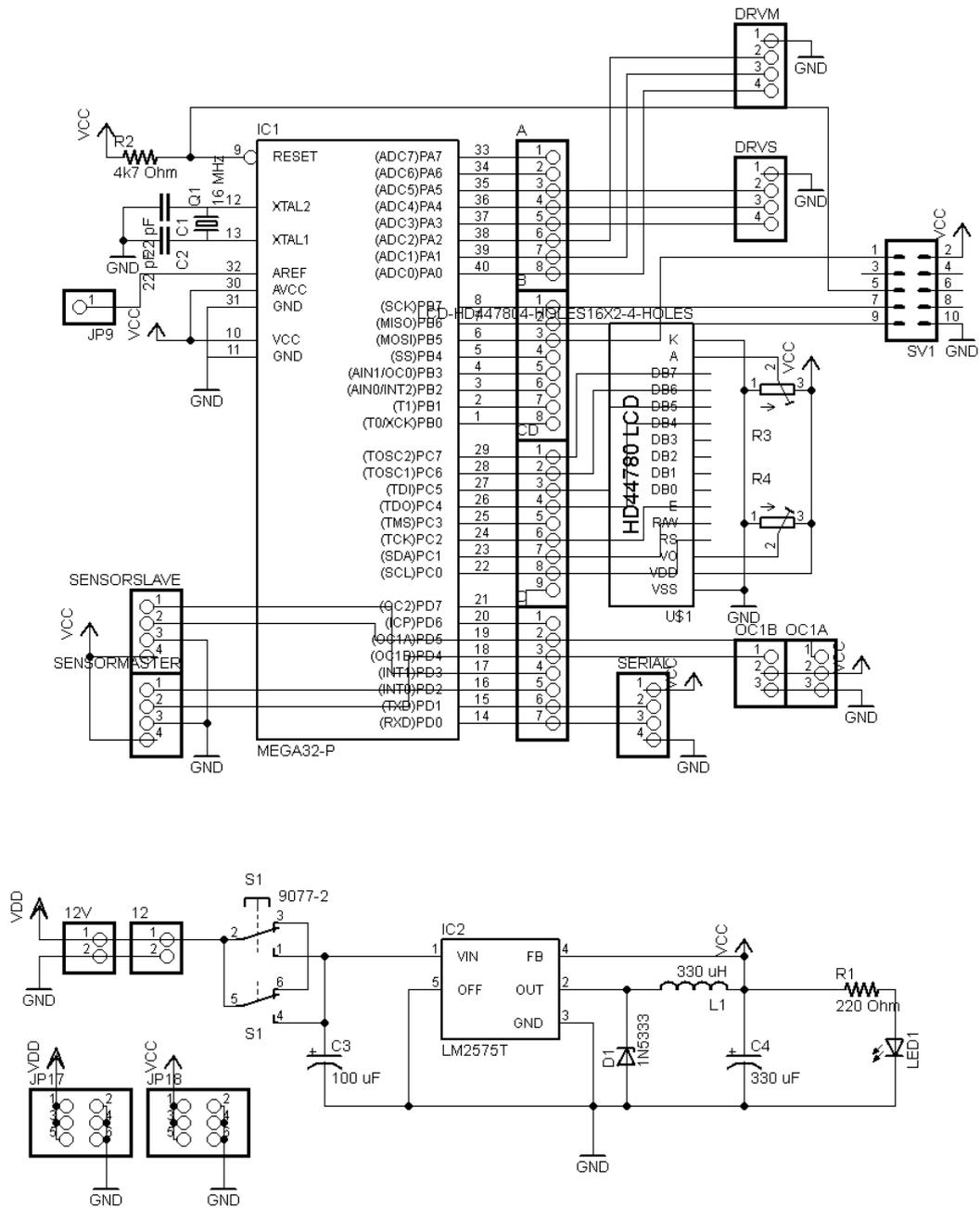
DAFTAR PUSTAKA

- Antonello, Ricardo, (2010), “Robust Control based on Disturbance”, *Lecture presentation: Control System Design*, University of Padove, Vicenza.
- Chen Tiehua, (2007), “Research on Master-Slave Robots Bilateral Control Strategy with Force Tele-Presence”. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*. August 18 - 21, 2007, Jinan, China
- Deng Le. Zhao Dingxuan. Ni Tao. Zhen Hongyu, (2005), “Design of a Manual Controller of 6-DOF Force Feedback Based on Stewart Platform”. *Journal of agriculture mechanism*, 36_7_, hal:118~121
- El Saddik, (2011), “*Haptics Technologies Bringing Touch To Multimedia*”, Springer.
- Katsura, K., Iida, W., Ohnishi, K, (2005),”Medical mechatronics - An Application to haptics forceps”, *Annual Reviews in Control*, hal: 237-245.
- Li, Y. F., & Chen, X. B, (1998), “On the dynamic behavior of a force/torque sensor for robots”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,47(1), hal: 304–308.
- Matsuhira N, Asakura M, Bamba H, (1994), “Manoeuvrability of a master-slave manipulator with different configurations and its evaluation tests [J]”. *Advanced Robotics*, 8(2), hal: 185~203.
- Muis, Abdul, dkk, (2009), “Microcontroller based Bilateral Control: A Comprehensive Study”, *Department of Engineering, Faculty of Engineering*, University of Indonesia.
- Murakami, T., Yu, F., Ohnishi, K. (1993), “Torque sensorless control in multidegree-of-freedom manipulator,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 40, no. 2, hal: 259–265,

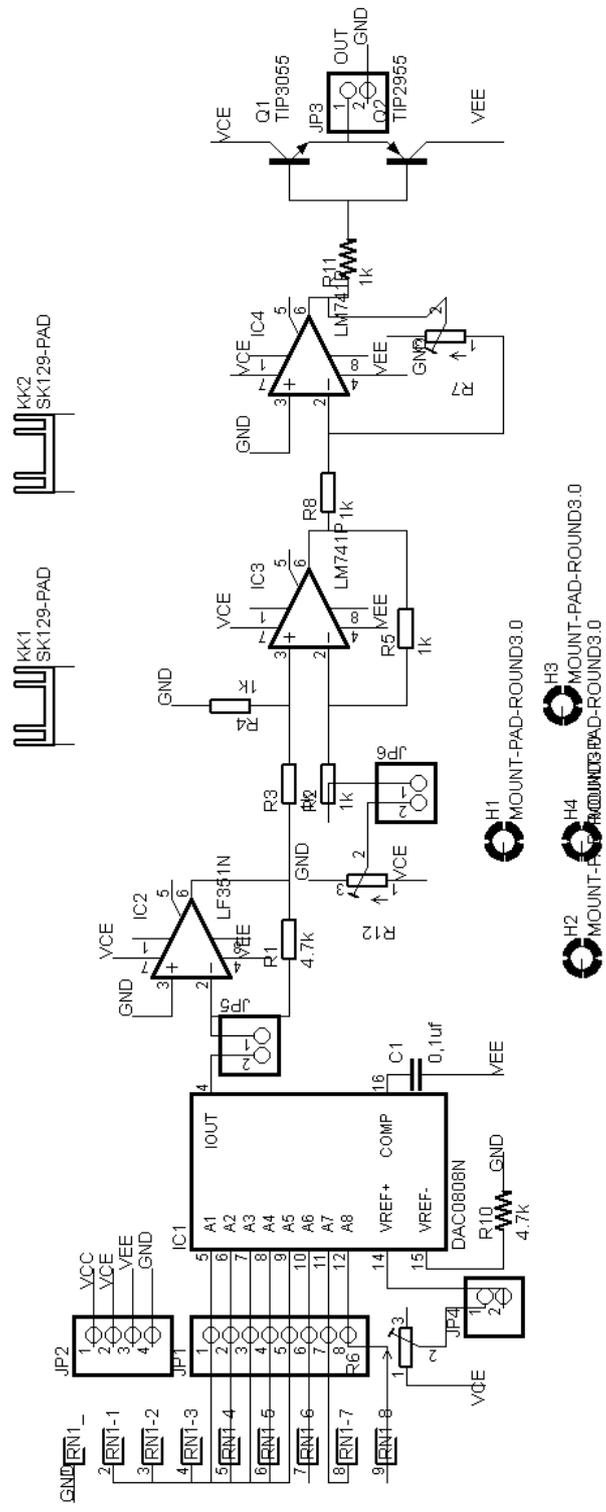
- Ohnishi, K., Matsui, N., Hori, Y., (1994), “Estimation, Identification, and Sensorless in Motion System” *Proceeding of IEEE Vol 82 No 8*.
- Okumura Allison, (2012). “Types of *haptic* interfaces and device demonstrations”, *Lecture presentation: Design and Control of Haptic Systems*, Stanford University.
- Preusche Carsten, (2006), “Telerobotics and *Haptics* Actual and Future Research Questions and Applications”, *IST’06 - Advanced Haptics Workshop*. Institute of Robotics and Mechatronics German Aerospace Center (DLR)
- Purwanto, Djoko (2012), *Electronic Control System*, Bahan Kuliah: Desain Sistem Kontrol Elektronik, ITS, Surabaya.
- S. Kudomi, et al (2000), “Development of a hydraulic master-slave system for tele-robotics” (*haptic* display device for usage of a hydraulic servo system) *J. Proc. 1th FPNI-PhD Symp*, hal: 467~474, 2000.
- S. Sato; J. Yoshida; K. Kobayashi, (1993), “Bilateral control of electro hydraulic servo mechanism”, *Proc. 2nd JHPS Inter. Symp. on Fluid Power*, hal:185-190.
- Tanaka, H. dkk (2009), “Implementation of Bilateral Control System Based on Acceleration Control Using FPGA for Multi-DOF *Haptic* Endoscopic Surgery Robot”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 56, NO. 3, March 2009.
- Wicaksono, (2012), “Implementasi Bilateral Control pada 1 DOF Telemanipulator”, *Jurusam Teknik Elektro, FTI, ITS*.
- Winson, (2015), “WCS2702-Hall Effect Base Linear Current Sensor”, *Winson Semiconductor Corp., China*, hal. 1-5.
- Winson, (2015), “WCS current sensor Application Note”, *Winson Semiconductor Corp., China*, hal. 1-2.

LAMPIRAN

Rangkaian Minimum Sistem



Rangkaian Driver





WCS2702

Hall Effect Base Linear Current Sensor

Features:

- Low noise analog signal path
- 98 mΩ internal conductor resistance
- Output voltage proportional to AC and DC current
- Min. sensing current 0~2.0A at 5V voltage supply
- High Sensitivity 1 mV/mA
- Wide operating voltage range 3.0~12 V.
- Low operating current 3mA
- Nearly zero magnetic hysteresis.
- Ratiometric output from supply voltage
- 10K Hz bandwidth



Functional Description :

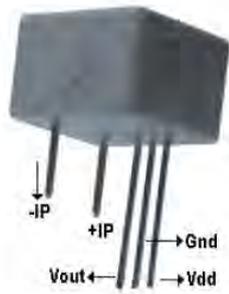
The Winson WCS2702 provides economical and precise solution for both DC and AC current sensing in industrial, commercial and communications systems. The unique package allows for easy implementation by the customer. Typical applications include motor control, load detection and management, over-current fault detection and any intelligent power management system etc...

The WCS2702 consists of a precise, low-temperature drift linear hall sensor IC with temperature compensation circuit and a current path with 98 mΩ typical internal conductor resistance. This extremely low resistance can effectively reduce power loss, operating temperature and increase the reliability greatly. Applied current flowing through this conduction path generates a magnetic field which is sensed by the integrated Hall IC and converted into a proportional voltage.

The terminals of the conductive path are electrically isolated from the sensor leads. This allow the WCS2702 current sensor to be used in applications requiring electrical isolation without the use of opto-isolators or other costly isolation techniques and make system more competitive in cost.

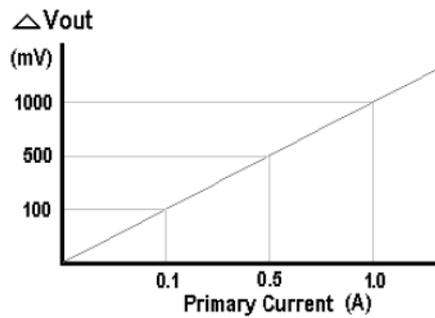
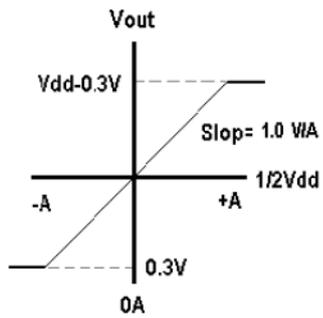
Winson reserves the right to make changes to improve reliability or manufacturability.

©Winson, 2015/5/8

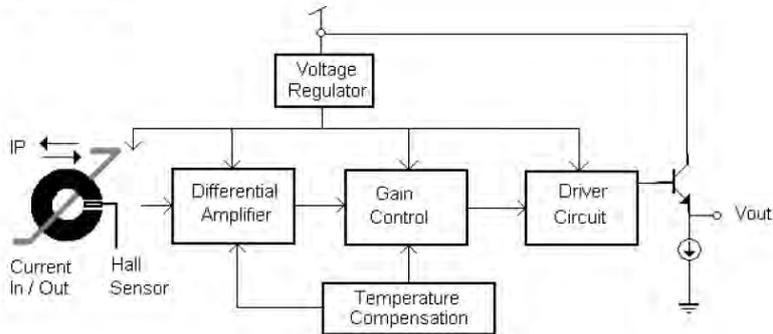


ABSOLUTE MAXIMUM RATING

| | |
|----------------------------------|-----------------|
| Supply Voltage, Vdd | 14V |
| Pass Current, IP | 2.5A |
| Pass Current (10ms pulse) Ipulse | 5A |
| Output Current Sink | 0.4mA |
| Output Current Source | 2mA |
| Conductor Isolation Voltage | 1000V |
| Operating Temperature Range | |
| Ta | -20°C to +125°C |
| Storage Temperature Range | |
| Ts | -65°C to +150°C |
| Power Dissipation Pd | 1 W |



Function Block:



Electrical Characteristics:

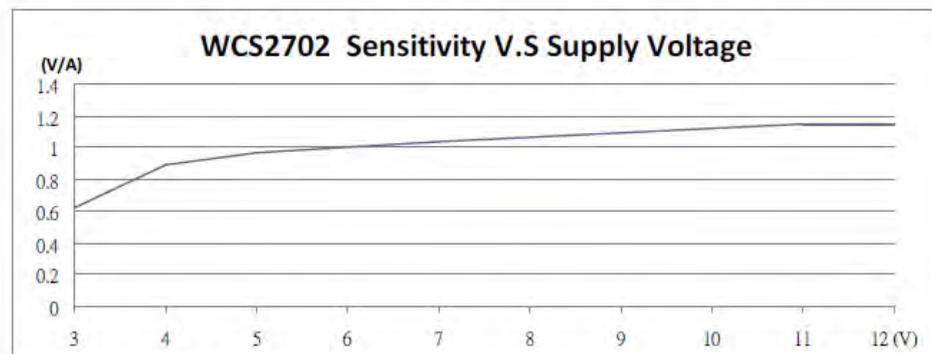
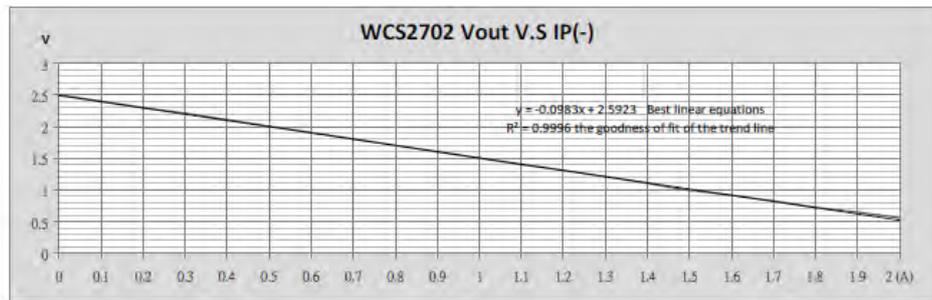
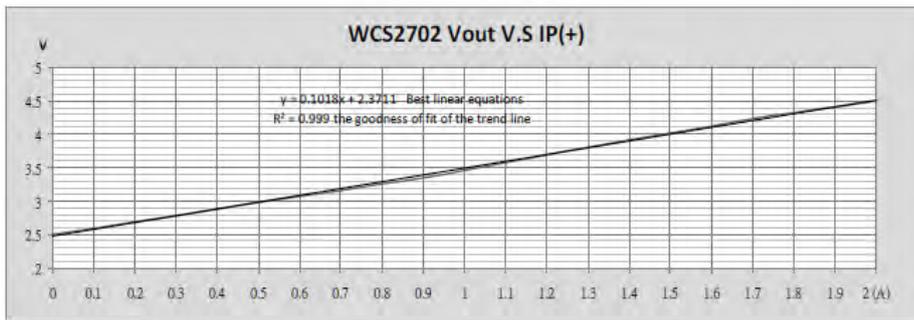
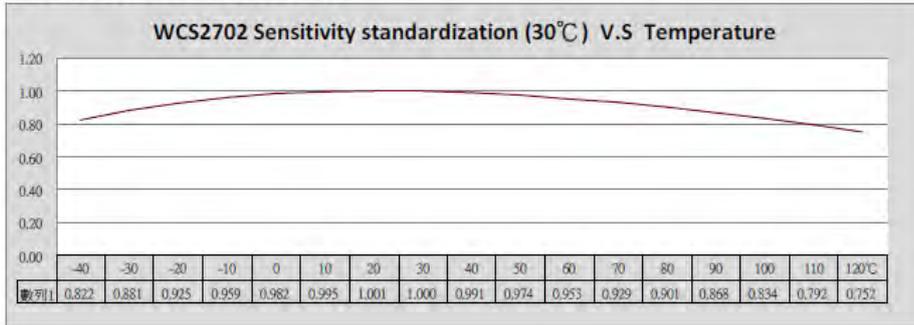
(T=+25°C, Vdd=5.0V)

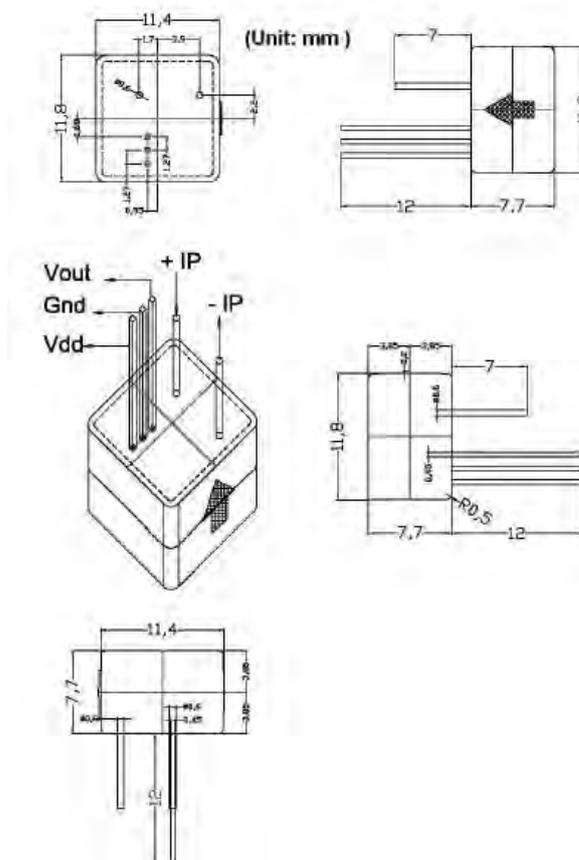
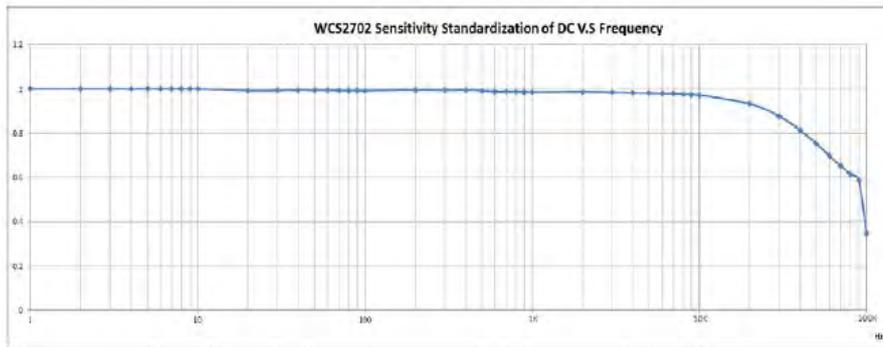
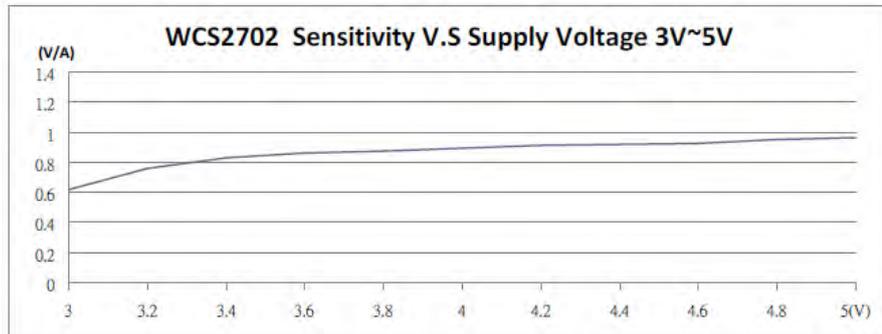
| Characteristic | Symbol | Test Conditions | Min | Typ | Max | Units |
|------------------------------|----------|---------------------|------|------|------|-------|
| Supply Voltage | Vcc | — | 3.0 | — | 12 | V |
| Supply Current | Isupply | IP = 0 A | — | 3.5 | 6.0 | mA |
| Zero Current Vout | V0G | IP = 0 A | 2.4 | 2.5 | 2.6 | V |
| Primary Conductor Resistance | Rprimary | IP = 2 A | — | 98 | — | mΩ |
| Sensitivity | ΔVout | IP = ± 2.0 A | 0.85 | 1.0 | 1.15 | V/A |
| Bandwidth | BW | | — | 10 | — | kHz |
| Measurable Current Range | MCR | Vdd=5V (DC current) | — | ±2.0 | — | A |
| | | Vdd=5V (AC RMS) | — | 1.4 | — | |
| Temperature Drift | ΔVout | Ip = 0 A | — | ±0.5 | — | mV/°C |

1. All output-voltage measurements are made with a voltmeter having an input impedance of at least 100kΩ

2. Do not apply any load on output pin, it will degrade IC performance.

Characteristic Diagrams:





RIWAYAT HIDUP PENULIS



Vita Permatasari dilahirkan di Bondowoso, 23 Setember 1990. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Supariyanto dan Ibu Lilik Setyowati. Penulis memulai pendidikan di SDN Kalirejo 02 Lawang-Malang, lalu melanjutkan di SMPN 01 Lawang-Malang. Penulis menempuh jenjang pendidikan di SMAN 01 Lawang-Malang. Pada tahun 2008 penulis diterima di Program S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas

Brawijaya-Malang dengan mengambil konsentrasi Bidang Studi Elektronika dan menyelesaikan studi tahap sarjana pada tahun 2012. Setelah menyelesaikan studi di tahap sarjana, penulis meneruskan pendidikan di Program Magister Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan memilih bidang keahlian Elektronika Industri.

e-mail : permatasariv@gmail.com