



**RANCANG BANGUN KENDALI KATUP PENYIMPANAN  
ENERGI UDARA TERKOMPRESI MENGGUNAKAN  
*FUZZY LOGIC***

**SKRIPSI**

Oleh

**Danang Aditiya Mahendra  
NIM 151910201021**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO STRATA 1  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**



**RANCANG BANGUN KENDALI KATUP PENYIMPANAN  
ENERGI UDARA TERKOMPRESI MENGGUNAKAN  
*FUZZY LOGIC***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Danang Aditiya Mahendra  
NIM 151910201021**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO STRATA 1  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2019**

## PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Orang tua saya, Bapak Bambang S. G. dan Ibu Sumarlina yang selalu memberikan kasih sayang, bimbingan, dukungan, dan doa yang tiada henti;
2. Kakak saya, Rudy Herlina Sari S.E., yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tiada henti;
3. Adik saya, Muhammad Zulfikar Anshori yang selalu menjadi penyemangat;
4. Guru-guru yang telah mendidik saya sejak taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi;
5. Almater Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember.

*“Kupersembahkan juga skripsi ini untuk mereka yang telah menghina, menganggap remeh, dan selalu merendahkanku. Terimakasih telah sejauh itu mengamati hidupku. Mungkin, kalian seperti itu karena kalian belum sepenuhnya kenal dengan kehidupanku, kalian masih memandangkanku hanya dari sisi yang lain. Terimakasih telah menjadikanku objek hinaan, cacian, dan umpatan kalian selama ini. Betapa tidak berharganya waktu kalian selama ini sehingga sampai sejauh itu mengamati setiap apa yang telah kuperbuat selama ini. Aku tak akan pernah mencapai tahap menulis ini apabila tanpa kalian. Terimakasih telah mengajarkanku arti kedewasaan dan kesabaran yang tinggi. Hidup kalian tidak akan pernah sekalipun berubah tanpa kalian mau untuk berubah. Keluar dari zona nyaman. Sekali lagi, terimakasih telah menjadikanku setengah dari bagian hidup kalian saat ini.”*

*\*untuk kalian yang merasa\**

## MOTO

*Dan berpeganglah kamu semuanya kepada tali (agama) Allah, dan janganlah kamu bercerai berai, dan ingatlah akan nikmat Allah kepadamu ketika kamu dahulu (masa Jahiliyah) bermusuh-musuhan, maka Allah mempersatukan hatimu, lalu menjadilah kamu karena nikmat Allah, orang-orang yang bersaudara; dan kamu telah berada di tepi jurang neraka, lalu Allah menyelamatkan kamu dari padanya. Demikianlah Allah menerangkan ayat-ayat-Nya kepadamu, agar kamu mendapat petunjuk.*

(terjemahan Surah Al-Imron ayat 103)\*)

---

\* Departemen Agama Republik Indonesia. 2006. *Al Qur'an dan Terjemahannya*. Jakarta: Pena Pundi Aksara.

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

nama : Danang Aditiya Mahendra

NIM : 151910201021

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “Rancang Bangun Kendali Katup Penyimpanan Energi Udara Menggunakan *Fuzzy Logic*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, April 2019

Yang menyatakan,

Danang Aditiya Mahendra  
NIM 151910201021

**SKRIPSI**

**RANCANG BANGUN KENDALI KATUP PENYIMPANAN  
ENERGI UDARA TERKOMPRESI MENGGUNAKAN  
*FUZZY LOGIC***

Oleh  
Danang Aditiya Mahendra  
NIM 151910201021

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T

Dosen Pembimbing Anggota : Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Rancang Bangun Kendali Katup Penyimpanan Energi Udara Terkompresi Menggunakan *Fuzzy Logic*” karya Danang Aditiya Mahendra telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal :

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

**Tim Penguji**

Ketua,

Anggota I,

RB. Moch. Gozali, S.T., M.T  
NIP 196906081999031002

Ir. Widyono Hadi, M.T  
NIP 196104141989021001

Anggota II,

Anggota III,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T  
NIP 197008261997021001

Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M  
NIP 196312011994021002

Mengesahkan  
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M  
NIP 196612161995032001

Rancang Bangun Kendali Katup Penyimpanan Energi Udara Terkompresi  
Menggunakan *Fuzzy Logic*

**Danang Aditiya Mahendra**

*Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember*

**ABSTRAK**

Kebutuhan penyimpanan energi alternatif sebagai pengganti baterai semakin meningkat seiring meningkatnya pemanfaatan energi baru dan terbarukan. Dalam penelitian ini akan dibahas mengenai penyimpanan energi alternatif dengan memanfaatkan potensial udara yang terkompresi dalam sebuah ruang tertutup yaitu *small scale – compressed air energy storage* dengan fokus pengembangan pada system kendali katup untuk udara tekan yang masuk pada *inlet in* turbin (*air motor*) dan dengan pengaturan tegangan agar tegangan yang dihasilkan generator konstan sesuai dengan target *set point* yang diberikan. Kendali katup udara disini menggunakan jenis kontrol *close loop* dengan menerapkan logika *fuzzy* menggunakan Arduino UNO R3. Pengujian tanpa beban dilakukan dengan model perpindahan nilai *set point*. Pengujian ini menghasilkan waktu selama kurang dari 20 s dan *error steady state* sebesar 2,67 %. Kemudian pengujian berbeban dilakukan dengan 2 model yaitu pelepasan dan pemberian beban serta penambahan beban secara *step by step*. Dalam pengujian model pelepasan dan pemberian beban waktu yang dibutuhkan untuk meju target *set point* 24 V kurang dari 10 s dengan *error steady state* sebesar 2,58 %. Sedangkan pengujian model perpindahan beban secara *step by step* waktu yang dibutuhkan untk menuju target *set point* 24 V kurang dari 10 s dengan *error steady state* sebesar 2,067 %. Pengujian beban LED waktu yang dibutuhkan untuk meju target *set point* 12 V kurang dari 10 s dengan *error steady state* sebesar 2,091 %. Penggunaan *fuzzy* sebagai kendali untuk pengaturan katup udara pada sistem *small scale – compressed air energy storage* efektif digunakan karena respon yang diberikan sistem sesuai dengan apa yang diharapkan. Sitem bekerja dengan baik dengan efisiensi yang dihasilkan turbin sebesar 25,57 % - 47,19%.

**Kata kunci:** *energy storage, renewable energy, compressed air energy storage system (CAES)*



*Design of Air Valve Control in Compressed Air Energy Storage Prototype Using Fuzzy Logic*

**Danang Aditiya Mahendra**

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember*

**ABSTRACT**

*The need of alternative energy storage as a battery replacement is more increasing along with increasing the utilization of new and renewable energy. In this research will be discussed about alternative energy storage by utilizing the compressed air potential in an enclosed space that is small scale - compressed air energy storage with the focus on the development on the control valve system for air pressure which come into turbine inlet air (air motor) and with the voltage control so that the voltage produced by the generator is constant in accordance with the set point target given. The air control valve here used the type of closed-loop control by applying fuzzy logic using Arduino UNO R3. No-load testing was done by the displacement model of set point value. This test produced time for less than 20 s and error steady state of 2,67 %. Then, the load testing was done with 2 models that are load shedding and sharing as well as the load transfer step by step. In the testing of load shedding and sharing model, the time needed to achieve set point target of 24 V was less than 10 s with the error steady state of 2,58 %. While the testing of load transfer model step by step, the time needed to achieve set point target of 24 V was less than 10 s with the error steady state of 2,067 %. The load testing of LED, the time needed to achieve set point target of 12 V was less than 10 s with the error steady state of 2,091 %. The use of fuzzy as a control for air control valve on the small scale system - compressed air energy storage is effective to be used because the response given by the system was suitable with what to be expected. The system worked well with the efficiency produced by the turbine of 25,57% - 47,19%.*

**Keywords:** *energy storage, renewable energy, compressed air energy storage system (CAES)*

## RINGKASAN

**Rancang Bangun Kendali Katup Penyimpanan Energi Udara Terkompresi Menggunakan *Fuzzy Logic***; Danang Aditya Mahendra, 151910201021; 2019; 127 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kebutuhan akan penyimpan energi semakin meningkat dengan meningkatnya pemanfaatan energi alternatif dan energi terbarukan karena kebanyakan energi ini sangat tergantung pada alam dan tidak selalu ada setiap saat ketika dibutuhkan. Hal inilah yang menjadi alasan utama mengapa diperlukan penyimpan energi listrik.

Penyimpan energi listrik yang paling populer sampai saat ini adalah baterai elektrokimia. Dalam skripsi ini dibahas aplikasi salah satu penyimpan energi listrik *compressed air energy storage* (CAES) skala kecil sebagai alternatif pengganti baterai elektrokimia. Penelitian ini akan difokuskan pada penerapan sistem kendali dengan algoritma *fuzzy logic* untuk menghasilkan respon kendali yang cepat, khususnya untuk pengaturan *valve* yang akan menghasilkan tekanan tegangan konstan sesuai dengan yang diharapkan.

Pada penelitian ini penulis menggunakan kontrol *fuzzy* dengan metode *gaussian fuzzy* dikarenakan jenis *fuzzy* ini menurut penelitian yang telah dilakukan cocok digunakan untuk jenis kontrol *close loop* sesuai dengan sistem yang digunakan dalam penelitian ini. Untuk menerapkan sistem kendali ini penulis menggunakan 2 buah arduino. Arduino pertama adalah arduino nano bertindak sebagai perekam data kecepatan atau fungsinya biasa disebut dengan *slave* dan arduino kedua adalah arduino UNO R3 yang berfungsi sebagai master. Penggunaan sistem *master-slave* ini sangat efektif digunakan dikarenakan dapat merekam data menjadi lebih presisi.

Sensor-sensor yang diperlukan untuk mendukung sistem ini sudah berhasil dibuat dan menghasilkan kinerja yang memadai. Untuk sensor tekanan, tegangan, arus dan kecepatan dihasilkan *error* di bawah 10 %. Dalam pelaksanaannya sistem kendali diuji dengan dua kali pengujian yaitu pada pengujian tanpa beban dan pada pengujian dengan menggunakan beban. Pada pengujian tanpa beban dilakukan

dengan cara sistem diuji secara random dengan perpindahan nilai set point untuk mendapatkan waktu *steady state*. Dari pengujian ini didapatkan respon kendali berupa *over shoot* dan *over damped* yang hasilnya kurang dari 10 V sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *set point* adalah kurang dari 20 s dan *error steady state* sebesar 2,67 %. Kemudian, pengujian yang kedua yaitu pengujian berbeban dengan pengujian yang pertama adalah model pelepasan dan pemberian beban. Pada pengujian ini dilakukan dengan target *set point* 24 V. Setelah dilakukan pengujian, sistem memberikan respon kendali berupa *over shoot* dan *over damped* yang hasilnya kurang dari 10 V sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *set point* adalah kurang dari 10 s dan *error steady state* sebesar 2,58 %. Pengujian berbeban yang kedua adalah dengan cara menambahkan beban secara *step by step*. Dari pengujian ini didapatkan respon kendali berupa *over shoot* dan *over damped* yang hasilnya kurang dari 4 V sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *set point* adalah kurang dari 10 s dan *error steady state* sebesar 2,067 %. Pengujian yang terakhir dengan menggunakan beban LED pada *set point* 12 V. Setelah dilakukan pengujian, sistem memberikan respon kendali berupa *over shoot* dan *over damped* yang hasilnya kurang dari 4 V sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai nilai *set point* adalah kurang dari 10 s dan *error steady state* sebesar 2,091 %. Efisiensi yang dihasilkan oleh turbin sebesar 25,57 % - 47,19 % sesuai dengan perubahan beban.

Dari keseluruhan pengujian sistem kendali *fuzzy* yang telah dilakukan didapatkan hasil yang maksimal dengan waktu yang diperlukan untuk menuju titik *steady state* tidak lebih dari 10 s dan dengan *over shoot* dan *over damped* tidak lebih dari 10 V. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kendali ini sudah maksimal dan baik untuk digunakan.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Kendali Katup Penyimpanan Energi Udara Terkompresi Menggunakan *Fuzzy Logic*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata 1 (S1) pada Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Dr. Triwahju Hardianto, ST., MT selaku Dosen Pembimbing Utama dan Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
3. RB. Moch. Gozali, ST., MT selaku Dosen Penguji Utama dan Ir. Widyono Hadi, MT selaku Dosen Penguji Anggota yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun dalam penulisan skripsi ini;
4. Bapak Widjonarko ST., MT yang telah memberikan saya kesempatan dan ilmu untuk mengikuti proyek penelitian dan memberikan dukungan moral serta material sehingga skripsi ini dapat berjalan dengan baik;
5. Bapak Andi Setiawan ST., MT yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat dalam berlangsungnya skripsi ini;
6. Saudara Cries Avian ST., yang telah membantu menyelesaikan masalah – masalah dan selalu memberi dukungan dan motivasi dalam berlangsungnya skripsi ini;
7. Orang tua saya, Bambang SG. dan Sumarlinah, kakak saya, Rudy Herlina Sari SE., dan adik saya Muhammad Zulfikar Anshori yang selalu memberikan bimbingan, dukungan, dan doa tiada henti;
8. Guru-guru saya dari taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi yang telah memberikan ilmu dan mendidik saya;

9. Keluarga CV. Buana Elektrik yang telah membantu jalannya penelitian ini;
10. PT. Lentera Bumi Nusantara yang telah memfasilitasi ilmu dalam menyelesaikan skripsi ini;
11. Keluarga Pondok Pesantren Nurul Qur'an, wabil khusus Rama Yai Muhammad Imam Wahyudin Al-Hafidz yang selalu memberikan motivasi dan arahan untuk selalu menjadi lebih baik;
12. Sahabat saya, Dria Candra Adityanti S.Ked., Erviana Dwi Nurhidayati S.Ked., Rezza Putri Mahartika S.Ked., Sayidati Zulaikhah, Dhimas Robby Alwy, Aqiyas Muhammad Dikri, Ade Widya Yuwono, Pipiq Taufiqur Rahman, Tegar Satria Nurhuda, Veni Dwi Sulastri, serta Yayang Permadi yang telah memberikan dukungan moral;
13. Keluarga besar angkatan 2015 DISTORSI Fakultas Teknik Universitas Jember;
14. Asrama Putra Reyog Perum Mastrip S11;
15. Keluarga Pelajar Mahasiswa Ponorogo – Bathoro Katong ;
16. Tim TITEN Mobil Listrik Universitas Jember
17. Almamater Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember;
18. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, April 2019

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMBUNG.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	iii
HALAMAN MOTO.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	viii
RINGKASAN.....	x
PRAKATA.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxi
<b>BAB 1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Latar Belakang.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Rumusan Masalah.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Batasan Masalah.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 Tujuan Penelitian.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5 Manfaat Penelitian.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6 Sistematika Penelitian.....</b>	<b>6</b>
<b>BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Teori Compressed Air Energy Storage.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Compressed Air Energy Storage (CAES) Skala Besar.....</b>	<b>7</b>
<b>2.3 Small Scale Compressed Air Energy Storage (SS-CAES).....</b>	<b>8</b>
<b>2.4 Termodinamika Udara Tekan.....</b>	<b>9</b>
<b>2.5 Air Motor.....</b>	<b>10</b>
<b>2.6 Generator DC.....</b>	<b>11</b>
<b>2.7 Servo.....</b>	<b>13</b>
<b>2.8 Kompresor.....</b>	<b>14</b>
<b>2.9 Arduino Uno.....</b>	<b>18</b>
<b>2.10 Arduino Nano V3.0.....</b>	<b>19</b>
<b>2.11 Sensor Tegangan (Konsep Pembagi Tegangan).....</b>	<b>20</b>
<b>2.12 Sensor Arus ACS.....</b>	<b>22</b>
<b>2.13 Hall Effect Sensor.....</b>	<b>23</b>
<b>2.14 Pressure Sensor.....</b>	<b>25</b>
<b>2.15 Fuzzy.....</b>	<b>27</b>
2.15.1 Fuzzy Gauss.....	28
2.15.2 Tahap Pemodelan dalam Fuzzy Logic.....	30
2.15.3 Struktur Dasar Fuzzy Logic Controller.....	32
2.15.4 Fuzzification.....	35

2.15.5 <i>Rule Evaluation</i> .....	35
2.15.6 <i>Defuzzification</i> .....	36
<b>BAB 3. METODE PENELITIAN</b> .....	36
<b>3.1 Tempat Penelitian</b> .....	36
<b>3.2 Waktu Penelitian</b> .....	36
<b>3.3 Tahapan Penelitian</b> .....	37
<b>3.4 Alat dan Bahan Penelitian</b> .....	39
<b>3.5 Rancangan Penelitian</b> .....	40
3.5.1 Diagram Blok SS-CAES.....	40
3.5.2 Rancangan Diagram Blok Kendali .....	43
3.5.3 Perancangan Sistem Monitoring.....	46
3.5.4 Perancangan Kendali <i>Fuzzy</i> .....	46
<b>3.6 Pengujian dan Pengambilan Data</b> .....	52
3.6.1 Pengujian <i>Magnetic Sensor</i> (Sensor Kecepatan) .....	52
3.6.2 Pengujian Sensor Tegangan .....	53
3.6.3 Pengujian Sensor Arus .....	54
3.6.4 Pengujian Sensor Tekanan .....	55
3.6.5 Pengujian Tanpa Beban .....	57
3.6.6 Pengujian hubungan antara Kecepatan <i>Air Motor</i> (Rpm) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi tanpa Beban .....	57
3.6.7 Pengujian hubungan antara Tekanan (Bar) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi tanpa Beban. ....	57
3.6.8 Pengujian hubungan antara Tekanan (Bar) dengan Kecepatan <i>Air Motor</i> (Rpm) Kondisi tanpa Beban .....	57
3.6.9 Pengujian hubungan antara Perpindahan <i>Set Point</i> dengan Waktu yang dibutuhkan untuk Mencapai <i>Set Point</i> .....	58
3.6.10 Pengujian Berbeban .....	58
3.6.11 Pengujian hubungan antara Kecepatan <i>Air Motor</i> (Rpm) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi Berbeban ..	59
3.6.12 Pengujian hubungan antara Tegangan Generator (V) dengan Arus pada Beban (I) Kondisi Berbeban .....	59
3.6.13 Pengujian hubungan antara Tegangan Generator (V) dengan Tekanan (Bar) Kondisi Berbeban .....	60
3.6.14 Rencana Pengujian hubungan antara Arus pada Beban (I) dengan Tekanan (Bar) Kondisi Berbeban .....	60
3.6.15 Pengujian hubungan antara Daya Keluaran ( <i>Watt</i> ) dengan Tekanan (Bar) Kondisi Berbeban .....	60
3.6.16 Pengujian hubungan antara Kecepatan Putar <i>Air Motor</i> (Rpm) dengan Tekanan (Bar) Kondisi Berbeban .....	60
3.6.17 Pengujian untuk Kestabilan Generator dengan Model Perpindahan antar Beban .....	60
3.6.18 Pengujian untuk Kestabilan Generator dengan Model Pelepasan Beban .....	61
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	63

<b>4.1 Pengujian Sensor</b> .....	63
4.1.1 Hasil Pengujian Sensor Tegangan .....	63
4.1.2 Hasil Pengujian Sensor Arus .....	65
4.1.3 Hasil Pengujian Sensor Tekanan .....	67
4.1.3 Hasil Pengujian Sensor Kecepatan .....	69
<b>4.2 Algoritma Penentuan Output Fuzzy</b> .....	70
4.2.1 Proses Inferensi .....	70
4.2.2 Proses <i>Defuzzyfikasi</i> .....	71
<b>4.3 Hasil Pengujian Tanpa Beban</b> .....	72
4.3.1 Hasil Pengujian hubungan antara Perpindahan <i>Set Point</i> Dengan Waktu yang dibutuhkan untuk Mencapai <i>Set</i> <i>Point</i> .....	75
4.3.2 Hubungan-hubungan Komponen Pengujian Kondisi tanpa Beban .....	76
<b>4.4 Hasil Pengujian Berbeban</b> .....	78
4.4.1 Hasil Pengujian untuk Kestabilan Generator dengan Model Pelepasan dan Pemasangan Beban .....	78
4.4.2 Hasil Pengujian untuk Kestabilan Generator dengan Model Beban Bervariasi.....	82
4.4.3 Hasil Pengujian Beban LED .....	86
4.4.4 Hubungan Antar Komponen pada Kondisi Berbeban ..	89
4.4.5 Hasil Pengujian Efisiensi Sistem .....	96
<b>BAB 5. PENUTUP</b> .....	97
<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	97
<b>5.2 Saran</b> .....	97
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	100
<b>LAMPIRAN</b> .....	102



DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Spesifikasi <i>air motor</i> .....	11
2.2 Spesifikasi motor DC NISCA NC5475 .....	13
2.3 Spesifikasi Arduino Uno .....	18
2.4 Spesifikasi Arduino Nano .....	20
2.5 Karakteristik sensor A3144 .....	25
2.6 Karakteristik operasi MPX5700 .....	26
3.1 Rencana dan jadwal pelaksanaan penelitian .....	36
3.2 Spesifikasi alat ukur yang digunakan dalam kalibrasi .....	40
3.3 <i>Rule base fuzzy</i> .....	50
4.1 Pengujian awal sensor tegangan.....	63
4.2 Hasil pengujian sensor tegangan setelah kalibrasi .....	65
4.3 Pengujian awal sensor arus .....	66
4.4 Hasil pengujian sensor arus setelah kalibrasi .....	67
4.5 Pengujian awal sensor tekanan .....	67
4.6 Hasil pengujian sensor tekanan setelah kalibrasi .....	68
4.7 Pengujian awal sensor kecepatan .....	69
4.8 Hasil pengujian sensor kecepatan setelah kalibrasi .....	70
4.9 Respon kendali sistem terhadap tegangan <i>output</i> .....	74
4.10 Respon kendali sistem terhadap waktu .....	75
4.11 Respon kendali sistem terhadap tegangan <i>output</i> akibat pengaruh pemberian dan pelepasan beban .....	80
4.12 Respon kendali sistem terhadap waktu akibat pengaruh pemberian dan pelepasan beban .....	81
4.13 Respon kendali sistem terhadap tegangan <i>output</i> akibat pengaruh pemberian Secara <i>step by step</i> .....	84
4.14 Respon kendali sistem terhadap waktu akibat pengaruh pemberian secara <i>step by step</i> .....	85
4.15 Respon kendali sistem terhadap tegangan <i>output</i> akibat pengaruh pemberian Beban LED.....	87
4.16 Respon kendali sistem terhadap waktu akibat pengaruh pemberian beban LED.....	88

4.17 Efisiensi reduksi tekann dan presentase terbukanya katub udara .....	95
4.18 Efisiensi sistem mekanik .....	96



DAFTAR GAMBAR

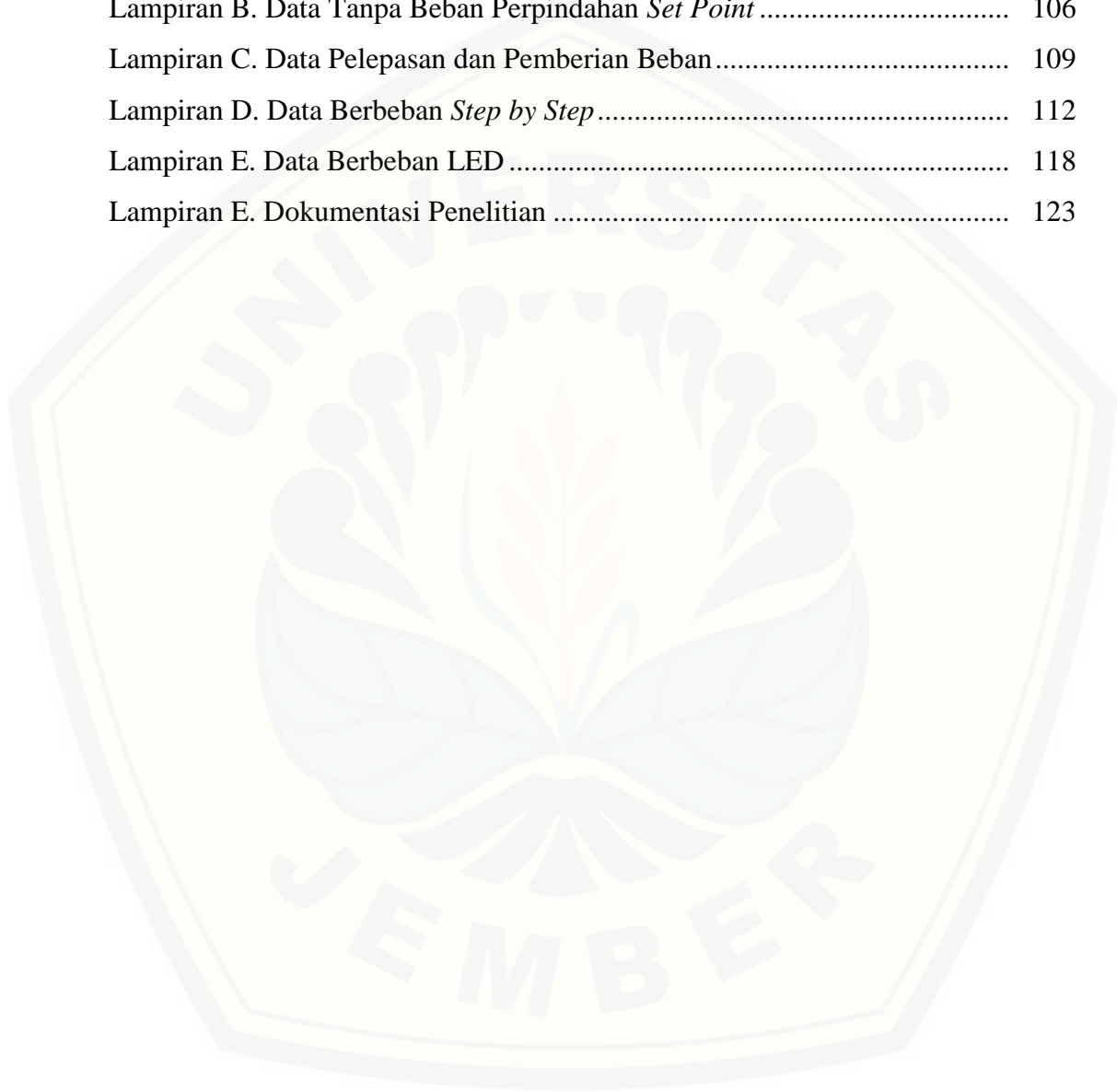
	Halaman
2.1 Sistem CAES dalam skala besar .....	8
2.2 <i>Prototype</i> SS-CAES oleh V. Kokaew .....	9
2.3 <i>Air motor</i> .....	10
2.4 Generator DC .....	12
2.5 Motor DC .....	13
2.6 Motor <i>Servo</i> .....	14
2.7 Tangki penyimpanan udara tekan .....	18
2.8 Kompesor .....	17
2.9 Arduino Uno R3 .....	18
2.10 Konfigurasi pin pada <i>board</i> Arduino Nano .....	20
2.11 Sensor tegangan DCT-Elektronik .....	21
2.12 Sensor ACS712 .....	22
2.13 <i>Hall effect</i> .....	24
2.14 Sensor tekanan udara MPX5700 .....	25
2.15 Diagram fungsional MPX5700 .....	26
2.16 Model <i>lingsuitik fuzzy</i> .....	27
2.17 Blok diagram <i>fuzzy</i> secara keseluruhan .....	28
2.18 Karakteristik fungsional kurva GAUSS .....	29
2.19 Blok diagram sistem <i>fuzzy</i> 1 .....	29
2.20 Blok diagram sistem <i>fuzzy</i> 2 .....	30
2.21 <i>Fuzzifikasi</i> umur .....	30
2.22 <i>Fuzzifikasi</i> suhu .....	31
2.23 Grafik fungsi min .....	34
2.24 <i>Fuzzyfication</i> .....	35
2.25 <i>Defuzzyfication</i> .....	36
3.1 Tahapan pelaksanaan penelitian .....	37
3.2 Gambar rancangan <i>prototype</i> sistem SS-CAES .....	40
3.3 Rangkaian driver motor <i>Servo</i> .....	42

3.4 PWM <i>Servo</i> .....	43
3.5 Gambar diagram blok kendali .....	44
3.6 <i>Flowchart</i> sistem kendali .....	45
3.7 Gambar sistem <i>monitoring</i> .....	46
3.8 <i>Member input error</i> .....	47
3.9 <i>Member input delta error</i> .....	47
3.10 <i>Member output</i> sudut .....	48
3.11 Gambar kurva <i>sigmoid</i> pertumbuhan .....	48
3.12 Gambar kurva <i>sigmoid</i> penyusutan .....	49
3.13 Rencana <i>rules</i> .....	51
3.14 <i>Flowchart fuzzy</i> .....	53
3.15 Penempatan sensor kecepatan .....	54
3.16 Rangkaian pengujian sensor tegangan .....	55
3.17 Rangkaian pengujian sensor arus .....	56
3.18 Rangkaian MPX5700 ke sistem .....	57
4.1 Kurva <i>fitting</i> sensor tegangan .....	64
4.2 Kurva <i>fitting</i> sensor arus .....	66
4.3 Kurva <i>fitting</i> sensor tekanan .....	68
4.4 Kurva <i>fitting</i> sensor kecepatan .....	69
4.5 Grafik perubahan <i>set point</i> terhadap tegangan <i>output</i> .....	73
4.6 Grafik perubahan <i>set point</i> terhadap tegangan <i>output</i> pada daerah respon kendali sitem .....	73
4.7 Hubungan antara kecepatan dengan tegangan kondisi tanpa beban .....	76
4.8 Hubungan antara tekanan dengan tegangan kondisi tanpa beban .....	77
4.9 Hubungan antara tekanan dengan kecepatan kondisi tanpa beban .....	78
4.10 Grafik pengaruh pelepasan dan pemberian beban terhadap <i>Vout</i> pada <i>set point</i> 24V.....	79
4.11 Grafik pengaruh pemberian beban terhadap <i>Vout</i> pada <i>set point</i> 24 V pada daerah respon kendali sistem .....	79
4.12 Grafik pengaruh pelepasan beban terhadap <i>Vout</i> pada <i>set point</i> 24 V pada daerah respon kendali sistem .....	79

4.13 Grafik pengaruh pemberian beban secara <i>step by step</i> terhadap $V_{out}$ pada <i>set point</i> 24 V pada daerah respon kendali sistem.....	83
4.14 Grafik pengaruh pemberian beban secara <i>step by step</i> terhadap $V_{out}$ pada <i>set point</i> 24 V pada daerah respon kendali sistem.....	83
4.15 Grafik pengujian dengan menggunakan beban LED pada <i>set point</i> pengujian 12 V.....	86
4.16 Grafik dengan menggunakan beban LED pada <i>set point</i> pengujian 12 V pada daerah respon kendali sistem .....	87
4.17 Grafik hubungan kecepatan dengan tegangan beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm.....	89
4.18 Grafik hubungan tegangan dengan arus beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm.....	90
4.19 Grafik hubungan tekanan dengan tegangan beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm .....	91
4.20 Grafik hubungan tekanan dengan arus beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm .....	92
4.21 Grafik hubungan tekanan dengan daya beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm .....	93
4.22 Grafik hubungan tekanan dengan kecepatan beban 122 Ohm, beban 430 Ohm, beban 600 Ohm, dan beban 1000 Ohm .....	94
4.22 Grafik efisiensi air motor yang dibangun oleh Vorrath Kokaew <i>et.,al.</i> pada tahun 2013.....	94

**DAFTAR LAMPIRAN**

	Halaman
Lampiran A. Data Observasi SS-CAES.....	102
Lampiran B. Data Tanpa Beban Perpindahan <i>Set Point</i> .....	106
Lampiran C. Data Pelepasan dan Pemberian Beban.....	109
Lampiran D. Data Berbeban <i>Step by Step</i> .....	112
Lampiran E. Data Berbeban LED .....	118
Lampiran E. Dokumentasi Penelitian .....	123



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Baru-baru ini perkembangan energi terbarukan Indonesia terus dilakukan seiring permintaan akan energi listrik yang terus meningkat. Namun, meningkatnya kebutuhan energi listrik ini, PT. PLN (Perusahaan Listrik Negara) selaku lembaga resmi yang ditunjuk oleh pemerintah dalam mengelola masalah kelistrikan belum dapat memenuhi kebutuhan masyarakat Indonesia akan energi listrik secara menyeluruh. Kondisi geografis dari negara Indonesia yang terdiri atas ribuan pulau dan kepulauan, tersebar dan tidak meratanya pusat-pusat beban listrik, rendahnya tingkat permintaan listrik di beberapa wilayah, tingginya biaya marginal pembangunan sistem suplai energi merupakan faktor yang mengakibatkan terhambatnya proses penyediaan energi listrik dalam skala nasional listrik (Ramani, 1992). Hal ini diperparah dengan berkurangnya ketersediaan sumber energi fosil sebagai bahan bakar dari sistem pembangkit komersial yang saat ini ada.

Menurut data Kementerian ESDM (Energi dan Sumber Daya Mineral) tahun 2015 dengan jumlah penduduk Indonesia sebanyak 255.461.700 jiwa konsumsi tenaga listrik mencapai 232.520 MWh dengan konsumsi tenaga listrik per kapita sebesar 0.91 KWh. Rasio elektrifikasi nasional pada tahun 2015 dengan mengacu pada data Kementerian ESDM tahun 2015 masih sebesar 88.30%. Nilai tersebut masih tergolong rendah apabila dibandingkan dengan negara-negara di ASEAN dengan rasio elektrifikasinya telah mencapai 98%. Masih jauhnya selisih rasio elektrifikasi tersebut pemerintah mendorong inovasi akan pembangkit listrik energi terbarukan guna untuk mencapai Indonesia 100% rasio elektrifikasi di tahun 2020. Indonesia memiliki potensi yang besar akan energi terbarukan, namun investasi dalam hal ini masih sangat kecil. Pengembangan energi terbarukan juga didukung dengan kebijakan energi nasional tahun 2014, yaitu di tahun 2020 proyeksi penggunaan minyak bumi mulai berkurang dan hanya mencapai 25% pada tahun 2035. Sedangkan peningkatan energi baru dan terbarukan sebagai energi primer sebesar 23%. Dengan peningkatan Energi Baru dan Terbarukan sebesar 23%

tersebut harus dibarengi dengan inovasi-inovasi mengenai konversi dari energi terbarukan menjadi energi listrik.

Dalam perkembangannya, penggunaan energi baru dan terbarukan tersebut belum banyak digunakan sebagai sumber energi utama untuk menyuplai kebutuhan energi listrik di masyarakat. Dalam pelaksanaannya, pemanfaatan energi terbarukan masih terdapat permasalahan yang harus dipecahkan, dalam hal ini ialah komponen penyimpanan yang tidak dapat digunakan dalam waktu interval 24 jam. Misalnya, dalam pemanfaatan energi matahari hanya dapat terjadi pada siang hari dengan cuaca terang. Dalam hal ini, kapasitas daripada pembangkitan energi masih sangat kecil apabila digunakan sebagai energi primer, sehingga diperlukan penopang berupa energi lain untuk dapat memenuhinya. Tetapi, dari keterbatasan-keterbatasan tersebut justru semakin banyak memunculkan gagasan penelitian yang baru, salah satunya adalah pembangkit energi listrik yang lebih cepat dalam merespon perubahan beban dan maksimal dalam hal pengonversian. Namun, hal ini tidaklah bersifat kontinyu yang dapat terus digunakan selama kurun waktu 24 jam, sehingga dengan kondisi ini memunculkan gagasan baru berupa komponen *energy storage*. Dengan pemanfaatan pembangkitan energi listrik yang memanfaatkan energi terbarukan tersebut dan mengintegrasikannya dengan konsep *energy storage* dalam proses pembangkitan energi listrik, akan memberikan keuntungan pada berkurangnya pembangkitan energi listrik secara tersentral, sehingga permasalahan akibat adanya *energy losses* karena ketidakseimbangan dalam menyuplai konsumsi energi listrik dapat dikurangi (Lemofouet, Rufer, 2005). Salah satu gagasan dari pengembangan konsep tersebut adalah pada aplikasi *compressed air energy storage* (CAES).

Teknologi CAES adalah sebuah pembangkit energi listrik yang menyimpan energi dengan cara memanfaatkan udara yang tertekan dalam sebuah ruang. Pengembangan pemanfaatan energi berupa udara terkompresi ini dalam skala besar telah digunakan dan dikembangkan di beberapa negara, yaitu di Huntorf Jerman dengan daya sebesar 290 MW yang digunakan sebagai *secondary power generator* pada sistem kelistrikan (Haisheng *et al.*, 2013). Pada saat permintaan akan energi listrik rendah, CAES akan mengambil energi yang terdapat di luar sistem untuk



selanjutnya disimpan dalam udara yang terkompresi yang letaknya berada di dalam tanah sampai pada saat ruangan untuk menampung udara yang terkompresi itu penuh. Pada saat permintaan energi listrik naik, maka CAES akan mengalirkan udara yang terkompresi tersebut melalui pipa udara yang terhubung dengan turbin, sehingga tekanan yang dihasilkan oleh CAES akan memutar turbin dan akan menghasilkan listrik sesuai dengan permintaan.

Teknologi *small scale-compressed air energy storage* (SS-CAES) merupakan teknologi pembangkit energi listrik tenaga kompresi udara berukuran mikro dengan skala pembangkitan kurang dari 10 MW (Haisheng, 2013). Model teknologi ini pernah dikembangkan oleh beberapa peneliti, diantaranya adalah penelitian yang pernah dilakukan oleh Alias Khamis pada tahun 2010 dan pada tahun 2011, serta V. Kokoew pada tiga tahun beruntun yakni pada tahun 2013, 2014, dan 2016. Sedangkan pengembangan SS-CAES yang menjadi rujukan dilakukan Widjonarko pada tahun 2016 dan oleh Widjonarko; Supeno, B; Setiawan, A; pada tahun 2017.

Penelitian yang dikembangkan oleh V. Kokaew pada tahun 2013 berfokus pada mode *maximum efficiency* (MPET) dan *maximum power* (MPPT). Fokus yang dilakukan pada penelitian ini pada kontrol *buck converter* untuk mengontrol pembebanan. Dalam penelitian yang dilakukan oleh V. Kokaew tersebut belum merepresentasikan pengonversian energi secara maksimum. Hal ini disebabkan karena kontrol dilakukan hanya pada bagian *outputnya* saja, *input* yang dalam hal ini merupakan hal yang paling mendasar dalam pengkonversian energi dalam penelitian ini belum diperhitungkan. Penelitian yang dilakukan oleh Widjonarko pada tahun 2016 berfokus untuk mengatasi permasalahan generator yang dioperasikan di luar spesifikasi nominalnya sehingga dibutuhkan konverter untuk memperbaiki kinerja sistem. Penambahan konverter membuat sistem menjadi lebih rumit dengan harus menambah sistem baru untuk mengontrol konverter tersebut. Sedangkan penelitian yang dikembangkan oleh Widjonarko, *et.al.*, pada tahun 2017 dalam pengonversian energinya telah melakukan kontrol pada bagian *input*, namun parameter keberhasilan yang digunakan berupa kecepatan putar dari generator dan tekanan udara yang masuk pada *air motor* yang bukan merupakan

tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator. Hal ini menyebabkan respon dari pengaturan *valve* tidak akan stabil. Dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya maka penulis menemukan titik kekurangan dimana pengonversian energi harus dibarengi dengan kontrol yang memadai dan menggunakan sistem yang lebih sederhana. Jenis kontrol yang paling memadai untuk jenis kontrol *close loop* adalah *fuzzy* dimana jenis kontrol *fuzzy* lebih mudah untuk dikontrol dan cepat dalam menuju *steady state*.

Dalam penelitian yang akan dilakukan ini, penulis menggunakan jenis kontrol *fuzzy* untuk mengontrol *valve (input)* dengan parameter *output* yang digunakan berupa tegangan yang dihasilkan oleh generator dengan metode pengujian tanpa beban dan berbeban sesuai dengan karakteristik generator sebagai pengembangan atas penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah diuraikan diatas dapat ditarik beberapa permasalahan yaitu:

1. Bagaimana mengendalikan tegangan pada SS-CAES dengan mereferensikan pengaturan pada katup udara dengan menggunakan servo?
2. Bagaimana cara untuk mendapatkan tegangan yang konstan pada SS-CAES dengan mengaplikasikan logika *fuzzy* sebagai pengambil keputusan pada pengaturan katup udara?
3. Bagaimana pengaruh pembebanan terhadap keandalan sistem pada SS-CAES?

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan tujuan penelitian maka penulis memberi batasan masalah rencana penelitian ini. Adapun yang menjadi batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tekanan yang digunakan untuk mendapatkan putaran pada *air motor* terbatas dengan menggunakan kompresor dengan tekanan maksimum sebesar 3 bar.
2. Diameter saluran udara yang masuk pada *air motor* adalah terbatas sebesar 1/4 inch.

3. Karena fokus penelitian merupakan pengonversian maksimum pada tekanan udara dalam kompresor dengan *set point* tertentu dan pengaturannya dengan menggunakan logika *fuzzy* maka karakteristik dari *air motor* menjadi tidak diperhitungkan.
4. Karena titik pencarian efisiensi hanya terbatas pada pengonversian maksimum tekanan udara yang terkompresi dengan pengontrolan katup udara, maka slip antara turbin (*air motor*) dengan generator menjadi diabaikan.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Dengan meninjau latar belakang pada permasalahan yang telah diuraikan, maka dapat dirumuskan tujuan utama dari penelitian ini diantaranya:

1. Dapat mengembangkan sistem pengonversian untuk mendapatkan tegangan konstan pada SS-CAES dengan memunculkan konsep terbaru berupa pengendalian katup udara sehingga mampu melakukan efisiensi pada penggunaan energy udara yang terkompresi.
2. Dapat menerapkan kendali katup udara yang telah dirancang pada prototipe SS-CAES dengan menggunakan logika *fuzzy* serta mengimplementasikannya ke dalam *microcontroller* untuk mengetahui respon tekanan udara terhadap tegangan yang dihasilkan dengan pengujian tanpa beban dan berbeban yang akan diamati langsung dengan cara melakukan monitoring keluaran sistem melalui komputer.
3. Dapat mengetahui keandalan sistem SS-CAES yang telah dibuat dengan pengujian tanpa beban dan berbeban.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu pengonversian energi pada SS-CAES dengan menggunakan pengaturan katup udara menjadi lebih maksimal dengan dibarengi oleh kontrol yang baik. Diharapkan, dengan adanya penelitian ini dapat memberikan warna baru terhadap penelitian bidang energi terbarukan di Indonesia.

### 1.6 Sistematika Penelitian

Secara garis besar penyusunan skripsi ini ialah sebagai berikut:

- a. **BAB 1. PENDAHULUAN**  
Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika pembahasan.
- b. **BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA**  
Berisi penjelasan tentang teori yang berhubungan dengan penelitian.
- c. **BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN**  
Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.
- d. **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**  
Berisi hasil penelitian dan analisa hasil penelitian.
- e. **BAB 5 PENUTUP**  
Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis.

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Teori *Compressed Air Energy Storage* (CAES)

Secara umum, CAES adalah sistem penyimpanan energi yang bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi gerak untuk memasukkan udara ke tabung atau tangki penyimpan udara dengan tekanan tertentu, menyimpannya sebagai energi potensial dan melepaskannya kembali pada konverter yang mengubah energi kinetik aliran udara menjadi energi listrik. Pada pembahasan selanjutnya, pengertian ini menjadi batasan untuk istilah CAES.

Sistem CAES sudah diaplikasikan sebagai penyimpan energi listrik untuk skala komersial. Beberapa diantaranya adalah unit CAES di Jerman dengan kapasitas 390 MW dan di USA dengan kapasitas 110 MW. Keduanya dioperasikan sebagai penyimpan energi listrik pada saat beban dasar dimana tarif energi rendah dan beroperasi sebagai pembangkit energi pada saat beban puncak di mana tarif energi tinggi (Salgi dan Lund, 2006).

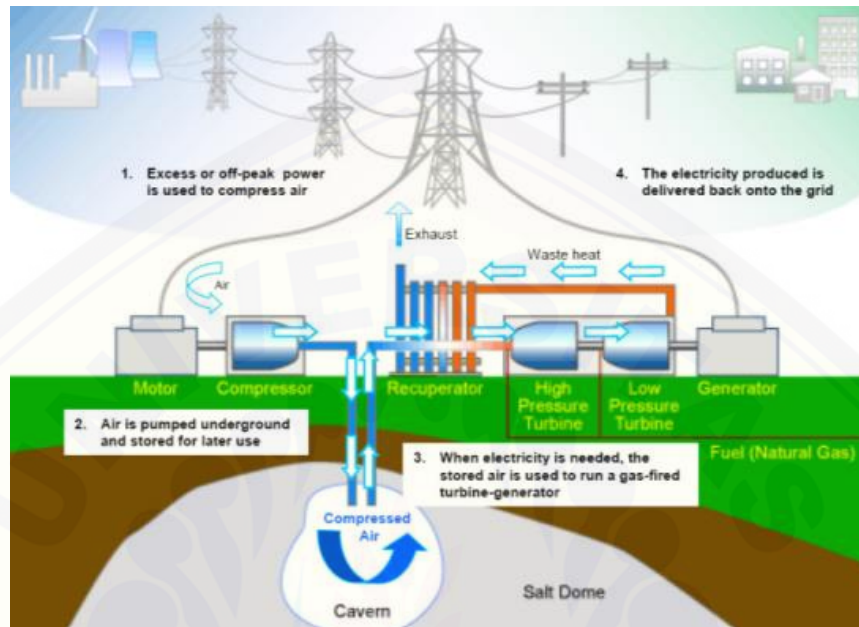
Dalam aplikasi yang lain, sistem CAES dengan skala yang cukup besar digunakan untuk *smoothing power line* di mana terdapat sumber-sumber energi listrik alternatif yang bersifat intermiten karena tergantung pada kondisi alam, misalnya pembangkit listrik tenaga angin (Hasan *et al.*, 2012).

Dalam penelitian ini, dilakukan pengembangan prototipe sistem CAES dengan skala kecil untuk menyelidiki kemungkinannya sebagai alternatif penyipian energi (*energy storage*) yang diharapkan dapat menjadi alternatif untuk penyimpanan energi yang saat ini sangat populer yaitu baterai elektrokimia.

### 2.2 *Compressed Air Energy Storage* (CAES) Skala Besar

*Compressed air energy storage* adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan tekanan udara yang terkompresi yang dilepas atau dikeluarkan untuk memutar turbin guna menghasilkan energi listrik. CAES dalam skala besar terdiri dari beberapa komponen, diantaranya adalah ruang penyimpan udara bertekanan atau *cavern storage*, motor kompresor untuk memompa udara ke dalam udara bertekanan, turbin dalam bentuk *air motor* untuk penggerak mula dan *generator*

untuk menghasilkan energi listrik. Gambar 2.1 ialah contoh sistem dari pemanfaatan CAES dalam skala besar.



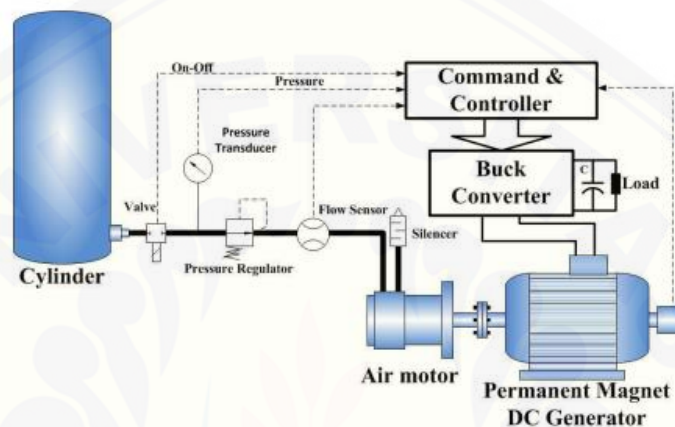
Gambar 2.1 Sistem CAES dalam skala besar (Sumber: Haisheng *et al.*, 2013)

Pada saat permintaan tenaga listrik rendah, sistem akan merespon dengan mengerjakan motor pada kompresor dan bekerja untuk mengisi udara ke dalam tangki udara bertekanan tinggi. Setelah ruangan penuh, maka motor kompresor akan berhenti bekerja. Ketika permintaan tenaga listrik naik, sistem akan menyalurkan gas panas pada *recuperator* untuk membuat udara dalam ruangan terkompresi keluar dari tangki penyimpanan. Dengan adanya panas tersebut, udara akan bergerak dari tangki penyimpanan menuju turbin atau *air motor*, kemudian memutar turbin yang terhubung dengan *generator* untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. Konsep inilah yang diunggulkan dari penggunaan CAES sebagai *secondary generator* di mana sistem ini akan menghasilkan energi yang dibutuhkan dengan cepat karena udara sudah lebih dahulu tersimpan.

### 2.3 Small Scale Compressed Air Energy Storage (SS-CAES)

Aplikasi CAES dalam skala kecil atau yang biasa dikenal dengan SS-CAES memiliki prinsip kerja yang sama dengan CAES dalam skala besar. Perbedaan

mendasar yang membedakan sistem ini dengan skala besar terletak pada kapasitas penyimpanan udara terkompresinya dan daya yang dihasilkan. Pada skala besar seperti *Adiabatic-CAES*, *Isothermal-CAES*, dan *Diabatic-CAES* daya yang dihasilkan diatas 10 MW (Haisheng, 2013), sedangkan untuk penyebutan *Small Scale CAES* adalah teknologi CAES dengan kapasitas pembangkitan daya kurang dari 10 MW.



Gambar 2.2 *Prototype SS-CAES* oleh V. Kokaew (Sumber: Kokaew *et al.*, 2013)

## 2.4 Termodinamika Udara Tekan

Termodinamika adalah ilmu tentang energi, yang secara spesifik membahas tentang hubungan antara energi panas dengan kerja. Energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain, baik secara alami maupun hasil rekayasa teknologi. Selain itu energi di alam semesta bersifat kekal, tidak dapat dibangkitkan atau dihilangkan, yang terjadi adalah perubahan energi dari satu bentuk menjadi bentuk lain tanpa ada pengurangan atau penambahan. Prinsip ini disebut sebagai prinsip konservasi atau kekekalan energi. Prinsip termodinamika tersebut sebenarnya telah terjadi secara alami dalam kehidupan sehari-hari.

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konsisten. Komponen yang konsentrasinya selalu bervariasi ialah air dalam bentuk uap  $H_2O$  dan karbon dioksida ( $CO_2$ ). Tekanan merupakan salah satu properti yang terpenting dalam termodinamika, dan didefinisikan sebagai gaya tekan suatu fluida (cair atau gas) pada satu satuan unit luas area. Istilah tekanan pada benda padat disebut

tegangan (stres). Satuan tekanan adalah Pascal (Pa), yang didefinisikan sebagai,  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Karena satuan Pascal terlalu kecil, maka dalam analisis termodinamika sering digunakan satuan kilopascal ( $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ ), atau megapascal ( $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ ). Satuan tekanan yang cukup dikenal adalah satuan *barometric* (bar), atau *standard atmosphere* (atm), sebagai berikut :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ Mpa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa} = 101,325 \text{ kPa} = 1,01325 \text{ bar}$$

Pengukuran tekanan dengan menggunakan referensi tekanan nol absolut disebut tekanan absolut (ata), sedang tekanan manometer (ato) adalah tekanan relatif terhadap tekanan atmosfer. Tekanan vakum adalah tekanan dibawah 1 atm, yaitu perbedaan antara tekanan atmosfer dengan tekanan absolut. Alat pengukur tekanan di atas atmosfer adalah manometer, alat pengukur tekanan vakum disebut manometer vakum, sedang alat pengukur tekanan atmosfer disebut barometer. Terdapat banyak jenis metode pengukuran tekanan seperti pipa U, manometer pegas, atau transduser elektronik.

### 2.5 Air Motor

*Air Motor* adalah jenis motor yang melakukan kerja mekanik dengan cara memperluas udara tekan. Bentuk dari *air motor* dapat dilihat pada gambar 2.3 Motor pneumatik umumnya mengubah energi udara yang terkompresi menjadi kerja mekanis melalui gerakan *linier* atau *rotari*. Gerak linier bisa berasal dari sebuah diafragma atau dari aktuator piston, sedangkan gerak rotasi dipasok oleh motor udara jenis baling-baling, motor udara piston, turbin udara atau motor tipe gigi.



Gambar 2.3 Air motor (Sumber: <https://gastmfg.com/products/air-and-gear-motors>)



*Air motor* telah ada dalam berbagai bentuk selama dua abad terakhir, mulai dari motor genggam hingga mesin yang kekuatannya hingga beberapa ratus tenaga kuda. Banyak mesin udara tekan meningkatkan performa mereka dengan memanaskan udara masuk atau mesin itu sendiri. Spesifikasi dari *air motor* yang akan digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi *air motor*

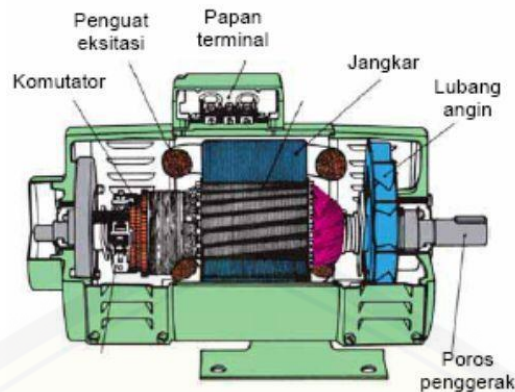
<b>Component</b>	<b>Value</b>
<i>Power</i> (HP/KW)	0.16 / 0.12
<i>Max Pressure</i> (kg/cm <sup>2</sup> (Mpa) )	7(0.68)
<i>Max Rotation Speed</i> (rpm)	3000
<i>Air Consumption</i> (l/min or 3.5kg/cm <sup>2</sup> )	380
<i>Axes Dimension</i> (mm)	10
<i>Weight</i> (g)	1800

(Sumber: www.pronatools.com)

## 2.6 Generator Direct Current (DC)

Nurhadi *et al.*, (2012) mengemukakan bahwa generator merupakan salah satu mesin listrik, yang mengubah energi gerak atau mekanik menjadi energi listrik. Rijono (1997:107) menuliskan, generator adalah sebuah mesin listrik yang dapat mengubah daya mekanis menjadi daya listrik.

Pada dasarnya generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Rotor merupakan bagian dari generator yang berputar, berfungsi sebagai kumparan medan, dan untuk menghasilkan medan magnetik yang menggunakan magnet permanen (Nurhadi *et al.*, 2012). Menurut Nurhadi *et al.*, (2012), bahwa stator ialah bagian dari generator yang tidak bergerak dan berfungsi sebagai kumparan jangkar sehingga menghasilkan tegangan keluaran. Adapun gambar dari generator DC dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Generator DC (Sumber:

<https://kaptenivan.wordpress.com/2014/11/05/generator-dc-dan-motor-dc-2/>)

Rotor dan stator mempunyai beberapa bagian. Bagian stator terdiri dari rangka, inti kutub magnet, ilitan, sikat komutator. Bagian rotor terdiri dari komutator, jangkar, dan lilitan jangkar (Sumardjati *et al.*, 2008:384). Generator DC didasarkan pada prinsip dasar yakni bila sebuah penghantar dibuat berputar melalui medan magnet, suatu gaya gerak listrik (ggl) akan diinduksi di dalam penghantar tersebut. Pada prinsipnya, rotor akan berputar sehingga akan timbul EMF. Pada generator DC arus induksinya tidak berubah karena menggunakan cincin belah. Pada hal ini, rotor akan tetap menghasilkan tegangan induksi bolak-balik, namun pada generator DC terdapat komutator sebagai pengubah tegangan.

Penggunaan generator DC biasanya bekerja dengan prinsip saat motor DC tersambung dengan rotor dalam *air motor*. Jadi ketika *air motor* sedang mengalami perputaran, maka motor DC akan ikut berputar dengan kecepatan yang sama seperti putaran *air motor* (jika tidak digunakan dalam *gearbox*). Adapun motor DC yang akan digunakan dalam penelitian ialah NISCA NC5475 dapat dilihat Gambar 2.5 dengan spesifikasi yang dapat di lihat pada Tabel 2.2.



Gambar 2.5 Motor DC (Sumber: Penulis)

Tabel 2.2 Spesifikasi motor DC NISCA NC5475

Komponen	Nilai
<i>Voltage</i> (V)	24
<i>Torque</i> (mN.m)	98.1
<i>Current</i> (A)	3.0
<i>Speed</i> (RPM)	4500
<i>Current No Load</i> (A)	0.45
<i>Speed</i> (RPM)	5400
<i>Starting Torque</i> (mN.m)	392.3
<i>Starting Current</i> (A)	16.0
<i>Torque Constant</i> (mN.m/A)	40.0
<i>Weight</i> (g)	700

(Sumber: [ftn.canon/en/product/motor/list.html](http://ftn.canon/en/product/motor/list.html))

## 2.7 Servo

Motor *servo* adalah sebuah perangkat sebagai aktuator putar (motor) yang dirancang dengan sistem kontrol umpan balik loop tertutup (*servo*), sehingga dapat di *set-up* atau di atur untuk menentukan dan memastikan posisi sudut dari poros *output* motor (Muhamad, 2016). Motor *servo* merupakan perangkat yang terdiri dari motor DC, serangkaian *gear*, rangkaian kontrol dan potensiometer. Serangkaian *gear* yang melekat pada poros motor DC akan memperlambat putaran poros dan meningkatkan torsi motor *servo*, sedangkan potensiometer dengan perubahan resistansinya saat motor berputar berfungsi sebagai penentu batas posisi putaran poros motor *servo* (Muhamad, 2016).



Gambar 2.6 Motor *Servo* (Sumber: <https://www.horizonhobby.com/product/>)

Motor *servo* DC memiliki sistem umpan balik tertutup di mana posisi rotor-nya akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontrol yang ada di dalam motor *servo*. Motor ini terdiri dari sebuah motor DC, serangkaian *gear*, potensiometer, dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi untuk menentukan batas sudut dari putaran *servo*. Sudut dari sumbu motor *servo* diatur berdasarkan lebar pulsa yang dikirim melalui kaki sinyal dari kabel motor *servo*. Penggunaan sistem kontrol *loop* tertutup pada motor *servo* berguna untuk mengontrol gerakan dan posisi akhir dari poros motor *servo*. Posisi poros *output* akan dihasilkan oleh sensor, untuk mengetahui posisi poros sudah tepat seperti yang diinginkan atau belum, jika belum, maka kontrol *input* akan mengirim sinyal kendali untuk membuat posisi poros tersebut tepat pada posisi yang diinginkan. Motor *servo* memanfaatkan motor *servo* DC karena penggunaannya yang praktis dan ditambah keunggulan dari fitur motor *servo* DC.

## 2.8 Kompresor

Kompresor adalah mesin untuk memampatkan udara atau gas. Kompresor udara biasanya mengisap udara dari atmosfer. Namun ada pula yang mengisap udara atau gas yang bertekanan lebih tinggi dari tekanan atmosfer yang disebut kompresor bekerja sebagai penguat. Sebaliknya ada kompresor yang mengisap gas yang bertekanan lebih rendah dari tekanan atmosfer. Dalam hal ini kompresor disebut pompa vakum. Kompresor terdapat dalam berbagai jenis dan model tergantung pada volume dan tekanannya. Klasifikasi dari kompresor tergantung tekanannya ialah kompresor (pemampat) dipakai untuk tekanan tinggi, *blower* (peniup) dipakai untuk tekanan agak rendah, dan *fan* (kipas) dipakai untuk tekanan sangat rendah.

Gambar 2.7 akan memperlihatkan skema tangki penyimpanan udara tekan. Udara berisi hampir 80% gas nitrogen ( $N_2$ ) yang merupakan gas diatomik sehingga dapat diasumsikan bahwa udara adalah gas diatomik ideal. Dengan demikian, hubungan antara tekanan, volume dan temperatur dalam udara dapat dinyatakan dengan persamaan (Setiawan *et al.*, 2015) :

$$pV = mRT \quad \dots\dots\dots (1)$$

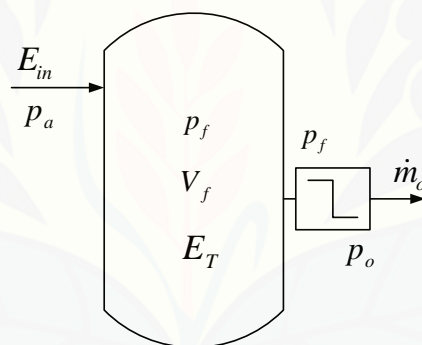
Dengan :  $p$  = Tekanan udara (gas) dalam Pascal

$V$  = volume gas dalam  $m^3$

$m$  = massa gas dalam kg

$R$  = konstanta gas ideal 287 J/(kg:K )

$T$  = Temperatur dalam Kelvin



Gambar 2.7 Tangki penyimpanan udara tekan (Sumber: Setiawan *et al.*, 2015)

Tangki ini menyimpan udara yang tekanannya sudah diubah dari tekanan udara luar  $p_a$  menjadi tekanan udara pada akhir keadaan  $p_f$ . Jumlah energi potensial yang tersimpan dalam udara tekan ini dapat dijelaskan dengan hubungan tekanan udara dalam tangki dan tekanan atmosfer yang diasumsikan sebagai tekanan udara di luar tangki penyimpanan. Kemudian, jika temperatur udara di dalam tangki diasumsikan sama dengan temperatur udara luar, maka jumlah energi yang tersimpan dalam tangki udara dengan tekanan dan volume tertentu adalah (Lemofouet dan Gatsi, 2006) .

$$E_T = p_f V_f \left( \frac{p_a}{p_f} - 1 + \ln \left( \frac{p_f}{p_a} \right) \right) \dots\dots\dots (2)$$

$E_T$  = energy yang tersimpan dalam tangki (J)

- Dengan:  $V_f$  = volume tangki ( $m^3$ )  
 $p_f$  = tekanan akhir pada tangki  
 $p_a$  = tekanan atmosfer

Dalam proses penyimpanannya diperlukan energi sebesar  $E_{in}$  yang merupakan kerja dari kompresor dengan efisiensi total  $\eta_{comp}$ . Dengan demikian maka kerja yang dibutuhkan untuk menyimpan energi sebesar  $E_T$  adalah :

$$E_{in} = \frac{E_T}{\eta_{comp}} \dots\dots\dots (3)$$

- Dengan:  $E_{in}$  = energi proses kompresi  
 $\eta_{comp}$  = efisiensi sistem kompresor

Penelitian ini tidak mencakup proses pada sisi hulu tangki penyimpan sehingga teori-teori yang berkaitan dengan kerja dalam proses kompresi udara tidak dibahas. Tangki udara melepas energi yang tersimpan dalam bentuk energi kinetik karena adanya perbedaan tekanan  $p_f$  dan  $p_o$  di mana  $p_o$  merupakan tekanan pada sisi output dari katub (*valve*) regulator. Perbedaan tekanan ini menyebabkan aliran masa udara sebesar  $\dot{m}_o$ . Pada persamaan (4) menunjukkan hubungan antara perubahan tekanan pada tangki penyimpan dengan adanya aliran massa udara sebesar  $\dot{m}_o$ . Sedangkan persamaan (5) adalah persamaan yang menyatakan hubungan nilai tekanan akhir dalam tangki dengan adanya energi aliran massa dari dalam ke luar tangki.

$$\dot{p}_f = \frac{RT}{V} \dot{m}_o \dots\dots\dots (4)$$

$$p_f(t) = m(0) - \int_0^t \dot{m}_0 dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

Dengan:  $\dot{m}_0$  = aliran massa udara keluar tangki (kg/s)

$\dot{p}_f$  = perubahan tekanan udara dalam tangki (Pascal/s)

$p_f(t)$  = tekanan akhir setelah  $t$  detik.

$m(0)$  = massa udara dalam tangki pada saat  $t = 0$ .

Beberapa jenis kompresor ialah kompresor piston satu tahap, kompresor piston dua tahap bentuk V, kompresor piston dua tahap kerja ganda, kompresor membrane (*diaphragma*), kompresor sudut geser, kompresor sekrup, kompresor *roots*, *blower*, kompresor aliran (turbin). Kompresor piston banyak dipakai karena cocok untuk bidang tekanan yang luas. Pada penelitian ini kompresor yang akan digunakan akan nampak seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Kompresor (Sumber: Penulis)

Dalam penelitian ini peneliti akan menggunakan jenis kompresor dengan daya sebesar 1 HP dan maksimal tekanan yang akan diberikan sebesar 3.5 bar.

## 2.9 Arduino Uno

Arduino uno merupakan perangkat elektronik dengan sistem *open source*. Arduino memiliki 14 pin *input/output* yang mana 6 pin dapat digunakan sebagai *output PWM*, 6 *analog input*, *crystal osilator* 16 MHz, koneksi USB, *jack power*,

dan tombol *reset*. Pada penelitian ini arduino yang akan digunakan dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Arduino Uno R3 (Sumber: [www.arduino.com](http://www.arduino.com))

Arduino memiliki kelebihan tersendiri dibanding *board* mikrokontroler yang lain selain bersifat *open source*, arduino juga mempunyai bahasa pemrogramannya sendiri yang berupa bahasa C. Selain itu dalam *board* arduino sendiri sudah terdapat *loader* yang berupa USB sehingga memudahkan kita ketika memprogram mikrokontroler di dalam arduino. Papan Arduino adalah papan mikrokontroler berdasarkan ATmega328. Tabel 2.3 spesifikasi dari arduino uno.

Tabel 2.3 Spesifikasi arduino uno

Nama	Keterangan
Mikrokontroler	ATmega328
Tegangan operasi	5V
Tegangan <i>input</i> (disarankan)	7-12V
Tegangan <i>input</i> (batas)	6-20V
Digital I/O	14 pin (dimana 6 output PWM)
<i>Input</i> Analog	6 pin
Arus DC per I/O	Pin 40 mA
Arus DC untuk 3.3V	Pin 50 mA
Memori <i>flash</i> 32KB (ATmega328)	0.5 KB digunakan untuk <i>bootloader</i>
SRAM	2 KB (ATmega328)
EPROM	1 KB (ATmega328)
Kecepatan <i>clock</i>	16 MHz

(Sumber: [www.arduino.com](http://www.arduino.com))

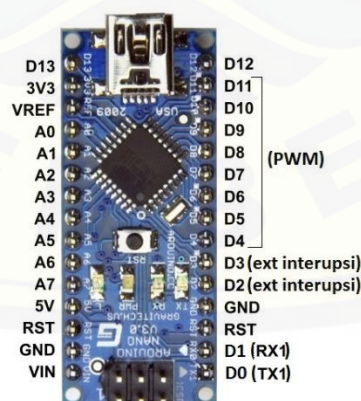
ATmega328 adalah mikrokontroler keluaran dari atmel yang mempunyai arsitektur *reduce intruction set computer* (RISC) dimana setiap proses eksekusi data lebih cepat daripada arsitektur *completed instruction set computer* (CISC). Mikrokontroler ini memiliki beberapa fitur antara lain sebagai berikut :



- a. 130 macam instruksi yang hampir semuanya dieksekusi dalam satu siklus *clock*.
- b. 32 x 8-bit register serba guna.
- c. Kecepatan mencapai 16 Mbps dengan *clock* 16MHz.
- d. 32 KB *flash memory* dan pada arduino memiliki *bootloader* yang menggunakan 2 KB dari *flash memory* sebagai *bootloader*.
- e. Memiliki *electrically erasable programmable read only memory* (EEPROM) sebesar 1 KB sebagai tempat penyimpanan data semi permanen karena EEPROM tetap dapat menyimpan data meskipun catu daya dimatikan.
- f. Memiliki *static random acces memory* (SRAM) sebesar 2 KB.
- g. Memiliki pin I/O digital sebanyak 14 pin 6 diantaranya *pulse width modulation* (PWM) *output*.
- h. *Master / Slave SPI serial interface*.
- i. Tegangan operasi sekitar 1,8 V sampai dengan 5,5 V.

### 2.10 Arduino Nano V3.0

Arduino nano adalah salah satu varian dari produk board mikrokontroler keluaran arduino. Arduino nano adalah *board* arduino terkecil, menggunakan mikrokontroler atmega 328 untuk arduino nano V3.0. Varian ini mempunyai rangkaian yang sama dengan jenis arduino duemilanove, tetapi dengan ukuran dan desain PCB yang berbeda.



Gambar 2.9 Konfigurasi pin pada *board* arduino nano (Sumber: [www.arduino.com](http://www.arduino.com))

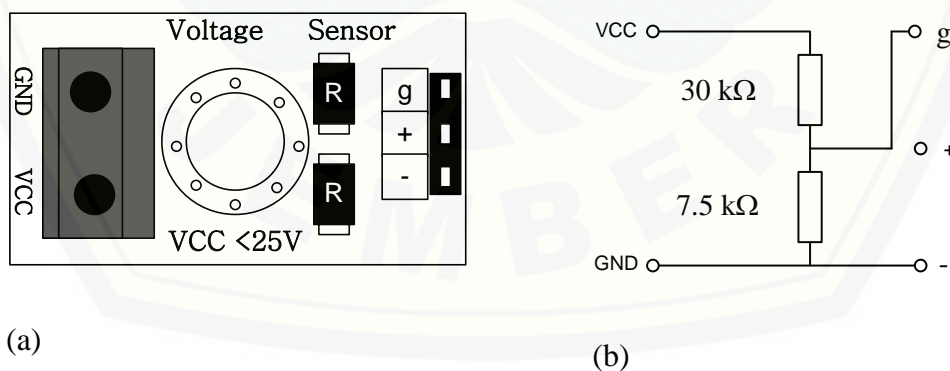
Tabel 2.4 Spesifikasi Arduino Nano

Nama	Keterangan
Mikrokontroler	Atmel ATmega168 atau ATmega328
Tegangan operasi	5V
<i>Input voltage</i> (disarankan)	7-12V
<i>Input voltage</i> (limit)	6-20V
Pin digital I/O	14 (6 pin digunakan sebagai <i>output</i> PWM)
Pins input analog	8
Arus DC per pin I/O	40 mA
<i>Flash memory</i>	16KB (ATmega168) atau 32KB (ATmega328) 2KB digunakan oleh <i>bootloader</i>
SRAM	1 KB (ATmega168) atau 2 KB (ATmega328)
EEPROM	512 byte (ATmega168) atau 1KB (ATmega328)
<i>Clock speed</i>	16 MHz
Ukuran	1.85cm x 4.3cm

(Sumber: www.arduino.com)

### 2.11 Sensor Tegangan (Konsep Pembagi Tegangan)

Sensor tegangan adalah modul pembagi tegangan yang digunakan untuk mengubah tegangan yang akan diukur untuk dapat diumpankan ke pin kontroler yang sudah memiliki konverter analog ke digital (ADC).



Gambar 2.10 Sensor tegangan DCT-elektronik (Sumber: Surplus Tek 2015)

Gambar 2.10 (a) adalah modul sensor pembagi tegangan, sedangkan Gambar 2.10 (b) adalah diagram skematik dari sensor tersebut. Kaki VCC dan GND adalah kaki-kaki untuk menempatkan terminal tegangan yang akan diukur sedangkan pin g, +

dan – adalah pin untuk dihubungkan dengan kaki ADC kontroler (Surplus Tek, 2015).

Dalam penelitian ini perancangan sensor tegangan yang akan digunakan adalah seperti dibawah ini:

$$V_{out} = \frac{V_{in} \times R_2}{(R_1 + R_2)} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana,  $V_{out} = 5 \text{ v}$  ;  $V_{in} = 100 \text{ v}$  ;  $R_1 = 30 \text{ k}\Omega$

$$5 = \frac{100 \times R_2}{(30k \times R_2)}$$

$$5 \times (30k + R_2) = 100 \times R_2$$

$$150k + 5R_2 = 100R_2$$

$$R_2 = \frac{150k}{95}$$

$$R_2 = 1k5 \Omega$$

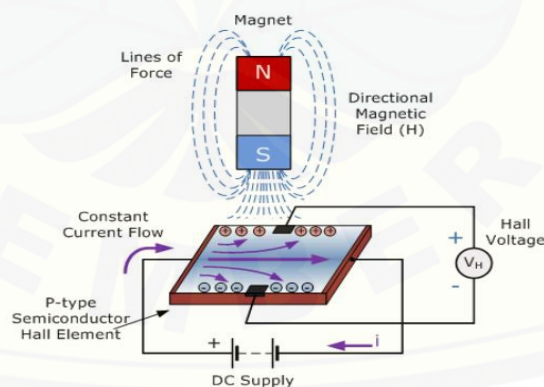
## 2.12 Sensor Arus ACS

Selain menggunakan sensor tegangan, untuk mendapatkan kurva daya juga diperlukan arus sebagai pengalinya. Maka dari itu keberadaan sensor arus juga menjadi sangat penting adanya. Pada penelitian ini, sensor arus yang digunakan ialah sensor ACS712. ACS712 merupakan sensor yang bekerja menggunakan prinsip dari efek medan. ACS712 dapat digunakan sebagai pengukur untuk arus bolak-balik (AC) atau arus searah (DC). Modul sensor ini juga dilengkapi dengan rangkaian penguat operasional yang berfungsi sebagai peningkat sensitivitas sensor, sehingga sensor ini dapat melakukan pengukuran pada perubahan arus yang kecil. Sensor ini juga dikenal memiliki pembacaan berakurasi tinggi, karena di dalam sensor ini terdapat *low offset* rangkaian *low linear field offset* dengan satu lintasan yang terbuat dari tembaga.



*Hall effect sensor* pada dasarnya terdiri dari potongan tipis semikonduktor yang bertipe P dengan bentuk persegi panjang. Bahan semikonduktor yang digunakan biasanya adalah *gallium arsenide* (GaAs), *indium antimonide* (InSb), *indium phosphide* (InP), atau *indium arsenide* (InAs). Potongan tipis semikonduktor tersebut dilewati oleh arus listrik secara berkesinambungan (terus-menerus). Ketika didekatkan dengan medan magnet atau ditempatkan pada lokasi yang bermedan magnet, garis fluks magnetik akan menggunakan gaya pada semikonduktor tersebut untuk mengalihkan muatan pembawa (elektron dan *holes*) ke kedua sisi pelat semikonduktor. Gerakan pembawa muatan ini merupakan hasil dari gaya magnet yang melewati semikonduktor tersebut.

Peristiwa berbelok atau beralihnya aliran listrik (elektron) dalam pelat konduktor karena pengaruh medan magnet ini disebut dengan efek Hall (*Hall Effect*). Efek Hall ini ditemukan oleh Dr. Edwin Hall pada tahun 1879. Untuk dapat menghasilkan perbedaan potensial diseluruh perangkat, garis *fluks* magnetik harus tegak lurus (90 derajat) terhadap aliran listrik dengan kutub yang benar. Nama “Hall” ini diambil dari nama penemu efek ini yaitu Dr. Edwin Hall. Dasar dari prinsip kerja efek Hall ini adalah gaya Lorentz yaitu gaya yang ditimbulkan oleh muatan listrik yang bergerak dalam suatu medan magnet ( $B$ ).



Gambar 2.12 *Hall Effect* (Sumber: Syam, 2013)

Hall sensor biasanya digunakan untuk waktu kecepatan roda dan poros, seperti untuk mesin pembakaran internal yang waktu pengapian, takometer, dan sistem pengereman anti-*lock*. Mereka digunakan dalam *brushless* DC motor listrik untuk mendeteksi posisi magnet permanen. Dalam roda digambarkan dengan dua

magnet sama spasi, tegangan dari sensor akan mencapai puncaknya dua kali untuk setiap revolusi. Susunan ini biasanya digunakan untuk mengatur kecepatan disk drive.

Terdapat beberapa kelebihan sensor efek Hall yang dapat digunakan sebagai sakelar elektronik, diantaranya ialah:

- Relatif lebih murah jika dibandingkan dengan sakelar mekanik dan lebih handal.
- Dapat beroperasi hingga 100 kHz.
- Tidak terpengaruh pada kondisi lingkungan karena sensor berada di dalam paket tertutup (dibungkus) sehingga dapat digunakan pada lingkungan yang kurang bersahabat.
- Dapat mendeteksi rentang medan magnet yang luas.
- Dapat mendeteksi kutub utara atau kutub selatan.
- Berbentuk pipih/datar sehingga dapat digunakan pada perangkat elektronik yang lebih tipis.

Namun Hall *Effect* sensor ini juga memiliki kelemahan, yaitu tingkat akurasi pengukuran yang lebih rendah jika dibandingkan dengan sensor sejenisnya seperti *magnetometer* ataupun sensor yang berbasis *magnetoresistance*. Dalam penelitian ini akan menggunakan sensor dengan tipe A3144 dan dengan karakteristik seperti pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Karakteristik sensor A3144

Karakteristik	Simbol	Kondisi Pengujian	Batas			Satuan
			Min	Tipikal	Maks.	
Tegangan suplai	$V_{CC}$	Operasi	4,5	-	24	V
Tegangan <i>output</i> saturasi	$V_{OUT(SAT)}$	$I_{OUT} = 20 \text{ mA}$ , $B > B_{OP}$	-	175	400	mV
Arus <i>output</i> bocor	$I_{OFF}$	$V_{OUT} = 24 \text{ V}$ , $B < B_{RP}$	-	<1.0	10	mA
Arus suplai	$I_{CC}$	$B < B_{RP}$ ( <i>output OFF</i> )	-	4,4	9	mA
Waktu naik <i>output</i>	$t_r$	$R_L = 820\Omega$ $C_L = 20\text{Pf}$	-	0,04	2	ms
Waktu turun <i>output</i>	$t_f$	$R_L = 820\Omega$ $C_L = 20\text{Pf}$	-	0,18	2	ms

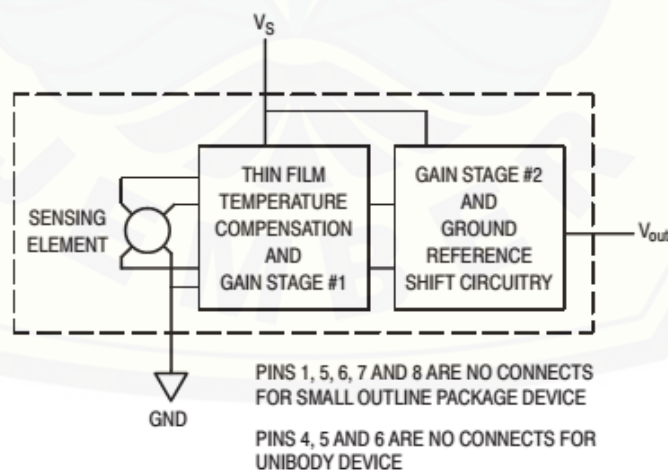
## 2.14 Pressure Sensor

*Tranducer* tekanan adalah perangkat sensitif yang berisi sirkuit diferensial tekanan yang terus-menerus mengirimkan pembacaan tekanan di dalam ruang. Kontroler menggunakan informasi ini untuk mengatur tekanan atau menghindari kondisi *over pressure*. Informasi tekanan juga dapat digunakan untuk pengumpulan data, untuk memicu alarm, dan untuk melakukan tugas kontrol eksternal lainnya (Anonymous, 2015).

Salah satu jenis sensor tekanan yang juga digunakan dalam penelitian ini adalah *silicon pressure sensor* yang bekerja dengan *piezosensitive*. Untuk membatasi pembahasan diambil acuan dari *datasheet* sensor MPX5700 yang digunakan dalam penelitian ini (Freescale, 2015).



Gambar 2.13 Sensor Tekanan Udara MPX5700



Gambar 2.14 Diagram fungsional MPX5700 (Sumber: Freescale 2015)

MPX5700 adalah transduser tekanan yang bekerja dengan sistem *piezoresistive* dan merupakan hasil rancang bangun sistem sensor mutakhir yang

dirancang untuk berbagai macam aplikasi, terutama yang menggunakan mikrokontroler atau mikroprosesor dengan A/D input. Transduser ini menggabungkan teknik-teknik canggih *micromachining*, metalisasi *thin film*, dan pengolahan bipolar untuk menghasilkan tegangan analog yang sebanding dengan tekanan diterapkan. Gambar 2.14 menunjukkan diagram fungsional dari sensor tekanan ini, sedangkan tabel 2.6 memperlihatkan karakteristik operasi dari MPX5700 pada  $V_S = 5.0 \text{ Vdc}$ ,  $T_A = 25^\circ\text{C}$  (Freescale 2015).

Tabel 2.6 Karakteristik operasi MPX5700

Karakteristik	Simbol	Min	Tipikal	Maks	Satuan
Range Tekanan	Pop	15	-	700	kPa
Tegangan Suplai	Vs	4,75	5	5,25	Vdc
Arus Suplai	Io	-	7	10	mAdc
Offset Tekanan Nol	Voff	0,184	-	0,409	Vdc
Output Skala Penuh	VFSS	4,587	4,7	4,813	Vdc
Rentang Skala Penuh	VFSS	-	4,5	-	Vdc
Akurasi	-	-	-	$\pm 2.5$	%VFSS
Sensitivitas	V/P	-	6,4	-	mV/kPa
Waktu Tanggap	tR	-	1	-	ms
Arus output sumber pada output skala penuh	Io+	-	0,1	-	mAdc
Waktu pemanasan	-	-	20	-	ms

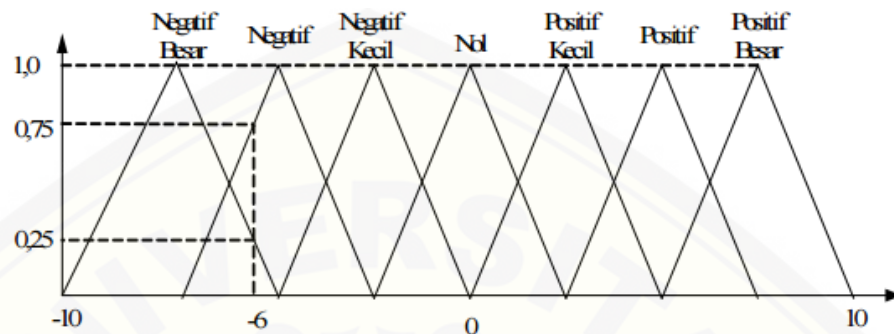
### 2.15 Fuzzy

*Fuzzy* adalah konsep himpunan yang pertama kali dikembangkan oleh Zadeh pada tahun 1965. Meskipun konsep dari himpunan *fuzzy* dikembangkan di Amerika, penggunaan *fuzzy* paling banyak diadaptasi dan dikembangkan di Jepang untuk diaplikasikan kedalam sistem kendali atau sistem kecerdasan buatan. Logika *fuzzy* pada umumnya diterapkan pada permasalahan-pemmasalahan yang memiliki unsur *uncertainty* (ketidakpastian) atau abu-abu serta *imprecise* (ketidaktepatan), *noisy*.

Logika *fuzzy* memiliki cara kerja yang didasarkan pada aturan linguistik yang biasa digunakan oleh manusia atau lebih spesifiknya mirip dengan instruksi yang berasal dari seorang operator dalam melakukan kendali. Dalam kinerja dari pengendalian tersebut, perintah atau instruksi didefinisikan dengan linguistik bukan dengan angka. Berhasil atau tidak tergantung dari pengalaman yang dimiliki oleh

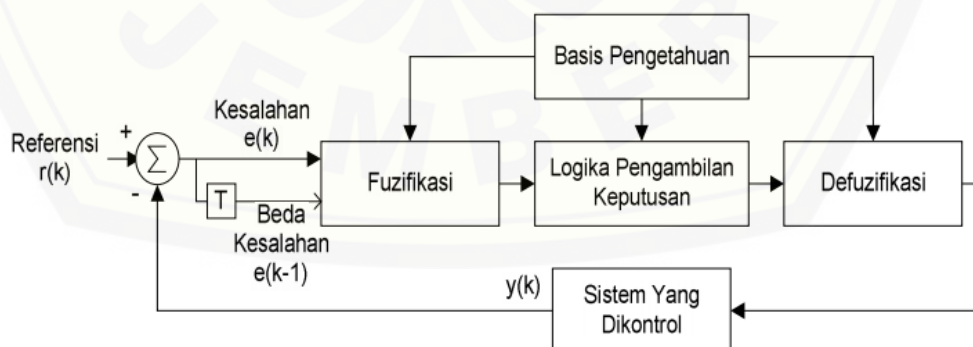


operator dan untuk mendapatkan pengalaman tersebut membutuhkan coba-coba dan waktu. Begitu juga dalam logika *fuzzy*, tidak ada istilah pendeskripsian yang baku untuk dapat menentukan sebuah sistem kontrol dari *fuzzy* tersebut dapat berkerja dengan hasil yang memuaskan.



Gambar 2.15 Model linguitik *fuzzy* (Wicaksono, *et.al.*, 2008)

Pada logika *fuzzy*, terdapat beberapa parameter yang dapat diatur guna menghasilkan *plan* yang sesuai dengan kita, diantaranya ialah semesta pembicaraan, agregasi *rule*, basis dari aturan *fuzzy*, bentuk fungsi tipe keanggotaan dan metode dalam implikasi serta metode *defuzifikasi* yang akan digunakan. Basis pengetahuan pada logika *fuzzy* berisikan tentang pengetahuan-pengetahuan dari sistem kontrol yang akan dijadikan referensi dalam mengevaluasi keadaan sistem yang sudah didesain untuk menghasilkan *output* kontrol yang sesuai dengan yang diharapkan oleh perancang. Basis pengetahuan dari sistem ini tersusun oleh basis-basis data dan basis-basis aturan (*rule*).



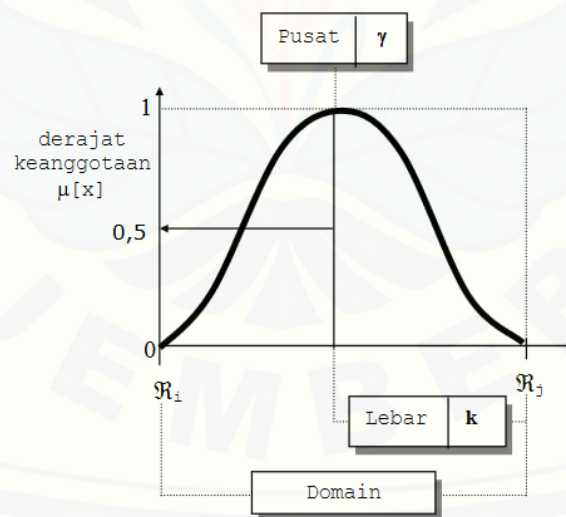
Gambar 2.16 Blok diagram *fuzzy* secara keseluruhan (Wicaksono, *et.al.*, 2008)

Himpunan *fuzzy* sebenarnya dibentuk oleh variabel-variabel linguistik dengan jumlah dan jenis himpunan yang ditentukan pada saat proses perencanaan

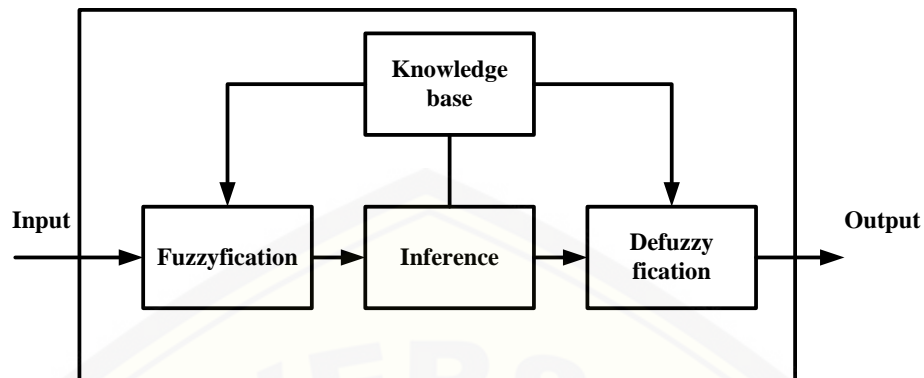
suatu *plan*. Sedangkan basis dari aturan atau *rule fuzzy* memiliki simbol dengan sintak 'IF-THEN' yang merupakan himpunan dari kondisi suatu pernyataan aturan-aturan. Penentuan ini didasarkan kepada pengetahuan pakar. Sedangkan untuk proses *defuzzifikasi* adalah proses dari perubahan nilai *fuzzy* menjadi nilai yang berbentuk himpunan-himpunan keluaran *fuzzy* berdasarkan *membership function* yang telah didesain untuk menghasilkan kembali bentuk tegasnya. Proses ini sangat diperlukan, karena pada suatu *plan* dapat mengenal nilai *defuzzifikasi* tersebut sebagai nilai sebenarnya yang nantinya nilai tersebut akan digunakan untuk proses regulasi.

#### 2.15.1 Fuzzy Gauss

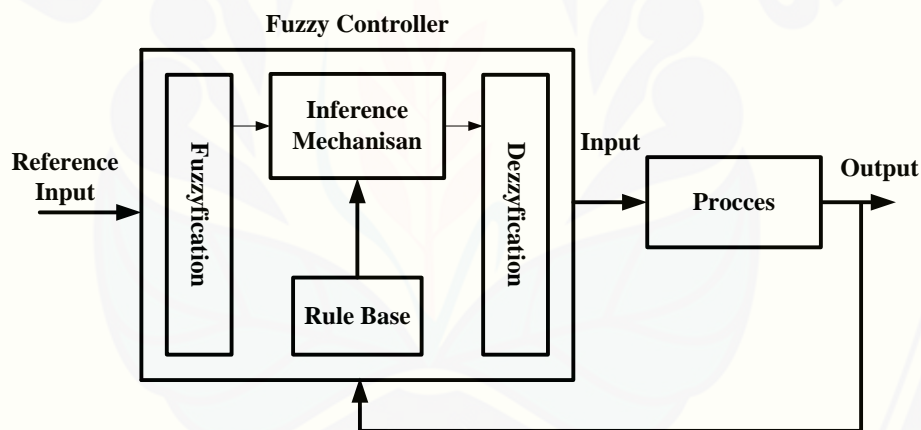
Jika kurva PI dan kurva BETA menggunakan 2 parameter yaitu ( $\gamma$ ) dan ( $\beta$ ), kurva gauss juga menggunakan ( $\gamma$ ) untuk menunjukkan nilai domain pada pusat kurva, dan ( $k$ ) yang menunjukkan lebar kurva. Nilai kurva untuk suatu nilai domain  $x$  diberikan sebagai:



Gambar 2.17 Karakteristik fungsional kurva gauss (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

2.15.2 Tahap Pemodelan dalam *Fuzzy Logic*Gambar 2.18 Blok diagram sistem *fuzzy* 1 (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

Dari blok diagram di atas, bila diterapkan dalam pengendalian suatu proses dapat kita gambarkan seperti blok diagram di bawah ini :

Gambar 2.19 Blok Diagram sistem *fuzzy* 2 (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem fuzzy, yaitu:

a. *Variable fuzzy*

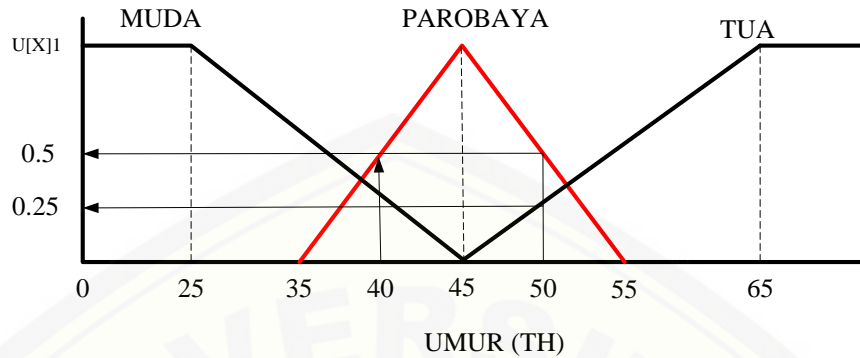
*Variable fuzzy* merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh: umur, temperatur, permintaan, dsb.

b. Himpunan *fuzzy*

Variabel *fuzzy* merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh: umur, temperatur, permintaan, dsb.

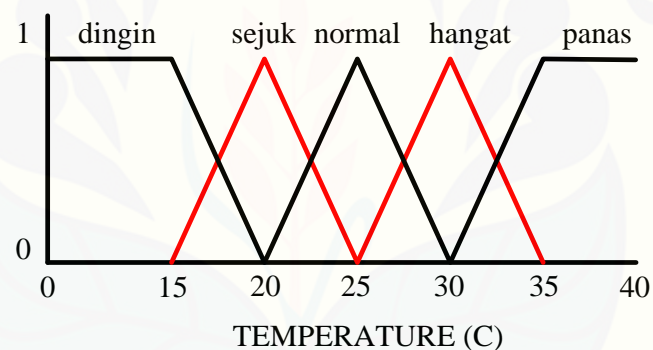
Contoh:

- Variabel umur, terbagi menjadi 3 himpunan *fuzzy*, yaitu : MUDA, PAROBAYA, TUA.



Gambar 2.20 Fuzzifikasi umur (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

- Variabel temperatur, terbagi menjadi 5 himpunan fuzzy, yaitu : DINGIN, SEJUK, NORMAL, HANGAT, dan PANAS.



Gambar 2.21 Fuzzifikasi suhu (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

#### c. Semesta Pembicaraan

Semesta pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Adakalanya nilai semesta pembicaraan ini tidak dibatasi batas atasnya.

Contoh :

- Semesta pembicaraan untuk variabel umur:  $[0 + 8)$
- Semesta pembicaraan untuk variabel temperatur:  $[0 40]$

#### d. Domain

Domain himpunan *fuzzy* adalah keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy*. Seperti halnya semesta pembicaraan, domain merupakan himpunan bilangan real yang senantiasa naik (bertambah) secara monoton dari kiri ke kanan.

Nilai domain dapat berupa bilangan positif maupun negatif. Contoh domain himpunan *fuzzy* :

- MUDA = [0 45]
- PAROBAYA = [35 55]
- TUA = [45 +8)
- DINGIN = [0 20]
- SEJUK = [15 25]
- NORMAL = [20 30]
- HANGAT = [25 35]
- PANAS = [30 40]

#### 2.15.2 Struktur Dasar *Fuzzy Logic Controller*

Kontroler logika *fuzzy* dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Unit logika *fuzzy* memiliki kemampuan menyelesaikan masalah perilaku sistem yang kompleks, yang tidak dimiliki oleh kontroler konvensional. Secara umum kontroler logika *fuzzy* memiliki kemampuan sebagai berikut :

- 1) Beroperasi tanpa campur tangan manusia secara langsung, tetapi memiliki efektifitas yang sama dengan kontroler manusia.
- 2) Mampu menangani sistem-sistem yang kompleks, non-linier dan tidak tasioner.
- 3) Memenuhi spesifikasi operasional dan kriteria kinerja.
- 4) Strukturnya sederhana, kokoh dan beroperasi *real time*.

##### A. Himpunan *fuzzy*

Pada himpunan tegas (*crisp*), nilai keanggotaan suatu item  $x$  dalam suatu himpunan  $A$ , yang sering ditulis dengan  $\mu [x]$ , memiliki 2 kemungkinan yaitu:

- Satu (1), yang berarti bahwa suatu item menjadi anggota dalam suatu himpunan, atau

- Nol (0), yang berarti bahwa suatu item tidak menjadi anggota dalam suatu himpunan.

Kalau pada himpunan *crisp*, nilai keanggotaan hanya ada 2 kemungkinan, yaitu 0 atau 1, pada himpunan *fuzzy* nilai keanggotaan terletak pada rentang 0 sampai 1. Apabila  $x$  memiliki nilai keanggotaan *fuzzy*  $\mu[x]=0$  berarti  $x$  tidak menjadi anggota himpunan  $A$ , demikian pula apabila  $x$  memiliki nilai keanggotaan *fuzzy*  $\mu_A[x]=1$  berarti  $x$  menjadi anggota penuh pada himpunan  $A$ .

Terkadang kemiripan antara keanggotaan *fuzzy* dengan probabilitas menimbulkan kerancuan. Keduanya memiliki nilai pada interval  $[0,1]$ , namun interpretasi nilainya sangat berbeda antara kedua kasus tersebut. Keanggotaan *fuzzy* memberikan suatu ukuran terhadap pendapat atau keputusan, sedangkan probabilitas mengindikasikan proporsi terhadap keseringan suatu hasil bernilai benar dalam jangka panjang. Misalnya, jika nilai keanggotaan suatu himpunan *fuzzy* MUDA adalah 0,9. Maka tidak perlu dipermasalahkan berapa seringnya nilai itu diulang secara individual untuk mengharapkan suatu hasil yang hampir pasti muda. Di lain pihak, nilai probabilitas 0,9 muda berarti 10% dari himpunan tersebut diharapkan tidak muda. Himpunan *fuzzy* memiliki 2 atribut yaitu :

- a) *Linguistik*, yaitu penamaan suatu grup yang mewakili suatu keadaan suatu kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti : MUDA, PAROBAYA, TUA.
- b) *Numeris*, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel, seperti : 40, 25, 50, dsb.

#### B. Fungsi keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik-titik *input* data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan adalah dengan melalui pendekatan fungsi. Ada beberapa fungsi yang bisa digunakan.

- a) Representasi linear
- b) Representasi kurva segitiga

- c) Representasi kurva trapesium
- d) Representasi kurva bentuk bahu
- e) Representasi kurva-s
- f) Representasi kurva bentuk lonceng (*bell curve*)
- g) Koordinat Keanggotaan

#### C. Operator dasar operasi himpunan *Fuzzy*

##### a) Operator AND

Diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terkecil antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A[x], \mu_B[y])$$

##### b) Operator OR

Diperoleh dengan mengambil nilai keanggotaan terbesar antar elemen pada himpunan-himpunan yang bersangkutan.

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A[x], \mu_B[y])$$

##### c) Operator NOT

Diperoleh dengan mengurangkan nilai keanggotaan elemen pada himpunan yang bersangkutan dari 1.

$$\mu_{A^c} = 1 - \mu_A[x]$$

#### D. Fungsi implikasi

Tiap-tiap aturan (proposisi) pada basis pengetahuan *fuzzy* akan berhubungan dengan suatu relasi *fuzzy*. Bentuk umum dari aturan yang digunakan dalam fungsi implikasi adalah:

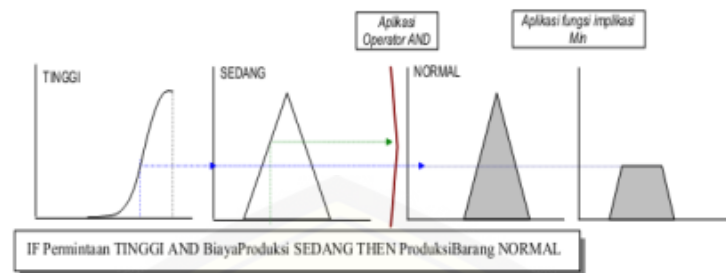
$$\text{IF } x \text{ is } A \text{ THEN } y \text{ is } B$$

Dengan  $x$  dan  $y$  adalah skalar, dan  $A$  dan  $B$  adalah himpunan *fuzzy*. Proposisi yang mengikuti IF disebut sebagai anteseden, sedangkan proposisi yang mengikuti THEN disebut sebagai konsekuen. Proposisi ini dapat diperluas dengan menggunakan operator fuzzy, seperti:

$$\text{IF } (x_1 \text{ is } A_1) \cdot (x_2 \text{ is } A_2) \cdot (x_3 \text{ is } A_3) \dots (x_n \text{ is } A_n) \text{ THEN } y \text{ is } B$$

Dengan  $\cdot$  adalah operator (misal: OR, AND atau NOT).

Fungsi ini akan memotong *output* himpunan *fuzzy*. Gambar di bawah menunjukkan salah satu contoh penggunaan fungsi min.

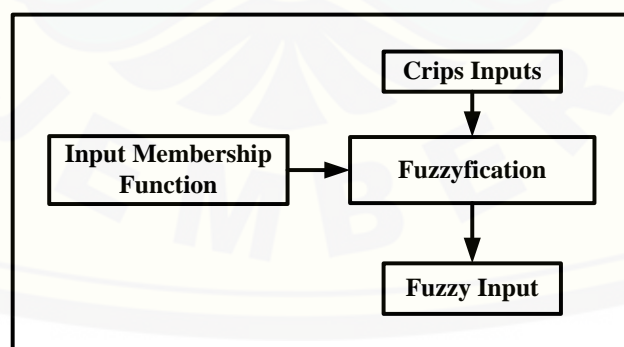


Gambar 2.22 Grafik fungsi min (Sumber : Sri Kusumadewi, 2003)

### 2.15.3 Fuzzification

Fuzzifikasi atau *fuzzyfication* adalah proses yang dilakukan untuk mengubah variabel nyata menjadi variabel fuzzy, ini ditujukan agar masukan kontroler *fuzzy* bisa dipetakan menuju jenis yang sesuai dengan himpunan *fuzzy*. Pemetaan dilakukan dengan bantuan model dari fungsi keanggotaan agar dapat diketahui besar masukan tersebut (derajat keanggotaan). Terdapat beberapa jenis penggambaran fungsi keanggotaan, antara lain gaussian, segitiga, trapesium dan bahu.

Komponen lainnya yang memiliki peranan penting adalah label. Label didefinisikan dari fungsi keanggotaan, fungsi keanggotaan apabila dikumpulkan akan menghasilkan *fuzzy set*. Dalam logika *fuzzy* terdapat basis pengetahuan, dimana terdiri dari fakta (*data base*), dan kaidah atur (*rulebase*).



Gambar 2.23 Fuzzification (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

### 2.15.4 Rule Evaluation

Prosedur *fuzzifikasi* merupakan proses untuk mengubah variabel *non fuzzy* (variabel *numerik*) menjadi variabel *fuzzy* (variabel *linguistik*). Nilai *error* dan *delta*

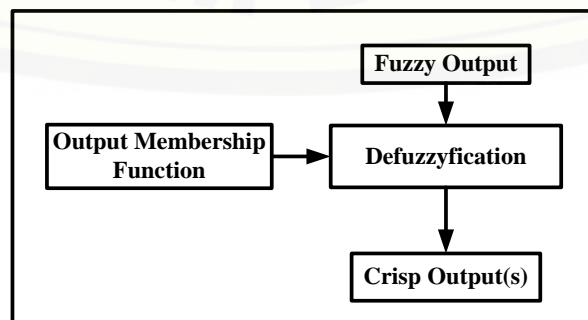


*error* yang dikuantisasi sebelumnya diolah oleh kontroler logika *fuzzy*, kemudian diubah terlebih dahulu ke dalam variabel *fuzzy*. Melalui *membership function* (fungsi keanggotaan) yang telah disusun, maka dari nilai *error* dan *delta error* kuantisasi akan didapatkan derajat keanggotaan bagi masing-masing nilai *error* dan *delta error*.

Pada umumnya aturan-aturan *fuzzy* dinyatakan dalam bentuk “*IF antecedent THEN consequent*” yang merupakan inti dari relasi *fuzzy*. Terdapat dua model aturan *fuzzy* yang digunakan secara luas dalam berbagai aplikasi, yaitu model mamdani dan model sugeno.

#### 2.15.5 Defuzzification

*Defuzzifikasi* dapat didefinisikan sebagai proses pengubahan besaran *fuzzy* yang disajikan dalam bentuk himpunan-himpunan *fuzzy* keluaran dengan fungsi keanggotaannya untuk mendapatkan kembali bentuk tegasnya (*crisp*). Hal ini diperlukan sebab dalam aplikasi nyata yang dibutuhkan adalah nilai tegas (*crisp*). Prosesnya adalah ketika suatu nilai *fuzzy output* yang berasal dari *rule evaluation* diambil kemudian dimasukkan ke dalam suatu *membership function output*. Bentuk bangun yang digunakan dalam *membership function output* adalah bentuk *singleton* yaitu garis lurus vertikal ke atas, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.24. Besar nilai *fuzzy output* dinyatakan sebagai *degree of membership function output*. Nilai-nilai tersebut dimasukkan ke dalam suatu rumus yang dinamakan *center of gravity* (COG) untuk mendapatkan hasil akhir yang disebut *crisp output*. *Crisp output* adalah suatu nilai analog yang akan kita butuhkan untuk mengolah data pada sistem yang telah dirancang.



Gambar 2.24 *Defuzzification* (Sumber: Sri Kusumadewi, 2003)

### BAB 3. METODELOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember.

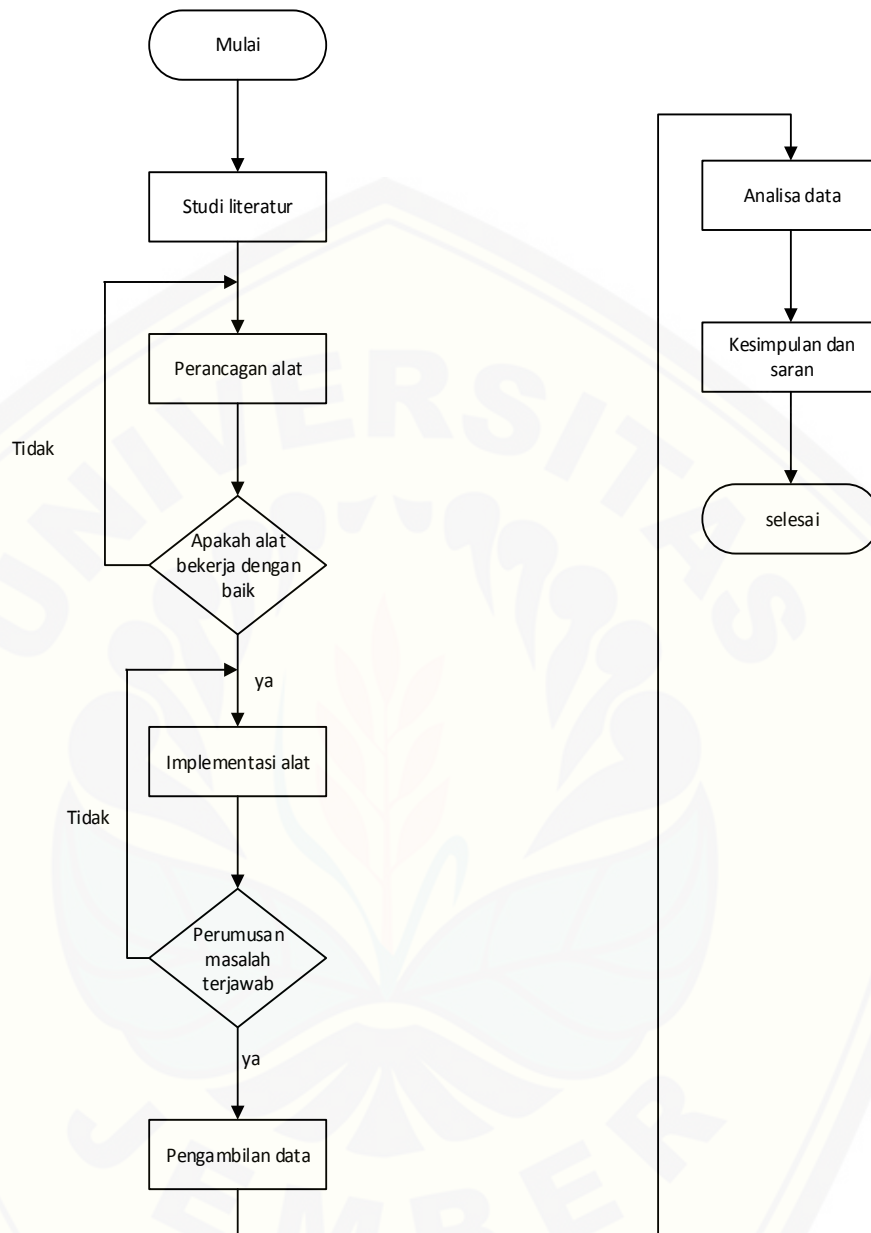
#### 3.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian ini dimulai pada bulan Oktober 2018–Desember 2018, dengan rincian pada tabel 3.1:

Tabel 3.1 Rencana dan jadwal pelaksanaan penelitian

No	Kegiatan	Bulan/Minggu											
		Oktober				November				Desember			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi literatur												
2	Rancangan sistem												
3	Pengukuran dan pengambilan data												
4	Analisa data dan pembahasan												
5	Penyusunan laporan												

### 3.3 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Tahapan pelaksanaan penelitian

Langkah-langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Studi literatur

Tahap awal pelaksanaan penelitian ini ialah dengan mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya melalui buku atau internet untuk mengetahui karakteristik komponen sistem, prinsip kerja, serta teori yang menunjang

lainnya. Diharapkan dengan literatur yang telah didapat dapat memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.

## 2. Perancangan alat

Tahapan ini merupakan tahap merancang konstruksi secara sistematis dari alat yang akan dilakukan penelitian. Diharapkan dari proses perancangan konstruksi yang sistematis ini, alat yang nantinya akan diteliti dapat terbentuk. Hal – hal lain yang dilakukan yakni seperti penyolderan, dan perancangan sistem monitoring.

## 3. Implementasi alat

Setelah *hardware* dan *software* terbentuk maka dilakukan pengujian pada masing-masing blok dan kemudian pengujian dilakukan pada keseluruhan sistem. Dalam implementasi alat ini juga dilakukan proses kalibrasi dimana pada proses kalibrasi ini bertujuan agar pembacaan sensor akurat sesuai dengan alat ukur.

## 4. Analisa dan pengambilan data

Setelah melakukan pengujian pada keseluruhan sistem dan memastikan bekerja dengan baik dan hasilnya memenuhi target, maka yang dilakukan selanjutnya adalah pengambilan data yang diperlukan untuk kemudian dianalisa dari data yang telah didapatkan. Analisa yang dilakukan adalah kecepatan menuju *steady state* dan ketahanan terhadap perubahan beban.

## 5. Penyusunan laporan

Pada tahap akhir ini, hasil pengambilan data dan analisa dimasukkan ke pembahasan. Kemudian, dari apa yang telah dianalisa dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang dibuat dan memberikan saran untuk memperbaiki kekurangan yang ada, kemungkinan pengembangan, serta penyempurnaan alat di masa mendatang.

### 3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Peralatan – peralatan yang diperlukan dalam penelitian adalah:

1. *Personal computer* (PC);
2. Alat – alat ukur : AVOMeter, *tachometer*, dan DC *power supply*;
3. Perkakas mekanis : Handrill, tank, dan obeng dll.;
4. Perangkat lunak: *Microsoft office*, visual studio 2012 dan matlab 2013a.

Beberapa komponen yang diperlukan dalam penelitian ini adalah :

1. *Air motor* (turbin);
2. Servo;
3. DC motor/*generator*;
4. Arduino UNO dan arduino NANO;
5. Sensor Kecepatan *hall effect sensor*;
6. Sensor tegangan;
7. Sensor arus ACS712;

Tabel 3.1 merupakan alat ukur dan spesifikasi yang digunakan dalam proses kalibrasi:

Tabel 3.1 Spesifikasi alat ukur yang digunakan dalam kalibrasi

No	Nama Alat	Spesifikasi Teknis dan Penjelasan
1.	<i>Digital multimeter</i>	<b>Sanwa CD771</b> Fungsi <i>Range</i> Pengukuran      Resolusi DCV            400m/4/40/400/1000V      0.1mV DCA            400u/4000u/40m/400m/4/10A      0.1Ua Resistansi    400/4k/40k/400k/4M/40MΩ      0.1Ω *fungsi yang tidak digunakan dalam penelitian tidak disebutkan.
2.	<i>Dc power supply</i>	Protek DF1730SB5A <i>Single Output Power Supply</i> 0 ~ 30V, 0 ~ 5A, <i>Output</i> terisolasi untuk pengoperasian seri atau parallel, Tampilan baca LED 3 digit
3.	<i>Pressure gauge</i>	<i>analogue pressure gauge</i> Typ-A-3 , <i>Measuring range</i> : 0 ... +9 bar, <i>Resolution</i> : 0.1 bar, <i>Accuracy</i> : ± 0.6% V.E.
4.	<i>Tacho meter</i>	Lutron DT 2234C <i>Tachometer</i> . 0.1 – 5 – 999.9 rpm. 1-1000-99,999 rpm.

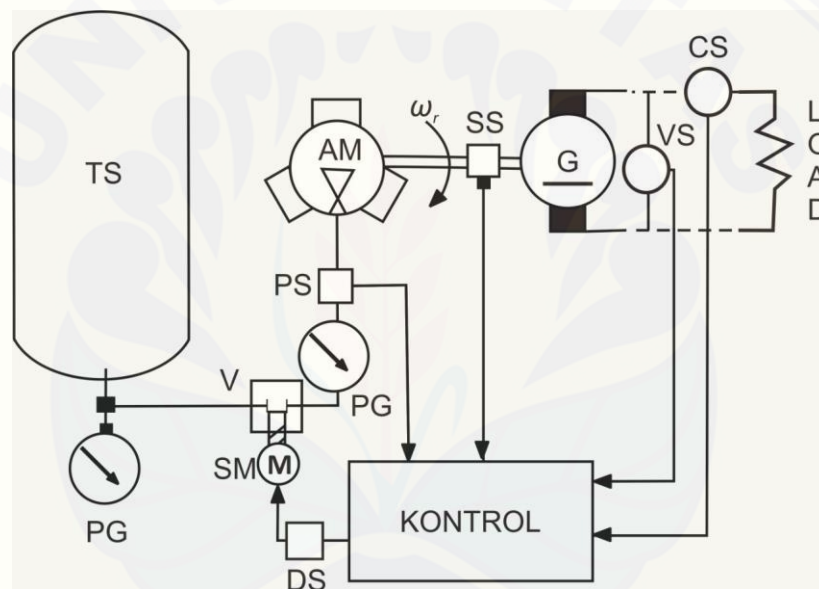
(Sumber: Tercantum dalam spesifikasi masing-masing alat)

### 3.5 Rancangan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan perancangan dalam mendapatkan konversi energi untuk keluaran daya secara konstan yang sesuai untuk aplikasi SS-CAES. Penelitian ini akan difokuskan pada pemilihan metode kendali untuk mendapatkan keluaran tegangan secara konstan. Detail langkah akan dijelaskan pada bagian 3.2.

#### 3.5.1 Diagram Blok SS-CAES

Untuk memudahkan dalam perancangan, maka sistem akan dipisahkan secara fungsinya. Berikut ini adalah diagram blok dari item SS-CAES :



Gambar 3.2 Gambar rancangan *prototype* sistem SS-CAES (Sumber: Penulis)

#### Keterangan Gambar :

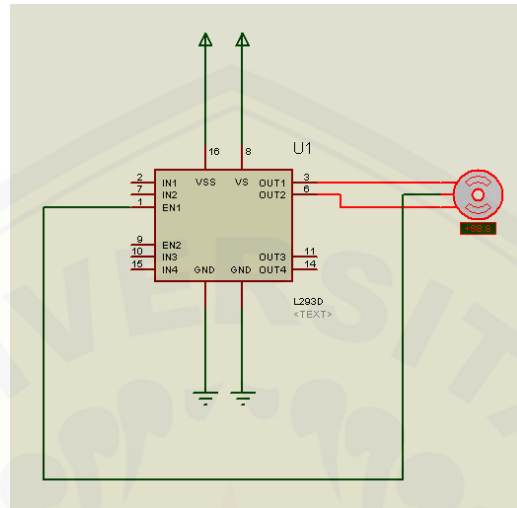
- TS = *Tank storage* (tangki penyimpan udara)
- PG = *Pressure gauge* digunakan untuk mengamati tekanan dalam tangki penyimpan udara tekan.
- PS = *Pressure sensor* adalah peralatan elektronik untuk memberi umpan balik nilai tekanan pada inlet air motor (AM)
- V = *Valve* untuk membatasi tekanan udara yang masuk pada air motor.

AM	=	<i>Air motor</i> yang digunakan sebagai penggerak mula dari generator.
G	=	<i>Generator</i> DC NC5475C
SS	=	<i>Speed sensor</i> digunakan untuk deteksi kecepatan dan memberikan umpan balik pada kontroler.
CS	=	<i>Current sensor</i> (sensor arus) digunakan untuk deteksi arus <i>output</i> generator sebagai informasi ke kontroler.
VS	=	<i>Voltage sensor</i> (sensor tegangan) untuk mendeteksi tegangan <i>output</i> generator sebagai informasi ke kontroler.
LOAD	=	Rangkaian beban DC berupa rangkaian resistor keramik dan rangkaian bohlam.
<i>Comman &amp; Control Block</i>	=	Kontroler arduino uno sebagai master dan arduino nano sebagai <i>slave</i> .
SM	=	<i>Servo motor</i> untuk menggerakkan <i>valve</i> akibat unpan balik dari kondisi <i>output</i>
S	=	<i>Driver servo</i> digunakan untuk menggerakkan servo sehingga servo memberikan tegangan nominal dan <i>input</i> PWM

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat bahwa pada sistem ini menggunakan 3 buah *input* kontrol. *Input* yang pertama adalah sensor kecepatan dengan menggunakan *magnetic sensor*. *Input* yang kedua adalah sensor tegangan yang dipasang pada keluaran *generator* dan *input* yang ketiga adalah sensor arus yang dipasang seri dengan beban.

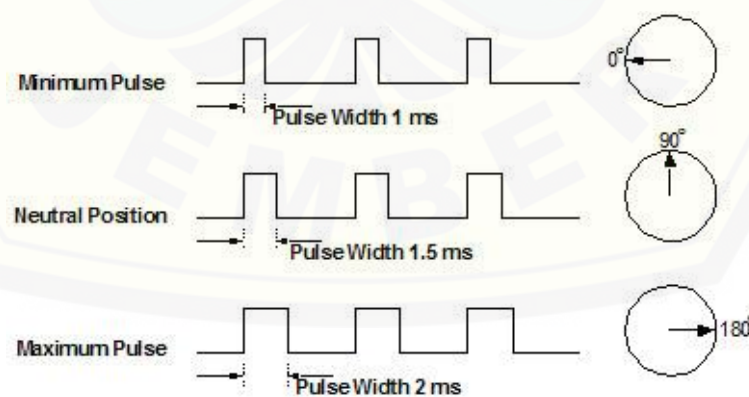
Pada pengujian dari sistem SS-CAES yang dirancang peneliti ialah dengan menggunakan tegangan *set point* sebesar 12 V, 18 V dan 24 V saat tanpa beban, *set point* 24 V saat terjadi perubahan beban, dan *set point* 12 V saat beban LED, maka secara otomatis akan terjadi perubahan tegangan. Dengan perubahan tersebut, sistem akan merespon dengan cara membuka atau menutup katup udara untuk mencapai tegangan *set point*. Ketika tegangan yang dibutuhkan telah tercapai, maka katub udara atau *valve* akan berhenti pada sudut tersebut. Dengan demikian

tegangan akan menjadi konstan dan energi yang dikonversi akan tetap maksimal tanpa membuang udara secara berlebihan.



Gambar 3.3 Rangkaian *driver motor servo*

Dalam pelaksanaannya untuk memaksimalkan kinerja dari *motor servo* maka menggunakan rangkaian *driver motor servo* sesuai dengan gambar 3.3 Rangkaian *driver motor servo*. Pada rangkaian ini menggunakan IC L283D yang didalamnya berupa kumpulan dari mosfet. Tujuan penggunaan IC ini adalah agar rangkaian menjadi lebih sederhana dan mudah dalam pengaturannya.



Gambar 3.4 PWM *servo* (Sumber: <http://pudintekel.blogspot.com/2011/09/kendali-motor-servo-dengan-pulse-width.html>)



Input rangkaian ini menggunakan sinyal PWM dengan *range* nilai pulsa dari 0–255 untuk mengendalikan *motor servo*. Input PWM berasal dari pin 9 arduino yang akan diintegrasikan dengan driver motor. Untuk mendapatkan sudut tertentu dari servo maka pengaturannya disesuaikan dengan sinyal PWM yang digunakan. Pengaturan dari sinyal input PWM dan hubungannya dengan keluaran sudut servo dapat dilihat pada gambar 3.4 PWM Servo.

$$T_{total} = T_{on} + T_{off} \cdot \dots\dots\dots (7)$$

Dimana =  $T_{on}$  = Waktu pulsa *High*

$T_{off}$  = Waktu pulsa *Low*

Dari rumus tersebut maka digunakan sebagai acuan untuk menentukan besarnya *duty cycle* yang dihasilkan.

$$D = \frac{T_{on}}{T_{off}} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana =  $D$  = *duty cycle* yaitu lamanya pulsa *high* dalam satu periode

Dari kedua perumusan tersebut kemudian dijadikan acuan untuk menentukan besarnya tegangan keluaran yang dihasilkan *driver* untuk menggerakkan servo.

$$V_{out} = D \times V_{in} \dots\dots\dots (9)$$

Atau

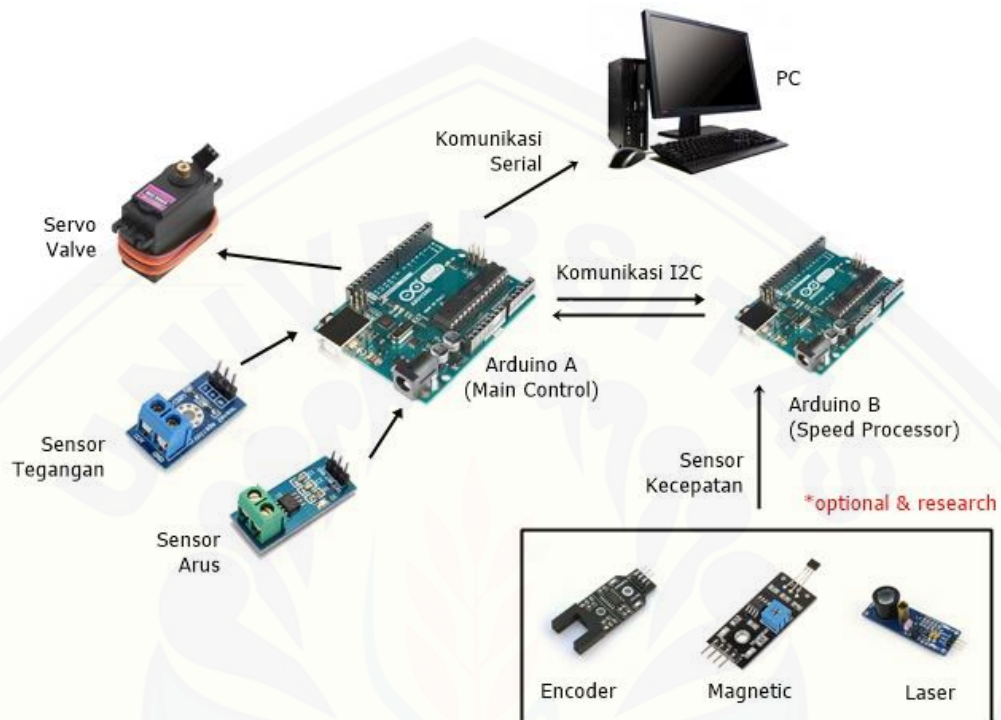
$$V_{out} = \frac{T_{on}}{T_{total}} \times V_{in} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana =  $V_{out}$  = Tegangan keluaran *driver*

$V_{in}$  = Tegangan masukan *driver*

### 3.5.2 Rancangan Diagram Blok Kendali

Gambar 3.5 adalah skema rancangan untuk kontroler yang akan digunakan pada penelitian ini.

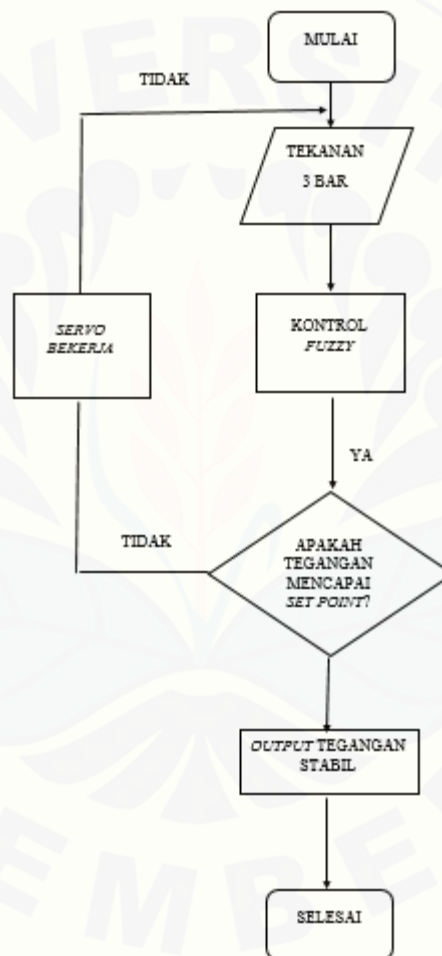


Gambar 3.5 Gambar diagram blok kendali

Pada gambar 3.5 dapat dilihat bahwa pada sistem ini menggunakan dua buah mikrokontroler yaitu berupa arduino uno dan arduino nano. Arduino uno bertindak sebagai pemroses utama dan arduino nano sebagai sub proses kontroler. Pemisahan mikrokontroler ini bertujuan untuk menjaga kepresisian dari pendeteksian kecepatan motor, dikarenakan pada *magnetic sensor* terdapat variabel waktu dalam menentukan kecepatan.

Pada blok diagram kendali, arduino pertama adalah arduino nano yang digunakan sebagai pengolah kecepatan dari *magnetic sensor*. Selanjutnya, arduino nano yang dijadikan sebagai pengolah *magnetic sensor*, akan mengirimkan data kecepatan putaran *air motor* pada arduino utama yang berupa arduino uno melalui komunikasi I2C. Setelah data dikirim, selanjutnya arduino uno akan melakukan pemrosesan data yang lain, yaitu data berupa sensor tegangan, sensor arus yang kemudian data tersebut diolah sesuai dengan kontrol *fuzzy* yang telah dirancang.

*Output* dari kontrol *fuzzy* ini berupa sudut dari servo dimana servo tersebut disambungkan dengan katub udara untuk membuka dan menutup katub guna untuk mengatur laju udara yang masuk pada *air motor* agar tegangan mencapai *set point* sebesar 12 V, 18 V dan 24 V saat kondisi tanpa beban, *set point* 24 V saat kondisi berbeban, dan *set point* 12 V saat beban LED. Selain itu arduino uno berfungsi untuk mengirimkan data ke *personal computer* sebagai *user interface* guna mengetahui respon dari sistem.



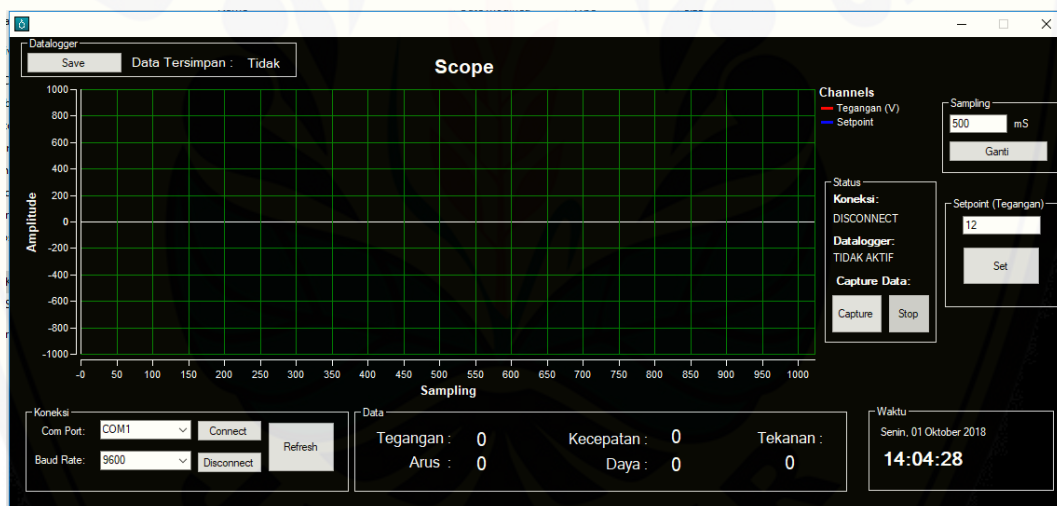
Gambar 3.6 Flowchart sistem kendali

Pada *flowchart* sistem kendali dapat dilihat bahwa *input* sistem merupakan tekanan pada tangki kompresor sebesar 3 bar. Kemudian tekanan tersebut akan masuk kedalam *air motor* sehingga *air motor* dapat berputar. Kemudian perputaran *air motor* akan menggerakkan *generator* sehingga *generator* menghasilkan tegangan. Lalu terdapat pengambilan keputusan apakah tegangan yang telah

dikeluarkan oleh generator telah mencapai *set point* atau belum. Apabila tahanan yang dikeluarkan oleh generator belum mencapai pada *set point* yang telah ditentukan, maka yang terjadi adalah *servo* akan membuka katub udara lebih lebar sehingga tekanan yang masuk pada *air motor* menjadi lebih besar. Maka dari itu tegangan yang akan dikeluarkan pun menjadi lebih besar pula.

### 3.5.3 Perancangan Sistem *Monitoring*

Dalam penelitian ini perancangan sistem *monitoring* menggunakan aplikasi Visual Studio 2012 untuk membuat tampilan *monitoring*. *Monitoring* ini juga dilengkapi dengan *data logger* dimana data pada keluaran sistem dapat disimpan secara langsung. Data yang diambil terdiri dari tegangan, arus, daya, Rpm, dan tekanan. Sistem *monitoring* yang akan digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Gambar sistem *monitoring*

### 3.5.4 Perancangan Kendali *Fuzzy*

#### a. *Fuzzyfikasi*

Desain *fuzzy*, didesain dengan dua masukan dan satu keluaran. Tahap awal dalam pembuatan *fuzzy* diawali dengan proses *fuzzyfikasi*. Pada tahap ini, proses dilakukan terhadap nilai *error* dan *delta error*, yaitu dengan membuat himpunan keanggotaan untuk *error* dan *delta error*. Setelah himpunan keanggotaan untuk *error* dan *delta error* terbentuk maka langkah selanjutnya adalah melakukan

perhitungan untuk menentukan derajat keanggotaan masing-masing nilai *error* dan *delta error*. Desain fuzzy, didesain dengan dua masukan dan satu keluaran. Untuk *membership function input* adalah hasil dari persamaan dari 11 sampai dengan persamaan 13 dan diberikan *membership function* seperti pada Gambar 3.8 – Gambar 3.10

$$e(t) = \text{SetPoint} - \text{ActualVoltage} \dots\dots\dots (11)$$

$$de = e(t) - e(t-1) \dots\dots\dots (12)$$

$$PWM = PWM + PWM(\text{AIOutput}) \dots\dots\dots (13)$$

dimana :

$e(t)$  = Error

$e(t-1)$  = Error sebelumnya

$de(t)$  = DeltaError

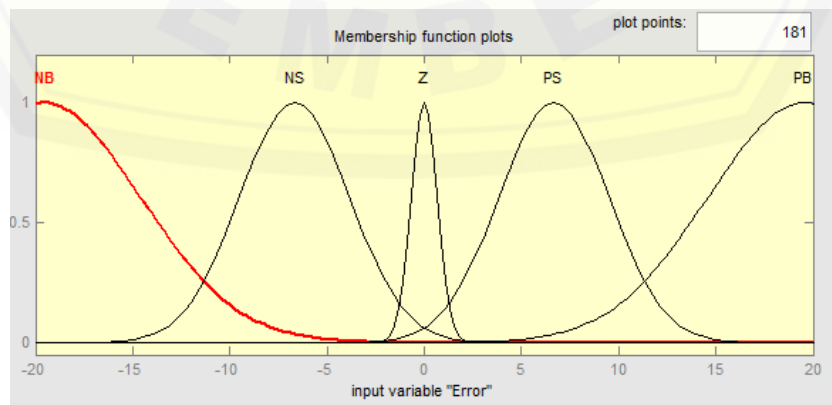
$PWM$  = Sinyal untuk mengubah sudut servo

$PWM(\text{AIOutput})$  = Nilai PWM sebelumnya

*Setpoint* = Tegangan yang diinginkan oleh pengguna

*ActualVoltage* = Tegangan yang muncul

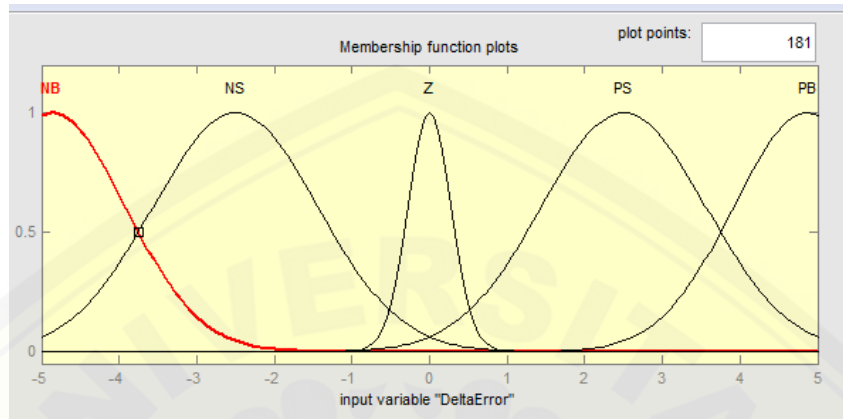
Pada penelitian ini, model kendali yang digunakan adalah *close loop* atau rangkaian tertutup menggunakan fungsi *error* dan *delta error*. *Error* di sini adalah nilai sekarang dikurangi pada *set point* yang telah ditentukan. Gambar 3.8 merupakan *member input* untuk *error*.



Gambar 3.8 *Member input error*

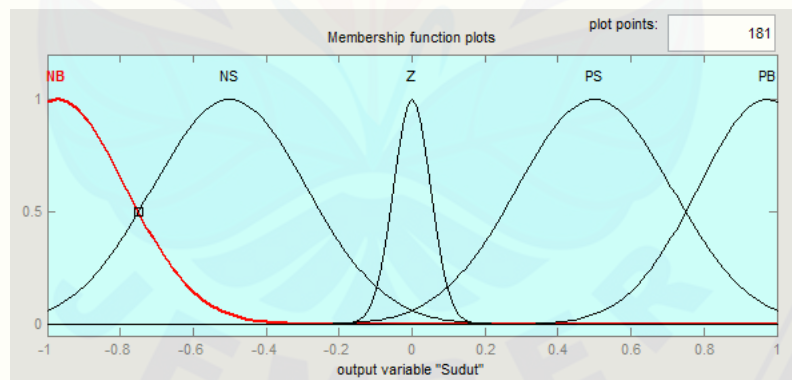
Sedangkan yang dimaksud untuk *delta error* di sini adalah *error* sekarang diurangi *error* sebelumnya. Gambar 3.9 merupakan *member input* untuk *delta error*

:



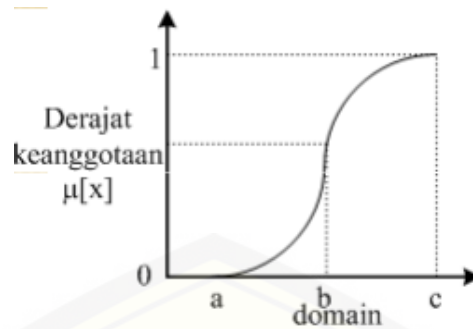
Gambar 3.9 *Member input delta error*

*Output* disini merupakan hasil keluran dari sudut *servo* yang akan diakumulasikan kedalam nilai derajat. Hasil dari *output* di sini berasal dari acuan sudut saat ini dikurangi dengan sudut *output* dari *fuzzy*. Gambar 3.10 merupakan *member output* untuk nilai sudut:



Gambar 3.10 *Member output sudut*

Untuk kurva *sigmoid* pertumbuhan bergerak dari sisi kiri (nilai keangotaan = 0) ke sisi kanan (nilai keanggotaan = 1). Bentuk kurva dapat dilihat pada gambar 3.11.

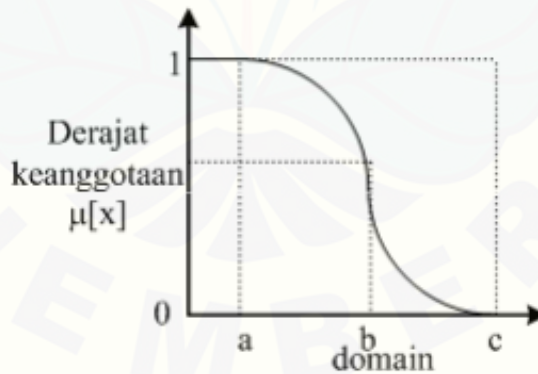


Gambar 3.11 Gambar kurva *sigmoid* pertumbuhan (Sumber: Martiana, 2018)

Maka, persamaannya adalah :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0 & x \geq 0 \\ 2 \left( \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 \right) & a \geq x \leq b \\ 1 - 2 \left( \left( \frac{c-x}{c-a} \right)^2 \right) & b \leq x \leq c \\ 1 & x > c \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

Untuk kurva *sigmoid* penyusutan bergerak dari sisi kiri (nilai keanggotaan = 1) ke sisi kanan (nilai keanggotaan = 0). Bentuk kurva dapat dilihat pada gambar 3.12.



Gambar 3.12 Gambar kurva *sigmoid* penyusutan (Sumber: Martiana, 2018)

Maka, persamaannya adalah :

$$\mu[x] = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 1 - 2 \left( \left( \frac{x-a}{c-a} \right)^2 \right) & a \geq x \leq b \\ 2 \left( \left( \frac{c-x}{c-a} \right)^2 \right) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \dots\dots\dots (15)$$

### b. Rules base

Interferensi dimulai dengan memetakan nilai derajat keanggotaan dari masing - masing nilai *error* dan *delta error* ke sebuah tabel yang berisi basis aturan yang akan dipilih (*rule base*) untuk menjalankan sistem dan menggunakan metode pemilihan nilai dari derajat keanggotaan. Dengan demikian terlebih dahulu harus dibuat matrik *rule base*.

Tabel 3.2 Rule base fuzzy

<b>Err</b> <b>dErr</b>	<b>NB</b>	<b>NS</b>	<b>Z</b>	<b>PS</b>	<b>PB</b>
<b>NB</b>	NB	NB	N	PB	PB
<b>NS</b>	NB	NS	PS	PS	PB
<b>Z</b>	NS	NS	Z	PS	PS
<b>PS</b>	NB	NS	NS	PS	PB
<b>PB</b>	NB	NB	PS	PB	PB

Dalam perancangan *fuzzy*, peneliti menggunakan metode *fuzzy mamdani* dengan aturan :

**If (X<sub>1</sub> is A<sub>1</sub>) and (X<sub>2</sub> is A<sub>2</sub>) and (X<sub>3</sub> is A<sub>3</sub>) and (X<sub>4</sub> is A<sub>4</sub>) then Z = k**

Setelah langkah ini maka proses inferensi telah selesai dan untuk selanjutnya ialah langkah *defuzzyfikasi*. Langkah *defuzzyfikasi* dilakukan untuk menentukan besarnya nilai sudut yang akan dikirim ke *servo* untuk mengendalikan *valve*.

### c. Defuzzyfikasi

*Defuzzyfikasi* dilakukan dengan memetakan nilai-nilai pada Z ke dalam suatu himpunan *defuzzyfikasi* yang selanjutnya dinyatakan dengan persamaan-persamaan garis. Berbeda dengan *fuzzyfikasi*, *defuzzyfikasi* di sini akan menghasilkan luasan-luasan yang dibatasi dengan tinggi pada masing – masing nilai Z dan garis yang dihasilkan dari pemetaan ke *rule base*.



$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{25} \mu_{zi}}{\sum_{i=1}^{25} \mu_i} \dots\dots\dots (16)$$

dimana :

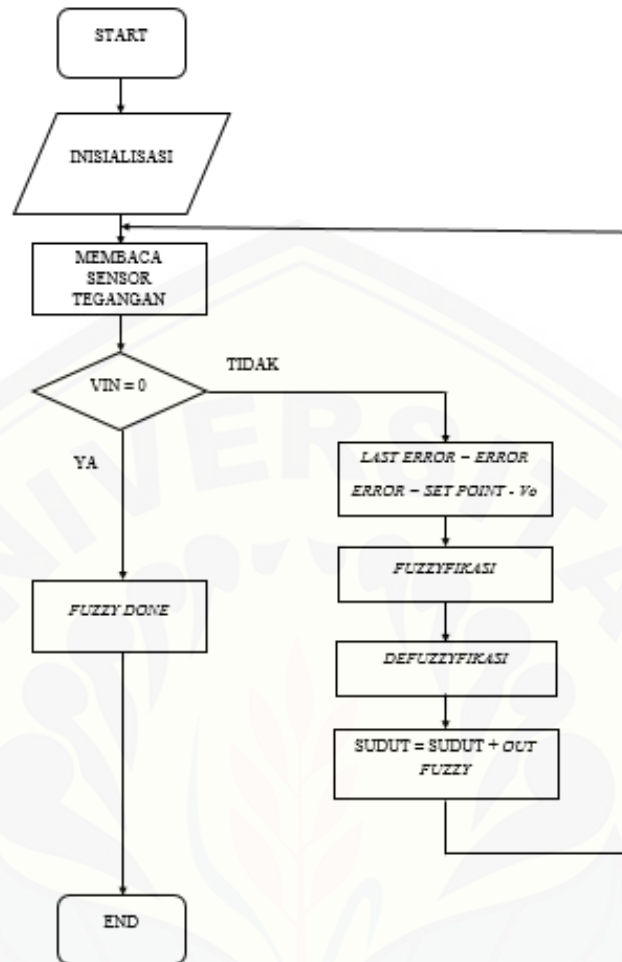
$Z$  = *output* perhitungan *fuzzy*

$Z_i$  =  $Z$  masing-masing pada 25 *rule*

$\mu$  ke- $i$  = derajat keanggotaan hasil proses dengan mencari nilai minimum masing-masing 25 *rule*

$i$  = jumlah *rule* pada *rule base* yang berjumlah 25 aturan

Pada perancangan *fuzzy* sendiri dibutuhkan sebuah tegangan *input* dan juga sebuah *feedback* dari pembacaan sensor tegangan. Untuk *input fuzzy* yaitu berupa tegangan *output* yang berasal dari generator saat ini dan juga tegangan *output* generator yang lalu. Setelah mengetahui *input fuzzy* maka akan diperoleh hasil dari proses *fuzzy* yang berupa nilai derajat sudut yang dihasilkan oleh *servo*. Nilai derajat sudut yang dihasilkan oleh *servo* ini akan digunakan untuk membuka dan menutup *valve* untuk mendapatkan hasil tegangan *output* yang diinginkan. Apabila nilai tegangan generator semakin kecil maka sudut *servo* yang diberikan oleh *fuzzy* semakin besar sehingga akan memutar *valve* semakin lebar untuk mengalirkan udara, sedangkan apabila nilai tegangan generator semakin besar maka sudut *servo* yang diberikan oleh *fuzzy* semakin kecil sehingga akan memutar *valve* semakin menyempit dan udara yang terkompresi dapat dihemat. Maka dari itu, nilai tegangan *output* dari generator akan menjadi konstan.



Gambar 3.14 Flowchart fuzzy

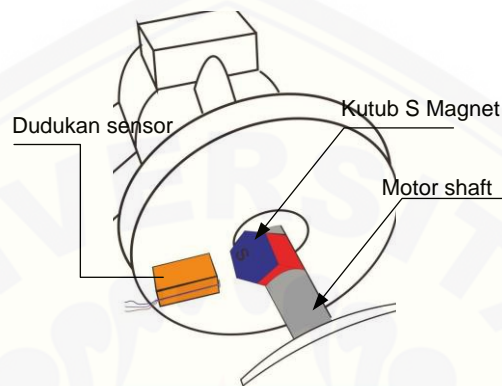
### 3.6 Pengujian dan Pengambilan Data

Dalam penelitian ini, terdapat tiga buah variabel yang digunakan sebagai acuan penelitian. Variabel tersebut adalah variabel bebas, variabel terikat dan variabel kontrol. Tekanan udara yang terkompresi pada tabung udara untuk memutar motor merupakan variabel bebasnya. Tegangan yang digunakan sebagai *set point* merupakan variabel terikatnya dan sudut *servo* untuk memutar *valve* merupakan variabel kontrolnya.

#### 3.6.1 Pengujian *Magnetic Sensor* (Sensor Kecepatan)

Pada pengujian sensor kecepatan sensor akan diletakkan Gambar 3.15. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa sensor diletakkan pada *couple* antara

turbin (*air motor*) dengan generator. Magnet kutub S yang terpasang pada sistem berfungsi untuk membantu pembacaan sensor. Sensor akan membaca ketika *hall sensor* melewati magnet kutub S yang berputar akibat tekanan udara yang masuk pada turbin (*air motor*).



Gambar 3.15 Penempatan sensor kecepatan

Pengujian *magnetic sensor* dilakukan guna mengetahui performa dari sensor. Yang dimaksud performa di sini adalah kemampuan sensor untuk mendapatkan nilai yang benar-benar sesuai dengan kecepatan aslinya, sehingga perlu dilakukannya kalibrasi. Proses kalibrasi dilakukan dengan menggunakan *tachometer*. Proses kalibrasi diharapkan mendapatkan maksimal nilai *error* persen pada hasil pembacaan sebesar 10%. Perumusan dalam mencari *error* persen dapat dilihat seperti pada dibawah ini.

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (17)$$

dimana :

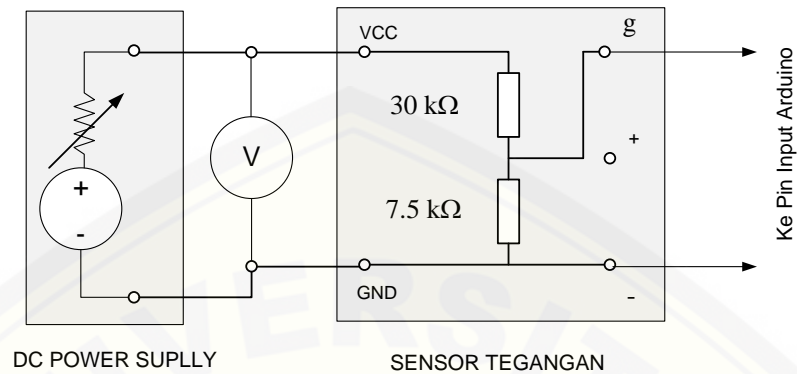
HT = Hasil teori (pengukuran *tachometer*)

HP = Hasil pembacaan (pembacaan pada sensor)

### 3.6.2 Pengujian Sensor Tegangan

Dalam pengujian sensor tegangan ini digunakan DC *power supply* Protek DF1730SB5A sebagai sumber tegangan pada sisi input dari sensor tegangan. Sebuah *digital multimeter* Sanwa CD771 untuk melakukan pengukuran tegangan

dan nantinya dibandingkan dengan pembacaan *display* tegangan yang ada pada DC *power supply*.



Gambar 3.16 Rangkaian pengujian sensor tegangan

Pengujian sensor tegangan dilakukan juga untuk mengetahui performa dari sensor. Pada tahap ini, sensor akan dikalibrasi agar dapat memperkecil *error persen*, pembandingnya adalah menggunakan alat yang bernama AVOMeter. Keberhasilan dalam proses kalibrasi akan berdampak pada respon yang diberikan kendali kepada *valve* dikarenakan respon kendali berasal dari parameter tegangan. Proses kalibrasi diharapkan mendapatkan maksimal nilai *error persen* pada hasil pembacaan sebesar 10%. Perumusan dalam mencari *error persen* dapat dilihat seperti pada dibawah ini.

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (18)$$

dimana :

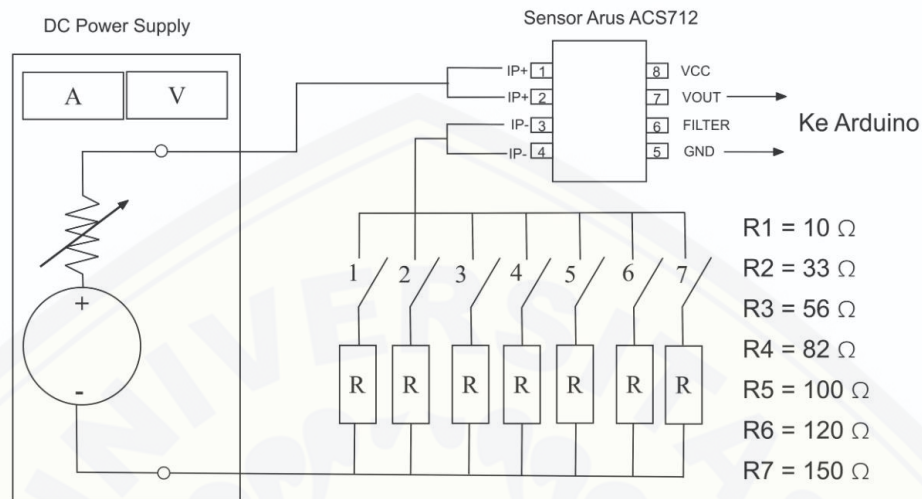
HT = Hasil teori (pengukuran AVOMeter)

HP = Hasil pembacaan (pembacaan pada sensor)

### 3.6.3 Pengujian Sensor Arus

Dalam pengujian sensor tegangan ini digunakan DC *power supply* Protek DF1730SB5A sebagai sumber tegangan untuk menyuplai pada sisi *input* dari sensor tegangan. Sebuah *digital multimeter* Sanwa CD771 untuk melakukan pengukuran arus dan nantinya dibandingkan dengan pembacaan *display* arus yang ada pada

sensor. Pembacaan arus menggunakan beban resistor yang resistansinya akan dinaikkan secara bertahap.



Gambar 3.17 Rangkaian pengujian sensor arus

Pengujian sensor arus dilakukan juga untuk mengetahui performa dari sensor. Pada tahap ini, sensor akan dikalibrasi agar dapat memperkecil *error* persen, pembandingnya adalah menggunakan alat yang bernama AVOMeter. Proses kalibrasi diharapkan mendapatkan maksimal nilai *error* persen pada hasil pembacaan sebesar 10%. Perumusan dalam mencari *error* persen dapat dilihat seperti pada dibawah ini.

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (19)$$

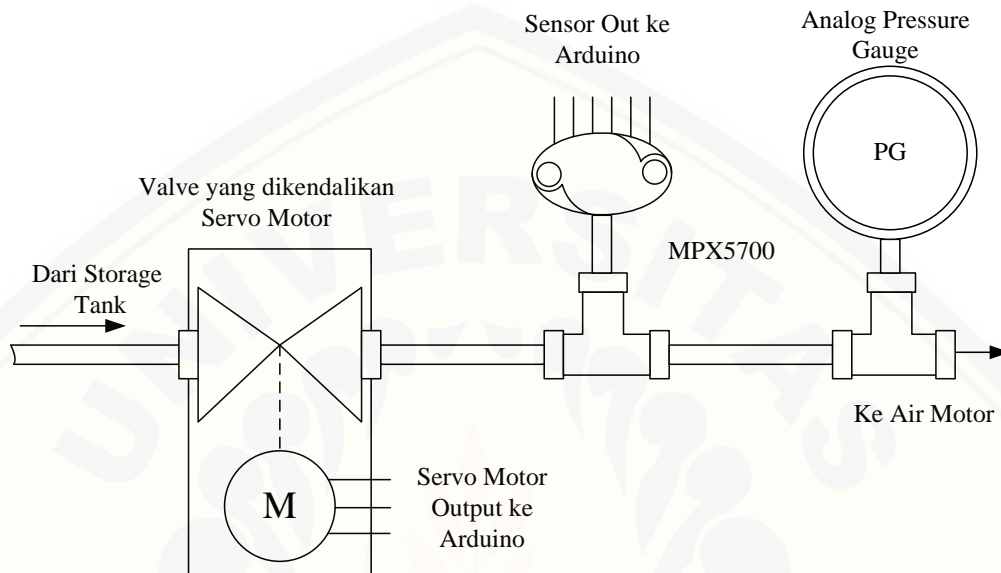
dimana :

- HT = Hasil teori (pengukuran AVOMeter)
- HP = Hasil pembacaan (pembacaan pada sensor)

### 3.6.4 Pengujian Sensor Tekanan

Pada pengujian sensor tekanan, sensor ditempatkan setelah sitem *valve* yang diatur dengan menggunakan servo motor. Hal ini dimaksudkan agar tekanan yang terukur ialah tekanan udara yang akan masuk *inlet* dari *air motor*, bukan lagi

tekanan *output* dari relief yang masih harus melewati selang udara. Sensor juga diletakkan sebelum alat ukur konvensional *pressure gauge* yang tujuannya agar lebih mempermudah dalam proses kalibrasi. Penempatan dari sensor dapat dilihat pada gambar 3.18



Gambar 3.18 Rangkaian MPX5700 ke sistem

Pengujian sensor tekanan dilakukan untuk mengetahui performa dari sensor. Pada tahap ini, sensor akan dikalibrasi agar dapat memperkecil *error persen*, pembandingnya adalah menggunakan alat yang bernama *pressure meter*. Proses kalibrasi diharapkan mendapatkan maksimal nilai *error persen* pada hasil pembacaan sebesar 10%. Perumusan dalam mencari *error persen* dapat dilihat seperti pada dibawah ini.

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% \dots\dots\dots (20)$$

dimana :

HT = Hasil teori (pengukuran *pressure meter*)

HP = Hasil pembacaan (pembacaan pada sensor)

### 3.6.5 Pengujian Tanpa Beban

Pengujian tanpa beban dimaksudkan untuk melihat apakah secara keseluruhan sistem telah bekerja dengan baik. Artinya sistem tersebut dapat menghasilkan tegangan konstan. Sistem diuji beberapa kali yaitu dengan nilai *set point* yaitu sebesar 12 V, 18 V, dan 24 V. Sistem ini akan diuji secara random untuk mendapatkan waktu *steady state*. Data-data yang akan diperoleh nantinya adalah berupa tegangan (V), kecepatan (rpm), tekanan (bar), waktu (s).

### 3.6.6 Pengujian Hubungan antara Kecepatan *Air Motor* (rpm) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi Tanpa Beban

Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan putar pada *air motor* dengan tegangan keluaran pada *generator* dalam kondisi tanpa beban. Hubungan antara kecepatan putar pada *air motor* (rpm) dengan tegangan generator (V) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.5. Pengujian tanpa beban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.7 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi Tanpa Beban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari tekanan yang masuk pada *air motor* dengan tegangan keluaran pada *generator* dalam kondisi tanpa beban. Hubungan antara tekanan yang masuk pada *air motor* (bar) dengan tegangan generator (V) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.5. Pengujian tanpa beban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.8 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Kecepatan *Air Motor* (Rpm) Kondisi Tanpa Beban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari tekanan yang masuk pada *air motor* dengan kecepatan putar pada *air motor* dalam kondisi tanpa beban. Hubungan antara tekanan yang masuk pada *air motor* (bar) dengan kecepatan putar *air motor* (rpm) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada

bagian 3.6.5. Pengujian tanpa beban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.9 Pengujian Hubungan Antara Perpindahan *Set Point* dengan Waktu yang Dibutuhkan untuk Mencapai *Set Point*

Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk mengetahui seberapa cepat waktu yang dibutuhkan oleh sistem dalam merespons perpindahan antar *set point* yang ditentukan. Pengujian hubungan antara perpindahan *set point* dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *set point* 12 V, 18 V, dan 24 V akan dituangkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk nantinya mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.10 Pengujian Berbeban

Pengujian berbeban dimaksudkan untuk melihat apakah secara keseluruhan sistem telah bekerja dengan baik ketika sistem telah ditambah dengan beban. Artinya sistem tersebut dapat menghasilkan tegangan konstan. Sistem diuji beberapa kali yaitu dengan nilai *set point* yaitu 24 V dan dengan variasi beban yang berbeda. Pada pengujian ini variasi beban yang adalah resistor keramik dengan besaran 5 watt 68  $\Omega$ , 100  $\Omega$ , 120  $\Omega$ , 150  $\Omega$ , 270  $\Omega$ , dan 330  $\Omega$  dirangkai secara paralel dengan sertiap bohlam dan resistor nya terdapat saklar yang nanti digunakan untuk *switching* sebagai variabel pembeda. Tujuan pengujian ini adalah untuk mengetahui karakteristik pada saat generator bekerja maksimal pada *set point* 24 V. Kemudian pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan beban 3 LED dengan besaran masing-masing LED sebesar 1,2 watt dengan *set point* pengujian 12 V. Data-data yang akan diperoleh nantinya adalah berupa tegangan (V), arus (A), kecepatan (rpm), tekanan (bar), daya (watt), waktu (s). Proses mencari daya dapat dicari dengan menggunakan rumus:

$$P = V \times I \quad \dots\dots\dots (21)$$

Dimana:

P = Daya (Watt)

I = Arus (A)

V = Tegangan (V)



Dengan melihat rumus daya apabila  $P$  tetap dan beban berubah maka otomatis merubah arus. Pada saat arus berubah tentunya nilai tegangan akan berubah karena menyesuaikan tegangan pada sistem. Dengan demikian, untuk mempertahankan nilai konstan, maka tegangan harus dinaikkan dengan cara merubah posisi *servo* dengan membuka atau menutup katup udara pada *valve*.

#### 3.6.11 Pengujian Hubungan antara Kecepatan *Air Motor* (rpm) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan putar pada *air motor* dengan tegangan keluaran pada generator dalam kondisi berbeban. Hubungan antara kecepatan putar pada *air motor* (rpm) dengan tegangan generator (V) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian Berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.12 Pengujian Hubungan antara Tegangan Generator (V) dengan Arus pada Beban (I) Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari tegangan keluaran pada generator dengan arus pada beban dalam kondisi berbeban. Hubungan antara ktegangan keluaran pada generator (V) dengan arus pada beban (I) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.13 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Tegangan Generator (V) Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari tegangan keluaran pada *generator* dengan tekanan dalam kondisi berbeban. Hubungan antara tekanan (bar) dengan tegangan keluaran pada generator (V) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.14 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Arus Pada Beban (I) Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari arus pada beban dengan tekanan dalam kondisi berbeban. Hubungan antara tekanan (bar) dengan arus pada beban (I) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.15 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Daya Keluaran (watt) Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari daya keluaran dengan tekanan dalam kondisi berbeban. Hubungan antara tekanan (bar) dengan daya keluaran (Watt) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.16 Pengujian Hubungan antara Tekanan (bar) dengan Kecepatan Putar *Air Motor* (rpm) dengan Kondisi Berbeban

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari kecepatan putar pada *air motor* dengan tekanan dalam kondisi berbeban. Hubungan antara tekanan (bar) dengan kecepatan putar pada *air motor* (rpm) dicari berdasarkan data yang telah diperoleh pada bagian 3.6.10. Pengujian berbeban untuk kemudian dituangkan dalam bentuk grafik sehingga mempermudah dalam hal analisa.

#### 3.6.17 Pengujian untuk Kestabilan Generator dengan Model Perpindahan antar Beban

Tujuan dilakukannya pengujian ini untuk mengetahui kestabilan generator dengan perpindahan beban yang diberikan. Kestabilan yang dimaksud dalam pengujian ini ialah seberapa stabil generator dalam mensuplai beban yang diberikan dengan cara memindahkan beban secara bertahap. Pengujian untuk kestabilan generator dengan model perpindahan antar beban akan dituangkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk nantinya mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.18 Pengujian dengan Model Pelepasan dan Pemasangan Beban

Tujuan dilakukannya pengujian ini untuk mengetahui kestabilan generator dengan pelepasan dan pemasangan beban  $56 \Omega$  yang diberikan. Kestabilan yang dimaksud dalam pengujian ini adalah seberapa stabil generator ketika beban dilepas kemudian beban dipasang kembali. Pengujian untuk kestabilan generator dengan model pelepasan dan pemasangan beban akan dituangkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk nantinya mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.18 Pengujian dengan Beban LED

Tujuan dilakukannya pengujian ini untuk mengetahui kestabilan generator dengan beban LED yang diberikan. Kestabilan yang dimaksud dalam pengujian ini adalah seberapa stabil generator ketika diberikan beban LED. Pengujian untuk kestabilan generator dengan beban LED akan dituangkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk nantinya mempermudah dalam hal analisa.

### 3.6.11 Pengujian Efisiensi Kendali dan Konversi Energi

Untuk dapat mengetahui seberapa efisien konversi energi yang didapatkan dari hasil proses pengendalian ini, maka pengujian konversi energi akan dilakukan. Pengujian ini akan dilakukan dengan menghitung efisiensi dari turbin dalam hal ini adalah *air motor*. Pertama efisiensi untuk *air motor* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 22.

$$\eta_{pm} = \frac{M_o(p_t) \frac{\pi}{30} \left( N_r - \frac{N_r^2}{N_o(p_t)} \right)}{\frac{\gamma}{\gamma-1} p_a \dot{V}_a \left[ \left( \frac{p_t}{p_a} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \dots\dots\dots 22$$

dimana :

- $\eta_{pm}$  = Efisiensi turbin (air motor)
- $M_o$  = Momen gaya *air motor* pada karakteristik (13,6 kg/cm<sup>2</sup>)
- $p_t$  = Tekanan karakteristik (0,68 Mpa)
- $p_a$  = Tekanan terukur (Mpa)

$V_a$	= <i>Air Flow</i> (Mpa/min)
$N_r$	= Kecepatan karakteristik (5250 Rpm)
$N_0$	= Kecepatan terukur (Rpm)
$\gamma$	= Tetapan gas (1,67)

Dari data yang didapat pada persamaan 22 maka efisiensi dari turbin akan dihasilkan. Dari persamaan tersebut dapat digunakan untuk melihat karakteristik dari sistem yang dibangun.



## BAB 5. PENUTUP

Dari hasil-hasil pengujian dan pembahasannya yang telah dilakukan dalam Bab 4 dapat diambil beberapa kesimpulan dan saran-saran yang dapat digunakan sebagai dasar untuk penelitian selanjutnya.

### 5.1. Kesimpulan

Hasil penelitian untuk membuat *prototype* sistem kendali *valve* pada aplikasi sistem penyimpan udara terkompresi ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. *Prototype* sistem SS-CAES ini sudah diuji kerjanya dan dapat berkerja dengan baik, yaitu untuk melakukan konversi balik dari udara yang terkompresi dalam kompressor menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk mencatu beban listrik. Hal ini ditunjukkan dengan pengujian-pengujian yang dilakukan, baik dengan menggunakan beban maupun tanpa beban.
2. Kerja sistem kendali sudah berhasil dibuat dan bekerja dengan baik. Hasil pengujian sensor tegangan, arus, kecepatan dan tekanan menghasilkan *error* kurang dari 10% yang berarti cukup memadai untuk digunakan mendukung sistem kendali.
3. Sistem kendali dengan algoritma *fuzzy* sudah berhasil diterapkan dan menghasilkan respon kendali yang cukup baik pada setiap kali pengujian, baik pengujian tanpa beban maupun pengujian berbeban. *Over shoot* dan *over damped* yang dihasilkan kendali kurang dari 10 V dengan *error steady state* kurang dari 3 %.
4. Efisiensi yang dihasilkan oleh turbin antara 25,57 % – 47,19 % sesuai dengan kebutuhan beban. Hasil ini lebih baik apabila dibandingkan dengan penelitian oleh Vorappath Kokew pada tahun 2013 yang memiliki efisiensi turbin maksimal 20 %.

### 5.2. Saran

Hal-hal yang dapat disarankan untuk kegiatan penelitian berikutnya yang berhubungan dengan kendali SS-CAES ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu penambahan parameter tekanan pada kendali *fuzzy* yang telah dibangun.
2. Perlu dicoba algoritma optimasi untuk dibandingkan dengan hasil yang telah dicapai dalam penelitian ini.



## DAFTAR PUSTAKA

- Akinyele DO, Rayudu RK. *Review of energy storage technologies for sustainable power networks*. *Sustain Energy Technol Assessments* 2014;8:74–91. doi:10.1016/j.seta.2014.07.004.
- Alias Khamis, Zulasyraf M Badarudin, Azhar Ahmad, Azhan Ab Rahman, and Mohd Hendra Hairi. *Overview of mini scale compressed air energy storage system*. In *Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2010 4th International*, pages 458–462. IEEE, 2010.
- Alias Khamis, Zulasyraf M. 2010. *Compressed Air Energi Storage System (CAES)*. Univ. Teknikal Malaysia Melaka, Durian Tunggal, Malaysia.
- Arduino UNO, R3. 2015. “A000066 Arduino | Mouser.” *MOUSER ELECTRONICS*. Accessed 3 April 2018.
- C, Haisheng, Z. Xinjing, L. Jinchao dan T, Chunqing. 2013. *Compressed air energy storage*. <http://dx.doi.org/10.5772/52221>
- Datasheet, Catalog. 2015. “A3144 Datasheet Pdf - Sensitive Hall-Effect Switches, High-Temperature - Allegro MicroSystems.” *DatasheetCatalog.com*. Accessed August 18. [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/A/3/1/4/A3144.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/A/3/1/4/A3144.shtml).
- Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan . 2016 . *Statistik Ketenagalistrikan 2015* . Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, No – 29 2016  
(<http://psbtik.smkn1cms.net/bse/smk/smk10%20TeknikPemanfaatanListrik%20Pr ihSumarjati.pdf>), diakses 6 April 2018.
- Freescale. 2015. “MPX5700 Datasheet(PDF) - Freescale Semiconductor, Inc.” *MPX5700 Datasheet*. Accessed August 18. <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/188326/FREESCALE/MPX5700.html>
- <http://surplustek.ca/dct-rsa-capteur-de-voltage-standard-pour-robot-arduino.html>. (diakses pada tanggal 1 Agustus 2018, pkl 20:06 )
- <https://www.academia.edu/5367973/KOMPRESOR> (diakses pada tanggal 1 Agustus 2018, pkl 20:06 )
- Lemofouet, S., and A. Rufer. *Hybrid Energy Storage System Based on Compressed Air and Supercapacitors With Maximum Efficiency Point Tracking*. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. Dresden, Germany. September 11-14,2005, p. 10. DOI: 10.1109/EPE.2005.219203

- Muhamad, AK. 2016. <http://eprints.polsri.ac.id/3329/3/FILE%20III.pdf>. (Online), di akses pada 6 April 2018.
- Needle, M.1991. *Teknologi Instalasi Listrik*. Bandung: Penerbit ITB
- Nurhadi, Arif. & Sukmadi, Tedjo. 2012. *Perancangan Generator Putaran Rendah Magnet Permanen Jenis Fe Fluks Aksial*. Diss Diponegoro University.Pdf, (Online), ([eprints.-undip.ac.id/32530/](http://eprints.-undip.ac.id/32530/)), diakses 6 April 2018.
- Pemerintah Republik Indonesia . 2014 . *Kebijakan Energi Nasional* . Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, No – 79 2014
- Ramani, K.V. 1992 . *Rural electnEcation and rural development*. Rural electrification guide book for Asia & Pacific, Bangkok.
- Rijono, Yon. 2002. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Robert B. Schainker, (2007). *Executive Overview: Energy Storage Options for a Sustainable Energy Future*, IEEE. SurplusTek. 2015. “Capteur de Voltage Standard Pour Robot Arduino.” *Surplustek Centre De Liquidation*. Accessed August 18.
- Sumardjati. Sofyan, Prih. & Mahsyar, Ali. 2008. *Teknik Pemanfaatan Tenaga Listrik*. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan. Pdf, (Online)
- Supeno, B; Setiawan, A; Widjonarko. Maret 2017 . *Prototype Small-Scale Compressed Air Energy Storage Dengan Pengoperasian Pada Titik Efisiensi Maksimum* . <http://repository.unej.ac.id/handle/123456789/79640>
- Vorrapath Kokaew, Mohamed Moshrefi-Torbati, and Suleiman M Sharkh. Februari 2013. *Maximum Efficiency or Power Tracking of Stand-Alone*. Energy Procedia, MGEF 13.
- Vorrapath Kokaew, Mohamed Moshrefi-Torbati, and Suleiman M Sharkh. Februari 2016. *Maximum Efficiency or Power Tracking of Stand-Alone Small Scale Compressed Air Energy Storage System*. IEEE transactions on industrial electronics, Vol. 63, No. 2.
- Widjonarko . Maret 2017 . *Sistem Kendali DC Converter untuk Aplikasi Sistem ( CAES)* . <http://repository.unej.ac.id/handle/123456789/79685>



**Lampiran A. Data Observasi SS-CAES tanpa kendali pengaturan katup udara sebagai acuan dalam menentukan *rules fuzzy* serta untuk mencari hubungan antar komponen sistem**

Data Observasi Tanpa Beban

Tegangan Praktik (V)	Tekanan Praktik (Bar)	Kecepatan Praktik (Rpm)	Tegangan Teori (V)	Tekanan Teori (Bar)	Kecepatan Teori (Rpm)
65,2	3.5	5450	62,67	3,63	5250
54,9	3	4678	53,8	3,11	4500
44,2	2.5	3803	43,74	2,53	3750
37,8	2	3125	35,94	2,08	3000
27,3	1.5	2347	26,99	1,56	2250
19,4	1	1678	19,3	1,11	1500
14,8	0.5	1250	14,38	0,83	750

Data Observasi Berbeban

Beban (Ohm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)
122	43.26	0.44	19.0344	6323	3.01
122	42.67	0.46	19.6282	6412	2.91
122	41.57	0.54	22.4478	6333	2.81
122	42.11	0.43	18.1073	6164	2.73
122	41.06	0.41	16.8346	6164	2.64
122	41.09	0.4	16.436	6085	2.56
122	40.23	0.56	22.5288	6011	2.44
122	40.17	0.47	18.8799	5938	2.3
122	39.59	0.6	23.754	5938	2.22
122	39.67	0.46	18.2482	5725	2.1
122	39.98	0.37	14.7926	5659	2.01
122	39.85	0.38	15.143	5593	1.9
122	40.34	0.39	15.7326	5352	1.81
122	39.74	0.38	15.1012	4768	1.72
122	38.93	0.39	15.1827	5177	1.6
122	38.16	0.39	14.8824	4965	1.5
122	37.76	0.37	13.9712	4867	1.42
122	36.44	0.39	14.2116	4672	1.3
122	35.74	0.35	12.509	4463	1.22
122	34.72	0.37	12.8464	4226	1.11
122	33.06	0.35	11.571	3983	1.01

122	31.38	0.36	11.2968	3765	0.9
122	29.17	0.34	9.9178	3444	0.81
122	25.77	0.27	6.9579	2994	0.7
122	23.01	0.25	5.7525	2605	0.61
122	17.8	0.22	3.916	2049	0.5
122	13.27	0.18	2.3886	1524	0.4
122	7.4	0.13	0.962	840	0.3
122	1.74	0.1	0.174	151	0.2

Beban (Ohm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)
430	57.63	0.18	10.3734	6333	3.03
430	57.15	0.17	9.7155	6323	2.89
430	58.44	0.18	10.5192	6412	2.83
430	57.86	0.17	9.8362	6402	2.72
430	57.3	0.17	9.741	6333	2.63
430	56.97	0.17	9.6849	6243	2.54
430	56.51	0.17	9.6067	6243	2.45
430	55.67	0.17	9.4639	6164	2.34
430	54.58	0.17	9.2786	6017	2.2
430	54.21	0.16	8.6736	6164	2.12
430	52.99	0.15	7.9485	5865	2
430	52.28	0.16	8.3648	5799	1.92
430	51.12	0.15	7.668	5659	1.81
430	50.32	0.15	7.548	5473	1.7
430	48.9	0.15	7.335	5352	1.59
430	47.95	0.15	7.1925	5177	1.5
430	46.47	0.15	6.9705	5016	1.4
430	45.05	0.14	6.307	4819	1.3
430	43.65	0.14	6.111	4720	1.21
430	42.13	0.13	5.4769	4546	1.12
430	40.09	0.13	5.2117	4304	1.02
430	37.47	0.12	4.4964	4016	0.91
430	34.07	0.11	3.7477	3680	0.8
430	30.9	0.11	3.399	3323	0.7
430	26.55	0.1	2.655	2851	0.6
430	20.96	0.09	1.8864	2239	0.5
430	15.2	0.07	1.064	1628	0.4
430	8.98	0.07	0.6286	955	0.3
430	2.19	0.04	0.0876	257	0.21

Beban (Ohm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)
600	59.95	0.1	5.995	6770	2.97
600	59.8	0.1	5.98	6650	2.9
600	59.63	0.1	5.963	6621	2.88
600	58.93	0.1	5.893	6591	2.71
600	58.35	0.1	5.835	6422	2.64
600	57.23	0.1	5.723	6412	2.5
600	56.76	0.09	5.1084	6323	2.43
600	56.63	0.09	5.0967	6243	2.32
600	55.58	0.09	5.0022	6170	2.2
600	55.42	0.09	4.9878	6097	2.14
600	54.33	0.09	4.8897	6017	1.98
600	54.13	0.08	4.3304	5938	1.93
600	53	0.08	4.24	5792	1.8
600	52.12	0.08	4.1696	5733	1.71
600	51.12	0.08	4.0896	5533	1.59
600	49.7	0.08	3.976	5467	1.49
600	48.51	0.08	3.8808	5297	1.39
600	47.38	0.08	3.7904	5177	1.3
600	45.32	0.07	3.1724	4999	1.2
600	43.54	0.07	3.0478	4768	1.1
600	41.56	0.07	2.9092	4544	0.99
600	39.34	0.06	2.3604	4226	0.9
600	36.87	0.06	2.2122	3984	0.81
600	32.91	0.05	1.6455	3570	0.69
600	28.79	0.04	1.1516	3090	0.6
600	23.1	0.04	0.924	2497	0.5
600	17.07	0.02	0.3414	1856	0.4
600	10.06	0.02	0.2012	1087	0.3
600	3.82	0.01	0.0382	429	0.24

Beban (Ohm)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)
1000	60.3	0.07	4.221	6502	2.98
1000	60.05	0.07	4.203	6422	2.94
1000	59.43	0.07	4.1601	6323	2.86
1000	59.33	0.07	4.1531	6323	2.77
1000	58.61	0.07	4.1027	6243	2.62

1000	58.01	0.06	3.4806	6249	2.5
1000	57.67	0.06	3.4602	6097	2.43
1000	57.21	0.06	3.4326	6011	2.3
1000	56.01	0.06	3.3606	6011	2.19
1000	55.6	0.06	3.336	5865	2.1
1000	54.89	0.06	3.293	5122	2.04
1000	53.81	0.06	3.2286	5733	1.9
1000	53.34	0.06	3.2004	5659	1.83
1000	51.9	0.06	3.114	5473	1.71
1000	51.1	0.06	3.066	5347	1.61
1000	49.8	0.06	2.988	5232	1.5
1000	48.41	0.05	2.4205	5071	1.38
1000	46.79	0.05	2.3395	4867	1.29
1000	45.04	0.05	2.252	4720	1.2
1000	42.93	0.05	2.1465	4544	1.1
1000	40.8	0.05	2.04	4304	1
1000	38.3	0.04	1.532	3983	0.89
1000	35.26	0.04	1.4104	3738	0.81
1000	31.47	0.04	1.2588	3300	0.7
1000	27.29	0.03	0.8187	2869	0.6
1000	21.48	0.04	0.8592	2262	0.5
1000	15.6	0.03	0.468	1622	0.4
1000	9.05	0.01	0.0905	946	0.3
1000	2.21	0.01	0.0221	238	0.21

Lampiran B. Data pengujian SS-CAES tanpa beban model perpindahan set point

Waktu Pengujian ke-(second)	Set Point (V)	Vout (V)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)	Error Set Point (V)
4	24	30.18	3277	0.86	6.18
6	24	30.86	3395	0.88	6.86
7	24	30.51	3300	0.85	6.51
8	24	29.79	3255	0.83	5.79
8.5	24	28.78	3212	0.8	4.78
10.5	24	28.09	3110	0.74	4.09
11	24	26.96	3015	0.72	2.96
13.5	24	25.92	2834	0.67	1.92
14	24	24.55	2706	0.63	0.55
14.5	24	23.85	2706	0.63	0.15
15	24	24.19	2676	0.63	0.19
19.5	24	24.52	2706	0.65	0.52
20.5	24	24.73	2752	0.65	0.73
21	24	24.6	2736	0.65	0.6
21.5	24	24.6	2736	0.65	0.6
22	24	24.61	2752	0.65	0.61
36.5	24	24.55	2706	0.63	0.55
712	24	24.28	2736	0.61	0.28
712.5	24	24.28	2736	0.61	0.28
713	24	24.59	2768	0.61	0.59
713.5	24	24.35	2769	0.6	0.35
714	24	24.58	2707	0.6	0.58
714.5	24	24.58	2707	0.6	0.58
715	24	24.36	2721	0.6	0.36
715.5	24	24.22	2706	0.61	0.22
716	24	24.48	2721	0.62	0.48
716.5	24	24.2	2753	0.62	0.2
717	24	24.2	2753	0.62	0.2
725.5	18	23.36	2578	0.57	5.36
726	18	23.2	2577	0.54	5.2
726.5	18	20.67	2272	0.5	2.67
728	18	20.24	2208	0.48	2.24
728.5	18	18.31	2039	0.44	0.31
729	18	18.1	2015	0.45	0.1
729.5	18	17.7	2015	0.45	0.3
730	18	18.58	2049	0.47	0.58
733	18	18.64	2084	0.45	0.64
733.5	18	18.64	2084	0.45	0.64
734	18	18.45	2066	0.45	0.45
740	18	18.41	2057	0.45	0.41
740.5	18	18.56	2084	0.45	0.56
755	18	18.2	2057	0.45	0.2

755.5	18	18.53	2057	0.45	0.53
756	18	18.42	2058	0.45	0.42
756.5	18	18.42	2058	0.45	0.42
757	18	18.31	2039	0.45	0.31
757.5	18	18.13	2039	0.45	0.13
758	18	18.18	2014	0.45	0.18
758.5	18	18.18	2014	0.45	0.18
759	18	18.12	2006	0.44	0.12
1424.5	18	18.27	2075	0.45	0.27
1425	18	18.27	2075	0.45	0.27
1425.5	18	18.04	2039	0.45	0.04
1426	18	18.06	2031	0.45	0.06
1426.5	18	18.07	2023	0.45	0.07
1427	18	18.07	2023	0.45	0.07
1427.5	18	17.94	2014	0.45	0.06
1428	18	18.06	7733	0.44	0.06
1428.5	18	18.05	2023	0.44	0.05
1429	18	18.05	2023	0.44	0.05
1429.5	18	18.2	2022	0.44	0.2
1430	18	18.19	2030	0.45	0.19
1430.5	18	18.29	2031	0.45	0.29
1431	18	18.26	2031	0.45	0.26
1431.5	18	18.26	2031	0.45	0.26
1432	18	18.54	2031	0.45	0.54
1432.5	18	18.29	2057	0.45	0.29
1433	12	18.42	2075	0.45	6.42
1434	12	18.59	2084	0.46	6.59
1435	12	18.69	2112	0.46	6.69
1435.5	12	18.68	2102	0.46	6.68
1436	12	18.74	2112	0.45	6.74
1437	12	18.17	2039	0.44	6.17
1437.5	12	17.98	1971	0.44	5.98
1438	12	17.53	8756	0.44	5.53
1438.5	12	17.53	8756	0.44	5.53
1439	12	17.28	1878	0.41	5.28
1439.5	12	17.28	1878	0.41	5.28
1440	12	16.49	1858	0.4	4.49
1440.5	12	16.01	1754	0.37	4.01
1441	12	14.16	1553	0.36	2.16
1441.5	12	14.17	1505	0.36	2.17
1442	12	12.26	1321	0.33	0.26
1442.5	12	12.43	1343	0.34	0.43
1443	12	12.33	1368	0.34	0.33
1443.5	12	12.33	1368	0.34	0.33
1444	12	12.4	1361	0.34	0.4
1445	12	12.39	1384	0.34	0.39

1445.5	12	12.39	1384	0.34	0.39
1457	12	11.6	1345	0.35	0.4
1459	12	14.25	1488	0.38	2.25
1459.5	12	14.32	1596	0.37	2.32
1460	12	14.32	1596	0.37	2.32
1460.5	12	13.97	1568	0.36	1.97
1461	12	13.53	1524	0.36	1.53
1461.5	12	13.06	1477	0.37	1.06
1462	12	13.06	1477	0.37	1.06
1462.5	12	13.35	1481	0.35	1.35
1463	12	12.55	1398	0.34	0.55
1463.5	12	12.61	1388	0.33	0.61
1464	12	12.61	1388	0.33	0.61
1464.5	12	11.86	1284	0.35	0.14
1465	12	12.49	1361	0.34	0.49
1465.5	12	12.48	1368	0.34	0.48
1466	12	12.63	1380	0.34	0.63
1466.5	12	12.63	1380	0.34	0.63
1467	12	12.56	1380	0.35	0.56
1467.5	12	12.51	1388	0.34	0.51
1470	12	12.49	1380	0.34	0.49
1470.5	12	12.49	1380	0.34	0.49
1471	12	12.38	1376	0.35	0.38
1471.5	12	12.34	1362	0.34	0.34
1473	12	12.33	1365	0.34	0.33
2095	12	12.3	1361	0.34	0.3
2095.5	12	12.49	1369	0.35	0.49
2096	12	12.49	1369	0.35	0.49
2096.5	12	12.28	1368	0.34	0.28
2097	12	12.46	1362	0.34	0.46
2097.5	12	12.31	1368	0.34	0.31
2098	12	12.31	1368	0.34	0.31
2098.5	12	12.16	1350	0.34	0.16
2099	12	12.26	1354	0.34	0.26
2099.5	12	12.14	1335	0.35	0.14
2100	12	12.28	1343	0.34	0.28
2100.5	12	12.28	1343	0.34	0.28
2101	12	12.08	1335	0.34	0.08
2101.5	12	12.13	1346	0.34	0.13
2102	12	12.01	1335	0.34	0.01
2102.5	12	12.01	1335	0.34	0.01
2103	12	12.08	1327	0.33	0.08
2103.5	12	11.92	1331	0.34	0.08
2104	12	11.98	1335	0.34	0.02
2104.5	12	11.98	1335	0.34	0.02
2105	12	11.98	1323	0.34	0.02

2105.5	12	11.83	1331	0.34	0.17
2106	12	12.13	1343	0.34	0.13
2106.5	12	12.13	1343	0.34	0.13
2107	12	11.97	1331	0.34	0.03
2107.5	24	11.91	1319	0.34	12.09
2108	24	12.76	1342	0.35	11.24
2108.5	24	13.44	1477	0.36	10.56
2109	24	13.59	1501	0.36	10.41
2109.5	24	15.14	1548	0.4	8.86
2110	24	15.79	1704	0.4	8.21
2110.5	24	16.73	1821	0.42	7.27
2111	24	17.1	1863	0.42	6.9
2111.5	24	17.95	1979	0.45	6.05
2112	24	18.67	2022	0.45	5.33
2112.5	24	19.79	2139	0.48	4.21
2113	24	19.77	2159	0.48	4.23
2113.5	24	19.77	2159	0.48	4.23
2114	24	20.25	2168	0.49	3.75
2114.5	24	20.96	2261	0.5	3.04
2115	24	21.83	2385	0.52	2.17
2115.5	24	22.22	2385	0.53	1.78
2116	24	23.24	2524	0.56	0.76
2116.5	24	24.12	2605	0.57	0.12
2117	24	24.12	2605	0.57	0.12
2117.5	24	23.3	2690	0.59	0.7
2118	24	24.3	2690	0.59	0.3
2118.5	24	24.15	2692	0.6	0.15
2119	24	24.14	2692	0.6	0.14
2119.5	24	24.17	2690	0.6	0.17
2120	24	24.17	2690	0.6	0.17
2120.5	24	24.33	2707	0.6	0.33
2121	24	24.23	2706	0.6	0.23
2121.5	24	24.2	2721	0.6	0.2
2122	24	24.2	2721	0.6	0.2
2122.5	24	24.21	2707	0.61	0.21
2123	24	24.29	2736	0.6	0.29
2123.5	24	24.25	2736	0.6	0.25
2124	24	24.25	2736	0.6	0.25
2124.5	24	24.28	2736	0.6	0.28
2125	24	24.55	2752	0.61	0.55
2125.5	24	24.46	2752	0.61	0.46
2126	24	24.46	2752	0.61	0.46
2179	24	24.28	2721	0.61	0.28
2180.5	24	24.46	2721	0.61	0.46
2214.5	24	24.43	2706	0.59	0.43
2215	24	24.03	2676	0.59	0.03

2215.5	24	23.96	2677	0.6	0.04
2216	24	23.96	2677	0.6	0.04
2216.5	24	24.15	2706	0.6	0.15
2217	24	24.18	2690	0.6	0.18
2218.5	24	24.26	2692	0.6	0.26
2219	24	24.1	2690	0.6	0.1
2761	24	24.03	2706	0.58	0.03
2761.5	24	24.03	2706	0.58	0.03
2762	24	24.16	2736	0.59	0.16
2762.5	24	24.49	2707	0.59	0.49
2764	24	24.48	2736	0.6	0.48
2765	24	24.37	2769	0.6	0.37
2765.5	24	24.37	2769	0.6	0.37
2766	24	24.43	2768	0.6	0.43
2768.5	24	24.46	2752	0.59	0.46
2769	24	24.06	2721	0.59	0.06
2769.5	24	24.34	2736	0.6	0.34
2770	24	24.34	2736	0.6	0.34
2770.5	24	24.48	2753	0.6	0.48
2771	24	24.64	2768	0.6	0.64
2771.5	24	24.76	2784	0.6	0.76
2772	24	24.76	2784	0.6	0.76
2772.5	24	24.63	2769	0.59	0.63
2773	24	24.42	2722	0.6	0.42
2773.5	24	24.47	2753	0.6	0.47
2774	24	24.47	2753	0.6	0.47
2774.5	24	24.58	2769	0.6	0.58
2779.5	24	24.92	2800	0.6	0.92
2780	12	24.94	2800	0.61	12.94
2780.5	12	25.23	2800	0.61	13.23
2781	12	21.23	2361	0.49	9.23
2783.5	12	20.52	2261	0.46	8.52
2784	12	17.43	1901	0.4	5.43
2784.5	12	16.91	1856	0.4	4.91
2785	12	16.97	1835	0.4	4.97
2785.5	12	16.81	1842	0.38	4.81
2786	12	15.04	1667	0.37	3.04
2786.5	12	13.08	1449	0.32	1.08
2787	12	12.43	1355	0.35	0.43
2796	12	12.22	1327	0.34	0.22
2796.5	12	11.08	1343	0.34	0.92
2797	12	12.08	1343	0.34	0.08
2797.5	12	12.1	1346	0.33	0.1
2798	12	12.3	1351	0.34	0.3
2798.5	12	12.24	1343	0.33	0.24
2799	12	12.2	1351	0.33	0.2

2799.5	12	12.2	1351	0.33	0.2
2800	12	12.18	1361	0.34	0.18
2800.5	12	12.24	1361	0.33	0.24
2801	12	12.27	1361	0.34	0.27
2801.5	12	12.27	1361	0.34	0.27
2802	12	12.4	1364	0.34	0.4
2802.5	12	12.39	1376	0.34	0.39
2803	12	12.28	1372	0.34	0.28
2803.5	12	12.28	1372	0.34	0.28
3314.5	12	12.1	1351	0.34	0.1
3315	12	12.41	1358	0.34	0.41
3315.5	12	12.3	1365	0.35	0.3
3319	12	12.47	1400	0.34	0.47
3320	12	12.39	1384	0.34	0.39
3321.5	12	12.42	1368	0.33	0.42
3322	12	12.36	1355	0.34	0.36
3322.5	12	12.12	1361	0.33	0.12
3323	12	12.12	1361	0.33	0.12
3323.5	12	12.27	1348	0.33	0.27
3324	12	12.12	1362	0.34	0.12
3324.5	12	12.39	1351	0.33	0.39
3325	12	12.39	1351	0.33	0.39
3325.5	12	12.12	1355	0.33	0.12
3326	12	12.13	1335	0.34	0.13
3326.5	12	11.96	1339	0.33	0.04
3327	12	12.02	1328	0.33	0.02
3327.5	12	12.02	1328	0.33	0.02
3328	12	11.9	1335	0.33	0.1
3328.5	12	12.21	1323	0.33	0.21
3329	12	11.96	1310	0.34	0.04
3329.5	12	11.96	1310	0.34	0.04
3343	12	11.8	1316	0.34	0.2
3344	18	11.71	1313	0.33	6.29
3344.5	18	11.79	1306	0.33	6.21
3345	18	11.73	1287	0.34	6.27
3345.5	18	13.61	1421	0.38	4.39
3346	18	14.71	1618	0.38	3.29
3346.5	18	14.71	1618	0.38	3.29
3347	18	14.79	1633	0.38	3.21
3347.5	18	15.01	1662	0.39	2.99
3348	18	15.98	1741	0.39	2.02
3348.5	18	16.33	1767	0.39	1.67
3349	18	16.33	1767	0.39	1.67
3349.5	18	17.63	1916	0.42	0.37
3350	18	17.8	1948	0.43	0.2
3350.5	18	17.81	1954	0.42	0.19

3351	18	18.02	1971	0.43	0.02
3351.5	18	18.26	1979	0.44	0.26
3352	18	18.26	1979	0.44	0.26
3356	18	17.16	1978	0.42	0.84
3356.5	18	18.12	1971	0.43	0.12
3357	18	18.17	1988	0.43	0.17
3357.5	18	18.15	1970	0.43	0.15
3358	18	17.99	1964	0.42	0.01
3358.5	18	17.99	1964	0.42	0.01
3359	18	18.16	1971	0.42	0.16
3359.5	18	18.17	1987	0.43	0.17
3360	18	17.94	1964	0.42	0.06
3360.5	18	17.94	1964	0.42	0.06
3361	18	17.88	1955	0.42	0.12
3374.5	18	17.72	1957	0.43	0.28
3375	18	17.72	1957	0.43	0.28
3375.5	18	17.87	1998	0.43	0.13
3376	18	18	2014	0.44	0
3376.5	18	18.39	2030	0.44	0.39
3377	18	18.39	2030	0.44	0.39
3377.5	18	18.36	2049	0.44	0.36
3405	18	18.04	1987	0.44	0.04
3405.5	18	18.12	2022	0.44	0.12
3406	18	18.03	2023	0.45	0.03
3942.5	18	17.88	1997	0.43	0.12
3943	18	17.88	1997	0.43	0.12
3943.5	18	17.88	1979	0.44	0.12
3944	18	17.76	1987	0.44	0.24
3944.5	18	17.93	2005	0.43	0.07
3945	18	17.93	2005	0.43	0.07
3945.5	18	17.97	1997	0.44	0.03
3946	18	17.83	2031	0.44	0.17
3946.5	18	17.95	2014	0.44	0.05
3947	18	17.95	2014	0.44	0.05
3947.5	18	17.88	2006	0.44	0.12
3948	18	18.15	2022	0.44	0.15
3948.5	18	18.1	2031	0.44	0.1
3949	18	18.1	2031	0.44	0.1
3949.5	18	18.11	2014	0.92	0.11
3950	18	17.99	2006	0.94	0.01
3950.5	18	18.04	2015	0.95	0.04
3951	18	18.04	2015	0.95	0.04
3951.5	18	17.85	2006	0.93	0.15
3952	18	18.13	1997	0.79	0.13
3952.5	18	17.87	2006	0.44	0.13
3953	18	18.14	1997	0.43	0.14

3953.5	18	18.14	1997	0.43	0.14
3954	18	18.02	2014	0.43	0.02
3954.5	18	17.99	2023	0.43	0.01
3955	18	17.84	2006	0.43	0.16
3955.5	18	17.84	2006	0.43	0.16
3956	18	17.86	2023	0.44	0.14
3956.5	18	17.84	2006	0.45	0.16
3957	18	18.48	2075	0.45	0.48
3957.5	18	18.48	2075	0.45	0.48
3958	18	18.48	2049	0.44	0.48
3958.5	18	18.35	2049	0.44	0.35
3966	18	18.28	2058	0.44	0.28
3966.5	24	18.14	1955	0.44	5.86
3967	24	19.11	2075	0.48	4.89
3967.5	24	19.11	2075	0.48	4.89
3968	24	19.97	2178	0.47	4.03
3968.5	24	20.1	2208	0.48	3.9
3969	24	20.67	2240	0.48	3.33
3969.5	24	21.37	2324	0.51	2.63
3970	24	22.11	2410	0.52	1.89
3970.5	24	22.21	2434	0.52	1.79
3971	24	22.41	2446	0.53	1.59
3971.5	24	23.32	2606	0.57	0.68
3972	24	23.57	2634	0.57	0.43
3972.5	24	23.52	2662	0.57	0.48
3973	24	24.03	2721	0.59	0.03
3973.5	24	24.22	2736	0.59	0.22
3974	24	23.22	2736	0.59	0.78
3974.5	24	24.38	2721	0.6	0.38
3977.5	24	24.34	2736	0.6	0.34
3978	24	24.34	2736	0.6	0.34
3978.5	24	24.19	2721	0.59	0.19
3979	24	24.48	2677	0.59	0.48
3979.5	24	24.4	2752	0.58	0.4
3980	24	24.4	2752	0.58	0.4
3980.5	24	24.77	2768	0.61	0.77
3981	24	24.33	2768	0.61	0.33
4026	24	24.54	2721	0.61	0.54
4026.5	24	24.54	2721	0.61	0.54
4027	24	24.53	2736	0.61	0.53
4027.5	24	24.61	2722	0.62	0.61
4028	24	24.36	2721	0.62	0.36
4028.5	24	24.36	2721	0.62	0.36
4029	24	24.42	2721	0.62	0.42
4029.5	24	24.15	2721	0.62	0.15
4030	24	24.19	2736	0.62	0.19

4030.5	24	24.19	2736	0.62	0.19
4031	24	24.37	2752	0.62	0.37
4031.5	24	24.43	2736	0.62	0.43
4033	24	24.37	2752	0.62	0.37
4033.5	24	24.2	2736	0.62	0.2
4034	24	24.29	2736	0.62	0.29
4035.5	24	24.3	2752	0.63	0.3
4036.5	24	24.32	2736	0.62	0.32
4037	24	24.32	2736	0.62	0.32
4067.5	24	24.38	2706	0.69	0.38
4453	24	23.95	2721	0.58	0.05
4453.5	24	23.95	2721	0.58	0.05
4454	24	24.03	2690	0.58	0.03
4454.5	24	23.59	2692	0.58	0.41
4455	24	23.79	2662	0.58	0.21
4455.5	24	23.79	2662	0.58	0.21
4468.5	24	24.31	2690	0.59	0.31
4469	24	23.79	2690	0.58	0.21
4469.5	24	23.79	2676	0.58	0.21
4470	24	23.79	2676	0.58	0.21
4470.5	24	23.95	2662	0.57	0.05
4471	24	23.55	2676	0.57	0.45
4471.5	24	23.61	2648	0.57	0.39
4473	24	23.65	2648	0.56	0.35

NB: Pengujian dilakukan selama 4473 s atau selama 74,55 menit dengan rata – rata *error steady state* sebesar **0,32 V**.

Keterangan warna:

- : *Steady state*
- : *Rise time*
- : *Over damped*
- : *Over shoot*
- : *Daerah respon kendali sistem*

Lampiran C. Data pengujian SS-CAES berbeban model pelepasan dan pemberian beban pada set point 24 V

Waktu Pengujian ke- (second)	Set Point (V)	Vout (V)	Arus	Daya	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)	Error Set Point (V)	317.5	24	23.97	0.28	6.7116	2994	1.09	0.03	552.5	24	24.52	0.05	1.226	2753	0.62	0.52
1	24	12.43	0.14	1.7402	1042	0.51	11.57	318	24	23.97	0.28	6.7116	2994	1.09	0.03	553	24	19.82	0.21	3.9522	2361	0.75	4.18
1.5	24	13.39	0.15	2.0085	1548	0.56	10.61	318.5	24	23.72	0.28	6.6416	2994	1.08	0.28	553.5	24	19.37	0.23	4.4551	2338	0.77	4.63
2	24	13.72	0.16	2.1952	1607	0.57	10.28	319	24	24.02	0.28	6.7256	3013	1.08	0.02	554	24	20.08	0.23	4.6184	2397	0.79	3.92
2.5	24	14.17	0.15	2.1255	1651	0.58	9.83	319.5	24	23.91	0.28	6.6948	3013	1.09	0.09	554.5	24	20.52	0.24	4.9248	2485	0.84	3.48
10	24	23.98	0.29	6.9542	2994	1.11	0.02	320	24	23.91	0.28	6.6948	3013	1.09	0.09	555	24	21.08	0.24	5.0592	2524	0.84	2.92
10.5	24	23.96	0.29	6.9484	2994	1.1	0.04	320.5	24	23.9	0.28	6.692	3032	1.08	0.1	555.5	24	22.84	0.26	5.9384	2753	0.94	1.16
11	24	23.96	0.29	6.9484	2994	1.1	0.04	321	24	23.83	0.28	6.6724	3013	1.08	0.17	556	24	23.02	0.26	5.9852	2768	0.95	0.98
11.5	24	23.83	0.29	6.9107	3013	1.11	0.17	321.5	24	23.86	0.27	6.4422	3013	1.09	0.14	556.5	24	23.89	0.28	6.6892	3071	1.06	0.11
12	24	23.84	0.29	6.9136	2974	1.11	0.16	322	24	23.9	0.28	6.692	3013	1.08	0.1	557	24	24.07	0.28	6.7396	3013	1.07	0.07
12.5	24	23.86	0.29	6.9194	2974	1.11	0.14	322.5	24	23.9	0.28	6.692	3013	1.08	0.1	558	24	23.7	0.28	6.636	3032	1.05	0.3
13	24	23.86	0.29	6.9194	2974	1.11	0.14	323	24	24.01	0.28	6.7228	3013	1.09	0.01	558.5	24	23.7	0.28	6.636	2974	1.05	0.3
13.5	24	24.03	0.29	6.9687	2994	1.11	0.03	324	24	23.89	0.28	6.6892	3032	1.08	0.11	559	24	23.8	0.28	6.664	2974	1.05	0.2
14	24	23.86	0.29	6.9194	3015	1.1	0.14	324.5	24	23.48	0.05	1.624	3570	0.91	8.48	559.5	24	24.02	0.28	6.7256	3052	1.06	0.02
14.5	24	23.84	0.29	6.9136	3013	1.1	0.16	325	24	31.08	0.05	1.554	3443	0.86	7.08	560	24	23.9	0.28	6.692	3032	1.06	0.1
15	24	23.84	0.29	6.9136	3013	1.1	0.16	325.5	24	30.54	0.06	1.8324	3419	0.86	6.54	560.5	24	23.9	0.28	6.692	3032	1.06	0.1
15.5	24	23.94	0.29	6.9426	2994	1.11	0.06	326	24	30.39	0.05	1.5195	3300	0.81	6.39	561	24	23.86	0.28	6.6808	3032	1.06	0.14
16	24	24.14	0.29	7.0006	2994	1.12	0.14	326.5	24	29.42	0.05	1.471	3234	0.78	5.42	561.5	24	23.88	0.28	6.6864	3032	1.07	0.12
16.5	24	24.07	0.29	6.9803	2994	1.12	0.07	327	24	28.37	0.05	1.4185	3110	0.74	4.37	562	24	23.95	0.28	6.706	3013	1.07	0.05
17	24	24.07	0.29	6.9803	2994	1.12	0.07	327.5	24	27.89	0.04	1.1156	3090	0.72	3.89	562.5	24	23.95	0.28	6.706	3013	1.07	0.05
17.5	24	24.07	0.29	6.9803	3013	1.13	0.07	328	24	26.92	0.05	1.346	2994	0.69	2.92	563	24	24.02	0.28	6.7256	3071	1.06	0.02
18	24	24.07	0.29	6.9803	3032	1.12	0.07	328.5	24	25.6	0.05	1.28	2851	0.65	1.6	563.5	24	23.84	0.28	6.6752	2994	1.06	0.16
18.5	24	24.1	0.29	6.989	3032	1.11	0.1	329	24	24.05	0.05	1.2025	2721	0.62	0.05	564	24	23.9	0.28	6.692	3032	1.04	0.1
19	24	24.1	0.29	6.989	3032	1.11	0.1	317	24	24.25	0.05	1.2125	2736	0.62	0.25	564.5	24	23.9	0.28	6.692	3032	1.04	0.1
19.5	24	24.09	0.29	6.9861	3013	1.12	0.09	317.5	24	24.33	0.05	1.2165	2722	0.62	0.33	575.5	24	24.29	0.28	6.8012	3032	1.07	0.29
20	24	24.08	0.29	6.9832	3032	1.12	0.08	318	24	24.33	0.05	1.2165	2722	0.62	0.33	578	24	24.05	0.28	6.734	3052	1.06	0.05
20.5	24	24.06	0.29	6.9774	2994	1.12	0.06	319.5	24	24.34	0.05	1.217	2737	0.62	0.34	578.5	24	24.15	0.28	6.762	3052	1.07	0.15
21	24	24	0.29	6.96	2994	1.12	0	320	24	24.41	0.05	1.2205	2721	0.62	0.41	579	24	24.15	0.28	6.762	3052	1.07	0.15
21.5	24	24	0.29	6.96	2994	1.12	0	320.5	24	24.41	0.05	1.2205	2721	0.62	0.41	579.5	24	23.95	0.28	6.706	3052	1.07	0.05
22	24	24.07	0.29	6.9803	3013	1.12	0.07	321	24	24.46	0.05	1.223	2752	0.62	0.46	760	24	24.04	0.28	6.7312	3052	1.07	0.04
22.5	24	24.09	0.29	6.9861	3032	1.11	0.09	321.5	24	24.38	0.06	1.4628	2752	0.61	0.38	760.5	24	24.06	0.28	6.7368	3052	1.06	0.06
23	24	23.89	0.29	6.9281	3013	1.11	0.11	325	24	24.38	0.05	1.219	2753	0.62	0.38	761	24	24.06	0.28	6.7368	3052	1.06	0.06
23.5	24	23.89	0.29	6.9281	3013	1.11	0.11	330	24	24.36	0.05	1.218	2753	0.62	0.36	761.5	24	23.93	0.28	6.7004	3032	1.07	0.07
24	24	24.03	0.29	6.9687	2994	1.11	0.03	331.5	24	24.34	0.05	1.217	2752	0.62	0.34	762	24	24.14	0.28	6.7592	3032	1.07	0.14
24.5	24	24.11	0.28	6.7508	3013	1.11	0.11	332	24	24.37	0.05	1.2185	2752	0.62	0.37	762.5	24	24.2	0.28	6.776	3052	1.07	0.2
25	24	24.07	0.29	6.9803	3013	1.12	0.07	334	24	24.43	0.05	1.2215	2736	0.62	0.43	763	24	24.2	0.28	6.776	3052	1.07	0.2
311	24	23.91	0.28	6.6948	3013	1.09	0.09	340.5	24	24.68	0.05	1.234	2768	0.62	0.68	763.5	24	24.12	0.28	6.7536	3052	1.07	0.12
311.5	24	23.93	0.28	6.7004	3013	1.09	0.07	541	24	24.42	0.05	1.221	2752	0.61	0.42	764	24	24.13	0.28	6.7564	3052	1.06	0.13
312	24	23.93	0.28	6.7004	3013	1.09	0.07	541.5	24	24.42	0.05	1.221	2752	0.61	0.42	764.5	24	24.12	0.28	6.7536	3032	1.06	0.12
312.5	24	23.71	0.28	6.6388	3013	1.09	0.29	542	24	24.34	0.04	0.9736	2768	0.62	0.34	765	24	24.12	0.28	6.7536	3032	1.06	0.12
313	24	23.86	0.28	6.6808	3052	1.08	0.14	542.5	24	24.33	0.05	1.2165	2736	0.62	0.33	765.5	24	23.93	0.28	6.7004	3052	1.05	0.07
313.5	24	23.85	0.28	6.678	3052	1.09	0.15	543	24	24.42	0.05	1.221	2752	0.62	0.42	766	24	24.32	0.28	6.8096	3032	1.06	0.32
314	24	23.85	0.28	6.678	3052	1.09	0.15	543.5	24	24.42	0.05	1.221	2752	0.62	0.42	766.5	24	24.19	0.28	6.7732	3052	1.05	0.19
314.5	24	23.98	0.28	6.7144	3032	1.09	0.02	544	24	24.42	0.05	1.221	2768	0.62	0.42	767	24	24.19	0.28	6.7732	3052	1.05	0.19
315	24	23.95	0.27	6.4665	3032	1.08	0.05	544.5	24	24.3	0.06	1.458	2752	0.62	0.3	767.5	24	24.42	0.28	6.8376	3072	1.06	0.42
315.5	24	23.72	0.28	6.6416	3013	1.09	0.28	545	24	24.34	0.05	1.217	2736	0.62	0.34	768	24	32.82	0.05	1.641	3652	0.89	8.82
316	24	23.72	0.28	6.6416	3013	1.09	0.28	545.5	24	24.34	0.05	1.217	2736	0.62	0.34	768.5	24	31.31	0.05	1.5655	3419	0.78	7.31
316.5	24	23.87	0.27	6.4449	2994	1.08	0.13	547	24	24.19	0.06	1.4514	2736	0.61	0.19	769	24	30.38	0.05	1.519	3370	0.76	6.38
317	24	23.99	0.28	6.7172	3032	1.09	0.01	547.5	24	24.19	0.06	1.4514	2736	0.61	0.19	769.5	24	29.15	0.05	1.4575	3191	0.7	5.15
								548	24	24.4	0.05	1.22	2736	0.61	0.4	770	24	28.53	0.04	1.1412	3172	0.7	4.53
								548.5	24	24.17	0.05	1.2085	2736	0.62	0.17	770.5	24	27.08	0.05	1.354	3013	0.64	3.08
								551.5	24	24.4	0.05	1.22	2736	0.61	0.4	771	24	26.62	0.05	1.331	2974	0.64	2.62
								552	24	24.4	0.05	1.22	2736	0.61	0.4	771.5	24	25.89	0.06	1.5534	2869	0.6	1.89



772	24	24.22	0.05	1.211	2736	0.58	0.22	995.5	24	24.13	0.28	6.7564	3171	1.06	0.13	1315	24	24.07	0.05	1.2035	2706	0.56	0.07
772.5	24	24.37	0.05	1.2185	2736	0.58	0.37	996	24	24.02	0.28	6.7256	3150	1.05	0.02	1315.5	24	24.11	0.05	1.2055	2721	0.57	0.11
773	24	24.37	0.05	1.2185	2736	0.58	0.37	996.5	24	24.16	0.28	6.7648	3130	1.05	0.16	1316	24	24.23	0.05	1.2115	2736	0.57	0.23
773.5	24	24.58	0.04	0.9832	2784	0.58	0.58	997	24	24.09	0.29	6.9861	3150	1.05	0.09	1316.5	24	24.23	0.05	1.2115	2736	0.57	0.23
774	24	24.51	0.04	0.9804	2768	0.58	0.51	997.5	24	24.09	0.29	6.9861	3150	1.05	0.09	1317	24	24.15	0.05	1.2075	2736	0.57	0.15
774.5	24	23.95	0.04	0.958	2721	0.55	0.05	998	24	24.28	0.29	7.0412	3130	1.05	0.28	1318	24	24.07	0.05	1.2035	2736	0.57	0.07
778.5	24	23.72	0.04	0.9488	2662	0.56	0.28	1002	24	24.09	0.29	6.9861	3150	1.06	0.09	1318.5	24	24.07	0.05	1.2035	2736	0.57	0.07
779	24	23.63	0.05	1.1815	2676	0.56	0.37	1002.5	24	23.98	0.29	6.9542	3130	1.06	0.02	1319	24	24.21	0.05	1.2105	2784	0.57	0.21
779.5	24	23.76	0.05	1.188	2662	0.56	0.24	1003	24	24.19	0.29	7.0151	3110	1.06	0.19	1485	24	24.17	0.05	1.2085	2736	0.56	0.17
780	24	23.93	0.05	1.1965	2676	0.56	0.07	1003.5	24	24.19	0.29	7.0151	3110	1.06	0.19	1485.5	24	24.24	0.05	1.212	2736	0.56	0.24
780.5	24	23.93	0.05	1.1965	2676	0.56	0.07	1285	24	23.77	0.29	6.8933	3052	1.03	0.23	1486	24	24.3	0.04	0.972	2736	0.56	0.3
781	24	23.81	0.05	1.1905	2676	0.55	0.19	1285.5	24	23.93	0.29	6.9397	3071	1.03	0.07	1486.5	24	24.11	0.04	0.9644	2752	0.55	0.11
781.5	24	23.81	0.05	1.1905	2692	0.56	0.19	1286	24	23.9	0.28	6.692	3091	1.03	0.1	1487	24	24.11	0.04	0.9644	2752	0.55	0.11
782	24	23.95	0.05	1.1975	2690	0.56	0.05	1286.5	24	23.95	0.28	6.706	3072	1.03	0.05	1487.5	24	23.72	0.05	1.186	2706	0.55	0.28
782.5	24	23.95	0.05	1.1975	2690	0.56	0.05	1287	24	23.95	0.28	6.706	3072	1.03	0.05	1488	24	23.88	0.05	1.194	2706	0.56	0.12
783	24	23.97	0.05	1.1985	2690	0.56	0.03	1287.5	24	24.11	0.29	6.9919	3071	1.04	0.11	1488.5	24	24.07	0.05	1.2035	2721	0.55	0.07
783.5	24	23.86	0.05	1.193	2706	0.56	0.14	1288	24	24.35	0.29	7.0615	3032	1.03	0.35	1489	24	24.07	0.05	1.2035	2721	0.55	0.07
784	24	23.77	0.05	1.1885	2692	0.57	0.23	1288.5	24	24.06	0.28	6.7368	3052	1.03	0.06	1489.5	24	24.29	0.05	1.2145	4514	0.56	0.29
966	24	24.11	0.05	1.2055	2706	0.56	0.11	1289	24	23.99	0.29	6.9571	3032	1.02	0.01	1490	24	24.19	0.05	1.2095	2721	0.56	0.19
966.5	24	23.91	0.05	1.1955	2706	0.56	0.09	1289.5	24	23.99	0.29	6.9571	3032	1.02	0.01	1490.5	24	24.16	0.05	1.208	2721	0.56	0.16
967	24	23.92	0.05	1.196	2662	0.55	0.08	1290	24	23.96	0.28	6.7088	3052	1.03	0.04	1491	24	24.16	0.05	1.208	2721	0.56	0.16
967.5	24	23.92	0.05	1.196	2662	0.55	0.08	1290.5	24	23.95	0.28	6.706	3052	1.02	0.05	1491.5	24	23.94	0.05	1.197	2706	0.56	0.06
968	24	23.77	0.05	1.1885	2676	0.55	0.23	1291	24	23.96	0.29	6.9484	3090	1.03	0.04	1492	24	24.09	0.05	1.2045	2736	0.56	0.09
968.5	24	23.78	0.04	0.9512	2692	0.55	0.22	1291.5	24	23.96	0.29	6.9484	3090	1.03	0.04	1492.5	24	24.17	0.05	1.2085	2753	0.56	0.17
970.5	24	23.72	0.05	1.186	2690	0.55	0.28	1292	24	23.99	0.28	6.7172	3052	1.03	0.01	1493	24	24.17	0.05	1.2085	2753	0.56	0.17
971	24	23.76	0.04	0.9504	2662	0.55	0.24	1292.5	24	24.06	0.28	6.7368	3052	1.03	0.06	1493.5	24	24.13	0.04	0.9652	2736	0.56	0.13
971.5	24	23.7	0.05	1.185	2662	0.55	0.3	1293	24	23.95	0.28	6.706	3052	1.03	0.05	1497	24	24.12	0.05	1.206	2736	0.56	0.12
972	24	23.7	0.05	1.185	2662	0.55	0.3	1293.5	24	23.95	0.28	6.706	3052	1.03	0.05	1497.5	24	24.12	0.05	1.206	2736	0.56	0.12
972.5	24	23.63	0.05	1.1815	2676	0.56	0.37	1294	24	24.14	0.28	6.7592	3032	1.02	0.14	1508.5	24	24.3	0.04	0.972	2753	0.57	0.3
973	24	24.37	0.05	1.2185	2706	0.57	0.37	1294.5	24	23.91	0.28	6.6948	3052	1.03	0.09	1509	24	19.31	0.22	4.2482	2373	0.71	4.69
975.5	24	23.77	0.05	1.1885	2706	0.55	0.23	1295	24	24.16	0.28	6.7648	3032	1.01	0.16	1509.5	24	20.49	0.23	4.7127	2510	0.77	3.51
976	24	23.77	0.05	1.1885	2706	0.55	0.23	1295.5	24	24.16	0.28	6.7648	3032	1.01	0.16	1510	24	21.54	0.24	5.1696	2605	0.82	2.46
976.5	24	23.65	0.06	1.419	2662	0.54	0.35	1296	24	32.81	0.04	1.3124	3625	0.87	8.81	1510.5	24	23.39	0.28	6.5492	2903	0.93	0.61
981	24	23.57	0.06	1.4142	2648	0.54	0.43	1296.5	24	32.08	0.04	1.2832	3597	0.85	8.08	1511	24	24.04	0.28	6.7312	3151	1.05	0.04
981.5	24	23.7	0.05	1.185	2662	0.54	0.3	1297	24	30.21	0.04	1.2084	3347	0.77	6.21	1511.5	24	24.08	0.29	6.9832	3150	1.04	0.08
982	24	23.64	0.05	1.182	2648	0.54	0.36	1297.5	24	29.01	0.04	1.1604	3234	0.69	5.01	1512	24	24.08	0.29	6.9832	3150	1.04	0.08
982.5	24	23.64	0.05	1.182	2648	0.54	0.36	1298	24	28.87	0.04	1.1548	3212	0.7	4.87	1512.5	24	24.06	0.28	6.7368	3151	1.04	0.06
983	24	23.39	0.05	1.1695	2619	0.54	0.61	1298.5	24	26.18	0.04	1.0472	2903	0.6	2.18	1513	24	24.04	0.29	6.9716	3090	1.04	0.04
983.5	24	18.45	0.21	3.8745	2198	0.67	5.55	1299	24	25.89	0.04	1.0356	2903	0.61	1.89	1513.5	24	23.93	0.28	6.7004	3130	1.03	0.07
984	24	18.45	0.21	3.8745	2198	0.67	5.55	1299.5	24	24.14	0.05	1.207	2721	0.57	0.14	1514	24	23.93	0.28	6.7004	3130	1.03	0.07
984.5	24	19.38	0.23	4.4574	2373	0.72	4.62	1300	24	24.17	0.05	1.2085	2721	0.56	0.17	1514.5	24	24.14	0.28	6.7592	3150	1.03	0.14
985	24	19.38	0.23	4.4574	2373	0.72	4.62	1300.5	24	24	0.04	0.96	2721	0.56	0	1515	24	24.13	0.28	6.7564	3110	1.04	0.13
985.5	24	19.91	0.23	4.5793	2422	0.74	4.09	1301	24	24.1	0.05	1.205	2752	0.57	0.1	1515.5	24	23.83	0.28	6.6724	3150	1.03	0.17
986	24	20.11	0.23	4.6253	2459	0.77	3.89	1301.5	24	24.1	0.05	1.205	2752	0.57	0.1	1518	24	23.85	0.28	6.678	3110	1.03	0.15
986.5	24	21.71	0.25	5.4275	2648	0.86	2.29	1310.5	24	23.98	0.05	1.199	2690	0.55	0.02	1518.5	24	23.85	0.28	6.678	3110	1.03	0.15
987	24	22.34	0.26	5.8084	2706	0.86	1.66	1311	24	23.77	0.05	1.1885	2690	0.56	0.23	1519	24	23.97	0.28	6.7116	3112	1.02	0.03
987.5	24	23.69	0.28	6.6332	3032	1.01	0.31	1311.5	24	23.92	0.05	1.196	2721	0.56	0.08	1519.5	24	23.88	0.28	6.6864	3090	1.03	0.12
988	24	24.08	0.28	6.7424	3052	1.02	0.08	1312	24	23.92	0.05	1.196	2721	0.56	0.08	1520	24	23.83	0.28	6.6724	3090	1.02	0.17
989	24	23.99	0.28	6.7172	3110	1.05	0.01	1312.5	24	23.92	0.05	1.196	2721	0.56	0.08	1520.5	24	23.83	0.28	6.6724	3090	1.02	0.17
993.5	24	24.12	0.28	6.7536	3130	1.02	0.12	1313	24	23.95	0.05	1.1975	2706	0.56	0.05	1521	24	23.89	0.28	6.6892	3091	1.01	0.11
994	24	24.21	0.28	6.7788	3111	1.06	0.21	1313.5	24	24.13	0.05	1.2065	2736	0.56	0.13	1521.5	24	23.87	0.29	6.9223	3130	1.02	0.13
994.5	24	24.04	0.29	6.9716	3150	1.06	0.04	1314	24	23.98	0.05	1.199	2721	0.56	0.02	1522	24	23.92	0.28	6.6976	3090	1.02	0.08
995	24	24.13	0.28	6.7564	3171	1.06	0.13	1314.5	24	23.98	0.05	1.199	2721	0.56	0.02	1522.5	24	23.92	0.28	6.6976	3090	1.02	0.08

1528	24	24	0.28	6.72	3032	1	0
1724	24	23.97	0.28	6.7116	3052	1.02	0.03
1724.5	24	23.97	0.28	6.7116	3052	1.02	0.03
1725	24	23.85	0.28	6.678	3052	1.01	0.15
1725.5	24	23.88	0.27	6.4476	3052	1.01	0.12
1729.5	24	23.92	0.27	6.4584	3032	1.01	0.08
1730	24	23.94	0.27	6.4638	3032	1	0.06
1730.5	24	23.84	0.28	6.6752	3032	1	0.16
1731	24	23.84	0.28	6.6752	3032	1	0.16
1731.5	24	23.93	0.28	6.7004	3032	0.99	0.07
1732	24	23.75	0.28	6.65	3032	1	0.25
1732.5	24	23.87	0.28	6.6836	3032	0.99	0.13
1733	24	23.87	0.28	6.6836	3032	0.99	0.13
1733.5	24	23.74	0.28	6.6472	3052	1	0.26
1734	24	23.67	0.28	6.6276	3032	0.99	0.33
1734.5	24	23.78	0.28	6.6584	3052	1	0.22

NB: Pengujian dilakukan selama 1734,5 s atau selama 28,9 menit dengan rata – rata *error steady state* sebesar **0,31 V**.

Keterangan warna:

- : *Steady state*
- : *Rise time*
- : *Over damped*
- : *Over shoot*
- : Daerah respon kendali sistem

Lampiran D. Data pengujian SS-CAES dengan perpindahan antar beban model *step by step*

Waktu pengujian ke (second)	R (Ohm)	Set Point (V)	Vout (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)	Error Steady State (V)
0,5	330	24	16,85	0,03	0,3255	1156	0,34	7,15
1	330	24	17,9	0,04	0,716	1455	0,62	6,1
1,5	330	24	18,3	0,04	0,972	2563	0,63	5,7
2	330	24	19,5	0,04	0,972	2563	0,63	4,5
2,5	330	24	20,32	0,05	1,209	2634	0,63	3,68
3	330	24	21	0,04	0,9612	2619	0,62	3
3,5	330	24	24,03	0,04	0,9612	2619	0,62	0,03
4	330	24	23,95	0,04	0,958	2605	0,63	0,05
4,5	330	24	23,99	0,04	0,9484	2592	0,62	0,01
5	330	24	23,98	0,04	0,9468	2550	0,61	0,02
5,5	330	24	23,92	0,04	0,9568	2592	0,63	0,08
6	330	24	23,83	0,04	0,9532	2619	0,61	0,17
6,5	330	24	23,55	0,04	0,942	2537	0,58	0,45
7	330	24	23,55	0,04	0,942	2537	0,58	0,45
7,5	330	24	23,92	0,03	0,7176	2591	0,62	0,08
8	330	24	24,62	0,04	0,9848	2692	0,61	0,62
8,5	330	24	24,13	0,05	1,2065	2706	0,62	0,13
9	330	24	24,13	0,05	1,2065	2706	0,62	0,13
9,5	330	24	24,17	0,05	1,2085	2648	0,61	0,17
10	330	24	24,4	0,04	0,976	2634	0,6	0,4
10,5	330	24	23,7	0,04	0,948	2619	0,6	0,3
11	330	24	23,7	0,04	0,948	2619	0,6	0,3
11,5	330	24	23,81	0,04	0,9524	2605	0,6	0,19
12	330	24	23,75	0,04	0,95	2605	0,6	0,25
163	330	24	24,16	0,04	0,9664	2676	0,61	0,16
163,5	330	24	24,31	0,04	0,9724	2692	0,61	0,31
164	330	24	23,89	0,05	1,1945	2676	0,61	0,11
164,5	330	24	23,89	0,05	1,1945	2676	0,61	0,11
165	330	24	24,35	0,05	1,2175	2676	0,61	0,35
165,5	330	24	24,17	0,05	1,2085	2690	0,61	0,17

166	330	24	24,17	0,05	1,2085	2690	0,61	0,17
166,5	330	24	24,02	0,04	0,9608	2706	0,61	0,02
167	330	24	24,34	0,05	1,217	2676	0,61	0,34
167,5	330	24	24,34	0,05	1,217	2676	0,61	0,34
168	330	24	24,19	0,05	1,2095	2662	0,61	0,19
168,5	330	24	24,39	0,05	1,2195	2692	0,61	0,39
169	330	24	24,26	0,04	0,9704	2690	0,61	0,26
169,5	330	24	24,26	0,04	0,9704	2690	0,61	0,26
170	330	24	24,26	0,05	1,213	2692	0,61	0,26
170,5	330	24	24,26	0,05	1,213	2692	0,61	0,26
171	330	24	24,43	0,05	1,2215	2662	0,61	0,43
171,5	330	24	24,33	0,05	1,2165	2707	0,61	0,33
172	330	24	24,34	0,05	1,217	2690	0,61	0,34
172,5	330	24	24,34	0,05	1,217	2690	0,61	0,34
173	330	24	24,39	0,05	1,2195	2706	0,62	0,39
173,5	330	24	24,3	0,05	1,215	2706	0,61	0,3
174	330	24	24,34	0,04	0,9736	2707	0,61	0,34
174,5	270	24	18,35	0,06	1,401	2634	0,6	5,65
175	270	24	19,01	0,06	1,413	2648	0,61	4,99
175,5	270	24	20,76	0,07	1,7171	2785	0,64	3,24
176	270	24	20,98	0,07	1,7087	2721	0,63	3,02
176,5	270	24	22,03	0,07	1,6821	2706	0,62	1,97
177	270	24	22,87	0,07	1,6821	2706	0,62	1,13
177,5	270	24	23,79	0,07	1,6653	2690	0,64	0,21
178	270	24	23,94	0,06	1,4364	2662	0,62	0,06
178,5	270	24	24,11	0,07	1,6877	2736	0,62	0,11
179	270	24	24,11	0,07	1,6877	2736	0,62	0,11
179,5	270	24	24,1	0,07	1,687	2721	0,63	0,1
180	270	24	24,33	0,06	1,4598	2737	0,63	0,33
180,5	270	24	24,34	0,07	1,7038	2784	0,63	0,34
181	270	24	24,03	0,07	1,6821	2706	0,62	0,03
181,5	270	24	23,79	0,07	1,6653	2690	0,64	0,21
182	270	24	23,94	0,06	1,4364	2662	0,62	0,06

182,5	270	24	24,14	0,06	1,4484	2690	0,62	0,14
183	270	24	24,14	0,06	1,4484	2690	0,62	0,14
183,5	270	24	23,62	0,07	1,6534	2619	0,61	0,38
184	270	24	23,84	0,06	1,4304	2676	0,62	0,16
184,5	270	24	23,84	0,06	1,4304	2676	0,62	0,16
185	270	24	23,9	0,05	1,195	2634	0,65	0,1
185,5	270	24	24,18	0,06	1,4508	2736	0,64	0,18
186	270	24	24,18	0,06	1,4508	2736	0,64	0,18
186,5	270	24	24,21	0,07	1,6947	2737	0,64	0,21
187	270	24	24,49	0,06	1,4694	2692	0,62	0,49
187,5	270	24	23,92	0,06	1,4352	2721	0,62	0,08
188	270	24	23,92	0,06	1,4352	2721	0,62	0,08
188,5	270	24	23,81	0,07	1,6667	2662	0,63	0,19
189	270	24	23,81	0,07	1,6667	2692	0,62	0,19
316,5	270	24	24,27	0,07	1,6989	2784	0,64	0,27
317	270	24	24,37	0,06	1,4622	2736	0,64	0,37
317,5	270	24	24,33	0,07	1,7031	2736	0,65	0,33
318	270	24	24,43	0,06	1,4658	2768	0,65	0,43
318,5	270	24	24,35	0,07	1,7045	2768	0,63	0,35
319	270	24	24,35	0,07	1,7045	2768	0,63	0,35
319,5	270	24	24,24	0,07	1,6968	2706	0,63	0,24
320	270	24	24,27	0,06	1,4562	2736	0,64	0,27
320,5	270	24	24,22	0,07	1,6954	2755	0,64	0,22
321	270	24	24,14	0,07	1,6898	2736	0,64	0,14
321,5	270	24	24,33	0,06	1,4598	2721	0,63	0,33
322	270	24	24,33	0,06	1,4598	2721	0,63	0,33
322,5	270	24	24,16	0,06	1,4496	2721	0,65	0,16
323	270	24	24,41	0,07	1,7087	2736	0,64	0,41
323,5	270	24	24,4	0,06	1,464	2769	0,64	0,4
324	270	24	24,4	0,06	1,464	2769	0,64	0,4
324,5	270	24	24,39	0,06	1,4634	2768	0,65	0,39
325	270	24	24,39	0,06	1,4634	2768	0,65	0,39
325,5	270	24	24,34	0,07	1,7038	2784	0,65	0,34

326	270	24	24,28	0,06	1,4568	2768	0,63	0,28
326,5	270	24	24,28	0,06	1,4568	2768	0,63	0,28
327	270	24	23,93	0,07	1,6751	2692	0,62	0,07
327,5	270	24	23,93	0,07	1,6751	2692	0,62	0,07
328	270	24	23,85	0,06	1,431	2706	0,62	0,15
328,5	270	24	23,87	0,06	1,4322	2692	0,62	0,13
329	270	24	23,77	0,06	1,4262	2706	0,62	0,23
329,5	270	24	23,77	0,06	1,4262	2706	0,62	0,23
330	270	24	23,74	0,07	1,6618	2690	0,63	0,26
330,5	270	24	24,31	0,07	1,7017	2736	0,64	0,31
331	270	24	24,08	0,06	1,4448	2721	0,63	0,08
331,5	270	24	24,3	0,06	1,458	2736	0,63	0,3
332	150	24	18,88	0,13	3,1044	2994	0,79	5,12
332,5	150	24	19,24	0,15	3,6495	2994	0,79	4,76
333	150	24	20,96	0,14	3,3516	2974	0,78	3,04
333,5	150	24	21,99	0,14	3,3586	2974	0,79	2,01
334	150	24	22,08	0,14	3,3712	2974	0,79	1,92
334,5	150	24	22,54	0,14	3,3712	2974	0,79	1,46
335	150	24	22,65	0,15	3,612	2994	0,79	1,35
335,5	150	24	22,67	0,14	3,3376	2957	0,79	1,33
336	150	24	22,98	0,13	3,1044	2955	0,78	1,02
336,5	150	24	23,3	0,13	3,1044	2955	0,78	0,7
337	150	24	23,56	0,14	3,353	2974	0,79	0,44
337,5	150	24	23,89	0,14	3,346	2957	0,78	0,11
338	150	24	24,03	0,14	3,3642	2974	0,8	0,03
338,5	150	24	24,04	0,14	3,3656	2938	0,79	0,04
339	150	24	24,04	0,14	3,3656	2938	0,79	0,04
339,5	150	24	24,11	0,15	3,6165	2974	0,79	0,11
340	150	24	24,09	0,14	3,3726	2955	0,79	0,09
340,5	150	24	23,9	0,13	3,107	2974	0,78	0,1
341	150	24	23,9	0,13	3,107	2974	0,78	0,1
341,5	150	24	24,33	0,14	3,4062	2976	0,78	0,33
342	150	24	24,16	0,13	3,1408	2955	0,78	0,16

342,5	150	24	24,01	0,13	3,1213	2957	0,78	0,01
343	150	24	24,01	0,13	3,1213	2957	0,78	0,01
343,5	150	24	24,18	0,14	3,3852	2994	0,79	0,18
344	150	24	24,07	0,14	3,3698	3013	0,79	0,07
344,5	150	24	24,23	0,14	3,3922	3015	0,79	0,23
345	150	24	24,23	0,14	3,3922	3015	0,79	0,23
345,5	150	24	24,02	0,14	3,3628	2974	0,79	0,02
346	150	24	24,06	0,14	3,3684	2994	0,78	0,06
346,5	150	24	24,17	0,14	3,3838	2974	0,79	0,17
515	150	24	24,03	0,14	3,3642	2994	0,79	0,03
515,5	150	24	24,3	0,14	3,402	2994	0,79	0,3
516	150	24	24,02	0,14	3,3628	3013	0,79	0,02
516,5	150	24	24,02	0,14	3,3628	3013	0,79	0,02
517	150	24	24,39	0,14	3,4146	2994	0,8	0,39
517,5	150	24	24,03	0,14	3,3642	3013	0,79	0,03
518	150	24	24,16	0,14	3,3824	3032	0,79	0,16
518,5	150	24	24,16	0,14	3,3824	3032	0,79	0,16
519	150	24	24,07	0,14	3,3698	3013	0,79	0,07
519,5	150	24	24,23	0,14	3,3922	2994	0,79	0,23
520	150	24	24,04	0,14	3,3656	2994	0,79	0,04
520,5	150	24	23,99	0,14	3,3586	2994	0,79	0,01
521	150	24	23,99	0,14	3,3586	2994	0,79	0,01
521,5	150	24	24	0,15	3,6	3013	0,79	0
522	150	24	24,14	0,14	3,3796	2994	0,8	0,14
522,5	150	24	24,35	0,14	3,409	3015	0,79	0,35
523	150	24	24,26	0,15	3,639	3032	0,79	0,26
523,5	150	24	24,26	0,15	3,639	3032	0,79	0,26
524	150	24	24,04	0,15	3,606	2994	0,79	0,04
524,5	150	24	24,23	0,15	3,6345	2974	0,8	0,23
525	150	24	24,05	0,14	3,367	3013	0,8	0,05
525,5	150	24	24,05	0,14	3,367	3013	0,8	0,05
526	150	24	24,16	0,14	3,3824	2994	0,79	0,16
526,5	150	24	24,16	0,14	3,3824	3013	0,8	0,16

527	150	24	24,39	0,14	3,4146	3013	0,79	0,39
527,5	150	24	24,39	0,14	3,4146	3013	0,79	0,39
528	150	24	24,23	0,15	3,6345	2974	0,79	0,23
528,5	150	24	24,1	0,14	3,374	3013	0,79	0,1
529	150	24	24,1	0,14	3,374	3013	0,79	0,1
529,5	150	24	23,89	0,14	3,3446	3013	0,8	0,11
530	150	24	24,08	0,14	3,3712	2994	0,79	0,08
530,5	150	24	23,96	0,14	3,3544	2994	0,8	0,04
531	150	24	24,12	0,14	3,3768	3013	0,8	0,12
531,5	150	24	24,12	0,14	3,3768	3013	0,8	0,12
532	150	24	23,99	0,15	3,5985	2994	0,79	0,01
532,5	150	24	24,15	0,15	3,6225	2957	0,79	0,15
533	150	24	24,14	0,14	3,3796	3013	0,79	0,14
533,5	120	24	18,83	0,26	4,8958	2817	0,84	5,17
534	120	24	19,18	0,17	3,9406	2974	0,8	4,82
534,5	120	24	20,2	0,18	4,1832	2938	0,8	3,8
535	120	24	22,54	0,18	4,1832	2938	0,8	1,46
535,5	120	24	23,34	0,17	3,9678	2957	0,8	0,66
536	120	24	23,96	0,17	4,0732	3130	0,86	0,04
536,5	120	24	24,12	0,17	4,1004	3111	0,86	0,12
537	120	24	23,83	0,17	4,0511	3130	0,86	0,17
537,5	120	24	23,83	0,17	4,0511	3130	0,86	0,17
538	120	24	23,97	0,17	4,0749	3091	0,86	0,03
538,5	120	24	23,92	0,17	4,0664	3090	0,87	0,08
539	120	24	23,87	0,17	4,0579	3111	0,87	0,13
539,5	120	24	23,87	0,17	4,0579	3111	0,87	0,13
540	120	24	23,91	0,17	4,0647	3071	0,87	0,09
540,5	120	24	24,11	0,17	4,0987	3091	0,86	0,11
541	120	24	23,79	0,17	4,0443	3110	0,86	0,21
541,5	120	24	23,79	0,17	4,0443	3110	0,86	0,21
542	120	24	23,74	0,17	4,0358	3090	0,86	0,26
542,5	120	24	23,83	0,17	4,0511	3110	0,87	0,17
543	120	24	23,83	0,17	4,0511	3110	0,87	0,17

543,5	120	24	23,88	0,17	4,0596	3130	0,87	0,12
544	120	24	23,93	0,17	4,0681	3111	0,86	0,07
544,5	120	24	24,07	0,17	4,0919	3071	0,86	0,07
737	120	24	24,11	0,17	4,0987	3191	0,89	0,11
737,5	120	24	23,96	0,17	4,0732	3191	0,88	0,04
738	120	24	24,39	0,17	4,1463	3212	0,89	0,39
738,5	120	24	23,84	0,17	4,0528	3234	0,89	0,16
739	120	24	23,84	0,17	4,0528	3234	0,89	0,16
739,5	120	24	24,12	0,17	4,1004	3212	0,88	0,12
740	120	24	23,93	0,17	4,0681	3212	0,87	0,07
740,5	120	24	24,2	0,17	4,114	3212	0,88	0,2
741	120	24	24,2	0,17	4,114	3212	0,88	0,2
741,5	120	24	24,13	0,17	4,1021	3212	0,89	0,13
742	120	24	24,13	0,17	4,1021	3212	0,89	0,13
742,5	120	24	23,96	0,17	4,0732	3192	0,88	0,04
743	120	24	24,2	0,17	4,114	3212	0,88	0,2
743,5	120	24	24,37	0,17	4,1429	3191	0,88	0,37
744	120	24	24,19	0,17	4,1123	3191	0,88	0,19
744,5	120	24	24,19	0,17	4,1123	3191	0,88	0,19
745	120	24	24,2	0,18	4,356	3212	0,89	0,2
745,5	120	24	23,99	0,17	4,0783	3212	0,89	0,01
746	120	24	24,19	0,17	4,1123	3191	0,88	0,19
746,5	120	24	24,19	0,17	4,1123	3191	0,88	0,19
747	120	24	24,03	0,18	4,3254	3255	0,88	0,03
747,5	120	24	24,06	0,17	4,0902	3191	0,89	0,06
748	120	24	24	0,18	4,32	3234	0,88	0
748,5	120	24	24	0,18	4,32	3234	0,88	0
749	120	24	24,12	0,18	4,3416	3191	0,88	0,12
749,5	120	24	24,18	0,17	4,1106	3191	0,88	0,18
750	120	24	23,84	0,17	4,0528	3302	0,88	0,16
750,5	120	24	23,84	0,17	4,0528	3302	0,88	0,16
751	120	24	24,33	0,17	4,1361	3234	0,89	0,33
751,5	120	24	24,14	0,17	4,1038	3212	0,88	0,14

752	120	24	24,24	0,18	4,3632	3212	0,88	0,24
752,5	120	24	24,04	0,18	4,3272	3212	0,88	0,04
753	100	24	18,25	0,2	4,45	3151	0,9	5,75
753,5	100	24	19,98	0,2	4,576	3323	0,95	4,02
754	100	24	19,76	0,2	4,574	3282	0,95	4,24
754,5	100	24	20,03	0,2	4,574	3282	0,95	3,97
755	100	24	20,43	0,2	4,694	3371	0,99	3,57
755,5	100	24	20,87	0,21	5,0736	3597	1,1	3,13
756	100	24	21,56	0,21	5,0841	3652	1,11	2,44
756,5	100	24	21,98	0,21	5,0841	3652	1,11	2,02
757	100	24	22,43	0,21	4,998	3519	1,07	1,57
757,5	100	24	22,98	0,21	5,0232	3544	1,08	1,02
758	100	24	23,92	0,21	5,0232	3519	1,07	0,08
758,5	100	24	23,92	0,21	5,0232	3519	1,07	0,08
759	100	24	24,06	0,21	5,0526	3544	1,07	0,06
759,5	100	24	23,7	0,2	4,74	3544	1,06	0,3
760	100	24	24,32	0,21	5,1072	3469	1,07	0,32
760,5	100	24	24,32	0,21	5,1072	3469	1,07	0,32
761	100	24	23,85	0,2	4,77	3546	1,05	0,15
761,5	100	24	24,3	0,2	4,86	3469	1,05	0,3
762	100	24	23,74	0,21	4,9854	3519	1,06	0,26
762,5	100	24	23,85	0,21	5,0085	3519	1,04	0,15
763	100	24	23,85	0,21	5,0085	3519	1,04	0,15
763,5	100	24	23,68	0,2	4,736	3544	1,06	0,32
764	100	24	23,93	0,2	4,786	3519	1,05	0,07
764,5	100	24	23,74	0,2	4,748	3493	1,04	0,26
765	100	24	23,74	0,2	4,748	3493	1,04	0,26
765,5	100	24	24,09	0,2	4,818	3546	1,06	0,09
766	100	24	23,83	0,2	4,766	3522	1,05	0,17
766,5	100	24	24	0,21	5,04	3519	1,06	0
767	100	24	24	0,21	5,04	3519	1,06	0
767,5	100	24	23,68	0,2	4,736	3519	1,06	0,32
768	100	24	23,69	0,2	4,738	3468	1,05	0,31

902	100	24	23,77	0,2	4,754	3885	1,21	0,23
902,5	100	24	24,03	0,2	4,806	3824	1,21	0,03
903	100	24	23,98	0,21	5,0358	3888	1,2	0,02
903,5	100	24	23,88	0,21	5,0148	3854	1,2	0,12
904	100	24	23,88	0,2	4,776	3949	1,26	0,12
904,5	100	24	23,88	0,2	4,776	3949	1,26	0,12
905	100	24	24,13	0,21	5,0673	3918	1,26	0,13
905,5	100	24	23,69	0,2	4,738	3952	1,25	0,31
906	100	24	24,22	0,2	4,844	3915	1,24	0,22
906,5	100	24	24,22	0,2	4,844	3915	1,24	0,22
907	100	24	23,86	0,21	5,0106	3918	1,24	0,14
907,5	100	24	23,63	0,21	4,9623	3983	1,24	0,37
908	100	24	24,01	0,21	5,0421	3918	1,23	0,01
908,5	100	24	24,01	0,21	5,0421	3918	1,23	0,01
909	100	24	24,05	0,2	4,81	3952	1,24	0,05
909,5	100	24	23,91	0,2	4,782	3952	1,24	0,09
910	100	24	24,41	0,21	5,1261	3918	1,25	0,41
910,5	100	24	24,41	0,21	5,1261	3918	1,25	0,41
911	100	24	23,84	0,21	5,0064	3915	1,24	0,16
911,5	100	24	24,14	0,21	5,0694	3888	1,24	0,14
912	100	24	23,89	0,2	4,778	3983	1,22	0,11
912,5	100	24	23,89	0,2	4,778	3983	1,22	0,11
913	100	24	23,98	0,21	5,0358	3888	1,24	0,02
913,5	100	24	23,76	0,2	4,752	3918	1,22	0,24
914	100	24	23,56	0,2	4,712	3949	1,22	0,44
914,5	100	24	23,92	0,2	4,784	3918	1,22	0,08
915	100	24	23,92	0,2	4,784	3918	1,22	0,08
915,5	100	24	23,95	0,21	5,0295	3915	1,22	0,05
916	100	24	23,71	0,2	4,742	3888	1,21	0,29
916,5	100	24	23,71	0,2	4,742	3888	1,21	0,29
917	100	24	23,97	0,2	4,794	3949	1,21	0,03
917,5	100	24	23,87	0,19	4,5353	4017	1,26	0,13
918	100	24	23,86	0,2	4,772	4017	1,25	0,14






918,5	100	24	23,86	0,2	4,772	4017	1,25	0,14
919	68	24	18,47	0,26	6,1022	3013	0,96	5,53
919,5	68	24	19,65	0,28	6,622	3111	0,96	4,35
920	68	24	22,43	0,27	6,4449	3130	0,96	1,57
920,5	68	24	24,09	0,27	6,5043	3090	0,98	0,09
921	68	24	24,12	0,28	6,7536	3130	0,98	0,12
921,5	68	24	24,12	0,28	6,7536	3130	0,98	0,12
922	68	24	24,17	0,29	7,0093	3171	0,98	0,17
922,5	68	24	24,2	0,28	6,776	3150	0,99	0,2
923	68	24	24,08	0,28	6,7424	3131	1	0,08
923,5	68	24	24,08	0,28	6,7424	3131	1	0,08
924	68	24	23,62	0,28	6,6136	3192	0,99	0,38
924,5	68	24	23,81	0,28	6,6668	3192	0,99	0,19
925	68	24	23,91	0,27	6,4557	3212	0,99	0,09
925,5	68	24	24,16	0,28	6,7648	3212	1	0,16
926	68	24	23,78	0,28	6,6584	3257	1	0,22
926,5	68	24	23,78	0,28	6,6584	3257	1	0,22
927	68	24	23,8	0,27	6,426	3236	1	0,2
927,5	68	24	23,87	0,28	6,6836	3234	1	0,13
928	68	24	23,8	0,28	6,664	3257	1,01	0,2
928,5	68	24	23,8	0,28	6,664	3257	1,01	0,2
929	68	24	24	0,29	6,96	3215	1,02	0
929,5	68	24	23,99	0,29	6,9571	3255	1,01	0,01
930	68	24	24,06	0,28	6,7368	3212	1,01	0,06
930,5	68	24	24,06	0,28	6,7368	3212	1,01	0,06
931	68	24	24,21	0,28	6,7788	3257	1,01	0,21
931,5	68	24	24,21	0,28	6,7788	3257	1,01	0,21
932	68	24	24,19	0,27	6,5313	3234	1,02	0,19
932,5	68	24	23,49	0,27	6,3423	3323	1,01	0,51
933	68	24	23,75	0,27	6,4125	3279	1,02	0,25
933,5	68	24	23,75	0,27	6,4125	3279	1,02	0,25
934	68	24	23,74	0,27	6,4098	3234	1,01	0,26
934,5	68	24	24,2	0,28	6,776	3255	1,02	0,2

935	68	24	23,86	0,27	6,4422	3348	1,02	0,14
935,5	68	24	23,86	0,27	6,4422	3348	1,02	0,14
936	68	24	24,28	0,27	6,5556	3302	1,03	0,28
936,5	68	24	24,32	0,27	6,5664	3277	1,03	0,32
937	68	24	24,23	0,27	6,5421	3302	1,02	0,23
937,5	68	24	24,23	0,27	6,5421	3302	1,02	0,23
938	68	24	24,13	0,27	6,5151	3281	1,03	0,13
938,5	68	24	24,19	0,26	6,2894	3302	1,03	0,19
939	68	24	23,7	0,28	6,636	3419	1,05	0,3
1109	68	24	23,86	0,28	6,6808	3052	1,11	0,14
1109,5	68	24	24,15	0,28	6,762	3013	1,11	0,15
1110	68	24	24,15	0,28	6,762	3013	1,11	0,15
1117	68	24	24,01	0,29	6,9629	3032	1,11	0,01
1117,5	68	24	24,08	0,28	6,7424	3013	1,09	0,08
1118	68	24	23,92	0,28	6,6976	2974	1,08	0,08
1118,5	68	24	23,92	0,28	6,6976	2974	1,08	0,08
1119	68	24	23,98	0,28	6,7144	2974	1,1	0,02
1119,5	68	24	24,05	0,28	6,734	2994	1,1	0,05
1120	68	24	23,97	0,28	6,7116	3032	1,09	0,03
1120,5	68	24	23,97	0,28	6,7116	3032	1,09	0,03
1121	68	24	23,72	0,28	6,6416	2974	1,09	0,28
1121,5	68	24	23,84	0,28	6,6752	2994	1,09	0,16
1122	68	24	23,89	0,28	6,6892	2994	1,1	0,11
1122,5	68	24	23,89	0,28	6,6892	2994	1,1	0,11
1123	68	24	23,89	0,28	6,6892	2974	1,09	0,11
1123,5	68	24	23,79	0,28	6,6612	2994	1,09	0,21
1124	68	24	23,75	0,29	6,8875	2974	1,09	0,25
1124,5	68	24	23,75	0,29	6,8875	2974	1,09	0,25
1125	68	24	23,66	0,28	6,6248	2974	1,1	0,34
1125,5	68	24	23,79	0,28	6,6612	2994	1,1	0,21
1126	68	24	23,76	0,28	6,6528	2974	1,09	0,24
1126,5	68	24	23,92	0,28	6,6976	3013	1,08	0,08
1127	68	24	23,92	0,28	6,6976	3013	1,08	0,08

1127,5	68	24	23,69	0,29	6,8701	3013	1,09	0,31
1128	68	24	23,76	0,28	6,6528	2974	1,09	0,24
1128,5	68	24	23,76	0,28	6,6528	2974	1,09	0,24
1129	68	24	23,85	0,28	6,678	2974	1,09	0,15
1129,5	68	24	23,85	0,28	6,678	3013	1,08	0,15
1130	68	24	23,82	0,28	6,6696	2974	1,09	0,18
1130,5	68	24	23,81	0,28	6,6668	3013	1,09	0,19

NB: Pengujian dilakukan selama 1330,5 s atau selama 22,18 menit dengan rata – rata *error steady state* sebesar **0,248 V**.

Keterangan warna:

-  : *Steady state*
-  : *Rise time*
-  : *Over damped*
-  : *Over shoot*
-  : Daerah respon kendali sistem



## Lampiran E. Data pengujian SS-CAES dengan beban LED

Waktu Pengujian ke- (second)	Set Point (V)	Vout (V)	Arus (A)	Daya (Watt)	Kecepatan (Rpm)	Tekanan (Bar)	Error Set Point (V)
0,5	12	0,25	0,01	0,0025	1124	0,05	11,75
1	12	0,24	0	0	1124	0,54	11,76
1,5	12	8,79	0,02	0,1758	982	0,46	3,21
2	12	8,83	0	0	968	0,45	3,17
2,5	12	9,05	0,02	0,181	986	0,49	2,95
3	12	9,05	0,02	0,181	986	0,49	2,95
3,5	12	9,24	0,03	0,2772	1085	0,5	2,76
4	12	9,6	0,01	0,096	1134	0,53	2,4
4,5	12	10,26	0,04	0,4104	1096	0,54	1,74
5	12	11,72	0,08	0,9376	1472	0,62	0,28
5,5	12	12,04	0,09	1,0836	1514	0,59	0,04
6	12	12,04	0,09	1,0836	1514	0,59	0,04
6,5	12	12,07	0,09	1,0863	1519	0,6	0,07
7	12	11,98	0,1	1,198	1519	0,6	0,02
7,5	12	12,15	0,1	1,215	1528	0,6	0,15
8	12	12,15	0,1	1,215	1528	0,6	0,15
8,5	12	12,32	0,1	1,232	1548	0,6	0,32

9	12	12,14	0,11	1,3354	1528	0,59	0,14
9,5	12	12,17	0,1	1,217	1538	0,61	0,17
10	12	12,17	0,1	1,217	1538	0,61	0,17
10,5	12	12,32	0,09	1,1088	1543	0,6	0,32
11	12	11,96	0,11	1,3156	1538	0,59	0,04
11,5	12	12,19	0,1	1,219	1538	0,6	0,19
12	12	12,17	0,1	1,217	1533	0,6	0,17
12,5	12	12,17	0,1	1,217	1533	0,6	0,17
13	12	12,24	0,1	1,224	1524	0,59	0,24
13,5	12	12,27	0,1	1,227	1538	0,6	0,27
14	12	12,17	0,09	1,0953	1538	0,6	0,17
14,5	12	12,17	0,09	1,0953	1538	0,6	0,17
15	12	12,18	0,1	1,218	1523	0,59	0,18
15,5	12	12,15	0,1	1,215	1529	0,6	0,15
16	12	12,13	0,09	1,0917	1528	0,6	0,13
16,5	12	12,13	0,09	1,0917	1528	0,6	0,13
17	12	12,28	0,1	1,228	1524	0,59	0,28
449	12	12,46	0,09	1,1214	1585	0,69	0,46
449,5	12	12,18	0,09	1,0962	1573	0,62	0,18
450	12	12,46	0,11	1,3706	1548	0,67	0,46
450,5	12	12,46	0,11	1,3706	1548	0,67	0,46
451	12	12,25	0,1	1,225	1543	0,65	0,25

452	12	12,39	0,11	1,3629	1548	0,67	0,39
452,5	12	12,39	0,11	1,3629	1548	0,67	0,39
453	12	12,25	0,1	1,225	1543	0,64	0,25
453,5	12	12,27	0,09	1,1043	1509	0,66	0,27
454	12	12,35	0,09	1,1115	1548	0,67	0,35
454,5	12	12,16	0,1	1,216	1538	0,64	0,16
455	12	12,16	0,1	1,216	1538	0,64	0,16
455,5	12	12,23	0,08	0,9784	1538	0,66	0,23
456	12	12,21	0,09	1,0989	1548	0,66	0,21
456,5	12	12,48	0,1	1,248	1558	0,65	0,48
457	12	12,48	0,1	1,248	1558	0,65	0,48
457,5	12	12,29	0,1	1,229	1573	0,65	0,29
458	12	12,48	0,09	1,1232	1578	0,67	0,48
460,5	12	12,39	0,09	1,1151	1585	0,67	0,39
461	12	12,39	0,09	1,1151	1585	0,67	0,39
461,5	12	11,57	0,15	1,7355	1574	0,69	0,43
462	12	11,8	0,15	1,77	1538	0,71	0,2
462,5	12	11,78	0,16	1,8848	1538	0,68	0,22
463	12	11,78	0,16	1,8848	1538	0,68	0,22
463,5	12	11,82	0,14	1,6548	1528	0,69	0,18
464	12	11,66	0,15	1,749	1538	0,71	0,34
464,5	12	11,59	0,15	1,7385	1534	0,67	0,41
465	12	11,82	0,15	1,773	1519	0,69	0,18
465,5	12	11,82	0,15	1,773	1519	0,69	0,18

466	12	12,47	0,18	2,2446	1602	0,73	0,47
466,5	12	12,29	0,17	2,0893	1590	0,73	0,29
467	12	12,12	0,18	2,1816	1590	0,71	0,12
467,5	12	12,12	0,18	2,1816	1590	0,71	0,12
468	12	12,06	0,17	2,0502	1579	0,73	0,06
468,5	12	12,25	0,18	2,205	1579	0,7	0,25
469	12	12	0,17	2,04	1563	0,72	0
469,5	12	12	0,17	2,04	1563	0,72	0
470	12	12,01	0,17	2,0417	1558	0,7	0,01
470,5	12	12,03	0,15	1,8045	1548	0,72	0,03
471	12	11,95	0,16	1,912	1553	0,68	0,05
471,5	12	11,95	0,16	1,912	1553	0,68	0,05
472	12	11,93	0,16	1,9088	1563	0,72	0,07
472,5	12	11,96	0,16	1,9136	1553	0,67	0,04
473	12	12,22	0,17	2,0774	1543	0,71	0,22
473,5	12	11,71	0,17	1,9907	1543	0,69	0,29
474	12	11,71	0,17	1,9907	1543	0,69	0,29
474,5	12	11,91	0,16	1,9056	1543	0,69	0,09
475	12	11,74	0,14	1,6436	1543	0,71	0,26
475,5	12	11,98	0,16	1,9168	1543	0,67	0,02
476	12	11,98	0,16	1,9168	1543	0,67	0,02
476,5	12	11,85	0,16	1,896	1528	0,69	0,15
477	12	11,55	0,14	1,617	1533	0,7	0,45
477,5	12	11,67	0,15	1,7505	1514	0,68	0,33

478	12	11,67	0,15	1,7505	1514	0,68	0,33
478,5	12	11,68	0,15	1,752	1506	0,66	0,32
479	12	11,58	0,14	1,6212	1501	0,67	0,42
479,5	12	11,6	0,14	1,624	1491	0,68	0,4
480	12	11,6	0,14	1,624	1491	0,68	0,4
482,5	12	11,8	0,14	1,652	1481	0,7	0,2
732	12	12,01	0,18	2,1618	1585	0,78	0,01
732,5	12	11,99	0,16	1,9184	1578	0,84	0,01
733	12	12,12	0,18	2,1816	1585	0,79	0,12
733,5	12	12,03	0,19	2,2857	1590	0,81	0,03
734	12	12,03	0,19	2,2857	1590	0,81	0,03
734,5	12	12,07	0,17	2,0519	1585	0,83	0,07
735	12	11,99	0,17	2,0383	1585	0,8	0,01
735,5	12	12,08	0,17	2,0536	1585	0,84	0,08
736	12	12,08	0,17	2,0536	1585	0,84	0,08
736,5	12	12,15	0,18	2,187	1607	0,83	0,15
737	12	12,19	0,19	2,3161	1602	0,8	0,19
737,5	12	12,19	0,19	2,3161	1613	0,82	0,19
738	12	12,19	0,19	2,3161	1613	0,82	0,19
738,5	12	12,26	0,17	2,0842	1607	0,85	0,26
739	12	12,13	0,19	2,3047	1613	0,83	0,13
739,5	12	12,14	0,19	2,3066	1601	0,82	0,14
740	12	12,14	0,19	2,3066	1601	0,82	0,14
740,5	12	12,13	0,18	2,1834	1618	0,84	0,13

741	12	12,27	0,18	2,2086	1618	0,85	0,27
741,5	12	12,28	0,18	2,2104	1618	0,84	0,28
742	12	12,18	0,18	2,1924	1628	0,82	0,18
742,5	12	12,18	0,18	2,1924	1628	0,82	0,18
743	12	11,32	0,19	2,3408	1623	0,82	0,68
743,5	12	12,29	0,21	2,5809	1644	0,81	0,29
744	12	12,39	0,21	2,6019	1661	0,82	0,39
744,5	12	12,39	0,21	2,6019	1661	0,82	0,39
745	12	12,5	0,2	2,5	1685	0,81	0,5
745,5	12	12,32	0,23	2,9486	1667	0,8	0,32
746	12	12,15	0,24	3,156	1768	0,81	0,15
746,5	12	12,15	0,24	3,156	1768	0,81	0,15
754	12	12,21	0,18	2,1978	1753	0,69	0,21
765	12	12,43	0,2	2,486	1633	0,74	0,43
765,5	12	12,43	0,2	2,486	1633	0,74	0,43
766	12	12,45	0,2	2,49	1638	0,73	0,45
766,5	12	12,4	0,2	2,48	1633	0,72	0,4
767	12	12,55	0,2	2,51	1638	0,72	0,55
767,5	12	12,55	0,2	2,51	1638	0,72	0,55
768	12	12,41	0,21	2,6061	1638	0,71	0,41
768,5	12	12,37	0,2	2,474	1638	0,72	0,37
769	12	12,37	0,2	2,474	1645	0,73	0,37
769,5	12	12,37	0,2	2,474	1645	0,73	0,37
770	12	12,35	0,2	2,47	1633	0,73	0,35






770,5	12	12,39	0,2	2,478	1645	0,74	0,39	782,5	12	12,24	0,19	2,3256	1628	0,74	0,24
771	12	12,41	0,19	2,3579	1628	0,75	0,41	783	12	12,45	0,19	2,3655	1623	0,75	0,45
771,5	12	12,53	0,19	2,3807	1638	0,74	0,53	783,5	12	12,5	0,2	2,5	1628	0,73	0,5
772	12	12,53	0,19	2,3807	1638	0,74	0,53	784	12	12,48	0,2	2,496	1623	0,72	0,48
772,5	12	12,51	0,2	2,502	1645	0,75	0,51	784,5	12	12,48	0,2	2,496	1623	0,72	0,48
773	12	12,54	0,2	2,508	1649	0,74	0,54	785	12	12,3	0,2	2,46	1628	0,7	0,3
773,5	12	12,38	0,19	2,3522	1628	0,7	0,38	785,5	12	12,14	0,18	2,1852	1618	0,71	0,14
774	12	12,38	0,19	2,3522	1628	0,7	0,38	786	12	12,24	0,18	2,2032	1613	0,73	0,24
774,5	12	12,09	0,17	2,0553	1558	0,71	0,09	786,5	12	12,24	0,18	2,2032	1613	0,73	0,24
775	12	12,11	0,18	2,1798	1573	0,72	0,11	787	12	12,14	0,18	2,1852	1607	0,69	0,14
775,5	12	12,15	0,19	2,3085	1608	0,7	0,15	787,5	12	11,87	0,17	2,0179	1573	0,7	0,13
776	12	12,15	0,19	2,3085	1608	0,7	0,15	788	12	12,12	0,17	2,0604	1579	0,71	0,12
776,5	12	12,08	0,18	2,1744	1601	0,73	0,08	788,5	12	11,89	0,18	2,1402	1585	0,69	0,11
777	12	12,2	0,18	2,196	1601	0,73	0,2	89	12	11,89	0,18	2,1402	1585	0,69	0,11
777,5	12	12,2	0,19	2,318	1607	0,71	0,2	789,5	12	12,07	0,18	2,1726	1578	0,71	0,07
778	12	12,2	0,19	2,318	1607	0,71	0,2	790	12	12,02	0,18	2,1636	1558	0,67	0,02
778,5	12	12,19	0,19	2,3161	1613	0,71	0,19	790,5	12	11,94	0,16	1,9104	1558	0,71	0,06
779	12	12,33	0,19	2,3427	1607	0,74	0,33	791	12	11,94	0,16	1,9104	1558	0,71	0,06
779,5	12	12,34	0,19	2,3446	1602	0,73	0,34	791,5	12	12,09	0,17	2,0553	1558	0,67	0,09
780	12	12,4	0,2	2,48	1628	0,72	0,4	792	12	11,92	0,17	2,0264	1548	0,7	0,08
780,5	12	12,4	0,2	2,48	1628	0,72	0,4	792,5	12	11,83	0,17	2,0111	1548	0,68	0,17
781	12	12,33	0,19	2,3427	1623	0,71	0,33	793	12	11,83	0,17	2,0111	1548	0,68	0,17
781,5	12	12,33	0,19	2,3427	1633	0,72	0,33	793,5	12	11,3	0,2	2,26	1501	0,68	0,7
782	12	12,24	0,19	2,3256	1628	0,74	0,24	794	12	11,52	0,2	2,304	1510	0,69	0,48

794,5	12	11,32	0,18	2,0376	1491	0,7	0,68
795	12	11,32	0,18	2,0376	1491	0,7	0,68
795,5	12	11,28	0,18	2,0304	1481	0,71	0,72
796	12	11,43	0,18	2,0574	1466	0,7	0,57
796,5	12	11,3	0,2	2,26	1486	0,7	0,7
797	12	11,3	0,2	2,26	1486	0,7	0,7
797,5	12	11,75	0,21	2,4675	1510	0,76	0,25
798	12	12,08	0,23	2,7784	1612	0,76	0,08
798,5	12	11,93	0,25	2,9825	1601	0,74	0,07
799	12	11,92	0,25	2,98	1613	0,73	0,08
799,5	12	11,92	0,25	2,98	1613	0,73	0,08
800	12	11,99	0,24	2,8776	1607	0,77	0,01
800,5	12	12,1	0,24	2,904	1602	0,75	0,1
801	12	12,06	0,26	3,1356	1601	0,73	0,06
801,5	12	12,06	0,26	3,1356	1601	0,73	0,06
1226	12	12,29	0,28	3,4412	1698	0,79	0,29
1226,5	12	12,49	0,29	3,6221	1704	0,82	0,49
1227	12	12,18	0,27	3,2886	1704	0,82	0,18
1227,5	12	12,18	0,27	3,2886	1704	0,82	0,18
1228	12	12,34	0,3	3,702	1722	0,8	0,34
1228,5	12	12,31	0,29	3,5699	1698	0,81	0,31
1229	12	12,47	0,3	3,741	1716	0,83	0,47
1229,5	12	12,47	0,3	3,741	1716	0,83	0,47
1230	12	12,37	0,29	3,5873	1704	0,83	0,37

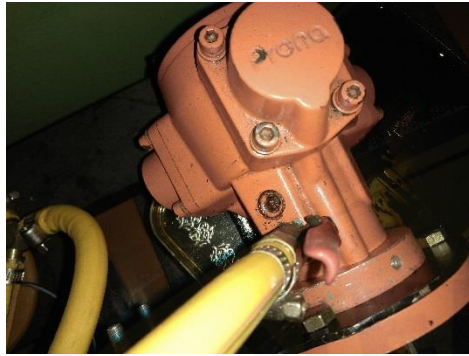
1230,5	12	12,25	0,29	3,5525	1698	0,8	0,25
1231	12	12,4	0,31	3,844	1722	0,81	0,4
1231,5	12	12,4	0,31	3,844	1722	0,81	0,4
1232	12	12,46	0,3	3,738	1716	0,84	0,46
1241	12	12,4	0,29	3,596	1698	0,82	0,4
1241,5	12	12,4	0,29	3,596	1698	0,82	0,4
1242	12	12,36	0,3	3,708	1698	0,82	0,36
1242,5	12	12,42	0,31	3,8502	1710	0,79	0,42

NB: Pengujian dilakukan selama 1242,5 s atau selama 20,71 menit dengan rata – rata *error steady state* sebesar **0,51 V**.

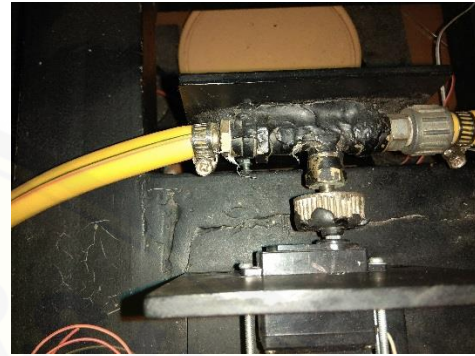
Keterangan warna:

-  : *Steady state*
-  : *Rise time*
-  : *Over damped*
-  : *Over shoot*
-  : Daerah respon kendali sistem

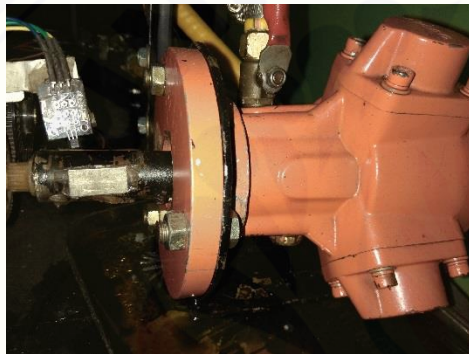
Lampiran F. Dokumentasi Penelitian



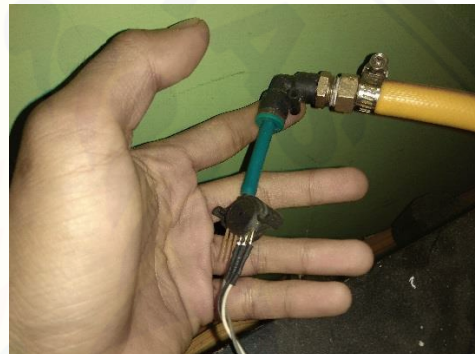
*Inlet In Air Motor*



*Servo Untuk Pengaturan Valve*



*Inlet Out Air Motor*



*Sensor Tekanan*



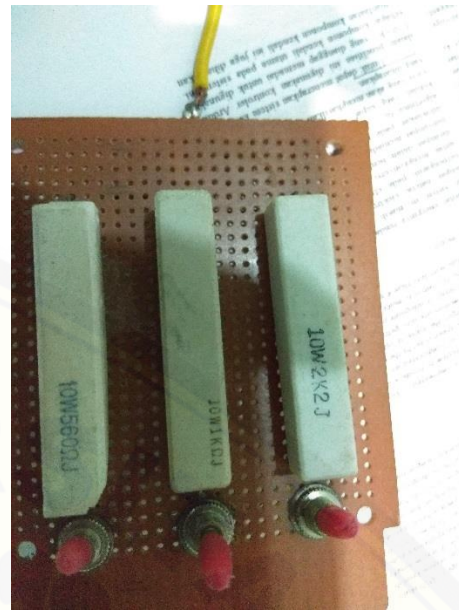
*Pressure Gauge*



*Couple Turbin (Air Motor) dengan Generator*



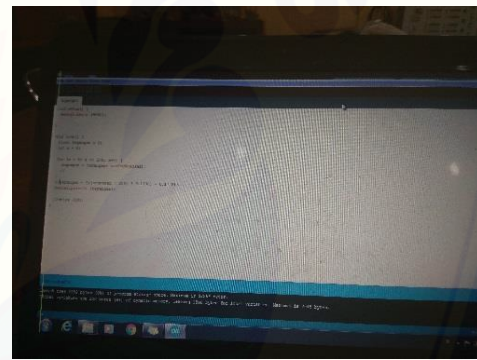
Rangkaian Keseluruhan Kendali



Rangkaian Beban Resistor



Proses Kalibrasi



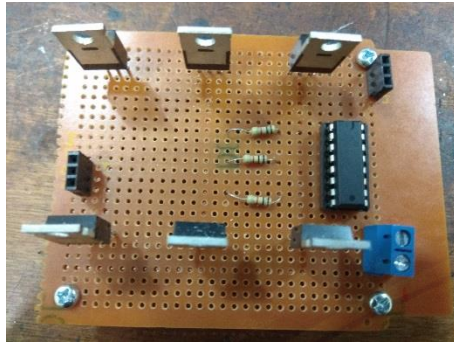
Proses Pemrograman Kendali



Dokumentasi Kalibrasi Sensor



Dokumentasi Proses Pemrograman



Driver Untuk Servo



Keseluruhan Sistem

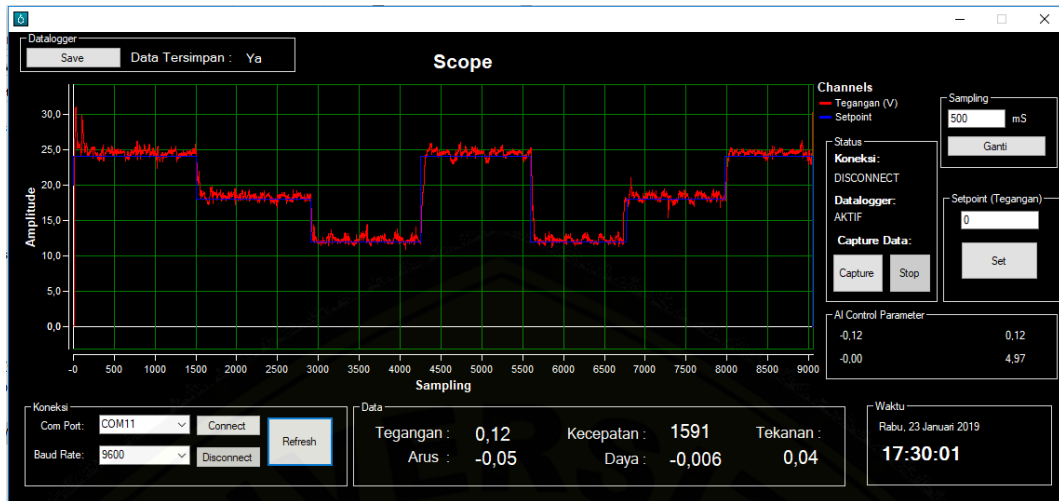


Couple Antara Generator dan Turbin



Penempatan Sensor Kecepatan dan Magnet

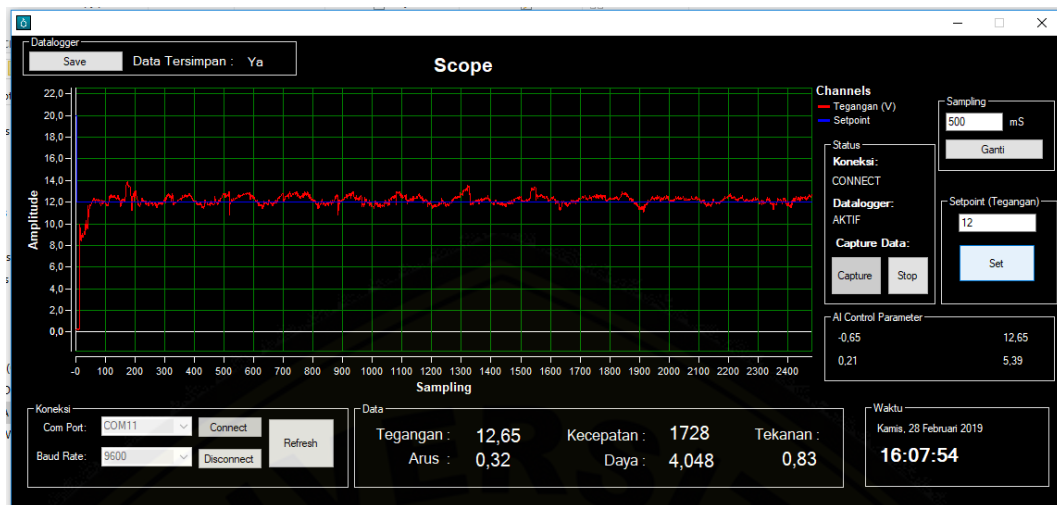




Grafik Monitoring Pengujian Tanpa Beban dengan Model Perpindahan Nilai Set Point



Grafik Monitoring Pengujian Berbeban dengan Model Pelepasan dan Pemberian Beban Resistansi 56 Ohm



Grafik Monitoring Pengujian Berbeban dengan beban LED