

**PENGONTROLAN TEGANGAN *OUPUT* PADA *PLANT* GENERATOR  
SET DC (TYPE 73411) DI LABORATORIUM SISTEM KONTROL  
MENGUNAKAN *SELF-TUNING CONTROLLER* (STC)**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



**MUHAMMAD ALFIAN PALKKA**  
**NIM. 145060301111075**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**MALANG**  
**2018**



**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGONTROLAN TEGANGAN *OUTPUT* PADA *PLANT*  
GENERATOR SET DC (TYPE 73411) DI LABORATORIUM SISTEM  
KONTROL MENGGUNAKAN *SELF-TUNING CONTROLLER* (STC)**

**SKRIPSI**

**TEKNIK ELEKTRO KONSENTRASI TEKNIK KONTROL**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**MUHAMMAD ALFIAN PALKKA**

**NIM. 145060301111075**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing

Pada tanggal 24 Juli 2018

Mengetahui,

**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Dosen Pembimbing**

**Ir. Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D., IPM**

**NIP. 197305202008011013**

**Goegoes Dwi Nusantoro, ST., MT.**

**NIP. 197110132006041001**

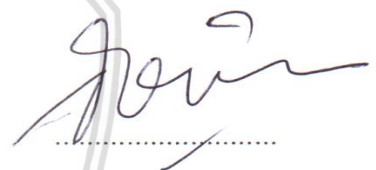
**JUDUL SKRIPSI :**

**PENGONTROLAN TEGANGAN *OUPUT* PADA *PLANT* GENERATOR SET DC (TYPE 73411) DI LABORATORIUM SISTEM KONTROL MENGGUNAKAN *SELF-TUNING CONTROLLER* (STC)**

Nama Mahasiswa : Muhammad Alfian Palkka  
 NIM : 145060301111075  
 Program Studi : Teknik Elektro  
 Konsentrasi : Teknik Kontrol

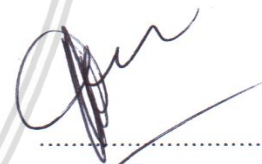
**KOMISI PEMBIMBING :**

Ketua : Goegoes Dwi Nusantoro, S.T, M.T.



**TIM DOSEN PENGUJI :**

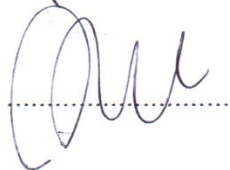
Dosen Penguji 1 : Ir. Purwanto, M.T.



Dosen Penguji 2 : Rahmadwati, S.T., M.T., Ph.D.



Dosen Penguji 3 : Dr. Ir. Bambang Siswojo, M.T.



Tanggal Ujian : 20 Juli 2018

SK Penguji : No. 1498 Tahun 2018



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

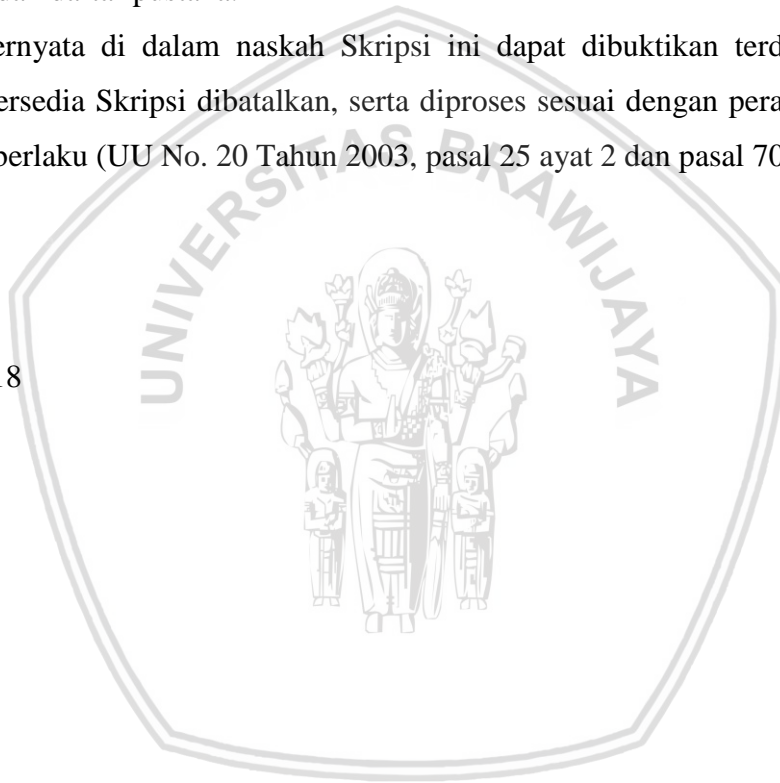
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Juli 2018

**Mahasiswa,**

**Muhammad Alfian Palkka**

**NIM. 145060301111075**



## PENGANTAR

*Bismillahirrohmanirrohim.* Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengontrolan Tegangan *Ouput* Pada *Plant* Generator Set DC (Type 73411) Di Laboratorium Sistem Kontrol Menggunakan *Self-Tuning Controller* (STC)” dengan baik. Tak lepas shalawat serta salam tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan bagi yang mengharapkan rahmat dan hidayah-Nya.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dorongan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar – besarnya kepada:

- Mama dan Ayah tercinta, Ibu Sri Rachmi Firdausi dan Bapak Yunalis Zain yang selalu memberikan kasih sayang dan doa yang tak pernah putus.
- Adik tersayang, Rifqi Farrel Muhammad dan Yafi Nabil Muhammad yang memberikan semangat.
- Saudara tersayang, Merry, Regina, Luthfy, Ian, Aal, dan Dani.
- Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ir. Nurussa’adah, MT. selaku Sekertaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ali Mustofa, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
- Ir. Purwanto, MT. selaku KKDK Teknik Kontrol.
- Dr. Ir. Erni Yudaningtyas, MT. selaku Kepala Laboratorium Sistem Kontrol yang selalu memberikan dukungan dan motivasi.
- Goegoes Dwi Nusantoro, ST., MT. sebagai dosen pembimbing yang telah banyak memberikan kesempatan, nasehat, pengarahan, motivasi, saran dan masukan.
- Mbak Eka Desiana sebagai pranata laboratorium sistem kontrol yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan berbagi cerita.
- Teman-teman asisten laboratorium sistem kontrol, Mas Yudha, Mas Zaini, Mas Iqbal, Mas Ronny, Mas Rifan, Mba Anna, Mba Diana, Iqbal, Alfin, Aldi, Pangky, Vilard, Boby, Canggih, Iqbal, Yoppy, Ateng, Firda, Nike, Godham, Kukuh N, Fajar, Karil, Galih, Rizal, Ikma, Amel, Candra, Adrian, dan Tri Agung terimakasih telah memberikan bannanyak bantuan dan canda tawa.
- Mbak Diana, Mas Yudha, dan Mas Ronny yang telah memberikan bantuan dan motivasi

- Octa, Galih, Ridho, Revo, dan Canggih yang telah memberikan bantuan
- Teman teman pengurus inti EME HME FT UB Periode 2017/2018, Gammal, Ical, Jihad, Vio, Titah, Bang Rif, Raka, Wildan, dan Danang selaku Ketua Angkatan yang memberikan dukungan.
- Teman-teman seperjuangan SMA, Dinan, Pixa, Raihan, Sasa, dan Kepas yang selalu memberikan keceriaan.
- Teman-teman Kontrakan Sumbersari 90, Ichi, Magnus, Murpid, Boim, Ralfi, dan Reza yang selalu berbagi keceriaan.
- Keluarga besar Teknik Kontrol 2014 dan Dioda 2014 untuk dukungan dan semangat.
- Halidazia untuk kesebaran, bantuan, saran, doa, dan semangat yang tak pernah putus.
- Semua pihak, yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa skripsi ini belumlah sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis berharap kritik dan saran untuk penyempurnaan tulisan di masa yang akan datang. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Juli 2018

Penulis

## RINGKASAN

**Muhammad Alfian Palkka**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2018, *Pengontrolan Tegangan Output Pada Plant Generator Set DC (Type 73411) Di Laboratorium Sistem Kontrol Menggunakan Self-Tuning Controller (STC)*, Dosen Pembimbing: Goegoes Dwi Nusantoro, ST., MT.

Plant motor generator DC 73411 merupakan salah satu panel pelatihan di Laboratorium Sistem Kontrol Universitas Brawijaya Malang. Plant motor generator DC 73411 memiliki karakteristik saat diberi beban maka tegangan *output* pada generator akan mengalami drop tegangan, sehingga mengakibatkan tegangan *output* tidak sesuai dengan apa yang diinginkan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka digunakan kontroler PID dengan metode *self-tuning controller*. Pengontrolan dengan metode *self-tuning controller* mampu mengubah nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$  secara terus menerus pada kontroler PID berdasarkan pembacaan *error* sampai respon mendekati dengan *setpoint*. Salah satu metode *self-tuning controller* yang dipakai dalam skripsi ini adalah Dahlin PID Controller. Metode pencarian estimasi dilakukan menggunakan *Recursive Least Square* (RLS), sehingga proses identifikasi berjalan secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan respon sistem yang dihasilkan dari penggunaan *self-tuning controller* ini memiliki nilai error steady state dibawah 5% dan tidak memiliki overshoot. Pada pengujian dengan gangguan berupa beban resistif tegangan output dapat mendekati setpoint yang diinginkan dengan *recovery time* kurang dari 5 detik.

**Kata Kunci:** Generator DC, *Self-Tuning Controller*, *Recursive Least Square*.



## SUMMARY

**Muhammad Alfian Palkka**, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering University of Brawijaya, July 2018, *Control of Output Voltage Generator Set DC (type 73411) in Control System Laboratory Using Self-Tuning Controller (STC)*, Academic Supervisor: Goegoes Dwi Nusantoro, ST., MT

*73411 DC motor generator plant is one of training panel in Control System Laboratory of Malang Brawijaya University. 73411 DC motor generator plant have a characteristic, the generator's output will coming through voltage drop if be given load and because of that, resulting in an output voltage not in accordance with what is desired. To solve the problem, use the methods of self-tuning controllers. By using self-tuning controller parameter values  $K_p$ ,  $K_i$ , and  $K_d$  will change constantly until the response in steady state state based on error system. One method of self-tuning controller used in this undergraduate thesis is Dahlin PID Controller. For estimation searching, using the estimation method Recursive Least Square (RLS), so the identification process runs in real-time. According to the research, response systems resulting from the use of self-tuning PID controller when the system is not given disorder has an average value of steady state error below 5% and experienced no overshoot. In the test when given the disturbances of resistive load the output voltage can approach the desired setpoint with recovery time less than 5 seconds.*

**Keywords:** DC Generator, Self-Tuning Controller, Recursive Least Square.

## DAFTAR ISI

<b>RINGKASAN</b> .....	<b>i</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>ii</b>
<b>PENGANTAR</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>ix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
<b>BAB II DASAR TEORI</b> .....	<b>5</b>
2.1 Generator <i>Direct Current</i> (DC).....	5
2.2 Plant Motor Generator DC (73411).....	7
2.3 Sensor Tegangan.....	7
2.4 STM32F4 <i>Discovery</i> .....	8
2.5 <i>Driver motor H-Bridge</i> L289.....	9
2.6 Beban Resistif.....	10
2.7 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM).....	11
2.8 Matlab R2013a.....	12
2.9 Kontroler.....	12
2.9.1 Kontroler Proporsional (P).....	13
2.9.2 Kontroler <i>Integral</i> (I).....	13
2.9.3 Kontroler Differensial (D).....	14
2.9.4 Kontroler Proporsional <i>Integral</i> Differensial (PID).....	14
2.10 <i>Self-Tuning Controller</i> (STC).....	15
2.11 <i>Recursive Least Square</i> (RLS).....	16
2.12 Dahlin PID <i>Controller</i> .....	18

<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>21</b>
3.1 Perancangan Diagram Blok Sistem .....	21
3.2 Spesifikasi Desain.....	22
3.3 Karakterisasi Setiap Blok.....	22
3.3.1 Karakterisasi Plant Motor Generator DC 73411 .....	22
3.3.2 Karakterisasi <i>Driver</i> L298.....	24
3.3.3 Karakterisasi Sensor Tegangan .....	26
3.3.4 Karakterisasi Pengujian Gangguan pada <i>Plant</i> Generator DC 73411 .....	28
3.4 Perancangan Perangkat Keras.....	30
3.5 Perancangan dan Pembuatan Program <i>Self-Tuning Controller</i> .....	30
3.6 Penentuan Nilai Awal Parameter Estimasi Dan Parameter Kontrol.....	35
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Pengujian Sistem Tanpa Gangguan .....	37
4.2 Pengujian Sistem Dengan Beberapa Gangguan.....	39
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>45</b>
5.1 Kesimpulan .....	45
5.2 Saran .....	45
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>47</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>49</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Konstruksi generator DC.....	4
<b>Gambar 2.2</b> <i>Plant</i> motor generator DC.....	5
<b>Gambar 2.3</b> Sensor tegangan .....	6
<b>Gambar 2.4</b> STM32F4 <i>Discovery</i>	
<b>Gambar 2.5</b> Driver motor L298 .....	7
<b>Gambar 2.6</b> Beban resistif jenis lampu pijar.....	8
<b>Gambar 2.7</b> Sinyal PWM.....	8
<b>Gambar 2.8</b> Tampilan Software Matlab R2013a .....	12
<b>Gambar 2.9</b> Diagram Blok Kontroler <i>Proportional</i> .....	14
<b>Gambar 2.10</b> Diagram Blok Kontroler <i>Integral</i> .....	16
<b>Gambar 2.11</b> Diagram Blok kontroler <i>Derivative</i> .....	18
<b>Gambar 2.12</b> Diagram Blok Kontroler PID.....	20
<b>Gambar 2.13</b> Diagram Blok <i>Self-Tuning Controller</i> .....	21
<b>Gambar 3.1</b> Diagram Blok Sistem .....	22
<b>Gambar 3.2</b> Perubahan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan motor generator DC .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Perubahan tegangan keluaran <i>driver</i> terhadap <i>duty cycle</i> .....	28
<b>Gambar 3.4</b> Perubahan tegangan pembacaan sensor terhadap tegangan masukan generator DC .....	28
<b>Gambar 3.5</b> Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 0,8 watt .....	28
<b>Gambar 3.6</b> Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 1,6 watt .....	29
<b>Gambar 3.7</b> Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 3,4 watt .....	30
<b>Gambar 3.8</b> Skema pembuatan perangkat keras .....	30
<b>Gambar 3.9</b> <i>Power Supply Unit (PSU)</i> .....	30
<b>Gambar 3.10</b> STM32F4 <i>Discovery</i> .....	31
<b>Gambar 3.11</b> Sensor tegangan .....	32
<b>Gambar 3.12</b> <i>Driver motor</i> L298 .....	32
<b>Gambar 3.13</b> Rangkaian beban resistif .....	32
<b>Gambar 3.14</b> Komputer yang terinstall cocox code .....	33

<b>Gambar 3.15</b> <i>Plant</i> motor generator DC 73411 .....	34
<b>Gambar 3.16</b> Struktur model ARX 35 .....	34
<b>Gambar 3.17</b> <i>System Indetification Tool</i> .....	35
<b>Gambar 3.18</b> Sinyal output dari estimasi model.....	35
<b>Gambar 3.19</b> <i>Flowchart</i> sistem keseluruhan .....	36
<b>Gambar 4.1</b> Respon sistem dengan setpoint 12 volt.....	37
<b>Gambar 4.2</b> Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 volt .....	38
<b>Gambar 4.3</b> Perubahan nilai parameter gain kontroler PID dengan setpoint 12 volt .....	38
<b>Gambar 4.4</b> Respon sistem dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt ....	39
<b>Gambar 4.5</b> Perubahan nilai estimasi pada setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt .....	40
<b>Gambar 4.6</b> Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt.....	40
<b>Gambar 4.7</b> Respon sistem dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 1,6 watt ....	41
<b>Gambar 4.8</b> Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 1,6 watt .....	41
<b>Gambar 4.9</b> Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 V dengan gangguan beban 1,6 W .....	42
<b>Gambar 4.10</b> Respon sistem dengan setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W .....	43
<b>Gambar 4.11</b> Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W .....	43
<b>Gambar 4.12</b> Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W .....	43

**DAFTAR TABEL**

**Tabel 3.1** Nilai tegangan keluaran terhadap tegangan masukan motor generator DC.....17  
**Tabel 3.2** Nilai tegangan keluaran *driver* terhadap masukan sinyal PWM .....19  
**Tabel 3.3** Nilai tegangan pembacaan sensor terhadap tegangan masukan motor generator DC  
 .....20





## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Energi listrik telah menjadi kebutuhan penting untuk menunjang aktifitas manusia. Meningkatnya permintaan untuk energi listrik merupakan salah satu masalah yang perlu diperhatikan (Nurafif L, 2012). Saat ini banyak berkembang sistem kontrol untuk mengatur proses dan juga hasil dari energi listrik guna menjadikan sumber energi listrik yang handal. Efisiensi pengontrolan perangkat listrik juga berpengaruh dalam kehandalan output yang dihasilkan. Generator DC merupakan sebuah perangkat listrik dinamis yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Karakteristik generator DC saat diberi beban maka output pada generator akan mengalami drop tegangan, sehingga mengakibatkan generator tersebut tidak bekerja dengan baik dikarenakan tegangan keluaran tidak sesuai dengan yang diinginkan (Nugraha, 2016).

Laboratorium Sistem Kontrol Teknik Elektro Universitas Brawijaya memiliki panel pelatihan berupa motor generator DC tipe 73411. Motor Generator DC 73411 terdiri dari generator DC yang dikopel dengan motor DC. Plant motor generator DC 73411 dapat dihubungkan ke beban listrik.

Penelitian terdahulu yang pernah dilakukan oleh (Nugraha,2016) pada pengontrolan tegangan *output plant* generator DC 73411 menggunakan metode struktur *state feedback control* memiliki kekurangan yaitu penggunaan fungsi alih yang dianggap berupa gain sehingga tidak mempertimbangkan karakteristik generator. Hal ini dikarenakan jika menggunakan fungsi alih yang didapatkan berdasarkan analisis matematis dan PRBS ada beberapa parameter yang berubah-ubah yaitu nilai resistansi beban generator.

Berdasarkan permasalahan tersebut, maka diperlukan suatu sistem pengendalian adaptif salah satunya Self-Tuning Controller (STC) yang merupakan suatu skema teknik kendali adaptif dimana parameter dari sistem diestimasi dan hasil estimasi parameter yang telah dihitung digunakan untuk mendapat parameter kontrol. (Bobal, 2005: 13). *Recursive Least Square* (RLS) merupakan suatu metode identifikasi sistem dengan kelebihan



menganggap sistem fisik yang akan dimodelkan sebagai sebuah *black box*, sehingga apapun





jenis komponen yang ada di dalam sistem fisik dan apapun jenis bahannya tidak dipermasalahkan dan tidak perlu diperhatikan. Selain itu, algoritma RLS ini dapat diaplikasikan secara *real time* (Bobal, 2005; 32).

Pada skripsi ini akan melakukan penelitian lebih lanjut pengontrolan tegangan *output* pada *plant* generator DC 73411 menggunakan metode sistem pengendalian adaptif yaitu *Self-Tuning Controller* (STC) berupa Dahlin PID dengan metode estimasi *Recursive Least Square* (RLS) dengan harapan mampu menghasilkan respon sistem yang baik dan dapat mengidentifikasi *plant* dengan mempertimbangkan karakteristik dari *plant*.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, dapat disusun rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem pengendalian tegangan *output* pada *plant* generator DC 73411 menggunakan *self-tuning controller*?
2. Bagaimana performansi respon sistem jika diberi gangguan berupa beban resistif?

### 1.3 Batasan Masalah

Karena luasnya objek pengkajian sehingga perlu adanya pembatasan masalah agar pembahasan lebih terfokus pada rumusan masalah. Dalam perancangan skripsi ini permasalahan dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Menggunakan *plant* sebuah prototype generator DC dalam bentuk motor generator DC (type 734 11) milik Laboratrium Sistem Kontrol FT UB.
2. Plant motor generator set DC (type 73411) terdiri atas 2 unit motor DC D-6759, 1 motor sebagai penggerak generator dan yang lainnya digunakan sebagai generator DC.
3. Motor DC D-6759 mempunyai spesifikasi, catu daya maksimal 24 V, arus 0,47 A, daya 3,8 W dan batas kecepatan 0-3000rpm.
4. Kontroler yang digunakan adalah mikrokontroler.
5. Gangguan berupa beban resistif berupa lampu bohlam dengan daya 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt.
6. Menggunakan metode estimasi online berupa *Recursive Least Square* (RLS).
7. Menggunakan desain *PID Dahlin Controller*.
8. Pada skripsi ini digunakan *software* matlab2013b.
9. Menggunakan mikrokontroler *STM32F4 Discovery*.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari skripsi ini adalah merancang dan mengaplikasikan sistem pengendalian tegangan *output* menggunakan *self-tuning controller* dan mengetahui respon sistem ketika diberi gangguan berupa beban resistif.

#### 1.5 Manfaat

Manfaat skripsi ini adalah dapat dipahaminya sistem pengendalian tegangan *output* menggunakan *self-tuning controller* dan mengetahui respon sistem ketika diberi gangguan berupa beban resistif.





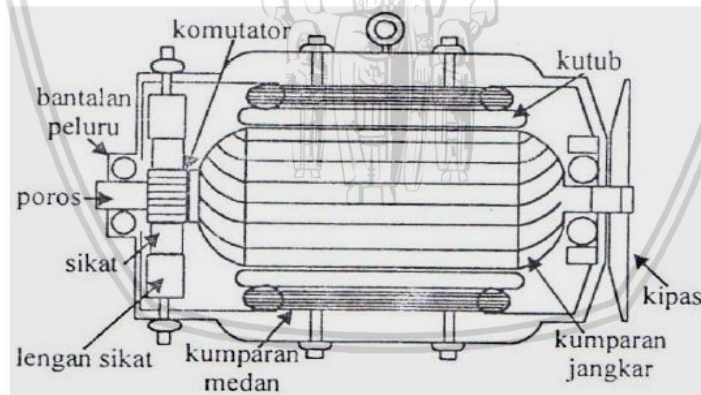
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Generator *Direct Current* (DC)

Generator *Direct Current* (DC) merupakan sebuah piranti elektronik yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Energi mekanis di pergunakan untuk memutar kumparan kawat penghantar di dalam medan magnet. Energi yang dipergunakan bisa berbentuk uap, turbin air, mesin bensin, atau motor listrik.

Generator DC memiliki konstruksi yang terdiri atas dua bagian yaitu bagian yang berputar (rotor) dan bagian yang diam (stator). Contoh dari stator adalah rangka, komponen magnet dan komponen sikat. Sedangkan yang termasuk rotor adalah jangkar, kumparan jangkar dan komutator (Ardian, 2010: 6). Secara umum, konstruksi generator DC dapat dilihat pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Konstruksi generator DC  
Sumber: Ardian, 2010: 7

Prinsip kerja dari suatu generator DC adalah berdasarkan hukum Faraday mengenai induksi elektromagnetik. Hukum Faraday menyebutkan “Apabila suatu konduktor digerakkan dan memotong garis-garis gaya magnetik (fluksi), maka pada konduktor tersebut akan timbul suatu gaya gerak listrik (g.g.l.)” (Soemarwanto, 2010: 79)

Jika kumparan kawat dihubungkan dengan rangkaian listrik tertutup, maka akan timbul pula arus listrik yang mengalir pada rangkaian. Berdasarkan Hukum Induksi Faraday/ Hukum Faraday besarnya g.g.l. yang diinduksikan satu belitan adalah:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} 10^{-8} \text{ volt } (\phi \text{ dalam Maxwell}) \quad (2-1)$$

Untuk N belitan maka:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \times 10^{-8} \text{ volt} \quad (2-2)$$

Apabila kecepatan putara =  $\frac{n \text{ putaran}}{\text{menit}}$ , maka untuk 1 putaran =  $\frac{1}{n}$  menit =  $\frac{60}{n}$  detik, konduktor akan memotong  $P \times \phi$  Maxwell, sehingga:

$$e_{rata-rata} = \frac{p \cdot \phi}{60/n} \times 10^{-8} \text{ Volt} = \frac{p \cdot n \cdot \phi}{60} \times 10^{-8} \quad (2-3)$$

Karena ada  $\frac{z}{a}$  konduktor pada setiap cabang jangkar paralel, maka:

$$E = \frac{z \cdot p \cdot n \cdot \phi}{a \cdot 60} \times 10^{-8} \text{ Volt} \quad (2-4)$$

$$E = \frac{p \cdot n}{a \cdot 60} \cdot z \cdot \phi \times 10^{-8} \text{ Volt} \quad (2-5)$$

dengan:

P = Jumlah kutub.

a = Jumlah cabang jangkar paralel.

n = Jumlah putaran (putaran/menit).

z = Jumlah konduktor di jangkar.

$\phi$  = Fluksi tiap kutub (Maxwell).

Di dalam generator DC besar p, a, dan z adalah tertentu/ tetap/ konstan. Maka dari persamaan 2-5, apabila  $\frac{p}{a} \cdot \frac{1}{60} \cdot z \times 10^{-8} C$  konstan, maka:

$$E = C \cdot n \cdot \phi \text{ Volt} \quad (2-6)$$

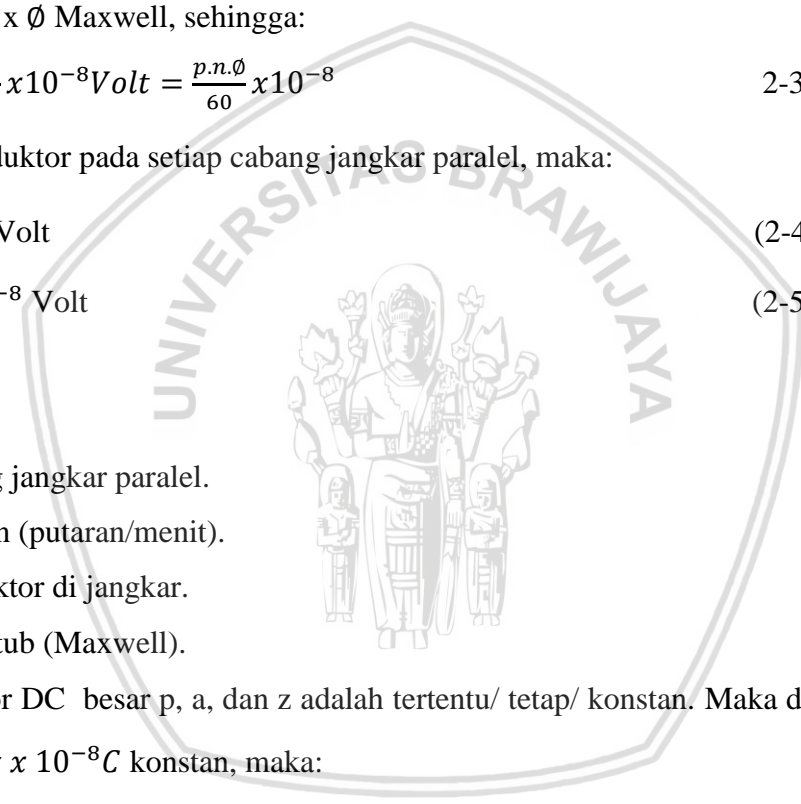
Dengan:

E : Tegangan induksi

C : Konstanta

n : Jumlah putaran (putaran/menit).

$\phi$  : Fluksi tiap kutub (Maxwell).



## 2.2 Plant Motor Generator DC (73411)

*Plant* motor generator DC merupakan sebuah panel pelatihan yang dimiliki oleh Laboratorium Sistem Kontrol Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang. *Plant* tersebut terdiri dari generator DC yang dikopel dengan motor DC. Putaran motor DC diubah oleh generator DC menjadi tegangan listrik. Motor DC tersebut mempunyai spesifikasi yaitu catu tegangan sumber maksimal 20 V, arus 0,47 A, daya 3,8 W dan range kecepatan (0–3000) rpm. Bentuk fisik dari *plant* generator DC (73411) dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 *Plant* motor generator DC

## 2.3 Sensor Tegangan

Sensor merupakan sebuah piranti yang berfungsi membaca nilai keluaran sistem. Sensor yang digunakan menggunakan prinsip pembagi tegangan. Piranti tersebut dapat mengurangi tegangan input hingga lima kali dari tegangan aslinya sehingga range tegangan input dari sensor tersebut adalah 0-25 V. Sensor tersebut memiliki resolusi analog sebesar 0.00489V. Dimana, input konektor terminal katoda dihubungkan ke Vcc dan anoda ke Ground (GND). Bentuk fisik dari modul sensor tegangan ada pada Gambar 2.3.

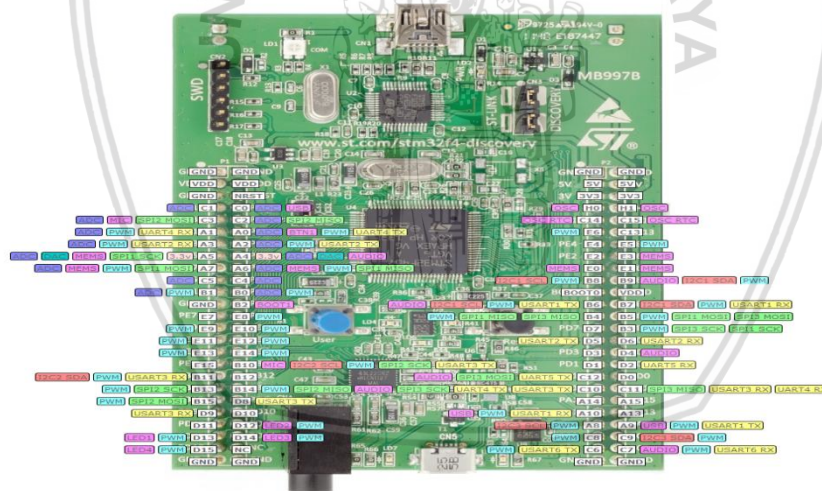




**Gambar 2.3** Sensor tegangan  
 Sumber: <http://instructables.com>

## 2.4 STM32F4 Discovery

STM32F4 *Discovery* adalah modul mikrokontroler produksi dari ST Microelectronics. Core dari Mikrokontroler ini adalah ARM Cortex™-M4 yang merupakan core mikrokontroler 32-bit. Mikrokontroler ini terdiri dari pin *Input Output* (I/O) berjumlah 82 pin sebagaimana ditunjukkan Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** STM32F4 *Discovery*  
 (Datasheet STM32F4 *Discovery*)

Salah satu kelebihan STM32F4 *Discovery* adalah kemampuan *floating point* secara *hardware*. Beberapa operasi matematika *floating point* 32bit dapat dilakukan oleh *microcontroller* ini hanya dengan 1 siklus mesin (1 *cycle*). Komputasi *floating point* biasa dipakai untuk pemrosesan sinyal digital yang memerlukan keakuratan yang tinggi atau bisa juga dipakai untuk pemrosesan audio atau *image* digital secara lebih mudah. Pada STM32F4



*Discovery* tertanam prosesor ARM Cortex™-M4 seri STM32F407VGT dengan *clock* maksimal 168MHz. Berikut spesifikasi STM32F4 *Discovery*:

- Core : Cortex-M4F
- Microcontroller : STM32F407VGT6
- Memory : 1MB Flash
- RAM : 192KB SRAM
- Package : LQFP100
- I/O pins : 82
- Timers(16-bit) : 12
- Advanced Control Timers : 2
- General Purpose Timers : 10
- Basic Timers : 2
- PWM Channels : 6
- ADC(12-bit) : 3 (16 channels)
- I2C(TWI) : 3
- USART : 4
- SPI : 3 full duplex
- DMA : 2 (8 channels each)
- USB : 1 (2.0 full speed)
- CAN : 2 (2.0 active)
- uP Supply Voltage : 1.8-3.6V

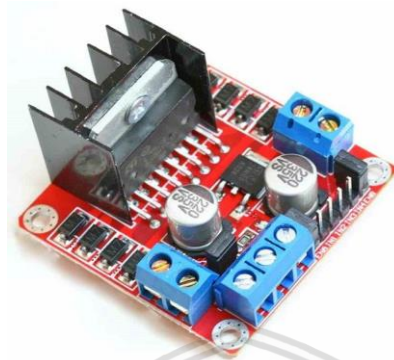
### 2.5 Driver Motor L289

*Driver motor* berfungsi sebagai pengubah sinyal PWM dari mikrokontroler menjadi tegangan. Dalam aplikasinya, *driver motor* biasanya tersusun dari rangkaian transistor-transistor yang tersusun sedemikian rupa sehingga mampu mengendalikan arah putar dan kecepatan motor berdasarkan arah loop dan tegangan kutub motor.

L298 adalah jenis IC driver motor yang dapat mengendalikan arah putaran dan kecepatan motor DC ataupun Motor stepper. Mampu mengeluarkan output tegangan untuk Motor dc dan motor stepper sebesar 50 volt. IC L298 terdiri dari transistor-transistor logik (TTL) dengan gerbang nand yang memudahkan dalam menentukan arah putaran suatu motor dc dan motor stepper. Dapat mengendalikan 2 untuk motor dc namun pada hanya dapat mengendalikan 1 motor stepper. Kelebihan akan modul driver motor L298 ini yaitu dalam hal kepresisian dalam mengontrol motor sehingga motor lebih mudah untuk dikontrol. Rangkaian ini dihubungkan ke STM32F4 *Discovery*. Bentuk fisik dari driver motor *H-Bridge* L289 adalah seperti pada Gambar

10

2.5.



**Gambar 2.5** Driver motor L298  
Sumber: Driver Motor L298 datasheet

## 2.6 Beban Resistif

Beban resistif yaitu beban yang terdiri dari komponen tahanan ohm saja (resistance), seperti elemen pemanas (heating element) dan lampu pijar. Beban jenis ini hanya mengkonsumsi beban aktif saja dan mempunyai faktor daya samadengan satu. Sifat beban resistif adalah arus beban resistif sefasa dengan tegangannya (Lanang, 2013: 4). Beban resistif yang dipakai pada penelitian ini adalah berjenis lampu pijar. Bentuk fisik dari beban resistif adalah seperti pada Gambar 2.6.



**Gambar 2.6** Beban resistif jenis lampu pijar  
Sumber: [http:// creativeelectro.com](http://creativeelectro.com)

Persamaan daya sebagai berikut :

$$P = VI$$

(2-7)

Dengan :

$P$  = daya aktif yang diserap beban (watt)

$V$  = tegangan yang mencatu beban (volt)

$I$  = arus yang mengalir pada beban (A)

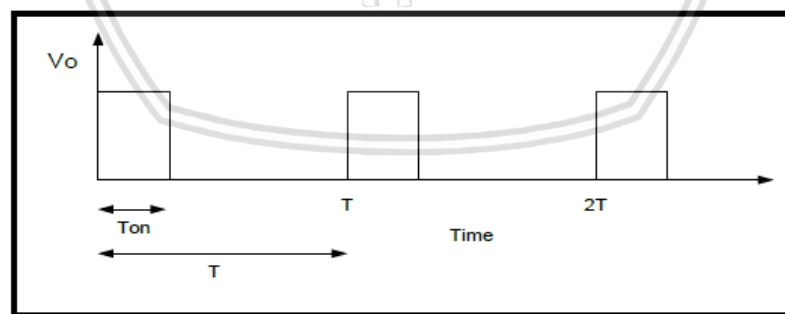
Jika suatu resistor dilewati oleh sebuah arus ( $I$ ), maka pada kedua ujung resistor tersebut akan timbul beda potensial atau tegangan, yang sesuai dengan Hukum Ohm, yaitu:

$$V_R = IR \quad (2-8)$$

Dengan  $V_R$  = tegangan di resistor (Volt),  $I$  = arus (Ampere),  $R$  = resistor (Ohm). Lampu pijar yang digunakan pada penelitian ini memiliki tegangan maksimal 2,5 volt dan arus maksimal 0,3 A. Lampu pijar yang digunakan disusun secara seri hingga nilai tegangan total beban, minimal sama dengan tegangan keluaran sistem. *Pulse Width*

## 2.7 Pulse Width Modulation (PWM)

*Pulse Width Modulation* (PWM) adalah salah satu jenis modulasi. Modulasi PWM dilakukan dengan cara mengubah lebar pulsa dari suatu pulsa data. Total 1 periode ( $T$ ) pulsa dalam PWM adalah tetap, dan data PWM pada umumnya menggunakan perbandingan pulsa positif terhadap total pulsa. Pada sinyal PWM, frekuensi sinyal konstan sedangkan *duty cycle* bervariasi dari 0%-100%. Dengan mengatur *duty cycle* akan diperoleh *output* yang diinginkan. *Duty cycle* adalah besarnya sinyal kontrol yang diberikan pada *plant*. Sinyal PWM secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Sinyal PWM  
Sumber: Ibrahim, 2016: 10

$$\text{Duty Cycle} = \frac{T_{on}}{T} \times 100\% \quad (2-9)$$

dimana:

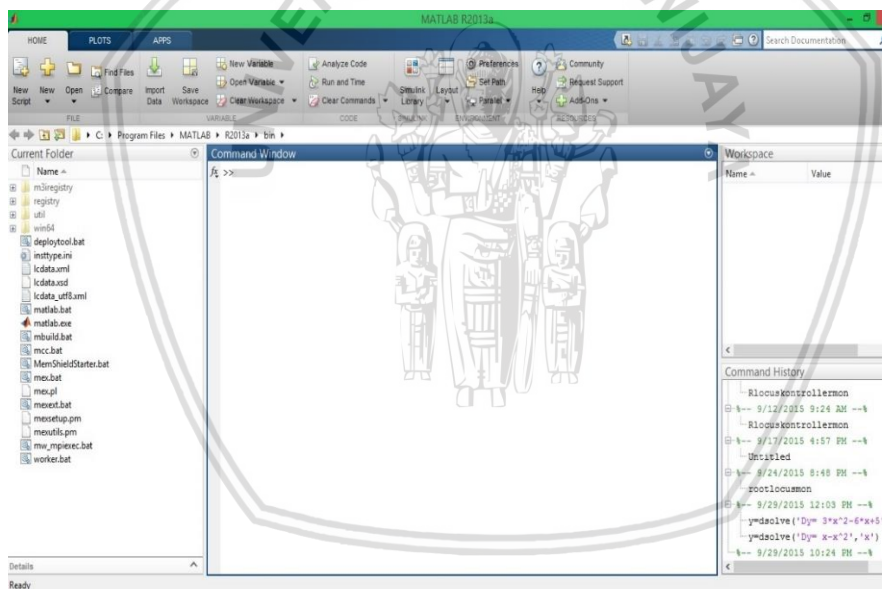
$T_{on}$  = periode logika tinggi

T = periode

## 2.8 Matlab R2013

Matlab (matrix laboratory) adalah sebuah lingkungan komputasi numerical dan bahasa pemrograman komputer generasi keempat. Dikembangkan oleh The Math Work, matlab memungkinkan manipulasi matriks, pemplotan fungsi dan data, implementasi algoritma, pembuatan antarmuka, dan peng-antarmuka-an dengan program dalam bahasa lain.

Dalam skripsi ini aplikasi matlab dipergunakan untuk mencari fungsi alih motor DC melalui data respon kecepatan motor yang diolah menggunakan beberapa fungsi yang terdapat di dalalam matlab. Serta dengan aplikasi matlab kita dapat melakukan simulink untuk mencari nilai  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  yang tepat untuk digunakan..



Gambar 2.8 Tampilan Software Matlab R2013a

## 2.9 Kontroler

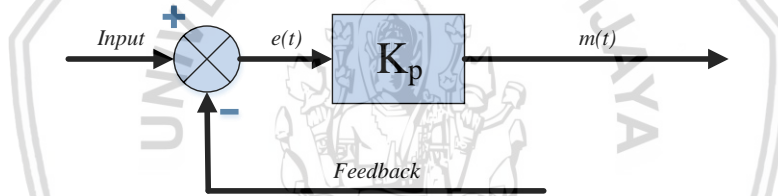
Kontroler dalam sebuah sistem kontrol mempunyai kontribusi yang besar terhadap perilaku sistem. Hal itu disebabkan oleh tidak dapat di rubahnya komponen penyusun sistem tersebut. Artinya, karakteristik *plant* harus diterima sebagaimana adanya, perubahan perilaku sistem hanya dapat dilakukan melalui penambahan kontroler.

Salah satu fungsi kontroler adalah mengurangi sinyal *error* sampai nol atau mendekati nol. Sinyal *error* merupakan selisih nilai *setpoint* dengan nilai *output plant*. *Setpoint* adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan *output plant* adalah nilai aktual yang terukur pada *output plant*. Semakin kecil nilai sinyal *error* maka kinerja sistem kontrol dianggap semakin baik.

Prinsip kerja kontroler adalah membandingkan nilai *output plant* dengan nilai *setpoint*, menentukan nilai kesalahan (nilai *error*) dan menghasilkan sinyal kontrol untuk meminimalkan *error* (Ogata K, 1997: 197).

**2.9.1 Kontroler Proporsional (P)**

Kontroler *proportional* memiliki *output* yang besarnya sebanding dengan besarnya sinyal *error*. *Output* kontroler merupakan hasil perkalian antara gain proporsional dengan sinyal *error*. Gambar 2.9 menunjukkan diagram blok kontroler *proportional* dan Persamaan 2-9 menunjukkan hubungan antara *output* kontroler dengan sinyal *error*.



Gambar 2.9 Diagram Blok Kontroler *Proportional* (Ogata K.,1997: 201)

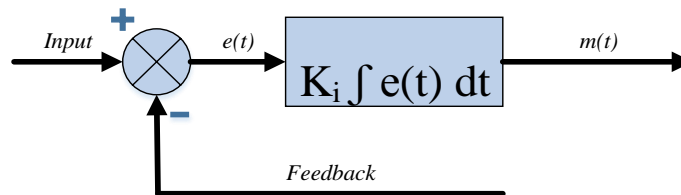
$$m(t) = Kp e(t) \tag{2-9}$$

dimana:

- $Kp$  : gain proporsiona
- $e(t)$  : sinyal *error*
- $m(t)$  : *output* kontroler

**2.9.2 Kontroler Integral (I)**

Kontroler *integral* memiliki karakteristik seperti sebuah operasi *integral*. *Output* kontroler merupakan hasil perkalian gain integral dengan penjumlahan terus menerus dari perubahan sinyal *error*. Gambar 2.10 menunjukkan diagram blok kontroler *integral* dan Persamaan 2-10 menunjukkan hubungan antara *output* kontroler dengan sinyal *error*.



**Gambar 2.10 Diagram Blok Kontroler Integral**  
(Ogata K., 1997: 202)

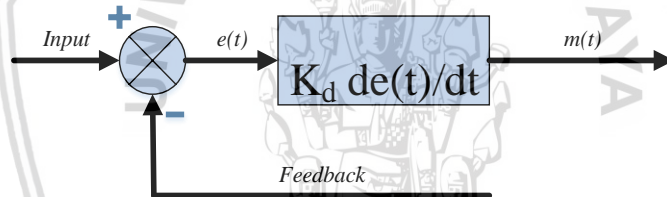
$$m(t) = K_i \int e(t) dt \quad (2-10)$$

dimana:

$K_i$  : gain integral  
 $e(t)$  : sinyal *error*  
 $m(t)$  : *output* kontroler

### 2.9.3 Kontroler *Differensial* (D)

Kontroler *derivative* memiliki sifat seperti suatu operasi *derivative* (turunan). Perubahan yang mendadak pada masukkan kontroler mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Kontroler ini tidak akan menghasilkan *output* pada saat sinyal *error* konstan sehingga tidak akan mempengaruhi keadaan mantap (*steady state*). Sehingga Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon *transient*. Gambar 2.11 menunjukkan diagram blok kontroler *derivative* dan Persamaan 2-11 menunjukkan hubungan antara *output* kontroler dengan sinyal *error*.



**Gambar 2.11 Diagram Blok kontroler *Derivative***  
(Ogata K., 1997: 203)

$$m(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-11)$$

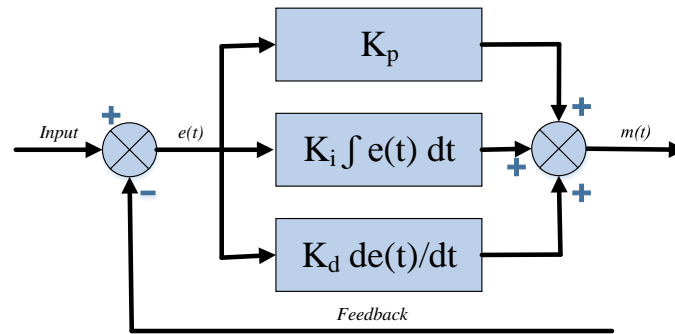
dimana:

$K_d$  : gain *derivative*  
 $e(t)$  : sinyal *error*  
 $m(t)$  : *output* kontroler

Kontroler ini digunakan untuk memperbaiki atau mempercepat respon *transient*.

### 2.9.4 Kontroler Proporsional Integral Differensial (PID)

Gabungan aksi kontrol *proportional*, *integral*, dan *derivative* yang terlihat dalam Gambar 2.12 mempunyai keunggulan dapat saling menutupi kekurangan dan kelebihan dari masing-masing kontroler. Persamaan kontroler PID ini dapat dinyatakan sebagai berikut (Persamaan 2-12):



Gambar 2.12 Diagram Blok Kontroler PID  
(Ogata K., 1997: 204)

$$m(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2-12)$$

dimana:

- $K_p$  : gain *proportional*
- $K_i$  : gain *integral*
- $K_d$  : gain *derivative*
- $e(t)$  : sinyal *error*
- $m(t)$  : *output* kontroler

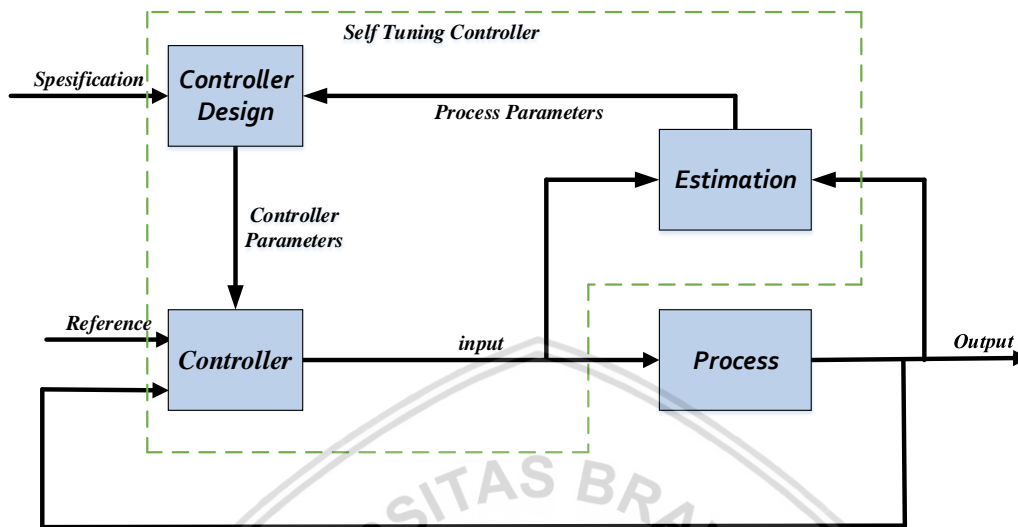
### 2.10 Self-Tuning Controller (STC)

Kontroler adaptif adalah kontroler yang dapat melakukan *adjustable* parameter dan mekanisme untuk mengatur parameter atau dalam pengertian umumnya berarti mengubah tingkah laku atau karakteristik untuk menyesuaikan diri terhadap keadaan yang baru atau tidak diketahui. Sebuah pendekatan kontrol adaptif yang berdasarkan *recursive estimation* (estimasi rekursif) dari karakteristik sistem dan gangguan serta dapat mengubah-ubah estimasi, sehingga memungkinkan untuk di amati. Dengan menggunakan pendekatan tersebut, kita dapat menggunakannya untuk merancang kontroler yang optimal. Dimana kontroler mengidentifikasi proses yang tidak diketahui dan kemudian mensintesis sinyal kontrol (Adaptif kontrol dengan rekursif identifikasi) yang disebut dengan *Self-Tuning Controller* (STC) (Bobal, 2005: 13). Dalam skema ini, parameter diestimasi dan hasil dari estimasi parameter tersebut, dihitung setelah itu digunakan untuk mendapatkan parameter kontrol yang baru.

Pada STC terdapat dua loop, yaitu *inner loop* dan *outer loop*. *Inner loop* terdiri dari *plant* (proses) dan kontroler dengan umpan balik biasa, sedangkan pada *outer loop* berfungsi untuk mengubah parameter dari kontroler, dimana terdiri estimasi parameter rekursif dan



perhitungan desain (Astrom, 2008: 21). Diagram Blok *Self Tuning Controller* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Diagram Blok *Self-Tuning Controller*  
(Astrom, 2008: 91)

Parameter dari model diidentifikasi secara *on-line* pada blok “*Estimation*” yang memberikan sebuah estimasi parameter *plant*. Pada blok “*Controller Design*” berisi perhitungan yang dibutuhkan untuk desain dari kontroler dengan metode yang telah ditentukan dan beberapa desain parameter yang telah di pilih. Setelah perhitungan selesai, hasil parameter dari blok *controller design* akan di implementasikan pada blok “*Controller*” (Astrom, 2008: 90).

## 2.11 *Recursive Least Square (RLS)* (Landau, 2006)

Untuk mengestimasi parameter model, sebuah kriteria estimasi harus dinyatakan terlebih dahulu. Kriteria yang akan digunakan disini adalah *least square error*, yang dinyatakan dalam persamaan:

$$V_t(\theta, Z^t) = \sum_{i=1}^t \varepsilon(i)^2 \quad (2-14)$$

Dimana :

$$\varepsilon(t) = y(i) - \hat{y}(i) \quad (2-15)$$

$$\hat{y} = \theta^T \varphi(i) \quad (2-16)$$

$$\varepsilon(t) = y(i) - \theta^T \varphi(i) \quad (2-17)$$

$$\varphi(t) = [-y(i-1) \quad -y(i-2) \dots -y(i-n_a) \quad u(i-1) \dots u(i-n_b)]^T \quad (2-18)$$

- Dengan :  $\theta$  = parameter estimasi  
 $\varepsilon$  = error estimasi  
 $y(t)$  = output sebenarnya  
 $\hat{y}(t)$  = output estimasi  
 $\varphi$  = vektor regresi

Untuk meminimalkan  $e(t)$  maka berlaku

$$V_t(\theta, Z^t) = \sum_{i=1}^t [y(i) - \varphi^T(i)\theta]^2 \quad (2-19)$$

Sehingga

$$\hat{\theta}_t^{LS} = \arg \min V_t(\theta, Z^t) = [\sum_{i=1}^t \varphi(i-1)\varphi^T(i-1)]^{-1} \sum_{i=1}^t \varphi(i-1)y(i-1) \quad (2-20)$$

Dimana

$$F(t)^{-1} = \sum_{i=1}^t \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) \quad (2-21)$$

Persamaan 2-21 masih merupakan persamaan *least square* yang belum *recursive*, untuk membuat persamaan tersebut menjadi *recursive* maka diberikan:

$$\hat{\theta}(t+1) = F(t+1) \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)y(i) \quad (2-22)$$

$$F(t+1)^{-1} = \sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)\varphi^T(i-1) = F(t)^{-1} + \varphi(t)\varphi^T(t) \quad (2-23)$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \Delta\hat{\theta}(t+1) \quad (2-24)$$

Dari persamaan 2-23 (dengan menambahkan  $\varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t)$ ) sehingga diperoleh

$$\sum_{i=1}^{t+1} y(i)\varphi(i-1) = \sum_{i=1}^t y(i)\varphi(i-1) + y(t+1)\varphi(t) + \varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t) \quad (2-25)$$

Berdasarkan persamaan (2-20), (2-22), dan (2-23), persamaan (2-25) dapat ditulis kembali kedalam persamaan (2-26)

$$\sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)y(i) = F(t+1)^{-1}\hat{\theta}(t+1) \quad (2-26)$$

$$\sum_{i=1}^{t+1} \varphi(i-1)y(i) = F(t)^{-1}\hat{\theta}(t) + \varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t) + \varphi(t)[y(t+1) - \hat{\theta}(t)^T\varphi(t)] \quad (2-27)$$

$$F(t+1)^{-1}\hat{\theta}(t+1) = F(t+1)^{-1}\hat{\theta}(t) + \varphi(t)\varepsilon(t+1) \quad (2-28)$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + F(t+1)\varphi(t)\varepsilon(t+1) \quad (2-29)$$



Untuk membuat formula *recursive* bagi  $F(t)$  digunakan persamaan *recursive*  $F(t)^{-1}$  pada persamaan 2-23. Pada persamaan tersebut berlaku matrix inversion lemma.

Lemma: misalkan  $F$  adalah matrix dengan dimensi  $(n \times n)$  dan  $\varphi$  adalah vektor dari dimensi  $n$ , maka

$$(F^{-1} + \varphi\varphi^T)^{-1} = F - \frac{F\varphi\varphi^T F}{1 + \varphi^T F\varphi} \quad (2-30)$$

Dari persamaan 2.25 dan 2.26 maka

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\varphi(t)\varphi(t)^T F(t)}{1 + \varphi(t)^T F(t)\varphi(t)} \quad (2-31)$$

$F$  adalah *adaptation gain* (konstanta yang berubah terhadap waktu),  $\varphi$  adalah vektor regresi, dan  $\varepsilon$  adalah *error* estimasi (selisih antara keluaran yang sebenarnya dengan keluaran estimasi).

## 2.12 Dahlin PID Controller (Bobal, 2005: 54-55, 93-94)

Bentuk fungsi alih *plant* yang digunakan untuk metode kontroler Dahlin PID ini:

$$G(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (2-32)$$

Algoritma dari kontroler ini, *output* kontroler dihitung menggunakan bentuk jumlahan dari persamaan diskretisasi dengan metode *forward rectangular* :

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2-33)$$

Persamaan PID diatas dalam bentuk umum dalam fungsi waktu. Dimana  $e(t) = w(t) - y(t)$  yang merupakan nilai selisih antara nilai yang diinginkan dengan nilai hasil proses atau nilai sebenarnya.  $u(t)$  merupakan nilai keluaran dari kontroler.  $y(t)$  merupakan nilai keluaran dari *plant* (proses) atau nilai sebenarnya.  $w(t)$  merupakan sinyal referensi atau setpoint (nilai yang diinginkan). Parameter dari kontroler PID, yaitu  $K_p$  merupakan *gain* (penguatan) proporsional,  $T_I$  adalah konstanta waktu integral, dan  $T_D$  merupakan konstanta waktu diferensial.

Menggunakan transformasi *Laplace* persamaan 2-33 diubah ke dalam bentuk:

$$U(s) = K_p \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] E(s) \quad (2-34)$$

Dimana  $s$  merepresentasikan operator transformasi *laplace*. Dari persamaan 2-34 maka kita dapat menentukan fungsi alih dari kontroler PID :

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left[ 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right] \quad (2-35)$$

Untuk mendapatkan persamaan dalam fungsi Z (digital) maka persamaan kontroler PID dalam fungsi waktu kita diskritisasi komponen integral dan diferensial pada persamaan 2-34 ketika periode sampling  $T_0$  kecil dan *noise* (derau) dari sinyal *output* proses telah di filter, maka algoritma yang paling sederhana diperoleh dengan mengganti derivatif dengan diferensial dari orde pertama (*two-point, backward difference*)

$$\frac{de}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_0} = \frac{\Delta e(k)}{T_0} \quad (2-36)$$

Dimana  $e(k)$  adalah nilai kesalahan pada saat  $k$  sampling (misal pada waktu  $t = kT_0$ ).

Pendekatan termudah dari integral adalah dengan penjumlahan sederhana sehingga kita mendekati fungsi waktu kontinyu dengan sampling periode  $T_0$  dari fungsi konstan (*step function* atau fungsi satuan). Dengan menggunakan *forward rectangular method* (FRM):

$$\int_0^t e(t) dt \approx T_0 \sum_{i=1}^k e(i-1) \quad (2-37)$$

Sehingga persamaan diskrit (digital) untuk kontroler PID memiliki bentuk:

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (2-38)$$

Dalam aplikasi pada industri persamaan (2-38) tidak praktis untuk digunakan dalam pengontrolan menggunakan komputer karena memerlukan memori untuk menyimpan semua nilai-nilai *error* sebelumnya. Oleh karena itu, nilai *output* kontroler  $u(k)$  adalah hasil dari nilai *output* kontroler sebelumnya  $u(k-1)$  ditambah dengan nilai selisih koreksi  $\Delta u(k)$ . Maka persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k-1) \quad (2-39)$$

Dimana,

$$\Delta u(k) = K_P \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T_0}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \quad (2-40)$$

Sehingga persamaan (2-38) menjadi seperti yang dituliskan kedalam persamaan (2-41):

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) - e(k-1) + \frac{T_0}{T_I} e(k) + \frac{T_D}{T_0} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} + u(k-1)$$

Kontroler ini menggunakan vektor estimasi parameter dalam bentuk

$$\hat{\theta}^T(k) = [\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{b}_1] \quad (2-42)$$

Dan karena  $\hat{b}_2 = 0$ , regresi vektornya adalah

$$\theta^T(k-1) = [-y(k-1), -y(k-2), u(k-1)] \quad (2-43)$$

Dari hubungan berikut di peroleh persamaan untuk parameter kontroler sebagai berikut:

$$K_p = -\frac{(\hat{a}_1 + 2\hat{a}_2)Q}{\hat{b}_1} \quad (2-44)$$

$$T_I = -\frac{T_0}{\frac{1}{\hat{a}_1 + 2\hat{a}_2} + 1 + \frac{T_D}{T_0}} \quad (2-45)$$

$$T_D = \frac{T_0 \hat{a}_2 Q}{K_p \hat{b}_1} \quad (2-46)$$

$$Q = 1 - e^{-\frac{T_0}{B}} \quad (2-47)$$

Dimana  $B$  di kenal sebagai *adjustment factor* (faktor pengatur) dimana menggambarkan konstanta dalam domain waktu dari fungsi alih sesuai dengan perubahan yang terjadi pada *output plant* (proses) pada *closed loop*. Semakin kecil nilai  $B$  maka respon akan semakin cepat.

Untuk menghindari osilasi pada *output plant* (proses) maka disarankan untuk memilih estimasi parameter kontrol awal menggunakan persamaan berikut. Pada dasarnya persamaan ini merupakan *invers* dari persamaan (2-44), (2-45) dan (2-46).

$$C = 1 + \frac{T_0}{T_I} + \frac{T_D}{T_0} \quad (2-48)$$

$$\hat{a}_1 = -\frac{1 + 2\frac{T_D}{T_0}}{C} \quad (2-49)$$

$$\hat{a}_2 = \frac{T_D}{T_0 C} \quad (2-50)$$

$$\hat{b}_1 = \frac{Q}{K_p C} \quad (2-51)$$

Oleh karena itu, ketika memulai merancang algoritma kita harus menghindari memilih nilai nol untuk parameter  $\hat{b}_1$



## BAB III METODE PENELITIAN

Untuk menyelesaikan rumusan masalah dan merealisasikan tujuan penelitian yang terdapat di bab pendahuluan maka diperlukan langkah-langkah untuk menyelesaikan masalah tersebut. Metode penelitian pada skripsi ini meliputi:

1. Perancangan blok diagram sistem
2. Spesifikasi desain
3. Karakterisasi setiap blok

Karakterisasi setiap blok dilakukan untuk mempermudah analisis sistem.

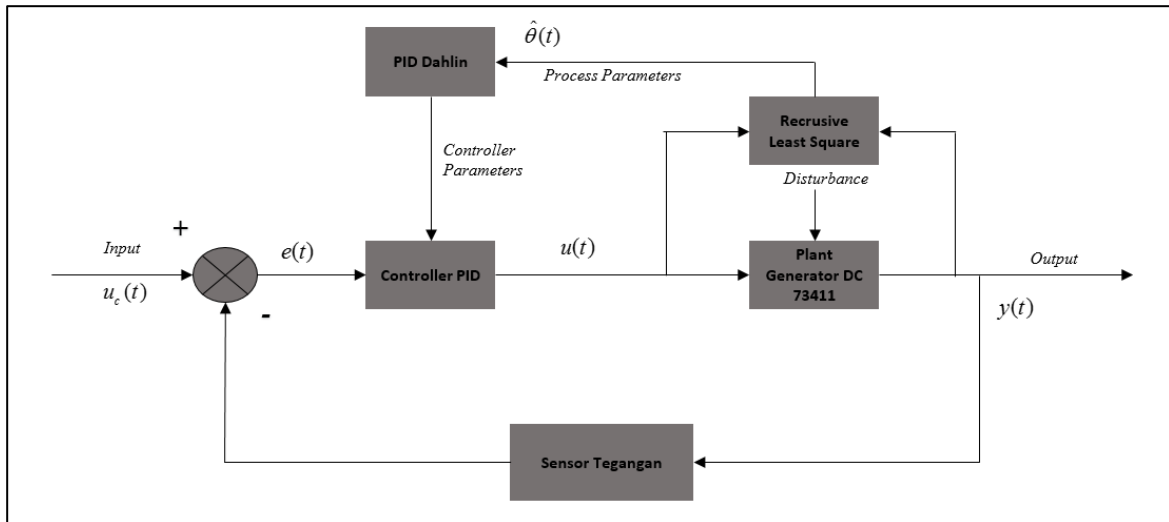
Karakterisasi dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

- a. Karakterisasi *plant* (motor generator DC 73411)
  - b. Karakterisasi *driver* L298
  - c. Karakterisasi sensor tegangan
  - d. Karakterisasi pengujian gangguan pada *plant*
4. Perancangan perangkat keras
  5. Penentuan nilai awal parameter estimasi dan parameter kontroler
  6. Perancangan dan pembuatan program algoritma *self-tuning controller*

Metode penelitian tersebut dijelaskan sebagai berikut:

### 3.1 Perancangan Diagram Blok Sistem

Perancangan diagram blok sistem menjelaskan sistem secara garis besar dan diharapkan alat dapat bekerja sesuai dengan yang didesain. Blok diagram sistem dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Blok Sistem

Keterangan:

$u_c(t)$ : *setpoint* (nilai masukan sistem yang diinginkan pada keluaran sistem).

$e(t)$ : nilai selisih antara *setpoint* dengan *output*.

$u(t)$ : nilai keluaran dari kontroler PID (sinyal kontrol).

$y(t)$ : keluaran sebenarnya dari sistem.

$\hat{\theta}(t)$ : parameter estimasi yang dihasilkan dari metode RLS.

Kontroler parameter: nilai yang menghasilkan parameter kontroler yang baru untuk kontroler PID.

### 3.2 Spesifikasi Desain

Desain yang diinginkan pada perancangan pengendalian tegangan *output* dengan *self-tuning PID controller* mempunyai spesifikasi yaitu:

1. *Settling time* < 10 detik

*Settling time* < 10 detik, karena pada sistem diharapkan dengan menggunakan teknik adaptif dengan skema *self-tuning controller* pada tuning kontroler PID mampu mempercepat *settling time* sistem kurang dari 10 detik.

2. Tidak memiliki *Overshoot*

Sistem mempunyai nilai *maximum overshoot* 0%.

3. *Error Steady State* < 5%

*Error Steady State* < 5%, karena sistem dapat dikatakan baik ketika memiliki *output* dengan batas nilai akhir 5% dari *setpoint*.

### 3.3 Karakterisasi Setiap Blok

#### 3.3.1 Karakterisasi Plant Motor Generator DC 73411



Karakterisasi motor generator DC 73411 dilakukan untuk mengetahui karakteristik motor generator DC dalam perubahan tegangan masukan terhadap tegangan keluaran generator DC 73411. Adapun peralatan yang digunakan saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply Unit* (PSU),
2. Motor Generator DC 73411,
3. Multimeter,
4. Perangkat komputer, dan
5. Kabel penghubung.

Adapun langkah langkah saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

1. Tegangan *output Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan generator DC.
2. Tegangan *output Power Supply Unit* diatur dari 0 volt hingga 20 volt dengan kenaikan setiap 1 volt.
3. Tegangan keluaran motor generator DC diukur menggunakan multimeter
4. Tegangan keluaran motor generator DC dicatat dan diamati.

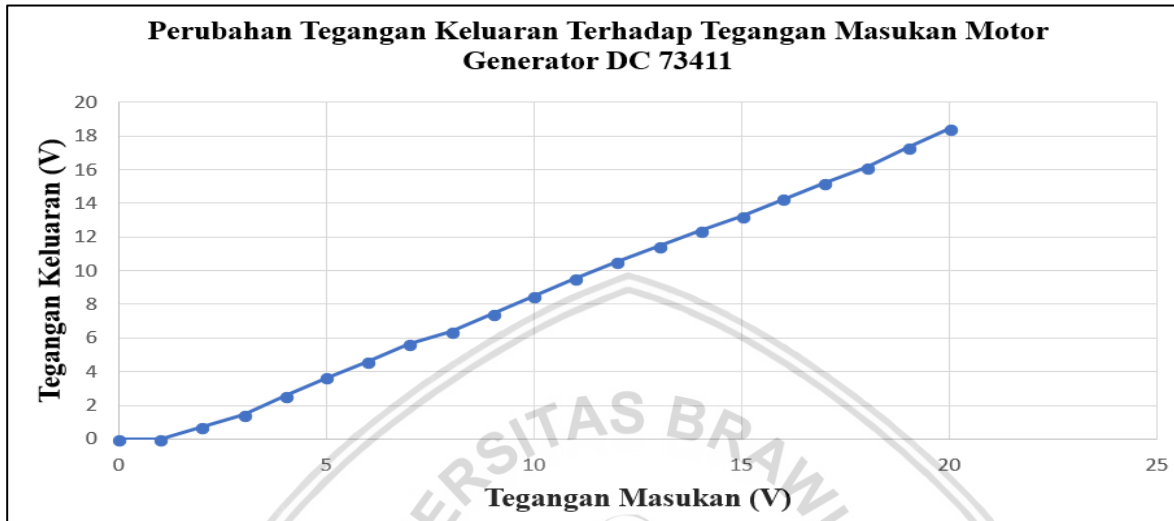
Nilai tegangan keluaran motor generator DC dapat dilihat pada Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Nilai tegangan keluaran terhadap tegangan masukan motor generator DC

Tegangan Masukan (volt)	Tegangan Keluaran (volt)
0	0
1	0
2	0.71
3	1.44
4	2.54
5	3.64
6	4.62
7	5.69
8	6.36
9	7.41
10	8.47
11	9.53
12	10.51
13	11.47
14	12.36
15	13.24
16	14.24
17	15.21
18	16.15
19	17.32

20	18.42
----	-------

Hubungan tegangan keluaran dengan tegangan masukan motor generator DC pada Tabel 3.1 dapat direpresentasikan menjadi grafik seperti pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Perubahan tegangan keluaran terhadap tegangan masukan motor generator DC

### 3.3.2 Karakterisasi *Driver* L298

Karakterisasi *driver* dilakukan untuk mengetahui karakteristik, kinerja dan *output* dari *driver motor* L298. Adapun peralatan yang digunakan saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply Unit* (PSU),
2. Perangkat komputer,
3. *Driver motor* L298 ,
4. Multimeter,
5. STM32F4, dan
6. Kabel penghubung.

Adapun langkah langkah saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

1. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan tegangan referensi *driver*.
2. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan tegangan referensi *driver*.
3. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan tegangan referensi *driver*.

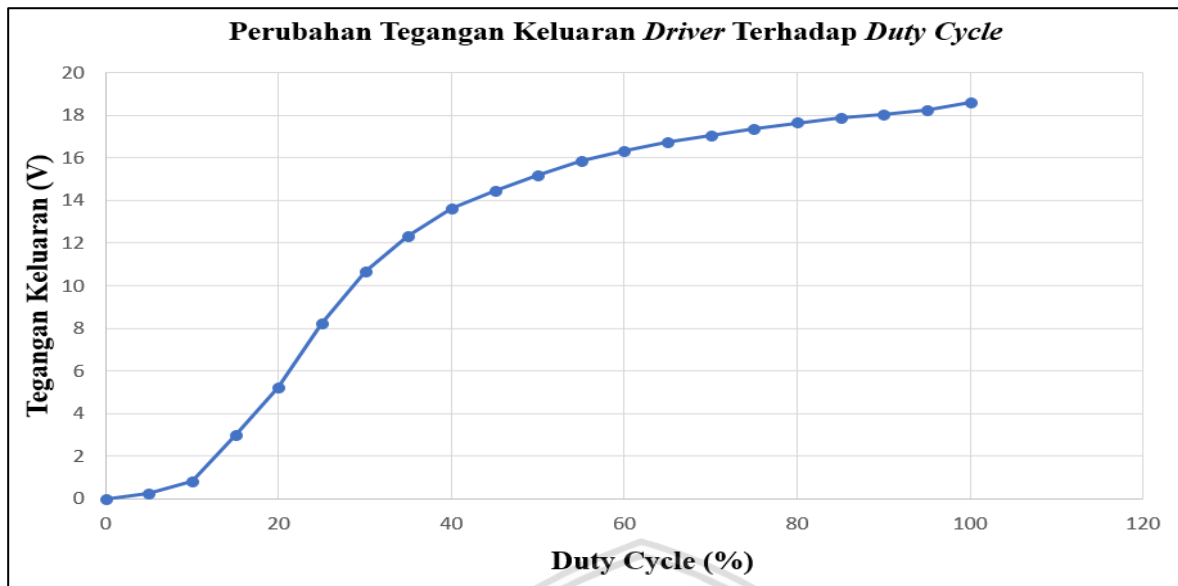
4. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan tegangan referensi driver.
5. Pin keluaran PWM di STM32F4 dihubungkan ke pin masukan tegangan *driver*.
6. Tegangan keluaran driver dihubungkan ke multimeter.
7. *Duty cycle* pada sinyal PWM diatur mulai 0% hingga 100% dengan kenaikan setiap 5 % untuk membangkitkan tegangan keluaran *driver*.
8. Nilai tegangan yang terbaca oleh multimeter dicatat dan diamati.

Nilai tegangan keluaran *driver motor L298* dapat dilihat pada Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Nilai tegangan keluaran *driver* terhadap masukan sinyal PWM

Duty Cycle (%)	Tegangan Keluaran (V)
0	0
5	0.24
10	0.79
15	2.98
20	5.21
25	8.23
30	10.69
35	12.32
40	13.63
45	14.44
50	15.18
55	15.86
60	16.33
65	16.75
70	17.07
75	17.36
80	17.65
85	17.86
90	18.06
95	18.27
100	18.6

Hubungan tegangan keluaran driver dengan masukan driver yang berupa sinyal PWM pada Tabel 3.2 dapat direpresentasikan menjadi grafik seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Perubahan tegangan keluaran *driver* terhadap *duty cycle*

### 3.3.3 Karakterisasi Sensor Tegangan

Karakterisasi sensor tegangan dilakukan untuk mengetahui tingkat kelinieran dalam pembacaan tegangan keluaran motor generator DC. Adapun peralatan yang digunakan saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply Unit* (PSU),
2. Sensor tegangan,
3. Motor generator DC 73411,
4. Multimeter,
5. STM32F4,
6. Perangkat komputer, dan
7. Kabel penghubung.

Adapun langkah langkah saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut:

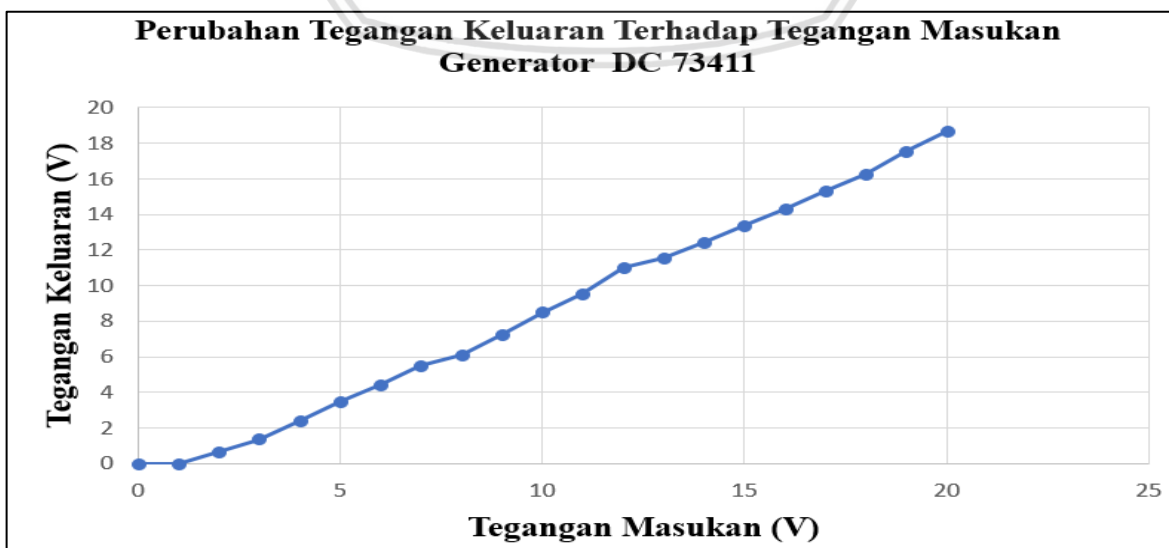
1. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan motor generator DC.
2. Tegangan keluaran motor generator DC dihubungkan ke sensor tegangan.
3. Sensor tegangan dihubungkan ke pin pembacaan analog di STM32F4.
4. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* diatur dari 0 volt hingga 20 volt dengan kenaikan sebesar 1 volt.
5. Nilai tegangan yang terbaca oleh sensor dicatat dan diamati.

Nilai tegangan keluaran yang telah dibaca sensor dapat dilihat pada Tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Nilai tegangan pembacaan sensor terhadap tegangan masukan motor generator DC

Tegangan Masukan (volt)	Hasil Pembacaan Sensor (volt)
0	0
1	0
2	0.64
3	1.36
4	2.38
5	3.47
6	4.42
7	5.48
8	6.13
9	7.24
10	8.49
11	9.53
12	11.04
13	11.53
14	12.44
15	13.36
16	14.31
17	15.29
18	16.24
19	17.51
20	18.66

Hubungan tegangan keluaran yang dibaca sensor dengan tegangan keluaran motor generator DC dapat direpresentasikan menjadi grafik seperti pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Perubahan tegangan pembacaan sensor terhadap tegangan masukan generator DC

### 3.3.4 Karakterisasi Pengujian Gangguan pada *Plant* Generator DC 73411

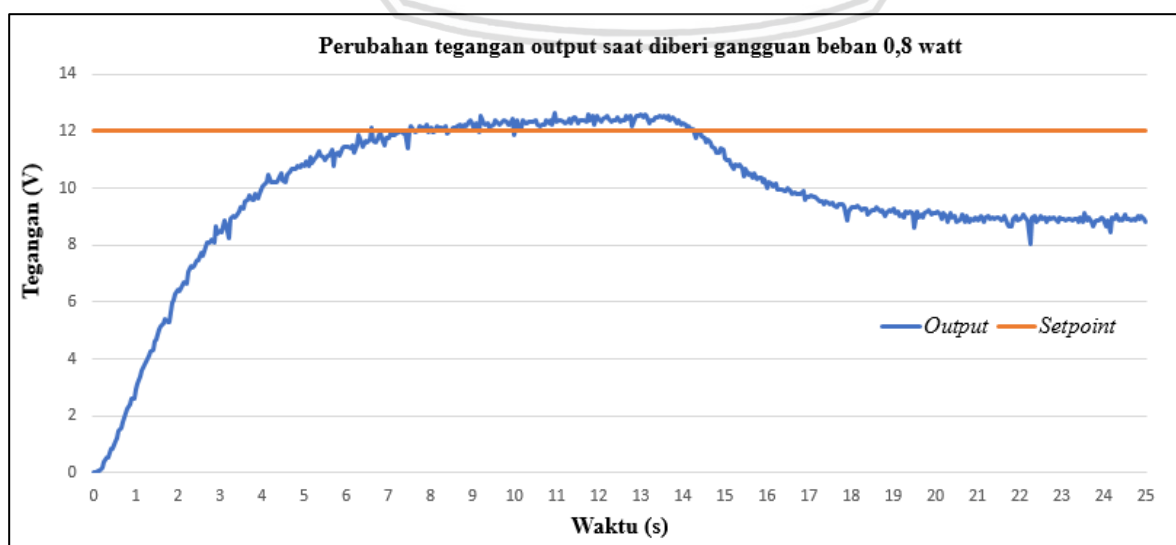
Untuk mengetahui pengaruh perubahan tegangan *output plant* generator DC 73411 saat diberikan gangguan berupa beban dengan nilai daya yang berbeda yaitu 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt. Adapun peralatan yang digunakan saat melakukan karakterisasi pengujian gangguan pada *plant* adalah sebagai berikut:

1. *Power Supply Unit* (PSU),
2. Sensor tegangan,
3. Motor generator DC 73411,
4. Multimeter,
5. STM32F4,
6. Perangkat komputer,
7. Rangkaian beban lampu dengan dimmer, dan
8. Kabel penghubung.

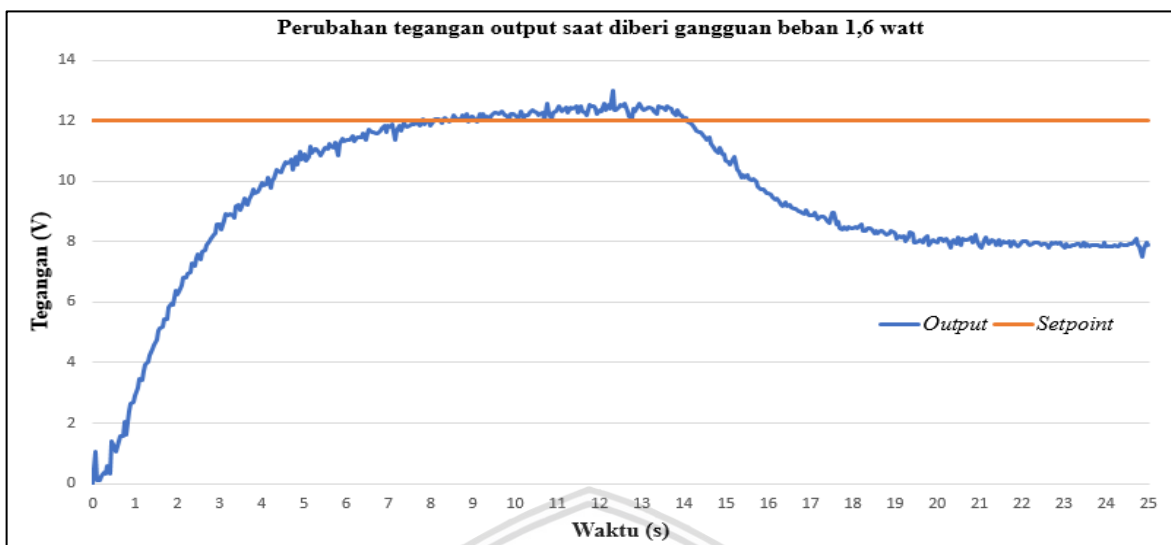
Adapun langkah langkah saat melakukan karakterisasi *plant* adalah sebagai berikut :

1. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* dihubungkan ke masukan motor generator DC.
2. Tegangan keluaran motor generator DC dihubungkan ke sensor tegangan.
3. Sensor tegangan dihubungkan ke pin pembacaan analog di STM32F4.
4. Tegangan keluaran *Power Supply Unit* diatur 12 volt
5. Ketika respon steady dimmer diputar sesuai dengan daya beban yang telah ditentukan
6. Nilai tegangan yang terbaca oleh sensor dicatat dan diamati.

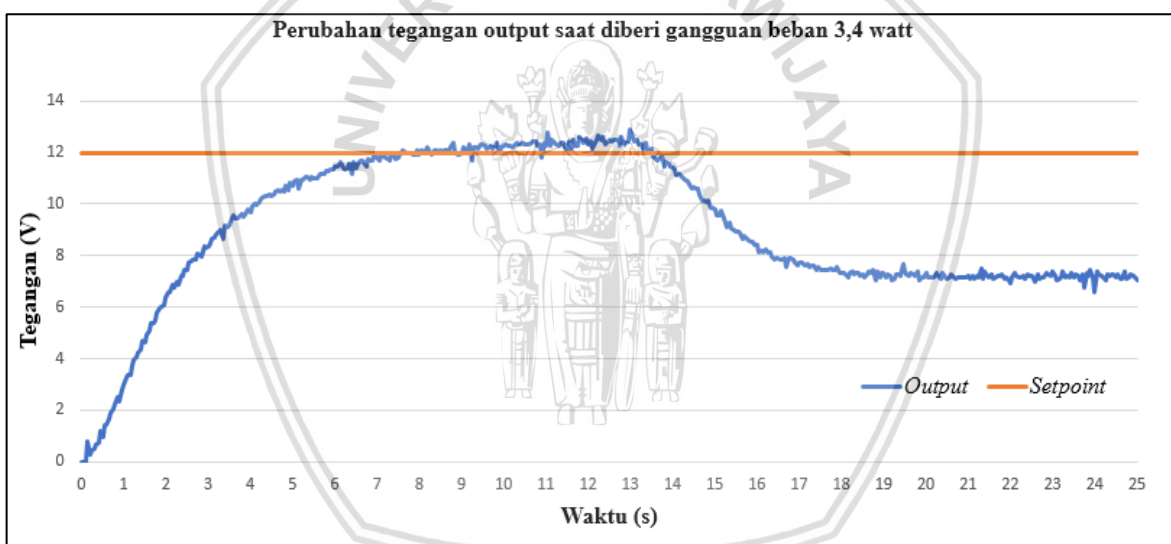
Hasil dari tegangan output pada plan generator DC 73411 ketika diberikan gangguan beban dengan daya 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt masing-masing ditunjukkan pada gambar 3.5, 3.6, dan 3.7.



Gambar 3.5 Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 0,8 watt



Gambar 3.6 Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 1,6 watt

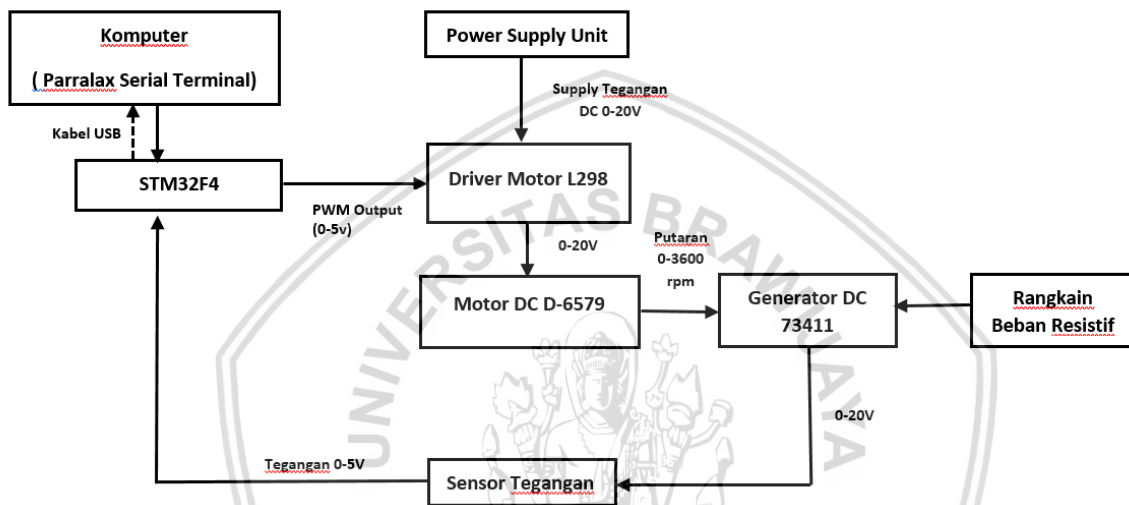


Gambar 3.7 Perubahan tegangan keluaran saat diberikan gangguan beban 3,4 watt

Berdasarkan grafik pada gambar 3.5, 3.6, dan 3.7, gangguan 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt masing-masing dapat menurunkan tegangan *output*. Ketika diberikan gangguan dengan beban 0,8 watt dapat menurunkan tegangan *output* hingga 9 volt atau 25% dari tegangan *steady state*. Saat diberikan gangguan dengan beban 1,6 watt dapat menurunkan tegangan *output* hingga 8 volt atau 33,33% dari tegangan *steady state*. Dan ketika diberikan gangguan dengan beban 3,4 watt dapat menurunkan tegangan *output* hingga 7 volt atau 41,67% dari tegangan *steady state*.

### 3.5 Perancangan Perangkat Keras

Pembuatan perangkat keras dilakukan sebagai langkah awal sebelum terbentuknya suatu sistem beserta pemrogramannya. Hal ini dimaksudkan agar pemodelan Generator DC 734 11 dengan pengontrol tegangan *output* menggunakan *self-tuning controller Model* dapat berjalan sesuai dengan spesifikasi desain yang telah direncanakan. Hal yang perlu dilakukan pada pembuatan perangkat keras adalah pembuatan skema perangkat keras dan pemilihan modul elektronik. Skema dari perangkat keras adalah seperti pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Skema pembuatan perangkat keras

Modul elektronik yang digunakan adalah sebagai berikut:

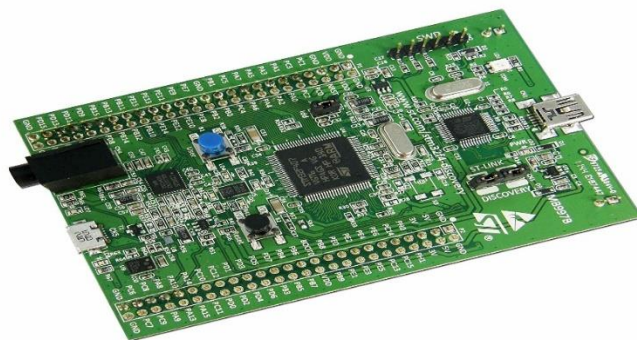
1. *Power Supply Unit* sebagai catu daya driver motor



Gambar 3.9 *Power Supply Unit (PSU)*



2. Mikrokontroler STM32F4 *Discovery* sebagai perangkat kontroler



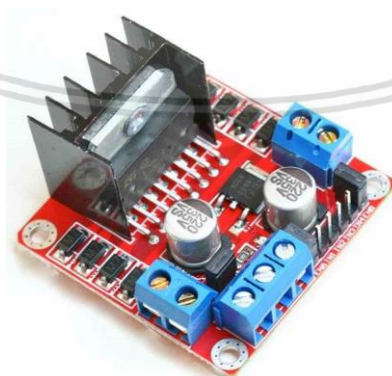
**Gambar 3.10** STM32F4 *Discovery*

3. Sensor tegangan digunakan sebagai pembagi tegangan keluaran motor generator DC agar sesuai dengan tegangan masukan arduino.



**Gambar 3.11** Sensor tegangan

4. *Driver motor H-Bridge L298N*



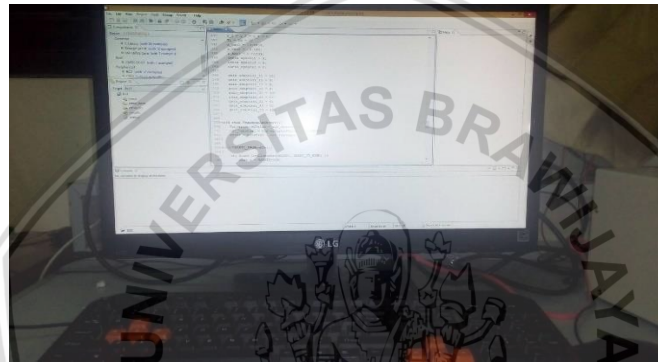
**Gambar 3.12** *Driver motor H-Bridge L298N*

5. Rangkaian beban resistif lampu bohlam 2,5 volt dengan dimmer



**Gambar 3.13** Rangkaian beban resistif

6. Komputer atau PC yang sudah terinstall software CooCox CoIDE



**Gambar 3.14** Komputer yang terinstall coocox coide

7. *Plant* motor generator DC 73411



**Gambar 3.15** *Plant* motor generator DC 73411

Prinsip kerja sistem pengontrolan tegangan output pada plant generator DC 73411 dengan menggunakan *self-tuning controller* berdasarkan skema perangkat keras pada gambar 8 adalah sebagai berikut:

1. Tegangan output dari plant generator dc 73411 akan dibaca oleh sensor tegangan dengan kalibrasi dari 0-20 V menjadi 0-5 V.
2. Selanjutnya hasil pembacaan dari sensor tegangan akan masuk ke rangkaian pengkondisi sinyal.
3. Tegangan keluaran rangkaian pengondisi sinyal berfungsi sebagai masukan analog bagi rangkaian ADC. Rangkaian ADC tersebut terdapat pada STM32F4 *Discovery* sebagai pemroses utama ADC.
4. Kemudian sinyal keluaran ADC tersebut kemudian diproses dengan menggunakan *Self-Tuning Controller* dengan kontroler PID sehingga menghasilkan keluaran berupa sinyal PWM pada pin A0 di mikrokontroler STM32F4 *Discovery*.
5. Keluaran sinyal PWM dari STM32F4 *Discovery* digunakan sebagai sinyal kontrol bagi aktuator berupa motor dc yang kemudian masuk kedalam *Driver* L298 yang dicatu dengan Power Supply Unit 20 V.
6. Tegangan keluaran dari *driver* L298 merupakan sinyal kontrol PWM yang telah dikuatkan.
7. Motor DC akan bergerak sesuai dengan besar *duty cycle* PWM yang dikeluarkan oleh *microcontroller* STM32F4 *Discovery* dan generator DC akan menghasilkan tegangan output yang kemudian akan dibaca kembali oleh sensor tegangan.
8. Kemudian hasil dari pembacaan sensor akan di tampilkan melalui komputer menggunakan software parallax serial terminal.

### **3.6 Perancangan dan Pembuatan Program *Self-Tuning Controller***

Perancangan algoritma pada skripsi ini meliputi:

1. Perancangan algoritma untuk mencari estimasi parameter dari *plant*.
2. Perancangan algoritma untuk mendapatkan parameter kontroler dengan metode Dahlin PID Kontroler.
3. Perancangan algoritma untuk menentukan estimasi parameter kontrol awal.
4. Pembuatan *flowchart* untuk pembuatan program di perangkat lunak.
5. Implementasi pada alat.

### 3.7 Penentuan Nilai Awal Parameter Estimasi Dan Parameter Kontrol.

Untuk mencari nilai awal parameter estimasi dilakukan dengan proses identifikasi sistem. Identifikasi sistem motor generator DC 73411 dilakukan dengan cara membangkitkan sinyal *Pseudo Random Binary Sequence (PRBS)* pada mikrokontroler yang kemudian menjadi sinyal masukan motor generator DC 73411. Dari pasangan data masukan dan keluaran tegangan dari motor generator DC 73411 dapat dilakukan identifikasi.

Selanjutnya memproses data masukan dan keluaran menggunakan sintaks ident pada *software* Matlab dengan struktur Model *Auto Regressive with Exogenous (ARX)* yang dapat dituliskan pada persamaan 1:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k - nk) + e(k) \quad (3.1)$$

Dengan:

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} \dots + a_{na}q^{-na}$$

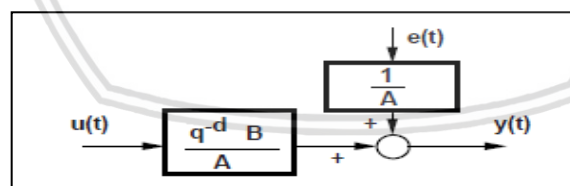
$$B(q) = b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \dots + b_{nb}q^{-nb}$$

$y(k)$  = keluaran

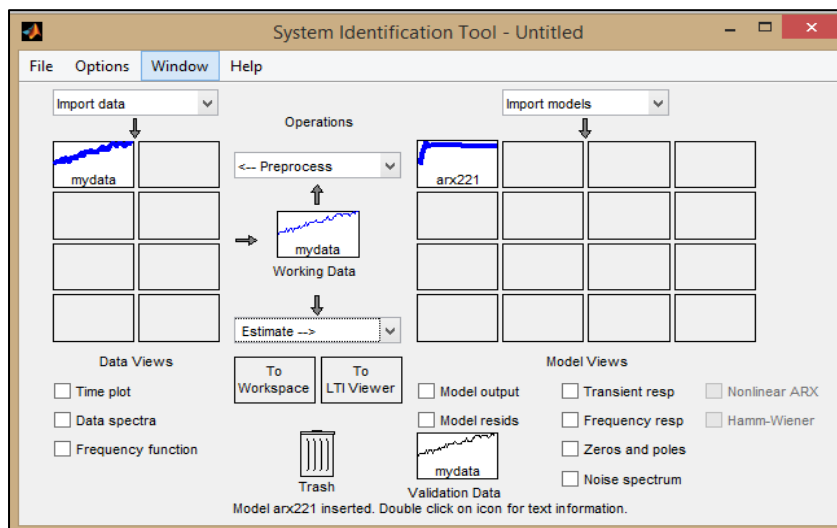
$u(k)$  = masukan

$e(k)$  = gangguan

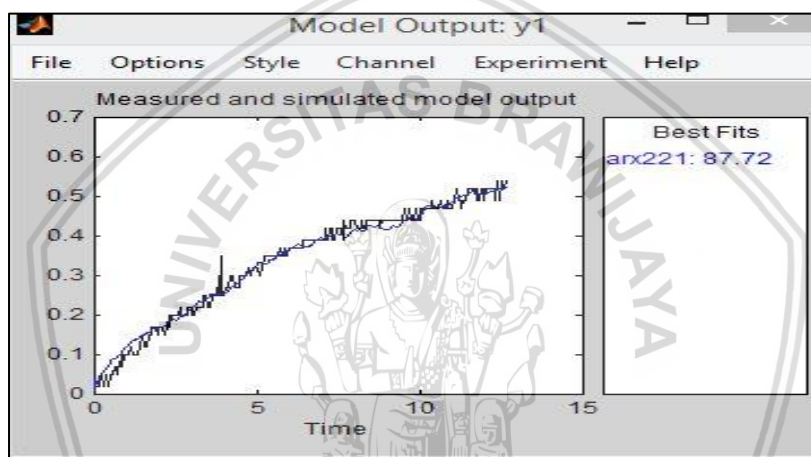
Atau dalam bentuk diagram seperti pada gambar 16.



Gambar 3.16 Struktur model ARX



Gambar 3.17 System Identification Tool



Gambar 3.18 Sinyal output dari estimasi model

Proses identifikasi dilakukan beberapa kali hingga didapatkan besfit yang terbaik. Dari hasil identifikasi, didapatkan fungsi alih motor generator DC 73411 yang memiliki besfit sebesar 87,72%. Fungsi alih tersebut dapat dilihat pada persamaan 3.2

$$G(z^{-1}) = \frac{0,001839z^{-1} + 0,002953z^{-2}}{1 - 0,4457z^{-1} - 0,548z^{-2}} \quad (3.2)$$

Dengan nilai  $\hat{a}_1 = -0.4457$ ,  $\hat{a}_2 = -0.548$ ,  $\hat{b}_1 = 0.001839$ .

Setelah mendapatkan nilai  $\hat{a}_1$ ,  $\hat{a}_2$ , dan  $\hat{b}_1$  yang didapat dari persamaan (3-1) langkah selanjutnya adalah menghitung nilai  $K_p, T_I, T_D$  dengan menggunakan persamaan (2-9), (2-10), (2-11), (2-12), (2-13). Untuk waktu sampling  $T_0 = 0,05$  detik dan nilai *adjustment factor* menurut Bobál *et al*,  $B = 1 \times 10^{-6}$ , oleh karena itu perhitungan ditunjukkan dengan cara dibawah ini :

$$Q = 1 - e^{-\frac{T_0}{B}} = 1 - e^{-\frac{0,05}{10^{-6}}} = 1$$

$$K_p = -1 X \left( \frac{a_1 + (2 x a_2)}{b_1} x Q \right) = -1 X \left( \frac{-0,4457 + (2 x (-0,548))}{0,01839} x 1 \right) = 83,8336$$

$$T_d = \frac{T_0 x a_2 x Q}{K_p x b_1} = \frac{0,05 x (-0,4457) x 1}{83,8336 x 0,01839} = -0,0144582$$

$$K_d = K_p x T_d = 83,8336 x (-0,0144582) = -1,48994$$

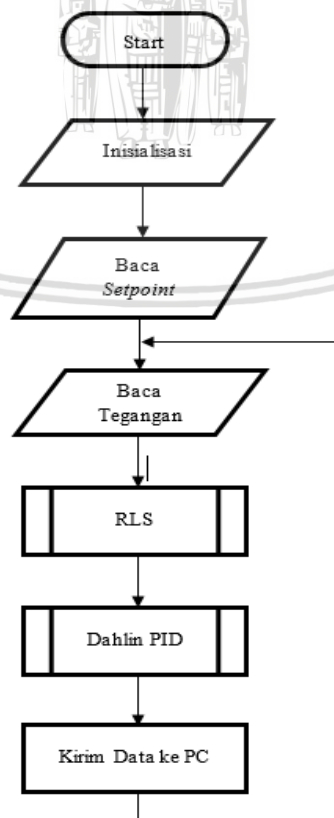
$$T_i = -1 x \left( \frac{1}{\frac{1}{a_1 + (2 x a_2)} + 1 + \frac{T_d}{T_0}} \right) = -1 x \left( \frac{1}{\frac{1}{-1,5417} + 1 + \left( \frac{-0,0144582}{0,05} \right)} \right) = 12,2356052$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{83,8336}{12,2356052} = 6.851610408$$

Dari perhitungan diatas didapatkan bahwa nilai parameter gain kontroler awal  $K_p = 83,8336$ ,  $K_d = -1,48994$ ,  $K_i = 6.851610408$

### 3.8 Flowchart Program Utama

Perancangan perangkat lunak berkaitan dengan *flowchart* program yang akan diimplementasikan ke *microcontroller* STM32F4 *Discovery*. Gambar 3.6 adalah *flowchart* sistem keseluruhan dan *flowchart* *Self-Tuning Controller*.



**Gambar 3.19** *Flowchart* sistem keseluruhan



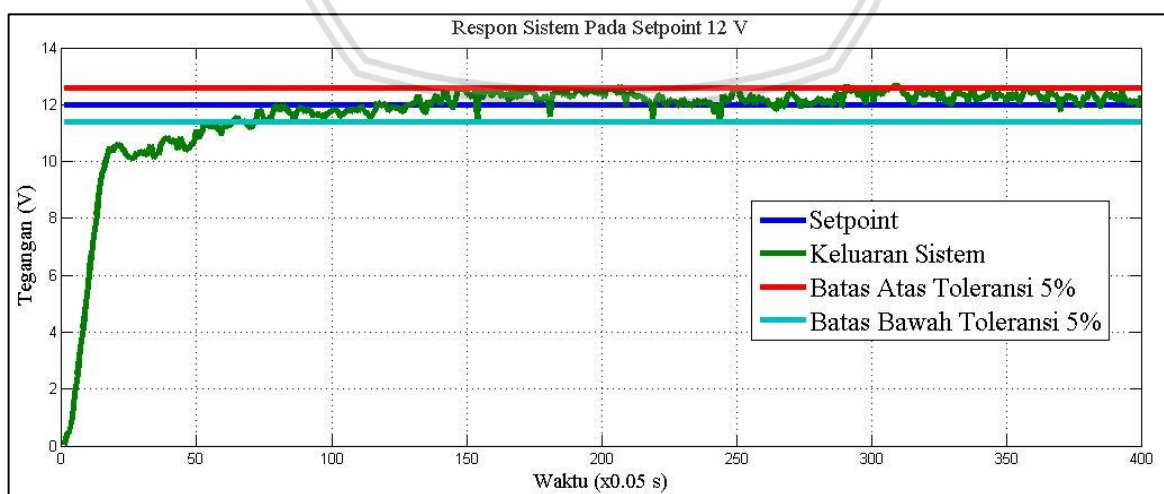
## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan diperoleh melalui pengujian sistem ketika sebelum diberikan gangguan dan setelah diberikan gangguan. Pengujian sistem tanpa diberikan gangguan dilakukan untuk mengamati apakah respon sistem sesuai dengan spesifikasi perancangan, dan pengujian sistem dengan diberikan beberapa nilai gangguan dilakukan untuk mengamati apakah sistem hasil perancangan dapat mengontrol tegangan *output* sesuai dengan yang *setpoint*.

### 4.1 Pengujian Sistem Tanpa Diberikan Gangguan

Pengujian dilakukan dengan nilai *setpoint* 12 volt. Dari pengujian yang dilakukan akan diamati respon sistem dengan melihat tegangan *output* yang dihasilkan, dan melihat perubahan parameter gain kontroler PID serta perubahan nilai estimasi yang didapatkan pada sistem tanpa diberikan gangguan.

Respon sistem tanpa diberikan gangguan dengan *setpoint* 12 volt, ditunjukkan pada gambar 4.1.

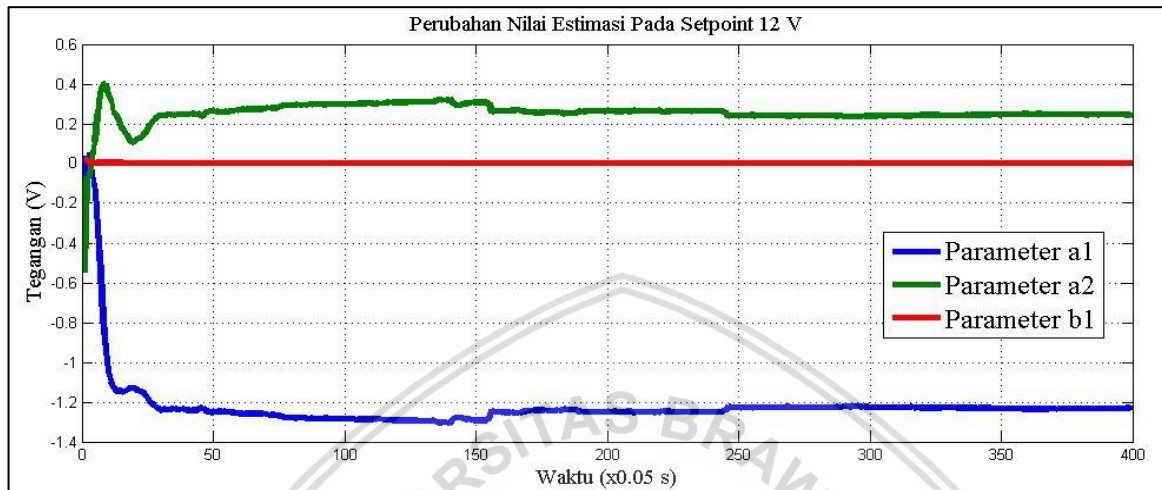


Gambar 4.1 Respon sistem dengan setpoint 12 volt



Dari grafik respon sistem pada gambar 4.1 dapat diketahui bahwa respon sistem dengan setpoint 12 volt memiliki nilai *settling time* sebesar 3,575 detik, *error steady state* sebesar 1,395%, dan tidak memiliki *overshoot*.

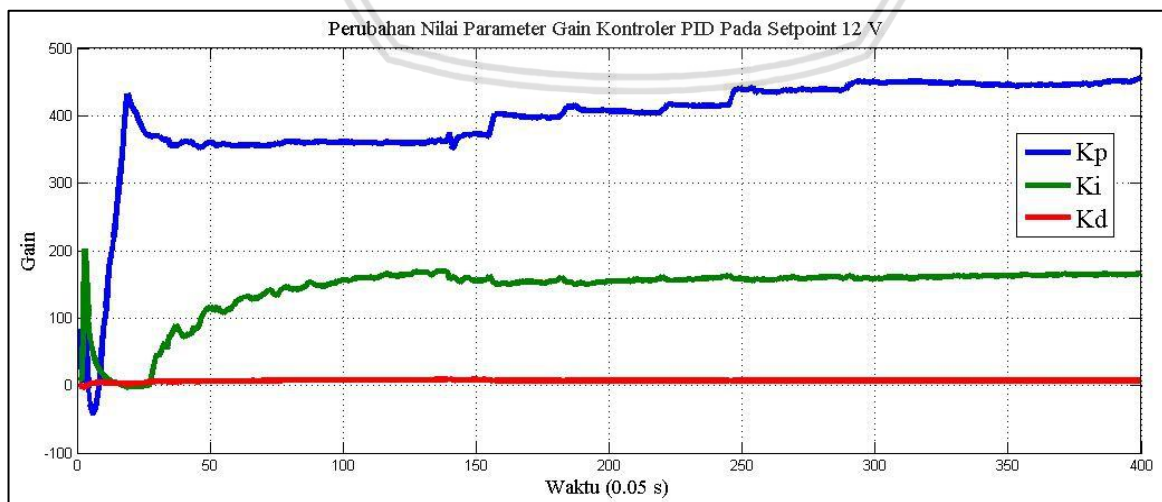
Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 volt ditunjukkan pada gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 volt

Dari grafik perubahan nilai estimasi pada gambar 4.2, dapat dilihat nilai  $\hat{a}_1$  berubah dari nilai awal sebesar -0,4457 menjadi -1,22879 sedangkan untuk nilai  $\hat{a}_2$  berubah dari nilai awal sebesar -0,548 menjadi 0,242337 dan untuk nilai  $\hat{b}_1$  berubah dari nilai awal sebesar 0,01839 menjadi 0,001628.

Perubahan nilai parameter kontroler PID dengan setpoint 12 volt ditunjukkan pada gambar 4.3



**Gambar 4.3** Perubahan nilai parameter gain kontroler PID dengan setpoint 12 volt

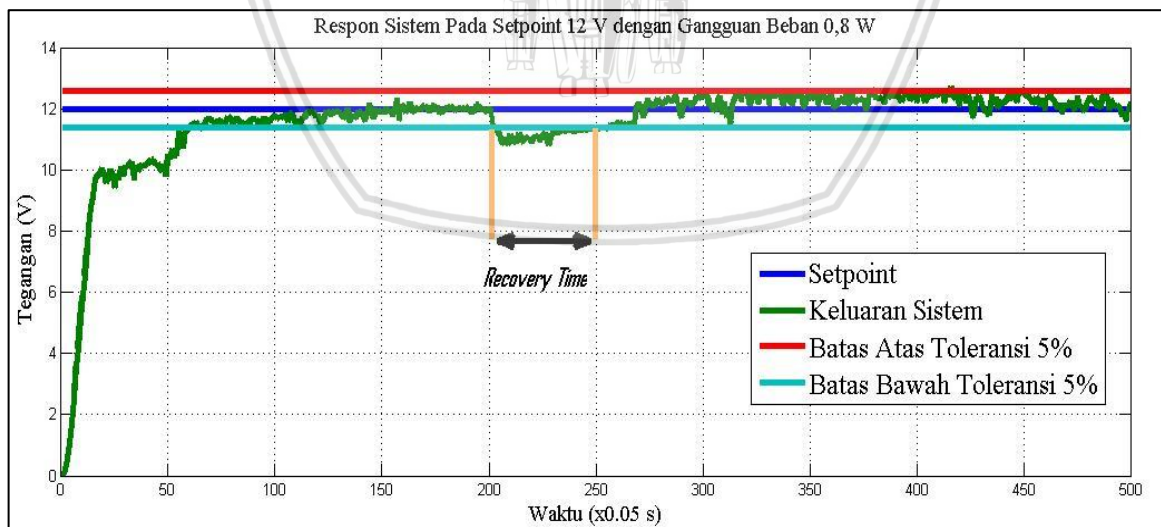
Dari grafik perubahan nilai parameter kontroler PID pada gambar 14, dapat dilihat nilai parameter gain kontroler PID untuk gain parameter  $K_P$  dan  $K_I$  mengalami perubahan

drastis diawal lalu nilai gain parameter  $K_P$  menurun sedangkan  $K_I$  meningkat, ketika respon sistem dalam keadaan *steady state* nilai gain parameter  $K_P$  mengalami peningkatan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar, sedangkan untuk nilai gain parameter  $K_I$  cenderung menurun lalu nilainya tidak mengalami perubahan yang besar. Dan untuk nilai gain parameter  $K_D$  terjadi peningkatan diawal dan sampai respon sistem dalam keadaan *steady state* tidak mengalami perubahan yang besar. Nilai akhir  $K_P$  sebesar 457,197021 sedangkan untuk nilai  $K_I$  sebesar 166,5397468 dan untuk nilai  $K_D$  sebesar 7,4448578.

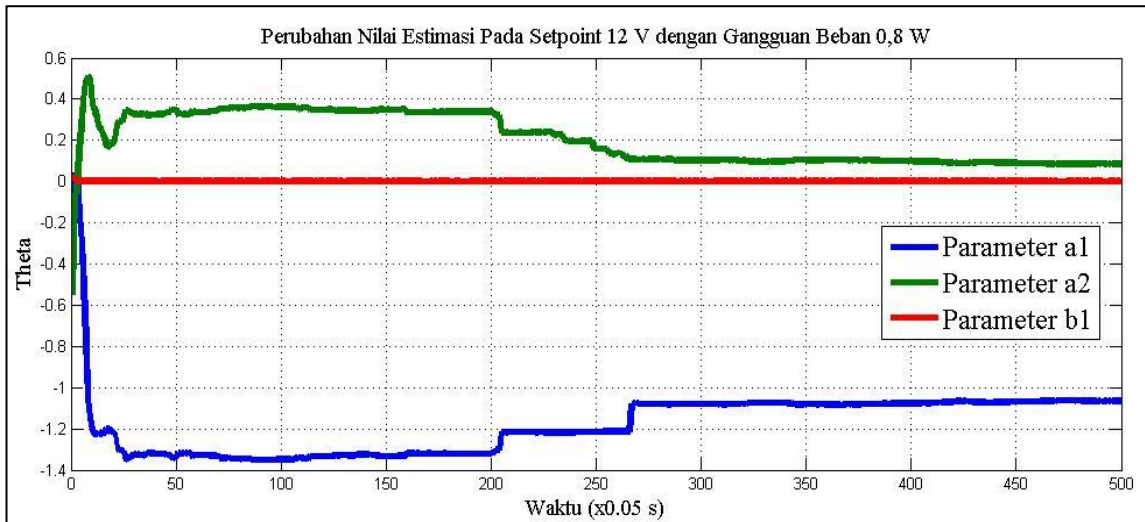
## 4.2 Pengujian Sistem Dengan Diberikan Beberapa Nilai Gangguan

Pengujian dilakukan dengan nilai setpoint 12 volt dan diberikan gangguan berupa beban resistif dengan nilai daya 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt ketika respon sistem dalam keadaan telah *steady state*. Dari pengujian yang dilakukan akan diamati respon sistem dengan melihat tegangan *output* yang dihasilkan, dan melihat perubahan parameter gain kontroler PID serta perubahan nilai estimasi yang didapatkan ketika sistem diberikan beberapa nilai gangguan.

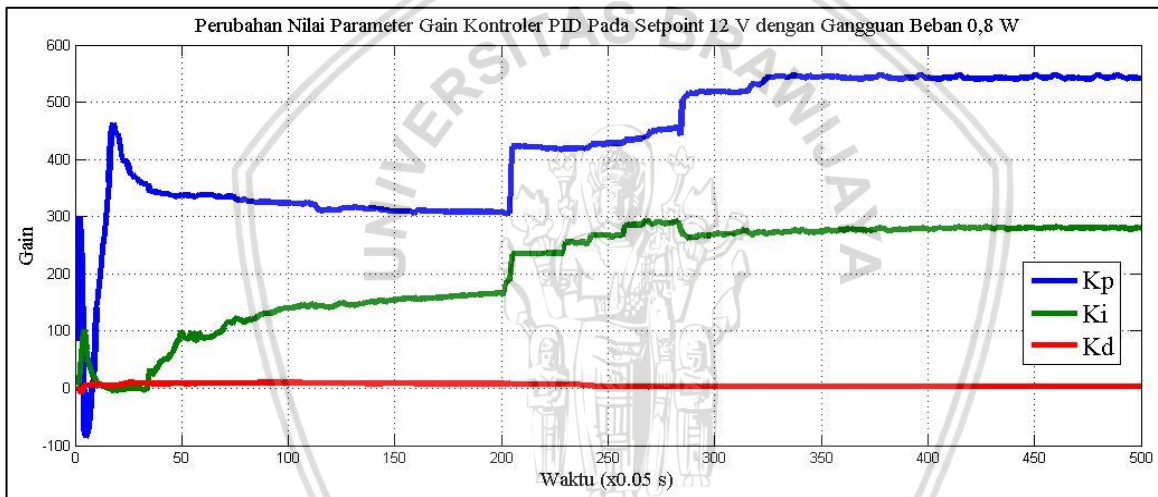
Respon sistem dengan diberikan gangguan beban dengan daya 0,8 watt, dan perubahan parameter gain kontroler PID serta perubahan nilai estimasi yang didapatkan masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.4, 4.5, dan 4.6



**Gambar 4.4** Respon sistem dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt



**Gambar 4.5** Perubahan nilai estimasi pada setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt

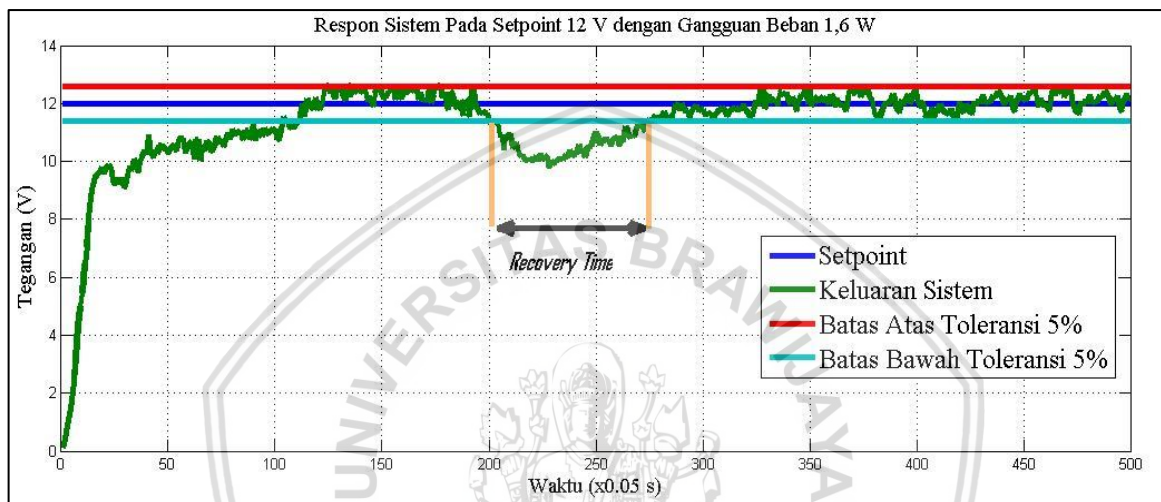


**Gambar 4.6** Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 volt dengan gangguan beban 0,8 watt

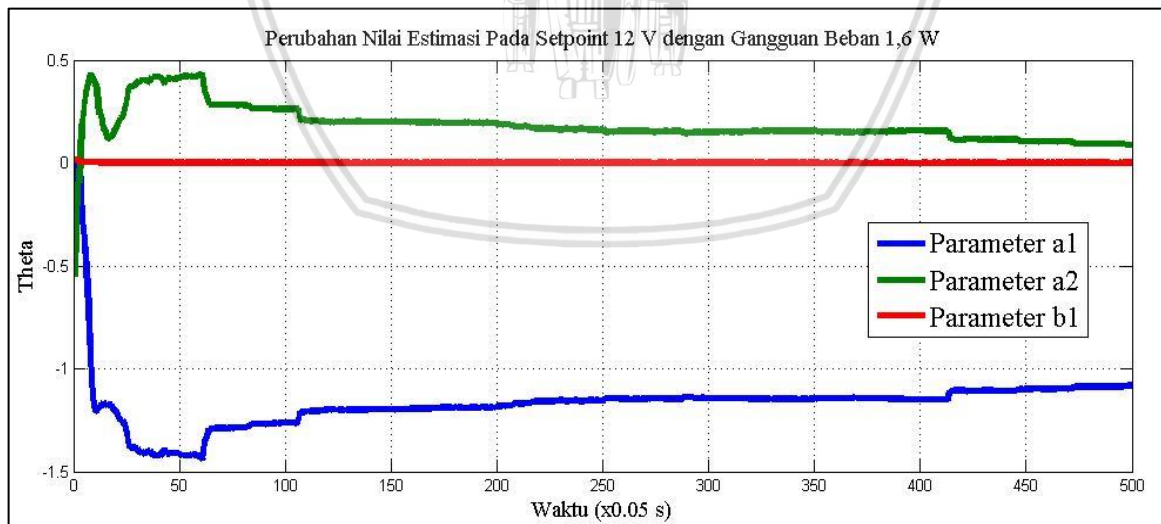
Dari grafik respon sistem pada gambar 4.4 dapat diketahui bahwa ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 0,8 watt respon memiliki nilai *recovery time* sebesar 1,5 detik. Dari grafik perubahan nilai estimasi pada gambar 4.5 dapat diketahui ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 0,8 watt nilai estimasi  $\hat{a}_1$  terjadi kenaikan sedangkan nilai  $\hat{a}_2$  terjadi penurunan. Dan untuk nilai estimasi  $\hat{b}_1$  tidak terjadi perubahan yang begitu drastis. Nilai akhir estimasi parameter  $\hat{a}_1$  sebesar -1,065882 sedangkan untuk nilai  $\hat{a}_2$  sebesar 0,086472 dan untuk nilai  $\hat{b}_1$  sebesar 0,001472. Berdasarkan grafik perubahan nilai parameter gain kontroler PID pada gambar 4.6 ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 0,8 watt untuk nilai gain parameter  $K_P$  dan  $K_I$  mengalami peningkatan, lalu ketika respon telah dalam keadaan *steady state* nilai gain parameter  $K_P$  mengalami peningkatan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar, sedangkan untuk nilai

gain parameter  $K_I$  cenderung menurun lalu nilainya tidak mengalami perubahan yang besar. Dan untuk nilai gain parameter  $K_D$  ketika diberikan gangguan terjadi penurunan dan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar. Nilai akhir  $K_P$  sebesar 541,9461 sedangkan untuk nilai  $K_I$  sebesar 278,0469 dan untuk nilai  $K_D$  sebesar 2,867988.

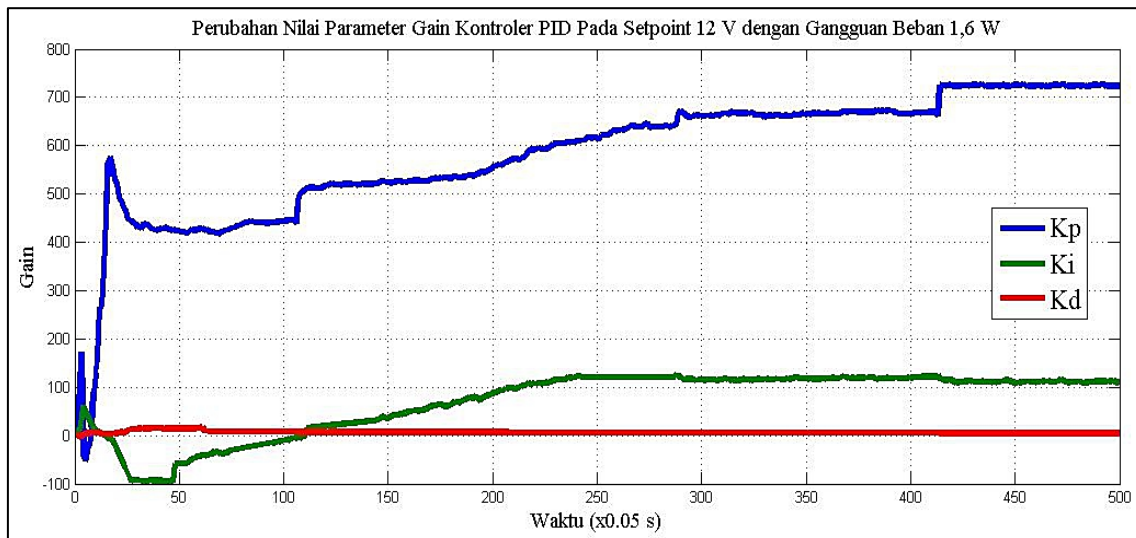
Respon sistem dengan diberikan gangguan beban dengan daya 1,6 watt, dan perubahan parameter gain kontroler PID serta perubahan nilai estimasi yang didapatkan masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.7, 4.8, dan 4.9.



Gambar 4.7 Respon sistem dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 1,6 watt



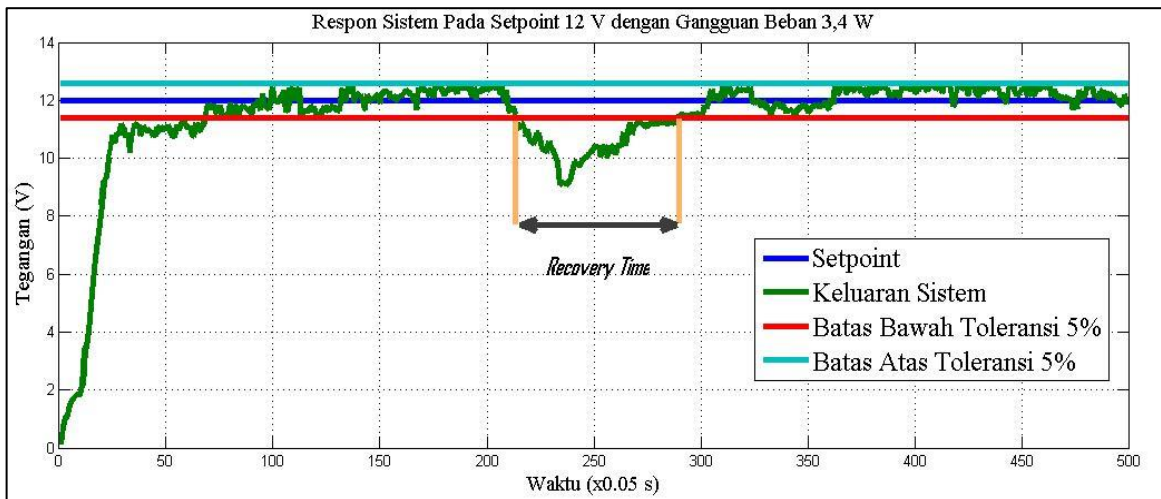
Gambar 4.8 Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 volt dengan gangguan beban 1,6 watt



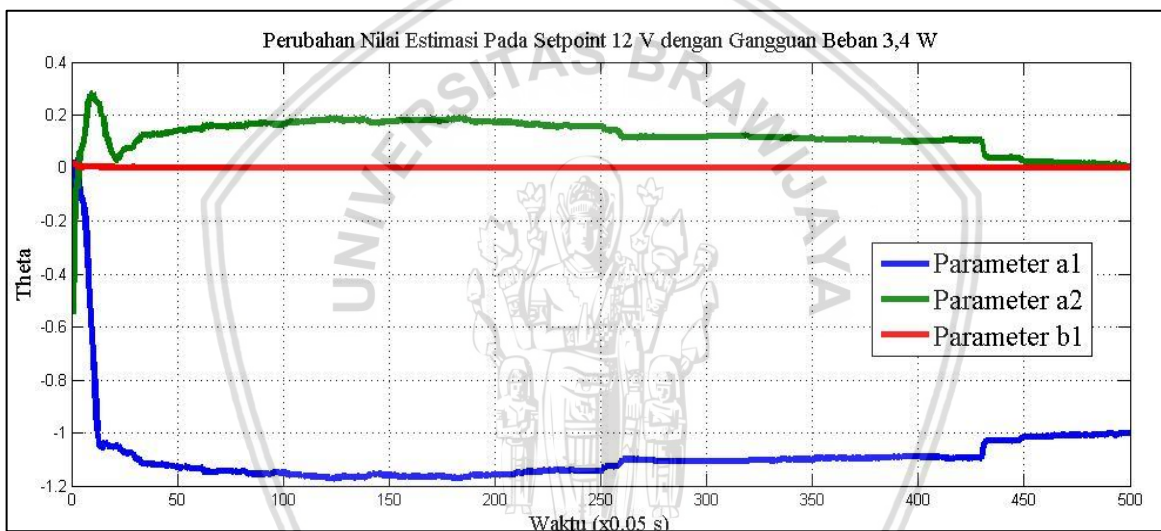
**Gambar 4.9** Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 V dengan gangguan beban 1,6 W

Dari grafik respon sistem pada gambar 4.7 dapat diketahui bahwa ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 1,6 watt respon memiliki nilai *recovery time* sebesar 3,75 detik. Dari grafik perubahan nilai estimasi pada gambar 4.8 dapat diketahui ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 1,6 watt nilai estimasi  $\hat{a}_1$  terjadi kenaikan sedangkan nilai  $\hat{a}_2$  terjadi penurunan. Dan untuk nilai estimasi  $\hat{b}_1$  tidak terjadi perubahan yang begitu drastis. Nilai akhir estimasi parameter  $\hat{a}_1$  sebesar -1,08084 sedangkan untuk nilai  $\hat{a}_2$  sebesar 0,08717 dan untuk nilai  $\hat{b}_1$  sebesar 0,001124. Berdasarkan grafik perubahan nilai parameter gain kontroler PID pada gambar 4.9 ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 1,6 watt nilai gain parameter  $K_P$  dan  $K_I$  mengalami peningkatan, lalu ketika respon telah dalam keadaan *steady state* nilai gain parameter  $K_P$  mengalami peningkatan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar, sedangkan untuk nilai gain parameter  $K_I$  cenderung menurun lalu nilainya tidak mengalami perubahan yang besar. Dan untuk nilai gain parameter  $K_D$  ketika diberikan gangguan terjadi penurunan dan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar. Nilai akhir  $K_P$  sebesar 724,1325 sedangkan untuk nilai  $K_I$  sebesar 110,2472 dan untuk nilai  $K_D$  sebesar 4,110926.

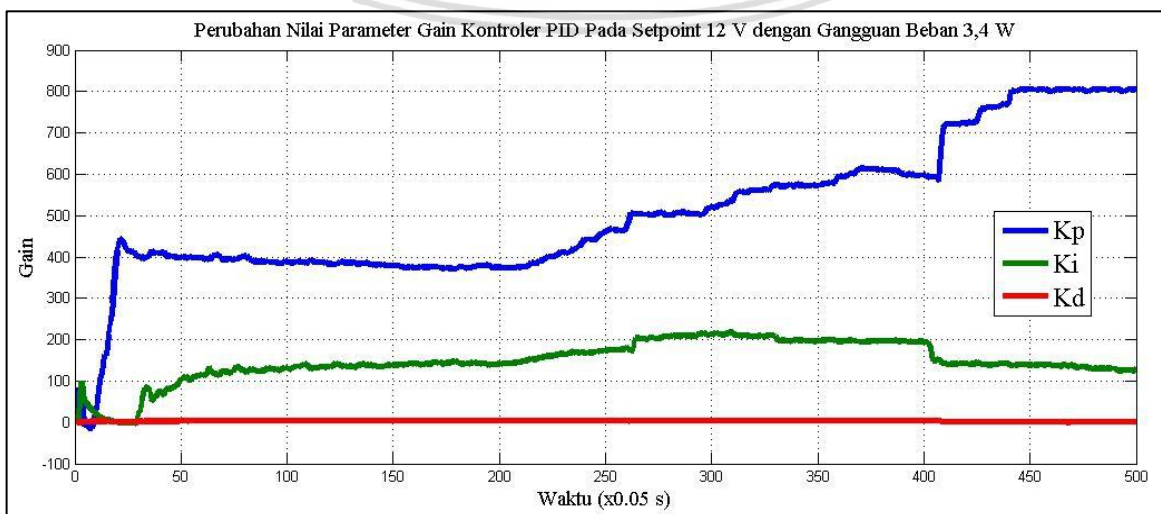
Respon sistem dengan diberikan gangguan beban dengan daya 3,4 watt, dan perubahan parameter gain kontroler PID serta perubahan nilai estimasi yang didapatkan masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.10, 4.11, dan 4.12.



Gambar 4.10 Respon sistem dengan setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W

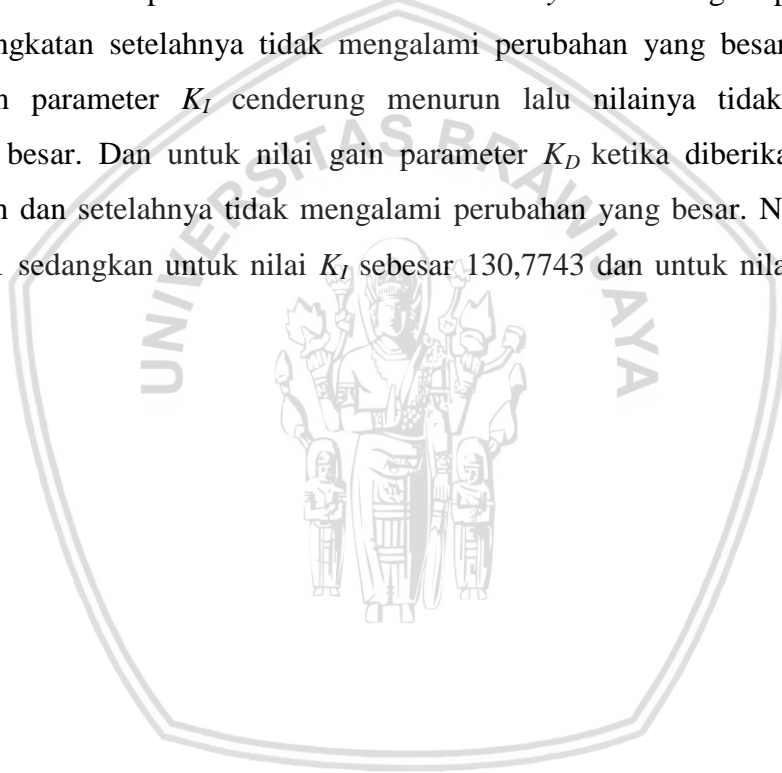


Gambar 4.11 Perubahan nilai estimasi dengan setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W



Gambar 4.12 Perubahan nilai parameter kontroler PID pada setpoint 12 V dengan gangguan beban 3,4 W

Dari grafik respon sistem pada gambar 4.10 dapat diketahui bahwa ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 3,4 watt respon memiliki nilai *recovery time* sebesar 4,25 detik. Dari grafik perubahan nilai estimasi pada gambar 4.11 dapat diketahui ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 3,4 watt nilai estimasi  $\hat{a}_1$  terjadi kenaikan sedangkan nilai  $\hat{a}_2$  terjadi penurunan. Dan untuk nilai estimasi  $\hat{b}_1$  tidak terjadi perubahan yang begitu drastis. Nilai akhir estimasi parameter  $\hat{a}_1$  sebesar -1,000569 sedangkan untuk nilai  $\hat{a}_2$  sebesar 0,008027 dan untuk nilai  $\hat{b}_1$  sebesar 0,001117. Berdasarkan grafik perubahan nilai parameter gain kontroler PID pada gambar 4.12 ketika diberikan gangguan berupa beban lampu 3,4 watt nilai gain parameter  $K_P$  dan  $K_I$  mengalami peningkatan, lalu ketika respon telah dalam keadaan *steady state* nilai gain parameter  $K_P$  mengalami peningkatan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar, sedangkan untuk nilai gain parameter  $K_I$  cenderung menurun lalu nilainya tidak mengalami perubahan yang besar. Dan untuk nilai gain parameter  $K_D$  ketika diberikan gangguan terjadi penurunan dan setelahnya tidak mengalami perubahan yang besar. Nilai akhir  $K_P$  sebesar 805,2031 sedangkan untuk nilai  $K_I$  sebesar 130,7743 dan untuk nilai  $K_D$  sebesar 0,636762.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil penentuan nilai awal estimasi generator DC 73411 tanpa diberikan beban didapatkan parameter estimasi  $\hat{a}_1 = -0.4457$ ,  $\hat{a}_2 = -0.548$ ,  $\hat{b}_1 = 0.001839$ . Parameter estimasi tersebut terjadi perubahan secara dinamis berdasarkan nilai beban yang diberikan.
2. Berdasarkan hasil pengujian sistem tanpa gangguan, respon sistem dengan setpoint 12 volt tidak memiliki overshoot, memiliki nilai settling time kurang dari 10 detik yaitu senilai 3,575 detik . Sedangkan nilai error steady state kurang dari 5% yaitu senilai 1,395%.
3. Berdasarkan hasil pengujian sistem dengan gangguan berupa beban lampu dengan daya 0,8 watt, 1,6 watt, dan 3,4 watt masing-masing respon memiliki *recovery time* sebesar 1,5 detik, 3,75 detik, dan 4,25 detik .

### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah dengan menguji sistem menggunakan gangguan berupa beban kapasitif atau induktif dengan nilai gangguan yang besar agar metode *self-tuning controller* yang digunakan bisa lebih optimal.





**DAFTAR PUSTAKA**

- Anonim. 2015. Manual Reference STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced ARM®-based 32-bit MCUs. STMicroelectronics.
- Astrom, K.J. dan B. Wittenmark. 1995. *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. USA.
- Bobal, V, J., Bohm, J., Fessl dan Machacek. 2005. *Digital Self-Tuning Controller*. London: Springer verlag.
- Lanang, Sang., Sardono Sarwito, dan Indra Ranu Kusuma. 2013. *Analisa Pengaruh Beban Induktif dan Resistif pada Generator Induksi pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut*. Jurnal Teknik Perkapalan ITS Surabaya.
- Landau, Ioan dan Gianluca Zito. 2006. *Digital Control Systems Design, Identification and Implementation*. Germany: Springer-Verlag London Limited.
- Niko, Ardian S. 2010. *Analisis Perbandingan Karakteristik Berbeban Generator Arus Searah Penguatan Bebas dengan Generator Arus Searah Penguat Shunt*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- Nugraha, R.P. 2016. *Pengontrolan Tegangan Keluaran Motor Generator Set DC (Type 73411) dengan Struktur State Feedback Control*. Skripsi. Tidak Dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Nurafif, L. 2013. 2010. *Rancang Bangun Power Control System Pada Turbin Vertikal Aksis Arus Sungai Tipe Darrieus Menggunakan Generator DC*. Skripsi. Surabaya: ITS.
- Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik*. terjemahan: Edi Laksono Ir. Jakarta : Penerbit Erlangga.

