



TUGAS AKHIR - TF 181801

RANCANG BANGUN *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN METODE *TORQUE CONTROL* BERBASIS *BUCK CONVERTER*

Choirul Mufit
NRP. 02311745000002

Dosen Pembimbing :
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”



FINAL PROJECT - TF 181801

**DESIGN OF SUPERVISORY CONTROL FOR
CONTROLLING WIND TURBINE SPEED USING
TORQUE CONTROL METHOD BASED BUCK
CONVERTER**

Choirul Mufit
NRP. 02311745000002

Supervisor :
Dr. Katherin Indriawati, S.T, M.T.

ENGINEERING PHYSICS DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Choirul Mufit
NRP : 02311745000002
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri
PerguruanTinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Rancang Bangun *Supervisory control* untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Metode *Torque Control* Berbasis *Buck Converter*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 24 juli 2019

Yang membuat



Choirul Mufit

NRP.02311745000002

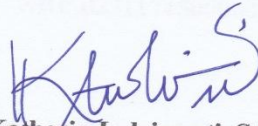
“Halaman ini memang dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
RANCANG BANGUN *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGGUNAKAN METODE *TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BUCK CONVERTER*

Oleh:
Choirul Mufit
NRP.0231174500002

Surabaya, 24 Juli 2019

Menyetujui,
Dosen Pembimbing



Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.
NIPN.197605232000122001

Mengetahui,
Kepala Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS




Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN.197809022003121002

“Halaman ini memang dikosongkan”

**RANCANG BANGUN *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BUCK CONVERTER***


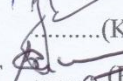
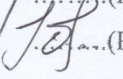

TUGASAKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

CHOIRUL MUFIT
NRP.0231174500002

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. .....(Pembimbing)
2. Ir. Yaumar, M.T. .....(Ketua Penguji)
3. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T., M.T. .....(Penguji I)
4. Moh. Kamalul Wafi, S.T., MSc.DIC .....(Penguji II)

SURABAYA
Juli, 2019

“Halaman ini memang dikosongkan”

**RANCANG BANGUN *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK
PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN
MENGUNAKAN METODE *TORQUE CONTROL*
BERBASIS *BUCK CONVERTER***

Nama : **Choirul Mufit**
NRP : **0231174500002**
Departemen : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

Abstrak

Variasi kecepatan angin mengakibatkan daya listrik yang dihasilkan turbin juga bervariasi. Untuk memperoleh daya maksimum maka kecepatan rotor turbin harus berada dinilai optimalnya. Kecepatan rotor dapat dikendalikan dengan cara memanipulasi torsi dari generator, metode ini disebut *Torque Control*. Dalam hal itu, dibutuhkan DC-DC *converter* sebagai aktuator pengendaliannya. Pada penelitian ini dilakukan perancangan *supervisory control* berbasis *buck converter* pada turbin angin HAWT. *Supervisory control* tersusun dari dua buah loop kontrol yang tersusun secara *cascade* serta algoritma *reference formula* sebagai *supervisory level*. *Primary loop* menggunakan mode kontrol *proportional* dengan *proportional gain* sebesar 0,3. Sedangkan pada *secondary loop* menggunakan mode kontrol *proportional integral* dengan *proportional gain* sebesar 5,2 dan *integral gain* sebesar 0,1. *Supervisory control* berbasis *buck converter* mampu melakukan kontrol kecepatan turbin dengan performansi kontroller dengan nilai error steady state kurang dari 5%, *peaktime* sebesar 19 detik, *risetime* sebesar 17 detik, *settling time* sebesar 31,5 detik serta *maximum overshoot* sebesar 2,35. Adapun *Supervisory control* yang telah dilakukan berhasil diimplementasikan dan menghasilkan rata-rata peningkatan daya turbin sebesar 4,1% pada kecepatan angin 5 m/s dan 10,58% pada kecepatan angin 6 m/s serta 11,65% pada kecepatan angin 7 m/s, dibandingkan dengan sistem turbin angin tanpa kontrol kecepatan.

Kata Kunci : Supervisory control, turbin angin, buck converter

**DESIGN OF SUPERVISORY CONTROL FOR
CONTROLLING WIND TURBINE SPEED USING TORQUE
CONTROL METHOD BASED BUCK CONVERTER**

Name : **Choirul Mufit**
NRP : **02311745000002**
Department : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Supervisor : **Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T.**

Abstract

The variation of wind speed causes electric power produced by the turbine to be unstable and not maximum due to the rotational speed of the rotor which is not in its optimal area. Rotor speed can be controlled by manipulating torque of the generator, this method is called Torque Control. Therefore, a DC-DC converter is needed as control actuator. This research design supervisory control based on buck converter on HAWT wind turbines. Supervisory control is consists of cascade control and extremum seeking algorithm as supervisory level. Primary loop uses proportional control mode with a proportional gain of 0.3. while the secondary loop uses proportional integral control mode with a proportional gain of 5.2 and an integral gain of 0.1. Buck converter-based supervisory control is able to control turbine speed with. with a error steady state value of less than 5%, peak time of 19 seconds, a rise time of 17 seconds, a settling time of 31.5 seconds and a maximum overshoot of 2.35. The Supervisory control that has been carried out was successfully implemented and resulted in an average increase in turbine power of 4.1% at wind speeds of 5 m / s and 10.58% at wind speeds of 6 m / s and 11.65% at a wind speed of 7 m / s, compared to wind turbine systems without speed control.

Keywords : **Supervisory control, wind turbine, buck converter**

“Halaman ini memang dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat serta hidayah-Nya, serta shalawat serta salam kepada Nabi Muhammad SAW, hingga terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul **“RANCANG BANGUN *SUPERVISORY CONTROL* UNTUK PENGENDALIAN KECEPATAN TURBIN ANGIN MENGGUNAKAN METODE *TORQUE CONTROL* BERBASIS *BUCK CONVERTER*”**.

Penulisan telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, mengucapkan terimakasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika.
2. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, nasihat, serta bimbingan yang sangat bermanfaat.
3. Bapak Ir Roekmono selaku dosen yang sangat telah banyak membantu saya dalam Kerja praktek maupun Tugas akhir pematang dan pengering kunyit sebelumnya
4. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika – ITS.
5. Bapak Jupri Respati dan Ibu Watini tercinta orang tua terbaik dan yang paling saya sayangi berkat doanya yang membuat saya bisa menyelesaikan tugas akhir ini, Adikku Muhammad Rofiki Mubarak yang semoga menjadi pribadi yang lebih baik lagi.

6. Asisten Laboratorium Fisika Rekayasa yang telah memberikan tempat dan fasilitas dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman seperjuangan dan satu angkatan F49 *tree Fortress* selalu memotivasi penulis.
8. Teman-teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir yang selalu memotivasi penulis.
9. Keluarga Laboratorium Pengukuran Fisis yang banyak membantu menyemangati pengerjaan.
10. Kesepuluh teman SMA saya yang juga sekarang tengah mengejar cita-citanya
11. Nur Ummama Sofyana, Siti Sofiya, Luis Yantri, Raihan Nanditio, Putri Merlisa, Agung Marhamsyah, Rizal Maulavi, Fery Agos Kurniawan dan Gustan Ubai Anggie Priambada yang telah menjadi teman yang baik bagi saya selama kuliah
12. Prihartini Nurmacrifah yang, memberikan motivasi, dan selalu membantu penulis dalam segala hal.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini tidak sempurna, namun semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika khususnya, dan civitas akademik ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa yang lain.

Surabaya, 24 Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
Abstrak.....	xi
<i>Abstract</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB I PENDAHULUAN.....	i
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	4
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1 Turbin Angin.....	5
2.2 DC-DC converter	12
2.3 <i>Buck Converter</i>	14
2.4 <i>Supervisory Control</i>	15
2.5 Sistem Satuan Per Unit	18
2.6 Kalibrasi.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1 Prosedur Umum Penelitian.....	21
3.2 Perancangan dan Pengujian Sensor	25
3.3 Perancangan dan implementasi buck Konverter	27
3.4 Perancangan dan implementasi rangkaian beban	29
3.5 Perancangan cascade control dan supervisory level.....	30

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Pengujian Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM.....	31
4.2 Kalibrasi Sensor	32
4.3 Efek pembebebanan	35
4.4 Pengujian Buck converter	36
4.5 Tracking Arus (Inner loop)	38
4.6 Tracking kecepatan	40
4.7 Pengujian Supervisory Control	42
4.8 Perbandingan daya turbin menggunakan supervisory control dengan tanpa control.....	44
BAB V PENUTUP	47
5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran.....	48
DAFTAR PUSTAKA	49
LAMPIRAN A.....	53
LAMPIRAN B	55
LAMPIRAN C.....	56
LAMPIRAN D.....	59
LAMPIRAN E	61
LAMPIRAN F	67
LAMPIRAN G.....	68
LAMPIRAN H.....	77
LAMPIRAN I	78
LAMPIRAN J	79
LAMPIRAN K.....	80
BIODATA PENULIS	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Diagram blok turbin angin [12]	5
Gambar 2.2	Klasifikasi turbin angin berdasarkan arah putarnya [14]	6
Gambar 2.3	Komponen turbin angin [10]	9
Gambar 2.1	Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin angin dan daya turbin angin [16]	
Gambar 2.5	DC-DC Konverter [12]	12
Gambar 2.6	Rangkaian DC chopper tipe buck [17]	14
Gambar 2.7	Struktur <i>supervisory control</i> pada proses produksi [23]	17
Gambar 2.8	Proses pembangkitan set point [15]	18
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	19
Gambar 3.2	<i>Rangkaian modul sensor ina</i> 219	25
Gambar 3.3	Rangkaian <i>buck converter</i>	26
Gambar 3.4	<i>Susunan Sistem Secara Keseluruhan</i>	27
Gambar 3.5	Diagram blok supervisory control	28
Gambar 4.1	Hasil Dari Sinyal Pembangkit <i>Pwm</i> Dengan <i>Duty Cycle</i> 25%	31
Gambar 4.2a	Respon kecepatan rotor dengan pengaruh pembebanan	35
Gambar 4.2b	Hubungan arus dengan pengaruh pembebanan .	35
Gambar 4.3a	Hubungan kenaikan nilai PWM terhadap output buck converter	37
Gambar 4.3b	Respon Arus generator terhadap kenaikan nilai PWM	37
Gambar 4.3c	Respon kecepatan rotor turbin terhadap kenaikan nilai PWM	38
Gambar 4.4a	Respon tracking Arus pada beberapa setpoint ...	39
Gambar 4.4b	Respon kecepatan pada tracking arus	

	yang dilakukan.....	39
Gambar 4.5a	Respon tracking kecepatan pada beberapa setpoint.....	41
Gambar 4.5b	Perbesaran Respon tracking kecepatan pada beberapa setpoint.....	41
Gambar 4.6	Respon tracking kecepatan terhadap setpoint yang dihasilkan reference formula.....	43
Gambar 4.7	Perbandingan nilai daya dengan supervisory control dan tanpa tercontrol.....	44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 perbandingan arus dari beberapa beban.....	26
Tabel 3.1 Nilai Komponen Konverter <i>Buck</i>	27
Tabel 4.1 Data Kalibrasi Tegangan	34
Tabel 4.2 Data Kalibrasi Arus	35
Tabel 4.3 Spesifikasi Tanggapan Sistem control arus	40
Tabel 4.4 Spesifikasi Tanggapan Sistem control kecepatan.....	42
Tabel 4.5 Spesifikasi Tanggapan Sistem control kecepatan dengan set point reference formula.....	43

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Naiknya pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia dari tahun ke tahun berimbas pada semakin tingginya konsumsi energi listrik disetiap tahunnya. Pada tahun 2015, jumlah energi listrik PLN yang terjual ke konsumen mengalami peningkatan sebesar 2,14%. Pada tahun yang sama data statistik PLN menyebutkan terjadi peningkatan jumlah konsumen sebesar 6,39% atau sebesar 61.167.980 pelanggan per akhir tahun 2015 dibandingkan akhir tahun 2014 [1]. Mengingat sebagian besar bahan baku produksi listrik di Indonesia masih bergantung pada energi fosil, maka penggunaan energi fosil seiring peningkatan konsumsi energi listrik juga semakin meningkat. Berdasarkan data Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) cadangan minyak bumi terus menurun dari 5,9 miliar pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada akhir 2015 serta diprediksi akan habis dalam kurun waktu 11 tahun lagi. Selain itu sumber daya batu bara selama kurun waktu 4 tahun terakhir juga mengalami penurunan dan diprediksi akan habis dalam waktu 70 tahun jika tidak ditemukan cadangan baru [2]. Dengan kondisi ini, maka sudah sepatutnya masyarakat mulai beralih ke sumber energi alternatif yaitu energi terbarukan.

Energi angin adalah salah satu dari sekian banyak energi baru terbarukan yang dapat dikembangkan di negara tropis seperti di Indonesia. Potensi energi angin di Indonesia adalah sebesar 950 MW dengan kecepatan angin berkisar dari 2,5 – 5 m/s [3]. Bahkan LAPAN menyebutkan terdapat daerah dengan kecepatan angin lebih dari 5 m/s yaitu NTT, NTB, Sulawesi Selatan, dan Pantai Selatan Jawa. Dengan potensi yang besar ini, Indonesia merencanakan dalam kurun waktu 2005 – 2025

berhasil memanfaatkan energi angin mencapai 5 MW untuk *on grid* dan 250 MW untuk *off grid*. Namun pada kenyataannya pemanfaatan energi angin masih sangat kurang, terbukti hanya sekitar 5,38% atau hanya sekitar 0,5 GW dari 950 MW potensi yang dimiliki Indonesia [2].

Dalam penerapan turbin angin sebagai pengkonversian energi kinetik angin menjadi energi mekanik sebagai penggerak generator listrik, terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi proses ekstraksi daya yang terjadi. Salah satu faktor adalah adanya sifat stokastik angin. Adanya sifat stokastik pada angin berupa kecepatan angin yang fluktuatif menyebabkan ekstraksi daya yang dihasilkan turbin angin tidak maksimal. Untuk mengatasi perubahan produksi daya yang diakibatkan oleh sifat stokastik angin perlu dilakukan penambahan kontrol turbin angin untuk dapat memaksimalkan daya listrik yang dihasilkan [4] [5].

Variable speed wind turbin (VSWT) merupakan bentuk upaya dalam peningkatan ekstraksi daya turbin angin dengan menggunakan *direct torque control* (DTC). Pada DTC dilakukan pengoptimalan daya melalui pelacakan torsi rotor yang optimal [5] [6] [7]. Dalam pengimplementasian DTC diperlukan actuator berupa DC-DC *converter* atau dikenal dengan sebutan DC chopper pada *permanent magnet synchronous generators* (PMSG) yang berperan untuk menjaga arus atau tegangan yang dihasilkan PMSG tetap berada pada daerah optimalnya [8]. *Buck converter* adalah salah satu jenis DC-DC *converter* yang berfungsi untuk menurunkan tegangan atau arus keluaran PMSG agar senantiasa berada pada set poin yang telah ditetapkan [9]. Dalam penerapan DC-DC *converter* dibutuhkan sebuah kontroler guna untuk memberikan strategi kontrol yang harus dilakukan oleh *converter*. Beberapa kontroler yang sering

digunakan diantaranya *maximum power point tracking* (MPPT), *supervisory control*, dan kontroler prediktif logika fuzzy.

Penggunaan DC-DC *converter* pada VSWT akan lebih maksimal jika menggunakan *supervisory control* dibandingkan dengan menggunakan MPPT [6]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pengimplementasian *supervisory control* pada *variable speed wind turbin* (VSWT) dengan menggunakan *direct orque control* berbasis *buck converter*. Algoritma yang digunakan untuk keperluan *set point Adjustemntt* pada *supervisory control* adalah *reference formulla*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, dapat diperoleh rumusan masalah sebagai berikut :

- a. Bagaimana menerapkan metode *cascade control* berbasis *buck converter* untuk mengendalikan kecepatan generator turbin angin?
- b. Bagaimana nilai daya sistem *supervisory control* menggunakan *reference formula* dibandingkan dengan daya sistem turbin angin tanpa kontrol kecepatan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan sebelumnya, maka adapun tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a. Mengimplementasikan sistem kontrol pada sistem turbin angin dengan metode *cascade control* berbasis *buck converter* untuk menjaga sistem turbin menghasilkan daya listrik yang optimal.
- b. Mengetahui penambahan nilai daya sistem turbin angin menggunakan *reference formula* dibandingkan dengan daya sistem turbin angin tanpa kontrol kecepatan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari luasnya permasalahan yang dapat muncul pada saat penelitian berlangsung, maka pada tugas akhir ini ditentukan batasan permasalahan sebagai berikut.

- a. Jenis *plant* turbin angin yang akan dikontrol adalah *horizontal axis wind turbin* (HAWT) skala 400 watt.
- b. Profil angin yang digunakan adalah dari kecepatan 5 m/s, 6 m/s dan 7 m/s.
- c. Variabel yang dikontrol adalah kecepatan *rotor* dengan variabel manipulasi torsi generator
- d. Jenis beban merupakan beban kapasitif berupa baterai dengan tegangan 5V dan kapasitas 8000 mAh

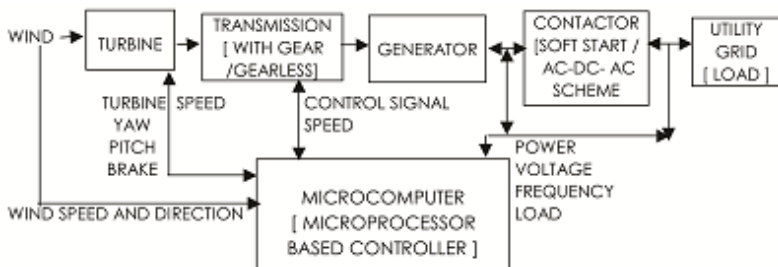
BAB II

TEORI PENUNJANG

2.1 Turbin Angin

Salah satu bentuk sistem konversi energi angin adalah turbin angin. Turbin angin mengkonversi energi angin menjadi energi listrik melalui sebuah generator yang berperan untuk mengubah energi putar rotor yang diakibatkan adanya energi kinetik turbin menjadi energi listrik [11]. Sistem turbin angin tidak hanya mengkonversikan energi kinetik angin menjadi energi listrik, akan tetapi dapat juga sebagai energi mekanis atau energi lain yang dapat dimanfaatkan dalam kebutuhan sehari-hari [10].

Kinerja turbin angin untuk dapat menghasilkan daya listrik bergantung dengan adanya interaksi antara angin dan rotor. Angin yang akan memutar rotor terdiri dari angin rata-rata serta fluktuasi turbulensi dari aliran angin. Pengalaman menunjukkan bahwa aspek utama dari kinerja turbin angin (berarti output daya dan beban rata-rata) ditentukan oleh gaya aerodinamik yang dihasilkan oleh angin rata-rata. Gaya periodik aerodinamis dapat disebabkan oleh angin geser, angin *off-axis*, dan rotasi rotor [12]. Secara umum blok diagram dari turbin angin dapat digambarkan sebagai berikut:



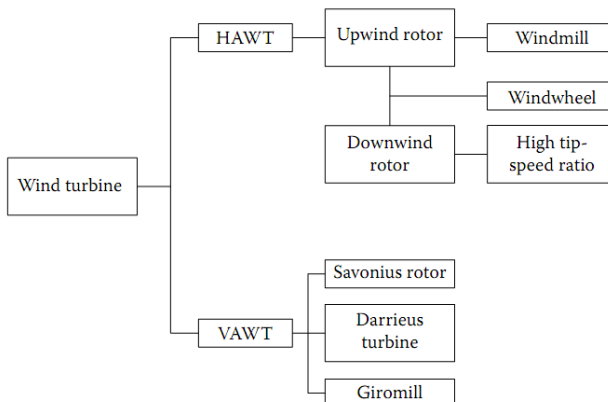
Gambar 2.2 Diagram blok turbin angin [12]

Dalam penerapannya, turbin angin dapat digolongkan kedalam dua tipe yaitu turbin angin dengan sumbu horizontal dan turbin angin dengan sumbu vertikal. Pada turbin angin dengan sumbu horizontal terdapat *blade* atau kipas yang poros atau sumbu putarnya tegak lurus dengan tanah, sehingga *blade* akan berputar sejajar dengan tanah. Pada turbin angin dengan sumbu horizontal terdapat *blade* atau kipas yang poros atau sumbu putarnya tegak sejajar dengan tanah, sehingga *blade* akan berputar tegak lurus dengan tanah [13].

2.1.1. Klasifikasi Turbin Angin

Turbin angin dapat diklasifikasikan berdasarkan energi listrik yang dihasilkan. Turbin angin skala utilitas memiliki kapasitas energi listrik sebesar 1,5 - 3,6 MW, turbin angin skala kecil memiliki kapasitas energi listrik sebesar ≤ 20 kW, dan turbin angin skala menengah memiliki kapasitas energi listrik sebesar 20 - 100 kW [14].

Turbin berdasarkan sumbu putarnya dapat dibedakan menjadi 2, yaitu sumbu horizontal dan sumbu vertikal [14].



Gambar 2.3 Klasifikasi turbin angin berdasarkan arah putarnya [14]

Berdasarkan Gambar 2.2 diatas HAWT dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *upwind* dan *downwind* rotor. *Upwind* rotor adalah rotor yang menghadap arah datangnya angin sedangkan *downwind* rotor adalah rotor yang membelakangi arah datangnya angin. Jenis turbin angin sumbu horizontal antara lain *windmill*, *windheel*, dan *high tip-speed ratio*, sedangkan jenis turbin angin sumbu vertikal antara lain *savonius rotor*, *darrieus turbine*, dan *giromill* [14].

2.1.2. Komponen Turbin Angin

Di dalam turbin angin itu sendiri terdapat beberapa komponen seperti Gambar 2.3 terdapat berbagai macam sub-sistem pada turbin angin yang dapat meningkatkan *safety* dan efisiensinya, antara lain yaitu:

a. *Gear Box*

Alat ini berfungsi untuk mengubah putaran rendah pada kincir menjadi putaran tinggi. Biasanya *gearbox* yang digunakan sekitar 1:60.

b. *Brake System*

Digunakan untuk menjaga putaran pada poros setelah *gearbox* agar bekerja pada titik aman saat terdapat angin yang besar. Alat ini perlu dipasang karena generator memiliki titik kerja aman dalam pengoperasiannya. Generator ini akan menghasilkan energi listrik maksimal pada saat bekerja pada titik kerja yang telah ditentukan. Kehadiran angin diluar digunaan akan menyebabkan putaran yang cukup cepat pada poros generator, sehingga jika tidak di atasi maka putaran ini dapat merusak generator.

c. *Generator*

Generator adalah salah satu komponen terpenting dalam pembuatan sistem turbin angin. Generator ini dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip

kerjanya dapat dipelajari dengan menggunakan teori medan elektromagnetik. Singkatnya, (mengacu pada salah satu cara kerja generator) poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetik permanen. Setelah itu disekeliling poros terdapat stator yang bentuk fisisnya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya karena terjadi perubahan fluks ini akan dihasilkan tegangan dan arus listrik tertentu. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik untuk akhirnya digunakan oleh masyarakat. Tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh generator ini berupa AC (*Alternating Current*) yang memiliki bentuk gelombang kurang lebih sinusoidal.

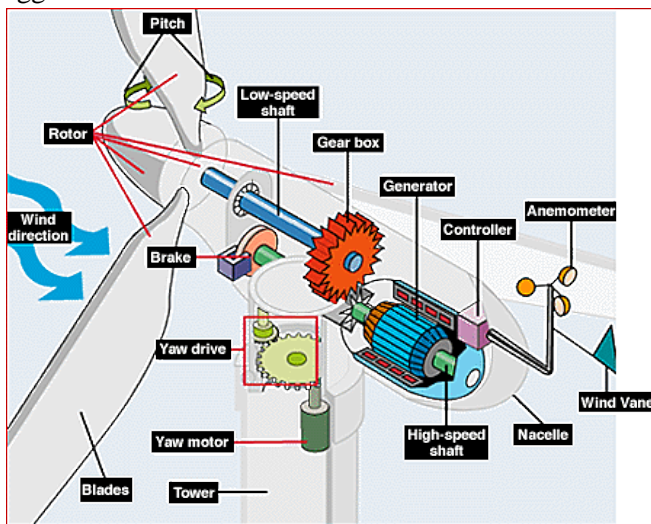
d. Penyimpanan Energi

Keterbatasan ketersediaan akan energi angin (tidak sepanjang hari angin akan selalu tersedia) menyebabkan ketersediaan listrik tidak menentu. Oleh karena itu digunakan alat penyimpan energi yang berfungsi sebagai *back-up* energi listrik. Ketika beban penggunaan daya listrik masyarakat meningkat atau ketika kecepatan angin suatu daerah sedang menurun, maka kebutuhan permintaan akan daya listrik tidak dapat terpenuhi. Oleh karena itu kita perlu menyimpan sebagian energi yang dihasilkan ketika terjadi kelebihan daya pada saat turbin angin berputar kencang atau saat penggunaan daya pada masyarakat menurun. Penyimpanan energi ini diakomodasi dengan menggunakan alat penyimpan energi. Contoh sederhana yang dapat dijadikan referensi sebagai alat penyimpan energi listrik adalah aki mobil. Aki mobil memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar. Aki 12

volt, 65 Ah dapat dipakai untuk mencatu rumah tangga (kurang lebih) selama 0.5 jam pada daya 780 watt.

e. *Rectifier – Inverter*

Rectifier berarti penyearah. *Rectifier* dapat menyearahkan gelombang sinusoidal (AC) yang dihasilkan oleh generator menjadi gelombang DC. *Inverter* berarti pembalik. Ketika dibutuhkan daya dari penyimpanan energi (aki/lainnya) maka catu yang dihasilkan oleh aki akan berbentuk gelombang DC. Karena kebanyakan kebutuhan rumah tangga menggunakan catu daya AC, maka diperlukan *inverter* untuk mengubah gelombang DC yang dikeluarkan oleh aki menjadi gelombang AC, agar dapat digunakan oleh rumah tangga.



Gambar 2.4 Komponen turbin angin [10]

Bagian-bagian turbin angin serta penjelasannya berdasarkan pada Gambar 2.3 adalah sebagai berikut:

- a. Anemometer untuk mengukur kecepatan angin, dan mengirim data angin ini ke alat pengontrol.

- b. *Blades* (Bilah Kipas). Kebanyakan turbin angin mempunyai 2 atau 3 bilah kipas. Angin yang menghembus menyebabkan turbin tersebut berputar.
- c. *Brake* (Rem). Suatu rem cakram yang dapat digerakkan secara mekanis, dengan tenaga listrik atau hidrolis untuk menghentikan rotor atau saat keadaan darurat.
- d. *Controller* (Alat Pengontrol). Alat Pengontrol ini menstart turbin pada kecepatan angin kira-kira 12-25 km/jam, dan mematikannya pada kecepatan 90 km/jam. Turbin tidak beroperasi di atas 90 km/jam, karena angin terlalu kencang dapat merusakkannya.
- e. *Gear box* (Roda Gigi). Roda gigi menaikkan putaran dari 30-60 rpm menjadi kira-kira 1000-1800 rpm yaitu putaran yang biasanya disyaratkan untuk memutar generator listrik.
- f. Generator untuk membangkitkan listrik, biasanya disebut alternator arus bolak-balik.
- g. *High-speed shaft* (Poros Putaran Tinggi) untuk menggerakkan generator.
- h. *Low-speed shaft* (Poros Putaran Rendah) yaitu poros turbin yang berputar kira-kira 30-60 rpm.
- i. *Nacelle* (Rumah Mesin). Rumah mesin ini terletak di atas menara. Di dalamnya berisi *gear-box*, poros putaran tinggi/rendah, generator, alat pengontrol, dan alat pengereman.
- j. *Pitch* (Sudut Bilah Kipas): Bilah kipas bisa diatur sudutnya untuk mengatur kecepatan rotor yang dikehendaki, tergantung angin terlalu rendah atau terlalu kencang.
- k. Rotor yaitu bilah kipas bersama porosnya.
- l. *Tower* (Menara). Menara bisa dibuat dari pipa baja, beton, rangka besi. Karena kencangnya angin bertambah dengan ketinggian, maka makin tinggi menara makin besar tenaga yang didapat.

- m. *Wind direction* (Arah Angin)
- n. *Wind vane* (Tebeng Angin) untuk mengukur arah angin, berhubungan dengan penggerak arah agar arah turbin disesuaikan dengan arah angin.
- o. *Yaw drive* (Penggerak Arah) untuk memutar turbin ke arah angin. Untuk desain turbin yang mendapat hembusan angin dari belakang tak memerlukan alat ini.
- p. *Yaw motor* (Motor Penggerak Arah) yaitu motor listrik yang menggerakkan penggerak arah.

2.1.3 Prinsip Kerja Turbin Angin

Secara sederhana, proses konversi diawali dari adanya energi kinetik angin yang bergerak mengenai bilah-bilah turbin sehingga menyebabkan bilah-bilah turbin berputar. Putaran bilah-bilah turbin akan menggerakkan rotor yang tersambung dengan generator listrik, sehingga menjadi energi listrik. Turbin angin dapat berputar dikarenakan adanya vektor dari gaya *lift* dan gaya *drag* yang dihasilkan akibat bentuk aerodinamis dari penampang bilah turbin angin tersebut. Ketika sebuah penampang *airfoil* terkena angin dari arah depan, maka akan menghasilkan vektor gaya *lift* (L) dan *drag* (D). Perubahan gaya *lift* dan gaya *drag* ini dipengaruhi langsung oleh bentuk geometri bilah, kecepatan dan arah angin terhadap garis utama bilah (*pitch* bilah). Perubahan gaya *lift* dan *drag* menyebabkan kecepatan bilah dan torsi poros akan berubah pula. Perubahan *pitch* bilah ini akan mempengaruhi kecepatan bilah (RPM) dari rotor karena adanya perubahan jumlah daya tiup angin yang diterima oleh bilah yang dikonversi menjadi kecepatan putar rotor [11].

Kecepatan minimal angin untuk dapat memutar bilah turbin adalah sebesar 3 m/s. Agar diperoleh daya listrik yang stabil sesuai dengan kapasitas generatornya, maka dibutuhkan kecepatan rata-rata angin sebesar 6 m/s sampai dengan 10 m/s.

Dengan begitu, daerah yang cocok digunakan dalam penerapan turbin angin daerah pegunungan, pesisir, dan pantai.

Dalam sistem konversi energi angin, energi mekanik turbin hanya dapat diperoleh dari energi kinetik yang tersimpan dalam aliran angin, berarti tanpa perubahan aliran masa udara, kecepatan angin di belakang turbin harus mengalami penurunan dan pada saat yang bersamaan luas penampang yang dilewati angin harus lebih besar.

2.1.4 Hubungan daya turbin dan kecepatan

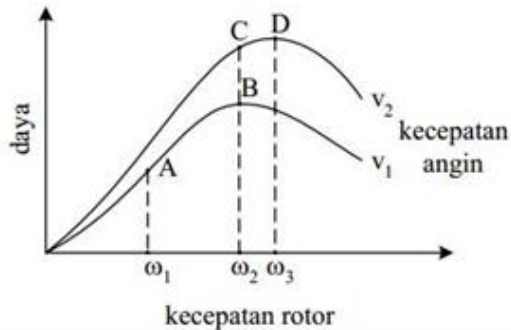
Pada dasarnya turbin angin menyerap daya dari angin ketika baling-baling dilalui oleh aliran udara. Aliran udara yang mengalir melalui permukaan baling-baling menyebabkan timbulnya gaya tangensial akibat adanya gaya angkat (F_{lift}) dan gaya dorong (F_{drag}) pada turbin angin. Arah dari gaya angkat (F_{lift}) yang dihasilkan tegak lurus (vertikal) terhadap arah angin, sementara gaya dorong (F_{drag}) mempunyai arah yang sama dengan arah angin. Derajat pitch merupakan sudut antara chord line (garis melintang badan baling-baling) dengan bidang putar baling, dan angle of attack α merupakan sudut antara chord line baling-baling dengan kecepatan relatif. Kecepatan angin relatif merupakan resultan antara kecepatan angin (V_w) yang masuk ke balingbaling dengan komponen kecepatan angin pada arah perputaran baling-baling (V_b).

Daya yang dihasilkan oleh turbin angin dipengaruhi oleh rapat jenis angin dan kecepatan angin [15], yang dirumuskan sebagai berikut:

$$P_a = \dot{m} \frac{v^2}{2g} \quad (2.1)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad (2.2)$$

Dari Gambar 2.4 diketahui bahwa jika kecepatan angin v_1 dan turbin beroperasi pada A (untuk kecepatan rotor ω_1), daya maksimal yang bisa diperoleh pada saat kecepatan angin v_1 adalah pada titik kerja A.



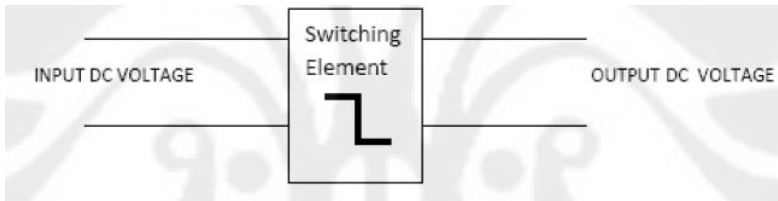
Gambar 2.5 Hubungan antara kecepatan angin, kecepatan rotor turbin angin dan daya turbin angin [16]

Jika kemudian kecepatan angin berubah menjadi v_2 , maka titik kerja turbin akan berpindah ke titik C. Perpindahan titik kerja ini menyebabkan daya yang diperoleh menjadi tidak maksimal, daya akan maksimal dengan memindahkan titik kerja turbin angin dari titik C ke titik D dengan cara mengubah kecepatan rotor menjadi ω_2 . Hal ini menunjukkan bahwa untuk mendapatkan daya secara maksimal, kecepatan rotor harus berubah mengikuti perubahan dari kecepatan angin. Setiap kecepatan angin memiliki kecepatan rotor yang optimal.

2.2 DC-DC Konverter

Dc-dc konverter merupakan rangkaian elektronika *power* untuk mengubah suatu masukan tegangan dc menjadi tegangan dc keluaran dengan nilai yang lebih besar atau kecil dari tegangan masukannya. Rangkaian dc-dc konverter salah satunya merupakan *switched-mode* dc-dc konverter, atau biasa disebut dengan *switching power supply*. Tegangan dc masukan dari

proses dc-dc konverter tersebut berasal dari sumber tegangan dc yang biasanya memiliki tegangan masukan yang tetap atau berubah-ubah. Pada dasarnya, tegangan keluaran dc yang ingin dicapai adalah dengan cara pengaturan lama waktu perhubungan antara sisi keluaran dan sisi masukan pada rangkaian yang sama. Dc-dc konverter terutama digunakan untuk menyediakan catu daya dc dengan tegangan *output* yang dapat disesuaikan, untuk penggunaan umum [12] seperti skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.5 DC-DC Konverter [12]

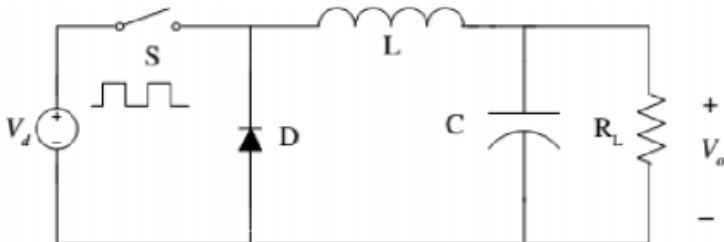
Dasar switching power supply terdiri dari tiga topologi yaitu buck (*step down*), boost (*step up*), dan buck boost (*step up/down*). Ketiga rangkaian dasar *switching power supply* ini merupakan *noninsolated* dc-dc konverter dimana masukan dan keluaran dengan *grounding* yang sama. Pada dasarnya, ada cara untuk meregulasi tegangan pada *switching power supply*, yaitu dengan *pulse width modulation* (PWM) [13].

- *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan suatu metode pengaturan tegangan dengan mengubah atau mengatur *periode on* (TON) pada tegangan berfrekuensi dengan merubah frekuensi yang tetap sama. PWM biasanya terdapat pada pengaturan motor, penaik atau penurun tegangan. Siklus kerja ini didapatkan dari perbandingan antara lamanya tegangan pada nilai maksimum (TON) dengan lamanya tegangan pada nilai minimum atau nol (TOFF) dan biasa disebut dengan *duty cycle* (D). Untuk menentukan besarnya *duty cycle* digunakan persamaan

$$\text{duty cycle } (D) = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T} = T_{on} \cdot F \quad (2.3)$$

2.3 Buck Converter

DC-DC *buck converter* merupakan sebuah alat yang berfungsi untuk menurunkan tegangan keluaran dari generator agar sesuai dengan tegangan keluaran yang diinginkan. Tegangan keluaran ini nantinya akan disimpan di baterai, sehingga membutuhkan nilai tegangan keluaran yang konstan. Ada lima rangkaian dasar dari konverter DC-DC non-isolasi, yaitu *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk*, dan *sepic*. Rangkaian dasar *buck converter* ditunjukkan pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2.5 Rangkaian DC chopper tipe *buck* [17]

Buck Converter berfungsi untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih rendah dibanding tegangan masukannya, atau biasa disebut dengan konverter penarik tegangan. Konverter ini banyak dimanfaatkan untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga surya dan turbin angin. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih rendah daripada masukannya, tipe *buck* ini menggunakan komponen *switching* untuk mengatur *duty cycle*-nya. Komponen *switching* tersebut dapat berupa thyristor, MOSFET, IGBT, dan lain-lain [20]. Rangkaian DC choper tipe *Buck* akan ditunjukkan pada Gambar 2.10. dan Gambar 3.4.

DC-DC *buck converter* menggunakan komponen penyimpan energi seperti induktor dan kapasitor untuk mengontrol aliran energi dari generator menuju beban dengan menggunakan saklar *on-off* secara kontinyu. Saklar adalah sebuah alat elektronik yang

beroperasi dalam dua keadaan. Keadaan *conduction mode (on)* terjadi pada saat keluaran generator dihubungkan pada sebuah induktor. Saat keadaan *cut-off mode (off)*, keluaran dari generator tidak dihubungkan dari induktor. DC-DC *buck converter* juga berisi sebuah dioda bias maju yang dapat menyediakan arah balik untuk arus dalam keadaan *cut-off* [18].

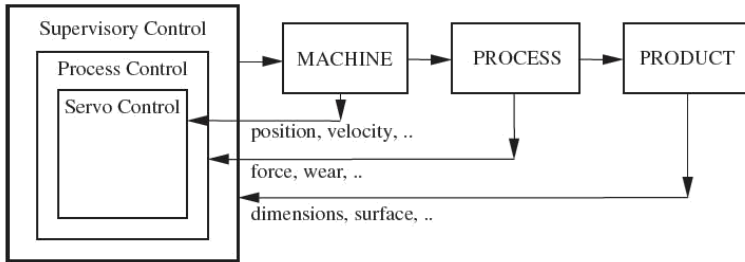
2.4 *Supervisory Control*

Istilah *supervisory control* digunakan untuk mendefinisikan sebuah sistem kontrol dengan supervisi yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performa, ekonomis, dan kehandalan. Beberapa fungsi yang tergolong *supervisor control* adalah pemilihan strategi kontrol, penggabungan sensor, pembangkitan sinyal referensi, monitoring kerusakan, deteksi gangguan, dan monitoring mesin [19]. Gambar 2.12 mengilustrasikan sebuah kontroler pada proses produksi yang terdiri atas tiga level kontrol yaitu level kontrol mesin, level kontrol proses, dan level kontrol pengawasan (level tertinggi).

Strategi di level pengawasan ditujukan untuk mengkompensasi faktor-faktor yang belum diperhitungkan secara eksplisit dalam desain kontrol nominal. Selain itu, level pengawasan dapat memonitor kegagalan dan/atau kerusakan komponen. Informasi dari sensor-sensor terkait dapat digabungkan untuk meningkatkan kehandalan dan kualitas informasi. Seluruh informasi kemudian dapat digunakan untuk tujuan optimisasi proses.

Pada level abstraksi yang tertinggi, tujuan utama *supervisory control* adalah mengoptimalkan produk. Dimana terdapat beberapa tugas yaitu diantaranya Dua tugas dasar perlu dilakukan untuk memenuhi tujuan ini:

- a. Meningkatkan performa sistem (misalkan menambah penghematan bahan bakar atau mengurangi biaya pembangkitan)
- b. Menjaga parameter operasional (frekuensi dan tegangan, beban pada mesin diesel, dan lain-lain) dalam batasannya



Gambar 2.6 Struktur *supervisory control* pada proses produksi [23]

Aksi kontrol yang digunakan untuk melakukan tugas tersebut adalah:

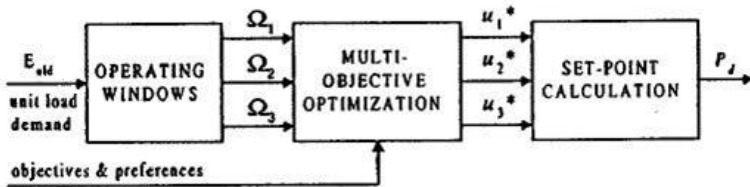
- a. Komponen *switching on/off*, yaitu mengubah model operasi system
- b. Mengubah *set point* operasi dari beberapa komponen

Beberapa peneliti menggunakan *coordinated control* sebagai nama lain dari *supervisory control*, seperti pada [15]. Mereka menerapkan teknik *supervisory control* dalam menentukan *set point* tekanan pada sistem pembangkit listrik tenaga fosil untuk tujuan optimisasi proses produksi. Problem utama yang dibahas adalah merancang pemetaan yang mentransformasikan profil permintaan beban dengan *trajectory set point* untuk loop kontrol tekanan uap. Proses perancangan meliputi tiga langkah:

- a. Penentuan daerah *feasibility* untuk variabel keputusan (*decision variable*)
- b. Solusi problem optimisasi untuk menemukan sinyal kontrol *steady-state* optimal

- c. Perhitungan *set point* tekanan melalui evaluasi langsung dari model *steady-state* unit.

Pemetaan tekanan daya pada makalah mereka dibangun sebagai studi kasus dimana fungsi obyektif bergantung hanya pada sinyal kontrol.



Gambar 2.7 Proses pembangkitan *set point* [15]

2.5 Sistem Satuan Per Unit

Setiap besaran pengukuran pasti memiliki satuan sebagai ukuran atau kuantitas dalam menyatakan suatu besaran. Dalam penggunaannya, terdapat 2 sistem satuan yang sering kali digunakan yaitu sistem satuan inggris dan sistem satuan metrik. Dalam kondisi tertentu besaran memiliki nilai pengukuran yang terlalu besar atau terlalu kecil, dalam hal ini diperlukan penyederhanaan nilai pengukuran dengan membagi nilai pengukuran dengan menggunakan nilai tertentu yang biasanya dikenal dengan nilai dasar. Sistem satuan ini dikenal dengan sistem satuan per-unit. Sistem satuan per-unit banyak digunakan dalam pengukuran atau perhitungan sistem tenaga karena dibutuhkan rentang kisaran besaran yang cenderung sempit, sehingga membuat nilai kesalahan menjadi mencolok [10].

Nilai dasar dalam sistem satuan per-unit selalu memiliki satuan/unit yang sama dengan nilai aktualnya. Nilai dasar selalu dalam besaran riil, sedangkan nilai aktual berada dalam besaran kompleks. Satuan per-unit biasa disingkat dengan istilah “pu”. Dalam tugas akhir ini terdapat beberapa besaran yang dinyatakan

dalam pu, diantaranya adalah koefisien daya dan daya nominal dari sistem turbin angin. Nilai dasar yang digunakan dalam konversi satuan per-unit menggunakan nilai maksimal dari masing-masing besaran, misalnya apabila rentang daya nominal dari turbin antara 10 watt sampai dengan 300 watt, maka nilai dasar yang digunakan adalah 300 watt. Apabila nilai daya nominal yang terukur sebesar 233 watt, maka nilai daya dalam satuan pu dapat dinyatakan dengan $233/300$ pu.

2.6 Kalibrasi

Kalibrasi sensor bertujuan untuk mengetahui nilai ketidakpastian hasil pengukuran. Kalibrasi sensor tegangan dan arus dilakukan dengan prosedur yaitu dilakukan pengukuran dan pencatatan dengan sensor tegangan dan multimeter terhadap tegangan keluaran *power supply* sebanyak sepuluh kali kemudian t dihitung nilai U_{A1} , U_{A2} , U_{B1} , dan U_{exp} menggunakan persamaan berikut:

- Nilai Ketidakpastian tipe A:

Standar deviasi :

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}}{n-1} \quad (2.4)$$

$$U_{a1} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.5)$$

$$U_{a2} = \sqrt{\frac{SSR}{n-2}} \quad (2.6)$$

Dimana :

SSR (*Sum Square Residual*) = $\sum SR$ (*Square Residual*)

$SR = R^2$ (*Residu*)

Y_i (Nilai koreksi) =

$$\text{Pemb. standar } (t_i) - \text{Pemb. alat } (x_i) \quad (2.7)$$

$$Y_{reg} = a + (b \times t_i) \quad (2.8)$$

$$a = \bar{y}_i + (b \times \bar{t}_i) \quad (2.9)$$

$$b = \frac{n \cdot \sum t_i y_i - \sum y \cdot \sum t_i}{n \cdot \sum t_i^2 - (\sum t_i)^2} \quad (2.10)$$

$t_i = \text{Pemb. standar}$

$y_i = \text{Nilai koreksi, } n = \text{Jumlah data}$

- Nilai ketidakpastian tipe B
Pada ketidakpastian tipe B ini terdapat 2 parameter ketidakpastian, yaitu ketidakpastian Resolusi (U_{B1}) dan ketidakpastian alat standar *multimeter* (U_{B2}). Berikut ini adalah perhitungan ketidakpastian tipe B :

$$U_{B1} = \frac{\frac{1}{2} \times \text{Resolusi}}{\sqrt{3}} \quad (2.11)$$

$$U_{B2} = \frac{a}{k} (2.9)$$

- Nilai ketidakpastian kombinasi U_c :

$$U_c = \sqrt{U_{A1}^2 + U_{A2}^2 + U_{B1}^2 + U_{B2}^2} \quad (2.12)$$

Dengan kondisi V atau derajat kebebasan dari kedua tipe ketidakpastian, sebagai berikut :

V = n-1, sehingga :

V3 = 50; V4 = 50 (berdasarkan table T)

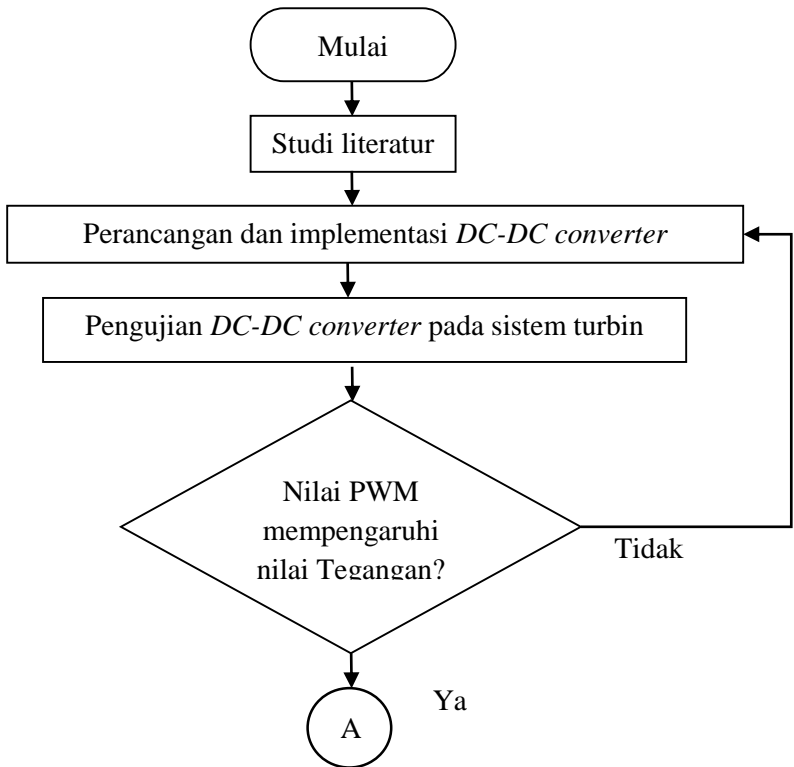
Dengan nilai V_{eff} (Nilai derajat kebebasan efektif) sebagai berikut :

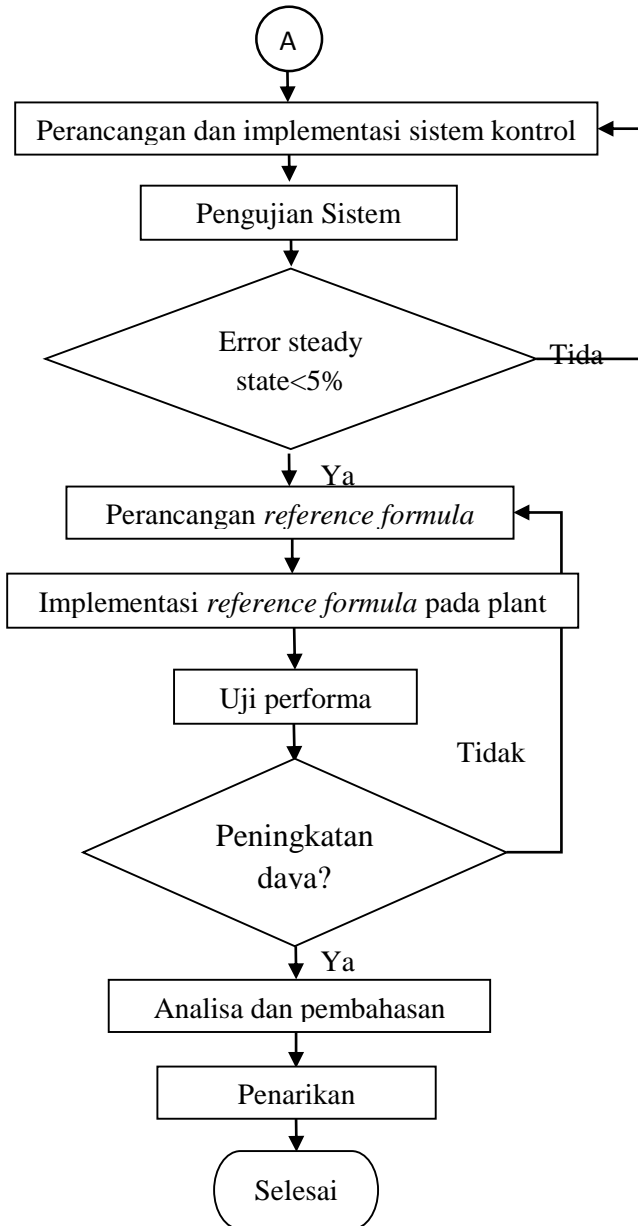
$$V_{eff} = \frac{(U_c)^4}{\sum (U_i)^4 / V_i} \quad (2.13)$$

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Prosedur Umum Penelitian

Dalam penelitian tugas akhir kali ini dilakukan perancangan *supervisory control* untuk pengendalian turbin angin menggunakan metode *direct torque control* berbasis *buck converter*. Penelitian tugas akhir dilakukan dengan metodologi sebagai berikut.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Studi Literatur merupakan tahapan awal dari penelitian ini dimana akan dilakukan pencarian informasi berdasarkan jurnal, *text book*, dan penelitian-penelitian yang telah ada sebelumnya. Studi literature terfokus pada topik penelitian, yaitu ekstraksi daya pada turbin angin, penerapan *supervisory control*, implementasi *Buck Converter*, dan pengoptimalan PMSG.

Tahap selanjutnya adalah dilakukan Perancangan sistem pengukuran arus tegangan dan dilakukan untuk keperluan memperoleh nilai *variable-variable* sistem kontrol yang nantinya digunakan sebagai *feedback* dalam sistem kontrol. Perancangan sendiri disini berkaitan dengan pemilihan jenis sensor serta pengambilan data pengukuran.

Setelah didapatkan data pengukuran. Data tersebut kemudian dibandingkan dengan menggunakan alat standart. dilakukan kalibrasi untuk mengetahui bahwa hasil pengukuran nilainya tidak jauh dengan hasil pengukuran menggunakan alat standart..

selanjutnya dilakukan Perancangan sistem kontrol diawali dengan merancang *buck converter*. Dimana *buck converter* bertujuan untuk menurunkan tegangan *output* generator. Penurunan tegangan ini disertai pula dengan penurunan arus. Arus yang merupakan fungsi dari torsi turbin akan berpengaruh langsung pada kecepatan putaran rotor turbin. Sehingga dapat dilakukan pengendalian kecepatan rotor turbin menggunakan pengendalian arus *converter* tipe *buck* ini. Perancangan berupa pembuatan *kontroller buck*, pembuatan sistem kontrol PI dan tuning Parameter kontrol. Perancangan sistem kontrol PI ini dilakukan untuk mengoptimalkan ekstraksi daya turbin. Selanjutnya Pada tahap ini akan dilakukan pengamatan parameter-parameter dari respon kontrol yang dihasilkan, parameter kontrol meliputi *Rise time*(r_s), *Maximum overshoot* (M_p), *peak time* (t_p), *time settling* (t_s). Apabila belum mencapai

parameter yang diinginkan maka akan dilakukan perancangan ulang sistem kontrol .

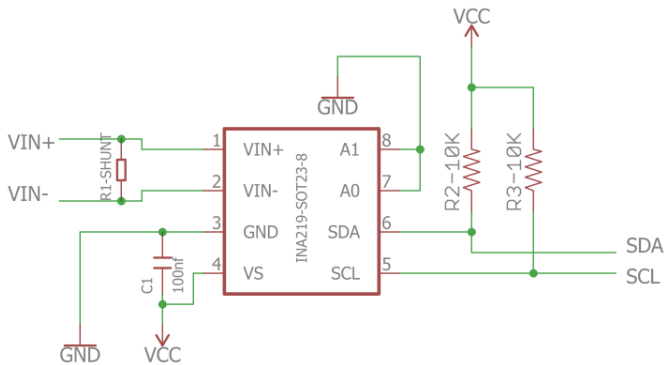
Dengan kontroler yang sudah dapat bekerja dengan baik, maka selanjutnya dilakukan tahap akhir perancangan yakni penambahan estimator *reference formulla*. *Reference formulla* ditambahkan pada *supervisory control* untuk melakukan estimasi nilai set poin untuk *primary loop* pada *supervisory control*. Setelah dilakukan perancangan selanjutnya dilakukan implementasi pada kontroler dan *plant* yang telah ada. Algoritma *reference formula* berperan untuk keperluan *memberikan set point* daya turbin optimum dengan variable manipulasi berupa kecepatan, pada tahap ini akan dilakukan perancangan algoritma yang sesuai agar dapat memberikan *set point* daya paling optimal

Untuk membandingkan *supervisory control* yang telah dilakukan maka dilakukan perbandingan hasil ekstrak daya turbin dengan dan sistem turbin tanpa kontrol kecepatan .

3.2 Perancangan dan Pengujian Sensor

Sensor tegangan yang digunakan adalah rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan berfungsi untuk mengukur tegangan keluaran buck converter sebagai input rangkaian beban. Dengan menggunakan persamaan (3.1) didapatkan nilai resistor yang diterapkan pada sistem. Sementara untuk sensor arus dan tegangan menggunakan modul sensor ina 219 yang dipasang pada *output rectifier* atau *input* dari buck converter. Rangkaian modul sensor ina 219 adalah sebagaimana pada gambar 3.2.

$$V_o = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times V_i \quad (3.1)$$

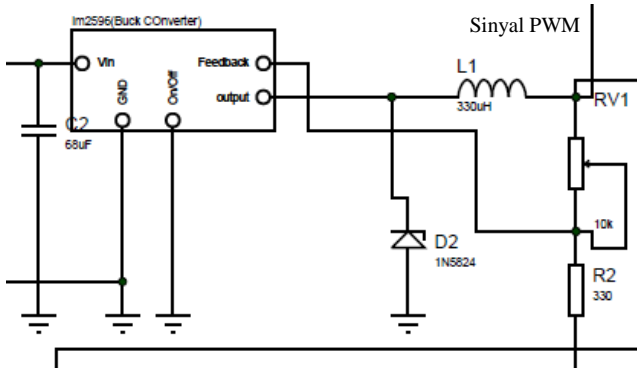


Gambar 3.2 Rangkaian modul sensor *ina219*

dengan menggunakan jenis komunikasi i2c, maka sensor dapat lebih mudah dihubungkan hanya dengan dua jalur kabel. pin scl dan sda masing-masing dihubungkan ke pin A4 (scl) dan A5 (sda) arduino. Masing-masing jalur kemudian ditambahkan resistor sebesar 10k sebagai pull up resistor yang berfungsi agar saat tidak ada arus yang mengalir output keluaran sensor bernilai high/5V. Pin vcc dan gnd masing-masing dihubungkan ke pin 5v dan gnd arduino. Sensor ina219 pada dasarnya memiliki konsep yang sama dengan sensor dc lainnya namun sensor ini tidak hanya mengukur arus, melainkan juga mengukur tegangan sehingga nilai daya dapat diukur menggunakan sensor ini.

3.3 Perancangan dan Implementasi Buck konverter

DC-DC *converter* yang diimplementasikan pada penelitian kali ini adalah *buck converter*. Pemasangan *buck converter* dilakukan untuk mengendalikan arus pada generator PMSG yang sebelumnya telah melewati *rectifier* terlebih dahulu. Rangkaian *buck converter* pada gambar 3.3:



Gambar 3.3 Rangkaian *buck converter*

Adapun komponen buck converter yang digunakan adalah mengacu pada nilai-nilai yang terdapat pada rangkaian referensi. Adapun nilai komponen converter

Tabel 3.1 Nilai Komponen Konverter *Buck*

No	Parameter	Nilai
1	Resistor	330 Ohm
2	Induktor	330 μ H
3	Kapasitor	68 μ F

Buck converter pada umumnya penurunan teganganya dikendalikan dengan cara mengatur *switch* mosfet berdasarkan *duty cycle* dari sinyal pwm. menggunakan pwm dengan resolusi 8 bit yang berarti pwm tersebut memiliki variasi perubahan nilai sebesar 2^8 atau 256 variasi mulai dari 0-255 perubahan nilai yang mewakili nilai *duty cycle* sebesar 0 – 100% dari keluaran pwm.

3.4 Perancangan dan implementasi rangkaian beban

Manipulasi tegangan yang masuk ke beban menggunakan *buck converter* akan menyebabkan arus yang dihasilkanpun akan termanipulasi. Maka oleh karena itu setelah melakukan beberapa

percobaan pembebanan pada turbin yaitu beban *resitif* (22 ohm 5 watt), beban *induktif* (motor DC 5.9 V) dan beban *kapasitif* (baterai lithium 3.7V 2200mAh. Maka dipilihlah baterai sejumlah 4 dirangkai seri parallel sehingga menghasilkan nilai baterai total sebesar 5 V 8000 mAH dengan pertimbangan pengujian nilai arus pada ketiga beban. Adapun hasil perbandingan arus dari ketiga beban diatas adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 perbandingan arus dari beberapa beban

No	Parameter	resitif	Induktif	Kapasitif
1	Kecepatan(m/s)	6	6	6
2	Arus(mA)	13	45	60

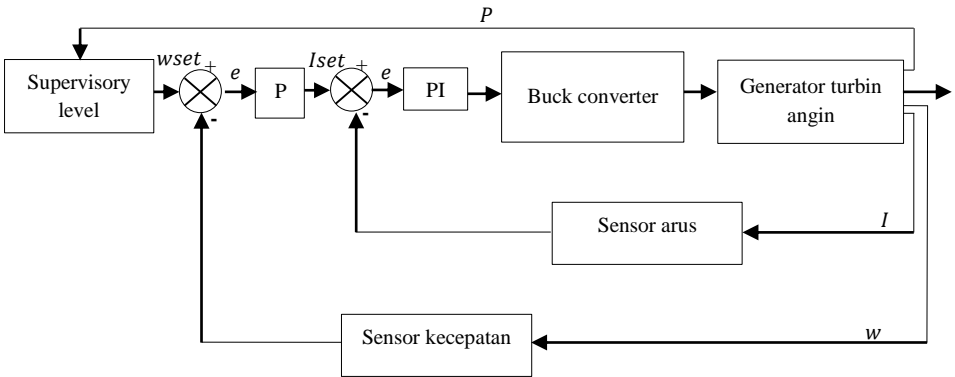
Sedangkan kedudukan beban dalam sistem secara keseluruhan dapat dilihat sebagaimana gambar 3.4:



Gambar 3.4 Susunan Sistem Secara Keseluruhan

Adapun metode *direct torque control* dalam keseluruhan sistem merupakan kontrol torsi (kebalikan kecepatan rotor turbin) secara langsung dengan cara mengontrol arus pada generator. Untuk itu diberikan efek pembebanan pada sistem turbin agar timbul arus pada generator. pembebanan akan berpengaruh terhadap arus pada generator. Jika arus pada generator besar maka kecepatan rotor turbin akan kecil karena torsi juga besar dan begitu sebaliknya apabila arus pada generator turbin kecil maka torsi juga kecil dan mengakibatkan kecepatan rotor besar. Dengan demikian metode *direct torque control* dapat dilakukan dengan cara memanipulasi tegangan yang mengalir ke beban menggunakan *buck converter*.

3.5 Perancangan Cascade Control dan Supervisory Level



Gambar 3.5 Diagram blok supervisory control

Perancangan diawali dengan *Cascade controller* yang mana tersusun dari dua buah kontroler yaitu kontrol arus pada *inner loop* dan kontrol kecepatan rotor pada *outer loop*.

Perancangan *cascade controller* dilakukan pada *inner loop* terlebih dahulu, dan dilanjutkan pada *outer loop*. Sebelum dilakukan *tuning* maka terlebih dahulu diketahui *range* dari masing-masing variabel yang dikontrol untuk masing-masing kondisi operasi. Dalam menentukan nilai gain K_p dan K_i metode tuning yang digunakan menggunakan metode *trial & error* sampai menghasilkan respon dengan *error steady state* $\pm 5\%$. Dari tuning yang dihasilkan diperoleh nilai parameter untuk masing-masing kontroler sebagai berikut:

- K_p Inner Loop (*secondary loop*) = 5.2
- K_i Inner Loop (*secondary loop*) = 0.1
- K_p Outer Loop (*primary loop*) = 0.3

Sebagai setpoint dari outer loop yaitu kontrol kecepatan rotor digunakan *reference formula* sebagai algoritma untuk mencari nilai kecepatan optimal. Algoritma ini tersusun atas beberapa persamaan yang menggunakan satuan PU (daya runit). Adapun

persamaan itu adalah persamaan turbin yang berlaku umum dimana kita harus menentukan nilai $P_{nominal}$ untuk merubah satuan daya terukur kedalam Satuan unit sebagaimana terdapat pada persamaan (3.2).

$$Pu = \frac{P_{measure}}{P_{nominal}} \quad (3.2)$$

Nilai Pu (daya unit) kemudian dimasukkan kedalam persamaan (3.3) agar diperoleh nilai ω_{ref} dari persamaan reference formula.

$$\omega_{ref} = (-0,67 \times Pu^2) + (1,42 \times Pu) + 0,5 \quad (3.3)$$

Nilai ω_{ref} kemudian dikalikan dengan $\omega_{nominal}$ untuk mendapatkan nilai ω_{set} sebagaimana terdapat pada persamaan (3.4)

$$\omega_{set} = \omega_{ref} \times \omega_{nominal} \quad (3.4)$$

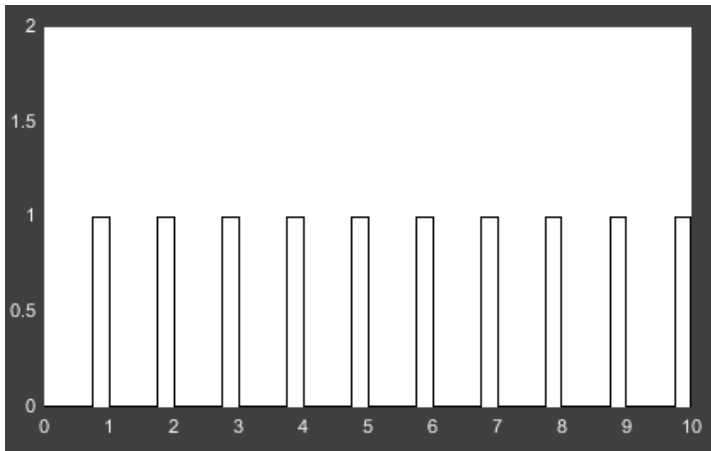
Adapun melalui perhitungan dan pencarian nilai $P_{nominal}$ dan $\omega_{nominal}$ agar didapatkan set point optimum di berbagai kecepatan dilakukan dengan cara trial eror serta perhitungan. Setelah dilakukan beberapa kali percobaan kombinasi $P_{nominal}$ dan $\omega_{nominal}$ didapatkan nilai sebesar $\omega_{nominal}=667.80$ rpm dan $P_{nominal}=17.6$ Watt. Dimana nilai $\omega_{nominal}$ memenuhi nilai ω untuk sistem turbin angin pada kecepatan 7 m/s dalam keadaan open loop.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Rangkaian Pembangkit Sinyal PWM

Seperti yang telah dijelaskan pada bab II mengenai *pulse width modulation* dan mosfet, *Pwm* merupakan salah satu metode yang digunakan untuk men-*driver* dari pada mosfet yang digunakan pada rangkaian ini . Pengujian dilakukan dengan cara pemberian nilai *duty cycle* yang berbeda-beda. Kemudian dilihat hasilnya pada osiloskop. pengujian menggunakan osiloskop didapat sinyal gelombang *pwm* seperti pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil dari Sinyal Pembangkit *Pwm* Dengan *Duty Cycle* 25%

Pada Gambar 4.1 diatas merupakan *output* sinyal *pwm* yang terbaca melalui osiloskop. Output dari nilai lebar pulsa tersebut di atur melalui perintah *pwm* yang terdapat pada arduino. Selanjutnya pengujian dilakukan dengan membangkitkan PWM pada lebar pulsa 50,75 dan 99%. Kemudian tiap output sinyal PWM diperiksa nilai lebar pulsanya apakah sudah seperti yang diharapkan. Selanjutnya *pwm* inilah yang digunakan untuk mendrive dari ic LM2596 yang terdapat pada buck converter.

4.2 Hasil Pengujian Sensor

Kalibrator yang digunakan berupa multimeter digital Sanwa. Berikut ini merupakan hasil pengukuran untuk mencari nilai ketidakpastian alat ukur yang terdapat pada table 4.1.

Tabel 4.1 Data Kalibrasi Tegangan

No	Pembacaan Standart	Pembacaan sensor	KOREKSI	SSR
1	1.31	1.47	-0.16	0.104562
2	2.2	2.37	-0.17	0.109694
3	3.27	3.42	-0.15	0.095236
4	4.24	4.4	-0.16	0.100014
5	5.23	5.38	-0.15	0.092323
6	6.22	6.38	-0.16	0.096998
7	7.2	7.33	-0.13	0.077878
8	8.24	8.39	-0.15	0.087937
9	9.21	9.36	-0.15	0.086547
10	10.15	10.29	-0.14	0.079471
11	11.18	11.32	-0.14	0.078068
12	12.1	12.25	-0.15	0.082469
13	13.13	13.28	-0.15	0.08104
14	14.06	14.18	-0.12	0.063715
15	15.09	15.21	-0.12	0.062459
Jumlah	122.83	125.03	-2.2	1.29841
Rata"	8.188666667	8.335333333	0.146667	0.086561

Berdasarkan persamaan kalibrasi yang terdapat pada persamaan (2.1) sampai dengan (2.10) maka didapatkan nilai-nilai ketidakpastian sebagaimana berikut:

$$U_{a1} = 0.02121$$

$$U_{a2} = 0.294211$$

$$U_{b1}=0.002886$$

$$U_{b2}= 0.004975$$

$$U_c = 0.295031$$

$$V_{eff} = 16.17$$

sehingga jika dibulatkan menjadi 16, dimana pada table *T-student* menghasilkan nilai k (faktor koreksi) sebesar 2,12

Oleh karena itu, hasil nilai ketidakpastian diperluas sebesar :

$$U_{exp} = k \times U_c$$

$$U_{exp} = 2.12 \times 0.295031 = 0.601864$$

Sehingga berdasarkan perhitungan ketidakpastian diperluas diatas, menghasilkan nilai ketidakpastian alat sebesar ± 0.601864 . dengan tingkat kepercayaan 95% dari tabel *T-Student*. Nilai ketidakpastian tersebut akan menjadi acuan untuk pembacaan alat ukur selama alat ukur tersebut digunakan.

Kemudian untuk sensor arus juga dilakukan hal yang sama dengan hasil sebagaimana berikut:

Tabel 4.2 Data Kalibrasi Sensor Arus

No	Pembacaan Standart	Pembacaan Alat	KOREKSI	SSR
1	0.07	0.092	-0.022	0.001838
2	0.2	0.243	-0.043	0.006805
3	0.32	0.384	-0.064	0.014564
4	0.4	0.46	-0.06	0.016419
5	0.5	0.585	-0.085	0.028043
6	0.6	0.693	-0.093	0.036018
7	0.7	0.812	-0.112	0.049776
8	0.8	0.921	-0.121	0.060727
9	0.9	1.04	-0.14	0.078261

Tabel lanjutan

No	Pembacaan Standart	Pembacaan Alat	KOREKSI	SSR
10	1	1.15	-0.15	0.092461
11	1.1	1.26	-0.16	0.107845
12	1.2	1.39	-0.19	0.13892
13	1.3	1.5	-0.2	0.157643
14	1.4	1.61	-0.21	0.177549
15	1.5	1.73	-0.23	0.207652
Jumlah	11.99	13.87	-1.88	117.452
Rata"	0.80	0.924667	0.125333	0.125333

Berdasarkan persamaan kalibrasi yang terdapat pada persamaan 3.1 sampai 3.10 maka didapatkan nilai-nilai ketidakpastian sebagaimana berikut:

$$U_{a1} = 0.07479$$

$$U_{a2} = 0.2798$$

$$U_{b1} = 0.289705$$

$$U_{b2} = 0,004975$$

$$U_c = 0.28970$$

$$V_{eff} = 18.289$$

sehingga jika dibulatkan menjadi 18, dimana pada table *T-student* menghasilkan nilai k (faktor koreksi) sebesar 2,1

Oleh karena itu, hasil nilai ketidakpastian diperluang sebesar :

$$U_{exp} = k \times U_c$$

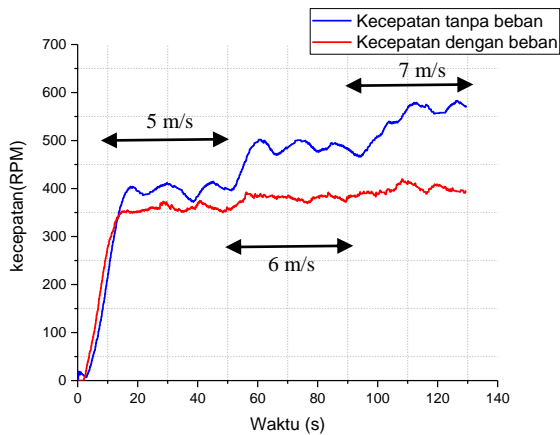
$$U_{exp} = 2,1 \times 0.28970 = 0.608381$$

Sehingga berdasarkan perhitungan ketidakpastian diperluas diatas, menghasilkan nilai ketidakpastian alat sebesar ± 0.608381 . dengan tingkat kepercayaan 95% dari tabel *T-Student*. Nilai

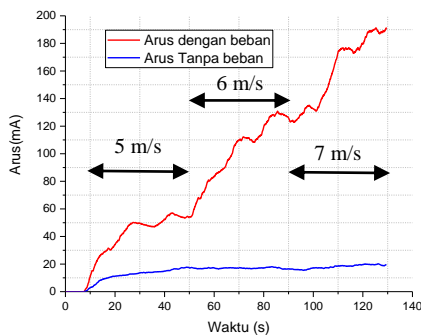
ketidakpastian tersebut akan menjadi acuan untuk pembacaan alat ukur selama alat ukur tersebut digunakan.

4.3 Efek pembebanan

Adapun respon kecepatan rotor Turbin angin dan Arus terhadap diberikanya beban adalah sebagaimana terdapat pada gambar 4.2a dan 4.2b.



Gambar 4.2a Respon kecepatan rotor dengan pengaruh pembebanan



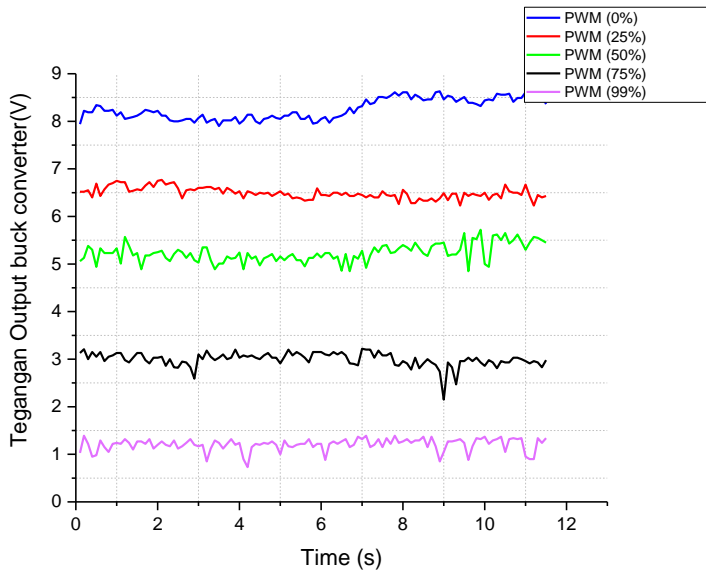
Gambar 4.2b Respon arus dengan pengaruh pembebanan

Dari grafik 4.2a dan 4.2b dapat dilihat bahwa efek pembebanan pada sistem turbin mengakibatkan perbedaan nilai pengukuran kecepatan. Garis biru merupakan kecepatan rotor pada saat tidak diberi beban sehingga sistem turbin angin berjalan pada rangkaian terbuka dengan arus dan torsi sangat kecil namun dengan kecepatan rotor turbin maksimum. Sedangkan garis merah merupakan kecepatan rotor saat diberi beban. Nilai arus dan torsi yang dihasilkan besar namun dengan nilai kecepatan rotor turbin yang kecil. Pada pengujian ini belum dilakukan aksi control sehingga daya yang dihasilkan belum optimum.

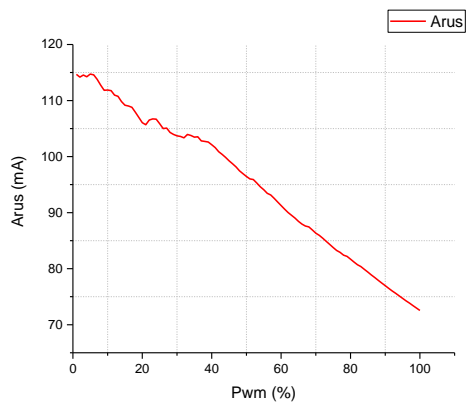
4.4 Pengujian Buck converter

Adapun buck converter yang telah dibuat kemudian diuji dengan memberikan variasi nilai PWM. Nilai PWM ini yang sebelumnya dijelaskan pada sub bab sebelumnya akan mempengaruhi penurunan tegangan pada buck converter. Penurunan ini terjadi karena switch IC pada rangkaian membuka dan menutup seiring dengan lebar dan frekuensi yang diberikan gate IC. Dengan demikian, dapat diubah nilai tegangan output buck converter dengan cara merubah-ubah nilai lebar pulsa(pwm) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3a. Adapun data tersebut diambil pada kondisi rangkaian belum tersambung dengan beban dengan kecepatan 6 m/s.

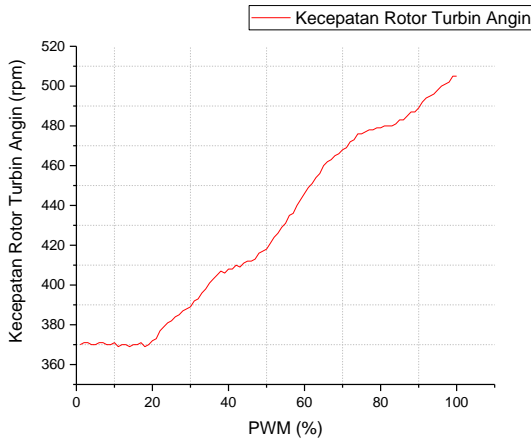
Manipulasi tegangan yang mengalir pada beban akan mempengaruhi efek dari pembebanan. Semakin besar tegangan pada beban maka semakin besar pula arus yang mengalir dan torsi generator, dimana berdampak pada kecilnya kecepatan rotor turbin. Dan begitu sebaliknya semakin kecil tegangan pada beban maka akan semakin kecil pula arus dan torsi pada generator sehingga kecepatan rotor turbin besar. Adapun pengaruh PWM terhadap arus dan kecepatan adalah sebagaimana terdapat pada 4.3b dan 4.3c:



Gambar 4.3a Respon output buck converter terhadap kenaikan nilai PWM



Gambar 4.3b Hubungan Arus generator terhadap kenaikan nilai PWM

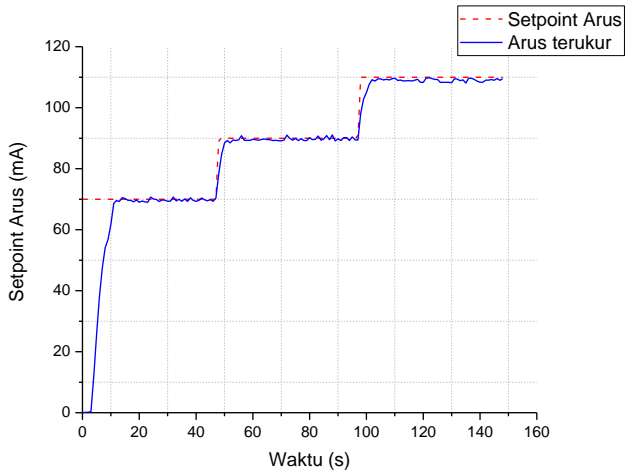


Gambar 4.3c Hubungan kecepatan rotor turbin terhadap kenaikan nilai PWM

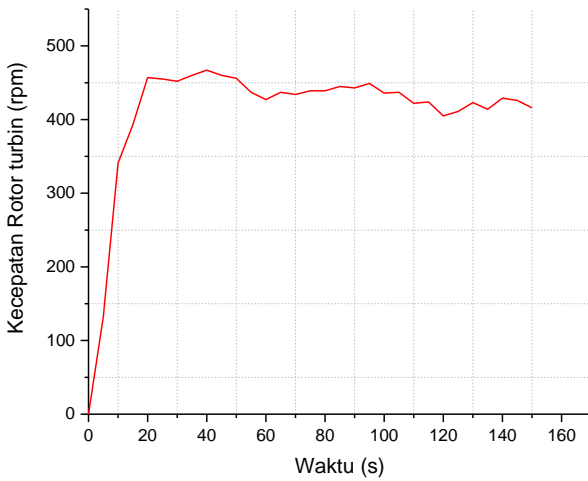
Dari grafik diatas dapat diketahui bahwasanya seiring dengan kenaikan nilai PWM maka semakin kecil pula nilai tegangan output buck converter. Dengan demikian bila disambungkan dengan beban maka kita akan dapat mengendalikan arus generator dengan memanipulasi PWM. Torsi turbin juga akan ikut terkendali karena torsi merupakan fungsi arus. Hal yang sama juga terjadi pada kecepatan rotor turbin yang merupakan kebalikan fungsi dari torsi.

4.5 Tracking Arus(Inner loop)

Sistem kontrol arus kemudian dibuat dengan manipulasi PWM yang diberikan ke buck converter. Adapun hasil respon tracking arus adalah sebagaimana pada gambar 4.4a sedangkan respon kecepatannya terdapat pada gambar 4.4b.



Gambar 4.4a Respon tracking Arus pada beberapa setpoint



Gambar 4.4b Respon kecepatan pada tracking arus yang dilakukan

Adapun respon pada gambar 4.4a didapatkan pada kecepatan angin sebesar 6 m/s dengan tegangan 4 volt pada kondisi tersambung beban. adapun metode menggunakan control PI dimana tuning dilakukan menggunakan metode trial dan eror dengan nilai K_p sebesar 5.2 dan K_i sebesar 0.1 adapun spesifikasi tanggapan sistem adalah sebagai berikut:

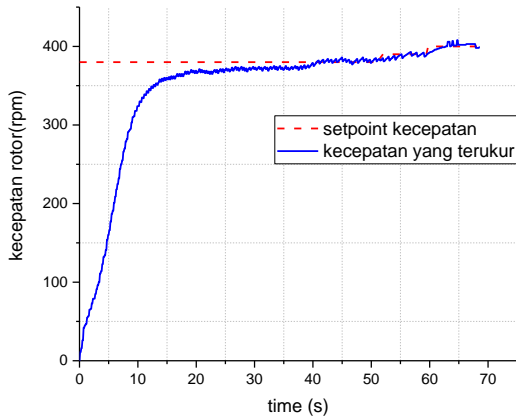
Tabel 4.3 Spesifikasi Tanggapan Sistem control arus

Spesifikasi Tanggapan sistem	Nilai
<i>Peak time (s)</i>	13,5
<i>Rise time (s)</i>	7,5
<i>Maksimum overshoot (%)</i>	2,6
<i>Setling time (s)</i>	11

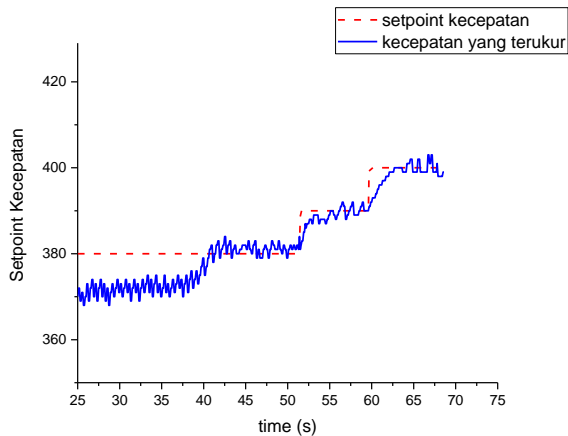
Hasil respon kontrol arus berdasarkan tanggapan sistem pada table 4.3 sudah sesuai dengan yang dirancang. Adapun respon kecepatan rotor turbin semakin kecil sebagaimana terdapat pada gambar 4.4b terjadi dikarenakan dari 3 set point arus. Nilainya kian membesar yaitu setpoint 1 sebesar 70 mA, set point 2 sebesar 90 mA dan setpoint 3 sebesar 110 mA. Setelah pengujian tracking arus menghasilkan tanggapan sistem yang baik. Maka dilakukan tracking kecepatan dengan cara menentukan beberapa setpoint kecepatan dan memanipulasi arus agar kecepatan berada pada set point, adapun pengujian tracking kecepatan akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

4.6 Tracking kecepatan

Sistem kontrol kecepatan kemudian dibuat dengan manipulasi set point arus. Adapun hasil respon tracking kecepatan ditunjukkan pada gambar 4.5a dan pembesarnya pada gambar 4.5b adalah sebagai berikut:



Gambar 4.5a Respon tracking kecepatan pada beberapa setpoint



Gambar 4.5b perbesaran respon Respon tracking kecepatan pada beberapa setpoint

Adapun respon diatas didapatkan pada kecepatan angin sebesar 6 m/s. adapun metode menggunakan control P dimana tuning

dilakukan menggunakan metode trial dan eror dengan nilai K_p sebesar 0.3 Adapun spesifikasi tanggapan sistem adalah sebagai berikut:

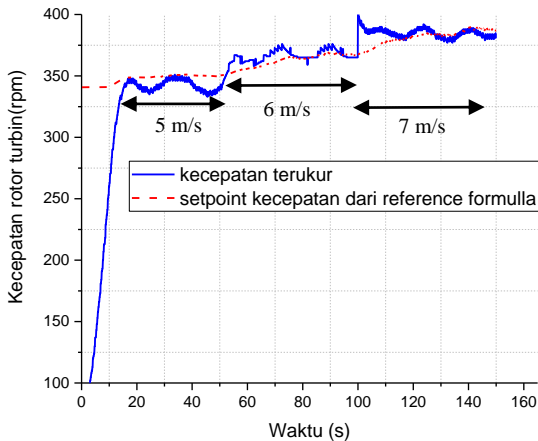
Tabel 4.4 Spesifikasi Tanggapan Sistem control kecepatan

Spesifikasi Tanggapan sistem	Nilai
<i>Peak time (s)</i>	41
<i>Rise time (s)</i>	14,85
<i>Maksimum overshoot (%)</i>	1,5
<i>Setling time (s)</i>	37

Hasil respon kontrol kecepatan berdasarkan tanggapan sistem pada table 4.4 sudah sesuai dengan yang dirancang. Respon begitu lama dikarenakan pengendalian kecepatan merupakan outer loop dalam sistem. Dari gambar 4.5a dan 4.5b juga dapat diketahui bahwasanya sistem pengendalian dapat menjaga nilai terukur di wilayah eror steady state sehingga dapat dikatakan kontrol kecepatan bekerja dengan cukup baik.

4.7 Pengujian *Supervisory Control*

Pada tahap terakhir, setelah kontrol kecepatan dapat dilakukan yaitu penerapan *supervisory control* secara keseluruhan dengan menambahkan supervisory level berbasis *reference formula* yang telah dibuat. Reference formula mengolah data daya terukur kemudian dibagi dengan daya nominal sebagaimana terdapat pada perancangan. Hasil dari pembagian tersebut adalah $PU(\text{Daya unit})$ kemudian nilai daya ini masuk kedalam persamaan (3.3). hasil ω_{ref} kemudian dikalikan dengan $\omega_{nominal}$ sehingga menghasilkan setpoint kecepatan.. Adapun tracking respon kecepatan rotor turbin terhadap setpoint yang diperoleh dari reference formula adalah sebagaimana terdapat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Respon tracking kecepatan terhadap setpoint yang dihasilkan reference formula

Adapun spesifikasi tanggapan sistem adalah sebagaimana terdapat pada table 4.5.

Tabel 4.5 Spesifikasi Tanggapan Sistem control kecepatan dengan set point reference formula

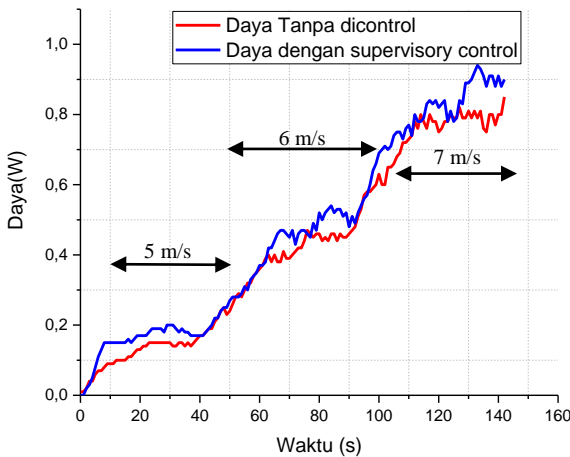
Spesifikasi Tanggapan sistem	Nilai
<i>Peak time (s)</i>	19
<i>Rise time (s)</i>	17
<i>Maksimum overshoot (%)</i>	2,35
<i>Settling time (s)</i>	31.5

Berdasarkan gambar 4.6 diketahui bahwasanya pengendalian *supervisory control* dapat diterapkan dengan tanggapan sistem sebagaimana terdapat pada table 4.5. terjadi overshoot kecepatan pada waktu 50 dan 100 detik pada respon tersebut. Hal ini dikarenakan pada waktu 50s tersebut kecepatan angin dirubah dari 5 m/s ke 6 m/s dan pada waktu 100s kecepatan angin dirubah dari 6 m/s ke 7 m/s. beberapa detik kemudian seiring dengan

kenaikan set point yang diberikan reference formula maka kecepatan terukur juga turun menuju kearah tracking setpoint.

4.8 Perbandingan daya turbin menggunakan *supervisory control* dengan tanpa kontrol kecepatan

Perbandingan dilakukan dengan cara pengambilan data hasil daya sistem turbin dengan supervisory control dibandingkan dengan sistem turbin tanpa kontrol kecepatan. Tanpa kontrol yang dimaksudkan ialah buck converter tidak dihidupkan sehingga dalam sistem, setelah rectifier langsung masuk ke beban tanpa ada kontrol tegangan maupun arus. adapun perbandingan nilai daya dengan supervisory control dan tanpa kontrol kecepatan terdapat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 perbandingan nilai daya dengan supervisory control dan tanpa kontrol kecepatan.

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwasanya peningkatan daya turbin dari supervisory control yang telah dilakukan berhasil diimplementasikan meskipun tidak begitu besar perbedaanya.

Adapun untuk kecepatan 5 m/s diketahui rata-rata peningkatan daya sebesar 4,1% dengan perolehan daya meningkat dari 0,166 W menjadi 0,172 W, kecepatan 6 m/s dengan rata-rata peningkatan sebesar 10.57% dengan perolehan daya dari 0,45 W menjadi 0,50W, dan kecepatan 7 m/s dengan rata-rata peningkatan sebesar 11.65% dengan perolehan daya dari 0,80 W menjadi 0,90W.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan beberapa analisa yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

- a. *Supervisory control* berbasis *buck converter* mampu melakukan kontrol kecepatan turbin dengan performansi kontroller dengan nilai error steady state kurang dari 5%, *peaktime* sebesar 19 detik, *risetime* sebesar 17 detik, *setling time* sebesar 31,5 detik serta *maximum overshoot* sebesar 2,35.
- b. *Supervisory level* menggunakan Reference formula sebagai algoritma pencarian setpoint optimum kecepatan turbin angin dengan nilai $\omega_{nominal}$ sebesar 667.80 rpm dan $P_{nominal}$ sebesar 17.6 Watt.
- c. *supervisory control* yang telah dilakukan berhasil diimplementasikan dan menghasilkan daya turbin sebesar 0.17 watt pada kecepatan angin 5 m/s dan 0.50 watt pada kecepatan angin 6 m/s serta 0.90 watt pada kecepatan 7 m/s, dengan nilai rata-rata peningkatan daya sebesar 4.1%-11.65% dari pada sistem turbin tanpa kontrol kecepatan .

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut adalah sebagai berikut.

1. Efisiensi turbin terhadap nilai daya relative kecil. Akan lebih baik jika turbin yang dibuat tidak lagi satu dengan harapan nilai daya yang dihasilkan jauh lebih besar.

2. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai pembangkit listrik *hybrid* tentunya level sudah pada implementasi bukan hanya pada simulasi saja.
3. Tidak semua yang ada pada simulasi akan berjalan sesuai dengan harapan pada saat di implementasi. Jadi perlu untuk mengetahui bahwa tidak semuanya sesuai dengan perancangan dan ekspektasi pada simulasi yang berhasil dibuat. Karena banyak hal yang ideal pada simulasi tidak akan ditemui pada implementasi

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. PLN, "Statistik PLN 2015," 2016.
- [2] BPPT, "Indonesia Energy Outlook 2016," 2016. [Online]. Available: www.bppt.go.id.
- [3] S. J. D. E. Nasional, "Outlook Energi 2016," 2016.
- [4] Y. yuan and J. Tang, "On Advance Control Methods toward Power Capture and Load Mitigation in Wind Turbines," *Engineering 3*, pp. 494-503, 2017.
- [5] A. Kusiak and H. Zheng, "Optimization of Wind Turbine Energy and Power Factor with An Evolutionary Computation Algorithm," *Energy 35*, vol. 1, pp. 1324-1332, 2010.
- [6] T. Armaditya, H. Suryoatmojo and T. Yuwono, "Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR)," *Jurnal Teknik POMITS 1*, vol. 1, pp. 1-6, 2010.
- [7] B. Pratap, N. Singh and V. Kumar, "Robust Control of Variable Speed Wind Turbine Using Quai Sliding Mode Approach," in *6th International Conference on Smart Computing and Communication*, Kurukshetra, India, December 7-8, 2017.
- [8] C. Elmas, O. Deperlioglu and H. H. Sayan, "Adaptive fuzzy logic controller for DC-DC converter".
- [9] M. Firad and S. Nababan, "Evaluasi Topologi Konverter DC-DC untuk Memperbaiki Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Angin Pengisi batere," Universitas Mataram, 2007.
- [10] R. Harianto, "Implementasi Supervisory Control untu

Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Metode Direct Torque Control Berbasis *Boost Converter*," Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

- [11] M. K. Asy'ari, "Rancang Bangun DC-DC *Buck Converter* Berbasis Pengendalian Logika Fuzzy Tipe - 2 pada Prototype Turbin Angin Skala Kecil," Departemen Teknik Fisika, ITS, Surabaya, 2018.
- [12] J. G. Manwell, *Wind Energy Explained* (2nd ed.) Wind Energy Explained (2nd ed.), Chicester, USA: Jhon Wiley & Sons Ltd, 2009.
- [13] H. Darmawan and I. K. Bachtiar, *Perancangan Turbin Angin Tipe Savonius L Sumbu Vertikal*, 2014.
- [14] J. A.R., *Wind Turbine Technology*, United States of America: CRC Press, 2011.
- [15] R. Garduni-Ramirez and K. Y. Lee, "Compensation of control-loop interaction for power *plant* wide-range operation," *Control Engineering Practice*, pp. 1475 - 1487, 2005.
- [16] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals* (4th ed.), New York, USA: McGraw-Hill, 2005.
- [17] H. J. Zaini, "Implementasi Maximum Power Point Tracker (MPPT) pada Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Metode Perturb and Observe," *Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Uniersitas Muhammadiyah Yogyakarta*, Yogyakarta, 2016.
- [18] A. Musyafa, "Development of *Buck Converter* Based Fuzzy Logic Control in Small Scale Wind Turbine System Implemented in East-Java.," *Asian Journal of Natural &*

Applied Sciences, pp. 2186-8476, 2012.

- [19] L. Wang and R. X. Gao, "Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing," Springer-Verlag London Limited, London, 2006.

“Halaman ini memang dikosongkan”

LAMPIRAN

Lampiran A

Data Respon Kecepatan
Rotor Dengan Dan Tanpa
Beban

Waktu	Kecepatan Tanpa Beban	Kecepatan Dengan Beban
s	rpm	rpm
0	0	0
1	19	18
2	39	39
3	68	63
4	96	92
5	127	121
6	158	153
7	195	189
8	225	218
9	254	242
10	283	264
11	307	284
12	329	297
13	350	314
14	364	326
15	374	334
16	385	337
17	393	342
18	397	345
19	405	348
20	410	350
21	414	351
22	418	352
23	420	352

24	421	357
25	422	356
26	418	355
27	420	354
28	418	354
29	420	354
30	420	354
31	426	354
32	434	349
33	444	350
34	459	351
35	470	352
36	481	353
37	489	349
38	500	351
39	503	352
40	509	352
41	514	353
42	516	353
43	519	353
44	525	354
45	525	350
46	524	351
47	523	352
48	523	352
49	519	357
50	520	356
51	516	355
52	513	355
53	517	354
54	519	354
55	515	349
56	521	355
57	521	355
58	525	350

59	533	351
60	534	355
61	535	359
62	532	366
63	532	371
63	532	371
64	529	375
65	527	373
66	524	371
67	524	374
68	519	372
69	516	375
70	509	373
71	509	376
72	513	374
73	517	372
74	514	375
75	516	373
76	521	372
77	521	370
78	521	374
79	530	372
80	540	375
81	552	377
82	556	373
83	563	374
84	572	375
85	579	376
86	583	372
87	591	373
88	592	375
89	592	371
90	597	373
91	604	370
92	605	368

93	605	366
94	611	369
95	610	367
96	614	366
97	615	369
98	616	372
99	620	382
100	620	381
101	616	379
102	617	383
103	619	381
104	619	384
105	618	382
106	619	385
107	616	382
108	614	385
109	616	387
110	617	388
111	616	385
112	617	386
113	618	387
114	615	388
115	611	385
116	611	386
117	609	388
118	604	384
119	605	386
120	605	384
121	611	386
122	612	388
123	619	385
124	624	382
125	626	384
126	624	382
127	625	384

Lampiran B
Data Pengujian Buck Converter

Time	PWM (%)				
	0	25	50	75	99
1	8,12	6,75	5,33	3,13	1,24
2	8,22	6,75	5,25	3,03	1,2
3	8,07	6,6	5,03	3,1	1,17
4	7,95	6,53	5,24	3,03	1,24
5	8,05	6,53	5,16	2,91	1
6	8,05	6,45	5,14	3,15	1,22
7	8,32	6,45	5,28	3,22	1,32
8	8,61	6,56	5,4	2,96	1,27
9	8,46	6,49	5,45	2,15	1,05
10	8,44	6,5	5	2,86	1,37
11	8,61	6,67	5,3	2,96	0,95

Lampiran C
Data Tracking Arus
 (Inner Loop)

Time	Setpoint Arus	Arus terukur
s	mA	mA
0	70	0
1	70	0,15
2	70	0,12
3	70	0,38
4	70	12,31
5	70	25,97
6	70	38,15
7	70	47,57
8	70	54,06
9	70	56,83
10	70	61,66
11	70	68,59
12	70	69,59
13	70	69,25
14	70	70,54
15	70	70,22
16	70	69,63
17	70	69,66
18	70	69,14
19	70	69,76
20	70	69
21	70	69,39
22	70	69,15
23	70	69,01

24	70	70,7
25	70	70,09
26	70	69,9
27	70	69,22
28	70	69,74
29	70	69,68
30	70	69,34
31	70	69,37
32	70	70,71
33	70	69,44
34	70	69,97
35	70	69,32
36	70	70,07
37	70	69,28
38	70	70,45
39	70	69,6
40	70	69,31
41	70	69,6
42	70	70,4
43	70	69,8
44	70	69,48
45	70	69,86
46	70	69,29
47	70	70,32
48	90	78,46
49	90	84,66
50	90	88,43
51	90	89,28
52	90	88,47

53	90	89,41
54	90	89,28
55	90	89,43
56	90	90,82
57	90	89,31
58	90	89,3
59	90	89,27
60	90	89,65
61	90	89,52
62	90	89,33
63	90	89,57
64	90	89,75
65	90	89,55
66	90	89,5
67	90	89,23
68	90	89,32
69	90	89,19
70	90	89,14
71	90	89,42
72	90	91,01
73	90	89,96
74	90	89,33
75	90	89,95
76	90	89,2
77	90	89,88
78	90	89,21
79	90	89,22
80	90	90,2
81	90	89,54

82	90	89,6
83	90	90,73
84	90	89,33
85	90	89,76
86	90	90,88
87	90	89,5
88	90	91,08
89	90	89,1
90	90	89,82
91	90	89,23
92	90	90,19
93	90	90,17
94	90	89,28
95	90	90,41
96	90	89,43
97	90	89,42
98	110	98,13
99	110	102,89
100	110	104,95
101	110	107,71
102	110	109,19
103	110	108,72
104	110	109,44
105	110	109,45
106	110	109,1
107	110	109,3
108	110	109,11
109	110	109,48
110	110	109,71

111	110	108,94
112	110	109,06
113	110	108,75
114	110	108,83
115	110	108,85
116	110	108,75
117	110	109
118	110	109,35
119	110	108,32
120	110	108,32
121	110	109,64
122	110	109,8
123	110	109,59
124	110	109,27
125	110	109,27
126	110	108,33
127	110	108,33
128	110	108,33
129	110	108,33
130	110	108,19
131	110	109,5
132	110	109,37
133	110	108,86
134	110	109,13
135	110	108,07
136	110	109,65
137	110	109,65
138	110	109,23
139	110	108,74

140	110	108,37
141	110	108,37
142	110	109,04
143	110	109,04
144	110	109,23
145	110	108,99
146	110	109,57
147	110	108,97
148	110	109,55

Lampiran D

Data Tracking Kecepatan

Time	Setpoint Kecepatan	Kecepatan yang Terukur
s	rpm	rpm
0	380	0
1	380	45
2	380	66
3	380	91
4	380	123
5	380	160
6	380	201
7	380	244
8	380	279
9	380	303
10	380	324
11	380	334
12	380	346
13	380	349
14	380	355
15	380	360
16	380	359
17	380	362
18	380	365
19	380	367
20	380	369
21	380	370
22	380	366
23	380	368

24	380	369
25	380	370
26	380	370
27	380	370
28	380	370
29	380	371
30	380	371
31	380	371
32	380	371
33	380	371
34	380	370
35	380	370
36	380	370
37	380	375
38	380	375
39	380	374
40	380	379
41	380	382
42	380	379
43	380	382
44	380	384
45	380	386
46	380	382
47	380	379
48	380	381
49	380	383
50	380	379
51	380	381
52	390	385

53	390	387
54	390	388
55	390	389
56	390	389
57	390	388
58	390	387
59	390	392
60	400	392
61	400	396
62	400	398
63	400	400
64	400	407
65	400	402
66	400	402
67	400	403
68	400	398

Lampiran E

Data Perbandingan Daya Turbin Menggunakan Supervisory Control Dengan Dan Tanpa Control

Time	kecepatan	Daya Tanpa dicontrol	Daya dengan supervisory control
s	m/s	W	W
0	5	0,01	0
1	5	0,01	0
2	5	0,02	0,02
3	5	0,04	0,03
4	5	0,04	0,05
5	5	0,06	0,08
6	5	0,07	0,11
7	5	0,07	0,13
8	5	0,08	0,15
9	5	0,09	0,15
10	5	0,09	0,15
11	5	0,09	0,15
12	5	0,1	0,15
13	5	0,1	0,15
14	5	0,1	0,15
15	5	0,1	0,15
16	5	0,11	0,16
17	5	0,11	0,15
18	5	0,12	0,16
19	5	0,13	0,17
20	5	0,13	0,17
21	5	0,14	0,17

22	5	0,14	0,17
23	5	0,15	0,18
24	5	0,15	0,19
25	5	0,15	0,19
26	5	0,15	0,19
27	5	0,15	0,19
28	5	0,15	0,18
29	5	0,15	0,2
30	5	0,15	0,2
31	5	0,14	0,2
32	5	0,14	0,19
33	5	0,15	0,18
34	5	0,15	0,19
35	5	0,14	0,18
36	5	0,15	0,18
37	5	0,14	0,17
38	5	0,15	0,17
39	5	0,16	0,17
40	5	0,17	0,17
41	5	0,17	0,17
42	5	0,18	0,18
43	5	0,19	0,19
44	5	0,19	0,2
45	5	0,21	0,22
46	5	0,22	0,22
47	5	0,24	0,24
48	5	0,25	0,25
49	5	0,23	0,25
50	5	0,24	0,27

51	6	0,26	0,28
52	6	0,28	0,28
53	6	0,29	0,28
54	6	0,28	0,29
55	6	0,3	0,31
56	6	0,32	0,3
57	6	0,32	0,33
58	6	0,34	0,34
59	6	0,35	0,35
60	6	0,36	0,37
61	6	0,37	0,37
62	6	0,39	0,38
63	6	0,4	0,42
64	6	0,38	0,42
65	6	0,4	0,44
66	6	0,38	0,46
67	6	0,38	0,47
68	6	0,41	0,47
69	6	0,39	0,46
70	6	0,39	0,45
71	6	0,4	0,47
72	6	0,41	0,43
73	6	0,42	0,46
74	6	0,42	0,47
75	6	0,44	0,47
76	6	0,47	0,46
77	6	0,46	0,45
78	6	0,45	0,49
79	6	0,46	0,47

80	6	0,46	0,52
81	6	0,44	0,5
82	6	0,45	0,52
83	6	0,44	0,53
84	6	0,46	0,54
85	6	0,46	0,52
86	6	0,44	0,53
87	6	0,46	0,53
88	6	0,45	0,51
89	6	0,45	0,52
90	6	0,46	0,48
91	6	0,47	0,51
92	6	0,48	0,49
93	6	0,51	0,52
94	6	0,53	0,54
95	6	0,57	0,56
96	6	0,58	0,57
97	6	0,58	0,6
98	6	0,59	0,64
99	6	0,6	0,66
100	6	0,63	0,69
101	7	0,6	0,7
102	7	0,6	0,71
103	7	0,65	0,7
104	7	0,65	0,71
105	7	0,66	0,74
106	7	0,68	0,75
107	7	0,69	0,75
108	7	0,72	0,73

109	7	0,72	0,76
110	7	0,73	0,77
111	7	0,74	0,74
112	7	0,78	0,8
113	7	0,76	0,78
114	7	0,8	0,78
115	7	0,78	0,79
116	7	0,76	0,83
117	7	0,8	0,84
118	7	0,78	0,83
119	7	0,78	0,84
120	7	0,75	0,82
121	7	0,76	0,83
122	7	0,78	0,84
123	7	0,78	0,78
124	7	0,8	0,81
125	7	0,79	0,78
126	7	0,79	0,79
127	7	0,82	0,84
128	7	0,79	0,83
129	7	0,79	0,89
130	7	0,81	0,89
131	7	0,79	0,9
132	7	0,81	0,92
133	7	0,79	0,94
134	7	0,81	0,93
135	7	0,76	0,91
136	7	0,75	0,88
137	7	0,8	0,91

138	7	0,8	0,91
139	7	0,77	0,88
140	7	0,8	0,91
141	7	0,8	0,88
142	7	0,85	0,9

Lampiran F
Kalibrasi sensor kecepatan

Data Kalibrasi Sensor Proximity

No.	Pembacaan alat (Rpm)	Pembacaan Standart (Rpm)	Koreksi
1	386.54	387.7	1.16
2	386.54	387.7	1.16
3	386.54	387.7	1.16
4	389.25	387.7	1.55
5	386.54	387.7	1.16
6	389.25	387.7	1.55
7	389.25	387.7	1.55
8	386.54	387.7	1.16
9	386.54	387.7	1.16
10	389.25	387.7	1.55

$$\begin{aligned}U_{a1} &= 0,3804 \\U_{a2} &= 0.09493 \\U_{b1} &= 0.0558 \\U_{b2} &= 0,002941 \\U_c &= 1.548 \\V_{eff} &= 10.181\end{aligned}$$

Pada table *T-student* menghasilkan nilai faktor koreksi (*k*) sebesar 2,2226. Sehingga didapatkan nilai ketidakpastian :

$$\begin{aligned}U_{exp} &= k \times U_c \\U_{exp} &= 2,2226 \times 1.548 = 3.4405\end{aligned}$$

Nilai ketidakpastian alat sebesar ± 3.4405 . Nilai ketidakpastian tersebut akan menjadi acuan untuk pembacaan alat ukur selama alat ukur tersebut digunakan.

Lampiran G

Source code Arduino

```
#include <Wire.h>          //wire library
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h> // MCP4725 library from
adafruit
#include <Adafruit_INA219.h> // You will need to download this
library
```

```
Adafruit_INA219 sensor219;
#define VI_PIN A0 // output
#define VO_PIN A1 // output
#define AT_PIN A2// connect AT
#define ARDUINO_WORK_VOLTAGE 5.0
#define DAC_RESOLUTION (12)
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
int encoder_pin = 3; // pulse output from the module
unsigned int rpm; // rpm reading
volatile byte pulses; // number of pulses
unsigned long timeold;
// number of pulses per revolution
// based on your encoder disc
unsigned int pulsesperturn = 2;
int i,s,DAC;
int n=0;
int m =0;
int x = 0;
double voltage2;
double voltage1;
```

```

double current;
double Dayaunit;
double Dayaterukur;
double Dayanominal;
double wref;
double wset;
double wnominal;
float error;
Adafruit_MCP4725 MCP4725;
int MCP4725_value;
float arus_new2;
float arus_new;
#include <Kalman.h>
Kalman fil(0.0005,20,1000,0);
Kalman fil2(0.08,15,1000,0);
int hitung=0;

unsigned long lastTime;
double Input, Output, Setpoint;
double errSum, lastErr;
double kp, ki;

void Compute()
{
    /*How long since we last calculated*/
    unsigned long now = millis();
    double timeChange = (double)(now - lastTime);
    /*Compute all the working error variables*/
    double error = Input - Setpoint;
    errSum += (error * timeChange);
}

```

```

/*Compute PID Output*/
Output = kp * error+ ki * errSum;
/*Remember some variables for next time*/
//lastErr = error;
//lastTime = now;
}
void SetTunings(double Kp, double Ki)
{
    kp = Kp;
    ki = Ki;
}
unsigned long lastTime2;
double Input2, Output2, Setpoint2;
double errSum2, lastErr2;
double kp2, ki2;
void Compute2()
{
    /*How long since we last calculated*/
    //unsigned long now2 = millis();
    //double timeChange2 = (double)(now2 - lastTime2);
    /*Compute all the working error variables*/
    double error2 = Input2 - Setpoint2;
    //errSum2 += (error2 * timeChange2);
    /*Compute PID Output*/
    Output2 = kp2 * error2;// + ki2 * errSum2;
    /*Remember some variables for next time*/
    //lastErr2 = error2;
    //lastTime2 = now2;
}
void SetTunings2(double Kp, double Ki)
{

```

```

    kp2 = Kp;
    ki2 = Ki;
}
void counter()
{
//Update count
    pulses++;
}
void setup()
{
    sensor219.begin();
    lcd.begin();
    Serial.begin(9600);// initialize timer1, and set a 1/2 second
period
    MCP4725.begin(0x62); // Default I2C Address of MCP4725
breakout board (sparkfun)
    pinMode(encoder_pin, INPUT);
// Interrupt 0 is digital pin 2
// Triggers on Falling Edge (change from HIGH to LOW)
    attachInterrupt(1, counter, FALLING);
// Initialize
    pulses = 0;
    rpm = 0;
    timeold = 0;
    SetTunings(5.2,0.1);
    SetTunings2(0.3, 0);
    //Setpoint2=600;
}
void loop()
{
//for(n=0;n<1500;n++)

```

```

//{ m++;
// Setpoint2=390;
// Setpoint=70;
if (millis() - timeold >= 300)
{
//Don't process interrupts during calculations
detachInterrupt(1);
rpm = (60 * 1000 / pulsesperturn )/ (millis() - timeold)*
pulses;
//Serial.println(pulses);
timeold = millis();
pulses = 0;
attachInterrupt(1, counter, FALLING);
}
rpm=fil2.getFilteredValue(rpm);
double busVoltage = 0;
double current = 0; // Measure in milli amps
double power = 0;
busVoltage = sensor219.getBusVoltage_V();
current = sensor219.getCurrent_mA();
power = busVoltage * (current/1000);
// if(m>=0 && m<=500)
// {
// Setpoint2=420;
// }
// else if(m>=0 && m<=1000)
// {
// Setpoint2=400;
// }
// else if(m>=1000)
// {

```

```

// Setpoint2=380;
// }
    n=n+1;
//MCP4725.setVoltage(n, false);
    int vt2_temp = analogRead(VO_PIN);
    int vt1_temp = analogRead(VI_PIN);
    // int at_temp = analogRead(AT_PIN);
    arus_new=fil.getFilteredValue(current);
for (i=0;i<50;i++){
    voltage1+= busVoltage ;
    voltage2+= vt2_temp ;
    arus_new2+= arus_new ;
    delay(1);
}
    voltage2=voltage2/50;
    voltage1=voltage1/50;
    //current=current/50;
    arus_new2=arus_new2/50;
    voltage2 = (voltage2 * (ARDUINO_WORK_VOLTAGE /
1023.0) * 5);//-0.98;
    //voltage1 = (voltage1 ;//-0.56;
    // current = current * (ARDUINO_WORK_VOLTAGE /
1023.0)*1000;
    // arus_new=current;
    //float      arus_new2      =      (arus_new      *
(ARDUINO_WORK_VOLTAGE / 1023.0)*1000);
    Dayaterukur=( arus_new2*voltage1)/1000;
////ref formula Arus <80
    Dayanominal=17.6;
    wnominal=667.80;
    Dayaunit=(Dayaterukur/Dayanominal);

```

```

wref=(-0.67*Dayaunit*Dayaunit)+(1.42*Dayaunit) + 0.51;
//y = -2,5331x4 + 5,794x3 - 4,603x2 + 1,5888x + 0,7337
//wref=(-2.5331*pow(Dayaunit,4)) + (5.794*pow(Dayaunit,3)) -
(4.603*pow(Dayaunit,2)) + (1.5888*Dayaunit) + 0.7337;//
polinomial 4
//
wref=(-
30.768*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Daya
unit)
+
(99.733*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit)-
(126.96*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit)
+
(80.359*Dayaunit*Dayaunit*Dayaunit)
-
(26.293*Dayaunit*Dayaunit) + (4.2498*Dayaunit) + 0.6524;//
polinomial 6
// y = -30,768x6 + 99,733x5 - 126,96x4 + 80,359x3 - 26,293x2 +
4,2498x + 0,6524
wset=wref*wnominal;
if(Dayaunit<0.75)
Setpoint2=wset;
else
Setpoint2=wnominal;
Input2=rpm;
Compute2();
Setpoint=Output2+203;
Input=arus_new2;
Compute();
MCP4725_value=Output+1002;
if(MCP4725_value>1000)
MCP4725_value=1000;
else if (MCP4725_value<0)
MCP4725_value=0;
DAC=1024-MCP4725_value;

```



```

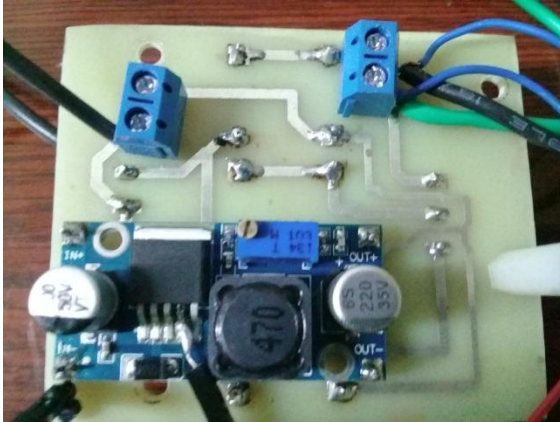
if (DAC<0)
    DAC=0;
MCP4725.setVoltage( DAC,false);
//Setpoint2=extseek(arus_new2);
//Setpoint2=410;
//Serial.print("nilai n = ");Serial.print(n);Serial.print("|");
//Serial.print(Setpoint2);Serial.print("|");//Serial.print(Setpoint);S
erial.print("|");
//Serial.print("RPM = ");Serial.print(rpm);Serial.print("|");
////Serial.print("Arus                               set:
");Serial.print(Setpoint);Serial.print("|");
//Serial.print("Arus                               input:
");Serial.print(arus_new);Serial.print("|");
//Serial.print("V input ");
Serial.print(voltage1);Serial.print("|");Serial.print(Dayaterukur);S
erial.print("|");Serial.print(rpm);Serial.print("|");Serial.print(Setpo
int2);
//Serial.print("V output ");Serial.print(voltage2);Serial.print("|");
//Serial.print("Vdac                               ");Serial.print(
MCP4725_value);Serial.print("|");
//Serial.print("P: ");Serial.print(Dayaterukur);Serial.print("|");
//Serial.print("PU: ");Serial.print(Dayaunit);
//Serial.print("|");Serial.print("wref: ");Serial.print(wref);
Serial.print("\n");//Serial.println(arus_new2);
// lcd.setCursor(2,0);
//// lcd.print("Kalibrasi Vi");
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Vi=");
    lcd.print(voltage1);
    lcd.setCursor(8,0);
    lcd.print("Vo=");

```

```
lcd.print(voltage2);  
lcd.setCursor(0,1);  
lcd.print("RPM=");  
lcd.print(rpm);  
lcd.setCursor(8,1);  
lcd.print("P=");  
lcd.print(Dayaterukur);  
// Serial.println(arus_new2);  
  delay(100);  
  // lcd.clear();  
//}  
}
```

Lampiran H

Implementasi rangkaian



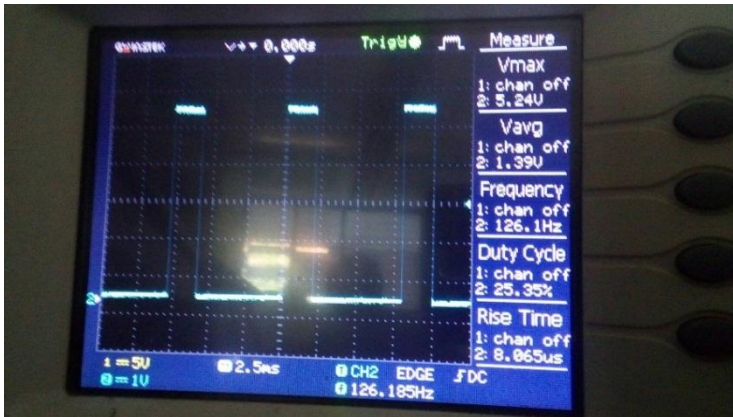
implementasi *buck converter*



Implementasi *rangkaian pembebanan*

Lampiran I

Pengujian Rangkaian PWM



Hasil Dari Sinyal Pembangkit *Pwm* Dengan *Duty Cycle* 25%



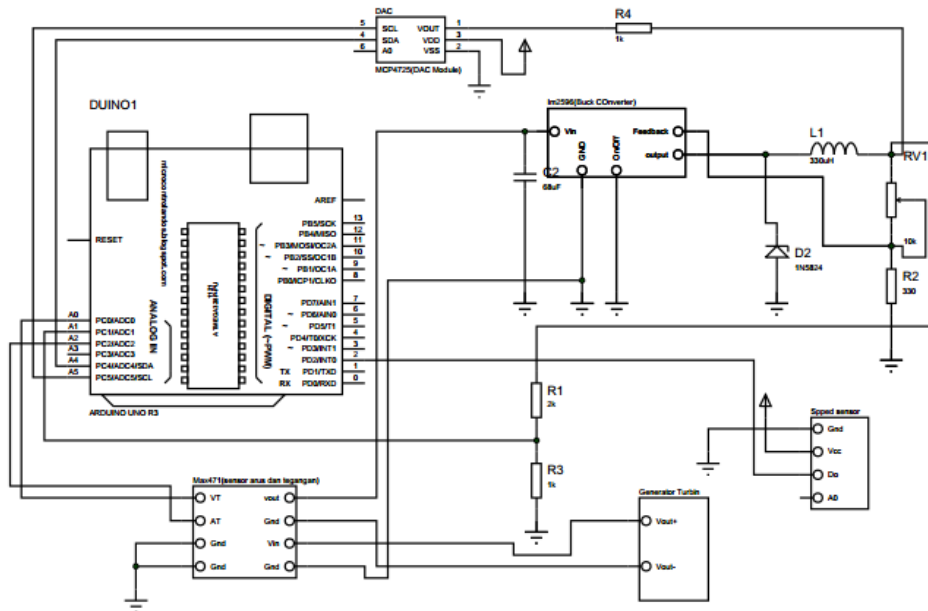
Pengambilan data pada beberapa kecepatan

Lampiran J

Spesifikasi turbin

Technical Specifications	
Model	ZL1.4S-400
Rated Power	400W @ 7m/s
Max. Power	600W
System Voltage	12V or 24V
Cut-in Wind Speed	2m/s
Cut-out Wind Speed	13m/s
Security Wind Speed	45m/s
Calculated Annual Output	1150KWH @ above 5m/s
Wheel Diameter	1.4m
Rotor Speed	300rpm/min
QTY of Blades	3PCS or 5PCS
Blades Material	Carbon Fiber
Insulation	Class F
Generator Type	3 phase/PMG
Waterproof	IP67

Lampiran K Rangkaian secara keseluruhan



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kota Magetan, 12 April 1996. Diberi nama oleh kedua orangtua, yaitu Choirul Mufit. Bapak bernama Jupri Respati, Ibu bernama Watini dan adik kandung bernama M. Rofiki Mubarok. Alamat asli rumah di Sidoarjo di desa Tawang Sari, kecamatan Taman. Penulis menyelesaikan Sekolah Dasar pada tahun 2008 di MI S Bahauddin, pada tahun 2011 penulis menamatkan SMP Bahauddin dan pada tahun 2014 penulis menamatkan sekolah menengah di SMA Wachid Hasyim 2 Taman. pada tahun 2017 penulis menamatkan D3 Instrumentasi ITS dan sedang menempuh pendidikan S1 teknik fisika ITS. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui *email: Mufitsetiawan@gmail.com*