

Rancang Bangun Speed Sensorless Supervisory Control Untuk Ekstrasi Daya Maksimum Pada Sistem Turbin Angin

Fadhil A. Dhiwanto, Katherin Indriawati

Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: katherin@ep.its.ac.id

Abstrak—Pada tugas akhir ini, telah dibuat *supervisory control* tanpa menggunakan sensor kecepatan yang bertujuan untuk meningkatkan daya dengan bantuan *boost konverter*. Pada sistem *open loop*, telah didapatkan hasil bahwa arus yang dihasilkan kecil sehingga daya yang dihasilkan juga kecil. Dengan adanya *supervisory control* diharapkan daya yang dihasilkan oleh turbin dapat maksimal. Dalam hal ini, di setiap kecepatan akan ditentukan besar arus optimum yang menghasilkan daya maksimum. Oleh karena itu digunakan *supervisory level* untuk menentukan nilai arus optimum yang berlaku, yaitu dengan menggunakan hasil pengukuran tegangan output *converter*. Dengan demikian, tidak lagi diperlukan sensor kecepatan untuk menentukan arus optimum. Selanjutnya, arus optimum hasil *supervisory level* menjadi arus *setpoint* bagi sistem kontrol arus dengan sinyal control adalah PWM bagi *boost converter*. Mekanisme kontrol ini menjamin arus yang terjadi pada masukan *converter* sesuai dengan nilai *setpoint* (arus optimum). Berdasarkan hasil percobaan diperoleh arus optimum untuk kecepatan angin 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s berturut-turut adalah 60 mA, 100 mA dan 140 mA. Dalam hal ini, daya maksimum yang diperoleh adalah 290 mW (kecepatan angin 5 m/s), 580 mW (Kecepatan angin 6 m/s), 910 mW (Kecepatan angin 7 m/s). Dengan demikian terjadi peningkatan daya sebesar 280 mW (kecepatan angin 5 m/s), 558 mW (kecepatan angin 6 m/s), dan 893 mW (kecepatan angin 7 m/s) dibandingkan dengan hasil daya pada kondisi *open loop* di setiap kecepatan angin.

Kata Kunci— Arus, *Boost Converter*, *Supervisory Control*, Tegangan, Turbin angin.

I. PENDAHULUAN

LISTRIK merupakan kebutuhan sehari-hari yang menunjang produktivitas masyarakat. Listrik dapat digunakan sebagai sumber penerangan, sumber energi peralatan rumah tangga maupun peralatan di industry, sebagai sumber panas dan masih banyak lagi kegunaan lainnya. PLN sebagai perusahaan penyedia listrik utama di Indonesia dalam membangkitkan listrik masih menggunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebesar 35,74% dari kapasitas total.

Oleh karena itu diperlukan pengganti untuk mengatasi

dampak buruk di atas, yaitu dengan menggunakan energi terbarukan yang salah satunya adalah energi angin. Di dunia energi angin sendiri mengalami peningkatan kapasitas yang sangat signifikan. Pada tahun 2014 hingga 2018 kapasitas pembangkit listrik tenaga angin mengalami peningkatan sebesar 50 GW setiap tahunnya. Indonesia sendiri memiliki potensi angin yang cukup besar, yaitu sebesar 60.647 GW untuk kecepatan angin yang lebih dari 4 m/s. sehingga diperlukan pembangunan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang dapat memaksimalkan potensi angin dengan komponen utama yang diperlukan adalah turbin angin.

Turbin angin adalah alat pengubah sumber energi angin yang ramah lingkungan dengan prinsip energi kinetik angin menjadi energi mekanik (rotasi) yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator listrik. Kinerja turbin angin secara signifikan dipengaruhi oleh sifat stokastik angin yang menyebabkan ketidakpastian dalam penangkapan energi dan beban structural, khususnya pada lading angin daerah II seperti di Indonesia dengan kecepatan angin antara, sehingga dapat menyebabkan besar produksi daya berubah-ubah. Oleh karena itu penelitian terbaru tentang control turbin angin ini diutamakan berfokus pada maksimalisasi daya (J.F. Manwell, 2010).

Maksimalisasi daya pada turbin angin dapat pula disebut dengan Maximum Power Point Tracking, yaitu metode-metode yang dapat digunakan dalam memaksimalkan daya pada turbin angin dikarenakan sistem turbin angin yang memiliki persamaan non-linier. Algoritma ekstrasi daya maksimum yang telah diteliti dapat diklasifikasikan dalam 3 metode kontrol utama, yaitu kontrol Tip Speed Ratio (TSR), kontrol Power Signal Feedback (PSF) dan kontrol Hill-Climb Search (HCS) (Petr Musilek, 2017)

Supervisory Control merupakan sebuah sistem kontrol dengan *supervise* yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performansi, ekonomis dan keandalan (Brandstetter, 2014). *Supervisory Control* ditujukan untuk kompensasi faktor-faktor yang tidak dipertimbangkan secara

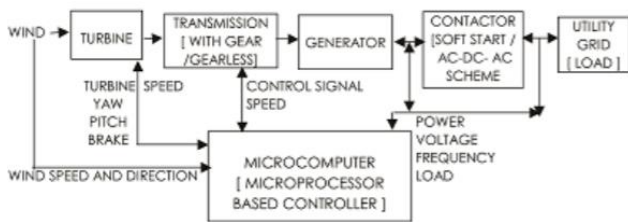
eksplisit dalam desain kontroler. Selain itu Supervisory Control dapat memonitor kegagalan atau degradasi untuk alat dan/atau mesin. Informasi dari sensor-sensor yang terkait dapat digabungkan untuk meningkatkan keandalan dan kualitas dari pencitraan informasi.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah dapat membuat sebuah sistem turbin angin sensorless yang dapat mengekstrasi daya secara maksimum dengan bantuan supervisory control.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Turbin Angin

Turbin angin adalah salah satu alat yang dapat mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang dapat menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik yang diperlukan di kehidupan sehari-hari. Tidak hanya berguna untuk menghasilkan listrik, namun energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin juga bisa diterapkan di bidang yang



Gambar. 1. Diagram Blok Turbin Angin

lain.

Prinsip kerja dari turbin angin sendiri yaitu dimulai dari angin yang akan memutar baling-baling pada turbin yang kemudian baling-baling tersebut akan memutar rotor yang terdiri dari angin rata-rata serta fluktuasi turbulensi pada aliran angin. Secara umum diagram blok angin dapat digambarkan dalam gambar di bawah ini.

B. Boost Converter

Boost Converter adalah sebuah teknik Power supply switching Step-Up yang merupakan konverter daya dari DC ke DC dengan tegangan output lebih besar dari tegangan input (Kumar, 2017). Ini merupakan teknik switched-mode power supply (SMPS) yang mengandung setidaknya dua semikonduktor switching (dioda dan transistor) dan setidaknya satu elemen penyimpanan energy seperti kapasitor, induktor, atau kombinasinya. Filter biasanya terbuat dari kapasitor dan biasanya ditambahkan untuk output konverter sehingga dapat mengurangi riak tegangan output.

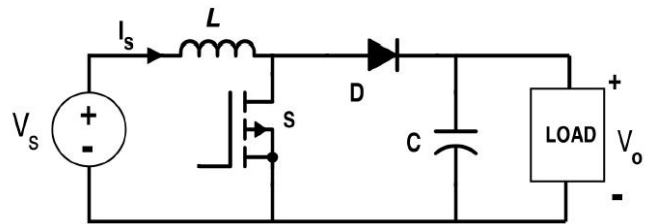
Prinsip utama untuk menaikkan tegangan adalah kemampuan induktor untuk menyimpan energi. Dalam boost konverter, tegangan output selalu lebih tinggi dari tegangan input. Prinsip dasar dari sebuah Boost converter terdiri dari dua kondisi yang berbeda :

- Bila saklar ditutup, arus mengalir melalui induktor searah jarum jam dan induktor menyimpan energi. Polaritas dari sisi kiri induktor adalah positif. Ketika saklar di On,

atau saklar S ditutup, maka akan mengakibatkan terjadinya peningkatan arus induktor.

- Ketika saklar dibuka, arus akan berkurang sebagai impedansi lebih tinggi. Oleh karena itu, perubahan atau pengurangan saat ini akan ditahan oleh induktor. Dengan demikian polaritas akan terbalik. Akibatnya dua sumber akan dalam seri menyebabkan tegangan yang lebih tinggi untuk mengisi kapasitor melalui dioda D. Ketika saklar Off, saklar terbuka dan satu-satunya jalan yang ditawarkan untuk arus induktor adalah melalui flyback dioda D, kapasitor C dan beban R. Ini hasil dalam mentransfer energi yang terakumulasi selama menjadi kapasitor. Arus input sama dengan arus induktor

Jika saklar buka-tutup dengan cukup cepat, maka induktor tidak akan sepenuhnya kosong ketika masa pengisian dan pengurangan energi. Maka dengan hal ini beban akan melihat tegangan akan selalu lebih besar daripada sumber tegangan input ketika saklar dibuka. Dan ketika saklar dibuka kapasitor secara paralel dengan beban, maka kapasitor akan menyuplai energi ke beban dengan kombinasi energi dari input sehingga energi total menjadi berlipat-lipat energi



Gambar. 2. Rangkaian Boost Converter

semula. Ketika saklar ditutup maka akan terjadi korsleting sehingga sisi kanan akan kekurangan energi, namun pada waktu ini energi akan di supply oleh kapasitor. Maka pada waktu tersebut kapasitor itu mampu memberikan tegangan dan energi ke beban. Selama waktu ini, dioda akan mencegah energi dari kapasitor untuk keluar melalui saklar. Saklar tentu saja harus dibuka dengan sangat cepat untuk mencegah energi kapasitor keluar terlalu banyak.

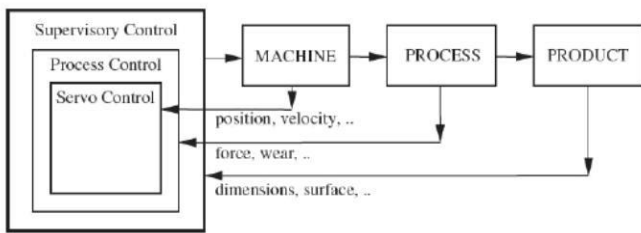
C. Sensorless Supervisory Control

Kontroller kecepatan memproses deviasi kontrol antara kecepatan referensi ω_{mref} dan kecepatan sebenarnya ω_m yang diperoleh dari sensor kecepatan seperti tachogenerator atau sensor incremental. Keuntungan jika menggunakan sensorless control adalah dapat mereduksi biaya pembuatan dan dapat melakukan penyerdahan dalam sistem yang akan dibangun (Brandstetter, 2014). Sistem sensorless control memiliki skema seperti yang ditunjukkan pada Gambar. Pada penelitian ini, turbin angin akan menggunakan sistem sensorless, yang berarti turbin angin ini tidak memiliki sensor kecepatan maupun posisi untuk mengetahui daya yang dihasilkan oleh turbin, namun variabel lain yang dapat diukur dan diketahui untuk mengestimasi variabel sensor tersebut. Dalam kasus ini variabel yang dapat diketahui dan diukur

adalah tegangan dan arus yang dihasilkan oleh turbin (Brandstetter, 2014).

Istilah supervisory control digunakan untuk mendefinisikan sebuah sistem kontrol dengan supervisi yang mengacu pada peninjauan menyeluruh operasi, perencanaan, koordinasi dan eksekusi aksi yang memperbaiki performansi, 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. Gambar 2 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) (L. Wang, 2006).

Pada suatu studi, supervisory Control (SC) merupakan suatu sistem kontrol kecepatan angin. SC memiliki supervisory level dalam melakukan optimisasi pada kecepatan generator sebagai setpoint untuk menentukan sudut



Gambar. 3. Blok Diagram Sensorless Supervisory Control pitch blade yang tepat. Sudut akan dikendalikan dengan kontrol PI sehingga menghasilkan daya keluaran optimum dari turbin angin tanpa melebihi batas kecepatan pada rotor (Katherin Indriawati, 2018).

Pada level abstraksi yang tertinggi, tujuan utama supervisory control adalah mengoptimalkan produk. Dua tugas dasar perlu dilakukan untuk memenuhi tujuan ini:

- a. Meningkatkan performansi 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.

III. METODE DAN METODOLOGI

A. Metode Penelitian

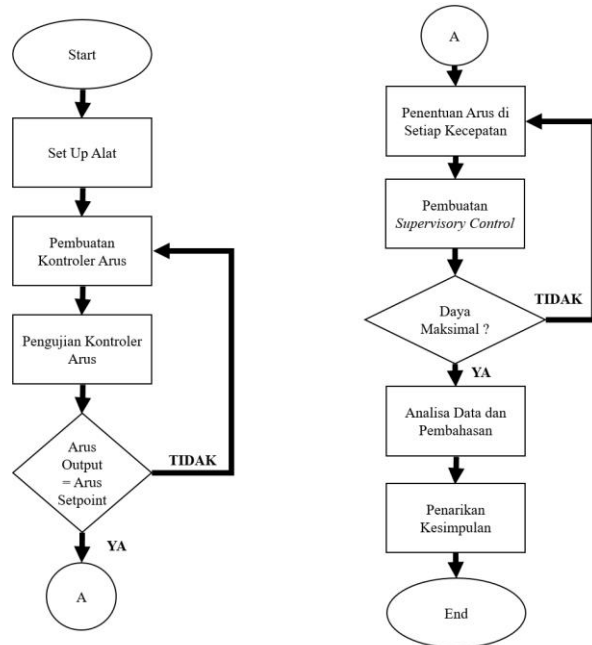
Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa proses yang harus dilalui yang akan disajikan pada gambar dibawah ini.

B. Set Up Turbin Angin

Kipas angin ini dapat menghasilkan angin dengan kecepatan angin 5 m/s pada saat kondisi kipas angin diatur pada kecepatan kipas 1. Pada saat kecepatan kipas 2, kecepatan angin yang dihasilkan adalah 6 m/s sedangkan pada saat kecepatan kipas 3, kecepatan angin yang dihasilkan

adalah 7 m/s. Data-data tersebut didapat dengan bantuan alat ukur kecepatan angin yang biasanya disebut sebagai anemometer.

Dikondisikan agar angin yang diterima oleh turbin dalam keadaan tegak lurus sehingga angin yang diterima oleh turbin bisa digunakan secara maksimal. Sudut pitch turbin yang



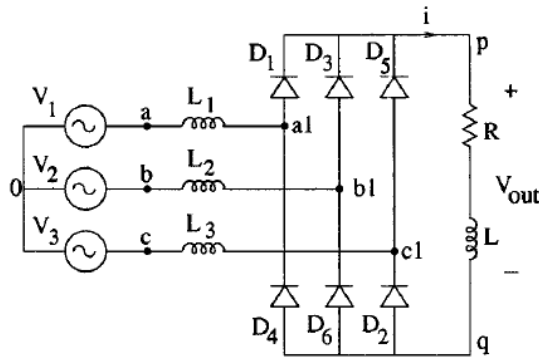
Gambar. 4. Flowchart Metode Penelitian digunakan adalah 00 agar turbin dapat menerima energi



Gambar. 5. Set Up Pengendali Turbin Angin

angin dari kipas secara maksimal. Jarak dari kipas ke turbin adalah 75 cm dikarenakan agar energi angin yang diterima turbin bisa maksimal. Dikarenakan turbin terkadang bergerak pada saat pengujian, maka ada bantuan berupa seorang teman yang bagian menjaga agar turbin tidak bergerak dikarenakan oleh angin yang diterima turbin.

Pengambilan data dilakukan pada saat turbin sudah berputar secara maksimal, kemudian data yang diambil oleh arduino adalah data arus, tegangan dan rpm yang dihasilkan oleh turbin. Setelah data yang diperoleh sudah cukup, maka



Gambar. 6. Rangkaian Rectifier

kecepatan angin akan diubah hingga tegangan yang dihasilkan oleh turbin sudah stabil. Langkah ini juga berlaku untuk kecepatan kipas 3.

C. Rangkaian Rectifier

Rangkaian ini digunakan untuk menyearahkan tegangan 3 fasa atau tegangan AC menjadi tegangan satu fasa atau tegangan DC. Rangkaian ini dibutuhkan dikarenakan tegangan yang dihasilkan oleh turbin adalah tegangan AC sehingga perlu rangkaian penyearah agar tegangan berubah menjadi DC. Setelah tegangan telah diubah menjadi tegangan DC, maka tegangan dan arus bisa diolah oleh kontroler. Gambar dari rangkaian rectifier ditunjukkan pada Gambar.

D. Arduino UNO

Dalam tugas akhir ini, alat yang berperan dalam untuk mengolah data dan mengatur variabel-variabel agar menghasilkan data yang sesuai dengan keinginan adalah arduino. Arduino yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah arduino UNO seperti yang ditunjukkan pada Gambar.

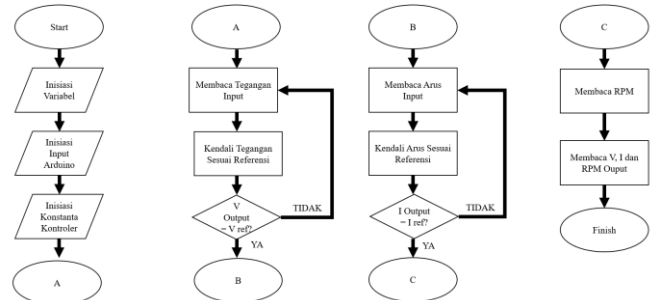
Arduino ini akan mengambil data dari sensor INA219 yang kemudian akan diolah agar arus yang dihasilkan bisa sesuai dengan set point yang telah ditentukan di setiap kecepatan angin agar daya yang dihasilkan bisa maksimal. Tegangan yang diperoleh dari sensor INA219 juga akan diolah sebagai referensi. Yang dimaksud adalah ketika tegangan yang dihasilkan oleh turbin berada di rentang tertentu, maka akan mengeluarkan set point arus yang sesuai kecepatan angin dari kipas. Contohnya adalah ketika tegangan yang dihasilkan turbin berada di antara 4,41 V dan 4,94 V, maka akan mengeluarkan set point arus 60 A dan arus akan yang dihasilkan akan dikontrol agar arus akan berada di sekitar 60 A.

Di Arduino ini terdapat pula filter yang digunakan untuk memperhalus data yang diperoleh dari sensor. Filter yang dipakai dalam tugas akhir ini adalah filter kalman. Berikut ini adalah gambar diagram blok dari filter kalman secara umum dan koding dari filter kalman yang digunakan.

E. Pengujian Desain

Dari data tegangan yang diperoleh dari turbin angin akan

dibandingkan dengan rentang tegangan yang telah ditentukan. Ketika tegangan telah dibandingkan, maka



Gambar. 7. Flowchart Controller

kontroler akan menentukan set point arus yang telah ditentukan berdasarkan rentang tegangan. Dalam percobaan ini set point arus akan bernilai 60 mA jika tegangan yang dihasilkan oleh turbin adalah di daerah rentang 4,41 V sampai 4,94 V dan kontroler akan mengendalikan agar arus yang dihasilkan oleh turbin akan berada di sekitar 60 mA, set point arus akan bernilai 100 mA. jika tegangan yang dihasilkan oleh turbin adalah di daerah rentang 4,94 V sampai 6,31 V dan kontroler akan mengendalikan agar arus yang dihasilkan oleh turbin akan berada di sekitar 100 mA, set point arus akan bernilai 80 A. jika tegangan yang dihasilkan oleh turbin adalah di daerah lebih dari 6,31 V dan kontroler akan mengendalikan agar arus yang dihasilkan oleh turbin akan berada di sekitar 80 mA.

Pada proses ini akan dilakukan uji secara menyeluruh dimulai dari kecepatan angin paling rendah untuk melihat apakah nilai arus akan mendekati nilai setpoint atau tidak. Jika tidak maka akan dilakukan pada koding yang telah dimasukkan kedalam arduino. Jika sukses maka kecepatan angin akan diubah menjadi lebih kencang untuk melihat apakah setpoint arus berubah dan nilai arus akan mengikut nilai setpoint arus yang baru. Kemudian angin akan diturunkan kecepatannya untuk melihat apakah arus bisa menyesuaikan nilainya. Kecepatan angin yang digunakan adalah 5 m/s, 6 m/s, dan 7 m/s.

Dalam tugas akhir ini pengambilan data dilakukan ketika kipas dinyalakan dan turbin sudah berputar secara maksimal, maka arduino dinyalakan untuk pengambilan data pada setiap kecepatan, kemudian setelah mengambil beberapa data, maka data dari arduino disimpan. Percobaan dilakukan disetiap kecepatan hingga didapatkan data yang sesuai. Kemudian data-data tersebut dianalisa kemudian hasilnya disimpulkan.

Sistem dikatakan berhasil jika tegangan yang dihasilkan oleh turbin mencapai nilai tertentu, maka setpoint akan berubah sesuai dengan perintah yang dimasukkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

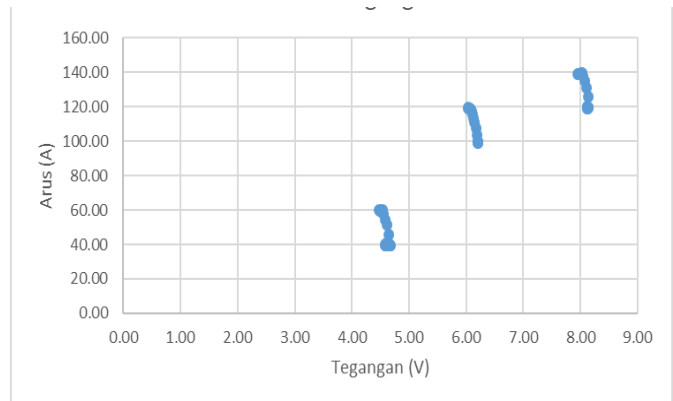
Diambil beberapa data pada waktu yang sama dan hasil perbandingan arusnya ditunjukkan pada Tabel. Dari data didapatkan bahwa rasio error tidak terlalu besar dan

cenderung dibawah 1% secara rata-rata maka dapat dilihat bahwa sensor mendapatkan data secara valid.

Sensor INA219 (mA)	Sensor INA219DC M (mA)	Rasio Error (%)
99.61	99.75	0.14
99.37	99.26	0.11
99.33	99.74	0.41
99.70	99.38	0.32
99.47	99.06	0.41
99.03	99.80	0.77
99.68	99.36	0.32
99.17	99.29	0.12
99.62	99.53	0.09
99.33	99.46	0.13
99.21	99.39	0.18
99.51	99.76	0.25
99.07	99.29	0.22
99.27	99.63	0.36

Sensor INA219 (mA)	Sensor INA219DC M (mA)	Rasio Error (%)
99.25	99.57	0.32

Bisa dilihat bahwa ketika sistem turbin angin dikondisikan dalam open loop, maka arus yang dihasilkan kecil yaitu sekitar 1 mA. Dengan kondisi seperti ini maka saya merancang sebuah rangkaian sistem Close loop dimana yang membangkitkan arus yang dihasilkan dengan bantuan boost



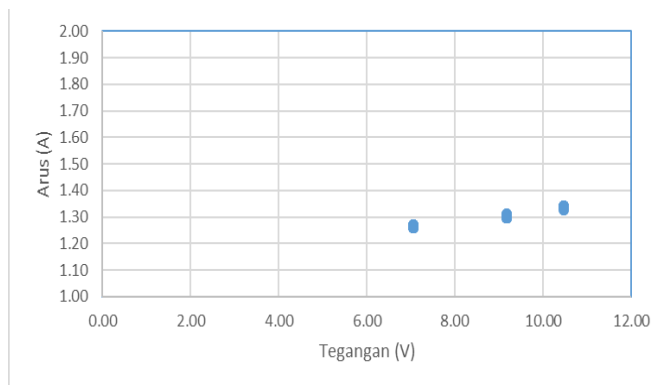
Gambar. 10. Grafik Hubungan Arus dan Tegangan Closed Loop

converter. Diharapkan bisa meningkatkan arus yang dihasilkan walaupun harus menurunkan tegangan yang dihasilkan.

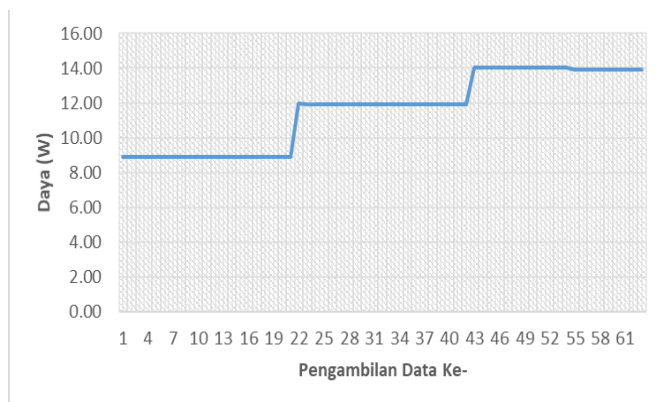
Daya yang dihasilkan ketika sistem dikondisikan open loop adalah kecil. Dari data ini kita bisa melihat bahwa sebelum ada pengendali, arus yang dihasilkan kecil walaupun tegangan yang dihasilkan besar. Maka di tugas akhir ini akan dibuat sebuah sistem yang dapat meningkatkan arus yang dihasilkan dan bisa berubah-ubah sesuai dengan tegangan yang dihasilkan.

Kemudian untuk closed loop, bisa dilihat bahwa set point arus bisa berubah seiring dengan jalannya program, hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali arus dapat bekerja dengan baik. Pengambilan data ini dilakukan ketika data ke-90 hingga data ke 110 dimana kontroler arus akan mengeluarkan nilai set arus 40 mA ketika pengambilan data dilakukan pada data ke-90 hingga ke-100 dan set point arus akan berubah menjadi 60 mA ketika pengambilan data dilakukan pada data ke-100 hingga data ke-110. Pengambilan data ini dilakukan pada kecepatan angin sebesar 5 m/s atau kecepatan angin 1.

Dan untuk kecepatan 2 bisa dilihat bahwa set point arus bisa berubah seiring dengan jalannya program, hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali arus dapat bekerja dengan baik. Pengambilan data ini dilakukan ketika data ke-390 hingga data ke 410 dimana kontroler arus akan mengeluarkan nilai set arus 100 mA ketika pengambilan data dilakukan pada data ke-90 hingga ke-100 dan set point arus akan berubah menjadi 120 mA ketika pengambilan data



Gambar. 8. Grafik Hubungan Arus dan Tegangan Open Loop



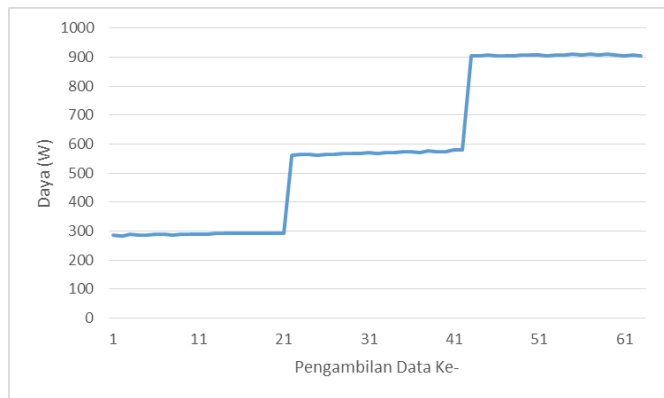
Gambar. 9. Grafik Daya Open Loop

99.66	99.17	0.49
99.50	99.47	0.03
99.41	99.63	0.22
99.03	99.54	0.51

dilakukan pada data ke-100 hingga data ke-110. Pengambilan data ini dilakukan pada kecepatan angin sebesar 6 m/s atau kecepatan angin 2. Dan untuk kecepatan 3 bisa dilihat bahwa set point arus bisa berubah seiring dengan jalannya program, hal ini menunjukkan bahwa sistem pengendali arus dapat bekerja dengan baik. Pengambilan data ini dilakukan pada kecepatan angin sebesar 7 m/s atau kecepatan angin 3.

Dan berikut adalah grafik ketika supervisory control dijalankan pada closed loop.

Didapatkan hasil lebih baik ketika menggunakan supervisory control dan lebih stabil.



Gambar. 11. Grafik Daya Supervisory Control Closed Loop

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dari penelitian, didapatkan beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut.

Hasil validasi modul pengukuran arus dan tegangan menunjukkan rasio error dibawah 1% yaitu untuk validasi arus rasio errornya adalah 0,28% sedangkan unruk validasi tegangan, rasio errornya adalah 0,011%.

Pada kondisi open loop, tegangan yang dihasilkan adalah 7 V, arusnya adalah sekitar 1,25 – 1,27 mA dan daya yang dihasilkan adalah 8,9 mW pada kecepatan angin 5 m/s, pada kecepatan angin 6 m/s, tegangan yang dihasilkan adalah 8,6 – 8,7 V, arusnya adalah sekitar 1,30 – 1,33 mA dan daya yang dihasilkan sebesar 11,9 mW, pada kecepatan angin 7 m/s, tegangan yang dihasilkan adalah 10,2 – 10,3 V, arusnya sekitar 1,34 mA, dan daya yang dihasilkan adalah 13,9 mW pada saat kecepatan angin 7 m/s.

Dari hasil respon sistem pengendalian arus diperoleh nilai eror steady state sebesar ±1 mA dan settling time sebesar ~1 detik dari kecepatan angin yang naik atau turun.

Dari hasil penentuan arus optimum untuk supervisory level, diperoleh daya maksimum 293,51 mW yang dihasilkan oleh arus sekitar 60 mA pada saat kecepatan angin 5 m/s, 580,38 mW yang dihasilkan oleh arus sekitar 100 mA pada saat kecepatan angin 6 m/s, dan 910,39 mW yang dihasilkan oleh arus sekitar 140 mA pada saat kecepatan angin 7 m/s.

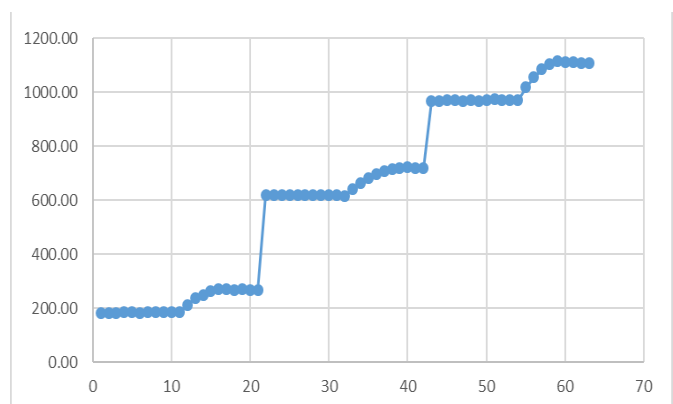
Ketika sistem sudah dibuat supervisory controlnya, bisa

dilihat bahwa pada tegangan 4,7 V – 4,9 V maka arus yang dihasilkan adalah sekitar 59 – 60 mA dan daya sekitar 285 mW – 290 mW di kecepatan angin 5 m/s, tegangan di sekitar 5,8 V maka arus yang dihasilkan adalah sekitar 99 - 100 mA dan daya sekitar 560 mW – 580 mW di kecepatan angin 6 m/s, dan pada tegangan sekitar 6,5 V maka arus yang dihasilkan adalah sekitar 140 mA dan daya sekitar 904 mW – 910 mW kecepatan angin 7 m/s. Penambahan daya yang terjadi pada setiap kecepatan jika dibandingkan dengan kondisi open loop adalah 280,83 mW untuk kecepatan angin 5 m/s, 558 mW untuk kecepatan angin 6 m/s dan 892,83 mW untuk kecepatan angin 7 m/s.

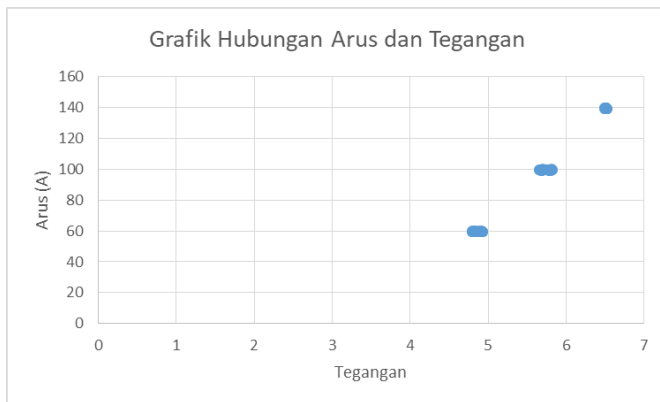
Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap bidang keilmuan energi terbarukan dan Teknik terapan fisika.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Implementasi Supervisory Control untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin Menggunakan Direct Torque Control Berbasis Boost Converter 2018 Surabaya Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Intelligent Energy Management for Environmental Monitoring Systems 201767-94.
- [3] Monitoring and Control of Machining 2006 Springer London Ltd 1-27.
- [4] Sensorless Control of DC Drive Using Artificial Neural Network 2014 Acta Polytechnica Hungarica 5-20.
- [5] Sensorless Vector Control of Induction Motor Drive 2011 ResearchGate.
- [6] Study of Supervisory Control Implementation in A Small Scale Variable Speed Wind Turbine 2018 ASTECHNOVA 2017.
- [7] Wind Energy Explained: Theory, Design, Explanation 2010 Chicester John Wiley & Sons Ltd.
- [8] Wind Turbine Blade Design 2012 Energies 3425-3449.
- [9] Qian, Lijun & Wang, Haixin & Dougherty, Edward. (2008). Inference of Noisy Nonlinear Differential Equation Models for Gene Regulatory Networks Using Genetic Programming and Kalman Filtering. Signal Processing, IEEE Transactions on. 56. 3327 - 3339.



Gambar. 11. Grafik Daya Closed Loop



Gambar. 12. Grafik Hubungan Arus dan Tegangan Supervisory Control Closed Loop

- [10] B., Mahesh & Das, S.P. & Joshi, Akanksha & Chandorkar, Mukul. (2002). A new public-domain simulator for power electronic circuits. Education, IEEE Transactions on. 45. 79 - 85. 10.1109/13.983225.
- [11] Kumar, Saurabh & Kumar, Rajat & Singh, Dr. Navdeep. (2017). Performance of closed loop SEPIC converter with DC-DC converter for solar energy system. 10.1109/ICPCES.2017.8117668.