SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA *BAYU* PADA PLTH *BAYU* BARU BANTUL D.I. YOGYAKARTA

SKRIPSI

untuk memenuhi salah satu persyaratan
mencapai derajat Sarjana S1

Disusun oleh:

Izzuddin Robbany

14524079

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta

2018

LEMBAR PENGESAHAN

SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA *BAYU* PADA PLTH *BAYU* BARU BANTUL D.I. YOGYAKARTA

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia

Disusun oleh:

Izzuddin Robbany
14524079

Yogyakarta, 03 Juli 2018

Menyetujui,
Pembimbing 1

R. M. Sisdarmanto Adinandra, S.T., M.Sc., Ph.D
025240101

LEMBAR PENGESAHAN

SKRIPSI

SIMULASI SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA *BAYU* PADA PLTH *BAYU* BARU BANTUL D.I. YOGYAKARTA

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Izzuddin Robbany

14524079

Telah dipertahankan di depan dewan penguji

Pada tanggal: 02 Oktober 2018

Susunan dewan penguji

Ketua Penguji : R.M. Sisdarmanto Adinandra, S.T., M.Sc., Ph.D , _____

Anggota Penguji 1: Husein Mubarok, S.T., M.Eng. , _____

Anggota Penguji 2: Wahyudi Budi Pramono, S.T., M.Eng. , _____

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana

Tanggal: 05 Oktober 2018

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Sc., Ph.D

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini Saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan Saya juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Skripsi yang terkait hak milik, hak intelektual, dan paten merupakan milik bersama antara tiga pihak yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal penggunaan informasi dan materi Skripsi terkait paten maka akan diskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut.

Yogyakarta, 04 Juli 2018



Izzuddin Robbany

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,

Alhamdulillahirabbil'alamin, segala puji dan syukur bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga pada kesempatan ini penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul "Simulasi Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Bayu* pada PLTH *Bayu* Baru, Bantul, D.I. Yogyakarta" sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia.

Penulis juga menyadari bahwa selama berlangsungnya penelitian, sampai dengan tahap penyelesaian laporan skripsi ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan oleh berbagai pihak. Oleh karena itu do'a dan ucapan terimakasih penulis sampaikan kepada:

1. Orang tua tercinta Ibu Wiwik Juliati dan Bapak Joemadi yang telah memberikan nasihat, do'a, dan dukungan moril maupun materil kepada penulis dalam menuntut ilmu, sehingga penyusunan laporan skripsi ini dapat terselesaikan.
2. Kakak tercinta Eka Widia Syaputri atas dukungan semangat dan do'a kepada penulis.
3. Bapak Yusuf Aziz Amrullah, S.T., M.Sc., Ph.D selaku ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak R.M. Sisdarmanto Adinandra, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberi masukan, arahan, dan semangat dalam membimbing penulis untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
5. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro, terima kasih atas ilmu dan bimbingan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh kuliah di Jurusan Teknik Elektro.
6. Mas Iwan dan Mas Jefri selaku pihak pengelola PLTH *Bayu* Baru di Pantai Baru yang telah mengizinkan dalam proses pengambilan data untuk tugas akhir ini.

7. Saudara-saudaraku keluarga besar Teknik Elektro, khususnya angkatan 2014 yang telah memotivasi dan membantu selesainya skripsi ini.
8. Seluruh pihak yang terlibat secara langsung dan tidak langsung yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu jasanya selama pengerjaan tugas akhir ini.

Jazakumullahu Khairan Katsiran. Semoga Allah *Subhanahu Wata'ala* membalas kebaikan selurruh pihak. Penulis sangat menyadari bahwa dalam laporan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dan memotivasi. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua orang maupun kepada penulis sendiri, Amin.

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Singkatan	Arti Singkatan
RPM	*Rotation Per Minutes*
MAE	*Mean Absolute Error*
HAWT	*Horizontal Axis Wind Turbine*
PLTH	Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid*
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga *Bayu*

ABSTRAK

Energi listrik merupakan kebutuhan sehari-hari manusia yang tidak dapat dipisahkan, bahkan kebutuhan energi listrik mengalami peningkatan setiap tahunnya. Hal ini terbukti dari pembangunan pembangkit energi-energi terbarukan pada daerah-daerah yang berpotensi. Daerah Pantai Baru adalah salah satu yang sangat berpotensi menghasilkan energi listrik melalui turbin angin. Oleh karena itu dibutuhkan simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* untuk mengetahui keluaran daya listrik. Penelitian ini melakukan pengambilan data lapangan dari tegangan dan arus turbin angin di PLTH *Bayu* Baru. Proses simulasi sistem membutuhkan model matematis sehingga diperlukan penentuan model matematis berdasarkan kecepatan angin (m/s). Validasi data dapat diukur berdasarkan nilai ketelitian dari perbandingan pengambilan data lapangan dan proses simulasi. Perbandingan proses simulasi dan pengambilan data lapangan didapatkan nilai MAE sebesar 22.81%. Hasil tersebut menunjukkan nilai *error* yang cukup baik dalam perbandingan proses simulasi dan pengambilan data lapangan. Namun, dengan melihat kesamaan grafik yang cukup baik, diharapkan dapat membantu sistem operasi PLTH *Bayu* Baru dalam proses simulasi.

Kata Kunci : Daya Listrik, Model, PLTB

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN i
PERNYATAAN iii
KATA PENGANTAR iv
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN vi
ABSTRAK vii
DAFTAR ISI viii
DAFTAR GAMBAR x
DAFTAR TABEL xi
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang Masalah 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Batasan Masalah 2
1.4 Tujuan Penelitian 2
1.5 Manfaat Penelitian 2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA 3
2.1 Studi Literatur 3
2.2 Tinjauan Teori 4
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) 4
2.2.2 Energi Angin 5
2.2.3 Turbin Angin 5
2.2.4 Anemometer 6
2.2.5 Perhitungan Data Lapangan 6
2.2.6 Model Matematis Turbin Angin 7
2.2.7 Menghitung MAE 8
BAB 3 METODOLOGI 9

3.1 Pengambilan Data Lapangan 9
3.2 Penentuan Model Matematis 10
3.3 Perancangan Simulasi 10
3.4 Validasi Data 11
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN 13
4.1 Hasil Data Lapangan 13
4.2 Hasil Perancangan Simulasi 15
4.3 Validasi Data 16
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 19
5.1 Kesimpulan 19
5.2 Saran 19
DAFTAR PUSTAKA 20
LAMPIRAN 19

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* 4
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin 5
Gambar 2.3 Turbin berjenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) 6
Gambar 2.4 Anemometer 6
Gambar 2.5 Sistem 3 Fasa Hubungan Bintang 7
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengambilan Data Lapangan 10
Gambar 3.2 Perancangan Simulasi dan sub-LabView 11
Gambar 3.3 Proses Perbandingan Data 11
Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin 15
Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Daya Listrik 17

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan di Lapangan 13
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Data Lapangan 14
Tabel 4.3 Hasil Proses Simulasi 15
Tabel 4.4 Perbandingan Nilai MAE 17

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Di Indonesia tersimpan kekayaan alam yang banyak. Para ilmuwan menjadikan Indonesia salah satu negara yang dapat menghasilkan sumber energi yang potensial. Beberapa contoh sumber energi yang digunakan di Indonesia, yaitu: minyak tanah, gas, mineral alam, serta fosil. Sumber energi tersebut merupakan sumber energi yang tidak dapat terbarukan, maka membutuhkan sumber energi alternatif agar dapat menjaga ketersedian energi yang dibutuhkan.

Sumber energi alternatif adalah sumber energi pengganti yang dapat menggantikan sumber energi yang tak dapat terbarukan menjadi dapat terbarukan. Energi alternatif dan yang dapat terbarukan, seperti: air, angin, matahari, dan lainnya. Namun, energi alternatif tersebut hanya dimanfaatkan oleh sebagian orang saja. Sumber energi tak terbarukan dan terbarukan dapat memenuhi kebutuhan energi listrik di Indonesia. Masyarakat Indonesia yang semakin bertumbuh dan berkembang, maka sumber energi tak terbarukan dan terbarukan dapat digunakan secara besama untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia.

Kebutuhan listrik yang meningkat setiap tahunnya, maka energi terbarukan dapat menjadi solusi kebutuhan listrik tersebut. Energi terbarukan merupakan energi yang bersumber dari alam sehingga tak habis-habis dan ramah terhadap lingkungan. Energi terbarukan menjadi teknologi yang sangat berkembang pada saat ini. Salah satu energi terbarukan yang cukup potensial adalah energi angin [1].

Energi angin merupakan energi yang tidak habis-habis dan ramah terhadap lingkungan sehingga salah satu solusi energi terbarukan di Indonesia saat ini [2]. Energi angin menjadi tidak habis-habis karena bersumber dari alam. Kemudian energi angin juga menjadi ramah terhadap lingkungan karena tidak merusak alam dan membuat dampak buruk atau dampak negatif terhadap lingkungan disekitarnya. Ketersediaan energi angin di Indonesia mempunyai tingkat ketersedian cukup banyak dan stabil. Hal tersebut karena letak Indonesia yang terdiri dari berbagai pulau-pulau, sehingga energi angin menjadi salah satu sumber energi yang berpotensi sebagai penghasil energi listrik.

Sebagian kecil daerah pantai di Indonesia yang menggunakan energi angin sebagai sistem pembangkit listrik tenaga angin. Permasalahan yang timbul dari pembangkit listrik tenaga *bayu* adalah bervariasinya lingkungan di Indonesia. Hal tersebut akan menentukan ketersediaan sumber energi angin. Sehingga sistem pembangkit listrik energi angin memerlukan pemodelan

untuk mempermudah perancangan dan penganalisaan dari sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* tersebut.

Kecepatan angin yang ada di daerah pantai berbeda-beda, maka dibutuhkan teknologi simulasi sistem pembangkit listrik tenaga angin untuk mendukung sistem operasi pada daerah tersebut. Kecepatan angin di daerah pantai menjadi salah satu *input* yang digunakan pada simulasi. Oleh karena itu dilakukan penelitian mengenai simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* pada PLTH *Bayu* Baru, Bantul, D.I. Yogyakata.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan sebelumnya, maka dapat ditentukan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* di daerah Pantai Baru dengan membandingkan model dan pengukuran riil?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang membatasi penelitian ini adalah:

1. Membandingkan daya listrik yang dihasilkan (*output*) yaitu simulasi dan daya sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Bayu* di PLTH *Bayu* Baru.
2. Jumlah turbin yang digunakan untuk membandingkan kedua keluaran adalah satu turbin.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang simulasi serta membandingkan daya yang dihasilkan antara simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* di PLTH *Bayu* Baru berbasis LabView dan pengukuran riil.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah agar simulasi sistem pembangkit listrik tenaga angin ini dapat menjadi salah satu referensi untuk mengetahui daya listrik yang akan dihasilkan ketika kecepatan di daerah Pantai Baru berubah-ubah.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi Literatur

Sebelumnya pernah dilakukan penelitian-penelitian dengan metode yang berbeda dari setiap peneliti, maka penulis memperoleh beberapa literatur. Penelitian yang dilakukan oleh Nappu dkk [1] membahas tentang kecepatan angin yang mempengaruhi besar keluaran torsi dan kualitas daya. Metodologi penelitian ini menggunakan model simulator turbin angin yang dikembangkan oleh *MathWork.Inc* berbasis software *Matlab/Simulink* r2013a. Sistem ini dirancang dan didesain khusus untuk model tubin angin *Vestas* $V82-1.65\,MW$. Dengan menggunakan variabel *input* data sistem seperti kecepatan angin yang berubah secara *linear* dari *cut-out speed* hingga *cut-in speed* dan arah angin yang konstan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa daya keluaran dalam jangkauan waktu 0-8 detik bernilai 0, meskipun kecepatan angin bernilai 16 m/s. Hal ini disebabkan putaran minimum generator belum terpenuhi. Selanjutnya pada waktu 8-10 detik, putaran generator dan kecepatan angin telah terpenuhi sehingga terjadi proses *switching* menyebabkan daya keluaran turbin angin meningkat cukup signifikan.

Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Oh dkk [3] membahas tentang kegagalan tak terduga dari *gearbox* dan generator sehingga memerlukan waktu tunggu yang lama dan derek yang besar untuk perbaikan atau pergantian. Untuk tujuan tersebut, dipasang *condition monitoring systems* (CMS) pada turbin angin multi-MW. Kemudian dari permasalahan tersebut dibuatlah simulator yang memiliki konfigurasi motor generator yang sederhana. Simulator tersebut berfungsi untuk memastikan percobaan yang stabil, keseluruhan kontrol kecepatan yang biasa dilakukan. Namun, simulator tersebut tidak tepat untuk mengembangkan pemantauan kondisi dan diagnosis kesalahan algoritma. Untuk mengatasi keterbatasan simulator yang ada, Institut Riset *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO) mengembangkan sebuah simulator turbin angin baru yang beroperasi dengan logika kontrol sama seperti turbin angin yang sebenarnya sehingga keadaan operasi tidak stasioner dapat disimulasikan. Selain itu, sensor yang sesuai dipasang untuk mengakuisisi data dari masing-masing komponen. Karakteristik dinamik turbin dan turbulensi angin disimulasikan dengan menerapkan model yang memiliki kesamaan dengan turbin angin 3 MW. Hasilnya kurva torsi untuk motor dan generator yang memiliki kesamaan dengan turbin angin.

Penelitian lain dilakukan oleh Rizkiani dkk [4] membahas tentang peningkatan konsumsi energi yang signifikan. Untuk menghasilkan energi tersebut memerlukan generator yang merupakan salah satu komponen terpenting dari sistem konversi energi angin karena dapat

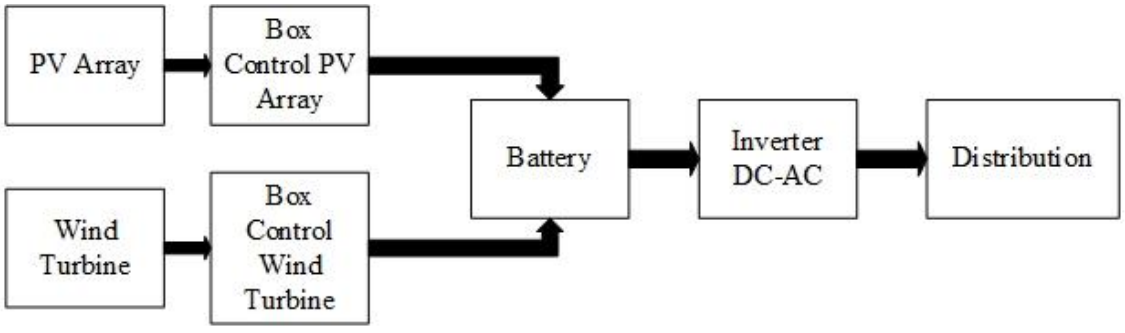
mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Model dari *permanent magnet synchronous generator* (PMSG) adalah model *nonlinear* yang memudahkan analisis untuk melakukan transformasi dari sistem *nonlinear* ke sistem *linear* dengan menggunakan metode *feedback linearization control*. *Feedback linearization control* berfungsi mengatasi ketidaklinearan tersebut melalui perubahan variabel dan *input* kendali yang sesuai sehingga dapat diketahui daya maksimal dan dapat diterapkan pada pembangkit listrik tenaga angin. Hasilnya semakin tinggi kecepatan angin dan kecepatan rotor maka akan menghasilkan daya yang semakin besar.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Oh dkk membahas tentang pembuatan simulator untuk mengetahui kesamaan antara motor pada generator dan turbin angin. Metodologi penelitian tersebut menggunakan proses perbandingan data riil dan simulator. Selanjutnya penelitian yang dilakukan oleh Nappu dkk dan Rizkiani dkk tentang menggunakan model matematis untuk menghasilkan daya listrik yang semakin besar. Model matematis merupakan komponen yang mempengaruhi dalam proses simulasi. Sehingga tugas akhir ini menggunakan salah satu model matematis turbin angin untuk mengetahui daya listrik yang didapatkan dengan *input* kecepatan angin di daerah yang telah ditentukan.

2.2 Tinjauan Teori

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH)

Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid* (PLTH) adalah pembangkit listrik yang memanfaatkan dua jenis pembangkit. PLTH yang berada di Pantai Baru merupakan pembangkit memanfaatkan gabungan 2 energi yaitu energi angin dan energi matahari agar dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Gambar 2.1 di bawah ini merupakan skema dari sistem pembangkit listrik tanaga *hybrid*.



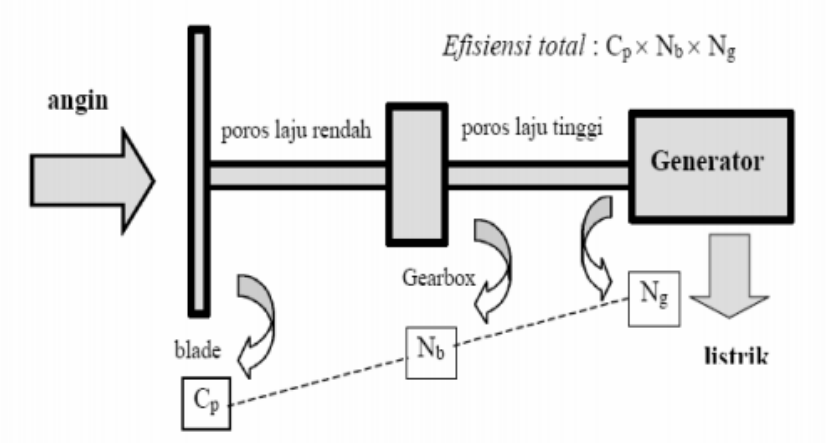
Gambar 2.1 Diagram Blok Sistem Pembangkit Listrik Tenaga *Hybrid*

2.2.2 Energi Angin

Pada dasarnya energi angin terjadi karena ada perbedaan suhu antara udara panas dan udara dingin. Indonesia yang dilewati khatuliswa merupakan daerah yang panas, maka udaranya menjadi panas, mengembang dan menjadi ringan, bergerak ke arah kutub yang lebih dingin. Sebaliknya di daerah kutub yang dingin, udaranya menjadi dingin dan turun ke bawah. Dengan demikian perputaran udara terjadi berupa perpindahan udara dari Kutub Utara ke Garis Khatuliswa, dan sebaliknya. Pada prinsipnya bahwa angin terjadi karena adanya perbedaan suhu udara pada beberapa tempat di muka bumi [5]. Oleh karena itu, Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki sumber energi angin yang baik.

2.2.3 Turbin Angin

Energi listrik dihasilkan dari energi gerak angin yang menggerakkan kincir sehingga menjadi energi putar pada kincir angin yang dipengaruhi oleh efesiensi kincir (C_p) tersebut. Kemudian putaran kincir tersebut digunakan untuk memutar *gearbox* dan dipengaruhi efesiensi *gearbox* (N_b) tersebut. *Gearbox* membuat putaran menjadi lebih besar dari sebelumnya, sehingga dapat memutar genetor lebih baik. Efiesiensi generator (N_g) akan mempengaruhi perputaran dari generator. Hal tersebut disebut prinsip dasar kerja dari turbin angin. Generator merupakan salah satu komponen yang akan menghasilkan listrik pada rangkaian turbin angin [6]. Gambar 2.2 adalah prinsip kerja turbin angin.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Turbin Angin [6]

Selanjutnya turbin angin *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) yaitu jenis turbin angin dengan sumbu horizontal seperti baling-baling pesawat terbang. Untuk mendapatkan kecepatan yang maksimal, maka turbin angin ini harus mengikuti arah angin [7]. Gambar 2.3 merupakan salah satu contoh turbin berjenis HAWT.



Gambar 2.3 Turbin berjenis *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT)

2.2.4 Anemometer

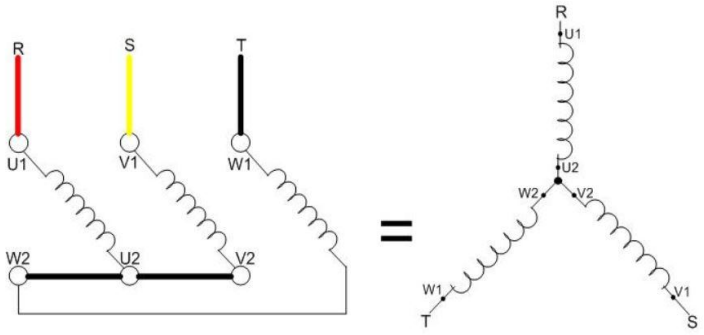
Anemometer merupakan sebuah sensor yang digunakan untuk mengukur RPM dan kecepatan angin. Kecepatan angin diukur dengan cara menghitung beberpa lubang kecil yang telah ditetapkan, sehingga dapat membaca kecepatan angin yang berputar secara vertikal [8]. Anemometer yang berputar secara vertikal ditunjukkan pada Gambar 2.4 di bawah ini



Gambar 2.4 Anemometer

2.2.5 Perhitungan Data Lapangan

Pada umumnya generator pada turbin angin akan menghasilkan tegangan 3 fasa serta arus. Salah satu teknik instalasi 3 fasa adalah sistem hubungan bintang. Setiap fasa terhubung dengan satu titik. Titik tersebut dihubungankan dengan fase netral [9]. Gambar 2.5 menunjukkan sistem 3 fasa hubungan bintang.



Gambar 2.5 Sistem 3 Fasa Hubungan Bintang

Tegangan *line* sama dengan 1,73 tegangan fasa. Sedangkan arus tiap fasa sama dengan arus *line*. Persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut,

$$V_{line} = \sqrt{3}V_{fasa}\,, \tag{2.1}$$

dengan nilai :

V_{line}= tagangan antar fasa (Volt)

V_{fasa}= tegangan pada fasa (Volt)

Pada beban yang setimbang, rumus umum untuk daya tiga fase seperti persamaan 2.2,

$$P = \sqrt{3}V_{line}I_{line}\cos\varphi\,, \tag{2.2}$$

dengan nilai :

P = daya listrik tiga fasa (watt)

I_{line}= arus pada fasa (Ampere)

cos φ= koefisien faktor daya

2.2.6 Model Matematis Turbin Angin

Model matematis bermula dari energi kinetik yang bergerak melalui massa udara. Di bawah ini menunjukkan energi kinetik akan berbanding lurus dengan kecepatan angin pada turbin sebagaimana persamaan 2.1 sebagai berikut [10],

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \tag{2.3}$$

dengan nilai :

m = massa udara (kg)

v = kecepatan angin (m/s)

Laju perubahan massa diperoleh persamaan.

$$m = \rho A v, \tag{2.4}$$

dengan nilai :

ρ = kerapatan udara (kg/m^3)

A = daerah turbin yang mengalir angin (m^2)

Dengan diperoleh persamaan (2.1) dan persamaan (2.2), maka akan menjadi daya total kinetik. Daya total kinetik akan berbanding lurus dengan koefisien turbin (C_p) untuk mengubah daya total kinetik menjadi daya mekanik. Koefisien turbin (C_p) mempunyai nilai maksimal yaitu 0.59, nilai tersebut dikenal sebagai batas betz [10]. Oleh karena itu, daya mekanik dapat dituliskan sebagai berikut,

$$P_m = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p, \tag{2.5}$$

dengan nilai :

P_m = daya mekanik (watt)

Perubahan daya mekanik menjadi energi listrik akan melalui generator. Oleh karena itu, efesiensi generator menjadi faktor pengali dalam perubahan daya tersebut [2]. Persamaan matematis dituliskan sebagai berikut

$$P_{listrik} = P_m N_g, \tag{2.6}$$

dengan nilai :

N_g = efesiensi generator

$P_{listirk}$ = daya listrik (watt)

2.2.7 Menghitung MAE

Mean Absolute Error (MAE) atau MAPE merupakan metode untuk mengukur ketelitian dengan menghitung selisih antara daya listrik dari simulasi dan daya listrik dari pengambilan data lapangan. Semakin nilai MAE mendekati nol, maka akan menunjukkan bahwa simulasi dari model matematis semakin mendekati data validasi atau data dari hasil pengambilan data lapangan[11]. Sehingga simulasi dan model matematis yang digunakan sudah *valid*. Persamaan MAE dituliskan sebagai berikut

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} |(y(t) - \hat{y}(t))|, \tag{2.7}$$

dengan nilai :

$y(t)$ = daya keluaran simulasi

$\hat{y}(t)$ = hasil pengukuran riil

n = banyak data

BAB 3
METODOLOGI

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam proses membuat simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* dan memvalidasinya. Proses tersebut terbagi menjadi dua yaitu: pengambilan data lapangan dan perancngan simulasi. Pengambilan data lapangan merupakan proses pengambilan data secara langsung dari keluaran generator $1kW/240V$ yang terhubung dengan turbin angin pada PLTH *Bayu* Baru. Mengukur kecepatan angin merupakan salah satu bagian dari pengukuran riil dengan menggunakan anemometer yang telah terpasang sebelumnya. Proses pengukuran riil berlangsung selama 24 jam dengan waktu *sampling* (t_s) setiap satu jam.

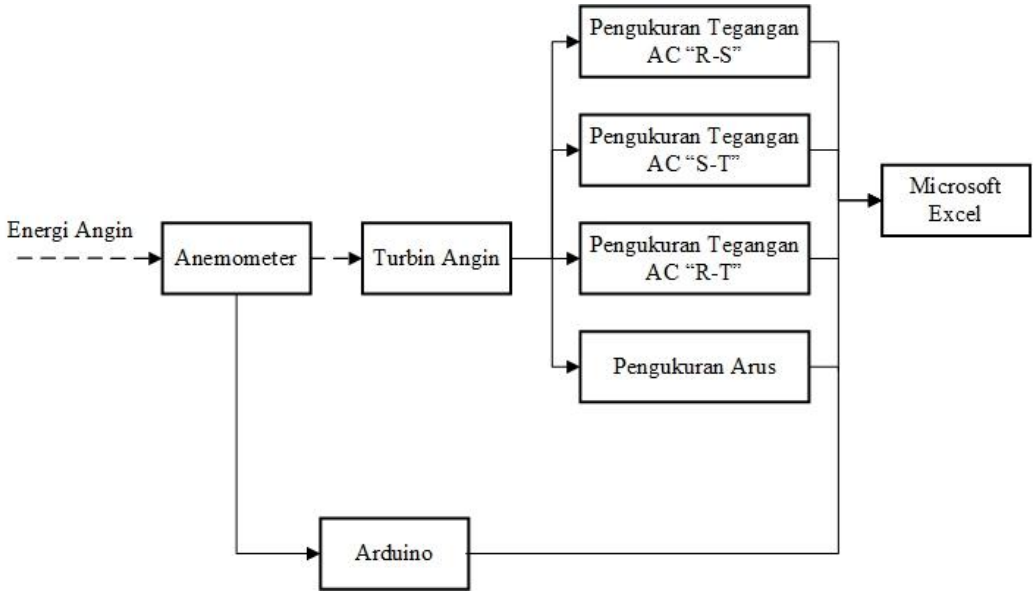
Perancangan simulasi adalah proses pembuatan sistem pembangkit listrik tenaga angin dengan menggunakan *LabView* dan model matematis tertentu. Penentuan model matematis berdasarkan parameter-parameter turbin angin. Kecepatan angin yang telah diukur akan menjadi *variable input* dari proses simulasi. Data *input* terdiri atas beberapa kecepatan angin, maka diperlukan proses presisi data untuk membuat data *input* tersebut menjadi data tunggal kecepatan angin pada setiap jamnya. Proses presisi data dilakukan oleh *Microsoft Excel*. *LabView* akan memproses data tunggal kecepatan angin menjadi *input* dari model matematis yang telah ditentukan. Kemudian model matematis akan menghasilkan *output* berupa daya listrik.

Selanjutnya proses verifikasi dan validasi data dilakukan dengan membandingkan daya listrik yang dihasilkan pada pengambilan data lapangan dan daya listrik yang dihasilkan pada proses simulasi. Proses validasi data menggunakan persamaan (2.7) sehingga didapatkan nilai *error* dari perbandingan data keduanya.

3.1 Pengambilan Data Lapangan

Pada tahap ini dilakukan proses pengukuran data dari hasil keluaran turbin angin. Data keluaran didapatkan melalui pengukuran menggunakan *clampmeter* dan multimeter. Untuk mengukur tagangan tiga fasa dari generator menggunakan multimeter yang dihubungkan secara paralel dengan keluaran dari generator turbin angin. Sehingga akan didapatkan tiga data *input* yaitu *input* tengangan R-S, *input* tegangan S-T, dan *input* tegangan R-T. Kemudian mengukur arus keluaran dari generator turbin angin menggunakan *clampmeter* dengan cara menglingkari salah satu kabel. Pengukuran diasumsikan sebagai sistem 3 fase hubungan bintang sehingga didapatkan daya listrik dengan menggunakan persamaan (2.2). Kemudian data kecepatan angin didapatkan dari pengukuran menggunakan anemometer yang terhubung dengan mikrokontroler (Arduino) sebagai pendataan.

Perekaman data melalaui Arduino dilakukan selama lima menit dengan waktu sampling sepuluh detik dan melakukannya setiap jam selama 24 jam. Kemudian merata-ratakan hasil perakaman dan memvisualisaikan dalam bentuk grafik di Microsoft Excel. Gambar 3.2 menunjukkan proses pengmabilan data lapangan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin.



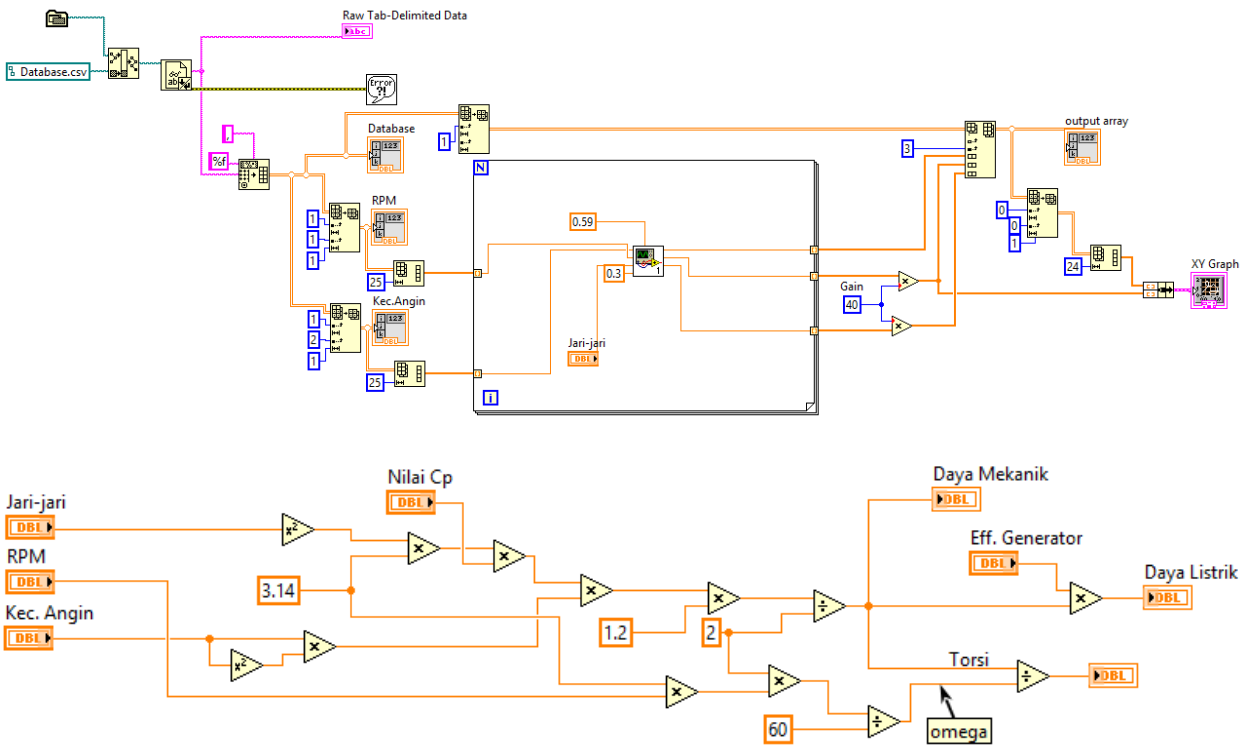
Gambar 3.1 Diagram Alir Pengambilan Data Lapangan

3.2 Penentuan Model Matematis

Model matematis ditentukan berdasarkan parameter-parameter yang digunakan oleh sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* di PLTH *Bayu* Baru. Parameter-parameter tersebut yaitu: kecepatan angin (v), jari-jari turbin (R), dan efesiensi generator (N_g). Oleh karena itu, persamaan (2.5) merupakan perumusan yang tepat untuk menjadi model matematis pada simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu*.

3.3 Perancangan Simulasi

Dalam tahap ini dilakukan perancangan simulasi menggunakan LabView. Perancangan simulasi bermula dengan menggunakan *Tab Delimited Data* untuk memasukkan data dari *Microsoft Excel* ke dalam LabView serta memisahkan data-data tersebut dengan menggunakan fungsi *Array* pada LabView. Data tersebut menjadi *input* dari model yang telah ditentukan, lalu modelnya dijadikan sub-LabView dan diletakkan dalam *for loop* agar perulangan data dapat dieksekusi. Gambar 3.3 menunjukkan perancangan simulasi di LabView dan sub-LabView yang menggambarkan model matematis turbin angin.

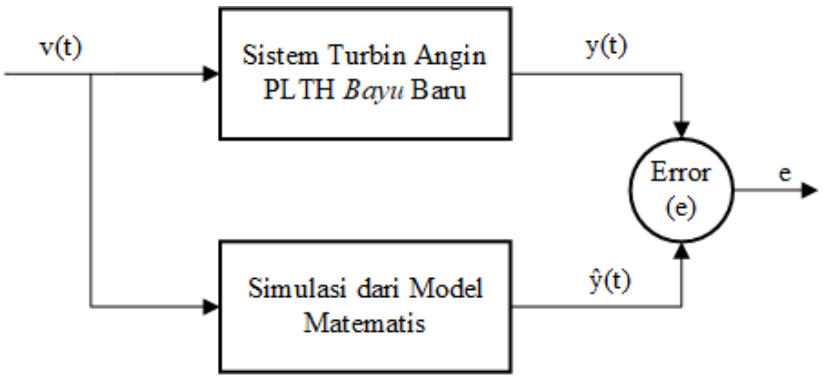


Gambar 3.2 Perancangan Simulasi dan sub-LabView

3.4 Validasi Data

Validasi data merupakan proses memeriksa kebenaran model matematis yang telah digunakan. Proses verifikasi data dilakukan dengan membandingkan data. Data yang dibandingkan adalah data pengambilan data lapangan dan data keluaran simulasi. Beberapa pengambilan data lapangan yaitu: daya keluaran AC, tegangan AC, dan arus. Sementara itu, daya keluaran dari simulasi yaitu: RPM, kecpatan angin (v), serta daya keluarannya.

Kedua data keluarannya akan dibandingkan dengan menggunakan pendakatan melalui grafik. Hasil pendekatan grafik tersebut akan menggambarkan perbedaan diantara keduanya. Proses perbandingan data dapat tergambarkan oleh gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.3 Proses Perbandingan Data

Hasil keluaran data lapangan maupun simulasi dapat dilihat keakurasian dan ketelitiannya dengan menggunakan metode MAE. Metode tersebut dilakukan untuk menghitung nilai MAE dengan menggunakan persamaan (2.7). Data yang *valid* adalah data yang menghasilkan nilai MAE yang mendekati nol. Oleh karena itu, semakin kecil nilai dari MAE akan semakin baik hasil dan semakin besar nilai MAE akan semakin tidak baik. Apabila hasil validasi belum baik, maka dilakukan identifikasi ulang pada simulasi.

BAB 4
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Data Lapangan

Hasil pengambilan data lapangan satu turbin yang menggunakan generator $1kW/240V$ dilakukan selama 24 jam dengan waktu *sampling* (t_s) satu jam didapatkan data *input* dan *output* seperti pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Tegangan di Lapangan

Pukul	V_{RS}	V_{ST}	V_{TR}
00:00:00	0	0	0
01:00:00	0	0	0
02:00:00	0	0	0
03:00:00	0	0	0
04:00:00	0	0	0
05:00:00	0	0	0
06:00:00	0	0	0
07:00:00	0	0	0
08:00:00	0	0	0
09:00:00	0	0	0
10:00:00	101,5	100	101.2
11:00:00	70,4	70	69,5
12:00:00	83,1	83,5	82,7
13:00:00	190,3	190	188.7
14:00:00	223	221,8	222,3
15:00:00	195,5	196	194,7
16:00:00	198,1	101,3	110,5
17:00:00	109,3	109	108,5
18:00:00	124	124,4	123,5
19:00:00	146	145,3	144,6
20:00:00	0	0	0
21:00:00	0	0	0
22:00:00	0	0	0
23:00:00	0	0	0

Berdasarkan Tabel 4.1 nilai tegangan RS, ST, dan RT didapat dengan melakukan pengambilan data lapangan secara primer menggunakan *clampmeter*. Nilai tegangan tersebut merupakan nilai tegangan tiap fasa yang terhubung bintang ke beban. Nilai tegangan tiap fasa mempunyai nilai yang tidak jauh berbeda setiap fasa, maka dapat diasumsikan bahwa nilai

tersebut seimbang. Apabila beban yang terhubung bintang dan nilai tegangan tiap fasa seimbang sehingga persamaan (2.2) dapat digunakan untuk mengetahui nilai daya tiga fasenya.

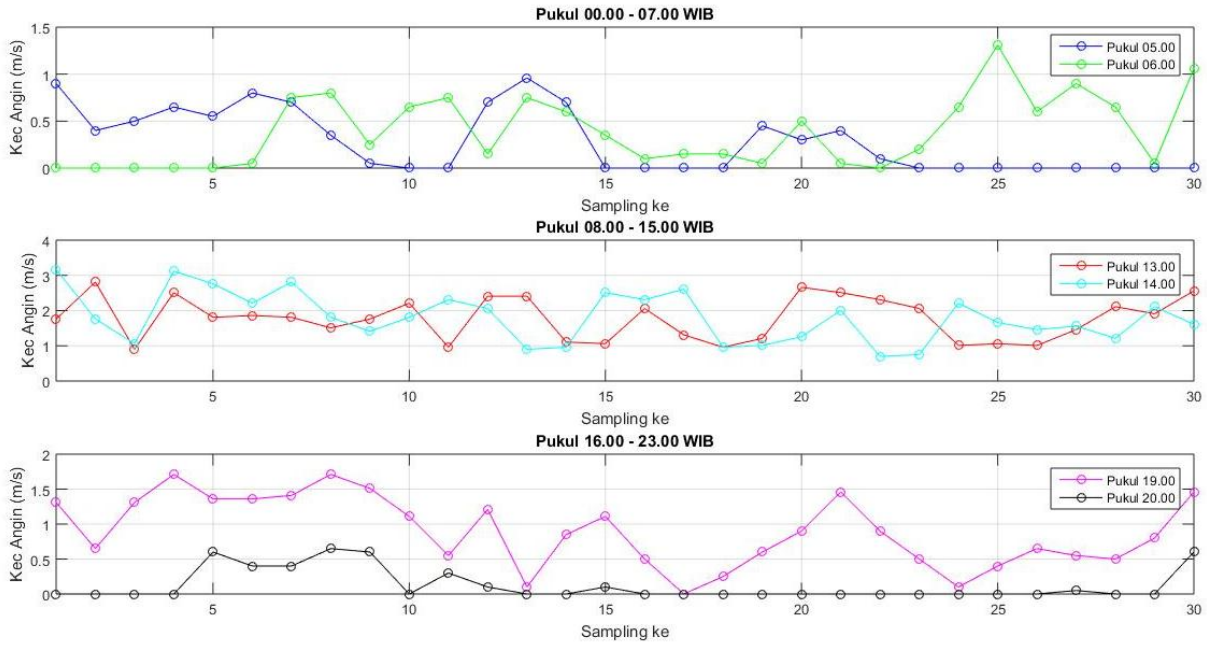
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Data Lapangan

Pukul	**Tegangan** $(\boldsymbol{volt})$	**Arus** $(\boldsymbol{ampere})$	**Daya Listrik** $(\boldsymbol{watt})$
00:00:00	0	0	0
01:00:00	0	0	0
02:00:00	0	0	0
03:00:00	0	0	0
04:00:00	0	0	0
05:00:00	0	0	0
06:00:00	0	0	0
07:00:00	0	0	0
08:00:00	0	0	0
09:00:00	0	0	0
10:00:00	175.595	0.93	163.30335
11:00:00	121.792	0.97	118.13824
12:00:00	143.763	0.91	130.82433
13:00:00	329.219	0.86	283.12834
14:00:00	385.79	0.72	277.7688
15:00:00	338.215	0.7	236.7505
16:00:00	342.713	0.81	277.59753
17:00:00	189.089	0.96	181.52544
18:00:00	214.52	1.1	235.972
19:00:00	252.58	1.08	272.7864
20:00:00	0	0	0
21:00:00	0	0	0
22:00:00	0	0	0
23:00:00	0	0	0

Bedasarkan Tabel 4.2 dapat diketahui bahwa menurut persamaan (2.2) turbin tidak dapat menghasilkan daya listrik ketika salah satu indikator yaitu tegangan dan arus bernilai nol. Nilai arus pada pengukuran akan tetap terbaca pada saat nilai tegangan bernilai nol karena sistem turbin di daerah Pantai Baru telah terhubung dengan beban yaitu baterai. Kemudian nilai tegangan yang sangat kecil tidak akan terbaca oleh sistem turbin sehingga tidak akan menghasilkan daya listrik. Hal tersebut terjadi karena turbin memutar turbin pada kecepatan angin $2 - 3\ m/s$. Oleh karena itu, nilai menjadi tidak terbaca ketika turbin berputar di bawah kecepatan tersebut.

4.2 Hasil Perancangan Simulasi

Peracangan simulasi menggunakan kecepatan angin di daerah Pantai Baru sebagai *input* untuk mendapatkan daya listrik. Di daerah Pantai Baru rata-rata angin berkecepatan 1 – 4 m/s terjadi pada pukul 10.00 – 19.00 WIB. Sementara itu, pada jam 20.00 – 09.00 WIB rata-rata kecepatan angin adalah 0 – 1 m/s. Sehingga turbin akan berputar dan menghasilkan daya listrik di siang hari daripada malam hari. Gambar 4.1 merupakan beberapa data kecepatan angin yang terjadi di daerah Pantai Baru pada 22 Mei 2018.



Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Angin

Beberapa grafik kecepatan angin pada Gambar 4.1 menunjukkan bahwa kecepatan angin di daerah Pantai Baru mempunyai nilai yang berubah-ubah pada setiap jam dan setiap iterasi. Hal tersebut dapat terjadi karena perbedaan temperatur dan tekanan udara. Pada siang daerah pesisir Pantai Baru menerima panas dan tekanan udara yang cenderung rendah, sehingga mengakibatkan terjadi aliran udara pada pesisir pantai. Sementar itu, untuk malam hari aliran udara tidak terjadi di pesisir pantai karena temperatur pada pesisir pantai tidak meningkat. Keadaan tersebut dimanfaatkan untuk mengetahui kecepatan angin serta melakukan proses presisi data. Proses tersebut dilakukan setiap jamnya dan mendapatkan sebuah nilai untuk dijadikan salah satu *input* proses simulasi. Berikut merupakan hasil proses simulasi dengan *output* dari anemometer akan ditunjukkan pada Tabel 4.3 di bawah ini.

Tabel 4.3 Hasil Proses Simulasi

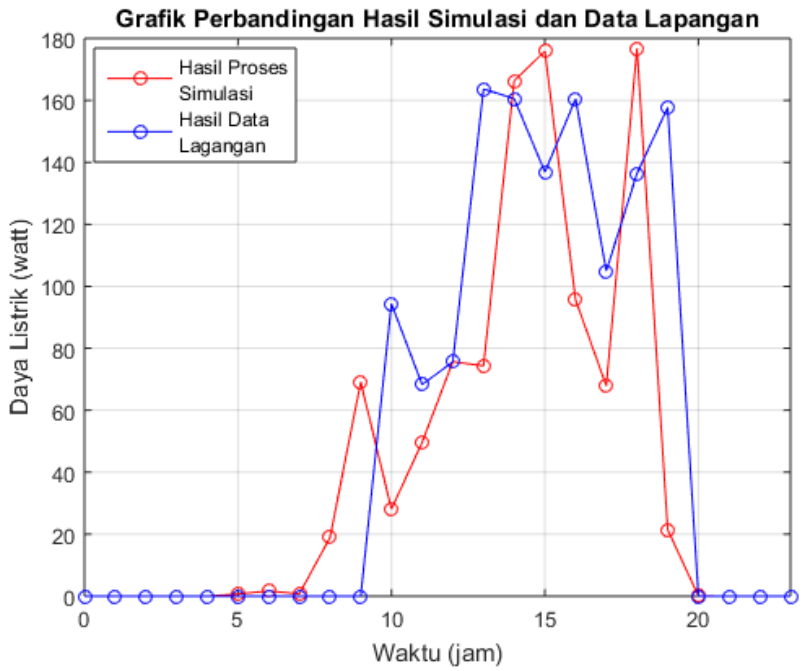
Pukul	**RPM** (rpm)	**Kec. Angin** $(^{m}/_{s})$	**Daya Listrik** $(watt)$
00:00:00	0	0	0
01:00:00	0	0	0

Pukul	RPM (rpm)	Kec. Angin $(^{m}/_{s})$	Daya Listrik $(watt)$
02:00:00	0	0	0
03:00:00	0	0	0
04:00:00	0	0	0
05:00:00	34	0.283667	1.19884
06:00:00	46	0.384	2.97391
07:00:00	34.8	0.29	1.28094
08:00:00	100.6	0.857667	33.1353
09:00:00	157.4	1.32067	120.98
10:00:00	116.8	0.978333333	49.1808
11:00:00	138.6	1.182333333	86.807
12:00:00	161.2	1.361	132.406
13:00:00	120	1.353	130.085
14:00:00	204.8	1.769666667	291.078
15:00:00	215.2	1.803	307.838
16:00:00	177	1.471333333	167.289
17:00:00	159.933333	1.312666667	118.795
18:00:00	216.6	1.806	309.377
19:00:00	106.8	0.894333333	37.5693
20:00:00	15.2	0.126667	0.106739
21:00:00	0	0	0
22:00:00	0	0	0
23:00:00	0	0	0

Bedasarkan Tabel 4.3 nilai daya listrik didapat melalui proses simulasi yang di dalamnya terdapat model matematis dari turbin angin. Model matematis tersebut merupakan gabungan antara persamaan (2.5) dan persamaan (2.6) sehingga menghasilkan daya listrik pada simulasi. Dari persamaan terdapat dua konstanta yaitu nilai C_p (efesiensi rotor) yang bernilai 0.59 dan N_g (efesiensi generator) bernilai 0.3 serta gain yang bernilai 70. Kecepatan angin di daerah Pantai Baru sangat mempengaruhi hasil dari persamaan, sehingga saat siang hari merupakan waktu yang efektif dalam menghasilkan daya listrik pada simulasi. Beberapa hasil dari simulasi mendapatkan nilai yang tinggi karena mencapai titik panas temperatur yang tertinggi dari yang lainnya.

4.3 Validasi Data

Pada peneletian ini, daya listrik yang dihasilkan dari simulasi dan pengambilan data lapangan dilakukan validasi dengan membandingkan keduanya. Hasil perbandingan tersebut dapat menjadi referensi untuk memeriksa kebenaran model matematis dari simulasi. Gambar 4.1 menunjukkan perbandingan daya listrik riil dan simulasi.



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Daya Listrik

Berdasarkan Gambar 4.2 selisih grafik yang terjadi pada sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* di PLTH *Bayu* Baru sangat berbeda. Hal tersebut karena anemometer yang menggunakan proses *encoder* dalam pengukuran kecepatan angin. Perbandingan kedua grafik pada gambar memiliki nilai yang berbeda, namun memiliki bentuk grafik yang serupa. Grafik berwarna merah memiliki nilai yang lebih tinggi karena pada proses simulasi menggunakan salah satu kondisi konstanta yang ideal yaitu efesiensi power (C_p). Pada saat pukul 05.00–10.00 terlihat grafik biru mengalami kenaikan terlebih dahulu dari grafik biru, namun pada pukul 19.00 grafik merah menurun terlebih dahulu. Hal tersebut dapat terjadi karena pengukuran energi angin menggunakan anemometer sehingga kecepatan angin yang kecil dapat terbaca dan menjadi *input* untuk daya listrik pada simulasi. Sementara itu, grafik biru merupakan pengukuran riil yang dapat menghasilkan daya listrik setelah energi angin berada pada kecepatan tertentu.

Untuk mengetahui ketelitian perbandingan pengambilan data lapangan dengan proses simulasi dapat dilihat berdasarkan nilai MAE. Namun, metode MAE menggunakan data simulasi pada pukul 10.00 – 19.00 agar perbandingannya sesuai dengan pengambilan data lapangan. Tabel 4.4 menunjukkan perbandingan nilai MAE.

Tabel 4.4 Perbandingan Nilai MAE

Pukul	Daya Listrik Simulasi (y(t))	Daya Listrik Lapangan (ŷ(t))	y(t) - ŷ(t)
00:00:00	0	0	0
01:00:00	0	0	0
02:00:00	0	0	0

Pukul	Daya Listrik Simulasi (y(t))	Daya Listrik Lapangan (ŷ(t))	y(t) - ŷ(t)
03:00:00	0	0	0
04:00:00	0	0	0
05:00:00	0	0	0
06:00:00	0	0	0
07:00:00	0	0	0
08:00:00	0	0	0
09:00:00	0	0	0
10:00:00	49.1808	163.30335	-114.12255
11:00:00	86.807	118.13824	-31.33124
12:00:00	132.406	130.82433	1.58167
13:00:00	130.085	283.12834	-153.04334
14:00:00	291.078	277.7688	13.3092
15:00:00	307.838	236.7505	71.0875
16:00:00	167.289	277.59753	-110.30853
17:00:00	118.795	181.52544	-62.73044
18:00:00	309.377	235.972	73.405
19:00:00	37.5693	272.7864	-235.2171
20:00:00	0	0	0
21:00:00	0	0	0
22:00:00	0	0	0
23:00:00	0	0	0
JUMLAH			-547.36983

Berdasarkan Tabel 4.4 menunjukkan perhitungan dengan sesuai dengan pengambilan data lapangan. Hasil perbandingan proses simulasi dan pengambilan data lapangan mendapatkan nilai sigma (Σ) sebesar -547.36983. Sehingga dengan meggunakan persamaan (2.7) didapatkan nilai RMSE sebagai berikut,

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}|(y(t) - \hat{y}(t))|$$

$$= \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}|-547.36983|$$

$$MAE = 22{,}81\%$$

Nilai ketelitian atau nilai *error* dapat menunjukkan keberhasilan model matematis yang digunakan. Dengan nilai MAE di atas menunjukkan bahwa antara model matematis dan data lapangan memiliki nilai yang cukup berbeda. Oleh karena itu, proses simulasi berhasil dilakukan dengan persentase dan memerhatikan kesamaan grafik dari proses simulasi dan pengambilan data lapangan.

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang diuraikan pada Bab 4 mengenai proses simulasi sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* di PLTH *Bayu* Baru, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbandingan proses simulasi dan pengambilan data lapangan didapatkan nilai MAE sebesar 22.81%. Hasil tersebut menunjukkan nilai *error* yang cukup baik dalam perbandingan proses simulasi dan pengambilan data lapangan. Namun, dengan melihat kesamaan grafik yang cukup baik, diharapkan dapat membantu sistem operasi PLTH *Bayu* Baru dalam proses simulasi.
2. Pengimplementasian model matematis pada LabView cukup berhasil dilakukan. Sehingga model tersebut dapat menjadi referensi dalam sistem pembangkit listrik tenaga *bayu* yang saya teliti.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diajukan untuk penulis berikutnya yaitu:

1. Mendapatkan hasil pengukuran yang lebih baik dengan menggunakan sensor-sensor yang mendukung pengukuran tersebut. Seperti: sensor tegangan AC $220V$ dan sensor *current transformer Non-Invasive* $100A$.
2. Menggunakan turbin yang lebih banyak dalam pengambilan data lapangan dan memperbanyak pengukuran data.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. B. Nappu, A. Mansur, dan N. A. Nikmatullah, "Pemodelan dan Simulasi Pembangkit Listrik Tenaga Angin untuk Koneksi Grid," *IPE-UNHAS*, vol. 19, no. 03, hal. 1–7, 2013.

[2] Subrata, "Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Angin 1kW Berbantuan Simulink Matlab," 2014.

[3] K. Oh, J. Lee, H. Bang, J. Park, J. Lee, dan B. I. Epureanu, "Development of a 20 kW wind turbine simulator with similarities to a 3 MW wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 62, hal. 379–387, 2014.

[4] I. Rizkiani, Subchan, dan Kamiran, "Analisis dan Simulasi Konversi Energi Angin Feedback Linearization Control," *Tek. Pomits*, vol. 1, no. 1, hal. 1–6, 2012.

[5] A. Kadir, "Energi: sumberdaya, inovasi, tenaga listrik, potensi ekonomi," Kedua., UI-Press, 2013, hal. 216–217.

[6] R. Sumiati dan A. Zamri, "Rancang bangun miniatur turbin angin pembangkit listrik untuk media pembelajaran," *Jur. Tek. Mesin Politek. Negeri Padang*, vol. 3, hal. 1–8, 2013.

[7] M. Mohammadi, A. Mohammadi, dan S. Farahat, "A New Method for Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Optimization," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 5, no. 1, hal. 1–8, 2016.

[8] M. Azlina dan T. Tamba, "Pembuatan Alat Ukur Kecepatan Angin," *Alat Ukur*, no. Alat ukur kecepatan Angin, hal. 13, 2013.

[9] S. Pakpahan dan M. Neidle, "Teknologi Instalasi Listrik," 3 ed., Jakarta: Erlangga, 1999, hal. 78–79.

[10] A. W. Manyonge, R. M. Ochieng, dan F. N. Onyango, "Mathematical Modelling of Wind Turbine in a Wind Energy Conversion System :," *Marthematical Sci.*, vol. 6, no. 91, hal. 4527–4536, 2012.

[11] T. Chai dan R. R. Draxler, "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? -Arguments against avoiding RMSE in the literature," *Geosci. Model Dev.*, vol. 7, no. 3, hal. 1247–1250, 2014.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Koding Arduino Pengambilan Data Lapangan

```
// Pin definitions
# define windPin 2 // Receive the data from sensor

// Constants definitions
const float pi = 3.14159265; // pi number
int period = 10000; // Measurement period (miliseconds)
int delaytime = 10000; // Time between samples (miliseconds)
int radio = 80; // Distance from center windmill to outer cup (mm)
int jml_celah = 18; // jumlah celah sensor

// Variable definitions
unsigned int Sample = 0; // Sample number
unsigned int counter = 0; // B/W counter for sensor
unsigned int RPM = 0; // Revolutions per minute
float speedwind = 0; // Wind speed (m/s)

void setup()
{
// Set the pins
pinMode(2, INPUT);
digitalWrite(2, HIGH);

// sets the serial port to 9600
Serial.begin(9600);

// Splash screen
Serial.println("ANEMOMETER");
Serial.println("**********");
Serial.print("Sampling period: ");
Serial.print(period/1000);
Serial.print(" seconds every ");
Serial.print(delaytime/1000);
Serial.println(" seconds.");
Serial.println();
}

void loop()
{
Sample++;
Serial.print(Sample);
windvelocity();
Serial.print(". Counter: ");
Serial.print(counter);
Serial.print("; RPM: ");
RPMcalc();
Serial.print(RPM);
Serial.print("; Wind speed: ");
```

```
WindSpeed();
Serial.print(speedwind);
Serial.print("[m/s]");
Serial.println();
delay(10000);
}

// Measure wind speed
void windvelocity()
{
speedwind = 0;
counter = 0;
attachInterrupt(0, addcount, CHANGE);
unsigned long millis();
long startTime = millis();
while(millis() < startTime + period) {}

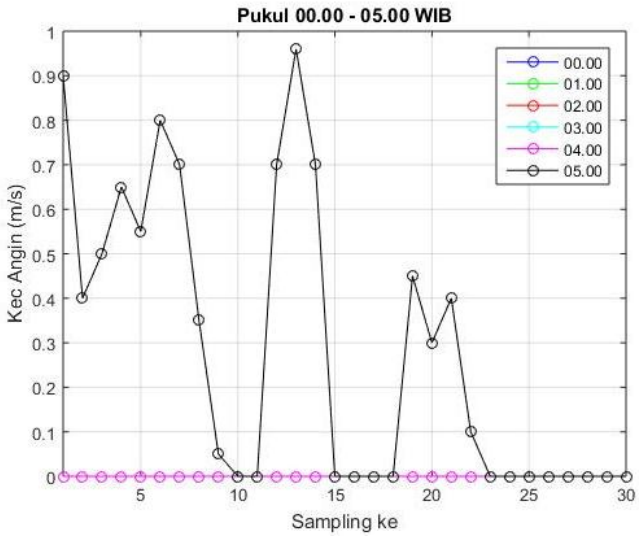
detachInterrupt(1);
}

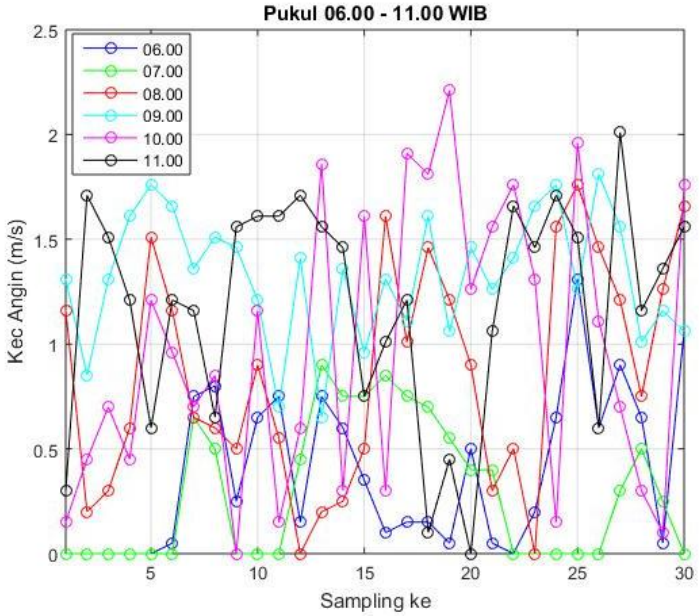
void RPMcalc()
{
RPM=((counter/jml_celah)*60)/(period/1000); // Calculate revolutions per minute (RPM)
}

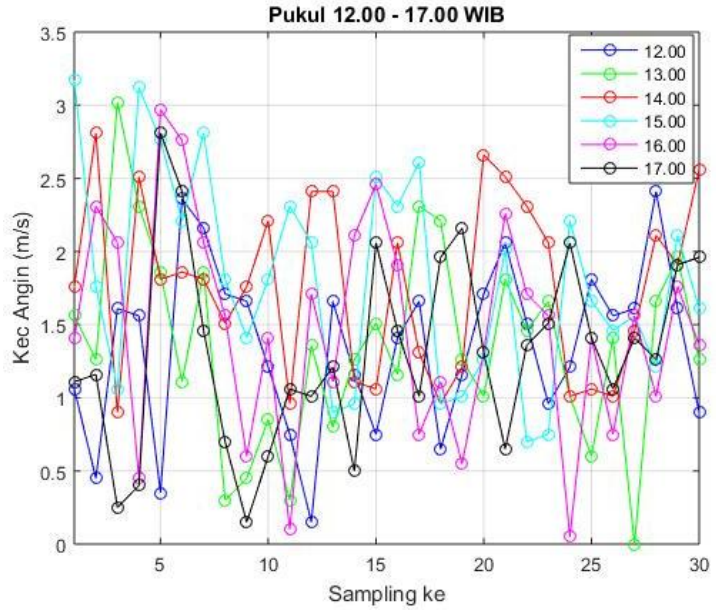
void WindSpeed()
{
speedwind = ((2 * pi * radio * RPM)/60) / 1000; // Calculate wind speed on m/s
}

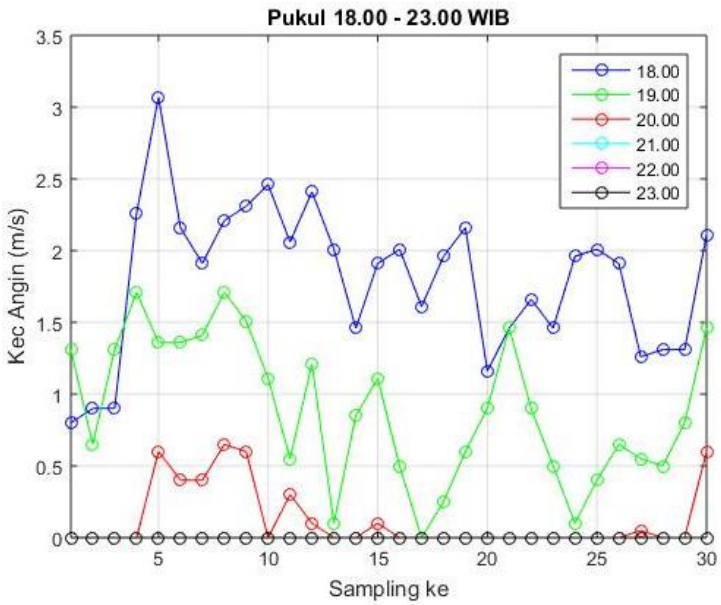
void addcount()
{
counter++;
}
```

Lampiran 2: Grafik Hasil Kecepatan Angin selama 24 jam.




Pukul 06.00 - 11.00 WIB
06.00
07.00
08.00
09.00
10.00
11.00
Kec Angin (m/s)
Sampling ke


Pukul 12.00 - 17.00 WIB
12.00
13.00
14.00
15.00
16.00
17.00
Kec Angin (m/s)
Sampling ke


Pukul 18.00 - 23.00 WIB
18.00
19.00
20.00
21.00
22.00
23.00
Kec Angin (m/s)
Sampling ke