



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE184801

PENENTUAN KAPASITAS DAYA SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HIBRIDA BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA TURBIN ANGIN DENGAN PROBABILITAS

Irfan Reza Wahyudi
NRP 07111440000190

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum B. P, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE184801

Penentuan Kapasitas Daya Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor Pada Turbin Angin Dengan Probabilitas

Irfan Reza Wahyudi
NRP 07111440000190

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum B. P, ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE184801

Probability Uses for Battery - Supercapacitor Hybrid System's Power Capacity Sizing on Wind Turbine

Irfan Reza Wahyudi
NRP 0711144000069

Supervisors

Vita Lystianingrum B. P., ST., M.Sc., Ph. D.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**Penentuan Kapasitas Daya Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Baterai-Superkapasitor Pada Turbin Angin Dengan Probabilitas**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip mapupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, April 2019

Irfan Reza Wahyudi
07111440000190

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENENTUAN KAPASITAS DAYA SISTEM
PENYIMPANAN ENERGI HIBRIDA BATERAI-
SUPERKAPASITOR PADA TURBIN ANGIN
DENGAN PROBABILITAS**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

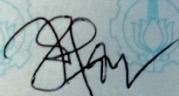
**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui,

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


24/4/19
Vita Lystianingrum B. P., ST.
M.Sc., Ph.D.
NIP 198208292006042001


Dr. Eng. Ardyono Priyadi,
ST., M.Eng.
NIP 197309271998031004


**DEPARTEMEN
SURABAYA
APRIL 2019**

Halaman ini sengaja dikosongkan

PENENTUAN KAPASITAS DAYA SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HIBRIDA BATERAI- SUPERKAPASITOR PADA TURBIN ANGIN DENGAN PROBABILITAS

Nama mahasiswa : Irfan Reza Wahyudi
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum B. P, ST., M.Sc., Ph. D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

Abstrak:

Energi terbarukan telah menjadi bagian penting dan kedepannya, energi yang ramah lingkungan menjadi fokus utama dibanding sumber energi konvensional seperti gas dan minyak bumi. Sebagai salah satu sumber energi terbarukan, angin mempunyai potensi yang sangat besar untuk dimanfaatkan. Dengan menggunakan data asli, pada Tugas Akhir ini menggunakan data kecepatan angin selama 24 jam dengan interval per menit. Pada sistem konversi angin menjadi energi listrik, Permanent Magnet Synchronous Generator akan digunakan karena mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan lainnya. Permasalahan utama sistem konversi angin adalah kecepatan angin yang fluktuatif menyebabkan keluaran yang dihasilkan ikut berubah sesuai masukannya. Keluaran sistem konversi angin berupa daya yang disalurkan menuju jala-jala disebut daya *dispatch* (P_d). Sistem penyimpanan energi hibrida atau *Hybrid Energy Storage System* (HESS) terdiri dari baterai dan superkapasitor diperlukan sebagai kontrol tegangan daya keluaran. Baterai mempunyai kerapatan energi yang tinggi sehingga cocok untuk menerima dan memberikan daya dengan frekuensi rendah sedangkan superkapasitor memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi dibandingkan dengan baterai sehingga cocok untuk menerima dan memberikan daya dengan frekuensi tinggi. HESS akan mengalami pengisian dan pelepasan daya agar selalu sesuai dengan nilai P_d . Metode Kolmogorov-Smirnov digunakan sebagai metode uji normalitas dan *Kernel Smoothing Density Estimation* sebagai uji non parametrik untuk menghitung kapasitas daya pada masing masing baterai dan superkapasitor dengan mempertimbangkan hasil uji statistik dimana menjadi tujuan pada Tugas Akhir ini.

Kata kunci: *Sistem Penyimpan Energi Hibrida, Baterai, Energi Angin, Superkapasitor.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

PROBABILITY USES FOR BATTERY – SUPERCAPACITOR HYBRID SYSTEM’S POWER CAPACITY SIZING ON WIND TURBINE

Student Name : Irfan Reza Wahyudi
Supervisor I : Vita Lystianingrum B. P, ST., M.Sc., Ph. D.
supervisor II : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Abstract:

Renewable energy has become the important part of nowadays energy development. In the future, eco-friendly energy source will be the main focus compared with conventional energy sources such as gas and oil. As one of the renewable energy sources, wind energy has enormous potential to use. The data of wind in Sukomoro is the real data that use in this thesis. The observation is held on a period of time with certain interval. The wind will catch by the wind turbine then it will be changed from kinetic energy to electrical energy. Permanent Magnet Synchronous Generator has self excitation ability that makes the generator can operates in the high power factor and efficiency. The main problem of wind turbine is wind velocity fluctuation that caused the output result is changing depends on the input. Therefore, a storage system called Hybrid Energy Storage System (HESS) consist of Lithium-Ion battery and supercapacitor which is needed for output power voltage control. The battery, that has high energy density, will be able to receive and give the power with low frequency and the supercapacitor, with high density power, can receive and give power with high frequency. HESS will be charging when the wind blows hard and the generated power is large and discharging when the power is low. Kolmogorov-Smirnov method is used as normality test method and *Kernel Smoothing Density Estimation* (KSDE) as non parametric test so the selection of power capacity on HESS can be appropriate and the battery usage can set as minimal as possible and the hybrid energy storage system can be more efficient in both function and maximum usage life span which is become the main purpose of this thesis.

Key Word: *Hybrid Energy Storage System, Battery, Wind Energy, Supercapacitors,*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT. Hari ini begitu membahagiakan karena rasa syukur yang terus menerus dipanjatkan. Berada pada titik penentuan perjalanan yang tidak mudah, penuh masalah serta cobaan. Tugas Akhir yang berjudul “Penentuan Kapasitas Daya Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Pada Turbin Angin Dengan Probabilitas” akhirnya dapat diselesaikan dengan baik berkat dukungan serta doa yang tidak akan pernah mampu dihitung. Semoga kebaikan selalu menyertai kita semua.

Tugas Akhir ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan kewajiban selama menempuh pendidikan jenjang Sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Banyak pihak yang membantu selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini, selaku penulis saya ucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Kedua Orang Tua, Nyonya Asteria dan Tuan Hery Wahyudi atas doa, dukungan serta kepercayaan yang diamanahkan selama ini. Menjadi tempat untuk mencari kemudahan dan pintu terkabulnya doa penulis.
2. Ibu Vita Listyaningrum dan Bapak Ardyono Priyadi selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk berbagi ilmu dan keluh kesah selama proses pengerjaan.
3. Para sahabat saya, Funtastic4 untuk bertukar pikiran dan doa.
4. Segenap kawan badminton yang telah duluan lulus, yang senantiasa menjadi partner untuk pola hidup sehat.
5. Rusdy Saleh, Rizka Prambudi, Deny Andika Prasetya, Saiful Anshoruddin dan Aditya Setiadi Putra, para Sahabat Superkapasitor yang selalu menjadi teman diskusi dan sepejuangan. Tidak mudah namun akhirnya kita bisa. Dan Lexy Akbar serta Octavian Nur F atas masukan dan diskusinya.
6. Restu Wicaksono dan M. Thoriq Aziz yang selalu ada baik suka maupun duka
7. Mas Purwanto yang menjadikan bursa tempat yang nyaman untuk singgah. Terima kasih jajan bursa dan motivasinya

8. Keluarga besar e54 yang menjadi tempat untuk merajut cerita tak terlupakan, menorehkan kenangan dan pengingat untuk segera lulus dan pergi dari ITS tercinta ini.
9. Seluruh dosen serta dosen karyawan yang telah membantu memfasilitasi segala kegiatan perkuliahan selama ini.

Akhir kata, tiada gading yang tak retak dan begitu pula Tugas Akhir yang penulis kerjakan. Semoga buku ini kelak dapat menebar manfaat dalam bentuk apapun. Segala kritik dan saran yang membangun tentu penulis harapkan. Terima kasih.

Surabaya, Maret 2019

Irfan Reza Wahyudi
0711144000190

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
1.7 Relevansi.....	3
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Mengenai Penentuan Daya HESS	5
2.2 Turbin Angin.....	6
2.2.1 Permodelan Turbin Angin	6
2.3 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	7
2.4 Uji Normalitas Data	8
2.5 Kernel Smoothing Density Estimation (KSDE).....	10
2.5.1 Fungsi Kepadatan Probabilitas	11
2.5.2 Fungsi Distribusi Kumulatif	12
2.6 Penyimpanan Energi Hibrida	12
2.6.1 Pemilihan Dispatch Level.....	15
BAB 3 PERMODELAN SISTEM KONVERSI ANGIN DAN DISTRIBUSI DATA	17
3.1 Topologi Sistem	17
3.2 Spesifikasi Turbin Angin	17
3.3 Estimasi Daya	20
3.3.1 Daya Turbin Angin.....	21
3.3.2 Power Dispatch.....	22
3.4 Model Pengujian Data.....	23
3.5 Estimasi Kapasitas HESS.....	24
3.5.1 Daya HESS Maksimal	25

3.5.2	<i>Kernel Smoothing Density Estimation</i>	27
3.5.3	Penentuan Daya Baterai dan Superkapasitor	27
3.6	Menentukan P_d Optimal	29
BAB 4	HASIL SIMULASI DAN ANALISA	31
4.1	Penentuan Nilai P_{ESS} Turbin Angin 10 kW	32
4.1.1	Penentuan P_d Optimum	32
4.1.2	Kurva <i>Cost Benefit</i>	36
4.2	Penentuan Nilai P_{ESS} Turbin Angin 20 kW	38
4.2.1	Penentuan P_d Optimum	38
4.2.2	Kurva <i>Cost Benefit</i>	42
4.3	P_d Optimum Dengan Turbin Angin 30 kW	43
4.3.1	Penentuan P_d Optimum	44
4.3.2	Kurva <i>Cost Benefit</i>	48
4.4	P_d optimum dengan turbin angin 50 kW	49
4.4.1	Penentuan P_d Optimum	50
4.4.2	Kurva <i>Cost Benefit</i>	53
4.5	Perbandingan P_{ESS} Antar Turbin	55
BAB 5	KESIMPULAN	57
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
	DAFTAR PUSTAKA	59
	BIODATA PENULIS	61

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2. 1. KURVA DISTRIBUSI NORMAL	11
GAMBAR 2. 2. FUNGSI DISTRIBUSI KUMULATIF	12
GAMBAR 2. 3. RAGONE PLOT PENYIMPAN DAYA	14
GAMBAR 2. 4 PERMODELAN TURBIN ANGIN	15
GAMBAR 3.1. PROFIL KECEPATAN ANGIN	21
GAMBAR 3. 2. KURVA P_w	22
GAMBAR 3. 3. <i>POWER DISPATCH</i> DARI TURBIN ANGIN	23
GAMBAR 3. 4. PENGUJIAN DATA DENGAN PERANGKAT LUNAK STATISTIK.....	24
GAMBAR 3. 5. UJI NORMALITAS DATA DENGAN PERANGKAT LUNAK STATISTIK.....	24
GAMBAR 3. 7. KURVA <i>CHARGING</i> DAN <i>DISCHARGING</i> HESS.	25
GAMBAR 3. 8. NILAI ABSOLUTE P_{ESS}	26
GAMBAR 3. 9. HISTOGRAM P_{ESS}	26
GAMBAR 3. 10. GRAFIK KSDE DARI P_{ESS}	27
GAMBAR 3. 11. KURVA DISTRIBUSI KUMULATIF DARI P_{ESS} ..	28
GAMBAR 3. 12. KURVA DISTRIBUSI KUMULATIF P_{ESS}	28
GAMBAR 4. 1. P_w TURBIN ANGIN 10 KW	33
GAMBAR 4. 2. P_D 6 KW DENGAN TURBIN ANGIN 10 KW	33
GAMBAR 4. 3. P_{ESS} DENGAN P_D 6 KW	34
GAMBAR 4. 4. SEBARAN DATA P_{ESS}	35
GAMBAR 4. 5. SEBARAN DATA P_{ESS} DENGAN METODE KSDE	35
GAMBAR 4. 6. KURVA <i>COST-BENEFIT</i> TURBIN ANGIN 10 KW	37
GAMBAR 4. 7. P_w TURBIN ANGIN 20 KW	39
GAMBAR 4. 8. P_D 7.5 KW DENGAN TURBIN ANGIN 20 KW	39
GAMBAR 4. 9. P_{ESS} DENGAN P_D 7.5 KW	40
GAMBAR 4. 10. SEBARAN DATA P_{ESS}	41
GAMBAR 4. 11. SEBARAN DATA P_{ESS} DENGAN METODE KSDE	41
GAMBAR 4. 12. KURVA <i>COST-BENEFIT</i> TURBIN ANGIN 20 KW	43
GAMBAR 4. 13. P_w TURBIN ANGIN 30 KW.....	44

GAMBAR 4. 14.	P_D 6 KW DENGAN TURBIN ANGIN 30 KW	45
GAMBAR 4. 15.	P_{ESS} DENGAN P_D 10 KW	45
GAMBAR 4. 16.	SEBARAN DATA P_{ESS}	46
GAMBAR 4. 17.	SEBARAN DATA P_{ESS} DENGAN KSDE.....	47
GAMBAR 4. 18.	KURVA <i>COST-BENEFIT</i> TURBIN ANGIN 30 KW	49
GAMBAR 4. 19.	P_W TURBIN ANGIN 50 KW	50
GAMBAR 4. 20.	P_D 16 KW DENGAN TURBIN ANGIN 50 KW	51
GAMBAR 4. 21.	P_{ESS} DENGAN P_D 16 KW	51
GAMBAR 4. 22.	SEBARAN DATA P_{ESS} DENGAN METODE KSDE	52
GAMBAR 4. 23.	SEBARAN DATA P_{ESS}	52
GAMBAR 4. 24.	KURVA <i>COST-BENEFIT</i> TURBIN ANGIN 50 KW	54

DAFTAR TABEL

TABEL 2. 1. TABEL KOLMOGOROV - SMIRNOV	10
TABEL 3. 1. SPESIFIKASI TURBIN ANGIN 10 KW[16].	18
TABEL 3. 2. SPESIFIKASI TURBIN ANGIN 20 KW[17].	19
TABEL 3. 3. SPESIFIKASI TURBIN ANGIN 30 KW[18].	19
TABEL 3. 4. SPESIFIKASI TURBIN ANGIN 50 KW[19].	20
TABEL 4. 1. P_{ESS} BERDASARKAN P_D PADA TURBIN ANGIN 10 KW	35
TABEL 4. 2. PEMILIHAN P_D OPTIMUM UNTUK TURBIN ANGIN10 KW	37
TABEL 4. 3. P_{ESS} BERDASARKAN P_D PADA TURBIN ANGIN 10 KW	41
TABEL 4. 4. PEMILIHAN P_D OPTIMUM UNTUK TURBIN ANGIN 20 KW	42
TABEL 4. 5. P_{ESS} BERDASARKAN P_D PADA TURBIN ANGIN 30 KW	48
TABEL 4. 6. PEMILIHAN P_D OPTIMUM UNTUK TURBIN ANGIN 30 KW	48
TABEL 4. 7. P_{ESS} BERDASARKAN P_D PADA TURBIN ANGIN 50 KW	53
TABEL 4. 8. PEMILIHAN PD OPTIMUM UNTUK TURBIN ANGIN 50 KW	54

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi dan kebutuhan manusia semakin bertambah seiring dengan berjalannya waktu. Berbagai penemuan dan riset dilakukan untuk memperbarui teknologi yang sudah ada untuk melayani kebutuhan sehari-hari baik skala kecil maupun industri. Hal ini berbanding terbalik dengan ketersediaan bahan bakar pembangkitan tenaga listrik seperti minyak bumi dan batu bara[1]. Dibutuhkan pembangkitan tenaga listrik yang ramah lingkungan menggunakan energi baru dan terbarukan. Sistem konversi angin (PLTB) mempunyai potensi yang besar untuk dapat dikembangkan. Namun energi listrik yang terbangkitkan tidak stabil karena sangat bergantung pada kecepatan angin yang fluktuatif. Tentu hal ini tidak baik bila terhubung secara interkoneksi dengan jala-jala. Oleh karena itu, penggunaan sistem penyimpanan energi dapat dipertimbangkan.

Sistem penyimpanan energi yang handal dibutuhkan dalam mengatasi fluktuasi energi yang terbangkitkan turbin angin. Sistem penyimpanan energi hibrida atau *Hybrid Energy Storage System* (HESS) adalah sistem penyimpanan energi yang terdiri dari baterai dengan superkapasitor dimana karakteristik keduanya yang saling melengkapi sehingga mampu memberikan keluaran yang stabil[2].

Pada penelitian sebelumnya, baterai digunakan dalam mengatasi fluktuasi sistem konversi angin sehingga baterai *overdesigned* dan tidak maksimal. Baterai mempunyai kerapatan energi yang tinggi dan mampu untuk mengakomodasi fluktuasi energi dengan frekuensi rendah sedangkan superkapasitor mempunyai kerapatan energi yang lebih rendah [3]. Dengan pembagian daya yang baik maka penggunaan sistem penyimpanan energi hibrida dapat maksimal begitupun dengan umur penggunaannya.

Dalam Tugas Akhir ini dibahas juga mengenai *power dispatch* yaitu daya yang disalurkan pada jala-jala. Pendekatan probabilitas akan digunakan untuk menentukan kapasitas daya dari sistem penyimpanan energi hibrida. Pada umumnya, distribusi kecepatan angin dimodelkan dengan menggunakan metode distribusi *Weibull* namun pendekatannya kurang maksimal sehingga metode lain dipertimbangkan dalam perhitungan ini. Metode perhitungan dengan Kolmogorov-Smirnov digunakan untuk menguji normalitas data dan metode *Kernel Smoothing*

Density Estimation (KSDE) digunakan sebagai metode uji non parametrik untuk menggambarkan fungsi kepadatan probabilitas (PDF) dari daya HESS dengan menentukan *confidence level* untuk pemilihan *Dispatch Power* yang tepat sehingga didapatkan efisiensi yang paling maksimal[4].

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh kecepatan angin dalam menentukan kapasitas daya sistem penyimpanan energi hibrida?
2. Bagaimana pengaruh pemilihan level *power dispatch* terhadap penentuan kapasitas daya pada HESS?

1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Menghitung pengaruh kecepatan angin dalam menentukan spesifikasi kapasitas daya baterai dan superkapasitor (HESS).
2. Menghitung pengaruh nilai *power dispatch* untuk mendapat kapasitas daya HESS yang optimal.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Perhitungan data angin menggunakan Microsoft Excel versi Office Professional Plus 2016
2. Pengolahan data dan uji normalitas menggunakan perangkat lunak statisik.
3. Fungsi kerapatan daya dan fungsi kepadatan kumulatif disimulasikan dengan menggunakan Matlab
4. Asumsi-asumsi yang berhubungan dengan metode penentuan kapasitas daya berdasarkan probabilitas ini akan dibahas pada bab 3 dan 4.
5. Tidak mempertimbangkan jenis baterai dan superkapasitor

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Mempelajari dan memperdalam pemahaman tentang turbin angin, *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG), superkapasitor, baterai, HESS dan penentuan P_d optimal dan mengumpulkan *paper*, jurnal dan informasi terkait lainnya.

2. Pengumpulan Data

Data yang akan digunakan pada Tugas Akhir ini adalah data asli dari kecamatan Sukomoro di kabupaten Nganjuk. Data yang diobservasi berupa kecepatan angin, temperature, kelembapan, tekanan dan arah angin.

3. Pengolahan Data dan Simulasi

Tahapan ini terdiri dari 2 bagian dimana pengolahan data dilakukan dengan Microsoft Excel dan uji statistic

4. Analisis Data dan Hasil Simulasi

Berisikan mengenai hasil uji statistic dan kapasitas daya pada harga *Dispatch Power* tertentu serta *Cost – Benefit Curve*.

5. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir

Bagian ini membahas mengenai bagian akhir pada Tugas Akhir ini.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1 adalah pendahuluan yang terdiri dari latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah dan metodologi serta sistematika penulisan
2. BAB 2 adalah kajian pustaka dan dasar teori yang berisikan tentang penjelasan mengenai setiap bagian dari turbin angin dan HESS yang terdiri dari superkapasitor dan baterai.
3. BAB 3 membahas mengenai metode uji statistik data angin dan perhitungan probabilitas untuk *sizing* HESS
4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data berupa hasil uji normalitas dan penentuan *sizing* berdasarkan nilai P_d beserta *Cost – Benefit Curve*.
5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi referensi dasar dan pertimbangan dalam memilih turbin energi angin dan merancang

kapasitas daya pada HESS sesuai dengan kondisi asli lapangan (*plant*) dengan menggunakan ilmu statistic dan probabilitas sehingga nantinya Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat secara nyata.

BAB 2

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan mengenai teori dan penjelasan dari hal yang berhubungan dengan topik Tugas Akhir ini yaitu penentuan kapasitas daya HESS pada turbin angin.

Paper dan penelitian yang berkaitan akan dibahas lebih dalam diantaranya mengenai karakteristik turbin angin, PMSG serta metode uji statistic yang terdiri dari uji normalitas data pada daya HESS, uji non parametrik KSDE serta teknologi baterai dan superkapasitor. Masing masing bagian akan dijelaskan secara rinci berdasarkan penelitian yang dijadikan acuan serta referensi.

2.1 Penelitian Mengenai Penentuan Daya HESS

Sistem penyimpanan energi hibrida (HESS) merupakan topik yang erat kaitannya dengan *renewable energy*. HESS sebagai media penyimpanan yang menjembatani antara kebutuhan dan ketersediaan. Hal ini jelas karena sumber energi terbarukan berasal dari alam dimana tidak ada yang mampu mengatur sumber energi tersebut. Dengan potensi yang melimpah dan tidak disertai dengan kontinuitas atas ketersediaan maka dilakukan banyak penelitian mengenai media penyimpanan energi dengan metode yang berbagai macam dan salah satunya menggunakan probabilitas.

Dalam penelitiannya, Howladder dkk[5] melihat potensi angin yang besar yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan energi listrik sehingga diperlukan turbin angin yang memiliki generator berefisien tinggi dan PMSG mempunyai beberapa keunggulan dibanding generator lainnya. Penyimpanan energi menjadi fokus utama untuk mengakomodasi fluktuasi angin dengan cara menentukan kapasitas dayanya melalui probabilitas sehingga pada penelitiannya, Domínguez-Navarro dkk[6], dengan menggunakan probabilitas dengan menentukan derajat keyakinan untuk menentukan kapasitas baterai dan superkapasitor dari penyimpanan energi hibrida.

Sistem penyimpanan energi hibrida juga diteliti oleh Babazadeh dkk[3], dengan memfokuskan penelitian pada kapasitas daya superkapasitornya sedangkan Tatsuo Horiba[7], juga meneliti mengenai baterai khususnya Lithium Ion secara komprehensif dimana *paper*nya menjadi *invited paper* dalam *proceeding of IEEE*.

Dalam akhir penelitiannya, Eduard Muljadi dkk[4] juga menyertakan analisa ekonomi untuk membuktikan pentingnya menentukan daya HESS dalam sistem konversi angin.

2.2 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang merubah energi kinetik menjadi energi listrik. Turbin angin pada awal ditemukan digunakan sebagai alat kincir angin sederhana yang berfungsi sebagai pompa air dan penggiling gandum atau lebih dikenal dengan istilah *windmill*. Lalu seiring berkembangnya zaman, turbin angin dikembangkan menjadi lebih kompleks dan pada akhirnya digunakan sebagai pembangkit listrik.

Energi kinetik didapatkan dari angin yang memutar bilah turbin. Kemudian energi kinetik yang berupa putaran bilah turbin akan dikonversikan menjadi energi listrik. Turbin angin mempunyai sensor arah angin yang berupa *power electronic* yang terhubung dengan *yaw motor* sehingga mampu menyesuaikan arah angin.

Turbin angin tidak hanya dipasang di darat saja melainkan juga di laut/*offshore*. Masalah turbin angin *onshore* adalah lahannya yang sulit didapat dan kecepatan angin di laut yang lebih cepat menjadi pertimbangan tersendiri. Berdasarkan jenisnya, turbin angin dibagi menjadi 2 jenis yaitu turbin angin sumbu horizontal (TASH) dan turbin angin sumbu vertikal (TASV)[8].

2.2.1 Permodelan Turbin Angin

Turbin angin dapat bekerja apabila bilah turbin dapat menangkap angin yang nantinya akan dirubah dari energi kinetik menjadi listrik. Daya angin (P_w) adalah daya yang mampu dibangkitkan oleh turbin angin dimana dapat dihitung melalui persamaan:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (2.1)$$

dimana :

ρ	: kerapatan udara (kg/m^3)
A	: luas sapuan <i>blade</i> turbin angin (m^2)
V_w	: kecepatan angin (m/s)

Pada persamaan di atas maka dapat diketahui bahwa daya yang terbangkitkan dipengaruhi oleh banyak faktor namun kecepatan angin mempunyai dampak besar pada daya keluaran. Hal ini perlu menjadi perhatian khusus karena karakteristik kecepatan angin yang mudah sekali berubah.

Perlu diperhatikan juga mengenai tingkat efisiensi dari suatu peralatan. Setiap peralatan mempunyai tingkat efisiensi yang berbeda atau dalam turbin angin hal ini *Power Coefficient* atau C_p . Setiap turbin dapat berbeda nilai C_p antara satu dengan lainnya. Nilai C_p sendiri dapat dihitung atau bisa langsung didapatkan melalui *datasheet* yang dibuat oleh pihak *manufacturer* turbin anginnya. Dengan mengetahui *datasheet* turbin angin tersebut maka daya keluaran turbin angin dapat dihitung dengan akurat.

2.3 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Pada sistem kelistrikan, pembangkitan merupakan bagian penting dimana daya listrik didapatkan dengan merubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator merupakan alat untuk merubah energi mekanik menjadi energi listrik Oleh karena itu, generator terus dikembangkan untuk mendapatkan efisiensi yang maksimal.

Permanent Magnet Synchronous Generator merupakan generator sinkron yang medan eksitasinya didapatkan dari magnet permanen sehingga tidak membutuhkan arus DC dari sumber eksternal. Kecepatan putar PMSG diatur oleh Pulse Width Modulator (PWM) converter dan keluarannya terhubung dengan converter serta inverter yang terhubung pada jala jala[5]. PMSG mampu menyediakan efisiensi tinggi dan struktur yang relative sederhana. Beberapa kelebihan PMSG diantaranya[9]:

- 1) Pemeliharaan lebih mudah dan murah dibanding generator lain karena tidak mempunyai *gearbox*.
- 2) Memiliki *lifetime* dan keandalan yang tinggi karena tidak mempunyai *bearing* dan *gear*
- 3) Tidak butuh arus eksternal untuk eksitasi karena medan eksitasinya berasal dari permanen magnetnya sendiri
- 4) Ringan dan struktur nya yang simple
- 5) Efisiensi tinggi

Beberapa kelemahan PMSG diantaranya:

- 1) Biaya bahannya masih mahal
- 2) Penghilangan medan magnet sulit, harus menggunakan suhu tinggi
- 3) Diameter *direct drive* PMSG yang lebih lebar dari SCIG konvensional
- 4) Tingkat kematangan rendah karena tergolong teknologi baru

- 5) Sangat bergantung pada elektronika daya

2.4 Uji Normalitas Data

Data merupakan fakta atau nilai yang dapat berupa kuantitatif dan kualitatif untuk selanjutnya dianalisa. Data diperlukan untuk selanjutnya diolah secara statistic. Mengetahui tipe data sangat penting agar pemilihan metode pengolahan data dapat ditentukan dengan tepat[10]. Data sendiri dibagi menjadi 2 tipe data, diantaranya:

- 1) Kategorikal

Data kategorikal merepresentasikan karakteristik data. Data kategorikal disebut juga data kualitatif. Menurut jenisnya data kategorikal dibagi menjadi 2, yaitu:

- 1) Nominal

Data nominal adalah data diskrit yang hanya digunakan sebagai *labeling* saja.

- 2) Ordinal

Data ordinal memiliki karakteristik data kategorikal dan numerical. Data ordinal hampir mirip dengan data nominal namun yang membedakan keduanya adalah data ordinal memperhatikan urutan sedangkan nominal tidak.

- 2) Numerikal

Data numerik adalah data yang mengandung unsur pengukuran. Data numerik disebut dengan istilah data kuantitatif. Data numerik dibagi menjadi 2 jenis data, diantaranya:

- 1) Diskrit

Data diskrit adalah data yang nilainya saling terpisah satu dengan lainnya. Data diskrit bisa dihitung namun tidak bisa diukur

- 2) Kontinu

Data kontinu adalah data yang tidak bisa dihitung namun bisa diukur. Data kontinu dibagi menjadi 2 bagian yaitu:

- 1) Interval

Data interval adalah data berurut yang mempunyai selisih yang sama antara data satu dengan lainnya.

- 2) Rasio

Data rasio hampir sama dengan interval hanya saja data rasio memiliki nilai 0 sebagai nilai mutlak.

Distribusi data mempunyai banyak model distribusi probabilitas. Beberapa diantaranya distribusi binomial, distribusi Poisson, distribusi Multinomial, distribusi Hipergeometri, distribusi Weibull, distribusi Pascal, distribusi normal dan masih banyak juga distribusi lainnya.

Uji normalitas adalah sebuah metode uji yang digunakan pada sebuah kelompok data atau variable untuk mencari distribusi datanya apakah berasal dari populasi normal atau tidak[10]. Data yang berasal dari populasi normal akan memiliki distribusi data yang normal atau disebut juga distribusi *Gaussian*. Oleh karena itu, uji normalitas mempunyai peran yang sangat penting untuk menentukan cara mengolah data yang tepat dengan menggunakan metode statistic.

Data yang bisa dikatakan berdistribusi normal adalah data yang memenuhi asumsi yang berupa parameter distribusi data normal. Jika parameter normalitas data tidak terpenuhi maka data tersebut dapat dikatakan mempunyai distribusi data tidak normal. Jika data tidak normal maka dapat digunakan uji non parametrik. Fungsi kepadatan distribusi normal dapat diketahui dengan persamaan:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (2.6)$$

Dimana x : data
 μ : rata-rata (*mean*)
 σ : deviasi standar (*standard deviation*)

Uji normalitas sendiri mempunyai beberapa metode uji dimana setiap metode mempunyai cara pengujian yang berbeda antara satu dengan lainnya. Beberapa metode uji diantaranya adalah Chi-Square, Liliefors, Shapiro Wilk, Jarque Bera, Kolmogorov-Smirnov (KS) dan lainnya. Metode Kosmolgorov-Smirnov merupakan salah satu metode uji pada suatu data untuk mengetahui distribusi data tersebut dengan menggunakan tabel pembanding Kosmolgorov Smirnov. Syarat uji KS yaitu data harus berupa data rasio atau interval. Signifikansi uji Kolmogorov-Smirnov dapat dihitung melalui tabel yang didapatkan dengan persamaan:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.8)$$

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (2.9)$$

$$D_{tabel} = \frac{1.36}{\sqrt{n}} \quad (2.10)$$

Tabel 2. 1. Tabel Kolmogorov - Smirnov

x	Frekuensi	Kumulatif	$S_n(x)$	Z	$F(x)$	Selisih

Dimana \bar{x} : rata-rata (*mean*)
 Z : nilai yang distandarisasi
 $S_n(x)$: luas daerah pada kurva
 $F(x)$: nilai distribusi normal Z
Selisih: nilai absolut $F(x) - S_n(x)$
 D_{hitung} : nilai selisih paling tinggi
 n : banyaknya data

Pada uji normalitas Kolmogorov-Smirnov, asumsi hipotesis data terdistribusi normal dapat diterima dan hipotesis data tidak terdistribusi normal ditolak apabila memenuhi kondisi berikut:

$$D_{tabel} > D_{hitung} \quad (2.11)$$

2.5 Kernel Smoothing Density Estimation (KSDE)

Kernel Smoothing Density Estimation atau KSDE adalah sebuah tes/uji non parametrik dari sebuah variable acak digunakan untuk memberikan efek *smooth* pada kurva distribusi sebuah data. KSDE sendiri mempunyai beberapa fungsi *smoothing* dalam membuat kurva fungsi kepadatan probabilitas atau *probability density function* (PDF) dan analisa data (*quantiles* dan *percentiles*). Dalam mengolah sebuah data, bentuk kurva dari KSDE sangat bergantung pada nilai parameter K atau fungsi *Kernel* dimana setiap fungsi *Kernel* mempunyai beberapa metode diantaranya adalah *Gaussian*, *Rectangular*, *Triangular*, *Biweight*, *Uniform* dan masih banyak metode lainnya. Setiap metode nantinya mempunyai hasil keluaran yang berbeda satu dengan lainnya. *Smoothing function* sendiri akan mempengaruhi bentuk kurva. Fungsi KSDE dapat dilihat pada persamaan:

$$F_{(x;h)} = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K \left\{ \frac{(x - X_i)}{h} \right\} \quad (2.12)$$

Dimana x_i : sampel variable acak

n : banyaknya sampel
 K : fungsi *Kernel*
 h : *bandwidth*

Selain fungsi *Kernel* K , tingkat *smooth* dalam kurva bergantung pada nilai *bandwidth*. Parameter *bandwidth* ini juga akan mempengaruhi bentuk kurva. Parameter ini disebut juga *tuning parameter*.

2.5.1 Fungsi Kepadatan Probabilitas

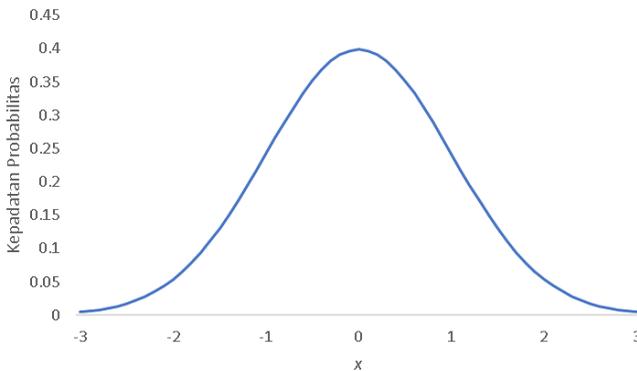
Fungsi kepadatan probabilitas/*probability density function* (PDF) adalah kedalaman dari suatu nilai probabilitas dari setiap kejadian dalam variable acak kontinu x dan dinotasikan dalam bentuk matematika $f(x)$. Fungsi distribusi probabilitas disebut juga distribusi probabilitas[11] dari setiap variable acak x . Total penjumlahan semua probabilitas akan sama dengan 1 dan probabilitas pada suatu interval tertentu merupakan total penambahan semua nilai probabilitas di interval tersebut.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \quad -\infty < x < \infty \quad (2.13)$$

$$P(x=a) = 0 \quad (2.14)$$

$$P(x \geq a) = P(x > a) \quad (2.15)$$

$$P(x \leq a) = P(x < a) \quad (2.16)$$



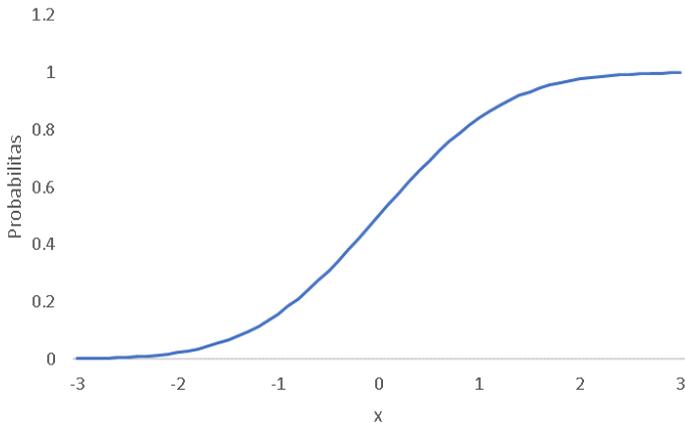
Gambar 2. 1. Kurva distribusi normal

2.5.2 Fungsi Distribusi Kumulatif

Fungsi distribusi kumulatif atau *Cumulative Distribution Function* adalah fungsi peluang atau probabilitas dari variable acak kontinu X untuk kurang dari atau sama dengan x [11]. Untuk dapat mengetahui nilai atau peluang probabilitas dari fungsi distribusi kumulatif maka dapat diketahui melalui persamaan:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)dt \quad -\infty < x < \infty \quad (2.17)$$

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad -\infty < x < \infty \quad (2.18)$$



Gambar 2. 2. Fungsi distribusi kumulatif

2.6 Penyimpanan Energi Hibrida

Keluaran yang stabil merupakan sebuah keharusan baik dalam sistem pembangkitan, transmisi maupun distribusi. Turbin angin adalah pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai masukan untuk selanjutnya dikonversi menjadi energi listrik. Angin mempunyai karakteristik yang fluktuatif sehingga kecepatan angin selalu berubah. Hal ini membuat daya keluaran turbin angin juga fluktuatif sesuai masukannya.

Sistem penyimpan energi merupakan salah satu solusi yang dapat dipertimbangkan untuk menjaga daya tetap stabil. Sistem penyimpan energi ini akan bekerja dengan cara menyimpan

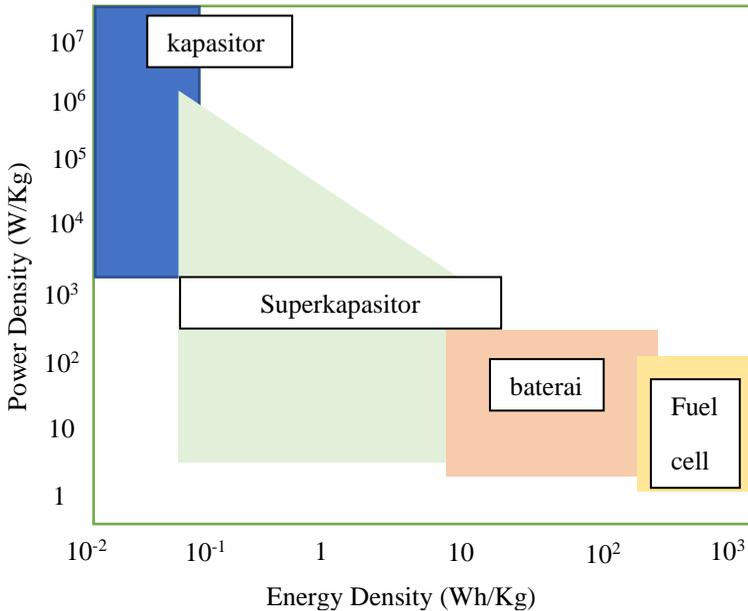
(*charging*) dan menyuplai daya (*discharging*). Sistem penyimpanan energi ini terdiri dari baterai dan superkapasitor yang dipasang secara seri dan paralel sehingga dapat diatur sesuai kemampuan untuk *charging* dan *discharging*, yang merupakan tujuan adanya HESS[12]

HESS ini nantinya akan menyimpan daya ketika daya yang terbangkitkan tinggi karena kecepatan angin yang berhembus kencang dan akan memberi suplai ketika daya yang terbangkitkan lebih rendah dari daya yang harus dikeluarkan (P_d) sehingga daya yang terbangkitkan stabil. Dengan begitu, HESS akan mampu mengatasi permasalahan utama turbin dalam mengakomodasi fluktuasi.

Baterai adalah media penyimpanan energi yang paling umum dijumpai. Baterai digunakan untuk menyimpan dan menyuplai energi melalui proses reduksi dan oksidasi. Baterai memiliki berbagai jenis baterai mulai dari Lead Acid, Nickel Cadmium hingga yang terbaru Lithium Ion. Masing masing baterai memiliki kerapatan energi dan daya yang berbeda namun relative sama[13].

Superkapasitor atau *ultracapacitor* adalah media penyimpanan energi yang hampir sama dengan kapasitor konvensional. Superkapasitor terdiri dari 2 buah plat logam/elektroda (*collector*) dan sebuah isolator sebagai pemisah (*separator*). Kedua permukaan elektroda memiliki luas permukaan yang besar dan ketebalan yang lebih tipis sehingga jarak antar elektroda tereduksi dan berdampak pada tingkat kapasitansi dari superkapasitor menjadi lebih besar.

Superkapasitor tidak membutuhkan proses konversi energi dari senyawa kimia menjadi energi listrik sehingga superkapasitor mempunyai kapasitas daya yang besar. Berbeda dengan baterai dimana baterai membutuhkan proses reaksi oksidasi sehingga baterai mempunyai kerapatan daya yang relative lebih rendah. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada *ragone plot* di gambar 2.3[14].



Gambar 2. 3. Ragone plot penyimpanan daya

Kapasitas daya pada sistem penyimpanan energi hibrida atau selanjutnya disebut *Power HESS* (P_{ESS}) terdiri dari 2 jenis yaitu baterai dan superkapasitor maka untuk menentukan kapasitasnya diperlukan metode yang tepat untuk bisa memilih kapasitas baterai dan kapasitas superkapasitor sesuai dengan karakteristik keduanya. Baterai mempunyai kerapatan energi yang tinggi sehingga mampu mengakomodasi fluktuasi dengan frekuensi yang rendah sedangkan superkapasitor mempunyai kerapatan daya yang tinggi sehingga mampu mengakomodasi fluktuasi dengan frekuensi tinggi. Karena itulah baterai akan dimanfaatkan untuk menerima daya sampai batas tertentu dan sisanya akan diterima oleh superkapasitor. Kapasitas daya pada HESS dapat diketahui melalui persamaan berikut:

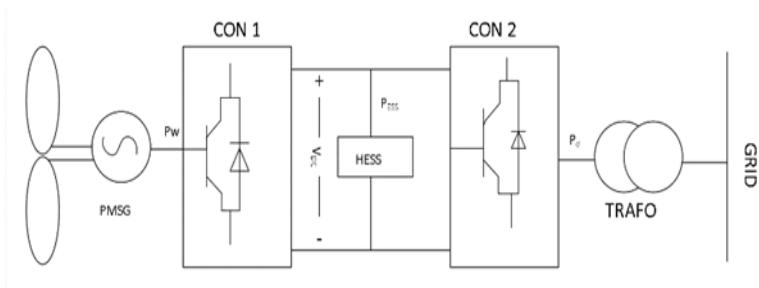
$$P_{ess(t)} = P_{w(t)} - P_d \quad (2.19)$$

Dimana

$P_{ess(t)}$:	Daya dari HESS
$P_{w(t)}$:	Daya turbin angin
P_d :	Daya Dispatch

2.6.1 Pemilihan Dispatch Level

Dispatch Power atau daya *dispatch* adalah daya yang disuplai dari turbin angin kepada jala jala. Daya *dispatch* (P_d) dibangkitkan melalui turbin angin yang nantinya akan menghasilkan P_w melalui sistem konversi angin dengan PMSG. P_w sendiri memiliki karakteristik yang fluktuatif mengikuti masukannya dimana dalam hal ini adalah kecepatan angin sedangkan P_d haruslah konstan atau stabil karena terhubung dengan jala jala yang selanjutnya dapat dilihat dalam gambar 2.7.



Gambar 2. 4 Permodelan turbin angin

Apabila daya yang terhubung dengan jala jala fluktuatif maka akan mengganggu kestabilan dari jala jala sehingga untuk membuat P_d stabil diperlukan sistem penyimpanan energi. Besarnya P_d dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$P_{ess}(t) = P_w(t) - P_d \quad (2.20)$$

Dimana

P_{ess} :	Kapasitas daya HESS
$P_w(t)$:	Daya terbangkit turbin
P_d L:	Daya <i>dispatch</i>

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PERMODELAN SISTEM KONVERSI ANGIN DAN DISTRIBUSI DATA

Pada bab ini akan dibahas mengenai sistem konversi angin mulai dari turbin angin sampai dengan penentuan P_{ESS} . Dengan kecepatan angin yang sama, daya yang terbangkitkan oleh turbin angin bisa berbeda antar 1 dengan lainnya karena kemampuan atau spesifikasi tiap turbin angin berbeda. Dilakukan perhitungan P_w dan uji normalitas terhadap P_{ESS} dengan memperhatikan sebaran data lewat histogram dan metode Kernel Smoothing Density Estimation (KSDE) dan *confidence level*.

3.1 Topologi Sistem

Konsep pembangkitan dengan turbin angin yang terkoneksi jala jala dilihat pada gambar 2.7. Pada skema tersebut, alur pembangkitan secara garis besar dapat dijelaskan sebagai berikut. Energi mekanik turbin angin yang didapat bilah turbin dari angin akan dikonversi menjadi energi listrik melalui PMSG, yang selanjutnya disebut *Wind Power* (P_w). Daya yang terbangkitkan akan masuk pada *back-to-back converter* dan terhubung dengan HESS yang terdiri dari baterai dan superkapasitor. Daya terbangkitkan berdasarkan kecepatan angin yang fluktuatif sehingga HESS akan bekerja dengan cara menyimpan daya (*charging*) ketika P_w besar dan akan menyuplai daya (*discharging*) ketika P_w rendah. Daya yang keluar dari turbin angin dan terhubung dengan jala jala akan menentukan berapa besarnya daya yang harus disuplai turbin angin ke jala jala, selanjutnya disebut *Dispatch Power* (P_d).

3.2 Spesifikasi Turbin Angin

Kemampuan turbin angin untuk mengonversikan energi angin menjadi energi listrik adalah proses penting dalam menentukan P_{ESS} . Beberapa parameter yang mempengaruhi diantaranya adalah luas sapuan rotor, *cut in* dan *cut off*, efisiensi generator, koefisien daya turbin angin dan beberapa parameter lainnya. Setiap turbin angin mempunyai karakteristik dan kemampuan yang berbeda antara satu dengan lainnya. Oleh karena itu, menentukan turbin angin yang sesuai antara spesifikasi turbin dengan kondisi angin perlu dilakukan.

Angin akan memutar bilah turbin yang terhubung dengan generator sehingga terbangkitkan daya turbin angin. Selain itu,

mengetahui profil angin juga akan berpengaruh pada pemilihan turbin angin juga. Pada pemilihannya perlu dipahami juga bahwa tidak pernah bisa turbin angin dimanapun mempunyai efisiensi diatas 59.3% atau lebih dikenal dengan istilah *Betz's Limit*[15].

Sistem konversi angin dilakukan dengan turbin angin dimana turbin angin mempunyai berbagai macam spesifikasi yang berbeda. Turbin yang memiliki daya keluaran sebesar 1 kW akan berbeda dengan turbin yang memiliki daya keluaran 5 kW baik dari segi maksimal *power output*, diameter bilah turbin, efisiensi, kecepatan *cut in*, *cut off* hingga berat turbinnya.

Pada Tugas Akhir berikut akan digunakan 4 jenis turbin angin yang berbeda. Spesifikasi turbin angin yang akan digunakan sebesar 10kW, 20 kW, 30 kW dan 50 kW. Turbin yang berbeda digunakan sebagai komparasi antara 1 dengan lainnya sehingga dapat dilihat turbin angin mana yang akan paling optimal.

Tabel 3. 1. Spesifikasi Turbin Angin 10 kW[16].

Atlantis Solar Wind Turbine	
Rated Power (W)	10,000
Max Power Output (W)	15,000
Battery Bank Voltage (DC)	240
System Output Voltage	110/220/380
Start Up Wind Speed (m/s)	3
Rated Wind Speed (m/s)	10
Working (m/s)	3– 25
Survival (m/s)	50
Generator Efficiency	0.9
Wind Energy Utilizing Ratio (Cp)	0.4
Generator Type	Permanent Magnet Alternator
Generator Weight (kg)	287
Blade Material	GRP/3
Blade Diameter (m)	8
Speed Regulation Method	Yawning + Electromagnetism Braking
Shutting Down Method	Manual + Automatic

Tabel 3. 2. Spesifikasi Turbin Angin 20 kW[17].

Atlantis Solar Wind Turbine	
Rated Power (W)	20,000
Max Power Output (W)	28,000
Battery Bank Voltage (DC)	240
System Output Voltage	220/380
Start Up Wind Speed (m/s)	3
Rated Wind Speed (m/s)	11
Working (m/s)	3– 25
Survival (m/s)	50
Generator Efficiency	0.9
Wind Energy Utilizing Ratio (Cp)	0.4
Generator Type	Permanent Magnet Alternator
Generator Weight (kg)	496
Blade Material	GRP/3
Blade Diameter (m)	9
Speed Regulation Method	Yawning + Electromagnetism Braking
Shutting Down Method	Manual + Automatic

Tabel 3. 3. Spesifikasi Turbin Angin 30 kW[18].

Atlantis Solar Wind Turbine	
Rated Power (W)	30,000
Max Power Output (W)	45,000
Battery Bank Voltage (DC)	360
System Output Voltage	380
Start Up Wind Speed (m/s)	2.5
Rated Wind Speed (m/s)	11
Working (m/s)	3– 25
Survival (m/s)	50
Generator Efficiency	0.95
Wind Energy Utilizing Ratio (Cp)	0.42
Generator Type	Permanent Magnet Alternator
Generator Weight (kg)	680

Atlantis Solar Wind Turbine	
Blade Material	GRP/3
Blade Diameter (m)	10
Speed Regulation Method	Yawning + Electromagnetism Braking
Shutting Down Method	Manual + Automatic

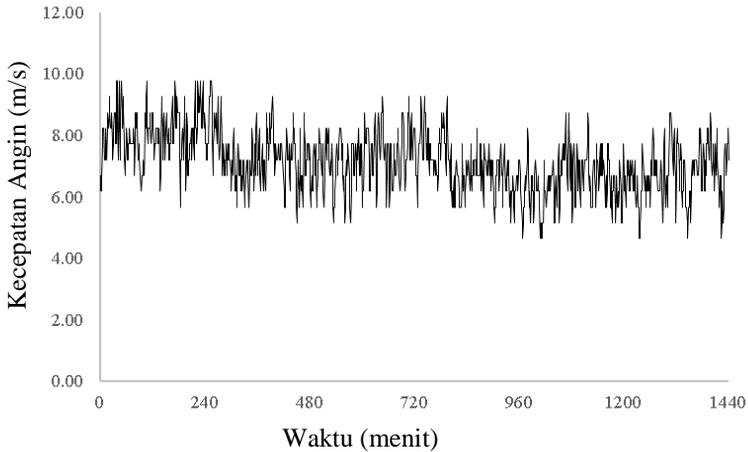
Tabel 3. 4. Spesifikasi Turbin Angin 50 kW[19].

Atlantis Solar Wind Turbine	
Rated Power (W)	50,000
Max Power Output (W)	75,000
Battery Bank Voltage (DC)	400
System Output Voltage	380
Start Up Wind Speed (m/s)	2
Rated Wind Speed (m/s)	11
Working (m/s)	2.5 – 25
Survival (m/s)	50
Generator Efficiency	0.95
Wind Energy Utilizing Ratio (Cp)	0.42
Generator Type	Permanent Magnet Alternator
Generator Weight (kg)	1200
Blade Material	GRP/3
Blade Diameter (m)	12
Speed Regulation Method	Yawning + Electromagnetism Braking
Shutting Down Method	Manual + Automatic

3.3 Estimasi Daya

Kecepatan angin akan menentukan seberapa besar potensi daya yang dapat ditangkap turbin angin untuk nantinya menghasilkan daya keluarannya akan mengikuti besarnya kecepatan angin. Data observasi dan pencatatan kecepatan angin merupakan bagian penting dan harus dilakukan guna mengetahui profil angin pada suatu daerah tertentu. Pada penelitian ini menggunakan data asli selama 24 jam dengan interval 1 menit yang dapat dilihat pada gambar 3.1. Data diasumsikan cukup. Profil

angin pada *site* turbin angin perlu dianalisa sehingga didapatkan karakteristik anginnya.



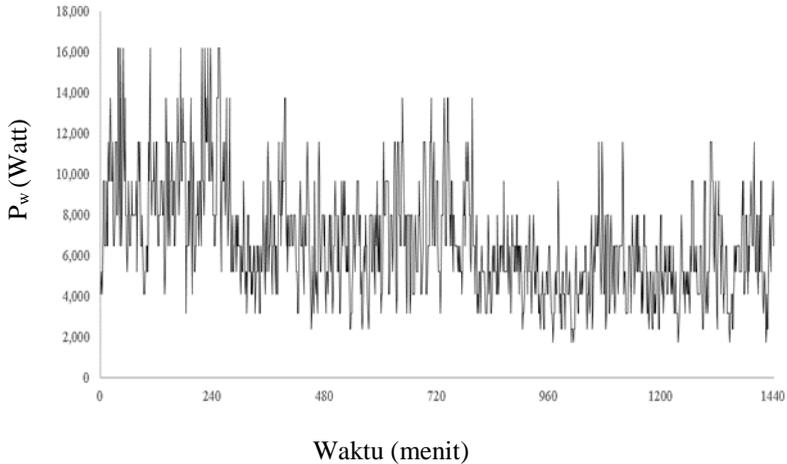
Gambar 3.1. Profil kecepatan angin

3.3.1 Daya Turbin Angin

Mengetahui profil angin sangat penting untuk mengetahui karakteristik angin di suatu daerah sehingga dapat memperkirakan potensi daya yang dapat dibangkitkan. Dengan begitu, langkah selanjutnya dapat dihitung estimasi daya yang mampu dihasilkan berdasarkan profil kecepatan anginnya.

Besarnya P_w juga dipengaruhi oleh *rating* turbin dimana setiap turbin memiliki *rating* yang berbeda. Turbin angin memiliki *power curve* yang diatur oleh produsen turbin angin sehingga mempengaruhi bentuk kurva P_w serta parameter *cut in* dan *cut off* yang dapat dilihat pada *website* resminya [16]–[19].

Data angin pada gambar 3.1 dikonversi menjadi P_w seperti pada gambar 3.2 melalui prinsip kerja turbin angin yang telah dijelaskan pada subbab 2.2 melalui persamaan (2.1) dimana telah dijelaskan secara lengkap. Selain itu pada gambar 2.4 dicantumkan juga topologi yang digunakan pada penelitian ini dan apabila digambarkan dengan bentuk kurva maka dapat dilihat sebagaimana kurva P_w pada gambar 3.2 berikut.



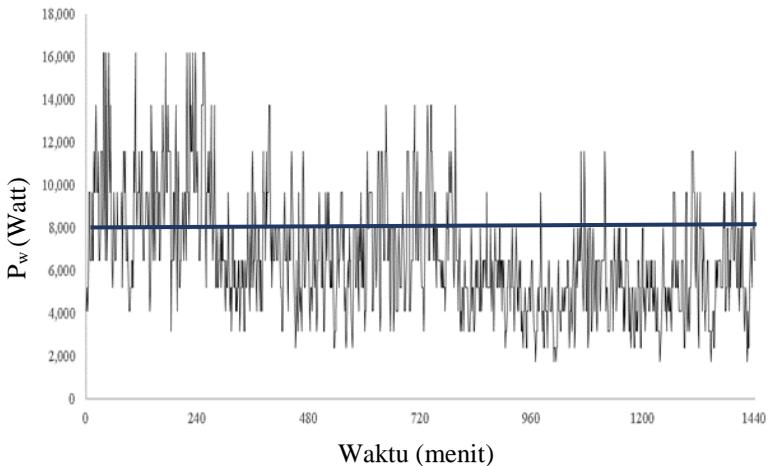
Gambar 3. 2. Kurva P_w

3.3.2 Power Dispatch

Power Dispatch atau P_d merupakan daya keluaran yang harus disuplai oleh turbin angin ke jala jala[20]. Daya keluarannya harus selalu konstan walaupun kecepatan angin selalu berubah ubah. Dengan menentukan P_d yang konstan maka daya pada sistem penyimpan energi (P_{ESS}) akan berubah sesuai dengan P_w . Pemilihan P_d sangat krusial untuk menentukan berapa besar kapasitas daya pada sistem penyimpan energi hibrida.

P_d yang terlalu besar atau kecil akan menyebabkan P_{ESS} tidak maksimal. Apabila P_d yang dipilih tinggi maka saat angin yang berhembus pelan, HESS bekerja dengan cara *discharge* untuk menambah daya sampai dayanya sesuai dengan P_d sehingga P_d akan selalu stabil. Hal ini akan menyebabkan HESS untuk memiliki kapasitas penyimpan daya yang besar sehingga daya yang dibangkitkan ketika daya yang terbangkitkan rendah dapat diatasi. Begitu pula sebaliknya, P_d yang terlalu rendah akan menyebabkan HESS bekerja terus menerus dengan cara *charging* karena daya yang dihasilkan lebih besar dari daya yang di *dispatch* atau *power dispatch*.

P_d digambarkan dengan garis lurus yang memotong fluktuasi daya terbangkit dari turbin angin. Sumbu horizontal x merepresentasikan durasi waktu dalam satuan menit sedangkan sumbu vertikal y merepresenetasikan besarnya daya yang terbangkitkan turbin angin dalam satuan Watt.



Gambar 3. 3. *Power dispatch* dari turbin angin.

3.4 Model Pengujian Data

Setelah mengetahui profi angin yang diperoleh dengan data asli maka selanjutnya dapat dihitung P_w dan menentukan P_d . Penentuan P_d akan berpengaruh pada P_{ESS} dimana jika P_d terlalu besar P_{ESS} juga memiliki kapasitas yang besar dan begitu juga P_d yang terlalu kecil maka P_{ESS} juga akan berkapasitas besar. Oleh karena itu, data ini selanjutnya akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan besarnya P_{ESS} . Data ini akan diuji secara statistic dengan cara uji normalitas. Metode Kosmolgorov-Smirnov akan menjadi metode uji untuk menentukan apakah distribusi datanya merupakan distribusi data normal atau tidak. Bila distribusi datanya memenuhi asumsi parameter data berdistribusi normal maka data akan diolah dengan uji parametrik dan bila tidak memenuhi asumsi parameter data berdistribusi normal maka akan digunakan uji non parametrik. Pada Tugas Akhir ini akan digunakan metode KSDE sebagai metode uji non parametrik.

Descriptive Statistics					
	N	Mean	Std. Deviation	Minimum	Maximum
VAR00001	1441	2126.3609	1818.69666	465.00	10160.00

Gambar 3. 4. Pengujian data dengan perangkat lunak statistik

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
VAR00001		
N		1441
Normal Parameters ^{a, b}	Mean	2126.3609
	Std. Deviation	1818.69666
Most Extreme Differences	Absolute	.237
	Positive	.237
	Negative	-.180
Test Statistic		.237
Asymp. Sig. (2-tailed)		.000 ^c

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

Gambar 3. 5. Uji normalitas data dengan perangkat lunak statistik

Dari uji normalitas Kolmogorov-Smirnov dengan menggunakan perangkat lunak dapat diketahui data tidak berdistribusi normal. Hal ini bisa diketahui pada nilai Asymp. Sig (2-tailed). Distribusi data dapat dikatakan normal pada tes KS menunjukkan persamaan:

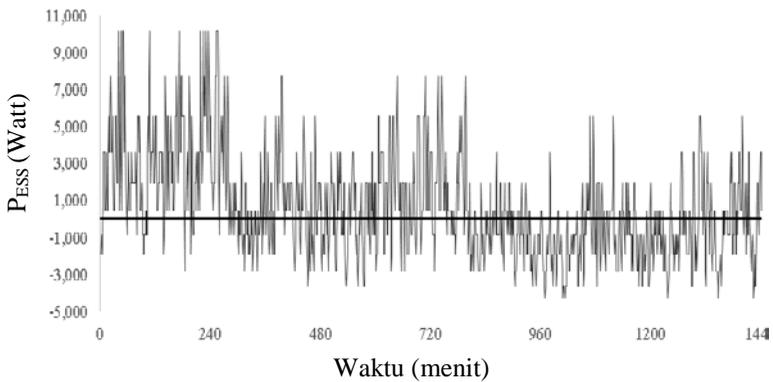
$$\text{Asymp. Sig (2 – tailed)} > 0.05 \quad (3.1)$$

3.5 Estimasi Kapasitas HESS

Fluktuasi daya akan mengakibatkan HESS bekerja untuk menyuplai dan menyimpan daya agar P_d stabil. Bila digambarkan pada kurva maka sumbu P_d akan memotong kurva P_w yang fluktuatif sesuai dengan nilai set P_d . Daya terbangkitkan diatas set P_d akan disimpan pada

HESS sedangkan daya yang terbangkitkan dibawah set P_d akan ditambah oleh HESS.

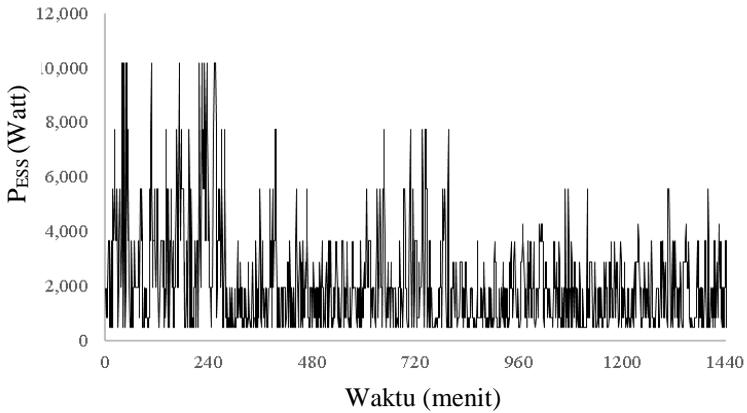
P_{ESS} dapat dilihat melalui Gambar 3.7. Untuk mengetahui P_{ESS} maka perhitungannya perlu diabsolutkan sehingga diketahui berapakah daya yang terbesar baik saat proses *charging* maupun *discharging*. Nilai P_{ESS} positif menunjukkan bahwa HESS mengalami *charging* sedangkan P_{ESS} bernilai negative menunjukkan bahwa HESS mengalami *discharging*.



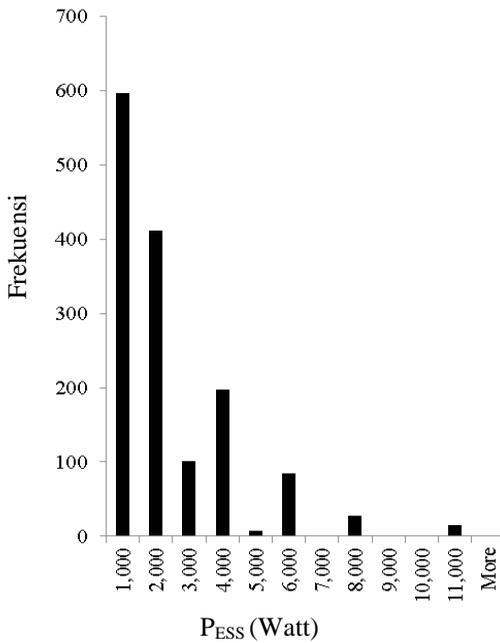
Gambar 3. 6. Kurva *charging* dan *discharging* HESS

3.5.1 Daya HESS Maksimal

Fluktuasi daya angin dapat menyebabkan P_d tidak stabil sehingga untuk dapat menjaga P_d konstan maka P_{ESS} harus mampu menerima atau mengeluarkan daya dalam jumlah besar. Untuk mengetahui fluktuasi daya dari P_{ESS} maka perhitungan P_{ESS} perlu diabsolutkan sehingga diketahui berapakah daya yang terbesar baik dari proses *charging* maupun *discharging*. Dengan mengetahui fluktuasi daya yang terbesar maka penentuan P_{ESS} akan menjadi lebih akurat. Nilai tertinggi dari *charging* maupun *discharging* akan dijadikan acuan fluktuasi tertinggi, dalam kata lain HESS harus mampu mengakomodasi lonjakan daya setinggi daya yang terukur tersebut [4]. Dengan memberi nilai absolut pada P_{ESS} maka bisa digambarkan besarnya P_{ESS} melalui histogram pada gambar 3.9.



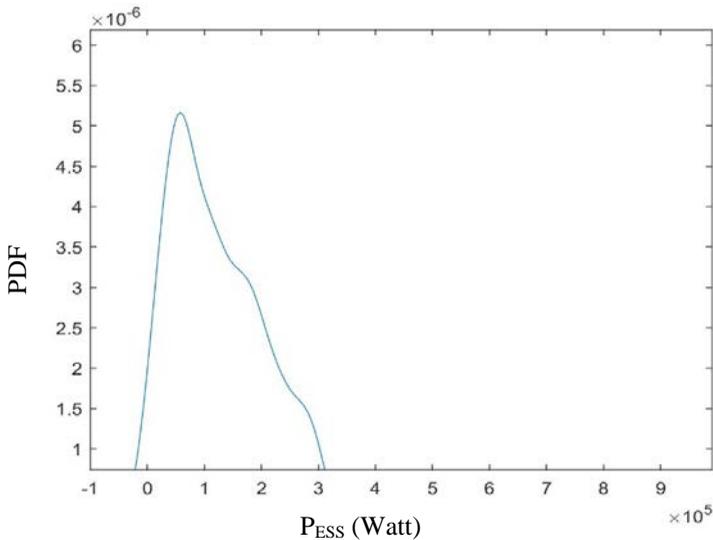
Gambar 3. 7. Nilai absolute P_{ESS}



Gambar 3. 8. Histogram P_{ESS}

3.5.2 *Kernel Smoothing Density Estimation*

Kernel Smoothing Density Estimation (KSDE) adalah metode non parametrik yang digunakan untuk mengestimasi kepadatan probabilitas dari data variabel acak. Dengan menggunakan KSDE maka distribusi dari P_w dapat direfleksikan dengan mengubah *tuning* parameter yang berupa fungsi *Kernel* atau *Kernel estimator*. Pada penelitian ini, KSDE digunakan sebagai metode untuk menghitung estimasi kepadatan probabilitas/*probability density estimation* dari P_{ESS} . PDF adalah fungsi statistik non negatif yang digunakan untuk menghitung variable acak kontinu pada suatu ruang sampel dimana total luas area dibawah kurva PDF bila ditambahkan akan sama dengan 1. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Matlab Statistical Toolbox*.



Gambar 3. 9. Grafik KSDE dari P_{ESS}

3.5.3 *Penentuan Daya Baterai dan Superkapasitor*

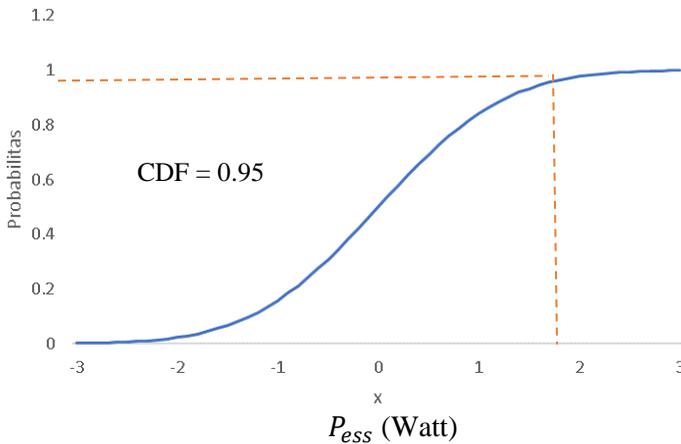
Pembagian daya antara baterai dan superkapasitor akan dilakukan dengan menetapkan *confidence level* atau derajat keyakinan pada kurva distribusi kumulatif (CDF) sebesar 95%. Derajat keyakinan atau sering disebut dengan tingkat signifikansi adalah keputusan untuk

meyakini pada H_0 memiliki persen *error* sebesar sekian persen. Dalam hal ini, *confidence level*, baterai akan mampu memberikan daya walaupun dalam kondisi minimal sekalipun[6]. Pemilihan *confidence level* ini akan berdampak pada penentuan kapasitas baterai. H_0 mengasumsikan baterai akan mampu mengakomodasi P_{ESS} dengan tingkat keyakinan sebesar 95% atau 0.95 dari keseluruhan kapasitas daya P_{ESS} dan *error* atau H_a sebesar 0.05 sisanya akan diakomodasi oleh superkapasitor. Secara matematik, kapasitas daya superkapasitor dapat dihitung melalui persamaan:

$$P_{C,P_d} = \max(|P_{ESS}|) - P_{b,P_d} \quad (3.2)$$

Dimana P_{C,P_d} : Kapasitas daya superkapasitor
 $\max(|P_{ESS}|)$: Nilai maksimum absolut P_{ESS}
 P_{b,P_d} : Kapasitas daya baterai

Pada statistik, pemilihan *confidence level* sebesar 95% umum digunakan dan apabila melihat sebaran data melalui histogram seperti gambar 3.8 maka tingkat signifikansi dapat digambarkan melalui kurva fungsi distribusi kumulatif atau CDF sebagaimana pada gambar 3.11 berikut:



Gambar 3. 11. Kurva distribusi kumulatif P_{ESS}

3.6 Menentukan P_d Optimal

Menentukan P_{ESS} merupakan tujuan utama dari penelitian ini sehingga diperlukan perhitungan untuk menghitung P_w , menentukan P_d dan didapatkan nilai P_{ESS} . Pemilihan nilai P_d akan berdampak pada P_{ESS} dimana nilai P_w akan selalu tetap karena merupakan variable yang independent. Berbeda dengan P_d dan P_w yang merupakan *dependent variable*. Oleh karena itu diperlukan nilai P_d yang berbeda untuk dapat dikomparasikan antara nilai P_d satu dengan lainnya. Untuk membuktikan bahwa pemilihan P_d adalah benar benar nilai yang optimal maka diperlukan fungsi obyektif sebagai bentuk perhitungan dari pemilihan P_d yang berbeda. Fungsi *Cost-Benefit* akan digunakan sebagai bentuk perhitungan bahwa pemilihan P_d sangat krusial dalam menentukan P_{ESS} . Fungsi *Cost-Benefit* dapat diketahui melalui persamaan:

$$B = \alpha P_d - \beta P_{bP_d} - \gamma P_{cP_d} \quad (3.3)$$

Dimana

B:	fungsi benefit
α :	koefisien P_d
β :	koefisien P_b
γ :	koefisien P_c

Dengan memberi masukan berupa nilai P_d , P_b dan P_c maka bisa diketahui fungsi yang berupa kurva \atau *Cost Benefit Curve*. Kurva ini akan menunjukkan nilai optimal dari pemilihan P_d sehingga dapat diketahui pengaruh P_d terhadap P_{ESS} .

Untuk harga jual dari turbin angin ke jala jala, diasumsikan harganya sebesar \$0.07/kWh, selanjutnya disebut α . Sedangkan untuk baterai, harga pembelian serta pemasangan sebesar 1440\$/kW. Rata rata umur efektif baterai diasumsikan kurang lebih 2 tahun dengan mempertimbangkan biaya depresiasi sehingga $(1440)/2/8760$ atau setara dengan \$0.082/kWh yang selanjutnya disebut koefisien β . Dan superkapasitor yang harganya kurang lebih antara \$2400/kWh - \$6000/kWh maka diambil nilai tengahnya yaitu \$4200/kWh dengan asumsi umur guna superkapasitor sebesar 5 tahun. Dapat diketahui untuk nilai koefisien γ akan sama dengan 0.096/kWh[4].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISA

Pada bab 4 ini akan dibahas secara detail bagaimana pengaruh pemilihan P_d dengan turbin angin yang berbeda dan P_{ESS} dengan menggunakan nilai P_d yang berbeda. Perhitungan dilakukan dengan cara memasukkan set nilai P_d berbeda satu persatu sehingga dapat diketahui nilai P_b dan P_c . Dengan mengetahui P_b dan P_c maka dapat dihitung nilai *Benefit* pada fungsi *Cost Benefit* dan kurvanya.

Fungsi *Cost Benefit* adalah fungsi nonlinier dari daya *dispatch* P_d . Dengan mengetahui besarnya daya yang di *dispatch*, daya baterai P_b dan daya superkapasitor P_c maka dapat dihitung daya jual P_d yang akan dikurangi oleh biaya baterai dan superkapasitor. dan ditulis pada sebuah tabel yang berisi nilai nilai P_d berbeda untuk setiap turbin sehingga dapat diketahui nilai P_d berapakah yang merupakan nilai P_d optimum. Dengan menggunakan persamaan fungsi *Benefit* maka dapat ditentukan biaya keseluruhan dari penentuan kapasitas daya hingga *revenue* dari penjualan listrik dan dalam penelitian ini akan digambarkan menjadi sebuah kurva yang disebut sebagai kurva *Cost – Benefit*

Data kecepatan angin yang digunakan adalah data kecepatan angin di Audubon, USA pada 12 Januari 2007. Data berdurasi 24 jam dengan interval per menit dapat diunduh *online* di website Iowa State of University. Daya keluaran turbin angin bisa berbeda walaupun kecepatannya anginnnya sama karena setiap turbin angin mempunyai spesifikasi yang berbeda. Dalam penelitian ini digunakan 4 turbin angin yaitu turbin angin 10 kW, 20 kW, 30 kW dan 50 kW. Spesifikasi dan parameter turbin dapat dilihat pada tabel 3.1 sampai 3.4 dimana data yang ditulis merupakan data asli salah satu *manufacturer* turbin angin. Penentuan P_{ESS} akan variatif bergantung pada set P_d nya karena keduanya adalah variabel yang saling berkaitan sehingga pemilihan P_d yang optimum adalah set P_d maksimal dengan P_{ESS} minimal. Analisa dari segi ekonomi pada penelitian ini juga dipertimbangkan karena tidaklah terlalu rumit namun cukup untuk bisa dijadikan referensi dan cara perhitungan.

Biaya pemeliharaan dan biaya pengeluaran lainnya tidak dimasukkan dalam perhitungan. Oleh karena itu pada perhitungan di subbab ini akan dianalisa kapasitas P_{ESS} dari P_d yang berbeda serta kurva *Cost Benefit*.

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa P_d dan P_{ESS} adalah variabel *dependent* atau saling bergantung satu dengan lainnya maka untuk mengetahui nilai P_d yang optimum perlu dilakukan *trial and error*. Nilai P_d tersebut merupakan pilihan terbaik apabila memiliki nilai *Benefit* tertinggi dan diindikasikan dengan nilai P_d yang tinggi namun memiliki nilai P_{ESS} yang rendah dibandingkan nilai P_d satu dengan P_d lainnya serta diamati nilai P_{ESS} nya.

Hal ini nantinya akan berpengaruh ke kurva *Cost-Benefit* yang dimana penjelasan mengenai persamaan 3.3 telah dijelaskan pada bab 3.6. Pada statistik, menggunakan data sampel yang semakin banyak akan semakin baik namun pada penelitian ini menggunakan data 1 hari dan diasumsikan cukup dan dapat dihitung estimasi P_w masing masing turbin yang dapat dilihat pada 4.1 sampai dengan 4.4 dan uraian singkat pada 4.5. Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat pada pembahasan berikut ini.

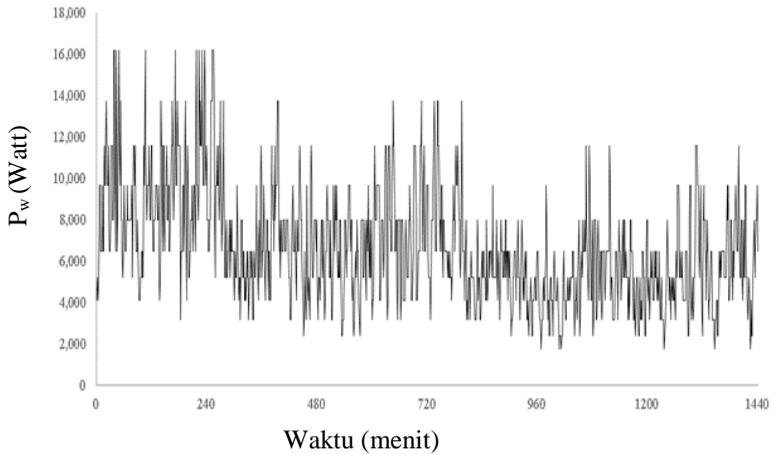
4.1 Penentuan Nilai P_{ESS} Turbin Angin 10 kW

Pada tabel perhitungan setiap turbin nantinya dapat diketahui pengaruh nilai P_d yang berbeda terhadap P_{ESS} dengan mengasumsikan tingkat signifikansi H_0 sebesar 95% dimana H_0 adalah asumsi bahwa baterai akan mampu mengakomodasi seluruh fluktuasi daya baik ketika *charging* maupun *discharging*.

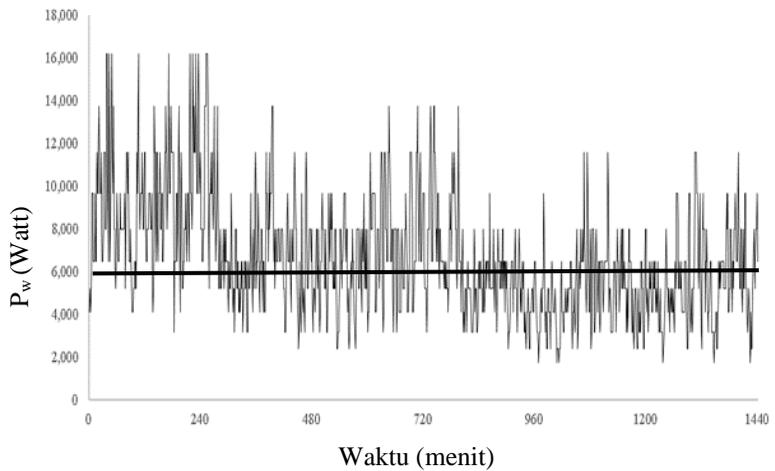
4.1.1 Penentuan P_d Optimum

Dalam sub-bab ini akan dihitung nilai P_d yang paling optimum dengan menggunakan turbin angin 10 kW. Dengan menghitung estimasi P_w pada turbin angin ini maka kurva P_w dapat digambarkan sebagaimana pada gambar 4.1. Lalu memilih *set* nilai P_d dimana nilai P_d dipilih sebesar 6 kW dan digambarkan sebagaimana pada gambar 4.2 berupa garis lurus yang memotong fluktuasi P_w . Pada gambar 4.3 dapat dilihat kurva yang menggambarkan fluktuasi daya P_{ESS} saat mengalami *charging* maupun *discharging*.

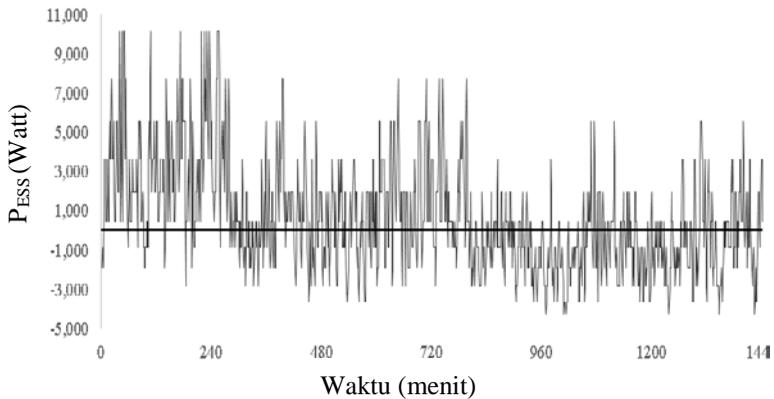
Pemilihan *set* P_d dilakukan dengan memilih suatu nilai dan dilakukan perhitungan penentuan P_b dan P_c atau *trial and error* dan hasil dari masing masing perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pengolahan data sebagaimana pada tabel 4.1.



Gambar 4. 1. P_w Turbin Angin 10 kW



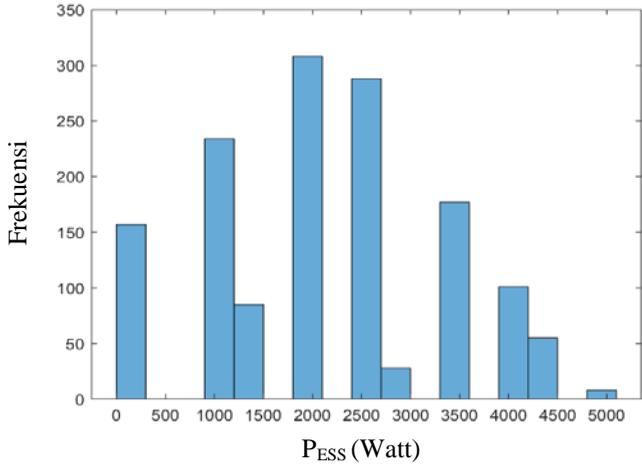
Gambar 4. 2. P_d 6 kW dengan turbin angin 10 kW



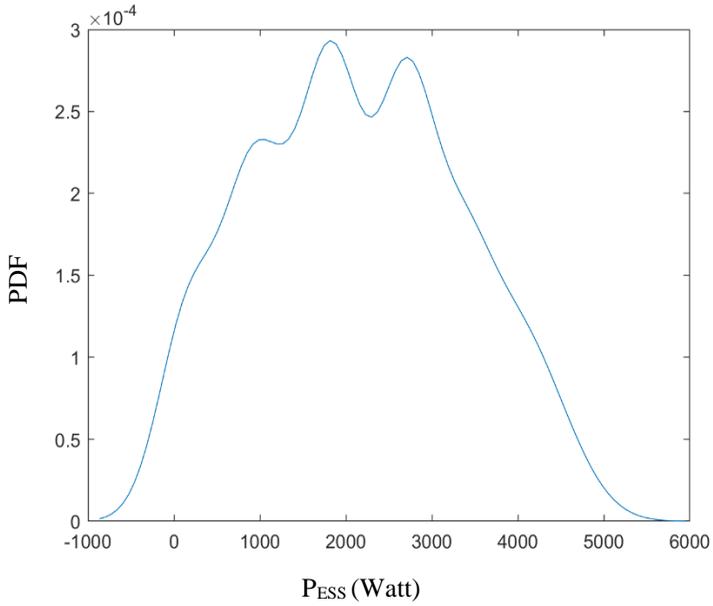
Gambar 4. 3. P_{ESS} dengan P_d 6 kW

Pada gambar 4.2 dapat dilihat P_w turbin angin 10 kW. Pada gambar 4.3, dapat dilihat kurva P_{ESS} saat menyalurkan P_d sebesar 6 kW serta fluktuasi ketika proses *charging* dan *discharging*. Gambar 4.4 merupakan histogram yang menunjukkan distribusi data dari P_{ESS} dan dimodelkan dengan KSDE pada gambar 4.5.

Pada gambar 4.4 dapat dilihat histogram yang menggambarkan sebaran data dari P_{ESS} ketika nilai P_d sebesar 6 kW. Fluktuasi daya paling sering berada antara 2 kW – 3 kW dengan frekuensi kurang lebih 300. Pada metode KSDE seperti gambar 4.5, sebaran data digambarkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan sebaran data pada histogram dengan menggunakan fungsi *Kernel Gaussian* dan nilai *bandwith default* pada Matlab. Pemilihan P_d selain 6 kW ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.1.



Gambar 4. 4. Sebaran data P_{ESS}



Gambar 4. 5. Sebaran data P_{ESS} Dengan Metode KSDE

Tabel 4. 1. P_{ESS} berdasarkan P_d pada turbin angin 10 kW

Turbin Angin 10 kW					
No	P_d (Watt)	Confidence Level		P_b (Watt)	P_c (Watt)
		Max P _{ess} (Watt)	Values		
1	2,000	8,343	0.95	7,925	417
2	3,000	7,343	0.95	6,975	367
3	4,000	6,343	0.95	6,025	317
4	5,550	4,793	0.95	4,553	240
5	6,000	4,901	0.95	4,656	245
6	7,000	5,901	0.95	5,606	295
7	8,000	6,901	0.95	6,556	345
8	8,500	7,401	0.95	7,031	370
9	9,000	7,901	0.95	7,506	395
10	10,000	8,901	0.95	8,456	445

4.1.2 Kurva Cost Benefit

Setelah dilakukan komparasi mengenai nilai P_d yang paling optimal untuk setiap turbin maka dapat diketahui nilai P_d yang sesuai akan berdampak baik bagi kontinuitas pembangkitan daya serta umur guna peralatan turbin angin dan tentunya bagi penyimpanan energi itu sendiri. Penentuan P_{ESS} ini untuk meminimalisir fluktuasi daya yang terlalu tinggi pada baterai sehingga tidak banyak mengalami rugi rugi berupa panas yang berpotensi memperpendek masa pakai[4].

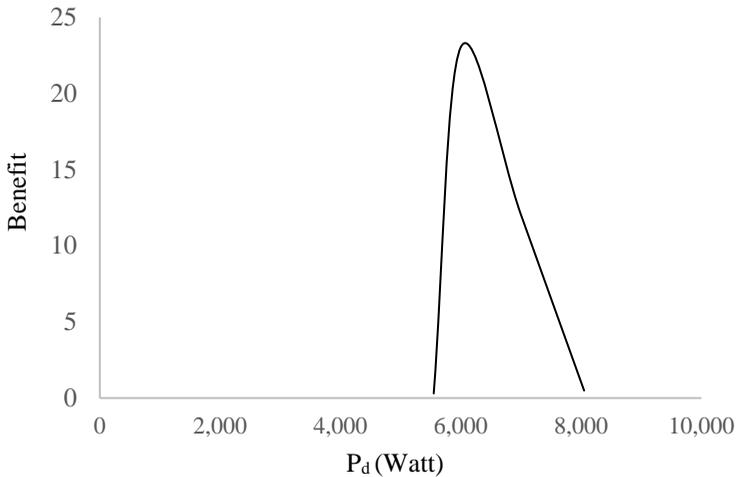
Hal lain yang penting dan menarik lainnya adalah aspek ekonomi dimana digunakan sebagai pemanfaatan sumber daya semaksimal mungkin dengan menghindari *overdesigned* dan *underutilized* sehingga pencapaian efisiensi yang tinggi bisa mungkin untuk dilakukan.

P_{ESS} dan perhitungan kurva *Cost Benefit* dilakukan dengan menggunakan rumus fungsi *Cost Benefit* sesuai tabel P_d dengan nilai yang berbeda menggunakan turbin angin 10 kW. P_d dapat dikatakan optimum apabila mendapatkan nilai Benefit yang paling tinggi dibandingkan nilai Benefit lainnya. Dapat diketahui melalui tabel 4.2 berikut.

Tabel 4. 2. Pemilihan P_d optimum untuk turbin angin 10 kW

P_d	$\alpha \times P_d$	$\beta \times P_b$	$\gamma \times P_c$	Benefit
2,000	140.00	634	42	-536
3,000	210.00	558	37	-385
4,000	280.00	482	32	-234
5,550	389.00	364	24	0
6,000	420.00	372	25	23
7,000	490.00	448	30	12
8,000	560.00	524	35	1
8,500	595.00	562	37	-4
9,000	630.00	600	40	-10
10,000	700.00	676	45	-21

Dari tabel 4.2 dapat diketahui bahwa perubahan nilai *Benefit* nya menyesuaikan dengan nilai P_d sehingga dengan turbin angin 10 kW didapatkan nilai optimum P_d berada pada 6 kW dan nilai *Benefit* berada pada 23. Hal ini menunjukkan bahwa dengan turbin sebesar 10 kW, P_d paling optimum berada pada 6 kW.



Gambar 4. 6. Kurva *Cost-Benefit* turbin angin 10 kW

Dari bentuk kurva *Cost Benefit* dapat diketahui bahwa nilai P_d optimum digambarkan dengan kurva yang mempunyai nilai puncak positif dimana dalam perhitungan ini nilai puncaknya sebesar 23 dan kemudian dilanjutkan pada garis kurva yang menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin seperti ini dan turbin angin 10 kW, 6 kW adalah nilai P_d optimum.

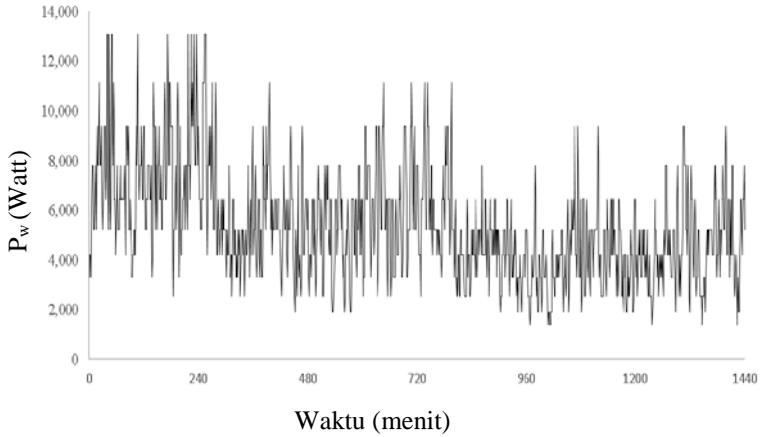
4.2 Penentuan Nilai P_{ESS} Turbin Angin 20 kW

Pada tabel perhitungan setiap turbin nantinya dapat diketahui pengaruh nilai P_d yang berbeda terhadap P_{ESS} dengan mengasumsikan tingkat signifikansi H_0 sebesar 95% dimana H_0 adalah asumsi bahwa baterai akan mampu mengakomodasi seluruh fluktuasi daya baik ketika *charging* maupun *discharging*.

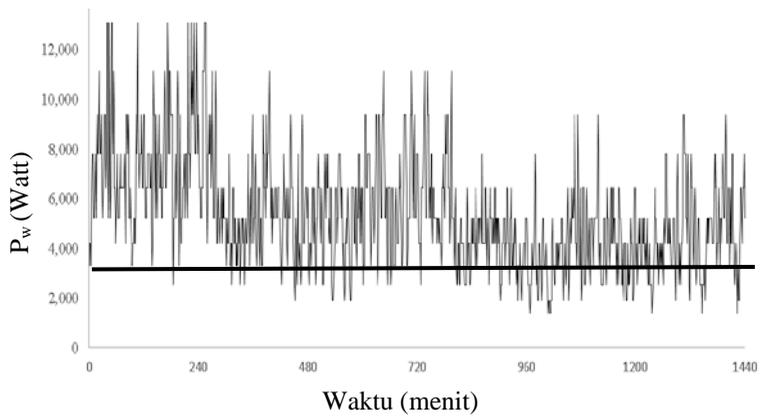
4.2.1 Penentuan P_d Optimum

Dalam sub-bab ini akan dihitung nilai P_d yang paling optimum dengan menggunakan turbin angin 20 kW. Dengan menghitung estimasi P_w pada turbin angin ini maka kurva P_w dapat digambarkan sebagaimana pada gambar 4.7. Lalu memilih *set* nilai P_d dimana nilai P_d dipilih sebesar 7,5 kW dan digambarkan sebagaimana pada gambar 4.8 berupa garis lurus yang memotong fluktuasi P_w . Pada gambar 4.9 dapat dilihat kurva yang menggambarkan fluktuasi daya P_{ESS} saat mengalami *charging* maupun *discharging*.

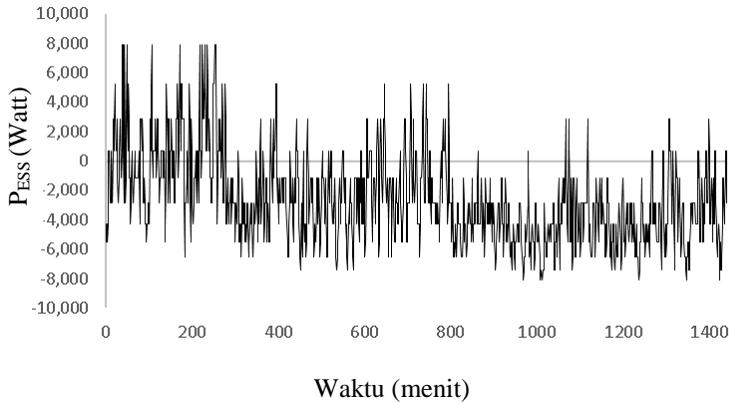
Pemilihan *set* P_d dilakukan dengan memilih suatu nilai dan dilakukan perhitungan penentuan P_b dan P_c atau *trial and error* dan hasil dari masing masing perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pengolahan data sebagaimana pada tabel 4.3.



Gambar 4. 7. P_w turbin angin 20 kW



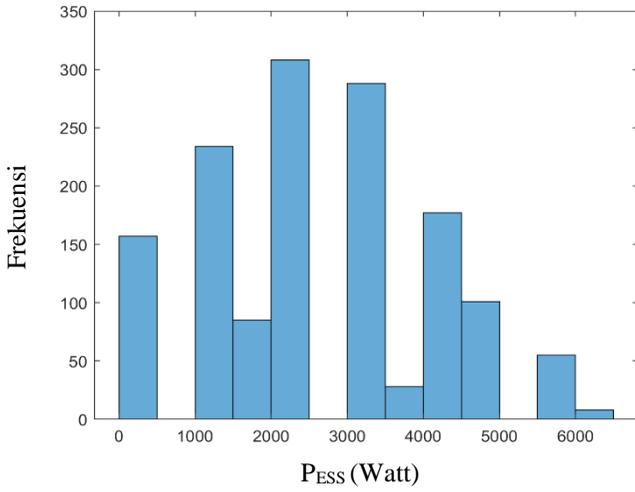
Gambar 4. 8. P_d 7.5 kW dengan turbin angin 20 kW



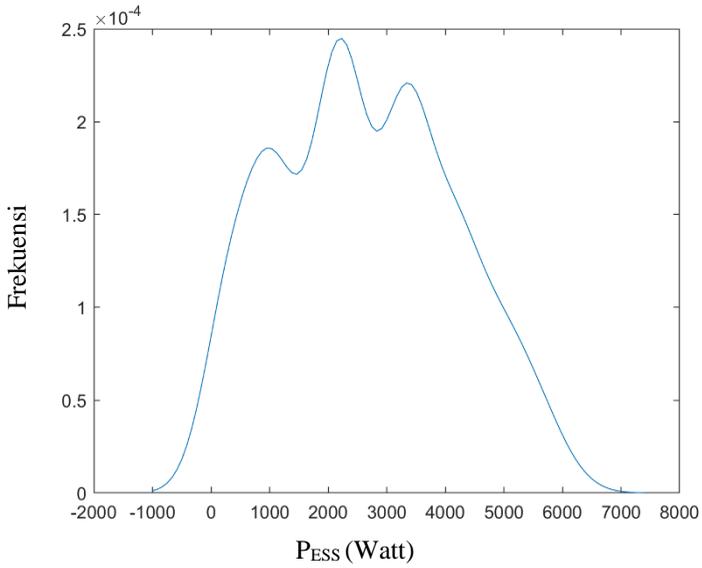
Gambar 4. 9. P_{ESS} dengan P_d 7.5 kW

Pada gambar 4.7 dapat dilihat P_w turbin angin 20 kW. Pada gambar 4.9, dapat dilihat kurva P_{ESS} saat menyalurkan P_d sebesar 7.5 kW serta fluktuasi ketika proses *charging* dan *discharging*. Gambar 4.10 merupakan histogram yang menunjukkan distribusi data dari P_{ESS} dan dimodelkan dengan KSDE pada gambar 4.11.

Pada gambar 4.10 dapat dilihat histogram yang menggambarkan sebaran data dari P_{ESS} ketika nilai P_d sebesar 7.5 kW. Fluktuasi daya paling sering berada antara 2 kW – 3.5 kW dengan frekuensi kurang lebih 300. Pada metode KSDE seperti gambar 4.11, sebaran data digambarkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan sebaran data pada histogram dengan menggunakan fungsi Kernel Gaussian dan nilai *bandwith default* pada Matlab. Pemilihan P_d selain 7.5 kW ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.3.



Gambar 4. 10. Sebaran Data P_{ESS}



Gambar 4. 11. Sebaran data P_{ESS} Dengan Metode KSDE

Tabel 4. 3. P_{ESS} berdasarkan P_d pada turbin angin 20 kW

Turbin Angin 20 kW					
		<i>Confidence Level</i>			
No	P_d (Watt)	Max P_{ess} (Watt)	Values	P_b (Watt)	P_c (Watt)
1	2,000	11,089	0.95	10,535	554
2	3,000	8,343	0.95	7,925	417
3	4,000	7,343	0.95	6,975	367
4	7,010	6,343	0.95	6,025	317
5	7,500	4,793	0.95	4,553	240
6	9,000	4,901	0.95	4,656	245
7	10,000	5,901	0.95	5,606	295
8	10,500	6,901	0.95	6,556	345
9	12,000	7,401	0.95	7,031	370
10	13,000	7,901	0.95	7,506	395

4.2.2 Kurva Cost Benefit

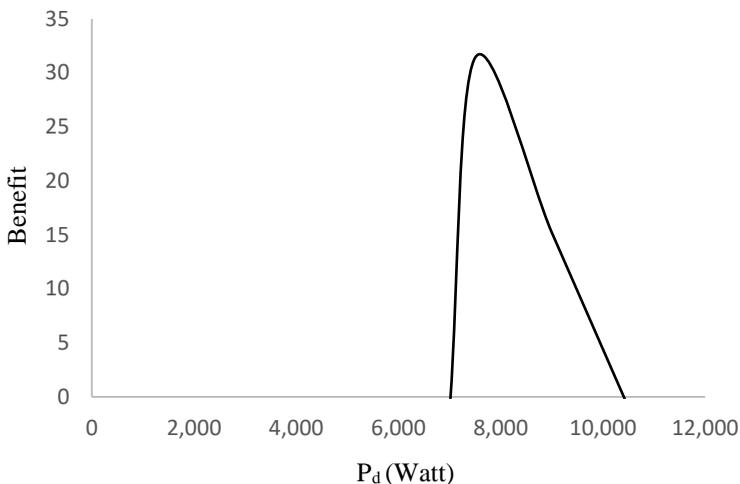
Setelah dilakukan komparasi mengenai nilai P_d yang paling optimal untuk setiap turbin maka dapat diketahui nilai P_d yang sesuai akan berdampak baik bagi kontinuitas pembangkitan daya serta umur guna peralatan turbin angin dan tentunya bagi penyimpan energi itu sendiri.

P_{ESS} dan perhitungan *Cost Benefit Curve* dengan menggunakan turbin angin 20 kW dapat diketahui melalui tabel 4.4 berikut.

Tabel 4. 4. Pemilihan P_d optimum untuk turbin angin 20 kW

P_d	$\alpha \times P_d$	$\beta \times P_b$	$\gamma \times P_c$	Benefit
2,000	140.00	842.83	53.23	-756
3,000	210.00	766.83	48.43	-605
4,000	280.00	690.83	43.63	-454
7,010	490.70	462.07	29.18	-1
7,500	525.00	464.27	29.32	31
9,000	630.00	578.27	36.52	15
10,000	700.00	654.27	41.32	4
10,500	735.00	692.27	43.72	-1
12,000	840.00	806.27	50.92	-17
13,000	910.00	882.27	55.72	-28

Dari tabel 4.4 dapat diketahui bahwa perubahan nilai *Benefit* nya menyesuaikan dengan nilai P_d sehingga dengan turbin angin 20 kW didapatkan nilai optimum P_d berada pada 7,5 kW dan nilai *Benefit* berada pada 31. Hal ini menunjukkan bahwa dengan turbin sebesar 20 kW, P_d paling optimum berada pada 7,5 kW.



Gambar 4.12. Kurva *Cost-Benefit* turbin angin 20 kW

Dari bentuk kurva *Cost Benefit* dapat diketahui bahwa nilai P_d optimum digambarkan dengan kurva yang mempunyai nilai puncak positif dimana dalam perhitungan ini nilai puncaknya sebesar 31 dan kemudian dilanjutkan pada garis kurva yang menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin seperti ini dan turbin angin 20 kW, 7,5 kW adalah nilai P_d optimum.

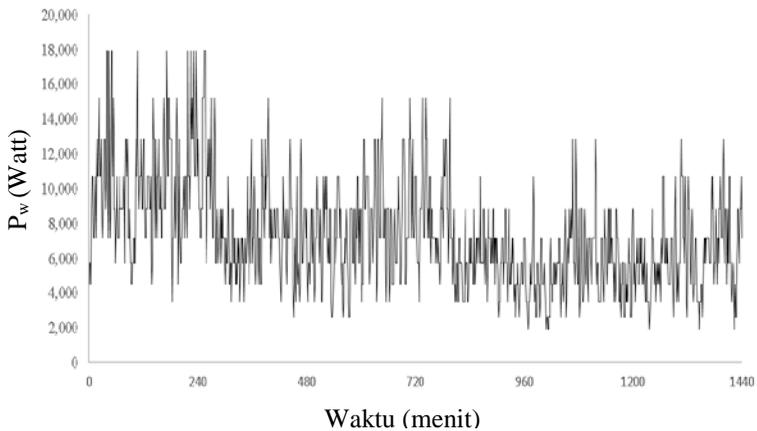
4.3 P_d Optimum Dengan Turbin Angin 30 kW.

Pada tabel perhitungan setiap turbin nantinya dapat diketahui pengaruh nilai P_d yang berbeda terhadap P_{ESS} dengan mengasumsikan tingkat signifikansi H_0 sebesar 95% dimana H_0 adalah asumsi bahwa baterai akan mampu mengakomodasi seluruh fluktuasi daya baik ketika *charging* maupun *discharging*.

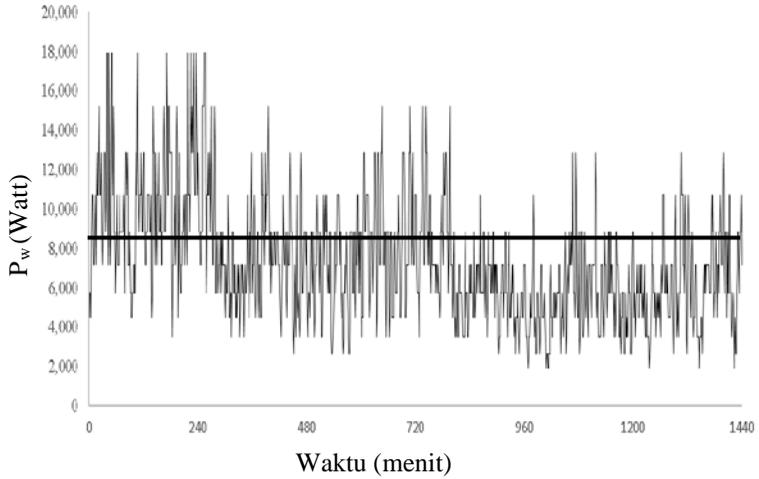
4.3.1 Penentuan P_d Optimum

Dalam sub-bab ini akan dihitung nilai P_d yang paling optimum dengan menggunakan turbin angin 30 kW. Dengan menghitung estimasi P_w pada turbin angin ini maka kurva P_w dapat digambarkan sebagaimana pada gambar 4.13. Lalu memilih *set* nilai P_d dimana nilai P_d dipilih sebesar 10 kW dan digambarkan sebagaimana pada gambar 4.14 berupa garis lurus yang memotong fluktuasi P_w . Pada gambar 4.15 dapat dilihat kurva yang menggambarkan fluktuasi daya P_{ESS} saat mengalami *charging* maupun *discharging*.

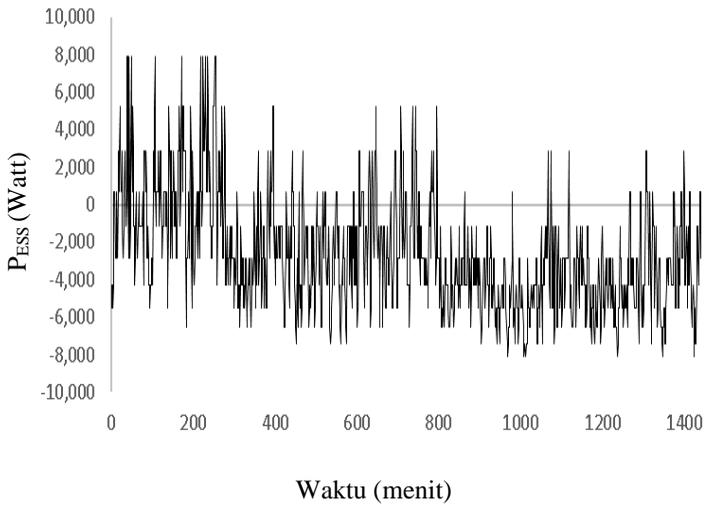
Pemilihan *set* P_d dilakukan dengan memilih suatu nilai dan dilakukan perhitungan penentuan P_b dan P_c atau *trial and error* dan hasil dari masing masing perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pengolahan data sebagaimana pada tabel 4.5.



Gambar 4. 13. P_w turbin angin 30 kW



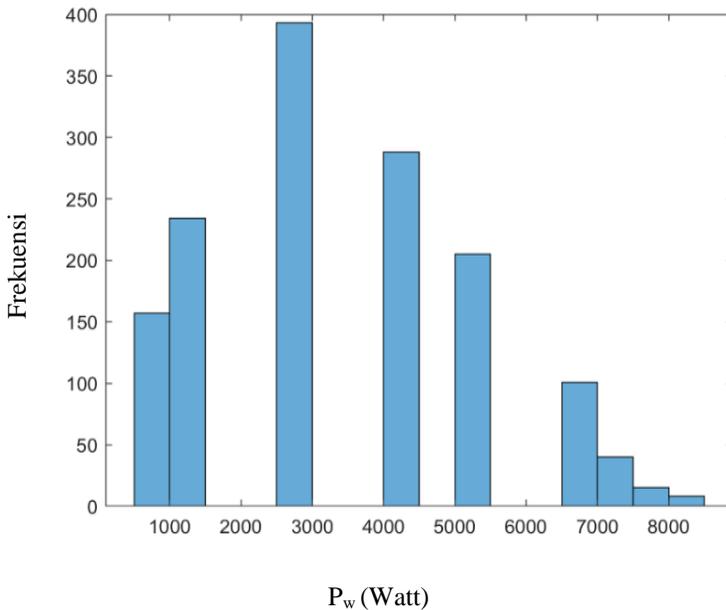
Gambar 4. 14. P_d 6 kW dengan turbin angin 30 kW



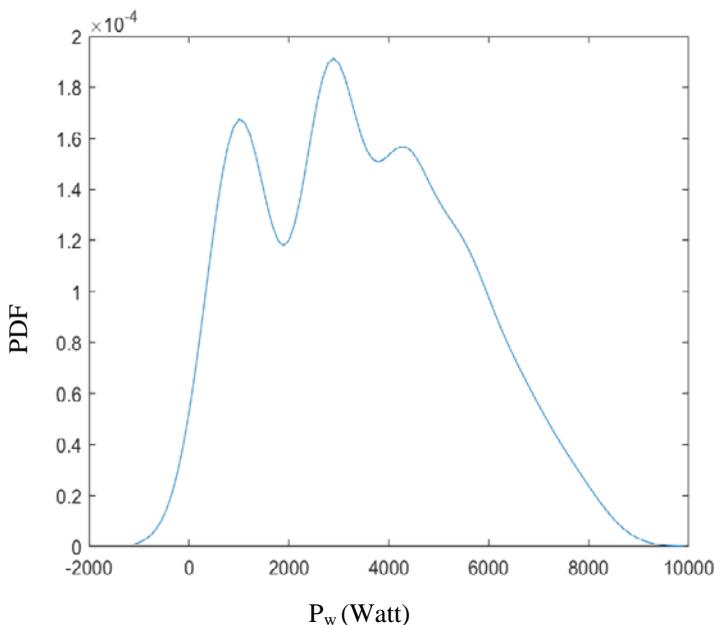
Gambar 4. 15. P_{ESS} dengan P_d 10 kW

Pada gambar 4.13 dapat dilihat P_w turbin angin 30 kW. Pada gambar 4.15 dapat dilihat kurva P_{ESS} saat menyalurkan P_d sebesar 10 kW serta fluktuasi ketika proses *charging* dan *discharging*. Gambar 4.16 merupakan histogram yang menunjukkan distribusi data dari P_{ESS} dan dimodelkan dengan KSDE pada gambar 4.17.

Pada gambar 4.16 dapat dilihat histogram yang menggambarkan sebaran data dari P_{ESS} ketika nilai P_d sebesar 10 kW. Fluktuasi daya paling sering berada antara 3 kW dengan frekuensi mendekati 400. Pada metode KSDE seperti gambar 4.17, sebaran data digambarkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan sebaran data pada histogram dengan menggunakan fungsi Kernel Gaussian dan nilai *bandwith default* pada Matlab. Pemilihan P_d selain 10 kW ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.5.



Gambar 4. 16. Sebaran Data P_{ESS}



Gambar 4. 17. Sebaran Data P_{ESS} Dengan KSDE

Pada gambar 4.16 dapat dilihat histogram yang menggambarkan sebaran data dari P_{ESS} ketika nilai P_d sebesar 10 kW. Dari histogram diatas maka dapat diketahui nilai fluktuasi daya paling sering berada kurang lebih pada 3 kW dengan frekuensi kurang lebih 400.

Pada metode KSDE seperti gambar 4.17, sebaran data digambarkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan sebaran data pada histogram dengan menggunakan fungsi Kernel Gaussian dan nilai *bandwith default* pada Matlab. Fungsi Kernel dan nilai *bandwith* menentukan *smoothness* dari kurva. Pemilihan P_d selain 10 kW ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.5.

Sebagaimana pada tabel 4.5 bisa dilihat nilai pemilihan P_d yang berbeda mulai dari 2 kW, 4 kW, 8.5 kW, 9.5 kW, 10 kW, 11 kW, 13 kW, 14 kW, 15 kW dan terakhir 16 kW. Tujuan dipilih nilai P_d yang berbeda tidak lain untuk melihat bagaimana pengaruh P_d terhadap P_{ESS} sehingga didapatkan nilai P_d yang tinggi dengan nilai P_{ESS} yang rendah.

Tabel 4. 5. P_{ESS} berdasarkan P_d pada turbin angin 30 kW

Turbin Angin 30 kW					
		<i>Confidence Level</i>			
No	P_d (Watt)	Max P_{ess} (Watt)	Values	P_b (Watt)	P_c (Watt)
1	2,000	15,911.03	0.95	15,115	796
2	4,000	12,160.33	0.95	11,552	608
3	8,500	9,411.03	0.95	8,940	471
4	9,500	8,211.03	0.95	7,800	411
5	10,000	8,096.35	0.95	7,692	405
6	11,000	9,096.35	0.95	8,642	455
7	13,000	11,096.35	0.95	10,542	555
8	14,000	12,096.35	0.95	11,492	605
9	15,000	13,096.35	0.95	12,442	655
10	16,000	14,096.35	0.95	13,392	705

4.3.2 Kurva Cost Benefit

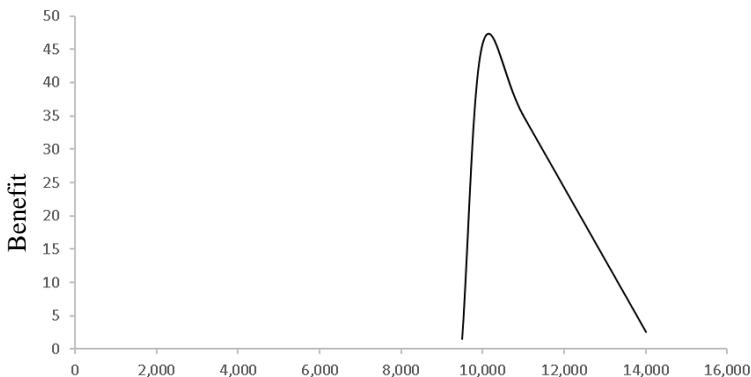
Setelah dilakukan komparasi mengenai nilai P_d yang paling optimal untuk setiap turbin maka dapat diketahui nilai P_d yang sesuai akan berdampak baik bagi kontinuitas pembangkitan daya serta umur guna peralatan turbin angin dan tentunya bagi penyimpan energi itu sendiri.

P_{ESS} dan perhitungan *Cost Benefit Curve* dengan menggunakan turbin angin 30 kW dapat diketahui melalui tabel 4.6 berikut.

Tabel 4. 6. Pemilihan P_d optimum untuk turbin angin 30 kW

P_d	$\alpha \times P_d$	$\beta \times P_b$	$\gamma \times P_c$	Benefit
2,000	140.00	1,209.24	76.37	-1,146
4,000	280.00	924.19	58.37	-703
8,500	595.00	715.24	45.17	-165
9,500	665.00	624.04	39.41	2
10,000	700.00	615.32	38.86	46
11,000	770.00	691.32	43.66	35
13,000	910.00	843.32	53.26	13
14,000	980.00	919.32	58.06	3
15,000	1,050.00	995.32	62.86	-8
16,000	1,120.00	1,071.32	67.66	-19

Dari tabel 4.6 dapat diketahui bahwa perubahan nilai *Benefit* nya menyesuaikan dengan nilai P_d sehingga dengan turbin angin 30 kW didapatkan nilai optimum P_d berada pada 10 kW dan nilai *Benefit* berada pada 46. Hal ini menunjukkan bahwa dengan turbin sebesar 30 kW, P_d paling optimum berada pada 10 kW.



Gambar 4. 18. Kurva *Cost-Benefit* turbin angin 30 kW

Dari bentuk kurva *Cost Benefit* dapat diketahui bahwa nilai P_d optimum digambarkan dengan kurva yang mempunyai nilai puncak positif dimana dalam perhitungan ini nilai puncaknya sebesar 46 dan kemudian dilanjutkan pada garis kurva yang menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin seperti ini dan turbin angin 30 kW, 10 kW adalah nilai P_d optimum.

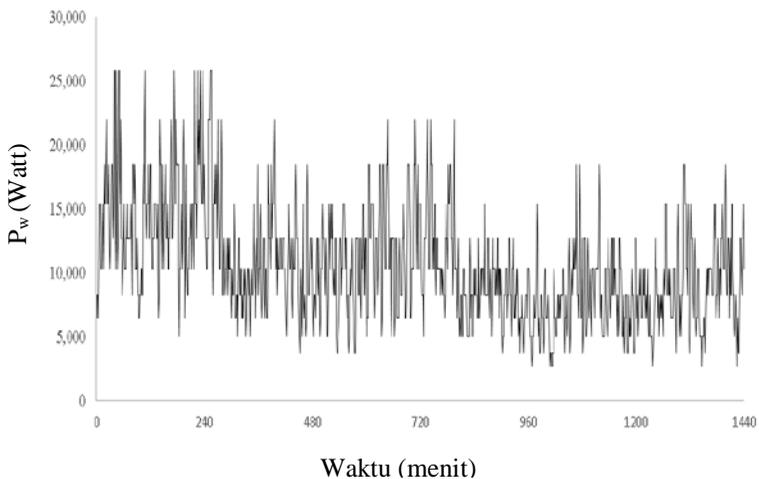
4.4 P_d optimum dengan turbin angin 50 kW.

Pada tabel perhitungan setiap turbin nantinya dapat diketahui pengaruh nilai P_d yang berbeda terhadap P_{ESS} dengan mengasumsikan tingkat signifikansi H_0 sebesar 95% dimana H_0 adalah asumsi bahwa P_{ESS} akan mampu mengakomodasi seluruh fluktuasi daya baik ketika *charging* maupun *discharging*.

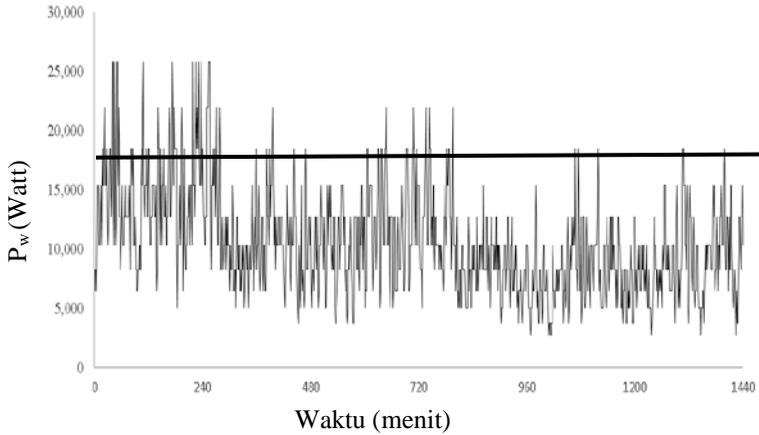
4.4.1 Penentuan P_d Optimum

Dalam sub-bab ini akan dihitung nilai P_d yang paling optimum dengan menggunakan turbin angin 50 kW. Dengan menghitung estimasi P_w pada turbin angin ini maka kurva P_w dapat digambarkan sebagaimana pada gambar 4.19. Lalu memilih *set* nilai P_d dimana nilai P_d dipilih sebesar 16 kW dan digambarkan sebagaimana pada gambar 4.20 berupa garis lurus yang memotong fluktuasi P_w . Pada gambar 4.21 dapat dilihat kurva yang menggambarkan fluktuasi daya P_{ESS} saat mengalami *charging* maupun *discharging*.

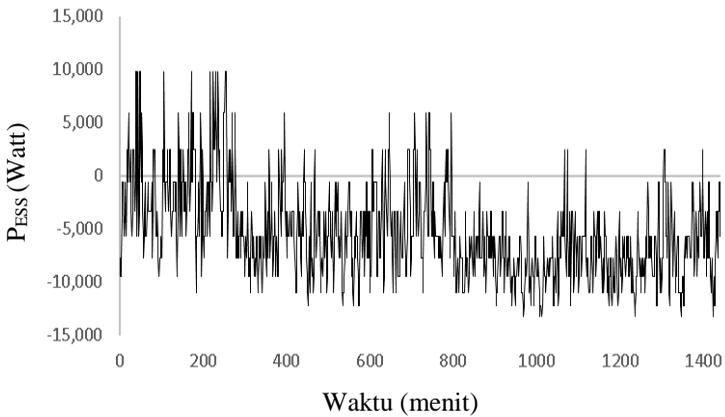
Pemilihan *set* P_d dilakukan dengan memilih suatu nilai dan dilakukan perhitungan penentuan P_b dan P_c atau *trial and error* dan hasil dari masing masing perhitungan akan ditampilkan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pengolahan data sebagaimana pada tabel 4.7.



Gambar 4. 19. P_w turbin angin 50 kW

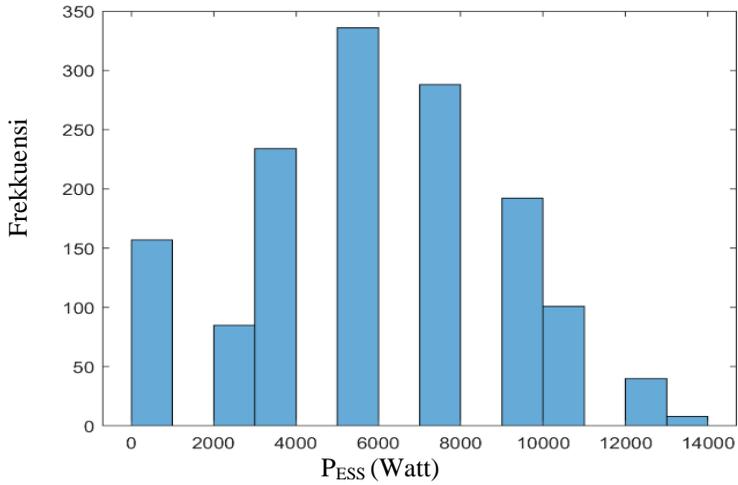


Gambar 4. 20. P_d 16 kW dengan turbin angin 50 kW

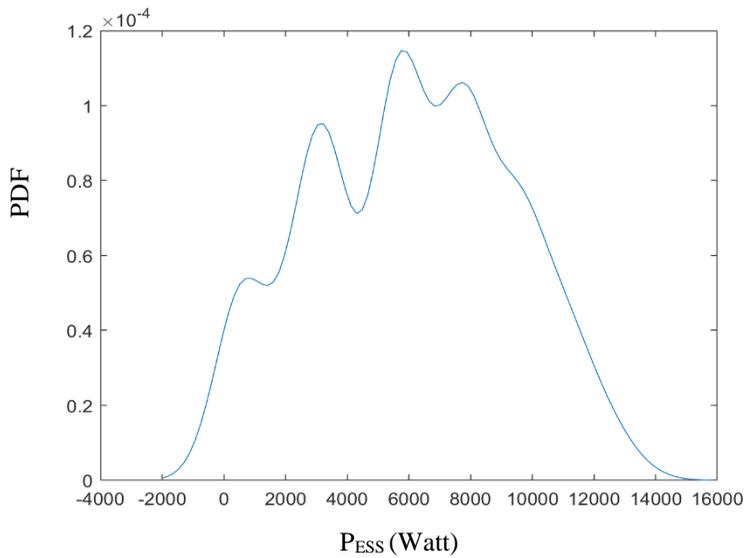


Gambar 4. 21. P_{ESS} dengan P_d 16 kW

Pada gambar 4.19 dapat dilihat P_w turbin angin 50 kW. Pada gambar 4.20, dapat dilihat kurva P_{ESS} saat menyalurkan P_d sebesar 16 kW. P_{ESS} yang bernilai positif menunjukkan saat *charging* dan *discharging* pada saat P_{ESS} bernilai negatif. Besarnya P_{ESS} pada gambar 4.21 dapat ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.7 berikut:



Gambar 4. 23. Sebaran data P_{ESS}



Gambar 4. 22. Sebaran data P_{ESS} Dengan Metode KSDE

Pada gambar 4.22 dapat dilihat histogram yang menggambarkan sebaran data dari P_{ESS} ketika nilai P_d sebesar 16 kW. Fluktuasi daya paling sering berada antara 6 kW dengan frekuensi mendekati 350. Pada metode KSDE seperti gambar 4.23, sebaran data digambarkan dalam bentuk kurva yang menggambarkan sebaran data pada histogram dengan menggunakan fungsi Kernel Gaussian dan nilai *bandwith default* pada Matlab. Pemilihan P_d selain 16 kW ditulis dalam bentuk tabel sebagaimana pada tabel 4.7

Tabel 4. 7. P_{ESS} berdasarkan P_d pada turbin angin 50 kW

Turbin Angin 50 kW					
No	P_d (Watt)	Confidence Level		P_b (Watt)	P_c (Watt)
		Max P _{ess} (Watt)	Values		
1	10,000	15,792	0.95	15,002	790
2	12,000	13,792	0.95	13,102	690
3	13,450	12,342	0.95	11,725	617
4	14,000	11,792	0.95	11,202	590
5	16,000	13,259	0.95	12,596	663
6	20,000	17,259	0.95	16,396	863
7	23,000	20,259	0.95	19,246	1,013
8	26,000	23,259	0.95	22,096	1,163
9	27,000	24,259	0.95	23,046	1,213
10	33,000	30,259	0.95	28,746	1,513

4.4.2 Kurva Cost Benefit

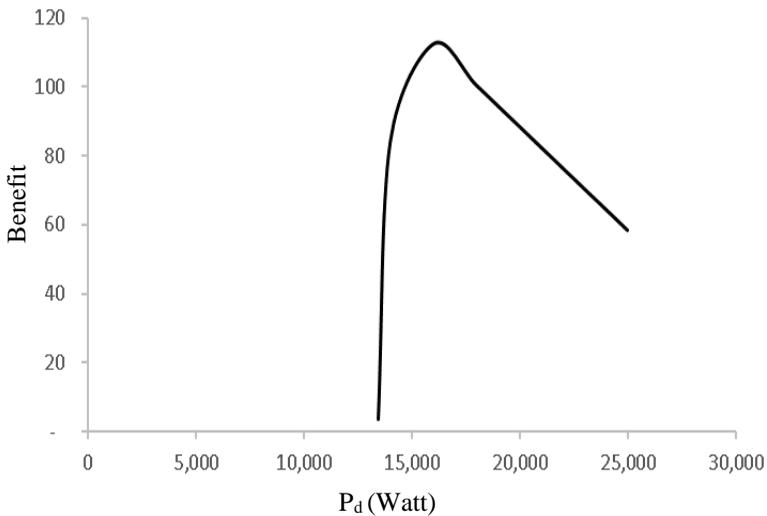
Setelah dilakukan komparasi mengenai nilai P_d yang paling optimal untuk setiap turbin maka dapat diketahui nilai P_d yang sesuai akan berdampak baik bagi kontinuitas pembangkitan daya serta umur guna peralatan turbin angin dan tentunya bagi penyimpanan energi itu sendiri.

P_{ESS} dan perhitungan *Cost Benefit Curve* dilakukan dengan cara menggunakan persamaan 3.3 dengan turbin angin 50 kW. Dengan memasukkan nilai P_d yang berbeda maka kitat dapat mengetahui nilai *Benefit* dari masing masing P_d . P_d yang paling optimum ditunjukkan dengan memiliki nilai *Benefit* yang paling tinggi bila dibandingkan dengan lainnya dan hal itu dapat dilihat melalui tabel 4.8 berikut.

Tabel 4. 8. Pemilihan P_d optimum untuk turbin angin 50 kW

P_d (Watt)	$\alpha \times P_d$	$\beta \times P_b$	$\gamma \times P_c$	Benefit
10,000	700	1,200	76	-500
12,000	840	1,048	66	-208
13,450	942	938	59	4
14,000	980	896	57	84
16,000	1,120	1,008	64	112
20,000	1,400	1,312	83	88
23,000	1,610	1,540	97	70
26,000	1,820	1,768	112	52
27,000	1,890	1,844	116	46
33,000	2,310	2,300	145	10

Dari tabel 4.8 dapat diketahui bahwa perubahan nilai *Benefit* nya menyesuaikan dengan nilai P_d sehingga dengan turbin angin 50 kW didapatkan nilai optimum P_d berada pada 16 kW dan nilai *Benefit* berada pada 112. Hal ini menunjukkan bahwa dengan turbin sebesar 50 kW, P_d paling optimum berada pada 16 kW.



Gambar 4. 24. Kurva *Cost-Benefit* turbin angin 50 kW

Dari bentuk kurva *Cost Benefit* dapat diketahui bahwa nilai P_d optimum digambarkan dengan kurva yang mempunyai nilai puncak positif dimana dalam perhitungan ini nilai puncaknya sebesar 112 dan kemudian dilanjutkan pada garis kurva yang menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi angin seperti ini dan turbin angin 50 kW, 16 kW adalah nilai P_d optimum.

4.5 Perbandingan P_{ESS} Antar Turbin

Dari kurva *Cost Benefit*, dapat diketahui bahwa nilai optimum P_d dari setiap turbin angin berbeda. Pada turbin angin 10 kW dapat dihitung nilai P_d nya sebesar 6 kW dengan P_{ESS} sebesar 4.9 kW sedangkan dengan turbin angin 20 kW, P_{ESS} nya sebesar 4.8 kW.

Pada turbin angin 30 kW dengan P_d 10 kW maka P_{ESS} sebesar 8.1 kW dan pada turbin angin 50 kW dapat diketahui P_d sebesar 16 kW dan P_{ESS} sebesar 13.2 kW

Walaupun penentuan P_d optimal bukan tujuan utama dari penelitian ini namun dengan mengetahui P_d yang tepat maa akan sangat berpengaruh terhadap penentuan kapasitas P_{ESS} , sebagaimana disebutkan diatas bahwa kedua variable P_d dan P_{ESS} adalah *dependent variable* atau saling terikat satu sama lain serta perlu dicatat bahwa dalam perhitungan *Cost Benefit* ini biaya pembelian turbin angin, O&M (*operation and maintenance*) serta biaya lainnya tidak diperhatikan atau diabaikan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari serangkaian perhitungan dan percobaan maka ada beberapa hal menarik yang dapat ditarik menjadi kesimpulan, seperti:

1. Kecepatan angin di Audubon, USA pada 12 Januari 2007 memiliki kecepatan angin minimal 5.6 m/s dan maksimal 9.8 m/s dengan rata-rata μ 7.9 m/s dan simpangan baku σ sebesar 0.97.
2. Perhitungan menggunakan turbin angin dengan rating 10 kW, 20 kW, 30 kW dan 50 kW
3. Nilai P_d optimum untuk turbin angin 10 kW, 20 kW, 30 kW dan 50 kW berturut turut adalah 6 kW, 7.5 kW, 10 kW dan 16 kW.
4. *Mean* dan *standard deviation* P_{ESS} pada P_d optimum tiap turbin berturut turut adalah (2.13, 1.21), (2.63, 1.49), (3.45, 1.97) dan (22.3, 4.38)
5. Nilai Asymp. Sig (2-Tailed) uji statistik pada P_{ESS} tiap turbin bernilai <0.05 sehingga tidak memenuhi syarat berdistribusi normal.
6. Fungsi Kernel K pada *Kernel Smoothing Density Estimation* menggunakan metode *Gaussian* sedangkan fungsi *bandwith* H menggunakan nilai *default* pada Matlab.
7. Nilai *Benefit* dengan P_d optimal pada turbin 10 kW, 20 kW, 30 kW dan 50 kW adalah 23, 31, 46 dan 112.

5.2 Saran

Secara garis besar dalam melakukan penentuan P_{ESS} ada beberapa poin yang dapat dikembangkan, diantaranya:

1. Ketersediaan data yang cukup , minimal 1 tahun.
2. Menggunakan jenis baterai dan superkapasitor yang sudah ada dan telah banyak digunakan.
3. Dapat menghitung kapasitas energi baik pada baterai dan superkapasitor.

Penelitian ini nantinya dapat digunakan sebagai referensi dasar untuk penentuan P_{ESS} dengan menggunakan metode probabilitas lain atau metode perhitungan lainnya. Semoga berguna dan bermanfaat bagi siapapun yang membaca. Kritik serta saran yang membangun akan selalu mendapatkan tempat. Sekian dan terima kasih.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] REN21, *Renewables 2017: global status report*, vol. 72, no. October 2016. 2017.
- [2] A. Abbassi, M. A. Dami, and M. Jemli, “Statistical characterization of capacity of Hybrid Energy Storage System (HESS) to assimilate the fast PV-Wind power generation fluctuations,” *Proc. Int. Conf. Adv. Syst. Electr. Technol. IC_ASET 2017*, pp. 467–472, 2017.
- [3] H. Babazadeh, W. Gao, J. Lin, and L. Cheng, “Sizing of Battery and Supercapacitor in a Turbines,” *T&D Conf. Expo. 2012 IEEE PES*, pp. 1–7, 2012.
- [4] X. Wang, M. Yue, and E. Muljadi, “Probabilistic Approach for Power Capacity Specification of Wind Energy Storage Systems,” vol. 50, no. 2, pp. 1215–1224, 2014.
- [5] A. M. Howlader, N. Urasaki, A. Yona, T. Senjyu, and A. Y. Saber, “A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 26, pp. 135–146, 2013.
- [6] H. Bludszuweit and J. A. Domínguez-Navarro, “A probabilistic method for energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1651–1658, 2011.
- [7] T. Horiba, “Lithium-ion battery systems,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 1–12, 2014.
- [8] A. Das, K. B. Chimonyo, and R. Kumar, “Vertical Axis and Horizontal Axis Wind School of Electrical Engineering,” *2017 Int. Conf. Energy, Commun. Data Anal. Soft Comput.*, pp. 2660–2669, 2017.
- [9] A. Beainy, C. Maatouk, N. Moubayed, and F. Kaddah, “Comparison of different types of generator for wind energy conversion system topologies,” *2016 3rd Int. Conf. Renew. Energies Dev. Ctries.*, pp. 1–6, 2016.
- [10] M. R. Spiegel, J. Schiller, and R. A. Srinivasan, *Schaum’s Outline: Probability and Statistics, Second Edition*, 2ED ed. MCGRAW HILL COMPANIES.
- [11] W. Mendenhall, R. J. Beaver, and B. M. Beaver, “Introduction to Probability and Statistics - 14th edition,” 14TH 13.,

- Brooks/Cole Publishing Co., 2013, p. 211.
- [12] Z. Song *et al.*, “Multi-objective optimization of a semi-active battery/supercapacitor energy storage system for electric vehicles,” *Appl. Energy*, vol. 135, pp. 212–224, 2014.
 - [13] J. Mcdowatl and S. America, “Conventional Battery Technologies .. Present & Future,” vol. 00, no. c, pp. 1538–1540, 2000.
 - [14] C. Meng, O. Z. Gall, and P. P. Irazoqui, “A flexible super-capacitive solid-state power supply for miniature implantable medical devices,” no. May, 2014.
 - [15] A. Sarkar and D. K. Behera, “Wind Turbine Blade Efficiency and Power Calculation with Electrical Analogy,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 1, pp. 2250–3153, 2012.
 - [16] “Atlantis Solar Wind Turbine 10 kW.” [Online]. Available: https://www.atlantissolar.com/turbine_10kw.html.
 - [17] “Atlantis Solar Wind Turbine 20 kW.” [Online]. Available: https://www.atlantissolar.com/turbine_20kw.html.
 - [18] “Atlantis Solar Wind Turbine 30 kW.” [Online]. Available: https://www.atlantissolar.com/turbine_30kw.html.
 - [19] “Atlantis Solar Wind Turbine 50 kW.” [Online]. Available: https://www.atlantissolar.com/turbine_50kw.html.
 - [20] C. Abbey and G. Joos, “Supercapacitor Energy Storage for Wind Energy Applications,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 769–776, 2007.

BIODATA PENULIS



Irfan Reza Wahyudi. Lahir di Surabaya, 07 Juli 1996. Besar dan mengenyam pendidikan di kota seberang mulai dari TK Semen Gresik, SD Semen Gresik, SMPN 3 Gresik dan SMAN 1 Kebomas, Gresik. Penulis pernah menjadi bagian dari sejarah Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS khususnya Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa yang kini sudah tidak ada serta beberapa kepanitiaan eventual lainnya. Sampai saat ini, penulis adalah penikmat arung jeram dan pemain badminton aktif yang hobi menulis. Untuk keperluan lainnya, penulis bisa ditemui lewat *twitter* @epanreza. Sekian dan terima kasih.

Halaman ini sengaja dikosongkan