



TUGAS AKHIR – ME184834

**ANALISA *COMPRESSED AIR SYSTEM* PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU**

**MUHAMMAD ADHITYA MUSLIM
NRP. 042115 4000 0015**

**Dosen Pembimbing
Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Juniarko Prananda, S.T., M.T.**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2019**



BACHELOR THESIS – ME184834

**ANALISA *COMPRESSED AIR SYSTEM* PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU**

**MUHAMMAD ADHITYA MUSLIM
NRP. 042115 4000 0015**

**Dosen Pembimbing
Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Juniarko Prananda, S.T., M.T.**

**PROGRAM STUDI SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BACHELOR THESIS – ME184834

**COMPRESSED AIR SYSTEM ON WIND POWER PLANT
ANALYSIS**

**MUHAMMAD ADHITYA MUSLIM
NRP. 042115 4000 0015**

SUPERVISOR

**Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Juniarko Prananda, S.T., M.T.**

**UNDERGRADUATE PROGRAM
DEPARTEMENT OF MARINE ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2019**

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA *COMPRESSED AIR SYSTEM* PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

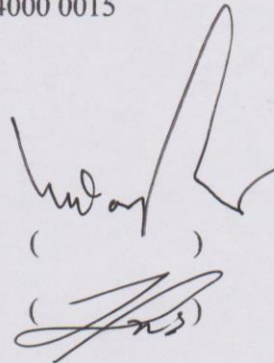
Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*
Program Studi Sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Muhammad Adhitya Muslim
NRP. 042115 4000 0015

Disetujui oleh Pembimbing:

1. **Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.**
NIP. 195808071984031004
2. **Juniarko Prananda, S.T., M.T.**
NIP. 199006052015041001



()
()

Surabaya, Juli 2019

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA COMPRESSED AIR SYSTEM PADA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA BAYU**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi *Marine Electrical and Automation System (MEAS)*
Program Studi Sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Muhammad Adhitya Muslim
NRP. 042115 4000 0015

Disetujui oleh,
Kepala Departemen



Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T.
NIP. 197708022008011007

Surabaya, Juli 2019

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

ANALISA COMPRESSED AIR SYSTEM PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU

Nama Mahasiswa : Muhammad Adhitya Muslim
NRP : 042115 4000 0015
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing 1 : Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Dosen Pembimbing 2 : Juniarko Prananda, S.T., M.T.

Abstrak

Angin merupakan udara yang bergerak dari suatu daerah yang memiliki tekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah, sehingga angin tersebut memiliki energi kinetik. Energi kinetik tersebut dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan turbin angin sebagai media konversi. Angin menggerakkan menghantam sudu-sudu pada dinamo turbin, sehingga energi kinetik diubah menjadi energi rotasi pada dinamo yang selanjutnya akan menghasilkan listrik. Potensi kecepatan angin 5 meter per sekon dapat menghasilkan daya sebesar 60.647 MW dari seluruh Indonesia berdasarkan data dari lampiran Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017. Meninjau letak Indonesia yang berada di garis khatulistiwa, kon-disi angin yang berhembus selalu berubah-ubah dan tidak konstan, sehingga daya yang dihasilkan menjadi kurang optimal karena membutuhkan kecepatan angin yang konstan. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu sistem yang dapat menjaga agar kecepatan angin tetap dalam keadaan konstan sehingga daya yang dihasilkan akan lebih efisien. Salah satu diantaranya adalah menggunakan compressed air system, dimana angin yang berhembus digunakan untuk menggerakkan kompresor, sehingga kompresor tersebut dapat memompa udara ke dalam air receiver. Udara dalam air receiver digunakan untuk menggerakkan turbin angin dengan laju yang konstan sehingga pergerakan turbin dapat bekerja secara optimal. Dari hasil penelitian, compressed air system menggunakan turbin angin dengan jari-jari sudu turbin 2,25 m dan airfoil NACA 4412 mampu menghasilkan torsi sebesar 49,64 Nm dan putaran 135,31 rpm untuk menggerakkan reciprocating compressor dengan free air delivery $9,05 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ dengan minimum torsi 48,47 Nm. Turbin angin dan kompresor dengan jumlah masing-masing 3 buah mampu mendistribusikan angin dengan total kapasitas 365,73 m³ dan kecepatan 10 m/s ke turbin impuls untuk menggerakkan generator dalam 24 jam termasuk saat tidak ada angin berhembus selama maksimal 7 jam 15 menit setiap harinya sehingga dapat menghasilkan daya 1.000 watt secara konstan per jam.

Kata kunci : kecepatan angin konstan, compressed air system, turbin angin

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

COMPRESSED AIR SYSTEM ON WIND POWER PLANT ANALYSIS

Name : Muhammad Adhitya Muslim
NRP : 042115 4000 0015
Department : Marine Engineering
Supervisor 1 : Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng.
Supervisor 2 : Juniarko Prananda, S.T., M.T.

Abstract

Wind is air that moves from an area that has higher pressure to a lower wind, because there's movement in wind, so wind has kinetic energy that can be used as electrical energy by utilizing wind turbines as a conversion medium. Wind moves hit the blades on the turbine dynamo, so that the kinetic energy is changed by men - so the rotational energy at the dynamo will then produce electricity. The potential of 5 meters of wind speed per second can produce power of 60,647 MW from all over Indonesia based on data from the provisions of Presidential Regulation Number 22 Year 2017. Reviewing the location of Indonesia that is in line with the equator, the winds that blow always change and cannot walk, So the resulting power becomes less optimal because it requires constant wind speed. Therefore, we need a system that can make wind speeds remain in the condition of the power produced to be more efficient. The wind that blows is used to drive the compressor, so that the compressor can pump air into the air receiver. The air receiver in the air is used to drive wind turbines at a constant rate so that the turbine rises optimally. From the results of the study, the compressed air system uses a wind turbine with a 2.25 m turbine blade radius and a NACA 4412 airfoil capable of producing torque of 49.64 Nm and 135.31 rpm to drive reciprocating compressors by $9.05 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ with a minimum torque of 48.47 Nm. Wind turbines and compressors with a total of 3 pieces capable of wind with a total capacity of 287.95 m^3 and speeds of 10 m/s to impulse turbines that linked with generator movements within 24 hours including when there is no wind blowing maximum 7 hours 15 minutes at any time so that it can produce 1,000 watts of power constantly per hour.

Keywords : compressed air system, constant wind velocity, wind turbine

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah swt. karena berkat rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “Analisa *Compressed Air System* pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu”. Shalawat serta salam tidak lupa terlimpah curahkan kepada nabi Muhammad saw.. Tidak lupa juga penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang terlibat dalam penelitian ini, yaitu:

1. Ibunda tercinta, Ibu Siti Rakhmah yang selalu berusaha dan mendoakan anak tunggalnya dari lahir hingga saat ini.
 2. Bapak Ir. A. A. Masroeri, M.Eng., D.Eng. dan Bapak Juniarko Prananda, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah banyak memberikan masukan dan membantu penelitian tugas akhir.
 3. Bapak Ir. Sardono Sarwito, M.Sc., Bapak Dr. Eddy Setyo Koenhardono, S.T., M.Sc., dan Bapak Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc. yang telah memberikan masukan-masukan tentang tugas akhir agar menjadi lebih baik ke depannya
 4. Bapak Dr. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc. selaku dosen wali yang telah memberi dukungan kepada penulis.
 5. Fakhri Wasi Auladi, Nadhif Yonda Raditya, Kevin Harris Setiawan, Muhamad Himawan Luthfillah, Hafizha Ega Widityo, dan seluruh teman-teman alumni SMAN 3 Bogor yang sama-sama sedang berjuang di Surabaya.
 6. Fonda Leviany yang selalu memberi dukungan secara penuh hingga tugas akhir selesai.
 7. Deliar Mahardika Candra, Zeffri Irawan, Daud Muhajir, Qathrunnada, Bina Astri Sitoresmi, Aziz Setiawan, Wildan Azka Fillah, Burhanuddin Ahmad, Juwita Maharani Zainur Putri, Waode Melvy Agrina Jalil Silea, dan seluruh keluarga besar Kopma dr. Angka ITS.
 8. Akhbar Buddy Al Afghan, Sultan Brillianto A., Iqbal Rusdan Arief dan keluarga besar Salvage '15 yang telah banyak membantu pengerjaan tugas akhir khususnya dan perkuliahan umumnya.
 9. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu
- Demikian penelitian ini ditulis untuk kebermanfaatannya bersama. Penulis berharap penelitian ini akan bermanfaat bagi dunia ilmu pengetahuan dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juli 2019
Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

	Halaman
Abstrak	ix
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR RUMUS	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR LAMPIRAN	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Angin Di Indonesia	5
2.2 Energi Angin	6
2.3 Turbin Angin.....	7
2.4 <i>Reciprocating</i> Kompresor	16
2.4.1 <i>Positive Displacement</i>	17
2.4.2 <i>Dynamic</i>	21
2.5 Daya Kompresor	22
2.6 <i>Air Receiver</i>	24
2.7 Generator	25
2.8 Distribusi Normal.....	25
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Diagram Alir	27
3.2 Penjabaran Diagram Alir.....	28
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	31
4.1 Analisa Kondisi Angin	31
4.2 Analisa Turbin Angin.....	34
4.2.1 Analisa Desain	34
4.2.2 Analisa Hasil Simulasi	39
4.3 Analisa Kompresor.....	40
4.4 Analisa <i>Air Receiver</i>	44
4.5 Analisa Turbin Impuls.....	46
4.6 Analisa Generator.....	47
4.7 Analisa Sistem.....	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran.....	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	59

BIODATA PENULIS 75

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1 Pengelompokan Potensi Energi, Pemanfaatan, dan Lokasi Potensial	1
Tabel 1.2 Potensi Energi Terbarukan Indonesia Tahun 2015	1
Tabel 2.1 Skala Beaufort	5
Tabel 2.2 Perkembangan Turbin Angin	11
Tabel 2.3 Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Angin Sumbu Horizontal	12
Tabel 2.4 Pertimbangan <i>Tip Speed Ratio</i>	15
Tabel 4.1 Kecepatan Angin	31
Tabel 4.2 Distribusi Normal Standar	33
Tabel 4.3 Spesifikasi NACA	35
Tabel 4.4 Data Sudu Turbin	37
Tabel 4.5 Data Turbin Setelah Optimasi	39
Tabel 4.6 Torsi dan Putaran NACA 4412	40
Tabel 4.7 Spesifikasi Produk	41
Tabel 4.8 Torsi <i>Bare Pump Compressor</i>	43
Tabel 4.9 Spesifikasi Pipa	44
Tabel 4.10 Variasi Tekanan dan Kecepatan Fluida	44
Tabel 4.11 Perhitungan Air Receiver	46
Tabel 4.12 Hasil Simulasi Turbin Impuls	47
Tabel 4.13 Torsi PMG	47
Tabel 4.14 Spesifikasi Turbin Penggerak Kompresor	50
Tabel 4.15 Spesifikasi Kompresor	51
Tabel 4.16 Spesifikasi <i>Air Receiver</i>	51
Tabel 4.17 Spesifikasi Turbin Impuls	52
Tabel 4.18 Spesifikasi <i>Gearbox</i>	52
Tabel 4.19 Spesifikasi Generator	52

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR RUMUS

	Halaman
Rumus (1) Energi Angin	6
Rumus (2) Massa Udara	6
Rumus (3) Daya Angin.....	7
Rumus (4) Daya Turbin.....	7
Rumus (5) Torsi	7
Rumus (6) Koefisien Hambat.....	13
Rumus (7) Koefisien Angkat.....	13
Rumus (8) <i>Reynold's Number</i>	14
Rumus (9) <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	14
Rumus (10) Volume Ruang Kompresi	22
Rumus (11) Efisiensi Volumetrik.....	23
Rumus (12) <i>Free Air Delivery</i>	23
Rumus (13) Massa Udara Tiap Satu Siklus.....	23
Rumus (14) Laju Massa Udara.....	23
Rumus (15) Daya Kompresor.....	24
Rumus (16) Nilai Data Distribusi Normal Standar	26

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Peta Potensi Angin Indonesia	5
Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal	8
Gambar 2.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius	9
Gambar 2.4 Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus	9
Gambar 2.5 Turbin Impuls	10
Gambar 2.6 Turbin Reaks	10
Gambar 2.7 Bagian-Bagian Sudu Turbin	12
Gambar 2.8 Kurva <i>Tip Speed Ratio</i> vs C_p	16
Gambar 2.9 Klasifikasi Kompresor	16
Gambar 2.10 <i>Single Acting Compressor</i>	17
Gambar 2.11 <i>Double Acting Cylinder</i>	18
Gambar 2.12 Kompresor Diafragma	18
Gambar 2.13 <i>Lobe Compressor</i>	19
Gambar 2.14 <i>Vane Compressor</i>	19
Gambar 2.15 <i>Liquid Ring Compressor</i>	20
Gambar 2.16 <i>Screw Compressor</i>	20
Gambar 2.17 <i>Scroll Compressor</i>	21
Gambar 2.18 <i>Centrifugal Compressor</i>	21
Gambar 2.19 <i>Axial Compressor</i>	22
Gambar 2.20 <i>Air Receiver</i>	24
Gambar 2.21 <i>Permanent Magnet Generator</i>	25
Gambar 2.22 Kurva Lonceng	25
Gambar 3.1 Diagram Alir	28
Gambar 3.2 Skema Sistem	29
Gambar 4.1 Distribusi Normal Standar	33
Gambar 4.2 Perencanaan <i>Tip Speed Ratio</i> dan Faktor Daya	34
Gambar 4.3 <i>Airfoil NACA</i>	35
Gambar 4.4 Perbandingan C_l/C_d v α	36
Gambar 4.5 Penampang Melintang Sudu Turbin	36
Gambar 4.6 Kotak Dialog Optimasi	38
Gambar 4.7 Sebelum dan Sesudah Optimasi	38
Gambar 4.8 Torsi vs Jari-Jari	39
Gambar 4.9 Grafik Putaran vs Jari-jari	39
Gambar 4.10 <i>Bare Pump Compressor</i>	40
Gambar 4.11 Desain Turbin Impuls	46
Gambar 4.12 <i>Reduction Gearbox</i>	48
Gambar 4.13 PMG GDG-1kW	48
Gambar 4.14 Grafik Putaran v Daya Generator	49
Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Generator	49
Gambar 4.16 Compressed Air System Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu	50

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 Pengolahan Data Angin	59
Lampiran 2 Cl/Cd v Alpha NACA 4412	60
Lampiran 3 Cl/Cd v Alpha NACA 4418	61
Lampiran 4 Cl/Cd v Alpha NACA 4421	62
Lampiran 5 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,00 m Sebelum Optimasi	63
Lampiran 6 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,25 m Sebelum Optimasi	63
Lampiran 7 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,50 m Sebelum Optimasi	63
Lampiran 8 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,75 m Sebelum Optimasi	64
Lampiran 9 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 3,00 m Sebelum Optimasi	64
Lampiran 10 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4412 Jari-jari 2,00 m	65
Lampiran 11 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4412 Jari-jari 2,25 m	65
Lampiran 12 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4412 Jari-jari 2,50 m	65
Lampiran 13 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4412 Jari-jari 2,75 m	66
Lampiran 14 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4412 Jari-jari 3,00 m	66
Lampiran 15 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4418 Jari-jari 2,00 m	67
Lampiran 16 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4418 Jari-jari 2,25 m	67
Lampiran 17 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4418 Jari-jari 2,50 m	67
Lampiran 18 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4418 Jari-jari 2,75 m	68
Lampiran 19 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4418 Jari-jari 3,00 m	68
Lampiran 20 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4421 Jari-jari 2,00 m	69
Lampiran 21 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4421 Jari-jari 2,25 m	69
Lampiran 22 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4421 Jari-jari 2,50 m	69
Lampiran 23 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4421 Jari-jari 2,75 m	70
Lampiran 24 Spesifikasi Turbin Angin Airfoil NACA 4421 Jari-jari 3,00 m	70
Lampiran 25 Hasil Simulasi Torsi Turbin Kompresor	71
Lampiran 26 Hasil Simulasi Putaran Turbin Kompresor	71
Lampiran 27 Hasil Perhitungan Kompresor	71
Lampiran 28 Katalog Gearbox	72
Lampiran 29 Katalog Kompresor	73
Lampiran 30 Katalog Permanent Magnet Generator(PMG)	74

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki potensi angin yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai salah satu alternatif energi terbarukan. Angin merupakan udara yang bergerak dari suatu daerah yang memiliki tekanan tinggi ke tekanan yang lebih rendah. Karena angin mengalami perpindahan tempat dengan kecepatan tertentu, angin memiliki energi kinetik. Energi kinetik tersebut secara sederhana dikonversi menjadi energi listrik dengan memanfaatkan turbin angin sebagai Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) untuk menggerakkan sudu-sudu yang terhubung dengan poros pada turbin angin. Poros tersebut terhubung pada dinamo turbin, sehingga energi kinetik diubah menjadi energi mekanik dengan gerak rotasi pada dinamo yang selanjutnya akan menghasilkan listrik (Sofiaty & Sumaryati, 2010). Angin yang berhembus pun harus memiliki kecepatan tertentu sebagai kecepatan minimal untuk menggerakkan sudu turbin dan menghasilkan daya yang sesuai dengan kebutuhan generator. Pengelompokan potensi energi angin pada kecepatan tertentu dengan daya yang dihasilkan dan lokasi angin tersebut dapat dilihat pada tabel 1.1.

Tabel 1.1 Pengelompokan Potensi Energi, Pemanfaatan, dan Lokasi Potensial
Sumber: (Soeripno, 2008)

Kelas	Kec. Angin (m/s)	Daya Spesifik (W/m ²)	Kapasitas (kW)	Lokasi (Wilayah)
Skala Kecil	2,5 – 4,0	< 75	s/d 10	Pantai Utara Jawa, NTB, NTT, Maluku, Sulawesi Tenggara
Skala Menengah	4,0 – 5,0	75 – 150	10-100	Pulau-pulau, NTB, NTT, Sulut, Sulsel
Skala Besar	>5,0	> 150	> 100	Sulsel, NTB dan NTT, Pantai Selatan Jawa

Tabel 1.1 merupakan data tentang potensi energi angin dan daerah yang memiliki potensi tersebut. Dari tabel 1.1, potensi angin di Indonesia tidak terlalu besar, namun berprospek. Untuk kecepatan angin 5,0 m/s, potensi daya yang dapat dihasilkan mencapai 100 kW yang secara garis besar berada di bagian selatan wilayah Indonesia, seperti pantai selatan Jawa, Nusa Tenggara Timur, dan Nusa Tenggara Barat. Dari hasil prospek tersebut, pemerintah mengeluarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) energi terbarukan yang salah satunya terdapat angin seperti yang tercantum pada tabel 1.2

Tabel 1.2 Potensi Energi Terbarukan Indonesia Tahun 2015
Sumber: Lampiran 1 RUEN Hal. 20

No	Jenis Energi	Potensi (MW)	Kapasitas Terpasang (MW)	Pemanfaatan (%)
1	Panas Bumi	29.544	1.438,5	4,9
2	Air	75.091	4.826,7	6,4

3	Mini & Mikro Hidro	19.385	197,4	1,0
4	Bioenergi	32.654	1.671,0	5,1
5	Surya	207.898	78,5	0,04
6	Angin	60.647	3,1	0,01
7	Laut	17.989	0,3	0,002

Berdasarkan tabel 1.2, Indonesia memiliki potensi angin yang mampu menghasilkan daya 60.647 MW dengan minimal kecepatan angin yang berhembus adalah 4 m/s, namun potensi tersebut masih dimanfaatkan hanya sebesar 0,04% yang berarti potensi angin yang baru dimanfaatkan untuk menghasilkan daya sebesar 78,5 MW (Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017). Salah satu faktor yang memengaruhi kurang dimanfaatkannya potensi angin di Indonesia karena Indonesia berada di garis khatulistiwa, kecepatan angin yang ada sering kali berbelok dan tidak konstan. Kecepatan angin yang tidak konstan akan memengaruhi performa dari generator yang digerakan dengan energi kinetik angin melalui Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini angin di Indonesia yang berhembus secara tidak konstan dimanfaatkan untuk memutar turbin pada kompresor, lalu angin dari kompresor dipompa ke dalam *air receiver*. Barulah dari *air receiver* tersebut angin dialirkan secara konstan ke sudu turbin impuls pada pembangkit listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan, untuk mengetahui bagaimana *compressed air system* yang bekerja pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yaitu

1. Bagaimana spesifikasi turbin sebagai penggerak kompresor?
2. Bagaimana spesifikasi *compressed air system*?
3. Bagaimana spesifikasi turbin sebagai penggerak generator?
4. Bagaimana analisa sistem keseluruhan terhadap daya yang dihasilkan?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disusun, tujuan dari penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui spesifikasi turbin sebagai penggerak kompresor
2. Mengetahui spesifikasi *compressed air system*
3. Mengetahui spesifikasi turbin sebagai penggerak generator
4. Mengetahui analisa sistem keseluruhan terhadap daya yang dihasilkan

1.4 Manfaat

Berdasarkan tujuan yang telah disusun, penelitian ini bermanfaat

1. Bagi penulis
Sebagai riset awal untuk menjawab permasalahan pembangkit listrik yang menggunakan tenaga angin dan memiliki potensi angin yang cukup baik namun dengan kecepatan yang tidak konstan.
2. Bagi pembaca
Sebagai acuan untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga bayu dengan tipe angin yang fluktuatif.

3. Bagi masyarakat
Menjadi salah satu alternatif sumber energi untuk kehidupan sehari-hari.

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dituliskan, penelitian ini dilakukan dengan batasan

1. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan menggunakan simulasi dan perhitungan.
2. Kecepatan angin yang digunakan sebesar 5 m/s dengan akumulasi waktu angin berhembus dalam satu hari disesuaikan dengan rata-rata waktu angin yang berhembus pada daerah yang memiliki potensi angin untuk dikembangkan menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), yakni daerah yang memiliki kecepatan angin lebih dari 4 m/s (skala menengah dan skala besar).

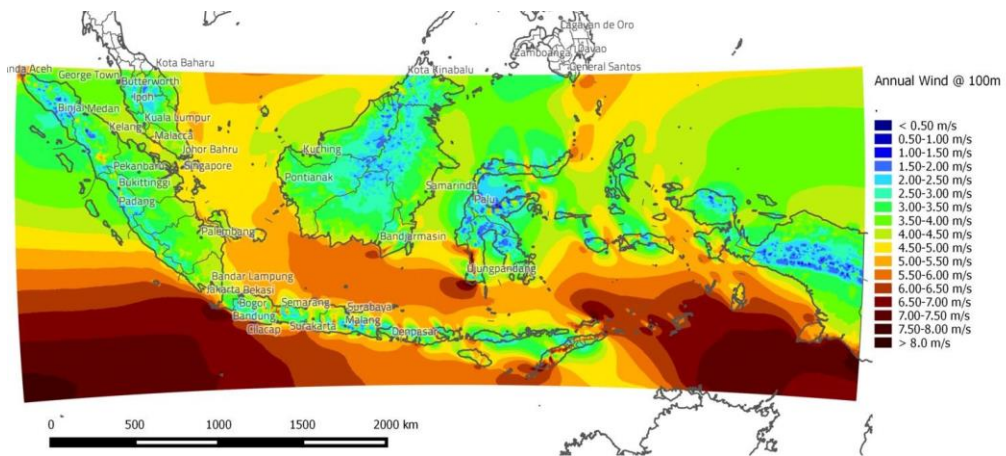
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Angin Di Indonesia

Angin merupakan udara yang bergerak dari kondisi tekanan tertentu ke tekanan yang lebih rendah. Indonesia memiliki potensi angin yang cukup besar terutama dibagian pesisir pantai dan di daerah laut. Sedangkan untuk di daerah daratan, Indonesia memiliki kecepatan angin yang sangat rendah, data tersebut bisa dilihat pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Peta Potensi Angin Indonesia
Sumber: *maps-indonesia.com*

Dengan merujuk gambar 2.1, daratan yang memiliki potensi angin terbesar terlihat sepanjang pulau Jawa, Madura, Bali, hingga ke Nusa Tenggara. Sedangkan untuk pulau lain cenderung kecepatan angin yang rendah seperti pulau Sumatera, Kalimantan, bagian tengah pulau Maluku, dan pulau Papua. Kecepatan angin pun dapat diklasifikasikan untuk mempermudah mengidentifikasi persebaran kecepatan angin dalam suatu daerah, yakni berdasarkan skala beaufort seperti yang tercantum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Skala Beaufort
Sumber: (Perry & Walker, 1977)

Skala Beaufort	Deskripsi	Kecepatan Angin (m/s)
1	Tenang	0 – 0,3
2	Sedikit tenang	0,3 – 1,5
3	Sedikit hembusan	1,5 – 3,3
4	Hembusan angin pelan	3,3 – 5,5
5	Hembusan angin sedang	5,5 - 8
6	Sejuk	8 – 10,8

7	Hembusan angin kuat	10,8 – 13,9
8	Mendekati kencang	13,9 – 17,2
9	Kencang	17,2 – 20,7
10	Kencang sekali	20,7 – 24,5
11	Badai	24,5 – 28,4
12	Badai dasyat	28,4 – 32,6
13	Badai topan	> 32,6

Berdasarkan tabel 2.1, angin di dataran Indonesia secara garis besar masuk dalam skala beaufort 1 sampai 4, untuk di daerah pesisir memiliki masuk dalam skala 4 sampai 5, dan untuk di daerah laut serta barisan pulau bagian selatan Indonesia sebagian besar masuk dalam skala 3 – 6.

2.2 Energi Angin

Angin memiliki energi kinetik sama halnya dengan energi kinetik yang dimiliki oleh sebuah benda yang memiliki kecepatan sebesar v m/s dan massa sebesar m kg (Liu, Miao, Liu, & Yang, 2009) atau yang dapat dituliskan dalam rumus (1) sebagai berikut

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Keterangan:

- E = energi (joule)
- m = massa udara (kg)
- v = kecepatan angin (m/s)

Massa dalam udara sendiri dalam suatu satuan kg dapat dijabarkan menjadi massa jenis udara dalam ρ kg/m³, dikalikan dengan suatu blok udara dengan luas penampang A m², aliran udara yang memiliki kecepatan v m/s dan mengalir pada waktu t s, atau yang dapat dijabarkan dalam rumus (2)

$$m = \rho A v t \quad (2)$$

Keterangan:

- m = massa udara (kg)
- ρ = massa jenis angin (kg/m³)
- A = luas penampang melintang aliran (m²)
- v = kecepatan angin (m/s)
- t = waktu (s)

Untuk mengetahui daya yang dimiliki oleh angin, maka rumus (2) disubstitusikan kepada rumus (1) dan dibagi waktu dalam s, karena daya merupakan energi per satuan waktu, sehingga dalam kondisi ideal dapat dituliskan dalam rumus sebagai berikut

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3)$$

Keterangan:

P	= daya angin (watt)
ρ	= massa jenis angin (kg/m ³)
A	= luas penampang melintang aliran (m ²)
v	= kecepatan angin (m/s)

2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah kincir angin yang digerakan oleh tenaga angin dan digunakan untuk membangkitkan mengubah energi kinetik angin menjadi energi yang lain sesuai dengan kebutuhan, biasanya turbin angin digunakan untuk menggerakkan generator. Pada awalnya turbin angin digunakan untuk mengakomodasi kebutuhan para petani untuk keperluan irigasi, penggilingan padi, pembuatan tepung, dan lain sebagainya yang membutuhkan energi mekanik. Pada zaman sekarang, turbin angin menjadi salah satu alternatif energi terbarukan untuk pembangkit listrik. Angin yang berhembus dengan kecepatan konstan memiliki momentum untuk menggerakkan sudu-sudu turbin angin, sehingga turbin angin berputar sehingga menghasilkan suatu daya. Daya turbin angin hampir serupa dengan daya angin pada rumus (3) namun dikalikan dengan faktor daya dari spesifikasi turbin angin tersebut. Batas maksimum daya yang dapat dihasilkan oleh turbin angin adalah dengan faktor daya 16/27. Angka 16/27 (=59.3%) ini disebut batas Betz atau *Betz limit* yang berasal dari ilmuwan asal Jerman, yakni Albert Betz. Angka ini secara teori menunjukkan efisiensi maksimum yang dapat dicapai oleh rotor turbin, seperti yang dituliskan dalam rumus (4)

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (4)$$

Keterangan

P	= daya turbin (watt)
ρ	= massa jenis angin (kg/m ³)
A	= luas penampang melintang aliran (m ²)
v	= kecepatan angin (m/s)
C _p	= faktor daya

Daya yang dihasilkan berasal dari putaran sudu turbin yang terhubung dengan poros dan generator. Daya yang dihasilkan dan putaran sudu turbin memiliki hubungan dengan torsi, dimana torsi merupakan hasil bagi daya turbin angin dan kecepatan angular pada ujung turbin, seperti yang tercantum pada rumus (5)

$$\tau = \frac{P}{\omega} \quad (5)$$

Keterangan

τ	= torsi (nm)
P	= daya (watt)
ω	= kecepatan angular (rad/s)

Turbin angin sebagai mesin konversi energi jika ditinjau dari arah sumbu rotasi motor dapat diklasifikasikan menjadi dua macam, yakni turbin angin sumbu horizontal

atau yang dapat disebut TASH dan turbin angin sumbu vertikal atau yang dapat disebut TASV.

1. Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH)



Gambar 2.2 Turbin Angin Sumbu Horizontal
Sumber: *turbinesinfo.com*

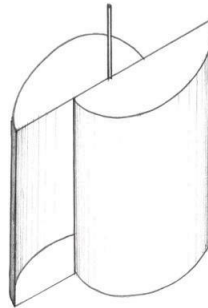
Berdasarkan Gambar 2.2, turbin angin sumbu horizontal (TASH) memiliki poros rotor utama dan generator listrik di puncak menara. Turbin berukuran kecil diarahkan oleh sebuah baling-baling angin (baling-baling cuaca) yang sederhana, sedangkan turbin berukuran besar pada umumnya menggunakan sebuah sensor angin yang digandengkan ke sebuah servo motor. TASV sebagian besar memiliki sebuah gearbox yang mengubah perputaran kincir yang pelan menjadi lebih cepat berputar. Karena sebuah menara menghasilkan turbulensi di belakangnya, turbin biasanya diarahkan melawan arah anginnya menara. Bilah-bilah turbin dibuat kaku agar mereka tidak terdorong menuju menara oleh angin berkecepatan tinggi. Sebagai tambahan, bilah-bilah itu diletakkan di depan menara pada jarak tertentu dan sedikit dimiringkan. Karena turbulensi menyebabkan kerusakan struktur menara, dan realibilitas begitu penting, sebagian besar TASH merupakan mesin *upwind* (melawan arah angin). Meski memiliki permasalahan turbulensi, mesin *downwind* (menurut jurusan angin) dibuat karena tidak memerlukan mekanisme tambahan agar mereka tetap sejalan dengan angin, dan karena di saat angin berhembus sangat kencang, bilah-bilahnya bisa ditekuk sehingga mengurangi wilayah tiupan mereka dan dengan demikian juga mengurangi resintensi angin dari bilah-bilah itu.

Turbin angin sumbu horizontal pun memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan turbin angin sumbu horizontal adalah dasar menara yang tinggi membolehkan akses ke angin yang lebih kuat di tempat-tempat yang memiliki geseran angin (perbedaan antara laju dan arah angin antara dua titik yang jaraknya relatif dekat di dalam atmosfer bumi. Di sejumlah lokasi geseran angin, setiap sepuluh meter ke atas, kecepatan angin meningkat sebesar 20%. Sedangkan kekurangan turbin sumbu horizontal diantaranya adalah untuk menara yang tinggi serta bilah yang panjangnya bisa mencapai 90 meter sulit untuk proses pengangkutan, sulit dalam proses instalasi, membutuhkan konstruksi yang sangat kuat untuk menopang beban yang berat (sudu turbin, *gearbox*, dan

generator), dan membutuhkan mekanisme kontrol yaw tambahan untuk membelokkan kincir ke arah angin.

2. Turbin Angin Sumbu Vertikal (TASV)

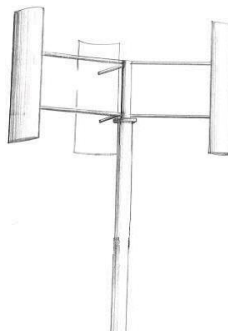
Turbin angin sumbu vertikal/tegak (atau TASV) memiliki poros rotor utama yang disusun tegak lurus. Kelebihan utama susunan ini adalah turbin tidak harus diarahkan ke angin agar menjadi efektif. Kelebihan ini sangat berguna di tempat-tempat yang arah anginnya sangat bervariasi. TASV mampu mendayagunakan angin dari berbagai arah. Terdapat dua jenis turbin angin sumbu vertikal, yakni savonius dan darrieus.



Gambar 2.3 Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Savonius

Sumber: www.getsttpln.com

TASV diciptakan oleh seorang insinyur Finlandia SJ Savonius pada tahun 1929. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.3, kincir TASV ini merupakan jenis yang paling sederhana dan menjadi versi besar dari anemometer. Kincir Savonius dapat berputar karena adanya gaya dorong dari angin, sehingga putaran rotornya tidak akan melebihi kecepatan angin. Meskipun daya koefisien untuk jenis turbin angin bervariasi antara 30% sampai 45%, menurut banyak peneliti untuk jenis Savonius biasanya tidak lebih dari 25%. Jenis turbin ini cocok untuk aplikasi daya yang rendah dan biasanya digunakan pada kecepatan angin yang berbeda.



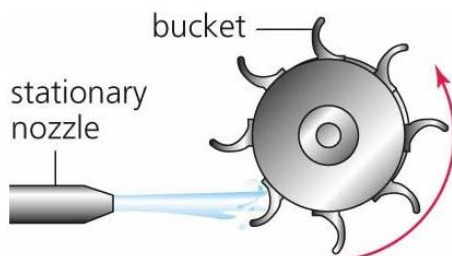
Gambar 2.4 Turbin Angin Sumbu Vertikal Jenis Darrieus

Sumber: www.getsttpln.com

Type Darrieus TASV ditemukan oleh seorang insinyur Perancis George Jean Maria Darrieus yang dipatenkan pada tahun 1931. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.4, kincir angin Darrieus TASV mempunyai bilah sudu yang disusun dalam posisi simetri dengan sudu bilah yang diatur relatif terhadap poros. Pengaturan ini cukup efektif untuk menangkap berbagai arah angin. Berbeda dengan Savonius, kincir angin Darrieus bergerak dengan memanfaatkan gaya angkat yang terjadi ketika angin bertiup. Bilah sudu turbin Darrieus bergerak berputar mengelilingi sumbu.

Selain dari posisi sudu turbin, turbin pun bisa diklasifikasikan berdasarkan sifat fluida yang bekerja pada turbin tersebut, yakni turbin reaksi dan turbin impuls (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2009). Turbin tersebut biasanya digunakan dengan menggunakan *incompressible fluid* seperti air, namun pada penelitian kali ini peneliti mencoba untuk menggunakan *compressible fluid* yakni udara.

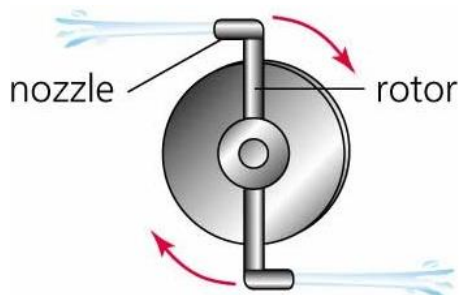
1. Turbin Impuls



Gambar 2.5 Turbin Impuls
Sumber: artikel-teknologi.com

Turbin impuls merupakan turbin yang bekerja dengan memanfaatkan fluida yang mengenai sudu-sudu turbin sehingga turbin bergerak dengan memanfaatkan impuls hasil dari momen dengan fluida yang bergerak seperti ilustrasi yang tampak pada gambar 2.5. Turbin impuls banyak digunakan oleh turbin-turbin modern seperti turbin pelton, turgo, dan *crossflow*.

2. Turbin Reaksi



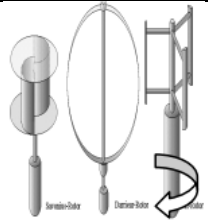
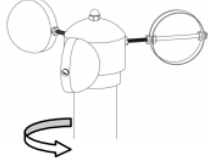


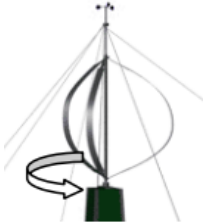
Gambar 2.6 Turbin Reaksi
Sumber: artikel-teknologi.com


Turbin reaksi adalah turbin yang memanfaatkan aliran fluida pada *nozzle* atau bentuk sudu turbin yang terhubung pada poros sehingga turbin berputar seperti ilustrasi pada gambar 2.6. Contoh turbin reaksi yang banyak ditemukan dalam kehidupan sehari-hari adalah turbin prancis, propeller, dan Kaplan.

Berdasarkan sejarah perkembangan, turbin angin mulai digunakan sejak zaman Persia hingga zaman sekarang, penggunaan turbin angin pun mulai dari keperluan ladang hingga menjadi pembangkit listrik, seperti yang tercantum dalam tabel 2.2 (Hau, 2006).

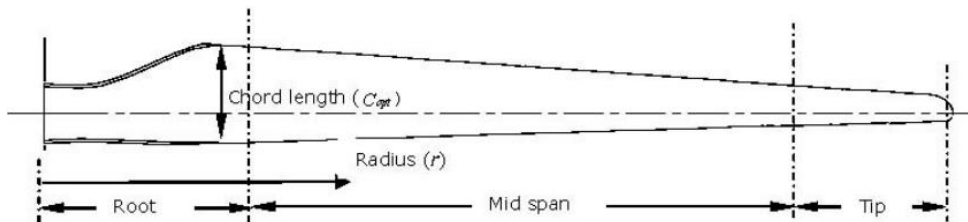
Tabel 2.2 Perkembangan Turbin Angin

Sumber: (Hau, 2006)

No.	Desain	Jenis Turbin	Penggunaan	Propulsi	Efisiensi		Gambar
1	Savonius	TASV	Semenjak zaman Persia hingga menjadi ventilasi di zaman modern	Drag	16%		
2	Cup	TASV	Anemometer	Drag	8%		
3	American farm windmill	TASH	Memompa air, menggiling gandum, dan menghasilkan listrik semenjak abad ke-18 hingga hari ini	Lift	31%		
4	Dutch windmill	TASH	Penggiling gandum pada abad ke-16	Lift	27%		
5	Darrieus (egg beater)	TASV	Banyak digunakan sebagai pembangkit listrik pada abad ke 20	Lift	40%		
6	Turbin angin modern	TASH	Banyak digunakan se-	Lift	Jumlah Sudu	Efisiensi	

			bagai pem- bangkit listrik pada abad ke 20		1	$\pm 43\%$	
					2	$\pm 47\%$	
					3	$\pm 50\%$	

Selain dari jenis turbin angin, daya angin pun dapat dioptimalkan lebih baik dengan mengoptimalkan desain pada sudu turbin tersebut. Ada beberapa pertimbangan dalam mendesain turbin angin, diantaranya adalah jumlah sudu, jenis *airfoil* yang digunakan, dan perancangan *tip speed ratio* (TSR) pada turbin yang akan digunakan.



Gambar 2.7 Bagian-Bagian Sudu Turbin
 Sumber: (Schubel & Crossley, 2012)

Sudu adalah bagian dari turbin angin yang bertugas menerima energi kinetik angin dan merubahnya menjadi energi gerak putar (mekanik) pada poros penggerak. Berdasarkan gambar 2.7. Jari-jari sudu turbin yang memanjang terdiri dari tiga bagian, yakni *root*, *mid span*, dan *tip*. *Root* merupakan bagian sudu turbin yang menghubungkan dengan sudu *hub* (poros) pada turbin angin. Ada beberapa faktor yang harus diperhitungkan dalam mendesain sudu turbin, diantaranya adalah

a. Jumlah Sudu

Jumlah sudu yang dimiliki oleh turbin memengaruhi performa dari daya yang dihasilkan, jumlah sudu untuk turbin angin sumbu horizontal memiliki nilai optimal pada jumlah sudu 3, jika lebih atau kurang maka performa turbin akan semakin menurun, seperti yang dijelaskan pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Pengaruh Jumlah Sudu Turbin Angin Sumbu Horizontal
 Sumber: (Hau, 2006)

Jumlah Sudu	Keterangan
1	▪ Mengurangi ratio gearbox

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kecepatan lebih tinggi yang berarti lebih berisik dan lebih beresiko mengenai hewan khususnya burung ▪ Lebih mudah dipasang ▪ Menangkap 10% energi lebih sedikit dibandingkan desain dengan 2 sudu
2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Membutuhkan peredam beban karena ketidakseimbangan giroskopis ▪ Menangkap 5% energi lebih sedikit dibandingkan desain dengan 3 sudu
3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mengurangi ratio gearbox ▪ Kecepatan lebih tinggi yang berarti lebih berisik dan lebih beresiko mengenai hewan khususnya burung ▪ Lebih mudah dipasang ▪ Lebih seimbang ▪ Kecepatan yang lebih rendah ▪ Meningkatkan rasio gearbox

b. *Airfoil*

Airfoil adalah bentuk dari suatu sudu turbin yang dapat menghasilkan gaya angkat (*lift*) atau efek aerodinamika ketika melewati suatu aliran udara. Bentuk dari *airfoil* dapat menghasilkan gaya angkat (*lift*) dan gaya hambat (*drag*). Untuk turbin angin bertipe horizontal membutuhkan gaya angkat (*lift*) yang besar dan sebisa mungkin membuat gaya hambat (*drag*) kecil. Sedangkan untuk turbin angin bertipe vertikal dilakukan hal sebaliknya (Schmitz, 1967).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (6)$$

Keterangan:

- C_D = koefisien hambat
 F_D = gaya hambat (N)
 ρ = massa jenis angin (kg/m^3)
 A = luas penampang melintang aliran (m^2)
 v = kecepatan angin (m/s)

Pada rumus (6) dapat dijelaskan bahwa jika kecepatan angin v menerpa *airfoil* dengan luas bidang bagian bawah *airfoil* dengan luas A mengakibatkan adanya perbedaan tekanan dan hambatan viskos pada ujung bagian belakang, maka perbandingan gaya hambat terhadap terhadap energi kinetik angin disebut sebagai koefisien hambat.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho A v^2} \quad (7)$$

- C_L = koefisien angkat
 F_L = gaya hambat (N)

ρ	= massa jenis angin (kg/m^3)
A	= luas penampang melintang aliran (m^2)
v	= kecepatan angin (m/s)

Pada rumus (7) dapat dijelaskan bahwa jika kecepatan angin V menerpa *airfoil* dengan luas bidang bagian bawah *airfoil* dengan luas A mengakibatkan adanya perbedaan tekanan dan hambatan viskos pada ujung bagian belakang, maka perbandingan gaya angkat terhadap terhadap energi kinetik angin disebut sebagai koefisien angkat.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\mu} \quad (8)$$

Keterangan

Re	= <i>reynold's number</i>
ρ	= massa jenis udara (kg/m^3)
v	= kecepatan angin (m/s)
l	= panjang <i>chord</i> pada <i>airfoil</i> (m)
μ	= viskositas dinamis udara (kg/m.s)

Rumus (8) merupakan perhitungan *reynold's number* untuk *airfoil* pada tiap *chord* untuk mengetahui nilai perbandingan antara gaya inersia dengan gaya kohesi antara molekul gas untuk mengetahui jenis aliran yang mengalir pada *airfoil* tersebut (laminer atau turbulen). Nilai viskositas udara bisa dicari dengan menggunakan tabel properti udara.

Salah satu *airfoil* yang sering digunakan adalah *airfoil* tipe *National Advisory Committee for Aeronautics* atau *NACA*. *NACA* adalah salah satu bentuk *airfoil* aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bodi lainnya dan dengan bantuan penyelesaian matematis sangat memungkinkan untuk memprediksi berapa besarnya gaya angkat yang dihasilkan oleh suatu bodi *airfoil*. Geometri *airfoil* memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik aerodinamika dengan parameter penting berupa koefisien angkat dan koefisien hambat.

c. *Tip Speed Ratio* (TSR)

Tip speed ratio adalah perbandingan antara kecepatan ujung blade dengan kecepatan angin yang melaluinya. Bila $TSR > 1$ artinya lebih banyak bagian blade yang mengalami gaya angkat. Apabila $TSR < 1$ artinya lebih banyak bagian blade yang mengalami gaya hambat. Sebisa mungkin kita mendesain blade dengan $TSR > 1$ guna mendapat gaya angkat lebih banyak. TSR bisa ditentukan dengan melihat rumus (8)

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (9)$$


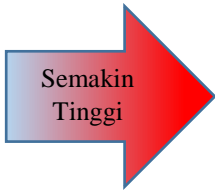
Keterangan

λ	= <i>tip speed ratio</i>
R	= jari-jari sudu
ω	= kecepatan angular (rad/s)
v	= kecepatan angin (m/s)

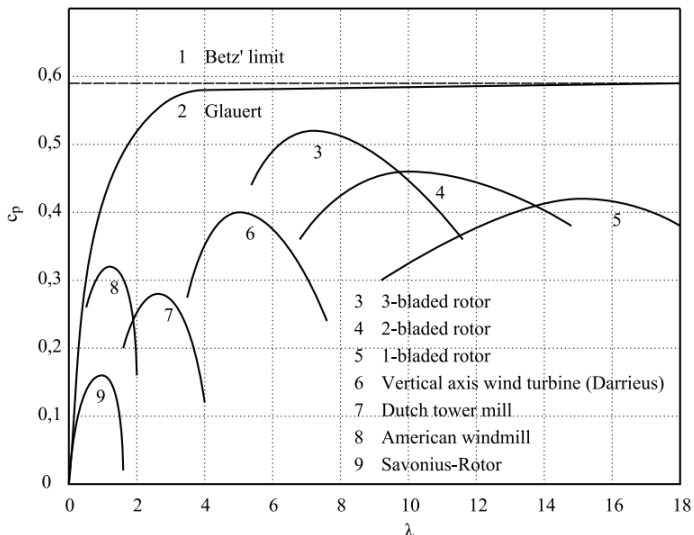
Berdasarkan rumus (8) nilai TSR bisa ditentukan dengan mengalikan kecepatan sudut sebesar ω rad/s dengan jari-jari sudu sepanjang R m dan dibagi dengan kecepatan angin sebesar v m/s.

Tabel 2.4 Pertimbangan *Tip Speed Ratio*

Sumber: (Gasch & Twele, 2002)

Tip Speed Ratio	 Semakin Rendah	 Semakin Tinggi
Keterangan	TSR dengan jumlah satu atau dua sudah tergolong sangat rendah	TSR dengan nilai diatas 10 tergolong tinggi
Penggunaan	Kincir angin tradisional dan pompa air	Sebagian besar digunakan untuk purwarupa satu atau dua sudu
Torsi	Semakin meningkat	Semakin berkurang
Efisiensi	Berkurang drastis setelah nilai TSR berada di bawah 5	Tidak terlalu meningkat setelah nilai TSR lebih dari 8
Tekanan Sentrifugal	Semakin berkurang	Bertambah
Tekanan Aerodinamis	Semakin berkurang	Bertambah secara proporsional sesuai dengan kecepatan rotasi
Luas Kerapatan	Meningkat, membutuhkan sekitar 20 sudu	Berkurang drastis
Penampang Sudu	Semakin luas	Semakin sempit
Bentuk Aerodinamis	Semakin sederhana	Semakin rumit

Untuk menentukan besarnya TSR yang digunakan memerlukan beberapa pertimbangan seperti yang tercantum pada tabel 2.4. Pertimbangan penyesuaian TSR untuk menghasilkan listrik disesuaikan dengan kebutuhan generator yang harus memiliki kecepatan konstan. Turbin pada zaman terdahulu memiliki TSR rendah karena difokuskan untuk keperluan ladang yang membutuhkan torsi yang tinggi, berbeda dengan turbin angin di zaman modern yang memfokuskan kerja turbin angin sebagai pembangkit listrik. Turbin angin zaman modern yang banyak digunakan untuk pembangkit listrik sebagian besar berada pada TSR 5 hingga 8 karena memiliki efisiensi yang tinggi terutama pada turbin angin sumbu horizontal dengan jumlah sudu 3. Untuk mengetahui besar pengaruh *tip speed ratio* terhadap faktor daya bisa dengan menggunakan referensi pada gambar 2.8.

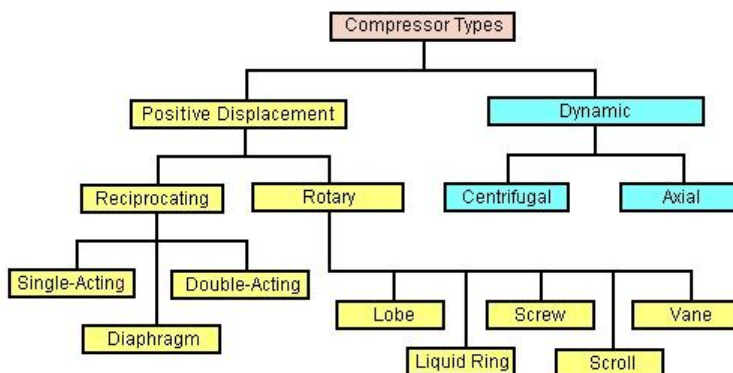


Gambar 2.8 Kurva *Tip Speed Ratio* vs C_p
 Sumber: (Hau, 2006)

Berdasarkan Gambar 2.8, melalui TSR dan jenis turbin yang digunakan, kita dapat menentukan faktor daya dalam mendesain turbin angin, seperti pada TSR 7 menggunakan turbin angin sumbu horizontal didapatkan faktor daya 0,52.

2.4 *Reciprocating* Kompresor

Compressed air system adalah sistem dimana kompresor digerakan oleh turbin kompresor, bukan oleh motor lalu udara dari kompresor tersebut ditampung dalam *air reservoir* untuk selanjutnya dialirkan secara konstan ke turbin generator. Komponen utama dalam *compressed air system* adalah kompresor. Kompresor adalah mesin atau alat mekanik yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan atau memampatkan fluida gas atau udara. Prinsip kerja kompresor mirip dengan paru-paru manusia yakni dengan mengisap udara lalu mengalirkannya kembali. Kompresor diklasifikasi menjadi dua berdasarkan cara mengalirkan fluida (Hanlon, 2001)



Gambar 2.9 Klasifikasi Kompresor
 Sumber: *intechopen.com*

Secara garis besar kompresor dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu *positive displacement compressor* dan *dynamic compressor (turbo)*. *Positive displacement compressor*, terdiri dari *reciprocating* dan *rotary*, sedangkan *dynamic compressor* terdiri dari *centrifugal* dan *axial*.

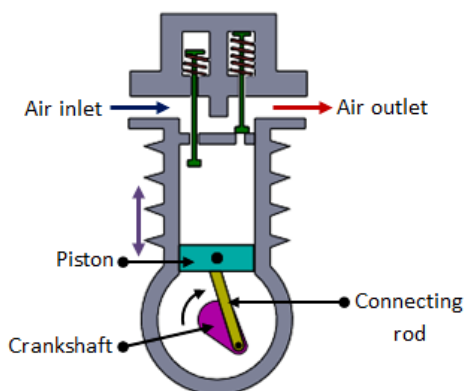
2.4.1 Positive Displacement

Positive displacement compressor atau yang dapat disebut kompresor dengan perpindahan positif adalah kompresor yang bekerja dengan cara memindahkan aliran fluida dengan jumlah yang konstan. Kompresor jenis ini digunakan untuk mengalirkan fluida dengan tekanan tinggi.

a. Reciprocating

Reciprocating compressor atau kompresor torak adalah kompresor yang bekerja memindahkan fluida dengan menggunakan toraks atau piston. *Reciprocating compressor* memiliki beberapa bagian, diantaranya adalah *cylinder head* (terdapat *inlet valve* dan *outlet valve*), toraks, silinder, dan ruang kompresi (ruang yang dibatasi oleh silinder, titik mati bawah toraks, dan titik mati atas). Secara garis besar, *reciprocating compressor* memiliki tiga tahap dalam mengompresikan udara. Langkah pertama adalah *suction* atau langkah hisap dimana air dari lingkungan sekitar dihisap oleh kompresor. Pada langkah ini, toraks bergerak ke titik mati bawah (TMB), pada tekanan tertentu, *inlet valve* akan tertarik karena tekanan udara diluar ruang kompresi menjadi lebih rendah, lalu udara pun masuk ke dalam ruang kompresi. Langkah kedua adalah langkah kompresi, dimana piston atau toraks bergerak dari titik mati bawah ke titik mati atas (TMA) sehingga terjadi kompresi udara. Langkah terakhir adalah *discharge* atau langkah buang, dimana setelah terjadi kompresi, pada tekanan tertentu *outlet valve* akan terdorong sehingga udara pada ruang kompresi akan dihembuskan keluar dari melalui *outlet valve*.

- *Single-Acting*

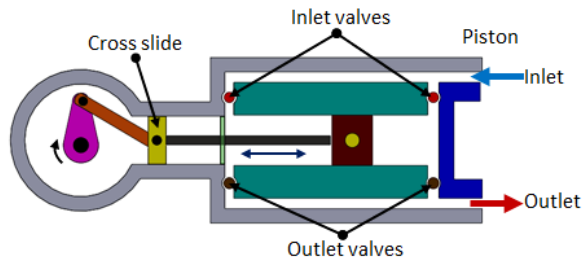


Gambar 2.10 *Single Acting Compressor*

Sumber: nptel.ac.in

Single acting compressor adalah tipe *reciprocating compressor* yang memiliki satu *inlet* dan satu *outlet* seperti pada gambar 2.10. *Single acting* memiliki kelebihan dapat memompakan udara dengan tekanan lebih tinggi dan konstruksi lebih sederhana jika dibandingkan dengan *double acting cylinder*.

- *Double Acting*

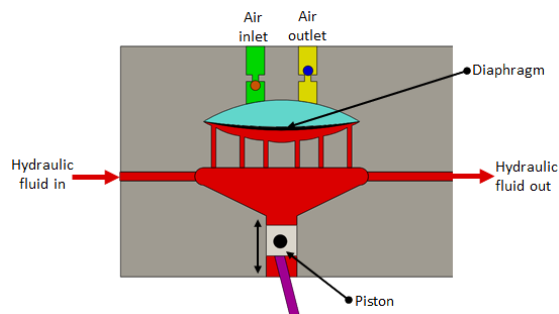


Gambar 2.11 *Double Acting Cylinder*

Sumber: nptel.ac.in

Double acting compressor adalah tipe *reciprocating compressor* yang memiliki dua buah *inlet* dan dua buah *outlet*. Kompresor jenis ini disebut *double acting* karena dapat melakukan *suction* dan *discharge* secara bersamaan. Sebagai contoh, pada gambar 2.11 pada saat langkah *suction* di *inlet valve 1*, terjadi langkah *discharge* pada *outlet valve 2*, hal ini dikarenakan dari dua *inlet* dan dua *outlet* terhubung oleh 1 piston yang membagi menjadi dua ruang kompresi seperti yang telah dijelaskan pada gambar 2.11.

- Diafragma



Gambar 2.12 Kompresor Diafragma

Sumber: indotara.co.id

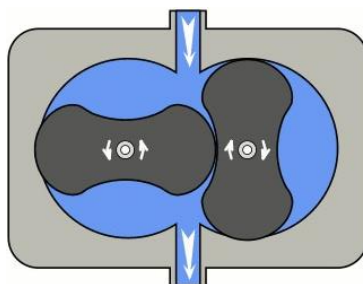
Kompresor diafragma atau *diaphragm compressor* termasuk dalam salah satu *reciprocating compressor* karena menggunakan piston. Diafragma bisa digunakan untuk memompa dua fluida sekaligus. Bisa dilihat pada gambar 2.12, bahwa membran diafragma berguna untuk menghisap udara, dan membran diafragma sendiri terhisap oleh

gerakan piston pada langkah hisap. Kompresor jenis diafragma biasanya digunakan dalam bidang yang membutuhkan ke higienisan seperti pada industri makanan dan obat-obatan.

b. *Rotary*

Rotary compressor atau kompresor putar adalah kompresor yang bekerja dengan memindahkan udara dengan memampatkan udara tersebut. Udara dipindahkan pada suatu ruangan dalam kompresor yang bergerak secara rotasi sehingga udara dapat dipindahkan. Jenis-jenis *rotary compressor* diantaranya adalah *lobe*, *liquid ring*, *screw*, *scroll*, dan *vane*.

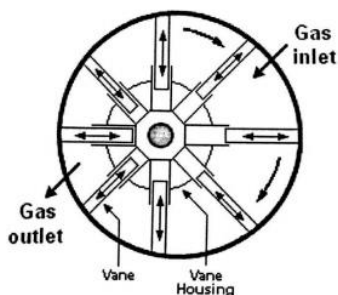
- *Lobe*



Gambar 2.13 *Lobe Compressor*
Sumber Wikimedia.org

Lobe compressor atau disebut juga dengan *root blower compressor* merupakan kompresor yang bekerja dengan cara memutar dua *lobe* atau sudu yang bersinggungan di satu titik satu sama lain serta berada dalam ruang kompresi yang berbentuk dua lingkaran yang saling berpotongan seperti yang tampak pada ilustrasi gambar 2.13. *Lobe compressor* banyak digunakan untuk *blower*. *Lobe compressor* memiliki kelebihan, yakni dapat menyalurkan udara secara konstan, sehingga tekanan yang diterima oleh *air receiver* juga terus meningkat

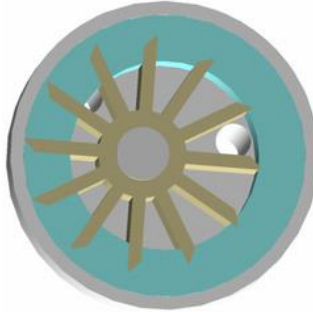
- *Vane*



Gambar 2.14 *Vane Compressor*
Sumber: mechdiploma.com

Vane compressor atau disebut juga *rotary vane air compressor* merupakan pompa yang menggunakan *shaft* yang terhubung dengan sudu, sehingga sudu tersebut bisa memindahkan udara dengan menciptakan ruang kompresi antara sudu *vane compressor* dengan silinder kompresor seperti yang tampak pada gambar 2.14. Volume pada bagian *intake* lebih besar daripada volume pada bagian *exhaust* dikarenakan poros rotor tidak berada tepat pada tengah lingkaran silinder, sehingga udara dapat disalurkan dengan tekanan tertentu.

- *Liquid Ring*



Gambar 2.15 *Liquid Ring Compressor*
Sumber: wikipedia.org

Liquid ring compressor memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan *vane compressor*, hanya saja baling-baling merupakan bagian integral dari rotor dan fungsi *liquid ring* sebagai segel ruang untuk kompresi seperti yang tampak pada gambar 2.15. *Liquid ring* didesain gesekan rendah. *Liquid ring compressor* memiliki kelebihan, yakni rotor menjadi satu-satunya bagian yang bergerak maka gesekan geser terbatas pada segel poros, pengoperasian lebih mudah jika dibandingkan kompresor lain, dan *maintenance* yang mudah. Namun *liquid ring compressor* memiliki kekurangan, yaitu efisiensi yang rendah.

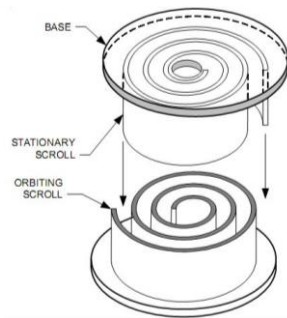
- *Screw*



Gambar 2.16 *Screw Compressor*
Sumber: clubtechnical.com

Screw compressor adalah salah satu jenis *rotary compressor* yang bekerja dengan menggunakan gerak sentrifugal. Memiliki bentuk seperti ulir pada sekrup dan bekerja mirip seperti *gear*. Udara disalurkan melalui ulir pada *screw compressor*.

- *Scroll*



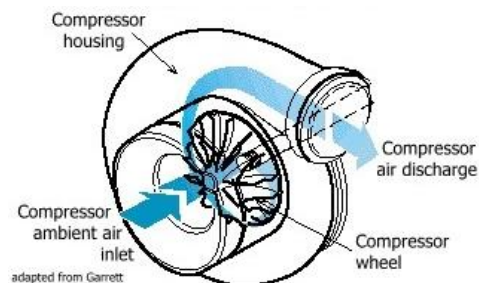
Gambar 2.17 *Scroll Compressor*
Sumber: theworkshopcompressor.com

Scroll compressor adalah kompresor yang melakukan kompresi dengan menggunakan dua bagian, yakni *stationary scroll* atau *scroll* yang tidak bergerak dengan *orbiting scroll* atau *scroll* yang bergerak seperti yang tampak pada gambar 2.17. *Orbiting scroll* bergerak secara sentrifugal sehingga udara dari bagian terluar diameter *scroll* sehingga udara bergerak dari bagian terluar *scroll* ke pusat *scroll*, hal ini dikarenakan bentuk *scroll* adalah spiral. *Scroll compressor* memompakan udara secara tegak lurus.

2.4.2 *Dynamic*

Dynamic compressor adalah kompresor yang bergerak dengan cara merubah energi kinetik yaitu putaran impeller (balung-balung penggerak pada kompresor) menjadi energi potensial yaitu tekanan. Kompresor dinamis memiliki karakteristik dapat mengalirkan fluida dalam debit yang besar.

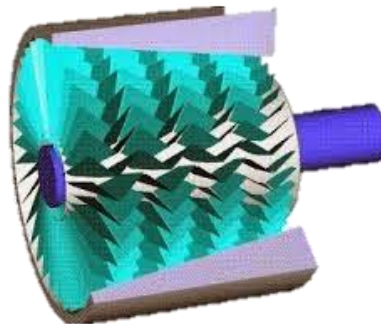
- Centrifugal*



Gambar 2.18 *Centrifugal Compressor*
Sumber: rikynurgiantoro.blogspot.com

Centrifugal compressor merupakan kompresor yang menggunakan gerak sentrifugal *impeller* untuk menghasilkan tekanan yang mengalirkan fluida karena adanya perbedaan tekanan dari sisi *inlet* dan *outlet* pada kompresor sentrifugal. Ilustrasi kompresor sentrifugal tampak pada gambar 2.18. Kompresor sentrifugal memiliki karakteristik seperti aliran udara pada *outlet* bersifat *uniform*, *range* dari kapasitas yang dialirkan cukup besar, tekanan pada sisi *outlet* dipengaruhi oleh masa jenis udara atau gas, dan memiliki efisiensi tinggi untuk beroperasi pada tekanan serta debit yang besar.

b. *Axial*



Gambar 2.19 *Axial Compressor*

Sumber: trikueni-desain-sistem.blogspot.com

Axial compressor atau kompresor aksial adalah kompresor yang bekerja dengan bentuk *airfoil impeller* yang seperti kipas yang berguna agar penekanan udara terjadi lebih optimal seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.19. Udara yang dihisap akan dikeluarkan secara cepat dengan tekanan yang cukup tinggi. Kompresor aksial banyak digunakan dalam industri aeronautika seperti dalam mesin jet, mesin kapal dengan kecepatan tinggi, dan penunjang dalam pembangkit listrik dalam skala yang kecil.

2.5 Daya Kompresor

Daya kompresor merupakan energi yang dibutuhkan untuk menggerakkan atau mengoperasikan suatu kompresor. Perhitungan daya dibutuhkan agar kompresor yang telah didesain dapat diberikan penggerak yang sesuai dengan daya yang sesuai dengan kebutuhan (Sularso & Tahara, 2000). Perhitungan daya kompresor menggunakan prinsip adiabatik.

$$V = \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot L \quad (10)$$

Keterangan:

V = volume ruang kompresi (m³)

D = diameter alas ruang kompresi atau *bore diameter* (m)

L = selisih titik mati atas (TMA) dan titik mati bawah (TMB) (m)

Rumus (10) digunakan untuk menghitung volume ruang kompresi pada kompresor. Rumus (10) merupakan rumus bangun ruang bentuk silinder. Dimana D adalah diameter alas dari ruang kompresi atau disebut juga *bore diameter*, L adalah panjang pergerakan piston dari titik mati atas ke titik mati bawah.

$$\eta_{vol} = 1 + k - k \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

Keterangan:

- η_{vol} = efisiensi volumetrik
- k = *clearance* pada ruang kompresi
- P_2 = tekanan kompresi (N/m^2)
- P_1 = tekanan atmosfer (N/m^2)
- n = politropik, untuk udara bernilai 1,3

Rumus (11) digunakan untuk menghitung efisiensi volumetrik, yakni perbandingan antara volume sesungguhnya yang disalurkan dari ruang kompresi berbanding dengan volume ruang kompresi.

$$FAD = V \cdot \eta_{vol} \quad (12)$$

Keterangan:

- FAD = *free air delivery* (m^3)
- V = volume ruang kompresi (m^3)
- η_{vol} = efisiensi volumetrik

Rumus (12) digunakan untuk menghitung volume sesungguhnya yang disalurkan dari ruang kompresi berdasarkan efisiensi volumetrik yang telah dihitung dengan menggunakan rumus (11). Volume sesungguhnya yang disalurkan disebut juga *free air delivery* (FAD).

$$m = \frac{P_1 \cdot FAD}{R \cdot T} \quad (13)$$

Keterangan:

- m = massa udara tiap satu siklus ($kg/siklus$)
- P_1 = tekanan atmosfer (N/m^2)
- V = volume ruang kompresi (m^3)
- R = konstanta gas ($J/kg.K$)
- T = temperatur udara (K)

Rumus (13) digunakan untuk menghitung massa udara yang dialirkan pada setiap satu kali siklus (*suction*, *compress*, dan *discharge*). Massa udara yang dihitung adalah massa udara pada saat berada di tekanan atmosfer.

$$\dot{m} = \frac{m \cdot rpm}{60} \quad (14)$$

Keterangan:

- \dot{m} = laju masa udara (kg/s)
 m = massa udara tiap satu siklus (kg/siklus)
 rpm = putaran kompresor per menit (rpm)

Rumus (14) digunakan untuk menghitung laju massa udara yang dialirkan pada tiap satuan waktu dengan cara mengalikan laju masa udara pada tiap siklusnya dengan putaran pada tiap detiknya sesuai dengan spesifikasi kompresor.

$$P = \frac{n}{n-1} \cdot \dot{m} \cdot R \cdot T \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (15)$$

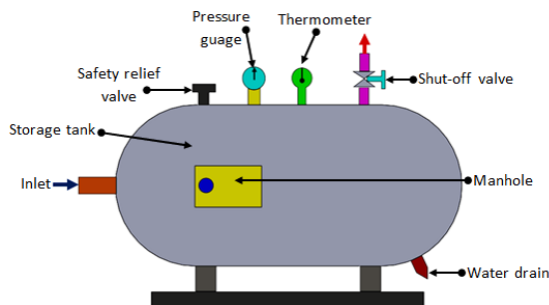
Keterangan:

- P = daya kompresor (watt)
 n = politropik, untuk udara bernilai 1,3
 \dot{m} = laju masa udara (kg/s)
 R = konstanta gas (J/kg.K)
 T = temperatur udara (K)
 P_2 = tekanan kompresi (N/m²)
 P_1 = tekanan atmosfer (N/m²)

Rumus (15) digunakan untuk menghitung daya minimal yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor. Setelah diketahui besarnya daya yang dibutuhkan lalu disesuaikan dengan daya komponen penggerak yang memiliki daya lebih tinggi dari daya yang dibutuhkan.

2.6 Air Receiver

Air receiver atau tanki udara merupakan tempat penampungan udara bertekanan untuk digunakan sesuai dengan kebutuhan. Dalam dunia industri, udara yang dimasukkan ke dalam *air receiver* memiliki tiga parameter untuk menentukan kualitas udara tersebut, yakni *particle*, *water/moisture content*, dan *oil/oil vapor* atau dapat disingkat PWO. *Air receiver* berbentuk seperti kapsul seperti tampak pada gambar 2.20, tidak ada sudut lancip di bagian dalam *air receiver* agar tidak ada fraktur saat mendapat tekanan dari udara (Parr, 1999).



Gambar 2.20 Air Receiver

Sumber: nptel.ac.id

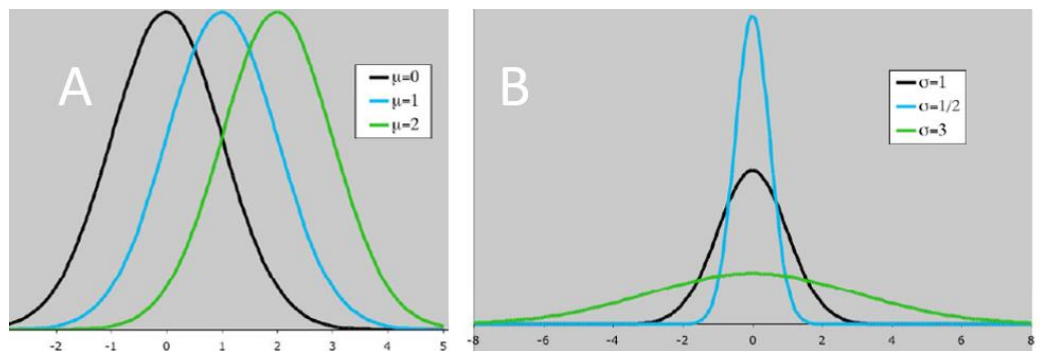
2.7 Generator



Gambar 2.21 *Permanent Magnet Generator*
Sumber: Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd

Generator merupakan salah satu mesin listrik yang bekerja berdasarkan energi gerak/mekanik yang kemudian merubahnya menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan sehari-hari. Generator menggunakan prinsip percobaan Faraday yaitu memutar magnet dalam suatu kumparan atau sebaliknya, ketika magnet bergerak dalam suatu kumparan, terjadi perubahan fluks gaya magnet (perubahan penyebaran arah medan magnet) dalam kumparan dan menembus tegak lurus terhadap kumparan sehingga timbul beda potensial antara ujung kumparan, hal ini karena adanya perubahan fluks magnetik. Fluks magnetik dapat diubah dengan menggerakkan magnet dalam kumparan atau sebaliknya dengan memanfaatkan sumber energi lain, seperti angin dan air untuk memutar baling-baling turbin sehingga menggerakkan magnet tersebut. Salah satu generator yang digunakan untuk turbin angin adalah *permanent magnet generator* (PMG) seperti pada gambar 2.21. Magnet permanen pada PMG menghasilkan fluks magnet sehingga generator tidak memerlukan proses eksitasi. PMG pun memiliki rpm yang rendah untuk menghasilkan listrik yang cukup tinggi (Irasari & Idayani, 2009).

2.8 Distribusi Normal



Gambar 2.22 Kurva Lonceng
Sumber: (Anderson, Sweeney, Williams, Camm, & Cochran, 2015)

Distribusi normal atau distribusi Gaussian adalah distribusi peluang kontinyu yang digunakan untuk menganalisis suatu permasalahan statistik. Pada gambar 2.22, merupakan ilustrasi tentang bentuk diagram distribusi normal yang berbentuk seperti lonceng terbalik. Ada dua faktor utama yang dipertimbangkan dalam distribusi normal, yakni standar deviasi dan rata-rata. Standar deviasi adalah parameter untuk mengetahui sebaran dalam kumpulan data sedangkan rata-rata adalah suatu bilangan yang mewakili kumpulan data. Poin A pada gambar 2.22 merupakan kondisi dimana standar deviasi bernilai tetap namun memiliki nilai rata-rata yang berbeda, semakin besar nilai rata-rata maka kurva semakin bergeser ke sebelah kanan. Poin B merupakan kondisi dimana rata-rata bernilai tetap namun memiliki nilai kurva yang berbeda. Semakin besar nilai standar deviasi maka kurva akan semakin landai. Perhitungan probabilitas pada distribusi normal dapat disederhanakan menjadi distribusi normal standar dengan menjadikan rata-rata menjadi nol dan standar deviasi bernilai satu. Suatu data dapat diubah menjadi distribusi normal standar dengan menggunakan rumus (16).

$$Z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (16)$$

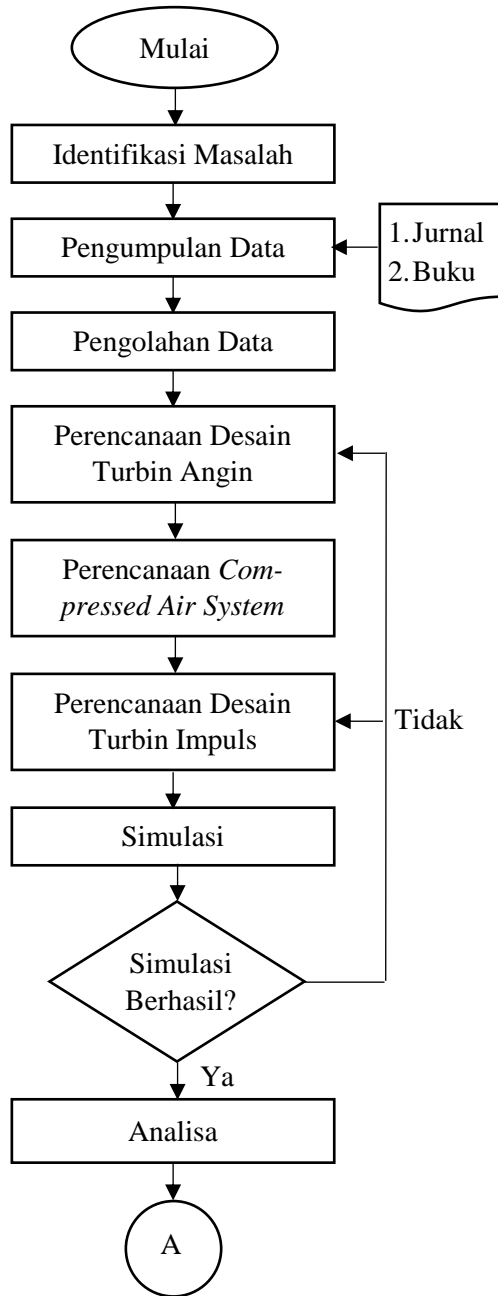
Keterangan:

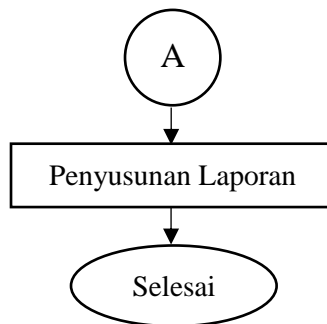
Z	= nilai data dalam distribusi normal standar
x	= data
\bar{x}	= rata-rata
σ	= standar deviasi

Setelah nilai data telah diubah menjadi distribusi normal standar hingga dua angka dibelakang koma, maka nilai probabilitas bisa diketahui dengan melihat tabel *standard normal cumulative distribution*.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir





Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Penjabaran Diagram Alir

Setelah diagram alir diilustrasikan pada gambar 3.1 yang berisi tentang jalannya penelitian secara skematik, berikut adalah penjabaran dari gambar 3.1.

a. Identifikasi Masalah

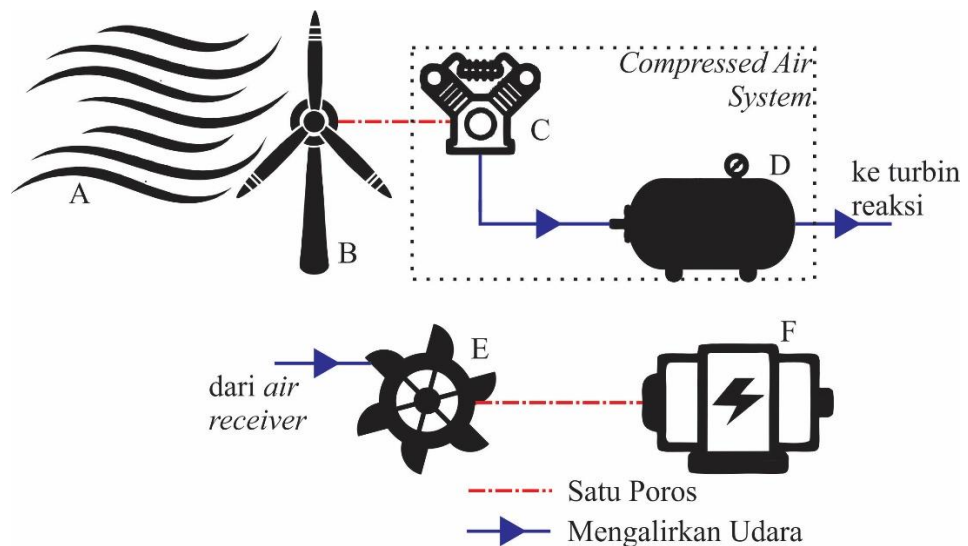
Pada tahap identifikasi masalah, masalah-masalah yang ada diidentifikasi untuk kemudian didata pada tahap pengumpulan data. Masalah yang akan diidentifikasi mengenai kondisi angin di Indonesia yang memiliki kecepatan tidak konstan, sehingga dibutuhkan suatu sistem dalam Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) untuk membuat angin yang mengalir pada turbin angin tersebut memiliki kecepatan konstan sehingga generator dapat menghasilkan daya yang optimal. Masalah yang telah diidentifikasi akan mempermudah proses pengumpulan data pada tahap selanjutnya.

b. Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data, masalah-masalah yang telah diidentifikasi selanjutnya dikumpulkan dengan informasi-informasi penunjang penelitian, diantaranya adalah jurnal dan buku. Untuk proses mendesain turbin kompresor, dibutuhkan data berupa kecepatan angin yaitu 5 m/s yang berhembus secara kumulatif dalam satu hari. Data yang dicari adalah selama beberapa jam angin tersebut akan berhembus sesuai dengan rumusan masalah, jenis-jenis *airfoil* yang sesuai dengan turbin angin yang akan dirancang, serta hal-hal mengenai turbin angin untuk kecepatan angin rendah. Untuk proses mendesain *compressed air system*, dibutuhkan data-data dari jurnal tentang jenis-jenis kompresor yang sesuai dengan perencanaan *compressed air system* lalu katalog-katalog tentang kompresor dan air reservoir sebagai pembanding. Untuk proses mendesain turbin generator, dibutuhkan data berupa jurnal-jurnal tentang turbin angin yang di desain untuk kecepatan angin rendah serta dengan ukuran yang lebih kecil serta generator yang sesuai dengan hasil analisa pada turbin impuls.

c. Pengolahan Data

Pada tahap pengolahan data, masalah-masalah yang telah diidentifikasi dan informasi yang telah dikumpulkan data yang diolah untuk menentukan metode-metode dalam penelitian. Metode yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah simulasi dan perhitungan. Setelah data yang dibutuhkan telah didapat, data tersebut diolah sesuai dengan alur penelitian yang dapat direpresentasikan dengan gambar 3.2.



Gambar 3.2 Skema Sistem

Berdasarkan gambar 3.2, gambar A merupakan angin yang memiliki kecepatan 5 m/s yang bersifat fluktuatif dalam lama waktu berhembus. Waktu berhembus angin tersebut dihitung dengan menggunakan data angin di wilayah Indonesia yang sebagian besar ada di bagian selatan, data angin tersebut kemudian diolah dan ditransformasikan dengan menggunakan distribusi normal standar lalu akan ditemukan nilai peluang angin yang berhembus ketika kecepatan mencapai minimal 5 m/s dan dikalikan 24 jam. gambar B merupakan jenis Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) yang berfungsi untuk mengubah energi kinetik angin menjadi energi mekanik yang berotasi pada poros yang menjadi penggerak untuk kompresor. Gambar C merupakan kompresor tipe *reciprocating* atau piston yang digerakan oleh TASH, kompresor tersebut mengalirkan udara ke *air receiver* yang diilustrasikan dengan gambar D. Kapasitas *air receiver* dihitung berdasarkan kebutuhan debit udara pada kecepatan tertentu yang disalurkan selama 24 jam sehari secara konstan ke turbin impuls. Turbin impuls diilustrasikan dengan gambar E bergerak karena aliran udara yang telah dialirkan dari *air receiver* dengan kecepatan tertentu yang konstan terus menerus. Turbin impuls memiliki poros yang sama dengan generator yang diilustrasikan oleh gambar F, sehingga putaran pada turbin impuls juga menggerakkan generator sehingga generator menghasilkan listrik dengan kecepatan putaran yang konstan sehingga generator dapat bekerja secara optimal.

d. Perencanaan Desain Turbin Angin

Desain turbin angin sebagai penggerak kompresor direncanakan berdasarkan data-data yang diolah. Kompresor tersebut di desain agar angin dapat menggerakkan turbin kompresor sehingga kompresor bisa memompakan angin dari lingkungan sekitar ke *air receiver*. Hasil yang diharapkan dari turbin angin adalah torsi yang memadai untuk menggerakkan kompresor serta putaran turbin yang sesuai dengan kebutuhan daripada kompresor.

e. Perencanaan *Compressed Air System*

Compressed air system terdiri dari dua bagian, yakni *air compressor* dan *air receiver*. Perencanaan *air compressor* dilakukan dengan menghitung torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan *bare compressor* atau kompresor yang belum memiliki penggerak dari katalog. Perencanaan *air reservoir* dilakukan dengan menghitung kapasitas angin yang dibutuhkan dari turbin generator selama jangka waktu tidak ada angin yang cukup.

f. Perencanaan Turbin Impuls

Desain turbin impuls direncanakan berdasarkan data-data yang diolah. Turbin impuls di desain agar dapat menyesuaikan debit angin yang mengalir sebagai *input* dari *air receiver* dan besarnya torsi serta putaran yang dibutuhkan untuk menggerakkan generator sehingga generator dapat menghasilkan putaran yang optimal.

g. Simulasi

Setelah model turbin kompresor dan turbin generator selesai, dilakukan simulasi pada turbin kompresor dan turbin generator. Pada turbin kompresor dan generator simulasi bertujuan untuk mengetahui torsi dan putaran per menit yang dihasilkan oleh turbin. Sumber angin pada simulasi turbin kompresor ditentukan sebesar 5 m/s sedangkan sumber angin pada simulasi turbin generator berdasarkan aliran udara yang telah diatur dari *air receiver*.

h. Analisa

Setelah simulasi selesai, data penelitian yang telah diperoleh dianalisa sebagai langkah untuk mengolah hasil simulasi dan perhitungan lebih lanjut serta melakukan pembahasan dengan hasil tersebut sesuai dengan rumusan masalah yang telah ditulis pada bab I. Hasil yang diharapkan dari analisa adalah penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah *compressed air system* pada pembangkit listrik tenaga bayu dapat menghasilkan daya secara konstan dari kondisi angin yang ada.

i. Penyusunan Laporan

Penyusunan laporan adalah tahap dimana seluruh jalannya penelitian dicatat dalam bentuk sebuah laporan dari penelitian dimulai hingga penelitian selesai dilakukan sesuai dengan format yang telah tersedia.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Kondisi Angin

Kondisi angin yang akan digunakan dalam penelitian kali ini adalah angin yang masuk dalam kelompok skala menengah hingga berskala besar berdasarkan tabel 1.1 dan hembusan angin pelan (skala 4) hingga hembusan angin sedang (skala 5) berdasarkan skala beaufort pada tabel 2.1, sehingga kecepatan angin yang akan di analisa berada di antara kecepatan 4,0 m/s hingga 8,0 m/s. Kondisi angin dengan pengelompokan tersebut sebagian besar berada dibagian selatan Indonesia, yakni di bagian selatan pulau Jawa dan di kepulauan Nusa Tenggara, namun ada pula beberapa data yang berada selain di bagian selatan Indonesia yang memiliki kecepatan angin sesuai dengan pengelompokan, seperti pada daerah Sulawesi Selatan.

Tabel 4.1 Kecepatan Angin
Sumber: (Pakpahan, 2003)

No.	Wilayah	Kecepatan (m/s)
1	Atambua, NTT	7,3
2	Tomenas SOE, NTT	7,0
3	Oelbubuk SOE, NTT	6,9
4	Baing, Sumba, NTT	6,8
5	Wakaibubak, Sumba, NTT	6,8
6	Waingapu, Sumba, NTT	6,6
7	Kananggar, Sumba, NTT	6,6
8	Baun Kuang, NTT	6,6
9	Rote, NTT	5,8
10	Sakteo SOE, NTT	5,8
11	Giligede, Lombok, NTB	5,5
12	Bungaiya, Sulsel	5,6
13	Netpala, NTT	5,4
14	Palakahembi, Sumba, NTT	5,4
15	Parangtritis, DIY	5,4
16	Napu, Sumba, NTT	5,3
17	Dusun V-Pulau Sumba	5,2
18	Bulak Baru, Jepara, Jateng	5,2
19	Mondu, NTT	4,9
20	Nangalili, Flores, NTT	5,1
21	Tembere, Lombok, NTB	4,9
22	Nangandoro, NTB	4,8
23	Kolak, Rote, NTT	4,6
24	Walakiri, NTT	4,6
25	Maubesi, NTT	4,6

26	Papagarang, Manggarai, NTB	4,6
27	Sambelia, Lombok, NTB	4,6
28	Nusa, NTT	4,4
29	Pameungpeuk, Jawa Barat	4,4
30	Nembrala, Rote, NTT	4,3
31	Ternate, Ambon	4,3
Kecepatan Tertinggi		7,3
Kecepatan Terendah		4,3

Tabel 4.1 merupakan tabel tentang daerah-daerah di Indonesia yang memiliki kecepatan angin antara 4,0 m/s hingga 8,0 m/s. Berdasarkan tabel 4.1, dari 31 data yang ada di tabel, kecepatan angin tertinggi dalam kategori tersebut berada di Atambua, Nusa Tenggara Timur dengan kecepatan 7,3 m/s dan kecepatan terendah 4,3 m/s yang berada di daerah Ternate, Ambon.

Untuk mencari rata-rata perhitungan dilakukan dengan cara menghitung jumlah total dari nilai data dibagi dengan jumlah data yang dihitung, sehingga rata-rata kecepatan angin bisa dihitung.

$$\bar{x} = \frac{169,3}{31}$$

$$\bar{x} = 5,46129 \text{ m/s}$$

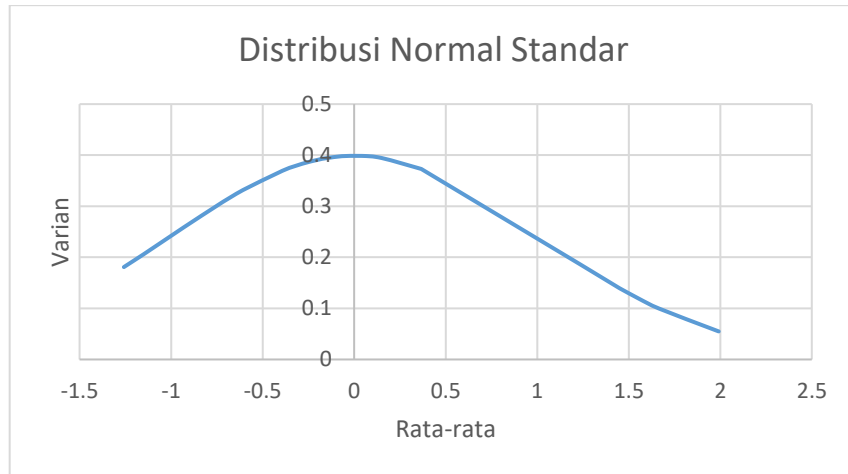
Nilai dari standar deviasi dan varian dari data pun bisa dihitung dengan menggunakan rumus (16) Nilai standar deviasi bisa dicari dengan mencari akar dari varians.

$$\sigma^2 = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$\sigma^2 = 0,852452$$

$$\sigma = 0,923283$$

Untuk mengubah data tersebut ke distribusi normal, maka harus diketahui terlebih dahulu rata-rata dan standar deviasi dari data pada tabel 4.1. Kecepatan rata-rata dari kelompok angin pada penelitian kali ini memiliki nilai 5,46129032 m/s, varian 0,852452, dan standar deviasi 0,923283. Namun sesuai dengan batasan masalah yang telah dituliskan, kecepatan angin untuk dasar perhitungan lama waktu angin yang berhembus menggunakan angin dengan kecepatan 5 m/s bukan menggunakan kecepatan angin rata-rata, sehingga tabel 4.1 dapat digunakan sebagai acuan lama angin berhembus dengan mengubah data-data angin tersebut menjadi peluang lama angin berhembus dalam satu hari dengan mengubah tabel 4.1 ke distribusi normal standar.



Gambar 4.1 Distribusi Normal Standar

Setelah data ditransformasi menjadi distribusi normal standar, waktu yang dibutuhkan bisa ditentukan dengan mencari probabilitas angin berhembus dengan minimal kecepatan 5 m/s menggunakan rumus (16).

$$Z = \frac{5 - 5,5}{0,9233}$$

$$Z = -0,50$$

Nilai Z yang didapatkan adalah -0,49962 atau dibulatkan ke bilangan desimal dua digit terdekat menjadi -0,50 dengan menggunakan tabel distribusi normal standar, maka dapat ditentukan nilai probabilitas Z.

Tabel 4.2 Distribusi Normal Standar

Z	0.00	0.01	0.02	0.03
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357
0.7	0.7580	0.7612	0.7642	0.7673
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238
1.0	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907

Berdasarkan tabel 4.2, nilai probabilitas untuk $Z = -0,50$ adalah 0,69, sehingga lama angin yang berhembus dengan kecepatan 5 m/s dalam satu hari adalah

$$t = 0,69 \times 24$$

$$t = 16,60 \text{ jam}$$

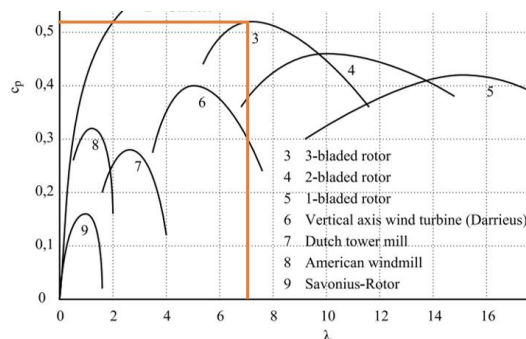
Jadi lama angin berhembus dengan kecepatan 5 m/s adalah 16,596 jam atau setara dengan 16 jam 45 menit, sehingga lama waktu angin berhembus tidak mencapai kecepatan 5 m/s adalah 7 jam 15 menit. Selama rentang waktu 7 jam 15 menit turbin angin tidak mendapat hembusan angin untuk memompakan angin ke kompresor, oleh karena itu *compressed air system* harus mampu tetap menggerakkan generator dengan kapasitas *air receiver* yang memadai dalam rentang waktu tersebut.

4.2 Analisa Turbin Angin

Turbin angin sebagai penggerak kompresor digunakan untuk memanfaatkan putaran turbin untuk menggerakkan kompresor, sehingga dibutuhkan jenis turbin dengan torsi dan putaran turbin yang sesuai dengan kebutuhan kompresor. Turbin Angin Sumbu Horizontal (TASH) dipilih sebagai turbin angin untuk menggerakkan kompresor dengan pertimbangan seperti pada tabel 2.2, yakni memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan tipe-tipe turbin angin yang lain dan sudu berjumlah tiga memiliki efisiensi yang paling tinggi pula jika dibandingkan dengan dua dan satu sudu turbin. Sehingga jumlah efisiensi atau faktor daya dapat mendekati nilai maksimal yakni 59,3% jika menggunakan teori *Betz limit*.

4.2.1 Analisa Desain

Desain untuk TASH menggunakan variasi tiga buah *airfoil* dengan tipe NACA 4412, NACA 4418, dan NACA 4421 serta variasi lima jari-jari sudu turbin dengan panjang berbeda, yakni 2 m, 2,25 m, 2,5 m, 2,75 m, dan 3 m. Sehingga hasil yang akan diperoleh adalah 15 kombinasi dari perpaduan variasi tersebut dan akan dipilih satu variasi yang memiliki putaran dan torsi yang optimal sesuai dengan spesifikasi kompresor yang akan dianalisa selanjutnya.



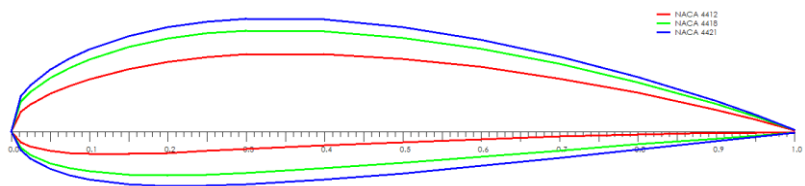
Gambar 4.2 Perencanaan *Tip Speed Ratio* dan Faktor Daya

Gambar 4.2 memiliki referensi dari gambar 2.8. Gambar 4.2 menunjukkan bahwa turbin angin yang akan didesain direncanakan memiliki faktor daya paling maksimum sebesar 0,52 dengan *tip speed ratio* (TSR) sebesar 7 yang berarti dengan kecepatan angin

tertentu yang berhembus menggerakkan sudu turbin, maka turbin akan bergerak dengan kecepatan tujuh kali lipat dari kecepatan angin yang berhembus tersebut, dan akan menghasilkan daya 52% dari energi angin yang dihasilkan sesuai dengan perhitungan dengan menggunakan rumus (3).

- *Airfoil*

Airfoil tipe NACA adalah tipe airfoil yang paling umum digunakan dalam mendesain turbin atau pun sayap pesawat. *Airfoil* yang digunakan dalam penelitian ini adalah NACA dengan kode empat digit, dimana angka pertama menunjukkan nilai *camber* maksimum dalam skala satu perseratus.



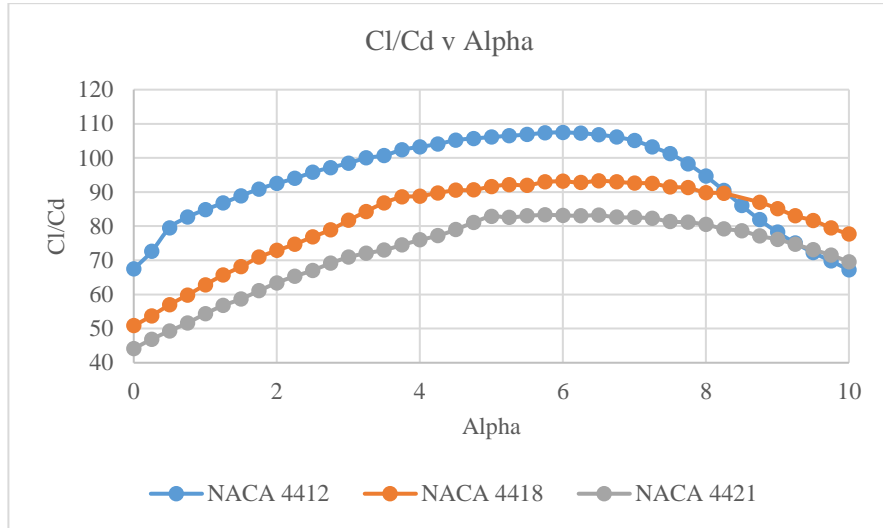
Gambar 4.3 *Airfoil* NACA

Dari gambar 4.3, jika *airfoil* NACA diurutkan dari yang memiliki bentuk yang ramping ke bentuk yang lebih lebar adalah NACA 4412, NACA 4418 dan NACA 4421. Hal ini sesuai dengan kode empat kode pada airfoil tersebut, sama-sama memiliki nilai ketebalan *camber* 0,04 dari panjang *chord* pada posisi 0,04 dari *leading edge* dan ketebalan maksimum dari *camber* yang berbeda-beda, yakni 0,12c, 0,18c, dan 0,21c.

Tabel 4.3 Spesifikasi NACA
Sumber: <http://airfoiltools.com>

NACA	Max. C _i /C _d	α
4412	107,5	6°
4418	93,3	6,5°
4421	83,3	5,75°

Tabel 4.3 merupakan hasil analisa variasi *airfoil* NACA sehingga dapat diketahui bahwa urutan *airfoil* yang memiliki perbandingan nilai koefisien angkat dan koefisien hambat dari terbesar ke terkecil adalah NACA 4412, NACA 4418, lalu NACA 4418.



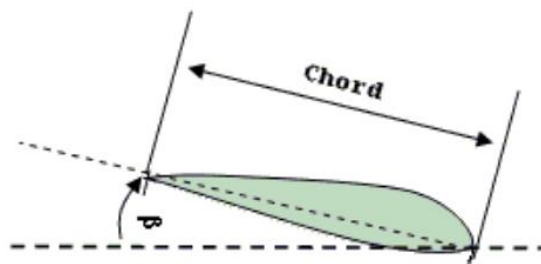
Gambar 4.4 Perbandingan Cl/Cd v Alpha

Gambar 4.4 merupakan penjabaran Cl/Cd v Alpha dari tabel 4.3. Nilai koefisien angkat per koefisien hambat berdasarkan sudut tiap *airfoil* terhadap arah datang angin. Nilai Cl/Cd maksimum dipilih agar memaksimalkan potensi pada saat pengoptimasian bentuk sudu turbin. Contoh pada grafik Cl/Cd v Alpha pada *airfoil* NACA 4412 memiliki nilai angkat dibanding nilai hambat maksimum yakni 107,5 jika berada pada sudut optimal angin mengenai *airfoil* 6°.

- Panjang Jari-Jari Sudu Turbin

Panjang jari-jari sudu turbin memengaruhi nilai torsi dan nilai putaran turbin. Semakin panjang jari-jari turbin maka kecepatan putaran akan semakin kecil namun torsi akan semakin besar, begitu pun sebaliknya, seperti yang tercantum pada rumus (5). Oleh karena itu maka perlu ditentukan panjang jari-jari sudu turbin yang optimal, dengan torsi dan putaran sesuai dengan yang dibutuhkan.

- Geometri Sudu Turbin



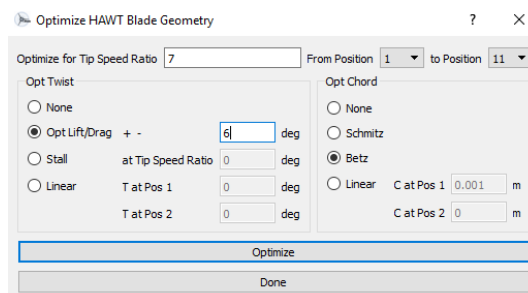
Gambar 4.5 Penampang Melintang Sudu Turbin
Sumber: warlock.com.au

Dalam mendesain geometri sudu turbin, bagian melintang dari sudu merupakan bentuk dari *airfoil*. Untuk mengoptimalkan gaya angkat turbin oleh energi angin, maka dalam mendesain sudu turbin satu radius sudu turbin dibagi menjadi 10 bagian. Seperti yang tertera pada gambar 4.5, penampang melintang setiap bagian sudu turbin (disebut juga *chord*) diputar dengan sudut tertentu (*beta*) dan ukuran *chord* disesuaikan dengan desain yang diinginkan. Untuk memudahkan mendesain turbin bisa menggunakan bantuan aplikasi daring di *warlock.com.au* dengan memasukkan data berupa *tip speed ratio*, efisiensi turbin (menggunakan *Betz limit*) kecepatan angin dan jari-jari sudu turbin. Hasil dari perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Sudu Turbin
Sumber: *warlock.com.au*

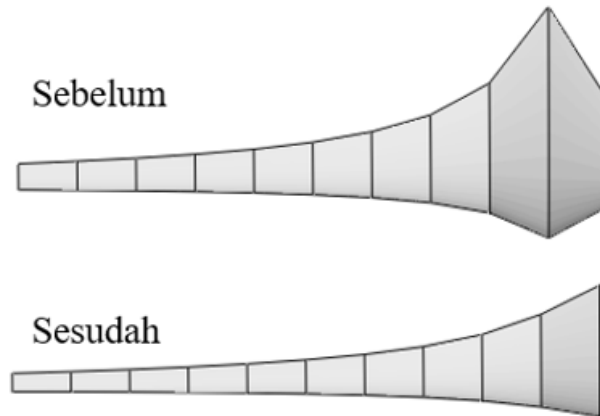
Radius (m)	Chord (m)	Beta (deg.)
0.2	0.896	37.6
0.4	0.448	19.5
0.6	0.299	11.6
0.8	0.224	7.4
1	0.179	4.8
1.2	0.149	3
1.4	0.128	1.7
1.6	0.112	0.8
1.8	0.1	0
2	0.09	-0.6

Pada tabel 4.4 terlihat bahwa dari radius 0,2 m ke radius 0,4 m ada perbedaan yang sangat signifikan. Panjang *chord* pada radius 0,4 m berkurang hingga setengah kali dari panjang *chord* 0,2 m. Hal yang serupa juga terjadi pada sudut diradius 0,2 m dan 0,4 m dimana sudut putar (*twist/beta*) mencapai dua kali lipat. Hingga pada radius 0,8 hingga radius 2 m perubahan yang terjadi tidak signifikan. Bentuk sudu turbin perlu dioptimasi agar mendapat gaya angkat yang lebih optimal. Optimasi bisa dengan menggunakan aplikasi QBlade v0.96 yang merupakan aplikasi *open source* khusus untuk menganalisa turbin angin baik sumbu vertikal mau pun horizontal.



Gambar 4.6 Kotak Dialog Optimasi

Berdasarkan gambar 4.6, dalam melakukan optimasi perlu dimasukkan beberapa data seperti *tip speed ratio*, sudut saat perbandingan koefisien angkat dan koefisien hambatan optimum (merujuk pada tabel 4.1), dan batas yang digunakan (dalam hal ini menggunakan *Betz limit*).



Gambar 4.7 Sebelum dan Sesudah Optimasi

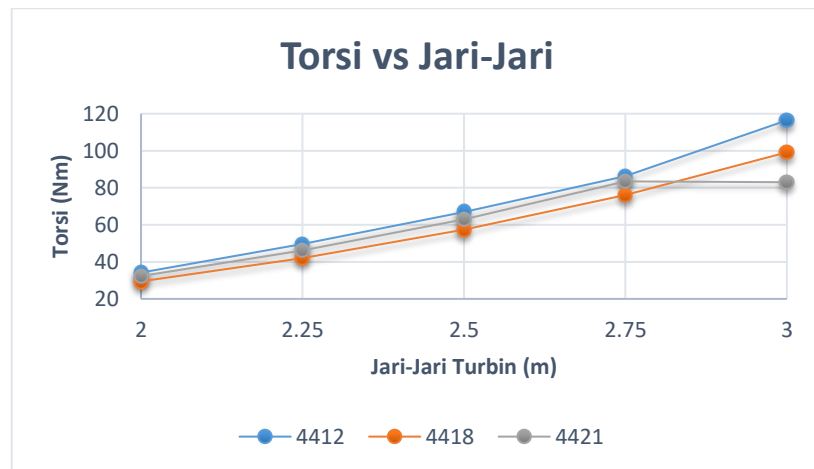
Gambar 4.7 merupakan hasil sebelum dan sesudah optimasi pada sudu turbin jari-jari 2 m. Sudu turbin sebelum optimasi memiliki bagian *root* yang lebih lebar, sedangkan setelah dioptimasi, sudu turbin memiliki bagian *root* yang lebih *streamline*, dengan data turbin setelah optimasi pada tabel 4.5, terdapat perbedaan antara sudut turbin yang diputar (*twist*) dengan panjang *chord*, karena telah disesuaikan dengan kebutuhan turbin dengan *tip speed ratio* 7 dan faktor daya 0,52.

Tabel 4.5 Data Turbin Setelah Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]
0	0,49	34,83
0,2	0,31	16,15
0,4	0,22	7,75
0,6	0,17	3,18
0,8	0,14	0,33
1	0,12	-1,60
1,2	0,10	-2,99
1,4	0,09	-4,04
1,6	0,08	-4,86
1,8	0,07	-5,52
2	0,06	-6,06

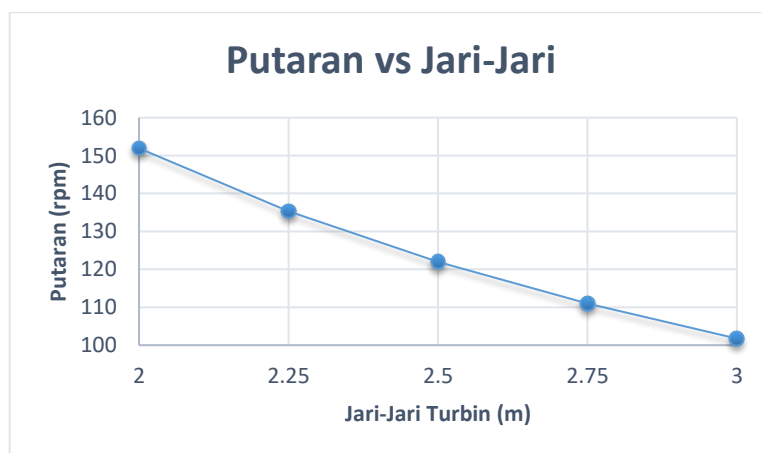
4.2.2 Analisa Hasil Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan QBlade v0.96, hasil yang akan di analisa adalah torsi dan kecepatan putaran yang dihasilkan oleh masing-masing sudu turbin pada kecepatan angin 5 m/s, masa jenis angin 1,225 kg/m³, dan viskositas 1,176 x 10⁻⁵.



Gambar 4.8 Torsi vs Jari-Jari

Berdasarkan gambar 4.8, tipe *airfoil* NACA 4412 menghasilkan torsi paling tinggi dan *airfoil* tipe NACA 4421 menghasilkan torsi yang paling rendah, namun pada jari-jari 3 m, *airfoil* tipe NACA 4421 memiliki torsi lebih tinggi daripada tipe *airfoil* NACA 4418. Tipe *airfoil* pun memengaruhi torsi yang dihasilkan karena setiap variasi *airfoil* memiliki gaya angkat dan gaya hambat yang berbeda.



Gambar 4.9 Grafik Putaran vs Jari-jari

Gambar 4.9 menunjukkan hasil analisa putaran turbin dengan jari-jari turbin. Tipe *airfoil* tidak berpengaruh kepada putaran yang dihasilkan. Putaran paling tinggi berada

pada jari-jari 2 m dan putaran paling rendah berada pada jari-jari 3 m. Hal ini sesuai dengan rumus (5) dimana semakin tinggi putaran yang dihasilkan maka jari-jari yang diperlukan semakin kecil, jari-jari direpresentasikan dengan lengan gaya sebagai faktor pengali daya untuk menghasilkan torsi.

Tabel 4.6 Torsi dan Putaran NACA 4412

Jari-Jari (m)	Torsi (Nm)	Putaran (rpm)
2	34,21	151,92
2.25	49,64	135,31
2.5	67,01	121,98
2.75	86,33	111,04
3	116,45	101,74

Dari hasil analisa pada gambar 4.8 dan 4.9, *airfoil* dengan tipe NACA 4412 digunakan sebagai *chord* sudu turbin dalam penelitian dengan spesifikasi seperti pada tabel 4.6 karena memiliki torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *airfoil* tipe NACA 4418 dan NACA 4421. Seperti yang telah dijelaskan pada gambar 4.5,

4.3 Analisa Kompresor



Gambar 4.10 *Bare Pump Compressor*
Sumber: Gardner Denver

Kompresor yang akan dianalisa adalah *bare pump compressor* seperti tampak pada gambar 4.10, yakni kompresor yang belum memiliki penggerak seperti motor, tipe kompresor ini biasanya digunakan untuk mengganti saat ada bagian kompresor yang rusak, sehingga sistem yang diganti tidak perlu secara keseluruhan. Karena kompresor belum memiliki penggerak, maka torsi untuk menggerakkan kompresor tersebut perlu dikalkulasi terlebih dahulu dengan menggunakan hukum termodinamika III. *Bare pump compressor* yang digunakan merupakan tipe *single acting* seperti pada gambar 2.10 yang berasal dari produsen manufaktur Gardner Denver model RV.10A, RV.15A, dan RV.30A dengan

spesifikasi seperti pada tabel 4.7. Perhitungan akan menggunakan sampel spesifikasi pada model RV10.A.

Tabel 4.7 Spesifikasi Produk

Sumber: Gardner Denver

Model	RV.10A	RV.15A	RV.30A
Tekanan (PSI)	175	175	175
Putaran Optimal (rpm)	400	400	400
Jumlah Silinder	2	2	4
Diameter Bore 1 (inci)	4,6	4,6	4,6
Diameter Bore 2 (inci)	2,5	2,5	2,5
Stroke (inci)	2,5	3	3

Daftar Konversi Satuan		
1 PSI	x 6894,76	= 6894,76 N/m ²
1 Inchi	x 0,0254	= 0,0254 cm
1 Bar	x 100.000	= 100.000 N/m ²
1 RPM	x 9,55	= 9,55 rad/s
0 °C	+ 273	= 273 K

- Perhitungan Volume

Volume Silinder 1

$$V_{s1} = \frac{\pi D_{B1}^2}{4} x L_s$$

$$V_{s1} = \frac{\pi (1,17 x 10^{-2})^2}{4} x 6,35 x 10^{-2}$$

$$V_{s1} = 6,81 x 10^{-4} m^3$$

Volume Silinder 2

$$V_{s2} = \frac{\pi D_{B2}^2}{4} x L_s$$

$$V_{s2} = \frac{\pi (6,35 x 10^{-2})^2}{4} x 6,35 x 10^{-2}$$

$$V_{s2} = 2,01 x 10^{-4} m^3$$

Perhitungan volume silinder pada *reciprocating compressor* menggunakan rumus volume seperti pada bangun ruang silinder. Jumlah silinder pada kompresor berjumlah dua buah seperti pada ilustrasi gambar 4.11. Perbedaan antara silinder 1 dan silinder 2 pada kompresor tersebut adalah panjang *bore* atau panjang diameter pada ruang kompresi.

Volume Total

$$V_t = V_{s1} + V_{s2}$$

$$V_t = 8,82 x 10^{-4} m^3$$

- Perhitungan Efisiensi Volumetrik dan *Free Air Delivery* (FAD)

Perhitungan efisiensi volumetrik dilakukan untuk mengetahui volume sesungguhnya yang disalurkan jika dibandingkan dengan volume pada ruang kompresi. Perhitungan efisiensi volumetrik dapat menggunakan rumus (12). Beberapa data yang digunakan untuk melakukan perhitungan ini adalah *clearance* atau nilai k sebesar 0,025 pada piston dengan silinder dan politropik pada udara lingkungan atau nilai n sebesar 1,3, tekanan pada tabel 4.7 tentang spesifikasi.

$$\eta_{vol} = 1 + 2,50 \times 10^{-2} - (2,50 \times 10^{-2}) \left(\frac{1.206.583}{100.000} \right)^{\frac{1}{1,3}}$$

$$\eta_{vol} = 8,55 \times 10^{-2}$$

Efisiensi volumetrik berdasarkan hasil hitungan adalah $8,55 \times 10^{-2}$ atau 8,55 % yang selanjutnya akan dikalikan dengan volume total ruang kompresi untuk mendapatkan nilai *free air delivery* (FAD).

$$FAD = (8,82 \times 10^{-4}) \times (8,55 \times 10^{-2})$$

$$FAD = 7,54 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

- Perhitungan Massa Udara

Perhitungan dilakukan untuk mengetahui massa udara yang disalurkan setiap satu putaran dengan nilai R sebesar 287 J/kg.K dan T sebesar 288 K dengan menggunakan rumus (13).

$$m_u = \frac{P_1 \cdot FAD}{R \cdot T}$$

$$m_u = \frac{100.000 \times 7,54 \times 10^{-4}}{287 \times 288}$$

$$m_u = 9,13 \times 10^{-4} \text{ kg untuk setiap satu kali putaran}$$

Setelah mengetahui massa udara yang disalurkan untuk tiap satu putaran, maka dapat diketahui masa udara yang dapat dialirkan menuju ke *air receiver* pada setiap detik pada masing-masing kompresor dengan menggunakan rumus (14).

$$\dot{m} = \frac{m_u \cdot rpm}{60}$$

$$\dot{m} = \frac{7,54 \times 10^{-4} \times 400}{60}$$

$$\dot{m} = 6,08 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

- Perhitungan Daya

Perhitungan daya dilakukan untuk mengetahui besarnya daya minimal yang dibutuhkan untuk menggerakkan *bare pump compressor*. Perhitungan daya minimal yang dibutuhkan merujuk pada rumus (15).

$$P = \frac{1,3}{1,3 - 1} x 6,08 x 10^{-3} x 287 x 288 \left[\left(\frac{1.206.583}{100.000} \right)^{\frac{1,3-1}{1,3}} - 1 \right]$$

$$P = 1.692,2 \text{ Watt}$$

Daya minimal yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor adalah 1.692,2 Watt. Data daya selanjutnya digunakan untuk menghitung torsi yang dibutuhkan.

- Perhitungan Torsi

Perhitungan torsi dilakukan untuk mengetahui torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan kompresor. Torsi bisa dihitung setelah nilai daya untuk menggerakkan kompresor dan putaran kompresor sesuai dengan desain diketahui. Perhitungan torsi menggunakan rumus (5).

$$\tau = \frac{1.692,2 x 9,55}{400}$$

$$\tau = 40,40 \text{ Nm}$$

Sehingga hasil yang didapatkan untuk setiap *bare pump compressor* seperti pada tabel 4.8. Untuk selanjutnya disesuaikan dengan torsi yang dihasilkan oleh turbin angin dan kapasitas yang dibutuhkan oleh kompresor.

Tabel 4.8 Torsi *Bare Pump Compressor*

Model	Free Air Delivery (m ³ /putaran)	Torsi (Nm)
RV.10A	7,54 x 10 ⁻⁴	40,40
RV.15A	9,05 x 10 ⁻⁴	48,47
RV.30A	1,81 x 10 ⁻³	96,95

Dari hasil perhitungan pada tabel 4.8, dipilih kompresor model RV.15A karena memiliki kapasitas yang cukup besar serta sudu turbin dengan jari-jari 2,25 m dan *airfoil* NACA 4412 karena memiliki putaran yang cukup tinggi yakni sebesar 135,31 rpm dan torsi 49,64 Nm, dimana torsi pada turbin angin lebih besar daripada torsi kompresor sehingga kompresor akan bergerak. Turbin angin dengan panjang 2 m tidak dipilih karena menghasilkan torsi yang lebih rendah daripada kompresor, sehingga kompresor tidak akan berputar. Sedangkan untuk panjang sudu 2,5 m, 2,75 m, dan 3,0 m tidak dipilih karena walau memiliki torsi yang lebih besar tetapi jumlah putaran yang dihasilkan lebih kecil daripada panjang sudu 2,25 m.

4.4 Analisa Air Receiver

Analisa *air receiver* bertujuan untuk mengetahui kapasitas yang dibutuhkan oleh *air receiver* dengan mempertimbangan debit dan tekanan aliran yang diterima dari kompresor dan akan dialirkan ke turbin impuls. Pipa yang akan digunakan adalah pipa dengan jenis JIS 3452 dengan spesifikasi seperti pada tabel 4.9.

Tabel 4.9 Spesifikasi Pipa

JIS 3452	
Diameter Dalam	80 mm
Diameter Luar	89,1 mm
Bahan	Carbon Steel
Ketebalan	9,1 mm

Dari tabel 4.9 bisa diketahui bahwa pipa tersebut memiliki diameter dalam 80 mm yang akan dilalui udara yang mengalir dari *air receiver* ke turbin. Untuk mengetahui debit udara yang akan dialirkan maka diperlukan data berupa kecepatan udara dan besar tekanan yang akan dialirkan melalui pipa seperti yang tertulis dalam tabel 4.10 yang berisi tentang variasi tekanan dan kecepatan aliran udara yang dialirkan menuju ke turbin impuls.

Tabel 4.10 Variasi Tekanan dan Kecepatan Fluida

Tekanan (bar)	Kecepatan (m/s)
1	10
2	4
3	3

Berdasarkan tabel 4.10, terdapat 3 variasi aliran udara berdasarkan tekanan dan kecepatan fluida yang disalurkan dari *air receiver* ke turbin impuls untuk mengetahui variasi kapasitas *air receiver* terhadap daya yang akan dihasilkan. Langkah awal untuk menghitung kapasitas *air receiver* adalah dengan menghitung debit udara yang mengalir melalui pipa (Q).

$$Q = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot v$$

$$Q = 0,25 \times \pi \times (0,08)^2 \times 10$$

$$Q = 5,03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Debit dari *air receiver* ke turbin impuls selalu konstan agar turbin impuls bisa memuat turbin secara konstan dan menghasilkan daya. Maka perlu diketahui kebutuhan volume angin untuk memutar turbin impuls dalam satu hari (V_t).

$$V_t = Q \cdot t$$

$$V_t = 5,03 \times 10^{-3} \times 86.400$$

$$V_t = 4.342,94 \text{ m}^3$$

V_t merupakan jumlah volume yang dibutuhkan untuk memutar turbin impuls dalam satu hari selama 24 jam penuh, sehingga turbin dapat berhembus dengan kecepatan yang konstan. Namun, V_t merupakan volume dalam tekanan atmosfer, belum dalam kapasitas setelah dikompresi dalam *air receiver* dengan tekanan 12,06583 N/m² menggunakan kompresor (V_c), oleh karena itu volume harus dikonversi.

$$P_c V_c = P_t V_t$$

$$V_c = \frac{P_t V_t}{P_c}$$

$$V_c = \frac{1 \times 4.342,94}{12.06583}$$

$$V_c = 359,94 \text{ m}^3$$

Setelah disesuaikan dengan besar volume pada tekanan dalam *air receiver* (V_c), maka jumlah kapasitas volume maksimal yang dapat dikompresikan sebuah kompresor RV.15A (V_i) dapat ditentukan.

$$V_i = FAD \cdot RPM \cdot 60 \cdot t_i$$

$$V_i = 9,05 \times 10^{-4} \times 135,31 \times 60 \times 16,59$$

$$V_i = 121,91 \text{ m}^3$$

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa kapasitas volume maksimal yang dapat dikompresikan sebuah kompresor RV.15A adalah 121,9089 m³. Sehingga kebutuhan jumlah turbin dan jumlah kompresor (n_c) dapat dihitung dengan membandingkan jumlah kebutuhan udara yang disalurkan ke turbin reaksi dengan kapasitas udara yang mampu disalurkan oleh kompresor dalam waktu 16,59 jam.

$$n_c = \frac{V_c}{V_i}$$

$$n_c = \frac{359,94}{121,91}$$

$$n_c = 2,95$$

$$n_c \approx 3$$

Jumlah kompresor (n_c) akan sama dengan jumlah turbin penggerak kompresor, karena setiap satu turbin angin dirancang untuk memenuhi kebutuhan satu kompresor. Udara yang dialirkan oleh tiap kompresor akan dialirkan ke satu *air receiver* dengan kapasitas minimal (V_{AR}) yang mampu memenuhi kebutuhan selama jangka waktu tidak ada angin berhembus (t_0) atau selama 7,41 jam .

$$V_{AR} = V_c \cdot t_0$$

$$V_{AR} = \frac{359,94}{24} \times (24 - 16,59)$$

$$V_{AR} = 111,13 \text{ m}^3$$

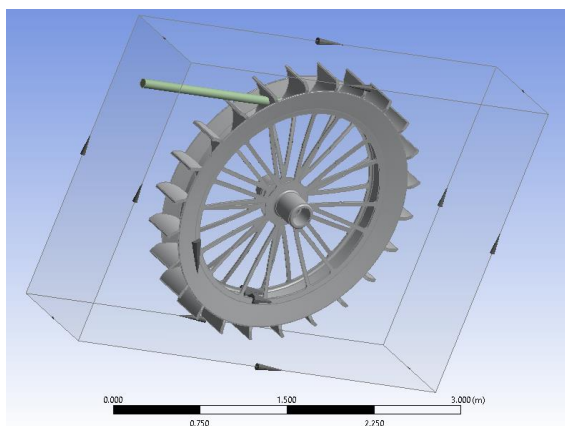
Setelah diketahui kapasitas minimum untuk *air receiver* (VAR), untuk setiap kombinasi tekanan dan kecepatan, maka keseluruhan perhitungan akan menjadi pertimbangan untuk kombinasi yang paling optimal untuk digunakan dalam *compressed air system* yang menjadi fokus dalam penelitian. Ringkasan perhitungan tercantum dalam tabel 2.11.

Tabel 4.11 Perhitungan *Air Receiver*

P_t (bar)	v (m/s)	V_t (m^3)	V_c (m^3)	n_c	V_{AR} (m^3)
1	10	4342,94	359,94	2.95 \approx 3	111,13
2	4	3474,35	287,95	2.36 \approx 3	88,90
3	3	3908,64	323,94	2.66 \approx 3	100,02

Dari tabel 4.11, dapat diketahui bahwa kapasitas *air receiver* paling kecil adalah kapasitas *air receiver* dengan *output* ke turbin impuls dengan variasi tekanan 2 bar dan kecepatan 4 m/s sehingga dapat menghemat kebutuhan ruang akan *air receiver*. Namun, kapasitas *air receiver* dengan variasi tekanan 1 bar dan kecepatan 10 m/s merupakan yang paling optimal, karena walau memiliki kapasitas *air receiver* paling besar, tetapi perbandingan jumlah kompresor dengan debit angin yang dapat disalurkan merupakan yang paling optimal, karena keseluruhan variasi memiliki jumlah 3 kompresor.

4.5 Analisa Turbin Impuls



Gambar 4.11 Desain Turbin Impuls

Turbin yang digunakan untuk menggerakkan generator adalah turbin impuls dengan prinsip seperti turbin di sungai namun fluida yang digunakan menggunakan udara dan

dialirkan melalui pipa dari *air receiver*. Gambar 4.11 merupakan ilustrasi yang digunakan dengan radius 1 m dan lebar 0,3 m serta memiliki 24 buah sudu turbin. Dan didapatkan hasil torsi sebesar 12,44 Nm dan putaran 211,13 rpm. Hasil analisa yang dibutuhkan dari turbin impuls tersebut berupa torsi dan rpm turbin. Hasil didapatkan melalui *software* simulasi aliran yang dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil Simulasi Turbin Impuls

Input		Output		
Tekanan (bar)	Kecepatan (m/s)	Kecepatan (m/s)	Putaran (rpm)	Torsi (Nm)
1	10	50	477,46	29,97
2	4	20,68	197,53	0,64
3	3	15,48	147,82	0,20

Setelah dilakukan analisa, diketahui hasil seperti pada tabel 4.12. Turbin dengan hasil terbesar adalah kecepatan *input* 10 m/s mampu menghasilkan kecepatan angular 50 m/s dengan putaran 477,46483 rpm, dan torsi 29,972302 Nm.

4.6 Analisa Generator

Generator yang digunakan untuk menghasilkan daya adalah generator tipe *permanent magnet generator* (PMG) karena tipe generator tersebut sebagian besar digunakan untuk menghasilkan daya dengan torsi dan putaran rendah. Untuk menghitung torsi yang dibutuhkan magnet, maka diperlukan perhitungan dengan rumus (5).

$$\tau = \frac{500}{20,94}$$

$$\tau = 23,87 \text{ Nm}$$

Spesifikasi PMG yang digunakan tertera pada tabel 4.11 katalog dari produk Qingdao Greef New Energy Equipment Co. Ltd dan menggunakan pendekatan rumus (5) untuk mendapatkan torsi dari produk tersebut.

Tabel 4.13 Torsi PMG

Sumber: Qingdao Greef New Energy Equipment Co. Ltd

No.	Model	Torsi (Nm)
1	GDG-200W	9,55
2	GDG-300W	14,32
3	GDG-500W	39,79
4	GDG-1kW	79,58
5	GDG-2kW	159,15
6	GDG-3kW	286,48

Setelah spesifikasi didapatkan, perhitungan disesuaikan dengan torsi yang dihasilkan oleh generator, yakni dengan memilih PMG model xx seperti yang diilustrasikan pada gambar 4.12. Putaran torsi pada generator harus memiliki nilai yang lebih rendah daripada torsi pada turbin impuls agar generator dapat berputar. Maka, dibutuhkan *reduction gearbox* agar kecepatan dan torsi yang dihasilkan turbin impuls dapat memenuhi spesifikasi generator. *Reduction gearbox* yang akan digunakan tampak pada gambar 4.12



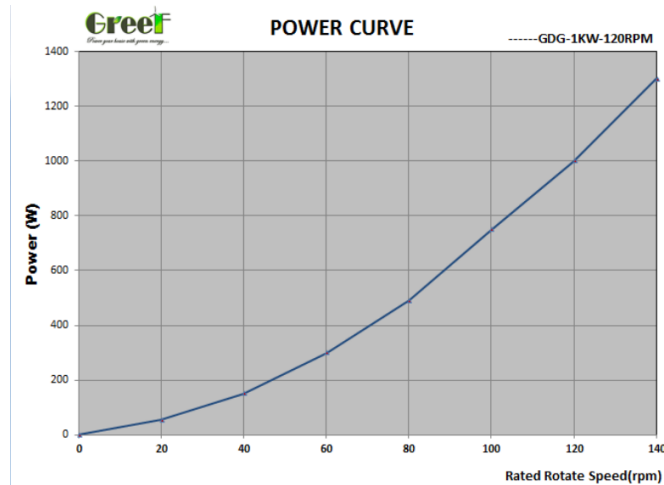
Gambar 4.12 *Reduction Gearbox*
Sumber: RC Jens-S Bevel Gearbox

Gambar 4.12 merupakan ilustrasi dari *reduction gearbox* dengan rasio 4:1, sehingga putaran yang dihasilkan akan menurun 0,25 kali dari putaran awal dan torsi yang dihasilkan akan lebih besar 4 kali dari torsi awal. Hal ini sesuai dengan rumus (5).



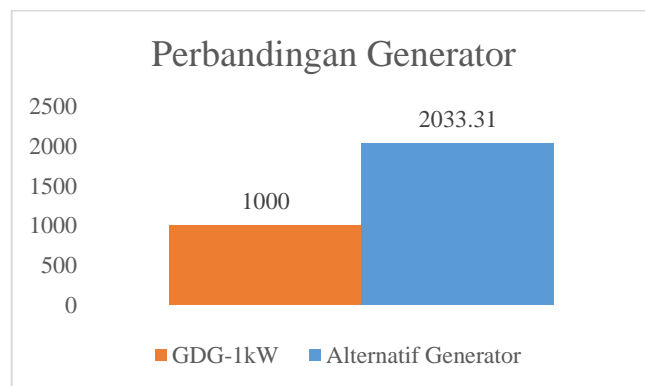
Gambar 4.13 PMG GDG-1kW
Sumber: Qingdao Greef New Energy Equipment Co. Ltd

Gambar 4.13 merupakan gambar generator dengan model GDG-1kW yang dipilih karena memiliki torsi 79,58 Nm dan turbin impuls memiliki torsi yang lebih besar, yakni 119,89 Nm setelah diberikan *reduction gearbox* dengan torsi awal 29,97 Nm. Untuk mengetahui daya yang dihasilkan, maka dibutuhkan grafik perbandingan antara putaran dan daya yang dihasilkan dari manufaktur *generator* tersebut. Grafik putaran terhadap daya dapat dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Putaran v Daya Generator
Sumber: Qingdao Greef New Energy Equipment Co. Ltd

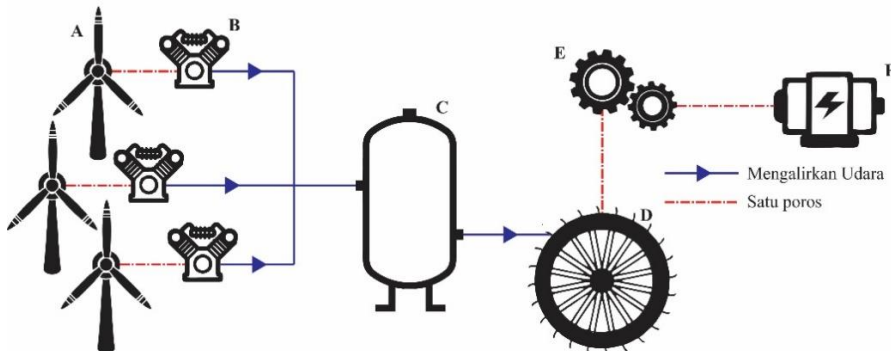
Berdasarkan gambar 4.14, putaran yang dihasilkan oleh turbin impuls adalah 119,37 rpm, jika dihubungkan dengan kurva pada gambar 4.14, maka daya yang dihasilkan adalah 1000 Watt atau 1 kW. Selain menggunakan generator GDG-1kW, perhitungan daya generator pun dapat menggunakan rumus (5) dimana daya yang dicari bisa disesuaikan dengan generator.



Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Generator

Gambar 4.15 merupakan gambar perbandingan generator yang digunakan antara PMG yang telah dipilih dengan generator pada umumnya. Pada generator PMG, daya yang dihasilkan adalah 1.000 Watt dengan putaran dan torsi yang menyesuaikan spesifikasi generator sehingga harus menggunakan gearbox. Pada perhitungan alternatif generator, daya yang dihasilkan bisa dua kali lebih banyak dan tanpa menggunakan gearbox sesuai dengan rumus (5).

4.7 Analisa Sistem



Gambar 4.16 *Compressed Air System* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Setelah semua spesifikasi komponen didapat, maka sistem dapat digambarkan dan disusun agar keseluruhan sistem dapat diketahui secara sederhana dan sistematis. Spesifikasi setiap komponen dapat diketahui dengan lebih rinci dengan menjabarkan sistem yang diilustrasikan pada gambar 4.15.

A. Turbin Penggerak Kompresor

Tabel 4.14 Spesifikasi Turbin Penggerak Kompresor

Jenis Turbin	Turbin Angin Sumbu Horizontal
Jumlah Sudu	3
Jenis <i>Airfoil</i>	NACA 4412
Kecepatan Angin	5 m/s
Lama Beroperasi	16,59 jam per hari
Jari-Jari Sudu	2,25 m
Jari-Jari Poros	0,22 m
Putaran	135,31 rpm
Torsi	49,64 Nm
Jumlah Turbin	3

Tabel 4.14 merupakan spesifikasi turbin sebagai penggerak kompresor. Jenis turbin angin sumbu horizontal dengan tiga buah sudu dipilih karena memiliki nilai efisiensi tertinggi. Jenis *airfoil* NACA 4412 dipilih karena dapat menghasilkan torsi yang tinggi dibandingkan NACA 4418 dan NACA 4421, hal ini sesuai dengan nilai C_l/C_d pada NACA 4412 memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan NACA 4418 dan NACA 4421. Dengan *input* angin 5 m/s, turbin ini mampu menghasilkan putaran 135,31 rpm dan torsi 49,64 rpm.

B. *Reciprocating Compressor*

Tabel 4.15 Spesifikasi Turbin Penggerak Kompresor

Manufaktur	Gardner Denver
Model	RV.15A
Jenis	<i>Bare pump compressor</i>
Tipe Kompresor	<i>Reciprocating, single acting</i>
Jumlah Silinder	2
Putaran	135,31 rpm
Torsi	48,47
Free Air Delivery	$9,05097 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$
Jumlah	3
Lama Beroperasi	16,59 jam per hari
Debit Per Hari	121,91 m^3 tiap kompresor

Berdasarkan tabel 4.15, tipe kompresor yang digunakan adalah *bare pump compressor*, yakni tipe kompresor yang belum memiliki alat penggerak, sehingga dapat dipasangkan dengan turbin angin karena turbin angin memiliki torsi 49,46 Nm dan kompresor memiliki torsi 48,47 Nm, sehingga turbin angin dapat menggerakkan kompresor dengan putaran kompresor menyesuaikan putaran turbin angin.

C. *Air Receiver*

Tabel 4.16 Spesifikasi *Air Receiver*

Kapasitas	111,13 m^3
Tekanan	12,07 bar
Debit Masuk	$7,38 \text{ m}^3/\text{jam} \times 3$
Durasi Debit Masuk	16,59 jam per hari
Debit Keluar	$180,96 \text{ m}^3/\text{jam}$
Durasi Debit Keluar	24 jam per hari
Diameter Pipa Output	0,08 m
Kecepatan Udara Keluar	10 m/s
Tekanan Pipa Keluar	1 bar

Berdasarkan tabel 4.16, spesifikasi *air receiver* yang digunakan adalah *air receiver* dengan kapasitas 111,1305 m^3 dan tekanan 12,06583 bar. Kapasitas *air receiver* dapat terpenuhi dengan *input* dari tiga buah kompresor yang mampu mengalirkan udara dengan debit $7,3843 \text{ m}^3/\text{jam}$ tiap kompresor dengan tekanan masing-masing 12,06583 bar. Kapasitas *air receiver* mampu mengalirkan udara ke turbin impuls ketika keadaan tidak ada udara yang mengalir pada turbin penggerak kompresor selama 7,41 jam dengan debit keluar melalui pipa dengan diameter 0,08 m, debit keluar $180,96 \text{ m}^3/\text{jam}$, dan kecepatan 10 m/s dengan tekanan 1 bar.

D. Turbin Impuls

Tabel 4.17 Spesifikasi Turbin Impuls

Diameter Turbin	2 m
Jumlah Sudu	24
Putaran	7,38 m ³ /jam x 3
Kecepatan Input	10 m/s
Tekanan Input	1 bar
Debit Input	180,96 m ³ /jam
Torsi	29,97 Nm
Putaran	477,46 rpm

Sesuai dengan spesifikasi pada tabel 4.17, turbin impuls yang digunakan memiliki diameter 2 m dengan jumlah sudu 24 agar putaran menjadi optimum saat mendapat input dari pipa berdiameter 0,08 m dengan kecepatan 10 m/s, debit 180,96 m³/jam, dan tekanan 1 bar. Dari hasil analisa simulasi *software* untuk analisa turbin dan aliran, didapatkan nilai putaran yang dihasilkan turbin yakni 477,46 rpm dan torsi 29,97 Nm untuk selanjutnya putaran dan torsi pada turbin impuls dihubungkan dengan *gearbox* agar putaran dan torsi sesuai dengan generator.

E. Gearbox

Tabel 4.18 Spesifikasi Gearbox

Jenis	<i>Reduction gearbox</i>
Rasio	4:1
Putaran Sebelum Gearbox	477,46 rpm
Putaran Sesudah Gearbox	119,37 rpm
Torsi Sebelum Gearbox	29,97 Nm
Torsi Sesudah Gearbox	119,89 Nm

Berdasarkan Tabel 4.18, *gearbox* yang digunakan adalah jenis *reduction gearbox* dengan rasio 4:1, yakni yang mereduksi putaran dari turbin impuls 0.25 kali dari 477,46483 rpm menjadi 119,3662075 rpm. Namun dengan berkurangnya putaran, daya yang dibutuhkan masih sama sehingga torsi semakin meningkat. Torsi meningkat 4 kali dari torsi sebelum masuk ke *gearbox*, yakni dari 29,972302 Nm menjadi 119,889208 Nm.

F. Generator

Tabel 4.19 Spesifikasi Generator

Manufaktur	Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd
Model	GDG-1kW
Jenis Generator	<i>Permanent Magnet Generator</i>
Stator	<i>Coreless wire coil</i>
Rotor	<i>Rare earth permanent magnet</i>

Torsi Minimal	79,58 Nm
Torsi Input	119,89 Nm
Putaran	119,37 rpm
Daya	1 kW

Berdasarkan tabel 4.19, generator yang digunakan adalah generator dengan jenis *permanent magnet generator*, yakni generator yang membutuhkan torsi tidak terlalu besar untuk memutar generator. Torsi minimal untuk memutar generator adalah 79,577 Nm sedangkan torsi *input* yang telah melewati *gearbox* adalah 119,889208 Nm sehingga generator dapat berputar dengan putaran sebesar 119,3662075 rpm. Dan menghasilkan daya 1 kW.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian analisa *compressed air system* pada pembangkit listrik tenaga bayu menganalisa tentang sistem *compressed air* yang digunakan untuk menjawab permasalahan potensi angin yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga bayu belum optimal dikarenakan kecepatan angin yang fluktuatif dan menjadikan kecepatan tersebut konstan. Dalam penelitian kali ini, *compressed air system* pada pembangkit listrik tenaga bayu memiliki spesifikasi sebagai berikut.

1. Turbin untuk menggerakkan kompresor merupakan turbin angin sumbu horizontal yang bergerak dengan angin berkecepatan 5 m/s selama kurang lebih 16,59 jam dalam satu hari, memiliki tiga buah sudu, jari-jari total 4,47 m (jari-jari turbin 2,25 m dan jari-jari poros 0,22 m), berputar dengan putaran 135,31 rpm dan torsi 49,46 Nm. Turbin ini berjumlah 3 buah dan masing-masing memiliki satu poros dengan sebuah *bare pump compressor*.
2. *Compressed air system* terdiri dari kompresor dan *air receiver*. Kompresor memiliki *free air delivery* (FAD) sebesar 0,000905097 m³/s dan putaran 135,31 rpm, berjumlah 3 buah sesuai dengan jumlah turbin penggerak kompresor. *Air receiver* memiliki kapasitas 111,1305 m³ yang merupakan kapasitas untuk mengalirkan udara saat tidak ada angin yang berhembus, direncanakan selama 7,41 jam dalam satu hari.
3. Turbin penggerak generator merupakan turbin impuls dengan diameter 2 m dan memiliki 24 sudu. Dari kecepatan angin sebesar 10 m/s yang disalurkan dengan pipa berdiameter 0,08 m dan tekanan 1 bar, turbin ini mampu menghasilkan putaran 477,46483 rpm dan torsi 29,972302 Nm. Untuk menyesuaikan dengan spesifikasi generator, maka turbin diberi *gearbox* dengan rasio 4:1, sehingga putaran menjadi 119,3662075 rpm dan torsi menjadi 119,889208 Nm.
4. Setelah disesuaikan dengan spesifikasi generator, untuk putaran 119,3662075 rpm generator dapat menghasilkan daya 1.000 Watt per jam atau 24.000 Watt dalam satu hari

5.2 Saran

Penelitian ini merupakan riset awal sebagai salah satu solusi dalam pengoptimalan potensi angin di Indonesia yang memiliki kecepatan fluktuatif menjadi kecepatan konstan sehingga bisa digunakan untuk pembangkit listrik tenaga bayu, sehingga masih butuh pengembangan desain turbin untuk menggerakkan kompresor yang lebih optimal, memiliki putaran dan torsi lebih tinggi seperti menggunakan turbin tipe *archimedes* atau bisa dengan menggabungkan dengan teknologi lain yang dapat membuat kecepatan angin menjadi lebih konstan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, D. R., Sweeney, D. J., Williams, T. A., Camm, J. D., & Cochran, J. J. (2015). *Statistics for Business and Economics 13rd Edition*. Boston: Cengage Learning.
- Gasch, R., & Twele, J. (2002). *Wind Power Plants*. Berlin: Solarpraxis.
- Hanlon, P. C. (2001). *Compressor Handbook*. New York: R. R. Donnelley & Sons Company.
- Hau, E. (2006). *Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2nd Edition*. Berlin: Springer.
- Irasari, P., & Idayani, N. (2009). Aplikasi Magnet Permanen BaFe₁₂O₁₉ dan NdFeB pada Generator Magnet Permanen Kecepatan Rendah Skala Kecil. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 38 - 41.
- Liu, Q., Miao, Q., Liu, J. J., & Yang, W. (2009). Solar and Wind Energy Resources and Prediction. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 1.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics 6th Edition*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Pakpahan, S. (2003). Pemetaan Energi Angin Untuk Pemanfaatan dan Melengkapi Peta Potensi SDA Indonesia. Jakarta: Lapan.
- Parr, A. (1999). *Hydraulics and Pneumatics*. Elsevier.
- Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017. (n.d.).
- Perry, A. H., & Walker, J. M. (1977). *The Ocean - Atmosphere System*. London: Longman Group Limited.
- Schmitz, F. W. (1967). *Aerodynamic of The Model Airplane*. Alabama: Redstone Scientific Information Center.
- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design Review. *Wind Engineering Volume 36*, 365 - 388.
- Soeripno. (2008). Potensi Angin dan Prospek Pemanfaatannya di Indonesia. *Workshop Nasional Energi Angin* (p. 95). Jakarta: LAPAN.
- Sofiati, I., & Sumaryati. (2010). Analisis Potensi Angin Keluaran TAPM (The Air Pollution Model) V. 3.1.7 untuk Energi Angin di Timika - Papua. *Prosiding SNSA 2010 Kontribusi Sains Atmosfer dalam Menghadapi Perubahan Iklim Indonesia* (pp. 271 -278). Bandung: Lapan.

Sularso, & Tahara, H. (2000). *Pompa dan Kompresor*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pengolahan Data Angin

	x	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
x ₁	7,3	1,838709677	3,380853278
x ₂	7	1,538709677	2,367627471
x ₃	6,9	1,438709677	2,069885536
x ₄	6,8	1,338709677	1,7921436
x ₅	6,8	1,338709677	1,7921436
x ₆	6,6	1,138709677	1,296659729
x ₇	6,6	1,138709677	1,296659729
x ₈	6,6	1,138709677	1,296659729
x ₉	5,8	0,338709677	0,114724246
x ₁₀	5,8	0,338709677	0,114724246
x ₁₁	5,5	0,038709677	0,001498439
x ₁₂	5,6	0,138709677	0,019240375
x ₁₃	5,4	-0,061290323	0,003756504
x ₁₄	5,4	-0,061290323	0,003756504
x ₁₅	5,4	-0,061290323	0,003756504
x ₁₆	5,3	-0,161290323	0,026014568
x ₁₇	5,2	-0,261290323	0,068272633
x ₁₈	5,2	-0,261290323	0,068272633
x ₁₉	4,9	-0,561290323	0,315046826
x ₂₀	5,1	-0,361290323	0,130530697
x ₂₁	4,9	-0,561290323	0,315046826
x ₂₂	4,8	-0,661290323	0,437304891
x ₂₃	4,6	-0,861290323	0,74182102
x ₂₄	4,6	-0,861290323	0,74182102
x ₂₅	4,6	-0,861290323	0,74182102
x ₂₆	4,6	-0,861290323	0,74182102
x ₂₇	4,6	-0,861290323	0,74182102
x ₂₈	4,4	-1,061290323	1,126337149
x ₂₉	4,4	-1,061290323	1,126337149
x ₃₀	4,3	-1,161290323	1,348595213
x ₃₁	4,3	-1,161290323	1,348595213
Σ	169,3		25,57354839

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

$$\bar{x} = \frac{169,3}{31}$$

$$\bar{x} = 5,461290323$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$\sigma^2 = \frac{25,57354839}{30}$$

$$\sigma^2 = 0,852452$$

$$\sigma = 0,923283062$$

Lampiran 2 Cl/Cd v Alpha NACA 4412

Alpha	Cl	Cd	Cl/Cd	Cdp	Cm
0	0,4741	0,00703	67,439545	0,0022	-0,1018
0,25	0,4944	0,00681	72,599119	0,00229	-0,0995
0,5	0,5429	0,00683	79,487555	0,00228	-0,1037
0,75	0,5727	0,00693	82,640693	0,00228	-0,1041
1	0,5983	0,00705	84,865248	0,00231	-0,1035
1,25	0,6239	0,00719	86,773296	0,00235	-0,103
1,5	0,6499	0,00731	88,905609	0,0024	-0,1026
1,75	0,6761	0,00744	90,873656	0,00246	-0,1022
2	0,7023	0,00759	92,529644	0,00253	-0,1018
2,25	0,7283	0,00775	93,974194	0,0026	-0,1014
2,5	0,7548	0,00788	95,786802	0,00269	-0,1011
2,75	0,7811	0,00804	97,151741	0,00279	-0,1007
3	0,8073	0,0082	98,45122	0,0029	-0,1004
3,25	0,8339	0,00834	99,98801	0,00302	-0,1001
3,5	0,86	0,00854	100,70258	0,00314	-0,0998
3,75	0,8867	0,00866	102,3903	0,00327	-0,0995
4	0,9127	0,00884	103,24661	0,00341	-0,0992
4,25	0,9385	0,00902	104,04656	0,00355	-0,0988
4,5	0,9647	0,00917	105,20174	0,0037	-0,0984
4,75	0,9903	0,00937	105,68837	0,00385	-0,098
5	1,0155	0,00957	106,11285	0,004	-0,0975
5,25	1,0403	0,00977	106,47902	0,00416	-0,097
5,5	1,0652	0,00997	106,84052	0,00433	-0,0964
5,75	1,0906	0,01016	107,34252	0,00452	-0,096
6	1,1155	0,01038	107,46628	0,00472	-0,0955
6,25	1,1399	0,01063	107,23424	0,00495	-0,0949
6,5	1,1639	0,0109	106,77982	0,00518	-0,0942
6,75	1,1875	0,01119	106,12154	0,00543	-0,0935
7	1,2103	0,01152	105,06076	0,00571	-0,0927
7,25	1,2318	0,01193	103,25231	0,00603	-0,0917
7,5	1,2528	0,01238	101,19548	0,00639	-0,0906
7,75	1,2718	0,01294	98,284389	0,00682	-0,0892
8	1,2891	0,01362	94,647577	0,00734	-0,0876
8,25	1,3042	0,01442	90,443828	0,00794	-0,0856
8,5	1,3175	0,01531	86,054866	0,00862	-0,0834
8,75	1,3282	0,01622	81,88656	0,00934	-0,0807
9	1,3388	0,01711	78,246639	0,01011	-0,0781
9,25	1,35	0,01798	75,083426	0,01089	-0,0756
9,5	1,3615	0,01884	72,266454	0,01169	-0,0732
9,75	1,3735	0,01968	69,791667	0,01251	-0,0709
10	1,3845	0,0206	67,208738	0,0134	-0,0687

Lampiran 3 Cl/Cd v Alpha NACA 4418

Alpha	Cl	Cd	Cl/Cd	Cdp	Cm
0	0,4728	0,0093	50,83871	0,00316	-0,0961
0,25	0,498	0,00927	53,721683	0,00322	-0,0955
0,5	0,5239	0,00919	57,007617	0,00328	-0,095
0,75	0,549	0,00918	59,803922	0,00335	-0,0944
1	0,5743	0,00914	62,833698	0,00345	-0,0937
1,25	0,5991	0,00912	65,690789	0,00354	-0,0929
1,5	0,6232	0,00915	68,10929	0,00365	-0,0919
1,75	0,6474	0,00913	70,909091	0,00377	-0,0909
2	0,6706	0,0092	72,891304	0,0039	-0,0895
2,25	0,6962	0,00932	74,699571	0,00406	-0,0887
2,5	0,7263	0,00945	76,857143	0,00419	-0,0889
2,75	0,7625	0,00966	78,933747	0,00433	-0,0906
3	0,8022	0,00982	81,690428	0,00448	-0,0931
3,25	0,8456	0,01003	84,307079	0,00463	-0,0964
3,5	0,8891	0,01024	86,826172	0,00478	-0,0999
3,75	0,9157	0,01034	88,558994	0,00487	-0,0998
4	0,9323	0,0105	88,790476	0,00494	-0,0976
4,25	0,9513	0,0106	89,745283	0,00504	-0,0958
4,5	0,9702	0,01072	90,503731	0,00514	-0,094
4,75	0,9886	0,01091	90,614115	0,00526	-0,0922
5	1,0097	0,01102	91,624319	0,00539	-0,0908
5,25	1,0304	0,01118	92,16458	0,00552	-0,0895
5,5	1,0503	0,01142	91,970228	0,00569	-0,0879
5,75	1,0726	0,01154	92,946274	0,00585	-0,0869
6	1,0926	0,01173	93,14578	0,00601	-0,0854
6,25	1,1114	0,01198	92,771285	0,00621	-0,0837
6,5	1,1326	0,01214	93,294893	0,0064	-0,0825
6,75	1,1519	0,01239	92,970137	0,00662	-0,081
7	1,172	0,01265	92,648221	0,00687	-0,0796
7,25	1,1925	0,01289	92,513576	0,00711	-0,0784
7,5	1,2105	0,01323	91,496599	0,0074	-0,0767
7,75	1,2311	0,01349	91,260193	0,00768	-0,0756
8	1,2483	0,0139	89,805755	0,00802	-0,0739
8,25	1,2693	0,01417	89,57657	0,00833	-0,0729
8,75	1,3047	0,015	86,98	0,00912	-0,0699
9	1,3207	0,01551	85,151515	0,00958	-0,0682
9,25	1,3357	0,01609	83,014295	0,01011	-0,0665
9,5	1,3534	0,01657	81,677731	0,0106	-0,0652
9,75	1,368	0,01721	79,488669	0,0112	-0,0635
10	1,3839	0,01782	77,659933	0,0118	-0,062

Lampiran 4 Cl/Cd v Alpha NACA 4421

Alpha	Cl	Cd	Cl/Cd	Cdp	Cm
0	0,4595	0,01042	44,097889	0,00379	-0,0906
0,25	0,4847	0,01034	46,876209	0,00384	-0,09
0,5	0,5093	0,01033	49,303001	0,00389	-0,0893
0,75	0,5335	0,01033	51,645692	0,00398	-0,0886
1	0,5585	0,01028	54,328794	0,00407	-0,0879
1,25	0,583	0,01027	56,767283	0,00416	-0,0872
1,5	0,6077	0,01036	58,658301	0,00427	-0,0865
1,75	0,6328	0,01036	61,081081	0,00438	-0,0858
2	0,6574	0,01037	63,394407	0,00449	-0,085
2,25	0,6814	0,01043	65,330777	0,0046	-0,0842
2,5	0,7058	0,01053	67,02754	0,00475	-0,0834
2,75	0,7294	0,01055	69,137441	0,00489	-0,0823
3	0,7523	0,01061	70,904807	0,00503	-0,0811
3,25	0,774	0,01074	72,067039	0,0052	-0,0796
3,5	0,7966	0,01091	73,015582	0,00539	-0,0783
3,75	0,8208	0,01102	74,482759	0,00556	-0,0773
4	0,8516	0,01121	75,967886	0,00574	-0,0779
4,25	0,8863	0,01148	77,203833	0,00595	-0,0794
4,5	0,9265	0,01173	78,985507	0,00618	-0,0821
4,75	0,9686	0,01194	81,122278	0,0064	-0,0853
5	1,0126	0,01222	82,864157	0,00663	-0,0889
5,25	1,0213	0,01237	82,562652	0,00671	-0,0853
5,5	1,0293	0,0124	83,008065	0,00677	-0,0815
5,75	1,0421	0,01251	83,301359	0,00688	-0,0786
6	1,0571	0,01271	83,170732	0,00703	-0,0763
6,25	1,0745	0,01294	83,037094	0,00723	-0,0745
6,5	1,0927	0,01313	83,22163	0,00743	-0,0728
6,75	1,1097	0,01343	82,628444	0,00767	-0,071
7	1,1294	0,01368	82,55848	0,00793	-0,0698
7,25	1,149	0,01396	82,30659	0,0082	-0,0685
7,5	1,1665	0,01434	81,345886	0,00853	-0,067
7,75	1,187	0,01463	81,134655	0,00884	-0,0659
8	1,2059	0,01498	80,500668	0,00919	-0,0647
8,25	1,2227	0,01544	79,190415	0,00961	-0,0632
8,5	1,2425	0,0158	78,639241	0,00999	-0,0622
8,75	1,2586	0,01632	77,120098	0,01046	-0,0607
9	1,2769	0,01677	76,14192	0,01093	-0,0595
9,25	1,2933	0,01732	74,670901	0,01146	-0,0581
9,5	1,3093	0,01791	73,104411	0,01204	-0,0568
9,75	1,3252	0,01853	71,51646	0,01265	-0,0554
10	1,3393	0,01925	69,574026	0,01334	-0,0539

Lampiran 5 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,00 m Sebelum Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,448	45	147692,3077
0,4	0,896	37,6	295384,6154
0,6	0,448	19,5	147692,3077
0,8	0,299	11,6	98571,42857
1	0,224	7,4	73846,15385
1,2	0,179	4,8	59010,98901
1,4	0,149	3	49120,87912
1,6	0,128	1,7	42197,8022
1,8	0,112	0,8	36923,07692
2	0,1	0	32967,03297
2,2	0,09	-0,6	29670,32967

Lampiran 6 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,25 m Sebelum Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,504	45	166153,8462
0,425	1,008	37,6	332307,6923
0,65	0,504	19,5	166153,8462
0,875	0,336	11,6	110769,2308
1,1	0,252	7,4	83076,92308
1,325	0,202	4,8	66593,40659
1,55	0,168	3	55384,61538
1,775	0,144	1,7	47472,52747
2	0,126	0,8	41538,46154
2,225	0,112	0	36923,07692
2,45	0,101	-0,6	33296,7033

Lampiran 7 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,50 m Sebelum Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,56	45	184615,3846
0,45	1,12	37,6	369230,7692
0,7	0,56	19,5	184615,3846

0,95	0,373	11,6	122967,033
1,2	0,28	7,4	92307,69231
1,45	0,224	4,8	73846,15385
1,7	0,187	3	61648,35165
1,95	0,16	1,7	52747,25275
2,2	0,14	0,8	46153,84615
2,45	0,124	0	40879,12088
2,7	0,112	-0,6	36923,07692

Lampiran 8 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 2,75 m Sebelum Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,616	45	203076,9231
0,475	1,232	37,6	406153,8462
0,75	0,616	19,5	203076,9231
1,025	0,411	11,6	135494,5055
1,3	0,308	7,4	101538,4615
1,575	0,246	4,8	81098,9011
1,85	0,205	3	67582,41758
2,125	0,176	1,7	58021,97802
2,4	0,154	0,8	50769,23077
2,675	0,137	0	45164,83516
2,95	0,123	-0,6	40549,45055

Lampiran 9 Spesifikasi Turbin Angin Jari-jari 3,00 m Sebelum Optimasi

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,21	0,672	45	221538,4615
0,51	1,345	37,6	443406,5934
0,81	0,672	19,5	221538,4615
1,11	0,448	11,6	147692,3077
1,41	0,336	7,4	110769,2308
1,71	0,269	4,8	88681,31868
2,01	0,224	3	73846,15385
2,31	0,192	1,7	63296,7033
2,61	0,168	0,8	55384,61538
2,91	0,149	0	49120,87912
3,21	0,134	-0,6	44175,82418

Lampiran 10 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4412 Jari-jari 2,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,20	0,490693	34,8322	161766,9231
0,40	0,314762	16,146	103767,6923
0,60	0,223643	7,74953	73728,46154
0,80	0,171868	3,17639	56659,78022
1,00	0,139111	0,333645	45860,76923
1,20	0,116678	-1,59582	38465,27473
1,40	0,100405	-2,98829	33100,54945
1,60	0,0880804	-4,03943	29037,49451
1,80	0,0784326	-4,86053	25856,9011
2,00	0,0706792	-5,5194	23300,83516
2,20	0,0643144	-6,05967	21202,54945

Lampiran 11 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4412 Jari-jari 2,25 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,22	0,573575	37,8987	189090,6593
0,445	0,363564	17,2676	119856,2637
0,67	0,255238	8,24684	84144,3956
0,895	0,194649	3,43142	64170
1,12	0,156758	0,476132	51678,46154
1,345	0,131018	-1,51258	43192,74725
1,57	0,112456	-2,93911	37073,40659
1,795	0,09846	-4,0111	32459,34066
2,02	0,0875413	-4,84557	28859,76923
2,245	0,0787904	-5,51334	25974,85714
2,47	0,0716229	-6,05967	23611,94505

Lampiran 12 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4412 Jari-jari 2,50 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,24	0,657159	40,625	216645,8242
0,49	0,41305	18,2449	136170,3297
0,74	0,287071	8,67065	94638,79121
0,99	0,217519	3,64571	71709,56044

1,24	0,174439	0,594757	57507,36264
1,49	0,145372	-1,44372	47924,83516
1,74	0,124512	-2,89862	41047,91209
1,99	0,108842	-3,98786	35881,97802
2,24	0,0966506	-4,83334	31862,83516
2,49	0,0869018	-5,50839	28648,94505
2,74	0,0789313	-6,05967	26021,30769

Lampiran 13 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4412 Jari-jari 2,75 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,26	0,741032	43,0543	244296,2637
0,535	0,463078	19,1034	152663,0769
0,81	0,319091	9,03611	105194,8352
1,085	0,240456	3,82829	79271,20879
1,36	0,192147	0,69505	63345,16484
1,635	0,159738	-1,38582	52660,87912
1,91	0,136574	-2,86469	45024,3956
2,185	0,119225	-3,96844	39304,94505
2,46	0,105761	-4,82314	34866,26374
2,735	0,0950133	-5,50427	31323,06593
3,01	0,0862398	-6,05967	28430,7033

Lampiran 14 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4412 Jari-jari 3,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,285	0,815846	44,0142	268960,2198
0,585	0,50889	19,4401	167765,9341
0,885	0,349504	9,17776	115221,0989
1,185	0,262819	3,89853	86643,62637
1,485	0,209731	0,73344	69142,08791
1,785	0,174192	-1,36373	57425,93407
2,085	0,148831	-2,85178	49065,16484
2,385	0,12986	-3,96107	42810,98901
2,685	0,115148	-4,81928	37960,87912
2,985	0,103414	-5,50271	34092,52747
3,285	0,0938406	-6,05967	30936,46154

Lampiran 15 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4418 Jari-jari 2,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,481427	33,3322	158712,1978
0,4	0,308818	14,646	101808,1319
0,6	0,219419	6,24953	72335,93407
0,8	0,168622	1,67639	55589,67033
1	0,136484	-1,16635	44994,72527
1,2	0,114475	-3,09582	37739,01099
1,4	0,0985085	-4,48829	32475,32967
1,6	0,0864171	-5,53943	28489,15385
1,8	0,0769515	-6,36053	25368,62637
2	0,0693444	-7,0194	22860,79121
2,2	0,0630999	-7,55967	20802,16484

Lampiran 16 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4418 Jari-jari 2,25 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,22	0,562743	36,3987	185519,6703
0,445	0,356698	15,7676	117592,7473
0,67	0,250418	6,74684	82555,38462
0,895	0,190974	1,93142	62958,46154
1,12	0,153797	-1,02387	50702,30769
1,345	0,128544	-3,01258	42377,14286
1,57	0,110332	-4,43911	36373,18681
1,795	0,0966006	-5,5111	31846,35165
2,02	0,0858881	-6,34557	28314,75824
2,245	0,0773025	-7,01334	25484,34066
2,47	0,0702703	-7,55967	23166,03297

Lampiran 17 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4418 Jari-jari 2,50 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,24	0,644749	39,125	212554,6154
0,49	0,40525	16,7449	133598,9011
0,74	0,281649	7,17065	92851,31868
0,99	0,213411	2,14571	70355,27473

1,24	0,171145	-0,905243	56421,42857
1,49	0,142627	-2,94372	47019,89011
1,74	0,122161	-4,39862	40272,85714
1,99	0,106786	-5,48786	35204,17582
2,24	0,0948254	-6,33334	31261,12088
2,49	0,0852607	-7,00839	28107,92308
2,74	0,0774407	-7,55967	25529,9011

Lampiran 18 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4418 Jari-jari 2,75 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,26	0,727038	41,5543	239682,8571
0,535	0,454333	17,6034	149780,1099
0,81	0,313065	7,53611	103208,2418
1,085	0,235915	2,32829	77774,17582
1,36	0,188519	-0,80495	62149,12088
1,635	0,156721	-2,88582	51666,26374
1,91	0,133995	-4,36469	44174,17582
2,185	0,116974	-5,46844	38562,85714
2,46	0,103763	-6,32314	34207,58242
2,735	0,093219	-7,00427	30731,53846
3,01	0,0846112	-7,55967	27893,8022

Lampiran 19 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4418 Jari-jari 3,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,285	0,80044	42,5142	263881,3187
0,585	0,49928	17,9401	164597,8022
0,885	0,342904	7,67776	113045,2747
1,185	0,257856	2,39853	85007,47253
1,485	0,20577	-0,76656	67836,26374
1,785	0,170903	-2,86373	56341,64835
2,085	0,146021	-4,35178	48138,79121
2,385	0,127407	-5,46107	42002,30769
2,685	0,112974	-6,31928	37244,17582
2,985	0,101461	-7,00271	33448,68132
3,285	0,0920684	-7,55967	30352,21978

Lampiran 20 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4421 Jari-jari 2,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,2	0,457737	33,5822	150902,3077
0,4	0,293622	14,896	96798,46154
0,6	0,208622	6,49953	68776,48352
0,8	0,160325	1,92639	52854,3956
1	0,129768	-0,916355	42780,65934
1,2	0,108842	-2,84582	35881,97802
1,4	0,0936612	-4,23829	30877,31868
1,6	0,0821648	-5,28943	27087,2967
1,8	0,0731649	-6,11053	24120,2967
2	0,0659322	-6,7694	21735,89011
2,2	0,0599949	-7,30967	19778,53846

Lampiran 21 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4421 Jari-jari 2,25 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,22	0,535053	36,6487	176391,0989
0,445	0,339146	16,0176	111806,3736
0,67	0,238095	6,99684	78492,85714
0,895	0,181576	2,18142	59860,21978
1,12	0,146229	-0,773868	48207,36264
1,345	0,122219	-2,76258	40291,97802
1,57	0,104903	-4,18911	34583,40659
1,795	0,0918472	-5,2611	30279,2967
2,02	0,0816618	-6,09557	26921,47253
2,245	0,0734987	-6,76334	24230,34066
2,47	0,0668125	-7,30967	22026,0989

Lampiran 22 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4421 Jari-jari 2,50 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,24	0,613023	39,375	202095,4945
0,49	0,385309	16,9949	127024,9451
0,74	0,26779	7,42065	88282,41758
0,99	0,20291	2,39571	66893,40659

1,24	0,162723	-0,655243	53644,94505
1,49	0,135609	-2,69372	44706,26374
1,74	0,11615	-4,14862	38291,20879
1,99	0,101532	-5,23786	33472,08791
2,24	0,0901594	-6,08334	29722,87912
2,49	0,0810653	-6,75839	26724,82418
2,74	0,0736301	-7,30967	24273,65934

Lampiran 23 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4421 Jari-jari 2,75 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,26	0,691263	41,8043	227888,9011
0,535	0,431977	17,8534	142410
0,81	0,29766	7,78611	98129,67033
1,085	0,224307	2,57829	73947,36264
1,36	0,179242	-0,55495	59090,76923
1,635	0,14901	-2,63582	49124,17582
1,91	0,127401	-4,11469	42000,32967
2,185	0,111218	-5,21844	36665,27473
2,46	0,0986574	-6,07314	32524,41758
2,735	0,088632	-6,75427	29219,34066
3,01	0,0804478	-7,30967	26521,25275

Lampiran 24 Spesifikasi Turbin Angin *Airfoil* NACA 4421 Jari-jari 3,00 m

Radial Position [m]	Chord Length [m]	Twist [deg]	Reynold's Number
0,285	0,761053	42,7642	250896,5934
0,585	0,474712	18,1901	156498,4615
0,885	0,326031	7,92776	107482,7473
1,185	0,245167	2,64853	80824,28571
1,485	0,195645	-0,51656	64498,35165
1,785	0,162493	-2,61373	53569,12088
2,085	0,138835	-4,10178	45769,78022
2,385	0,121138	-5,21107	39935,6044
2,685	0,107415	-6,06928	35411,53846
2,985	0,10233	-5,25271	33735,16484
3,285	0,0875381	-7,30967	28858,71429

Lampiran 25 Hasil Simulasi Torsi Turbin Kompresor

v (m/s)		1	2	3	4	5	6	7	8	
Torque (Nm)	R = 2 m	4412	1,37	5,47	12,32	21,89	34,21	49,26	67,05	87,58
		4418	1,18	4,72	10,61	18,86	29,48	42,44	57,77	75,46
		4421	1,29	5,17	11,64	20,70	32,34	46,57	63,38	82,79
	R = 2,25 m	4412	1,99	7,94	17,87	31,77	49,64	71,49	97,30	127,09
		4418	1,68	6,72	15,13	26,90	42,03	60,52	82,37	107,58
		4421	1,85	7,40	16,65	29,60	46,24	66,59	90,64	118,39
	R = 2,5 m	4412	2,68	10,72	24,12	42,88	67,01	96,49	131,33	171,53
		4418	2,30	9,18	20,66	36,73	57,39	82,64	112,48	146,92
		4421	2,52	10,08	22,68	40,32	63,00	90,71	123,47	161,27
	R = 2,75 m	4412	3,45	13,81	31,08	55,25	86,33	124,31	169,20	221,00
		4418	3,05	12,18	27,41	48,72	76,13	109,62	149,21	194,88
		4421	3,34	13,35	30,04	53,41	83,45	120,17	163,56	213,63
	R = 3 m	4412	4,66	18,63	41,92	74,53	116,45	167,69	228,24	298,11
		4418	3,97	15,86	35,69	63,46	99,15	142,78	194,33	253,82
		4421	3,32	13,28	29,87	53,11	82,99	119,50	162,65	212,44

Lampiran 26 Hasil Simulasi Putaran Turbin Kompresor

v (m/s)	Putaran Radius Sudu Turbin (RPM)				
	2 m	2,25 m	2,5 m	2,75 m	3 m
1	30,38	27,06	24,40	22,21	20,35
2	60,77	54,13	48,79	44,42	40,70
3	91,15	81,19	73,19	66,62	61,05
4	121,54	108,25	97,58	88,83	81,39
5	151,92	135,31	121,98	111,04	101,74
6	182,31	162,38	146,38	133,25	122,09
7	212,69	189,44	170,77	155,45	142,44
8	243,07	216,50	195,17	177,66	162,79

Lampiran 27 Hasil Perhitungan Kompresor

Model		RV,10A	RV,15A	RV,30A
Pressure	(PSI)	175	175	175
	(N/m ²)	1.206.583	1.206.583	1.206.583
RPM		400	400	400
Cylinder		2	2	4
Bore 1 Diameter	(Inch)	4,6	4,6	4,6
	(m)	0,11684	0,11684	0,11684
	(Inch)	2,5	2,5	2,5

Bore 2 Di- ameter	(m)	0,0635	0,0635	0,0635
Stroke	(Inch)	2,5	3	3
	(m)	0,0635	0,0762	0,0762
Volume m³		0,0008819	0,0010583	0,0021167
n_{air}		1,3	1,3	1,3
Clearance		0,025	0,025	0,025
η_{volumetric}		0,855212	0,855212	0,855212
FAD/cycle		0,0007542	0,0009051	0,0018102
Mass	Kg/cycle	0,0009125	0,001095	0,00219
	Kg/s	0,0060834	0,0073001	0,0146002
T_{out}	K	511,66135	511,66135	511,66135
Power (kW)		1,6921667	2,0306	4,0612
Torque (Nm)		40,395402	48,474483	96,948966

Lampiran 28 Katalog Gearbox



RC

Hollow shaft bevel gearboxes.

Ratios:

1/1 - 1/1,5 - 1/2 - 1/3 - 1/4.

RC RR RB RA RS RP RX RZ

		Ratio 1/4																	
		54		86		110		134		166		200		250		350		500	
Fast shaft revolution speed ω_v [rpm]	Fast shaft revolution speed ω_L [rpm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]	P_i [kW]	M_{tLL} [daNm]
3000	750	0,45	0,55	1,89	2,31	2,73	3,33	6,37	7,70	12,2	14,7	30,8	36,8	45,3	54,2	189	226	-	-
1500	375	0,24	0,58	1,00	2,44	1,43	3,49	3,36	8,12	6,49	15,7	16,4	39,2	24,2	57,9	100	239	155	355
1000	250	0,21	0,77	0,89	3,26	1,22	4,47	2,86	10,3	5,54	20,1	13,0	46,6	20,8	74,6	70,2	252	144	496
750	188	0,19	0,92	0,73	3,56	0,98	4,79	2,30	11,1	4,46	21,5	10,5	50,2	16,7	79,9	56,8	271	117	536
500	125	0,14	1,02	0,54	3,96	0,71	5,20	1,68	12,1	3,27	23,7	7,73	55,5	12,3	88,3	42,0	301	87,0	600
250	62,5	0,08	1,17	0,31	4,54	0,42	6,16	0,98	14,2	1,92	27,8	4,53	65,0	7,26	104	24,9	357	51,7	711
100	25	0,04	1,46	0,15	5,50	0,20	7,33	0,48	17,4	0,94	34,1	2,22	79,7	3,57	128	12,3	441	25,6	880
50	12,5	0,02	1,68	0,09	6,60	0,12	8,80	0,28	20,3	0,55	39,9	1,30	93,3	2,08	149	7,16	514	14,9	1024

Lampiran 29 Katalog Kompresor

Pump Model RV-10A

RV-SERIES | 2-3 HP RECIPROCATING COMPRESSORS

MOTOR HP	TANK CAPACITY GAL.	HORIZONTAL PACKAGES			VERTICAL PACKAGES			125 PSI RATING		175 PSI RATING	
		RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RPM	CFM DEL'Y	RPM	CFM DEL'Y
2	RV-10	-	-	-	VRV2-6	35.3 x 29 x 75.5	499	520	5.7	433	4.5
3	RV-10	-	-	-	VRV3F-6	35.3 x 29 x 75.5	509	802	9.2	759	8.2

Pump Model RV-15A

RV-SERIES | 5-7.5 HP RECIPROCATING COMPRESSORS

MOTOR HP	TANK CAPACITY GAL.	HORIZONTAL PACKAGES			VERTICAL PACKAGES			125 PSI RATING		175 PSI RATING	
		RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RPM	CFM DEL'Y	RPM	CFM DEL'Y
5	80	-	-	-	VRV5-8	35.3 x 30.9 x 74.8	570	759	18.1	715	16.5
5	80	-	-	-	VRV5-8*	35.3 x 28.6 x 74.8	560	684	16.3	641	14.6
7.5	80	-	-	-	VRV7F-8	35.3 x 30.9 x 74.8	630	975	22.8	975	22.1
7.5	80	-	-	-	VRV7F-8*	35.3 x 30.9 x 74.8	630	983	23	983	22.4

* Unit shipped with 3600 RPM motor

Pump Model RV-30A

RV-SERIES | 7.5-15 HP RECIPROCATING COMPRESSORS

MOTOR HP	TANK CAPACITY GAL.	HORIZONTAL PACKAGES			VERTICAL PACKAGES			125 PSI RATING		175 PSI RATING	
		RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RV-SERIES MODEL	DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	RPM	CFM DEL'Y	RPM	CFM DEL'Y
7.5	80	-	-	-	VRV7-8	40.8 x 31.6 x 74.8	710	628	29.8	570	24.0
7.5	80S**	-	-	-	VRV7-8S	40.5 x 33.4 x 62.3	753	628	29.8	570	24.0
7.5	120	HRV7-12	71.8 x 30.3 x 53.2	882	VRV7-12	42.1 x 34.5 x 75.2	882	628	29.8	570	24.0
10	120	HRV10-12	71.8 x 30.3 x 53.2	895	VRV10-12	42.1 x 34.4 x 75.2	895	756	36.6	699	32.0
15	120	HRV15F-12	71.8 x 30.3 x 53.2	1017	VRV15F-12	42.1 x 34.4 x 75.2	1017	1020	48.1	1020	46.8

**80S is an 80 gallon squat version of a 120 gallon receiver

Bare Pumps

RV-SERIES | RECIPROCATING COMPRESSOR

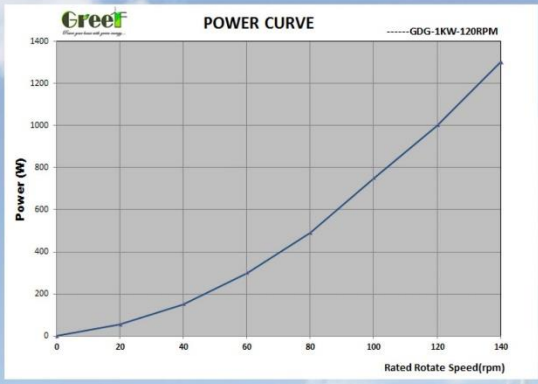
MODEL	# OF CYLINDERS	BORE DIA. INCHES	STROKE INCHES	OIL CAPACITY QUARTS	UNIT DIMENSIONS L x W x H INCHES	APPROX. SHIP WEIGHT LBS.	MINIMUM RPM	MAXIMUM RPM
RV-10A	2	4.6 & 2.5	2.5	2	18.7 x 16.5 x 21.9	124	400	1050
RV-15A	2	4.6 & 2.5	3	2	18.7 x 16.5 x 21.9	124	400	1050
RV-30A	4	4.6 & 2.5	3	4	19.2 x 23.9 x 21.8	233	400	1050

Lampiran 30 Katalog *Permanent Magnet Generator (PMG)*

QINGDAO GREEF NEW ENERGY EQUIPMENT CO.,LTD
 E-MAIL:SALES@GREEFENERGY.COM
 TEL:++86-532-67731422

Model: GDG-1kW

Rated Power	1KW
Rated Rotor Speed	120RPM
Rated Voltage	12-240V
Efficiency	>85%
Wending Method	Y
Leakage Level	<5Ma
Start Torque	<0.3N/M
Phase Type	3 Phase
Sturcture	Out rotor
Stator	Coreless wire coil
Rotor	Rare Earth Permanent Magnet
Weight	48kg
Shaft Material	Carbon Steel



BIODATA PENULIS



Penulis bernama Muhammad Adhitya Muslim, akrab disapa Adhit atau Muslim merupakan pria kelahiran Bogor, 24 Maret 1997. Lahir dari keluarga sederhana dan merupakan anak semata wayang dari pasangan alm. Djoko Pitono dan Siti Rakhmah. Menitik jengjang pendidikan mulai dari SDN 1 Cisarua (2003-2009), dilanjutkan ke tingkat menengah pada SMPN 1 Ciawi (2009-2012), tingkat lanjut pada SMAN 3 Bogor (2012-2015), dan program Sarjana di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (2015-2019). Memiliki hobi membaca dan tadabur alam. Pernah berpengalaman organisasi sebagai *steering committee* Himasiskal, FTK, ITS periode 2016/2017 dan menjadi Ketua Umum Kopma dr. Angka ITS periode 2018/2019.

surel: adhityamuslim@gmail.com

(Halaman ini sengaja dikosongkan)