

**SIMULASI DAN PEMODELAN TURBIN ANGIN TIPE DARRIEUS
DENGAN KONFIGURASI ROTOR TIPE H UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA BAYU SKALA MIKRO**

Alexander Prasetyo Widodo¹⁾, Stenly Tangkuman²⁾, Hengky Luntungan³⁾

Jurusan Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi

Jln. Kampus UNSRAT, Manado

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan mendapatkan hasil pemodelan dan simulasi turbin angin *Darrieus* tipe H dengan sudu-sudu lurus. Terdapat dua pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu perhitungan manual dan analisis perangkat lunak. Data yang digunakan adalah kecepatan angin di Kota Manado. Sebelum dilaksanakan analisis perangkat lunak, data dihitung untuk mendapatkan hasil gaya *lift* dan *drag* yang terjadi pada sudu turbin dan gaya-gaya lainnya yang bekerja pada turbin angin. Selanjutnya, hasil perhitungan manual dan analisis perangkat lunak dibandingkan agar hasil pemodelan dan simulasi divalidasi.

Daya hitungan turbin rata-rata sebesar 181,81 watt, diameter turbin angin adalah 2260 mm, dan tinggi turbin adalah 2350 mm. Gaya *lift* sebesar 143,257 N dan gaya *drag* sebesar 3,978 N yang didasarkan pada sudut serang (α) = 8,95°, serta nilai tegangan *von Mises* maksimum pada turbin angin adalah 184,96 MPa. Sehingga turbin angin tidak akan mengalami kegagalan karena tegangan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan tegangan ijin material yang digunakan.

Pada akhirnya, hasil pemodelan dan simulasi turbin angin *Darrieus* tipe H dengan sudu-sudu lurus telah berhasil diperoleh. Luaran pemodelan dan simulasi pada penelitian ini berupa gambar desain turbin.

Kata Kunci : Turbin Angin *Darrieus*, Pemodelan, Simulasi, Gaya *Lift & Drag*

ABSTRACT

The purpose of this study was to obtain the results of modeling and simulation for H-Darrieus wind turbine with straight blades. There are two approaches used in this study, namely hand calculation and software analysis. The calculation and analysis employed wind speed data of Manado City. Before applying software analysis, the data is processed to obtain the lift & drag forces that occur in turbine blades and other forces acting on wind turbines. Furthermore, the results of hand calculations and software analysis are compared so that the results of modeling and simulation are validated.

The average counted-power of turbine is 181,81 watts, the wind turbine diameter is 2260 mm, and the wind turbine height is 2350 mm. The lift force is 143,257 N & the drag force is 3,978 N which is based on the attack angle 8,95, and the maximum Von Mises stress in the wind turbine is 184,96 MPa. Therefore, the wind turbine would not fail because the maximum stress that occurs in the structure is smaller than allowable stress of the material.

Finally, the results of the modeling and simulation for the H-Darrieus wind turbine with straight blades are successfully obtained. The output of this research is turbine design drawings.

Keywords: *Darrieus Wind Turbine, Modelling, Simulation, Lift & Drag Force*

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang kaya potensi sumber daya alam. Jenis sumber daya alam yang banyak digunakan sebagai energi listrik adalah tidak terbarukan dengan persentase 65,56% (*World Bank*, 2014). Hal ini membuat Indonesia berada di posisi ke-13 daftar peringkat emisi gas karbon dioksida secara internasional (*International Energy Agency*, 2015).

Karbon dioksida merupakan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim. Sehingga tindakan yang dapat mengurangi peningkatan emisi gas karbon dioksida sangat diperlukan. Salah satu tindakan adalah menggunakan sumber daya terbarukan (Teuku Bahrhan Basyiran, 2014).

Potensi energi angin di Sulawesi Utara berkisar 2,5 m/s hingga 4,0 m/s sehingga penggunaan energi angin dapat diimplementasikan (Soeripno, 2008).

Turbin angin merupakan alat yang digunakan dalam Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).

Salah satu tipe turbin angin adalah turbin angin Darrieus. Dengan konstruksi yang sederhana dan disusun menyerupai huruf H, maka turbin angin Darrieus dapat diimplementasikan dalam skala mikro dan harus dapat menahan kekuatan angin.

Salah satu cara untuk mengetahui turbin dapat menahan kekuatan angin adalah melakukan simulasi berdasarkan pemodelan turbin angin. Sehingga perlu dilakukan penelitian pemodelan dan simulasi turbin angin Darrieus tipe H sebelum diimplementasikan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana proses simulasi dan pemodelan turbin angin tipe Darrieus dengan konfigurasi rotor tipe H untuk pembangkit listrik tenaga bayu skala mikro.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang pertama adalah hanya turbin angin Darrieus yang dibahas. Kedua adalah wilayah yang ditinjau adalah Kota Manado dengan suhu udara 15°C.

Ketiga adalah hanya sudu turbin dan batang penghubung yang dibahas dari keseluruhan komponen pembangkit listrik tenaga bayu. Keempat adalah analisis gaya aerodinamis dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS 18.1 dan perhitungan manual. Kelima adalah kecepatan sudut turbin bernilai konstan. Keenam adalah pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak SOLIDWORKS 2019. Ketujuh adalah analisis tegangan *von Mises* dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS 18.1.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang pertama adalah hasil pemodelan turbin angin Darrieus tipe H dengan sudu-sudu lurus didapatkan. Kedua adalah hasil simulasi aerodinamis sudu turbin dan tegangan *von Mises* didapatkan. Luaran pemodelan dan simulasi tersebut adalah gambar desain turbin.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang pertama adalah dapat menghasilkan suatu simulasi dan pemodelan turbin angin Darrieus tipe H dengan sudu-sudu lurus yang

dapat digunakan sebagai salah satu model turbin angin pembangkit listrik tenaga bayu skala mikro. Manfaat yang kedua adalah dapat digunakan sebagai acuan dalam merancang turbin angin Darrieus tipe H dengan sudu-sudu lurus dan dapat dikembangkan di waktu mendatang.

II. LANDASAN TEORI

2.1 Turbin Darrieus Tipe H

Turbin Darrieus tipe H merupakan pengembangan turbin Darrieus yang dilakukan pada tahun 1970-1980 oleh P.J. Musgrove di Inggris. Konfigurasi turbin Darrieus tipe H ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Turbin Darrieus Tipe H (Kavade, R. K. dan Ghanegaonkar, P. M., 2017)

2.2 Parameter Desain Turbin Angin

Terdapat beberapa parameter desain yang diperlukan dalam proses perencanaan turbin angin. Parameter-parameter desain turbin angin tersebut adalah kecepatan angin (V_w), koefisien kinerja daya (C_p), luas penampang aliran (S), *tip speed ratio* (λ), jumlah sudu (n), *solidity* (σ), rasio aspek (AR), dan pemilihan profil *airfoil*.

2.3 Analisa Gaya Aerodinamis Turbin Angin dan Mekanisme Turbin Angin

Gaya-gaya aerodinamis yang diperlukan dalam analisis mekanisme turbin angin adalah gaya normal dan aksial.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap dari bulan November 2018 sampai bulan Februari 2018. Pelaksanaan penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi.

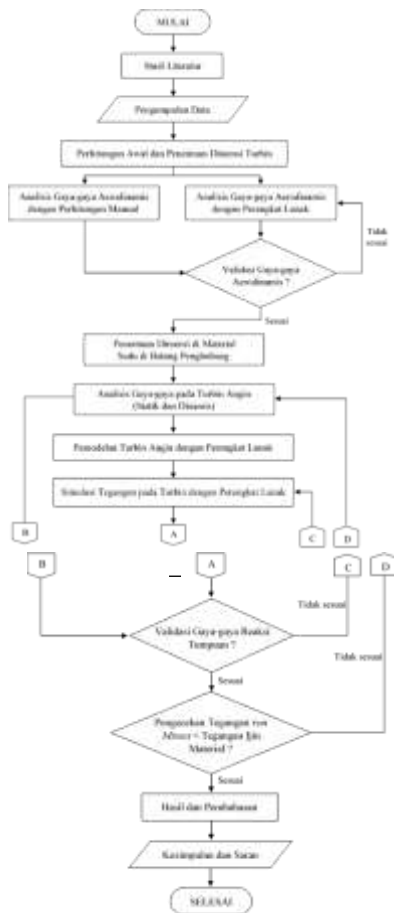
3.2 Bahan dan Peralatan

Bahan penelitian adalah literatur-literatur sebagai landasan teori dan data kecepatan angin (m/s) Kota Manado yang berasal dari sebuah situs penyedia map kecepatan angin global (globalwindatlas.info) pada bulan November 2018.

Peralatan yang digunakan adalah perangkat komputer yang di dalamnya terdapat lima perangkat lunak. Perangkat lunak tersebut adalah ANSYS 18.1, XFOIL (airfoiltools.com), MAXIMA – *Computer Algebra System* (integral-calculator.com), SOLIDWORKS 2019, dan Microsoft Office Excel.

3.3 Prosedur Penelitian

Penelitian dilaksanakan dalam 14 tahapan. Prosedur penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian

IV. ANALISIS DAN PERHITUNGAN

4.1 Perhitungan Awal Perancangan Turbin

4.1.1 Data Kecepatan Angin

Berdasarkan Gambar 4.1, data kecepatan angin maksimum sebesar 4,25 m/s, kecepatan angin minimum sebesar 2,5 m/s, dan kecepatan angin rata-rata sebesar 2,74 m/s.



Gambar 4.1. Sebaran Kecepatan Angin di Kota Manado November 2018 (globalwindatlas.info)

4.1.2 Daya Desain, Koefisien Kinerja Daya, dan Tip Speed Ratio

Turbin angin Darrieus memiliki koefisien kinerja daya maksimum sebesar 0,4 dengan nilai TSR adalah 5. Direncanakan turbin angin digunakan untuk pembangkit listrik tenaga bayu skala mikro. Sehingga daya turbin yang perlu dicapai (daya desain) ditetapkan sebesar 100 watt.

4.1.3 Jumlah Sudu, Solidity, dan Rasio Aspek

Jumlah sudu dan *solidity* turbin angin Darrieus adalah tiga sudu dan 0,25 (Hameed, M. S. dan Afak, S. K., 2013). Rasio aspek turbin angin Darrieus ditetapkan sebesar 12,5 (Anderson, J. D., 2010).

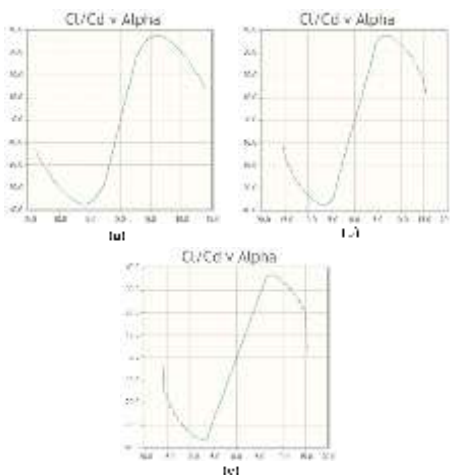
4.1.4 Dimensi Turbin dan Sudu

Berdasarkan data-data yang telah diketahui sebelumnya, maka

dapat diperoleh nilai dimensi turbin dan sudu. Dimensi turbin dan sudu yang diperoleh adalah panjang *chord* (c) = 0,2 m, diameter turbin (D) = 2,26 m, dan tinggi turbin (H) = 2,35 m.

4.1.5 Pemilihan Profil *Airfoil*

Profil *airfoil* sudu turbin angin yang digunakan adalah *airfoil* simetris. NACA 0015 memiliki rasio C_L/C_D tertinggi dibandingkan NACA 0018 dan NACA 0021. Namun, *airfoil* NACA 0015 memiliki lebar paling tipis dibandingkan NACA 0018 dan NACA. Sehingga diputuskan profil *airfoil* yang digunakan adalah *airfoil* NACA 0018. Berdasarkan hal tersebut diperoleh nilai C_L dan C_D setiap sudut serang yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.



Gambar 4.2. Profil-profil *Airfoil* (a) NACA 0015, (b) NACA 0018, dan (c) NACA 0021.

Tabel 4.1. C_L dan C_D Setiap Sudut Serang

θ (deg)	α (deg)	C_L	C_D
0	0,00	0,000	0,021
30	4,87	0,766	0,022
60	8,95	0,999	0,028
90	11,31	1,100	0,036
120	10,89	1,087	0,035
150	6,90	0,895	0,024
180	0,00	0,000	0,021
210	-6,90	-0,895	0,024
240	-10,89	-1,087	0,035
270	-11,31	-1,100	0,036
300	-8,95	-0,999	0,028
330	-4,87	-0,766	0,022
360	0,00	0,000	0,021

4.1.8 Kecepatan Tangensial Sudu Turbin dan Kecepatan Relatif

Pada Tabel 4.2, ditunjukkan nilai kecepatan tangensial sudu turbin dan kecepatan relatif pada setiap kecepatan angin.

Tabel 4.2. Kecepatan Relatif pada Setiap Kecepatan Angin

Sudut Pitch (θ)	V_r (m/s)		
	$V_w = 4,25 ; V_t = 21,25$	$V_w = 2,74 ; V_t = 13,7$	$V_w = 2,5 ; V_t = 12,5$
0	25,50	16,44	15,00
30	25,02	16,13	14,72
60	23,66	15,26	13,92
90	21,67	13,97	12,75
120	21,07	13,58	12,39
150	18,42	11,87	10,83
180	17,00	10,96	10,00
210	18,42	11,87	10,83
240	21,07	13,58	12,39
270	21,67	13,97	12,75
300	23,66	15,26	13,92

330	25,02	16,13	14,72
360	25,50	16,44	15,00

4.2 Analisis Gaya-gaya pada Mekanisme Turbin Angin

4.2.1 Analisis Gaya Lift dan Drag pada Sudu Turbin

Hasil analisis gaya lift dan drag setiap kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Gaya Lift dan Drag pada Setiap Kecepatan Angin

α (deg)	$V_w = 4,25$ m/s		$V_w = 2,74$ m/s		$V_w = 2,5$ m/s	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
0,00	0,000	3,847	0,000	1,599	0,000	1,331
4,87	138,345	3,937	57,503	1,637	47,870	1,362
8,95	161,435	4,582	67,100	1,905	55,860	1,586
11,31	149,074	4,921	61,962	2,046	51,583	1,703
10,89	139,211	4,426	57,862	1,840	48,170	1,532
6,90	87,630	2,344	36,423	0,974	30,322	0,811
0,00	0,000	1,710	0,000	0,711	0,000	0,592
-6,90	-87,649	2,344	36,431	0,974	30,329	0,811
-10,89	-139,192	4,426	57,855	1,840	48,163	1,532
-11,31	-149,030	4,921	61,944	2,046	51,568	1,703
-8,95	-161,455	4,582	67,108	1,905	55,867	1,586
-4,87	-138,382	3,937	57,518	1,637	47,883	1,362
0,00	0,000	3,847	0,000	1,599	0,000	1,331

4.2.2 Analisis Gaya Normal dan Aksial pada Sudu Turbin

Hasil analisis gaya lift dan drag setiap kecepatan angin ditunjukkan pada Tabel 4.4.

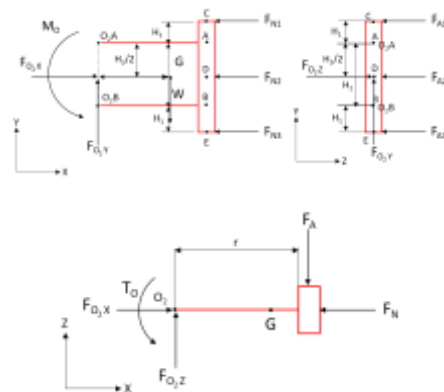
Tabel 4.4. Gaya Normal dan Aksial pada Setiap Kecepatan Angin

α (deg)	$V_w = 4,25$ m/s		$V_w = 2,74$ m/s		$V_w = 2,5$ m/s	
	F_N (N)	F_A (N)	F_N (N)	F_A (N)	F_N (N)	F_A (N)
0,00	0,000	3,847	0,000	1,599	0,000	1,331
4,87	138,180	-7,826	57,434	-3,253	47,813	-2,708
8,95	160,183	-20,584	66,580	-8,556	55,427	-7,122
11,31	147,144	-24,410	61,160	-10,146	50,915	-8,446
10,89	137,539	-21,962	57,167	-9,128	47,591	-7,599
6,90	87,277	-8,196	36,276	-3,406	30,200	-2,836
0,00	0,000	1,710	0,000	0,711	0,000	0,592

-6,90	-86,734	12,851	36,051	5,341	30,012	4,447
-10,89	-135,848	30,651	56,464	12,740	47,006	10,606
-11,31	-145,171	34,053	60,340	14,154	50,232	11,783
-8,95	-158,777	29,640	65,995	12,320	54,940	10,256
-4,87	-137,547	15,676	57,171	6,516	47,594	5,424
0,00	0,000	3,847	0,000	1,599	0,000	1,331

4.2.3 Analisis Gaya Statik pada Mekanisme Turbin

Pada Gambar 4.3 ditunjukkan mekanisme turbin angin yang mendapat pembebanan angin pada sudu turbin.

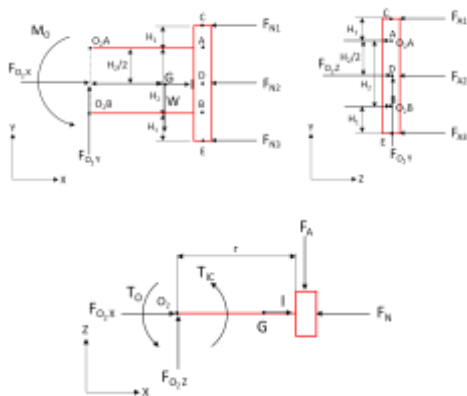


Gambar 4.3. Mekanisme Turbin Angin (Statik)

Berdasarkan Gambar 4.3, torsi statis mekanisme turbin angin diperoleh sebesar 23,260 Nm.

4.2.4 Analisis Gaya Dinamis pada Mekanisme Turbin Angin

Pada Gambar 4.4 ditunjukkan mekanisme turbin angin yang mendapat pembebanan angin pada sudu turbin.



Gambar 4.4. Mekanisme Turbin Angin (Dinamis)

Berdasarkan Gambar 4.4, hasil torsi dinamis dan daya hitungan turbin ditunjukkan pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5. Torsi dan Daya Hitungan Turbin

Kecepatan Angin (m/s)	Torsi (Nm)	Daya Hitungan Turbin (W)
4,25	23,260	437,411
2,74	9,668	181,81
2,5	8,048	151,34

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pemodelan Komponen Turbin Angin



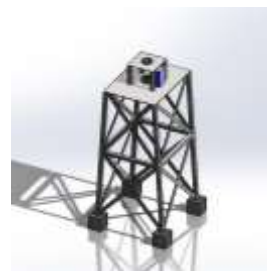
Gambar 5.1. Model Sudu Turbin Angin



Gambar 5.2. Batang Penghubung



Gambar 5.3. Poros Turbin Angin



Gambar 5.4. Model Tower Turbin Angin

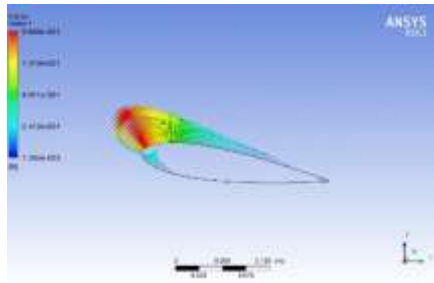


Gambar 5.5. Model Turbin Angin dengan Tower

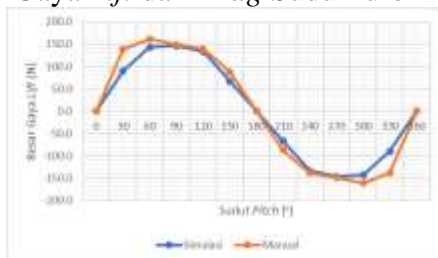
5.2 Simulasi Gaya Lift dan Drag Sudu Turbin Angin

Simulasi gaya lift dan drag sudu turbin angin dilakukan dengan perangkat lunak ANSYS Workbench 18.1. Hasil simulasi dan

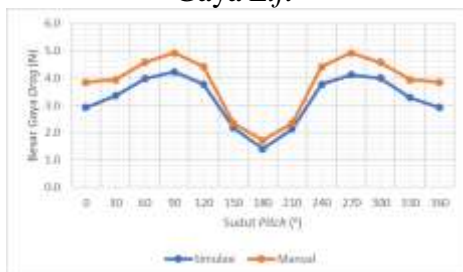
perbandingan ditunjukkan pada Gambar 5.6, Gambar 5.7 dan Gambar 5.8.



Gambar 5.6. Hasil Simulasi Plot Gaya Lift dan Drag Sudu Turbin



Gambar 5.7. Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan Manual Gaya Lift

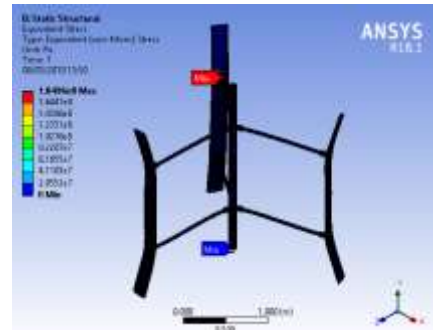


Gambar 5.8. Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan Manual Gaya Lift

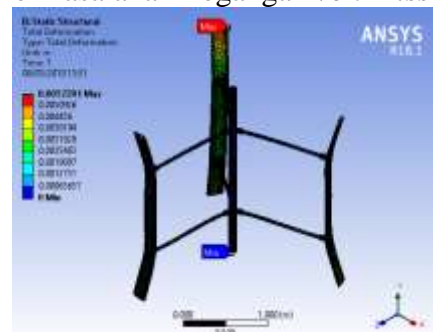
5.3 Simulasi Tegangan von Mises

Simulasi tegangan *von Mises* pada turbin angin dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 18.1. Hasil

simulasi tegangan *von Mises* dan deformasi bentuk ditunjukkan pada Gambar 5.9, dan Gambar 5.10.



Gambar 5.9. Hasil Solusi Permasalahan Tegangan *von Mises*



Gambar 5.25. Hasil Solusi Permasalahan Deformasi Bentuk

VI. PENUTUP

Daya hitungan turbin rata-rata sebesar 181,81 watt, diameter turbin angin adalah 2260 mm, dan tinggi turbin adalah 2350 mm.

Gaya lift sebesar 143,257 N dan gaya drag sebesar 3,978 N yang didasarkan pada $(\alpha) = 8,95^\circ$, serta nilai tegangan *von Mises* maksimum turbin angin adalah 184,96 MPa. Sehingga turbin angin tidak akan mengalami kegagalan karena

tegangan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan tegangan ijin material yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

Aerospaceweb, *NACA Airfoil Series*.

<http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>.

Diakses tanggal : 13 November 2018.

Airfoiltools, *NACA 0018 (naca0018-il)*.

<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>.

Diakses tanggal : 17 Desember 2018.

Anderson, J. D. 2010. *Fundamentals of Aerodynamics Fifth Edition*. New York: McGraw-Hill.

Basyiran, T. B. 2014. *Konsumsi Energi Listrik, Pertumbuhan Ekonomi Dan Penduduk Terhadap Emisi Gas Rumah Kaca Pembangkit Listrik Di Indonesia*. Skripsi Program Sarjana Ekonomi Universitas Syiah Kuala. Banda Aceh.

Berita Satu, *BPPT: Energi Angin Potensial Dikembangkan di Indonesia*.

<http://www.beritasatu.com/nasional/230463-bppt-energi-angin-potensial-dikembangkan-di-indonesia.html>

Diakses tanggal : 14 Oktober 2018

Budio, S.P. 2016. *Dinamika*. Malang: Universitas Brawijaya

Castillo, J. 2011. *Small-Scale Vertical Axis Wind Turbine Design*. Bachelor's Thesis Degree Program in Aeronautical Engineering Tampere University of Applied Sciences. Finland.

Daryanto, Y. 2007. *Kajian Potensi Angin Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Bayu*. Yogyakarta: Balai PPTAGG - UPT-LAGG.

Energy Data, *Indonesia – Wind Speed and Wind Power Potential Maps*.

<https://energydata.info/dataset/indonesia-wind-speed-and-wind-power-potential-maps>.

Diakses tanggal : 14 Desember 2018

Fox, R., McDonald, A., dan Pritchard, P. 2004. *Introduction To Fluid*

- Mechanic Sixth Edition.*
United State of America: John Wiley & Sons.
- Global Wind Atlas, *Wind Power Density of Sulawesi Utara - Indonesia.*
<https://globalwindatlas.info/area/Indonesia/Sulawesi%20Utara>. Diakses tanggal : 14 Desember 2018
- Hameed, M. S. dan Afaq, S. K. 2013. *Design and Analysis of A Straight Bladed Vertical Axis Wind Turbine Blade Using Analytical and Numerical Technique.* Ocean Engineering 57 : 248-255.
- Hameed, M. S. dan Shahid, F. 2012. *Evaluation of Aerodynamic Forces Over A Vertical Axis Wind Turbine Blade Through CFD Analysis.* Applied Mechanical Engineering Open Access Journal Vol. 1, Issue 5, 1000116.
- Hau, E. 2013. *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics Third Translated Edition.* Berlin: Springer.
- Hibbeler, R.C. 2013. *Engineering Mechanics Statics.* New Jersey: Pearson Education.
- Jacobs, E. N, Ward. K. E, dan Pinkerton, R. M. 1933. *NACA Report No. 460, "The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Test in The Variable-Density Wind Tunnel.*
NASA.(https://en.wikipedia.org/wiki/NACA_airfoil)
Diakses tanggal : 6 November 2018
- Jonifan, Lidya, I., dan Yasman. 2005. *Fisika Mekanika.* Universitas Gunadarma.
- Kavade, R. K. dan Ghanegaonkar, P. M. 2017. *Design and Analysis of Vertical Axis Wind Turbine for Household Application.* Journal of Clean Energy Technologies Vol. 5 No. 5 : 353-358.
- Malende, N., Tangkuman, S., dan Arungpadang, T. 2016. *Analisis Kekuatan Poros Landing Gear Pesawat N-219.* Jurnal Online Poros Teknik Mesin Volume 5 Nomor 2 : 70-79.

- Manullang, E., Tangkuman, S., dan Maluegha, Benny L. 2016. *Analisis Tegangan Pada Bejana Tekan Vertikal 13ZL100040291 Di PT. Aneka Gas Industri*. Jurnal Online Poros Teknik Mesin Volume 5 Nomor 2 : 92-102.
- Martin, George H. 1984. *Kinematics and Dynamics of Machines Second Edition*. Tokyo: McGraw-Hill.
- MIT Open Courseware, *Wing Structural Analysis and Bending Test*.
<https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/systems-labs-06/>.
 Diakses tanggal : 15 November 2018.
- Mittal, Neeraj. 2001. *Investigation Of Performance Characteristics Of A Novel VAWT*. Thesis. Glasgow: Departement of Mechanical Engineering University of Strathclyde.
- Mott, R. L. 2009. *Elemen-elemen Mesin dalam Perancangan Mekanis*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Mustofa, G., Tangkuman, S., dan Luntungan, H. 2018. *Simulasi Kinematika Mekanisme Lengan Backhoe Excavator*. Jurnal Online Poros Teknik Mesin Volume 7 Nomor 1 : 13-24
- Nila, I., Bogateanu, R., dan Stere, M. 2012. *Small Power Wind Turbine (Type Darrieus)*. INCAS BULLETIN Vol. 4 Issue I/2012 : 135-142
- Poeng, Rudy. 1996. *Dinamika Teknik*. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Pudjanarsa, A. dan Nursuhud, D. 2008. *Mesin Konversi Energi*. Surabaya: Penerbit Andi.
- Ragheb, M. 2015. *Vertical Axis Wind Turbines*. Papers. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Santoso, A. A. 2018. *Perancangan Mesin Stirling Beta Tenaga Matahari Sebagai Penggerak Pompa Air*. Skripsi Program S1 Teknik Mesin Universitas Sam Ratulangi. Manado.

- Soeripno. 2008. *Potensi Energi Angin Dan Prospek Pemanfaatannya Di Indonesia*. Prosiding Workshop Nasional Energi Angin 2008 : 93-109.
- Syamza, A.F. 2017. *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Turbin Angin Vertikal Sebagai Energi Alternatif*. Tugas Akhir Program D3 Teknik Mesin Politeknik Negeri Padang.
- Tangkuman, Stenly. 2015. *Mekanika Kekuatan Material*. Manado: Universitas Sam Ratulangi.
- Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Tameghe, T. A., dan Ekemb, G. 2015. *A New Approach for Modeling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors Using Electrical Equivalent Circuit Analogy: Basis of Theoretical Formulations and Model Development*. *Energies Open Access Journal* : 10684-10717.
- The World Bank, *Fossil Fuel Energy Consumption (% of total) of Indonesia*.
<https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.COMM.FO.ZS?end=2014&locations=ID&start=1971&type=points&view=chart>
 Diakses tanggal : 14 Oktober 2018
- Tietenberg, T. dan Lewis, L. 2012. *Environmental & Natural Resource Economics Ninth Edition*. New Jersey: Pearson.
- Ulinuha, A. dan Widodo, W. A. 2018. *Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Angin Skala Mikro Untuk Keperluan Penerangan Jalan*. The 7th University Research Colloquium 2018 : 128-135
- Union of Concerned Scientists, *Each Country's Share of CO₂ Emissions*.
<https://www.ucsusa.org/global-warming/science-and-impacts/science/each-country-share-of-co2.html#.W8NouGgzbDc>
 Diakses tanggal : 14 Oktober 2018
- Wood, D. 2011. *Small Wind Turbines Analysis, Design, and Application*. London: Springer.