



TUGAS AKHIR TF-141581

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH
FOIL TERHADAP EFISIENSI TURBIN HELIKS
CASCADE FOIL**

ABDI ISMAIL
NRP. 2412 100 027

Dosen Pembimbing
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Sarwono, M.M.

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT TF-141581

**EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF
THE NUMBER OF FOILS TO THE EFFICIENCY
OF CASCADE FOIL HELICAL TURBINE**

ABDI ISMAIL
NRP. 2412 100 027

Supervisor
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Sarwono, M.M.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH FOIL
TERHADAP EFISIENSI TURBIN HELIKS CASCADE FOIL**

TUGAS AKHIR

Oleh :

ABDI ISMAIL

NRP : 2412 100 027

**Surabaya, Januari 2016
Mengetahui/Menyetujui**

Pembimbing I ,

Pembimbing II ,


Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
NIPN. 19761223 200501 1 001


Ir. Sarwono, M.M.
NIPN. 19580530 198303 1 002

**Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS**


Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 19780902 200312 1 002

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH FOIL
TERHADAP EFISIENSI TURBIN HELIKS CASCADE FOIL**

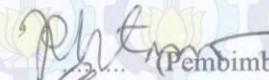
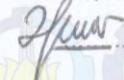
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ABDI ISMAIL
NRP. 2412 100 027

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  (Pembimbing I)
2. Ir. Sarwono, M.M.  (Pembimbing II)
3. Dr. Gunawan Nugroho, S.T, M.T.  (Penguji I)
4. Ir. Matradji, M.Sc.  (Penguji II)
5. Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T.  (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI 2016

STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH JUMLAH FOIL TERHADAP EFISIENSI TURBIN HELIKS CASCADE FOIL

Nama Mahasiswa : Abdi Ismail
NRP : 2412 100 027
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
**Dosen Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Sarwono, M.M.**

Abstrak

Pada penelitian ini telah dilakukan studi eksperimental untuk mengetahui pengaruh jumlah foil terhadap daya mekanik dan efisiensi Turbin Heliks Cascade Foil. Data yang diperoleh dalam penelitian ini ialah kecepatan sudut dan torsi dari 3 variasi jumlah foil (Turbin Heliks 3 foil, 6 foil, dan 9 foil) pada 3 variasi kecepatan arus (1,142 m/s, 1,228 m/s, dan 1,341 m/s). Variasi kecepatan arus didapatkan dari saluran keluaran mata air Umbulan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Penambahan foil secara cascade dapat meningkatkan daya mekanik turbin dalam luas sapuan yang sama. Pada kecepatan arus 1,341 m/s, Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil menghasilkan daya mekanik secara berturut-turut sebesar 104 watt, 116,8 watt, dan 133,6 watt. Turbin Heliks 9 foil memiliki daya mekanik dan torsi tertinggi karena memiliki momen inersia lebih tinggi daripada Turbin Heliks 6 dan 3 foil. Selain itu, penambahan jumlah foil menyebabkan bertambahnya gaya lift yang bekerja pada turbin. Turbin Heliks 9 foil memiliki lebih banyak foil, sehingga memberikan gaya lift lebih besar dibandingkan dengan Turbin Heliks 6 dan 3 foil. Penambahan foil secara cascade juga dapat meningkatkan efisiensi Turbin Heliks. Pada kecepatan arus 1,142 m/s, Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil menghasilkan efisiensi secara berturut-turut sebesar 15,2 %, 17,6 %, dan 19,9 %. Penambahan foil secara cascade dapat meningkatkan ekstraksi energi arus air tanpa memperbesar dimensi turbin.

Kata kunci : Turbin Heliks Cascade Foil, kecepatan sudut, torsi, daya mekanik, efisiensi

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF THE NUMBER OF FOILS TO THE EFFICIENCY OF CASCADE FOIL HELICAL TURBINE

Name : Abdi Ismail
NRP : 2412 100 027
Department : Engineering Physics FTI-ITS
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.
Ir. Sarwono, M.M.

Abstract

This experimental study has been conducted on influence of the number of foils to the efficiency and mechanical power of Cascade Foil Helical Turbine. The data in this study obtained the angular velocity and torque of the number of foil (Helical 3 foil, 6 foil, and 9 foil Turbine) at 3 variations of flow velocity (1.142 m/s, 1.228 m/s, and 1.341 m/s). Variation of flow velocity obtained from output channels of Umbulan springs, Pasuruan, East Java. The addition of the cascade foil can improve mechanical power of turbine in the same swept area. At the flow velocity of 1.341 m/s, Helical 3, 6, and 9 foil Turbine produces mechanical power respectively, 104 watts, 116.8 watt, and 133.6 watts. Helical 9 foil Turbine has higher mechanical power and torque, because it has a higher inertia moment than the Helical 6 and 3 foil turbine. Moreover, the addition of the foil causes increased lift force acting on the turbine. Helical 9 foil Turbine has more foil, thus it providing the greater lift force than Helical 6 and 3 foil Turbine. The additions of cascade foil can also improve the efficiency of Helical Turbine. At the flow velocity of 1,142 m/s, the efficiency of Helical 3, 6, and 9 foil Turbine respectively 15.2%, 17.6% and 19.9%. The addition of the cascade foil can increase water flow energy extraction without increasing the dimensions of the turbine.

Keywords : Cascade Foil Helical Turbine, angular velocity, torque, mechanical power, efficiency

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir “Studi Eksperimental Pengaruh Jumlah *Foil* terhadap Efisiensi Turbin Heliks *Cascade Foil*”.

Selama melaksanakan Tugas Akhir dan penulisan laporan Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Ir. Tutug Dhanardono, M.T. selaku Dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan dan arahan kepada penulis.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T. dan Ir. Sarwono, M.M. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, ilmu, motivasi dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Sarwono, M.M., selaku KBM Energi serta kepala Laboraturium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan yang telah memberikan dukungannya kepada penulis.
5. Bapak dan Ibu dosen yang telah memberikan ilmu dan bimbingannya selama penulis menuntut ilmu di Jurusan Teknik Fisika ITS.
6. Bapak Irfan yang telah membiayai pengambilan data Tugas Akhir
7. PDAM Kota Pasuruan, termasuk Bapak Supriyadi, Bapak Panji, dan Bapak Anto beserta staff PDAM Umbulan Kota Pasuruan yang telah membantu proses perizinan dan pengambilan data Tugas Akhir ini.

8. Bapak Abdul Fatah, Ibu Elok Erlina, dan seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan psikologis, motivasi dan terutama doa kepada penulis.
9. Saudara Zain Amarta yang telah memberikan dukungan kepada penulis sekaligus menjadi partner TA dan PKM.
10. Bapak dosen, teman-teman Teknik Fisika dan Sistem Perkapalan yang telah membantu pengambilan data di Umbulan serta tim PKM Turbin Arus Laut : Mas Fahmi, Mas Seno, Zain, Mas Iwang, Mas Aang, Mbak Erna, Mas Elfa, Mas Aam, Okky, Tukul, Alan, Jamal, Febryn, Mas Arie, Mas Eko, Mas Angga, Mas Jangka, Arif, Riza, Ayu Fitriyah.
11. Teman-teman Kelompok Studi Energi (KSE)
12. Teman-teman 2011, 2012, 2013, dan 2014 lainnya yang tidak bisa disebutkan satu persatu.
13. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.

Apabila terdapat kekurangan, penulis memohon kritik dan saran demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, dan tambahan ilmu bagi banyak orang.

Surabaya, 11 Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

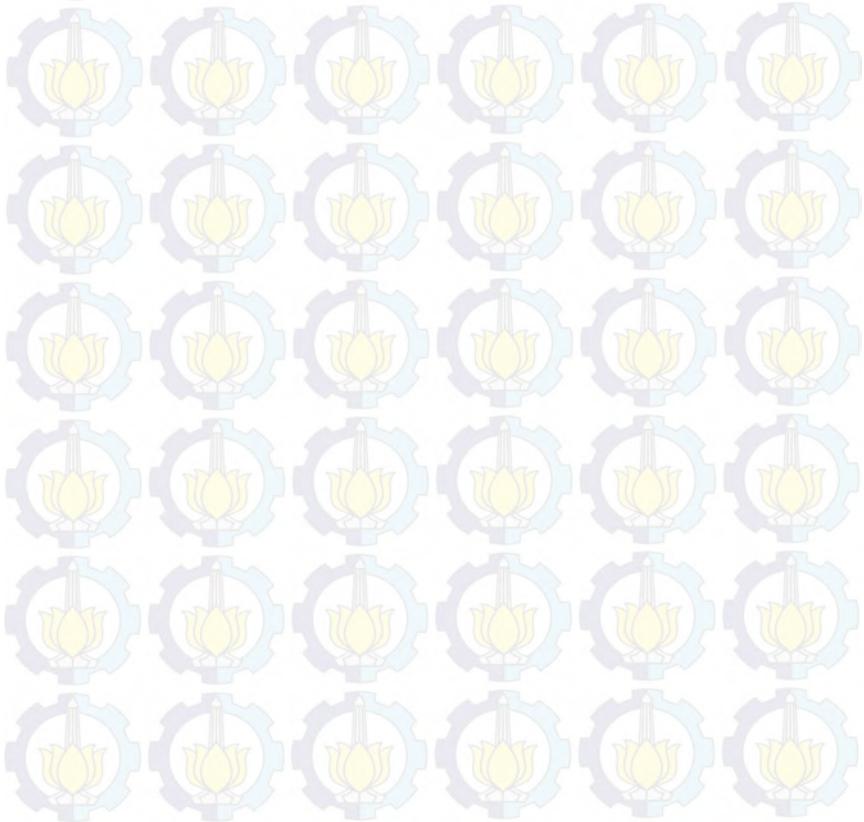
Halaman Judul	i
Cover	iii
Lembar Pengesahan	v
Abstrak	ix
Abstract	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Laporan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Gaya <i>Lift</i> dan Gaya <i>Drag</i>	7
2.2 Jenis Turbin Hidrokinetik	12
2.3 Turbin Heliks	15
2.4 Parameter Desain Turbin Heliks	16
2.5 Analisis Turbin Hidrokinetik	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27
3.1 Studi Literatur dan Referensi	28
3.2 Survei Lokasi Pengujian	29
3.3 Penentuan Geometri	29
3.4 Fabrikasi Turbin	33
3.5 Pengujian dan Pengambilan Data	35
3.6 Analisis dan Pembahasan serta Penyusunan Laporan	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Analisis Data	39
4.1.1 Kecepatan arus (V)	39

4.1.2 Kecepatan Sudut (ω) dan Torsi (T)	40
4.1.3 <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR) dan <i>Coefficient of Torque</i> (Ct)	41
4.1.4 Daya Mekanik (P) dan Efisiensi	42
4.2 Pengaruh Kecepatan Arus terhadap Beberapa Variabel	43
4.2.1 Kecepatan arus (V) terhadap Kecepatan Sudut (ω) dan <i>Tip Speed Ratio</i> (TSR)	43
4.2.2 Kecepatan arus (V) terhadap Torsi (T) dan <i>Coefficient of Torque</i> (Ct)	46
4.2.3 Kecepatan arus (V) terhadap Daya mekanik (P) dan Efisiensi	49
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (<i>lift</i> dan <i>drag</i>) (Munson, 2002)	8
Gambar 2.2 Gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda (Munson, 2002)	8
Gambar 2.3 Gaya <i>lift</i> pada Turbin Vertikal Aksis (Lazauskas, 2012)	11
Gambar 2.4 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik (Khan, 2009)	12
Gambar 2.5 Jenis-jenis pemasangan Turbin Horizontal Aksis (Khan, 2009)	13
Gambar 2.6 Tipe Turbin Vertikal Aksis (Khan, 2009)	13
Gambar 2.7 Perbandingan <i>moment</i> dan daya dari Turbin Helical (kiri) dan Darrieus (kanan) (Tsai, 2014)	15
Gambar 2.8 Efisiensi dari Berbagai Tipe Turbin Arus Air (Gorban, 2001)	16
Gambar 2.9 Sudut Kemiringan <i>Foil</i> Turbin Helical (δ) (Niblick, 2012)	17
Gambar 2.10 (a) <i>Straight foil</i> (Turbin <i>Straight Foil</i>), (b) <i>Helical foil</i> (Turbin Helical)	19
Gambar 2.11 Jenis <i>airfoil</i> , <i>chord</i> , dan <i>span</i>	19
Gambar 2.12 Jari-jari (R) dan tinggi (H) turbin	20
Gambar 2.13 Berbagai jenis <i>airfoil</i> (Mohamed, 2012)	20
Gambar 2.14 Hubungan antara H/R terhadap C_p (Ye Li, 2010)	22
Gambar 2.15 Azimuth (Θ) turbin vertikal aksis (Shiono, 2002)	23
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	28
Gambar 3.2 Lebar dan kedalaman saluran keluaran mata air Umbulan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur	29
Gambar 3.3 Penempatan <i>Foil 1</i> , <i>Foil 2</i> , <i>Foil 3</i> pada Turbin Helical 9 <i>foil</i> beserta rangka	31
Gambar 3.4 (a) Turbin Helical 3 <i>foil</i> , (b) Turbin Helical 6 <i>foil</i> , (c) Turbin Helical 9 <i>foil</i>	33
Gambar 3.5 Hasil fabrikasi Turbin Helical 9 <i>foil</i> beserta rangka	34
Gambar 3.6 <i>Current meter</i>	36

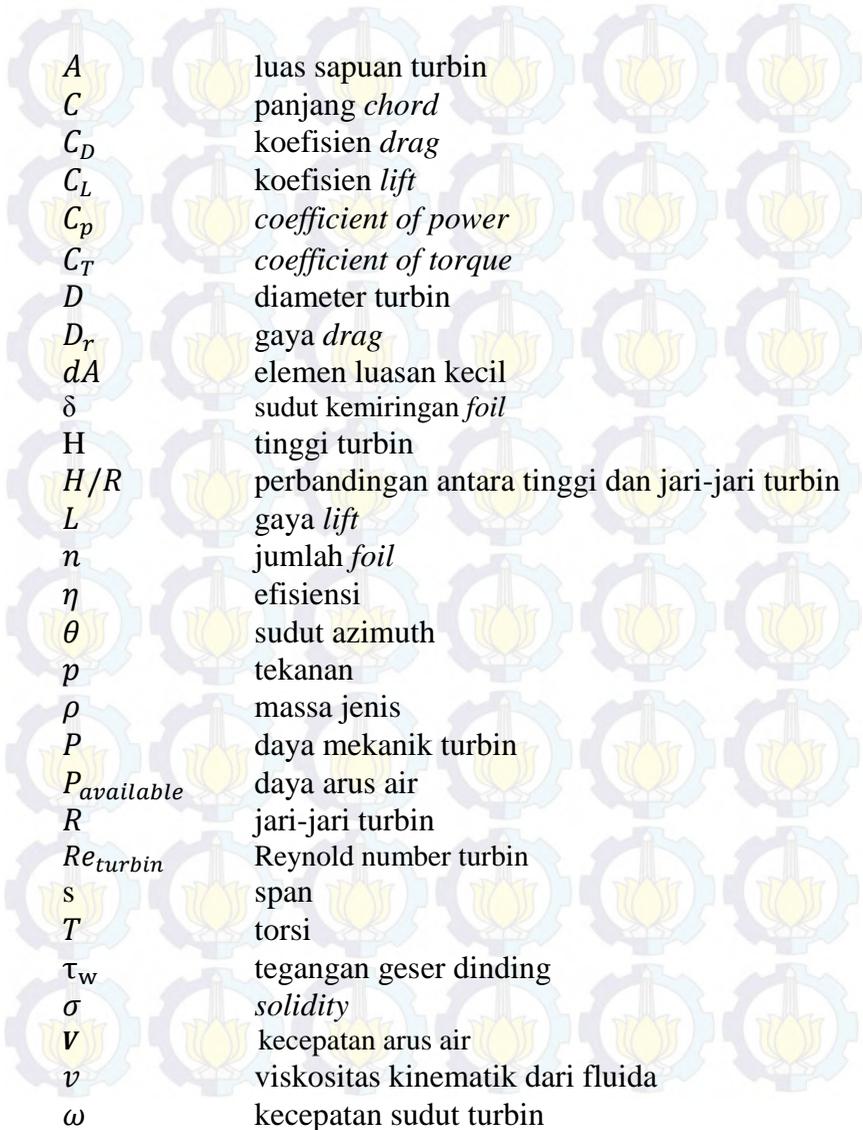
Gambar 3.7 <i>Torque wrench</i>	36
Gambar 3.8 <i>Tachometer</i>	37
Gambar 4.1 Lokasi pengujian	39
Gambar 4.2 Pengaruh kecepatan arus terhadap kecepatan sudut	44
Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan arus terhadap TSR	45
Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan arus terhadap torsi	47
Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan arus terhadap Ct	48
Gambar 4.6 Pengaruh kecepatan arus terhadap daya mekanik	50
Gambar 4.7 Pengaruh kecepatan arus terhadap efisiensi	52



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Power coefficient</i> (C_p) maksimum dari berbagai airfoil (Mohamed, 2012)	21
Tabel 3.1 Desain Turbin Helical <i>Cascade Foil</i>	30
Tabel 4.1 Rata-rata kecepatan arus (V) dan Reynold number turbin	40
Tabel 4.2 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Helical 3 <i>foil</i>	40
Tabel 4.3 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Helical 6 <i>foil</i>	40
Tabel 4.4 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Helical 9 <i>foil</i>	41
Tabel 4.5 TSR dan C_t dari Turbin Helical 3 <i>foil</i>	41
Tabel 4.6 TSR dan C_t dari Turbin Helical 6 <i>foil</i>	41
Tabel 4.7 TSR dan C_t dari Turbin Helical 9 <i>foil</i>	42
Tabel 4.8 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Helical 3 <i>foil</i>	42
Tabel 4.9 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Helical 6 <i>foil</i>	42
Tabel 4.10 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Helical 9 <i>foil</i>	42

DAFTAR SIMBOL



A	luas sapuan turbin
C	panjang <i>chord</i>
C_D	koefisien <i>drag</i>
C_L	koefisien <i>lift</i>
C_p	<i>coefficient of power</i>
C_T	<i>coefficient of torque</i>
D	diameter turbin
D_r	gaya <i>drag</i>
dA	elemen luasan kecil
δ	sudut kemiringan <i>foil</i>
H	tinggi turbin
H/R	perbandingan antara tinggi dan jari-jari turbin
L	gaya <i>lift</i>
n	jumlah <i>foil</i>
η	efisiensi
θ	sudut azimuth
p	tekanan
ρ	massa jenis
P	daya mekanik turbin
$P_{available}$	daya arus air
R	jari-jari turbin
Re_{turbin}	Reynold number turbin
s	span
T	torsi
τ_w	tegangan geser dinding
σ	<i>solidity</i>
V	kecepatan arus air
ν	viskositas kinematik dari fluida
ω	kecepatan sudut turbin



“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil, keadaan tersebut memaksa manusia untuk mencari sumber energi yang dapat diperbaharui (energi terbarukan) dan dapat menggantikan bahan bakar fosil. Pemerintah melalui Peraturan Presiden Nomor 5 tahun 2006 menyatakan bahwa pada tahun 2025 peranan energi terbarukan dalam Bauran Energi Nasional harus sudah mencapai 17%.

Salah satu energi terbarukan yang potensial untuk dikembangkan di Indonesia ialah energi arus air (*hydrokinetic energy*). Energi arus air dapat ditemukan pada arus sungai, arus saluran air dan arus laut. Dari ketiga arus tersebut, arus laut cukup potensial untuk dimanfaatkan energinya. Dalam hal geografis, 63% wilayah Indonesia adalah laut (Yuniarso, 2012). Selain ramah lingkungan, energi arus laut juga mempunyai intensitas energi kinetik yang besar dibandingkan dengan energi terbarukan lain. Hal ini disebabkan densitas air laut 830 kali lipat densitas udara sehingga dengan kapasitas yang sama, turbin arus laut akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan turbin angin (Andrianto, 2009).

"Buku Putih Penelitian, Pengembangan Dan Penerapan Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Energi Baru Dan Terbarukan Untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2005 - 2025" menyatakan bahwa Perpres No.5 tahun 2006 salah satu prinsipnya menekankan untuk menggunakan sumber energi baru dan terbarukan yang sudah siap secara teknis maupun ekonomis serta ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan tersebut ialah energi arus dan gelombang samudera. Lebih jauh lagi pada buku putih tersebut telah dibuat Roadmap Sektor Energi Arus Laut. Dalam roadmap tersebut dinyatakan bahwa dalam jangka pendek dan menengah pemerintah memiliki tugas untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi Sistem Konversi Energi Arus

Laut (SKEAL). Sehingga untuk mendukung pemerintah dalam Roadmap Sektor Energi Arus Laut, diperlukan penelitian-penelitian untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi SKEAL.

Salah satu komponen SKEAL yang perlu diteliti untuk ditingkatkan efisiensinya ialah turbin. Turbin arus air (*hydrokinetic turbine*) dapat diterapkan pada arus laut, arus sungai maupun arus saluran air. Turbin arus air yang banyak dikembangkan ialah tipe Darrieus dan tipe Heliks. Konsep kedua turbin ini dapat diterapkan pada fluida berupa arus air maupun angin. Dari kedua tipe turbin tersebut, Turbin Heliks memiliki *moment* (N-m) dan daya (Watt) yang nilainya lebih tinggi dan lebih stabil (Tsai, 2014). Turbin Heliks memiliki semua karakteristik unggul dari Turbin Darrieus tanpa karakteristik lemah dari Turbin Darrieus. Turbin Heliks memiliki torsi yang stabil pada berbagai kecepatan arus dan dapat berputar pada kecepatan arus rendah (Gorlov, 1998). Selain itu dari berbagai tipe turbin arus air yang lain, Turbin Heliks memiliki efisiensi tertinggi (Gorban, 2001).

Turbin dengan efisiensi yang tinggi diperlukan, agar energi arus air dapat semaksimal mungkin dikonversi menjadi energi mekanik maupun energi listrik. Metode yang telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi Turbin Heliks adalah dengan melakukan optimalisasi pada sudut kemiringan *foil* dan *solidity*. Pada sudut kemiringan $65,3^\circ$ didapatkan efisiensi 30 % dan pada sudut kemiringan $66,4^\circ$ didapatkan efisiensi 33 % (Han, 2013). Selain itu, diantara sudut kemiringan $43,7^\circ$, 50° dan 60° didapatkan efisiensi tertinggi (24,4 %) pada 60° . Semakin besar nilai sudut kemiringannya maka torsi dan efisiensi Turbin Heliks akan semakin tinggi (Shiono, 2002). Sehingga secara umum didapatkan sudut kemiringan *foil* terbaik pada 60° hingga 66° .

Sedangkan dari sisi *solidity*, menurut Shiono (2002) diantara *solidity* 0,2, 0,3, 0,4 dan 0,5, efisiensi Turbin Heliks tertinggi yaitu didapatkan pada *solidity* 0,4 sedangkan efisiensinya akan menurun pada *solidity* 0,5. Hal berbeda dinyatakan oleh Jing (2014) yang menyatakan bahwa diantara *solidity* 0,191, 0,210, 0,23, 0,255, 0,28, 0,306, 0,318, 0,35, dan 0,382 $C_{p_{max}}$ (C_p

puncak) tertinggi dicapai pada *solidity* 0,35. Dengan demikian, masih diperlukan metode lain untuk meningkatkan efisiensi Turbin Heliks sebab didapatkan hasil yang berbeda dan tidak saling mengkonfirmasi pada penerapan metode dari sisi *solidity*.

Optimasi efisiensi Turbin Heliks yang dapat dilakukan ialah dengan menerapkan komponen tambahan pada turbin dalam luas sapuan yang sama. Penerapan metode semacam ini pernah dilakukan oleh Tjiu (2013). *Movable Fin* ditambahkan pada Turbin Heliks untuk meningkatkan efisiensi dengan memanfaatkan gaya *drag* (Tjiu, 2013). Akan tetapi, metode ini kurang efektif karena *Movable Fin* tersebut memanfaatkan gaya *drag*. *Drag device* memiliki putaran/RPM dan efisiensi yang rendah karena *foil* tidak dapat bergerak lebih cepat daripada arus. Sedangkan *Lift Device* yang memanfaatkan gaya *lift* / gaya angkat akan bergerak lebih cepat daripada arus (Hantoro, 2011).

Optimasi efisiensi Turbin Heliks yang belum pernah dilakukan ialah menempatkan beberapa *foil* / *blade* (sebagai *lift device*) dalam satu lengan turbin dengan luas sapuan yang sama. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh penambahan beberapa *foil* / *blade* dalam satu lengan yang sama terhadap daya mekanik dan efisiensi Turbin Heliks pada berbagai kecepatan arus air melalui studi eksperimental. Penempatan beberapa *foil* dalam satu lengan yang sama disebut *cascade foil*. *Cascade foil* dalam penelitian ini diterapkan di Turbin Heliks, sehingga disebut dengan Turbin Heliks *Cascade Foil*. Penerapan *Cascade foil* bertujuan untuk menambah ekstraksi energi arus air tanpa melakukan perbesaran dimensi, sehingga diharapkan turbin memiliki efisiensi yang lebih tinggi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan belakang diatas, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana pengaruh jumlah *foil* terhadap daya mekanik Turbin Heliks *Cascade Foil* ?
- b. Bagaimana pengaruh jumlah *foil* terhadap efisiensi Turbin Heliks *Cascade Foil* ?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilaksanakannya tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Mengetahui pengaruh jumlah *foil* terhadap daya mekanik Turbin Heliks *Cascade Foil*
- b. Mengetahui pengaruh jumlah *foil* terhadap efisiensi Turbin Heliks *Cascade Foil*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Jenis turbin yang digunakan adalah turbin arus air vertikal aksis jenis Heliks / Gorlov.
- b. Tinggi dan diameter Turbin Heliks ialah 80 cm dan 80 cm.
- c. Jumlah lengan Turbin Heliks ialah 3.
- d. Tipe *foil* yang digunakan ialah NACA 0018 dengan panjang *chord* 10 cm.
- e. Sudut kemiringan *foil* terluar sebesar 65° .
- f. Metode yang digunakan untuk menilai efisiensi turbin ialah melalui studi eksperimental, tanpa memperhatikan *blockage correction*.
- g. Energi output turbin pada penelitian ini berupa energi mekanik putaran, yang dinyatakan dalam RPM dan torsi.
- h. Pengukuran RPM dilakukan dengan tachometer dan pengukuran torsi statis dilakukan dengan torque wrench.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini tersusun dari 5 bab dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini dijelaskan mengenai latar belakang dilakukannya Tugas Akhir, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab II dijelaskan beberapa teori singkat yang mendasari tugas akhir ini. Beberapa teori singkat yang dijelaskan pada bab ini adalah sebagai berikut: Gaya *Lift* dan Gaya *Drag*, Jenis Turbin Hidrokinetik, Turbin Heliks, Parameter Desain Turbin Hidrokinetik, dan Analisis Turbin Hidrokinetik.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III dijelaskan tentang tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir secara sistematis dan runtut, diantaranya studi literatur dan referensi, survei lokasi pengujian, penentuan geometri, fabrikasi / rancang bangun turbin, pengujian dan pengambilan data, analisis dan pembahasan serta penyusunan laporan.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bagian awal bab IV, disajikan proses perolehan data-data beserta rumus yang digunakan. Berdasarkan pengambilan dan pengolahan data yang telah dilakukan dapat diketahui pengaruh kecepatan arus terhadap kecepatan sudut, TSR, torsi, Ct, daya mekanik, dan efisiensi pada berbagai variasi jumlah *foil*. Analisis pengaruh kecepatan arus terhadap variabel-variabel tersebut dilakukan menggunakan grafik dan tabel pendukung.

BAB V PENUTUP

Bab V merupakan bagian akhir dari bab utama dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Bab V berisikan kesimpulan yang menjawab tujuan tugas akhir serta saran yang diperlukan oleh peneliti. Dengan adanya saran ini, diharapkan penelitian selanjutnya dapat lebih baik dan mampu memberikan dampak yang besar terhadap perkembangan teknologi.



“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gaya *Lift* dan Gaya *Drag*

Ketika sebuah benda apapun bergerak melalui sebuah fluida, suatu interaksi antara benda dengan fluida terjadi. Efek ini dapat digambarkan dalam bentuk gaya-gaya pada pertemuan antar-muka fluida benda. Hal ini dapat digambarkan dalam tegangan – tegangan geser dinding, τ_w , akibat efek viskos dan tegangan normal akibat tekanan, p . Distribusi tegangan geser dan tekanan ditunjukkan pada Gambar 2.1 (a) dan 2.1 (b). Baik τ_w dan p bervariasi besar dan arahnya disepanjang permukaan.

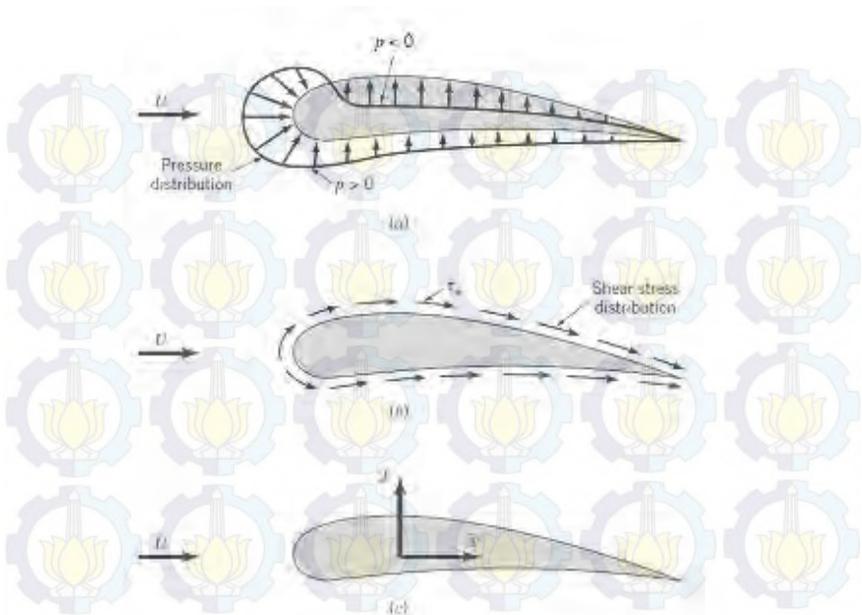
Seringkali berguna jika diketahui distribusi terperinci dari tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda, meskipun informasi tersebut sulit untuk didapatkan. Namun demikian, seringkali yang diperlukan hanya efek resultan secara keseluruhan. Gaya resultan dengan arah yang sama (sejajar) dengan kecepatan fluida disebut sebagai gaya hambat (*drag*), D_r , dan gaya resultan yang tegak lurus terhadap arah kecepatan fluida disebut sebagai gaya angkat (*lift*), L , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 (c). Untuk beberapa benda tiga dimensi, mungkin juga terdapat sebuah gaya samping yang tegak lurus terhadap bidang yang memuat D_r dan L .

Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan pengaruh-pengaruh dari kedua besaran ini pada permukaan benda seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Komponen x dan y dari gaya fluida pada elemen luas kecil sebesar dA adalah

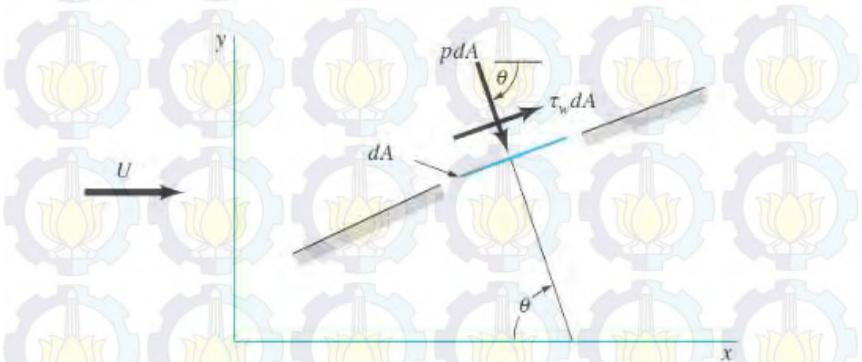
$$dF_x = (pdA) \cos\theta + (\tau_w dA) \sin\theta \quad (2.1)$$

dan

$$dF_y = -(pdA)\sin\theta + (\tau_w dA) \cos\theta \quad (2.2)$$



Gambar 2.1 Gaya-gaya dari fluida di sekeliling pada sebuah benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) (Munson, 2002)



Gambar 2.2 Gaya tekanan dan gaya geser pada sebuah elemen kecil dari permukaan sebuah benda (Munson, 2002)

Jadi, komponen x dan y netto dari gaya pada benda adalah

$$D_r = \int dF_x = \int p \cos\theta dA + \int \tau_w \sin\theta dA \quad (2.3)$$

dan

$$L = \int dF_y = - \int p \sin\theta dA + \int \tau_w \cos\theta dA \quad (2.4)$$

Tentu saja untuk melakukan pengintegralan dan menentukankan *lift* dan *drag*, harus diketahui terlebih dahulu bentuk benda (yaitu, θ sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi dari τ_w dan ρ di sepanjang permukaan. Distribusi – distribusi ini seringkali sangat sulit didapatkan, baik secara eksperimental maupun secara teoritis. Distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan dengan menggunakan serangkaian tap tekanan statis di sepanjang permukaan benda. Akan tetapi, sangat sulit untuk mengukur distribusi tegangan geser dinding.

Tegangan geser maupun tekanan sama-sama memberikan kontribusi terhadap *lift* dan *drag*, karena untuk sembarang benda θ tidak nol ataupun 90° pada benda. Pengecualian adalah pelat datar yang diatur baik sejajar terhadap aliran fluida ($\theta=90^\circ$) atau tegak lurus terhadap aliran fluida ($\theta=0$).

Meskipun persamaan 2.3 dan 2.4 berlaku untuk benda apapun, kesulitan dalam pemakaiannya terletak pada bagaimana mendapatkan distribusi tegangan geser dan tekanan yang sesuai pada permukaan benda. Banyak sekali upaya telah dilakukan dalam menentukan besaran-besaran ini, tetapi karena berbagai kerumitan yang terlibat, informasi mengenai hal tersebut hanya tersedia untuk beberapa kondisi sederhana.

Tanpa informasi terperinci yang berkaitan dengan distribusi tegangan geser dan tekanan pada benda, persamaan 2.3 dan 2.4 tidak dapat digunakan. Alternatif yang banyak digunakan adalah dengan mendefinisikan koefisien *lift* dan *drag* yang tak berdimensi dan menentukan nilai-nilai perkiraannya dengan cara-cara tertentu, baik menggunakan analisis yang disederhanakan, atau dengan beberapa teknik numerik, atau eksperimen yang sesuai. *Koefisien lift*, C_L dan *koefisien drag*, C_D , didefinisikan sebagai (Munson, 2002) :

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.5)$$

$$C_D = \frac{D_r}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (2.6)$$

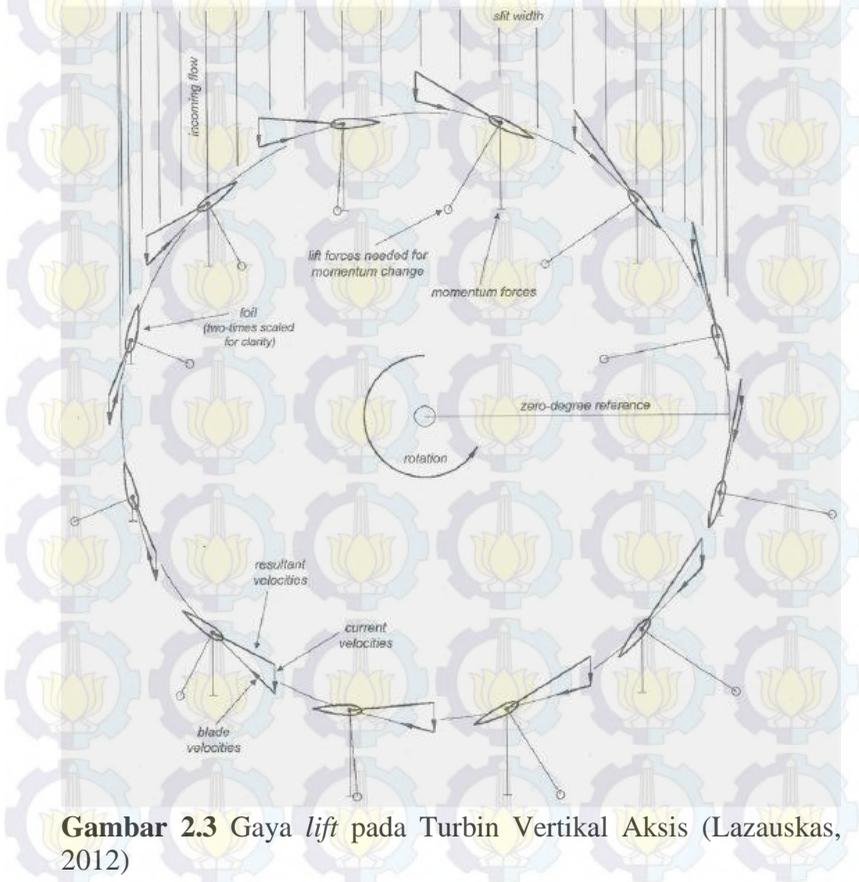
Ketika suatu benda padat ditempatkan dalam suatu aliran fluida akan dihasilkan gaya *lift*/angkat dan gaya *drag*/seret. Gaya *lift*/angkat dihasilkan oleh perubahan aliran disekitar foil. Gaya angkat terjadi ketika tekanan udara dibawah sayap/*airfoil* lebih tinggi daripada tekanan udara diatas sayap/*airfoil*. Fase ini menyebabkan perbedaan tekanan udara yang kemudian mengalir dari permukaan bawah sayap, sekitar ujung sayap menuju permukaan atas sayap. Gaya aerodinamis total pada umumnya terdiri dari dua komponen, yakni gaya angkat dan gaya seret. Didefinisikan bahwa komponen yang sejajar terhadap aliran adalah gaya dorong/*drag*, sedangkan komponen yang tegak lurus terhadap aliran adalah gaya angkat (Setiaji, 2011).

Setiap *foil / blade* turbin yang terkena aliran fluida akan mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*. Desain *foil* akan disesuaikan tergantung gaya manakah yang lebih banyak dimanfaatkan. Berdasarkan cara kerjanya, turbin *Vertical Axis* dibagi menjadi 2 jenis, yaitu *lift device* dan *drag device*. Turbin Darrieus dan Gorlov termasuk dalam turbin *lift device*. Sedangkan Turbin Savonius dan Turbin Hunter termasuk dalam turbin *drag device*.

Turbin tipe *drag device* memiliki *blade* berukuran lebar untuk menangkap arus. Turbin tipe ini menggunakan salah satu sisi *blade* (*blade* yang searah dengan arah arus) yang memiliki desain koefisien *drag* tinggi, sedangkan sisi yang lain (*blade* yang berlawanan dengan arah arus) digunakan *blade* dengan desain koefisien *drag* yang rendah. Dengan cara ini gaya dorong / gaya *drag* pada sisi *blade* yang searah dengan arah arus lebih besar daripada sisi *blade* yang berlawanan dengan arah arus. Sehingga torsi yang bernilai positif dapat dihasilkan dan turbin dapat berputar. Turbin tipe *drag device* memiliki RPM dan efisiensi yang rendah karena *blade* tidak dapat bergerak lebih cepat daripada arus (Hantoro, 2011).

Sedangkan turbin tipe *lift device*, seperti Turbin Heliks dan Turbin Darrieus memanfaatkan *blade / foil* yang berbentuk *airfoil*

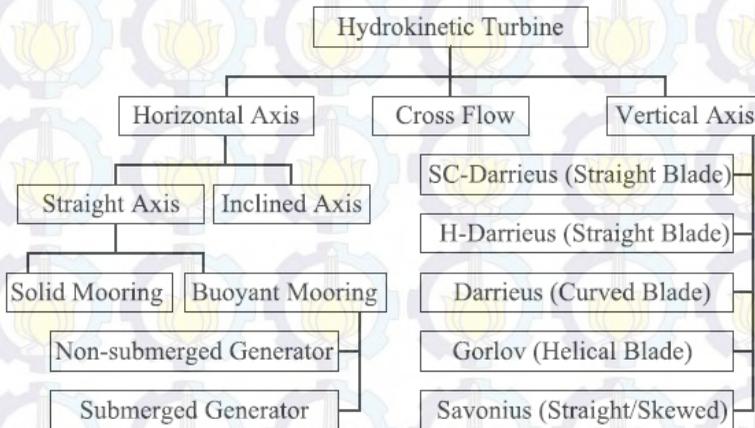
untuk menghasilkan gaya *lift* / gaya angkat. Turbin tipe ini mampu mengkonversi gaya angkat *blade* / *foil* menjadi torsi positif (dalam bentuk putaran turbin). *Blade* / *foil* turbin tipe *lift device* akan bergerak lebih cepat daripada arus. Dengan demikian turbin tipe *lift device* memiliki efisiensi yang lebih tinggi daripada *drag device* (Hantoro, 2011). Berikut ialah gaya *lift* yang terjadi pada turbin Vertikal Aksis.



Gambar 2.3 Gaya *lift* pada Turbin Vertikal Aksis (Lazauskas, 2012)

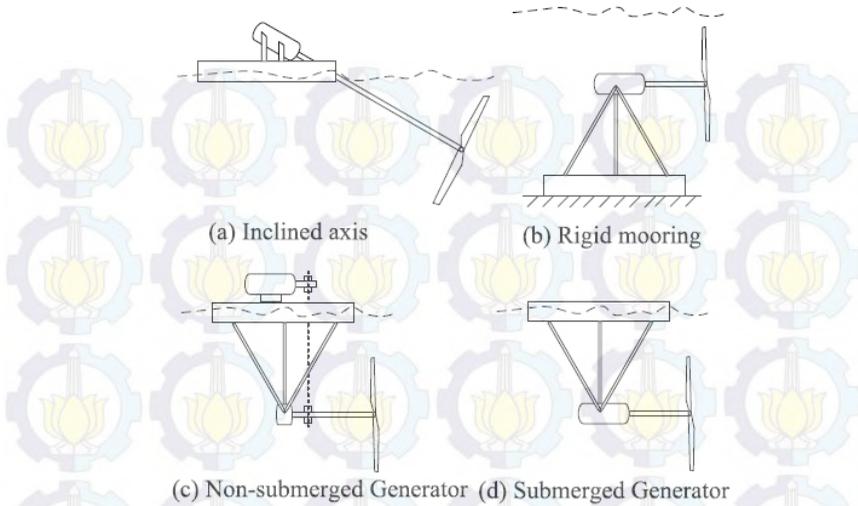
2.2 Jenis Turbin Hidrokinetik

Energi kinetik arus air (*hydrokinetic energy*) dapat ditemukan pada arus sungai dan arus laut. Teknologi untuk mengkonversi energi kinetik pada arus sungai maupun arus laut untuk menjadi energi mekanik putaran adalah turbin arus air atau turbin hidrokinetik. Teknologi turbin hidrokinetik banyak diadopsi dari konsep dan desain turbin angin (Khan, 2009). Berdasarkan sumbu putarnya, turbin hidrokinetik dibagi menjadi 3 jenis yaitu horizontal aksis, vertikal aksis, dan turbin crossflow. Berikut ialah klasifikasi turbin hidrokinetik.

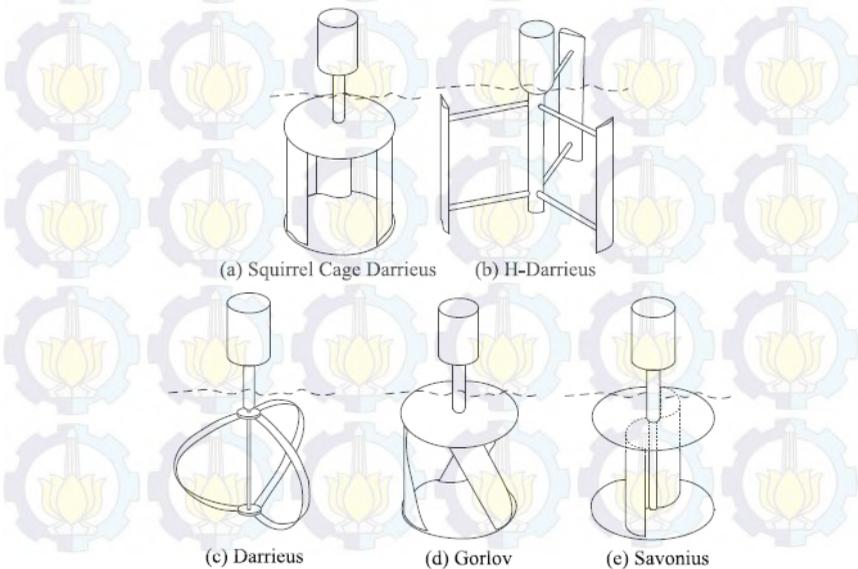


Gambar 2.4 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik (Khan, 2009)

Turbin horizontal aksis memiliki sumbu putar yang sejajar dengan arah arus air dan bekerja menggunakan rotor berbentuk *propeller*. Gambar 2.5 menunjukkan jenis-jenis pemasangan turbin horizontal aksis. Sedangkan turbin vertikal aksis memiliki sumbu putar tegak lurus dengan arah arus air. Gambar 2.6 menunjukkan tipe-tipe turbin vertikal aksis.



Gambar 2.5 Jenis-jenis pemasangan Turbin Horizontal Aksis (Khan, 2009)



Gambar 2.6 Tipe Turbin Vertikal Aksis (Khan, 2009)

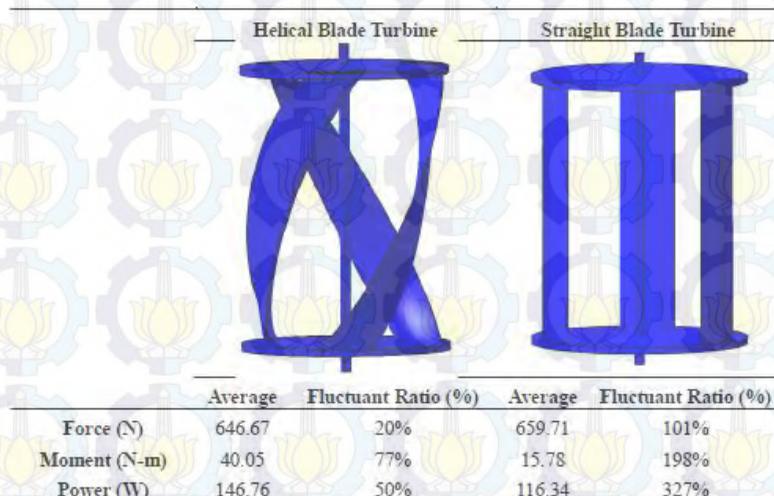
Masing – masing jenis turbin tersebut memiliki beberapa kelebihan dan kekurangan. Turbin sumbu horizontal memiliki kelebihan efisiensi yang lebih tinggi, memiliki kemampuan *self starting* yang lebih besar, memiliki rasio biaya terhadap daya yang dihasilkan lebih rendah sedangkan kekurangannya yaitu mengharuskan pemasangan generator dan gearbox dekat dengan rotor sehingga membuat perawatan yang lebih sulit dan memerlukan bagian tambahan seperti ekor / *tail fin* yang digunakan untuk mengarahkan turbin ketika arah aliran fluida berubah (Zobaa, 2011).

Turbin sumbu vertikal memiliki kelebihan yaitu kemudahan dalam perawatan karena generator dan gearbox dapat diletakkan jauh dari rotor turbin atau berada dipermukaan air laut, lalu dapat menerima arah aliran fluida dari mana saja (*omni directional*), dapat beroperasi pada aliran fluida yang rendah, dan desain blade yang sederhana sehingga biaya fabrikasi blade dapat diminimalkan. Kekurangan turbin sumbu vertical adalah tidak memiliki kemampuan *self starting* atau kemampuan *self starting* yang buruk, sehingga dapat mengakibatkan *blade* pada turbin menjadi patah dan menimbulkan getaran pada *blade*, lalu kekurangan lainnya turbin sumbu vertikal memiliki efisiensi yang rendah serta susah untuk mengendalikan kecepatan blade yang terlalu tinggi (Zobaa, 2011).

Pada aplikasi di arus air, pemasangan generator dengan turbin memiliki tantangan tersendiri. Pada turbin horizontal aksis generator dapat dipasang secara *inclined*, *rigid mooring*, *non-submerged generator*, dan *submerged generator* seperti pada gambar 2.5. Sedangkan pada turbin vertikal aksis, generator dapat ditempatkan diujung *shaft* sehingga generator berada diatas arus air. Hal ini dapat mengurangi biaya peralatan listrik yang anti air (*water sealed*) (Khan, 2009). Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini, digunakan Turbin Vertikal Aksis.

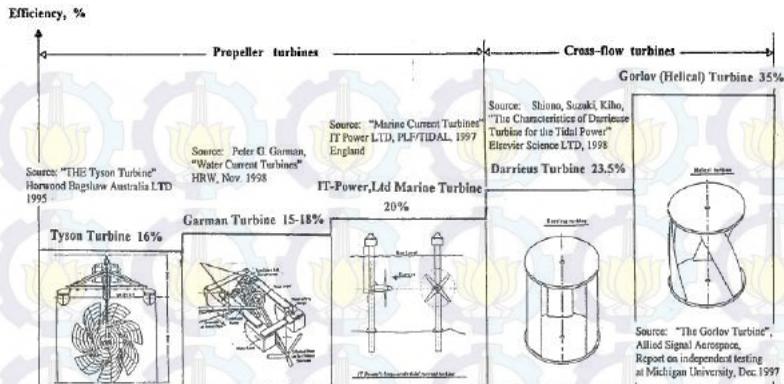
2.3 Turbin Heliks

Turbin arus air yang banyak dikembangkan ialah tipe Darrieus dan tipe Heliks. Dari kedua tipe turbin tersebut, Turbin Heliks memiliki *moment* (N-m) dan daya/power (Watt) yang nilainya lebih tinggi dan lebih stabil (Tsai, 2014). Berikut ialah perbandingan performansi kedua turbin tersebut.



Gambar 2.7 Perbandingan *moment* dan daya dari Turbin Heliks (kiri) dan Darrieus (kanan) (Tsai, 2014)

Turbin Heliks memiliki semua karakteristik unggul dari Turbin Darrieus tanpa karakteristik lemah dari Turbin Darrieus. Turbin Heliks memiliki torsi yang stabil pada berbagai kecepatan arus dan dapat berputar pada kecepatan arus rendah (Gorlov, 1998). Selain itu dari berbagai tipe turbin arus air yang lain, Turbin Heliks memiliki efisiensi tertinggi (Gorban, 2001).



Gambar 2.8 Efisiensi dari Berbagai Tipe Turbin Arus Air (Gorban, 2001)

Keunggulan lain dari Turbin Heliks ialah memiliki kemampuan *self-starting* (kemampuan turbin untuk dapat berakselerasi dari keadaan diam sampai pada keadaan dimana dapat menghasilkan daya untuk berotasi). Sementara Darrieus tidak memiliki kemampuan tersebut (Wright, 2011). Oleh karena itu, jenis Turbin Vertikal Aksis yang digunakan pada Tugas Akhir ini ialah Turbin Heliks / Turbin Gorlov.

2.4 Parameter Desain Turbin Heliks

Parameter desain Turbin Heliks menentukan performa turbin tersebut ketika dilakukan uji performansi. Performa turbin direpresentasikan dalam variabel efisiensi. Turbin Heliks memiliki beberapa parameter desain, yaitu : tinggi, jari-jari turbin, jumlah *blade / foil*, tipe *foil*, panjang *chord*, sudut kemiringan *foil* terhadap horizontal, dan *solidity* (Anderson, 2011).

Metode yang telah digunakan untuk meningkatkan efisiensi Turbin Heliks adalah dengan melakukan optimalisasi pada sudut kemiringan *foil* dan *solidity*. Sudut kemiringan *foil* (δ) yang dimaksud ialah sudut kemiringan *foil* terhadap horizontal. Berikut adalah ilustrasi sudut kemiringan *foil*.



Gambar 2.9 Sudut Kemiringan *Foil* Turbin Heliks (δ) (Niblick, 2012)

Pada sudut kemiringan $65,3^{\circ}$ didapatkan efisiensi 30 % dan pada sudut kemiringan $66,4^{\circ}$ didapatkan efisiensi 33 % (Han, 2013). Selain itu, diantara sudut kemiringan $43,7^{\circ}$, 50° dan 60° didapatkan efisiensi tertinggi (24,4 %) pada 60° . Semakin besar sudut kemiringannya maka torsi dan efisiensi turbin Heliks akan semakin tinggi (Shiono, 2002). Niblick (2012) juga menyatakan bahwa turbin dengan efisiensi tertinggi (24%) menurut penelitiannya didapatkan pada kemiringan *foil* 60° . Berdasarkan ketiga penelitian tersebut, kemiringan *foil* yang dipilih sebagai variabel tetap pada Tugas Akhir ini ialah 65° .

Dari sisi *solidity*, menurut Shiono (2002) diantara *solidity* 0,2, 0,3, 0,4 dan 0,5, efisiensi turbin heliks tertinggi yaitu didapatkan pada *solidity* 0,4 sedangkan efisiensinya akan menurun pada *solidity* 0,5. Hal berbeda dinyatakan oleh Jing (2014) yang menyatakan bahwa diantara *solidity* 0,191, 0,210, 0,23, 0,255, 0,28, 0,306, 0,318, 0,35, dan 0,382 $C_{p_{max}}$ (C_p puncak) tertinggi dicapai pada *solidity* 0,35. Dengan demikian, masih diperlukan metode lain untuk meningkatkan efisiensi Turbin Heliks sebab didapatkan hasil yang berbeda dan tidak saling mengkonfirmasi pada penerapan metode dari sisi *solidity*.

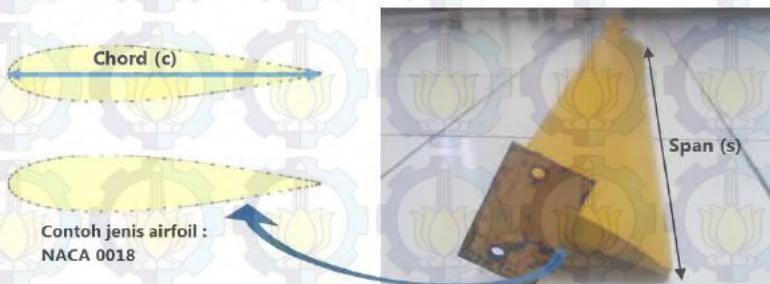
Foil / blade merupakan bagian utama dari sebuah turbin arus air maupun turbin angin. Jumlah *blade* tidak hanya berpengaruh pada *power coefficient* (C_p), tetapi juga berpengaruh pada stabilitas struktur. Rata-rata torsi pada turbin 2 *blade* lebih rendah daripada turbin 3 *blade*. Berkurangnya jumlah *blade* menyebabkan kurva *power* (range TSR) yang semakin lebar dan satu *blade* memberikan kurva *power* (range TSR) yang paling lebar. Akan tetapi mengimplementasikan 1 *blade* adalah sesuatu yang tidak mungkin, karena adanya gaya sentrifugal yang tidak seimbang. Sementara itu, turbin 3 *blade* lebih tepat daripada turbin 2 *blade*, karena turbin 3 *blade* memberikan stabilitas yang lebih baik (Samaraweera, 2010). Samaraweera (2010) melaporkan bahwa jumlah *foil* terbaik dalam sebuah turbin Vertikal Aksis ialah 3 *foil* dan 4 *foil*. Secara umum, beberapa peneliti lebih sering menggunakan 3 *foil*, seperti Hantoro (2011), Han (2013), dan Bachant (2014).

Selanjutnya, dilakukan analisis desain geometri *foil* yang terbaik berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya. Geometri *foil* merupakan salah satu faktor yang menentukan kinerja dari Turbin Arus Laut. Kinerja Turbin Arus Laut dinyatakan dalam *Coefficient of Performance / Coefficient of Power / Power Coefficient* (C_p) atau efisiensi. Gambar 2.10 dibawah ini menunjukkan geometri *foil* pada Turbin *Straight Foil* (Turbin Darrieus) dan Turbin Heliks (Turbin Gorlov).

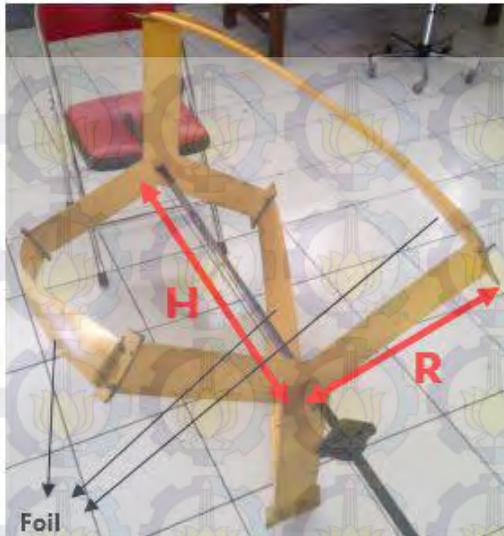
Sedangkan gambar 2.11 menjelaskan tentang terminologi dalam geometri foil, diantaranya ialah jenis airfoil, chord (C), dan span (s). Sedangkan gambar 2.12 menunjukkan jari-jari (R) dan tinggi (H) dari sebuah turbin. Terdapat beberapa parameter desain sebuah *foil* yang banyak diteliti, yaitu jenis *airfoil*, kemiringan *foil* (δ), dan rasio tinggi dengan jari-jari turbin (H/R).



Gambar 2.10 (a) *Straight foil* (Turbin *Straight Foil*), (b) *Heliks foil* (Turbin *Heliks*)

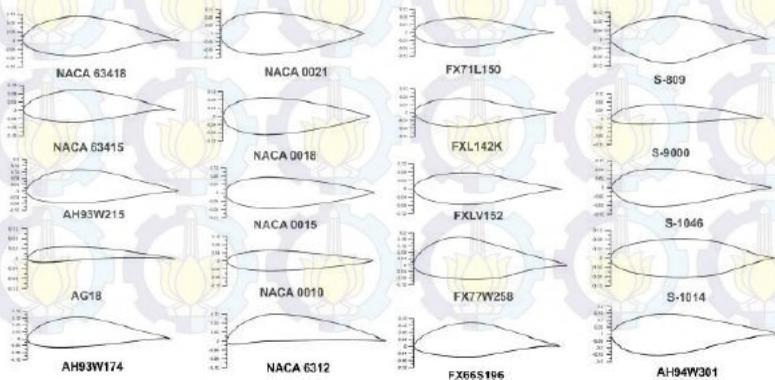


Gambar 2.11 Jenis *airfoil*, *chord*, dan *span*



Gambar 2.12 Jari-jari (R) dan tinggi (H) turbin

Mohamed (2012) melaporkan hasil penelitiannya pada beberapa seri airfoil menggunakan CFD (Computational Fluid Dynamics), yaitu NACA 00XX, NACA 63XXX, S-series, A-series dan FX-series. Berikut ialah variasi airfoil yang diteliti oleh Mohamed (2012).



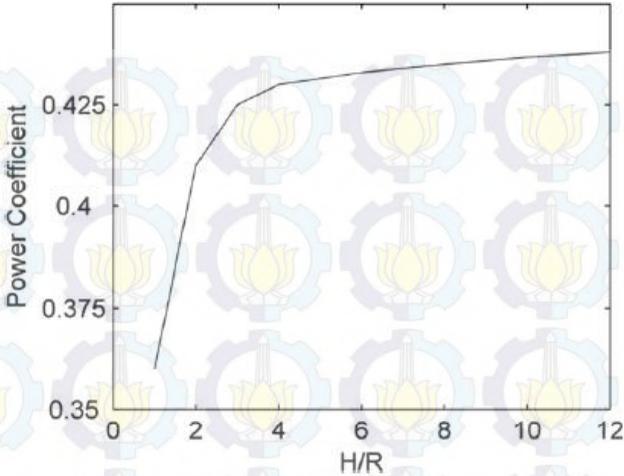
Gambar 2.13 Berbagai jenis airfoil (Mohamed, 2012)

Tabel 2.1 *Power coefficient* (C_p) maksimum dari berbagai airfoil (Mohamed, 2012)

Airfoil	C_p max	Airfoil	C_p max	Airfoil	C_p max	Airfoil	C_p max
NACA 0010	0.2345	NACA 63415	0.1711	AG18	0.0123	FX66S196	0.2074
NACA 0015	0.2947	NACA 63418	0.2772	S 809	0.3428	FX77W256	0.1639
NACA 0018	0.2964	AH93W174	0.2469	S 9000	0.1696	FX71L150	0.2961
NACA 0021	0.2679	AH93W215	0.2541	S 1046	0.4051	FXL142	0.3311
NACA 6312	0.1290	AH94W301	0.2130	S 1014	0.2769	FXLV152	0.3576

Tabel 2.1 diatas menunjukkan *power coefficient* (C_p) maksimum dari berbagai jenis *airfoil*. *Airfoil* dengan C_p max tertinggi didapatkan pada airfoil S-1046. Untuk *airfoil* seri NACA, C_p max tertinggi didapatkan pada NACA 0018. Sebagai catatan, turbin yang terdiri dari *airfoil* simetris memiliki kinerja yang lebih tinggi daripada turbin *airfoil* asimetris. NACA 0018 ialah tipe airfoil terbaik untuk seri NACA dan umum digunakan untuk Turbin Darrieus (Mohamed, 2012). Lebih jauh lagi, NACA 0018 memiliki karakteristik terbaik untuk turbin arus laut vertikal aksis. NACA 0018 umum digunakan pada Turbin Darrieus karena *foil* ini memiliki rasio ketebalan terhadap *chord* yang relatif tinggi, sehingga memiliki kekuatan yang baik untuk menahan *bending* (Hantoro, 2011). Dengan demikian, didapatkan bahwa *airfoil* terbaik ialah NACA 0018 dan S-1046.

Selain itu, terdapat pula parameter desain (H/R) yang dapat digunakan untuk menentukan tinggi turbin (H) dan jari-jari turbin (R). Besarnya span foil (s) dapat dikatakan sama dengan tinggi turbin (H). Gambar 2.14 menunjukkan grafik hubungan antara H/R terhadap *power coefficient* (C_p). Ketika tinggi lebih dari 6 kali jari-jari turbin, didapatkan bahwa maksimum *power coefficient* meningkat kurang signifikan (Ye Li, 2010).



Gambar 2.14 Hubungan antara H/R terhadap Cp (Ye Li, 2010)

2.5 Analisis Turbin Hidrokinetik

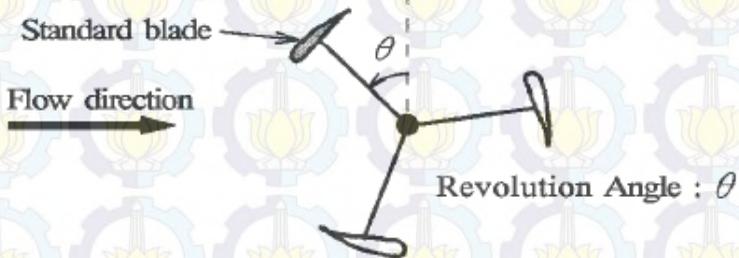
Terdapat beberapa variabel untuk mengevaluasi sebuah Turbin Hidrokinetik. Diantaranya ialah kecepatan sudut (ω), tip speed ratio (TSR), torsi (T), *coefficient of torque* (C_t), daya mekanik, dan efisiensi.

Kecepatan sudut merupakan banyaknya putaran turbin dalam satuan waktu tertentu. Kecepatan sudut turbin dapat dinyatakan dalam satuan RPM (*rotation per minute*) atau rad/s. Variabel TSR masih berhubungan dengan RPM. TSR adalah perbandingan antara kecepatan tangensial *foil* turbin dengan kecepatan arus air. Nilai TSR menyatakan seberapa cepat turbin berputar terhadap kecepatan arus tertentu. Secara matematis, TSR dinyatakan dalam persamaan berikut (Roy, 2015).

$$TSR = \frac{R\omega}{V} \quad (2.7)$$

Keterangan : TSR = tip speed ratio
 R = jari-jari turbin (m)
 ω = kecepatan sudut (rad/s)
 V = kecepatan arus air (m/s)

Torsi merupakan perkalian antara gaya dengan jari-jari turbin. Torsi dapat pula dinyatakan sebagai kekuatan turbin dalam berputar. Torsi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini ialah torsi *start* dari turbin atau biasa pula disebut dengan torsi statis. Pengukuran torsi statis dilakukan pada saat turbin tidak berputar. Alat ukur torsi (*torque wrench*) ditahan pada azimuth tertentu untuk mengukur besarnya gaya yang diberikan turbin untuk mulai berputar. Turbin vertikal aksis memiliki sudut azimuth 0° ketika *leading edge* dari *standard blade* (*blade* referensi / *foil* referensi) berhadapan langsung dengan arah arus. Gambar 2.15 menunjukkan besarnya azimuth (Θ) dalam turbin vertikal aksis.



Gambar 2.15 Azimuth (Θ) turbin vertikal aksis (Shiono, 2002)

Variabel *Coefficient of torque* (C_t) masih berhubungan dengan torsi turbin. *Coefficient of torque* (C_t) adalah koefisien yang menyatakan besarnya torsi suatu turbin terhadap kecepatan arus tertentu. Berdasarkan koefisien ini, peneliti dapat membandingkan besarnya torsi satu turbin dengan turbin yang lain, walaupun tipe dan dimensi turbin yang dibandingkan berbeda satu sama lain. Atau dengan kata lain variabel C_t merupakan variabel yang *comparable* untuk membandingkan besarnya torsi satu turbin dengan turbin yang lain. Secara matematis, C_t dinyatakan oleh persamaan berikut (Roy, 2015).

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R} \quad (2.8)$$

Keterangan : C_T = coefficient of torque

T = torsi turbin (Nm)

ρ = densitas dari air (kg/m^3)

A = area sapuan turbin (m^2)

untuk vertikal aksis A = diameter x tinggi

V = kecepatan arus air (m/s)

R = jari-jari turbin (m)

Daya mekanik turbin merupakan perkalian antara kecepatan sudut (rad/s) dengan torsi turbin (Nm). Semakin besar daya mekanik suatu turbin, maka potensi daya listrik yang dapat dihasilkan juga semakin besar. Sedangkan, efisiensi merupakan perbandingan antara daya mekanik (daya output turbin) dengan daya yang tersedia (daya input arus air). Daya input arus air sangat dipengaruhi oleh kecepatan arus (V). Efisiensi yang dimaksud pada Tugas Akhir ini ialah efisiensi mekanik dari turbin. Efisiensi menyatakan persentase daya mekanik (daya output turbin) yang dapat dihasilkan terhadap daya input arus air tertentu. Semakin besar efisiensi, maka semakin besar daya yang dapat dihasilkan oleh turbin tersebut. Oleh karena itu, performansi turbin direpresentasikan dalam efisiensi.

Berdasarkan variabel efisiensi, peneliti dapat membandingkan performansi satu turbin dengan turbin yang lain, walaupun tipe dan dimensi turbin yang dibandingkan berbeda satu sama lain. Atau dengan kata lain efisiensi merupakan variabel yang *comparable* untuk membandingkan besarnya performansi satu turbin dengan turbin yang lain. Efisiensi biasa pula disebut dengan *Coefficient of Power* (C_p). Secara matematis, C_p dinyatakan oleh persamaan berikut (Roy, 2015). Sedangkan efisiensi sama seperti C_p , akan tetapi dinyatakan dalam persentase.

$$P = T\omega \quad (2.9)$$

$$C_P = \frac{P}{P_{available}} = \frac{T\omega}{0,5\rho AV^3} = \frac{T}{0,5\rho AV^2 R} \cdot \frac{R\omega}{V} = C_T \times TSR \quad (2.10)$$

$$\eta = \frac{P}{P_{available}} \cdot 100\% = \frac{T\omega}{0,5\rho AV^3} \cdot 100\% \quad (2.11)$$

Keterangan : T = torsi turbin (Nm)

ω = kecepatan sudut turbin (rad/s)

ρ = densitas dari air (kg/m^3)

A = area sapuan turbin (m^2)

untuk vertikal aksis A = diameter x tinggi

V = kecepatan arus air (m/s)

R = jari-jari turbin (m)

C_T = *coefficient of torque*

TSR = *tip speed ratio*

P = daya mekanik turbin (watt)

$P_{available}$ = daya arus air (watt)

C_P = *coefficient of power*

η = Efisiensi (%)

Sebagai tambahan, terdapat pula variabel *machine Reynolds number* atau Reynold number turbin. Reynold number turbin menunjukkan jenis aliran pada turbin dengan skala/dimensi tertentu. Berikut ialah persamaan dari Reynold number turbin (Niblick, 2012).

$$Re_{turbin} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.12)$$

Keterangan : Re_{turbin} = Reynold number turbin

V = kecepatan arus (m/s)

D = diameter turbin (m)

ν = viskositas kinematik dari fluida (m^2/s)

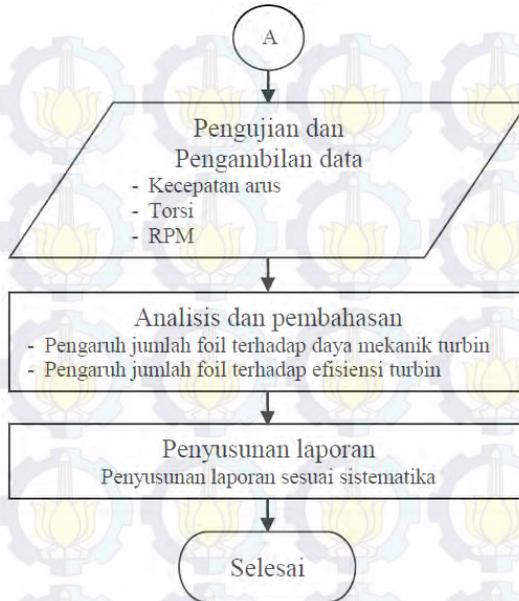


“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini. Melalui gambar tersebut dapat diketahui tahapan-tahapan pelaksanaan tugas akhir.





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Studi Literatur dan Referensi

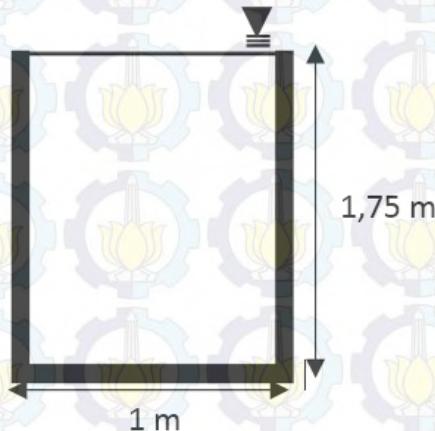
Pelaksanaan tugas akhir ini diawali dengan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pemahaman peneliti terhadap topik penelitian yang diambil. Studi literatur dilakukan dengan mempelajari pengetahuan pendukung dalam penelitian, seperti mekanika fluida dalam *open channel*, gaya *lift* dan gaya *drag*. Studi referensi dilakukan dengan mengumpulkan dan mempelajari bahan referensi berupa jurnal / *paper*. Referensi yang dipelajari antara lain terkait dengan jenis turbin hidrokinetik, Turbin Heliks, dan parameter desain Turbin Heliks. Referensi diperlukan juga untuk mempelajari tentang pengaruh tinggi dan jari-jari (H/R), jumlah *arm*/lengan turbin (n), aspek rasio (AR), kemiringan foil (δ), serta tipe *foil* terhadap performansi Turbin Darrieus dan Turbin Heliks. Selain itu, perlu dipelajari juga tentang analisis turbin hidrokinetik. Analisis yang dimaksud

berkaitan tentang variabel-variabel yang berkaitan tentang pengujian turbin hidrokinetik.

3.2 Survei Lokasi Pengujian

Selanjutnya dilakukan survei dan penetapan lokasi yang dapat digunakan sebagai tempat pengujian turbin. Lokasi tersebut harus memiliki kecepatan arus air yang signifikan perbedaannya. Selain itu, pada tahap ini dilakukan pengukuran lebar dan kedalaman saluran. Hal ini dilakukan agar dimensi turbin yang diteiti dapat disesuaikan dengan lebar dan kedalaman saluran.

Lokasi pengujian yang dipilih yaitu di saluran keluaran mata air Umbulan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur. Gambar 3.2 menunjukkan lebar dan kedalaman saluran. Lebar saluran sebesar 1 m dan kedalaman saluran sebesar 1,75 m. Dimensi rangka dan turbin harus dapat menyesuaikan lebar dan kedalaman saluran tersebut.



Gambar 3.2 Lebar dan kedalaman saluran keluaran mata air Umbulan, Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur

3.3 Penentuan Geometri

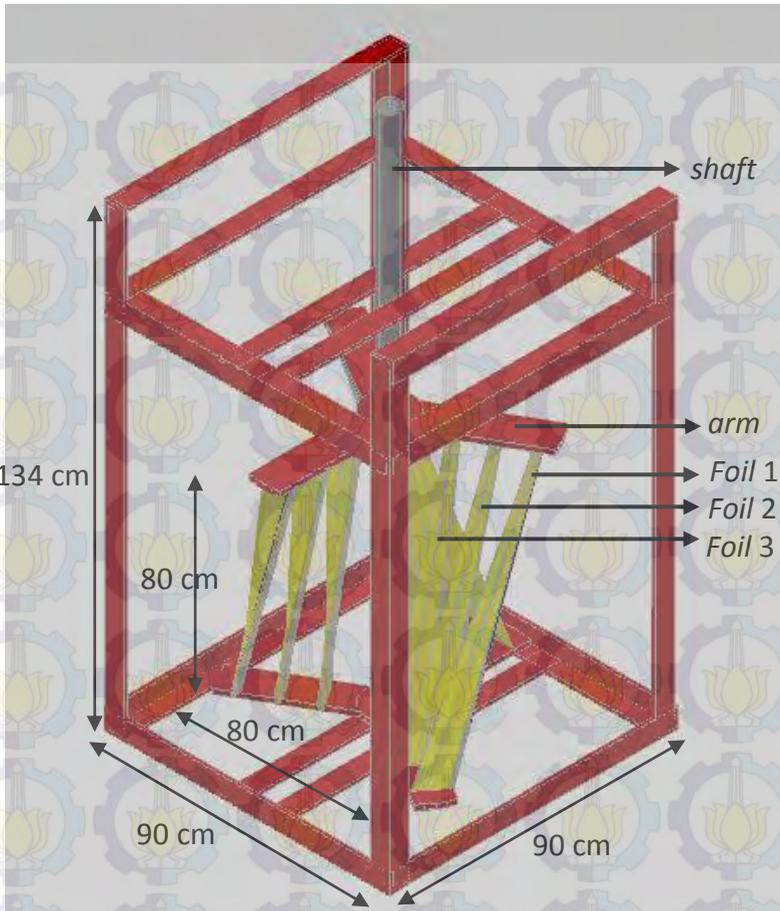
Tahap berikutnya dilakukan penentuan geometri turbin guna memaksimalkan efisiensi Turbin Heliks, sebelum nantinya

dilakukan optimasi kembali efisiensi turbin tersebut dengan adanya variasi jumlah *foil* secara *cascade*. Penerapan *cascade foil* pada Turbin Heliks bertujuan untuk menambah ekstraksi energi arus air tanpa melakukan perbesaran dimensi, sehingga diharapkan turbin memiliki efisiensi yang lebih tinggi. Penentuan geometri disesuaikan pula dengan lebar dan kedalaman saluran air yang akan digunakan sebagai tempat pengujian turbin.

Selain itu, ditentukan jenis material yang akan digunakan yaitu dengan serat *fiberglass*, resin, dan besi (sebagai struktur utama penguat *foil*) untuk bahan pembuatan *foil* serta besi untuk komponen shaft dan arm turbin. Tabel 3.1 menunjukkan parameter desain Turbin Heliks yang dijadikan variabel tetap pada penelitian ini. Gambar 3.3 menunjukkan penempatan *foil* 1, *foil* 2, *foil* 3 pada Turbin Heliks 9 *foil* beserta rangka.

Tabel 3.1 Desain Turbin Heliks *Cascade Foil*

Parameter	Keterangan
Diameter turbin (cm)	80 (Ye Li, 2010)
Tinggi turbin (cm)	80 (Ye Li, 2010)
Jumlah lengan turbin / <i>arm</i>	3 (Samaraweera, 2010)
Diameter <i>shaft</i> (cm)	3,2
Tipe <i>foil</i>	NACA 0018 (Mohamed, 2012)
Panjang <i>chord</i> (cm)	10 (Hantoro, 2011)
Penempatan <i>foil</i> 1	R
Penempatan <i>foil</i> 2	0,75 R
Penempatan <i>foil</i> 3	0,5 R
Kemiringan <i>foil</i> 1 (°)	65 (Han, 2013)
Kemiringan <i>foil</i> 2 (°)	70
Kemiringan <i>foil</i> 3 (°)	75
Dimensi rangka (cm)	90 (panjang) x 90 (lebar) x 134 (tinggi)

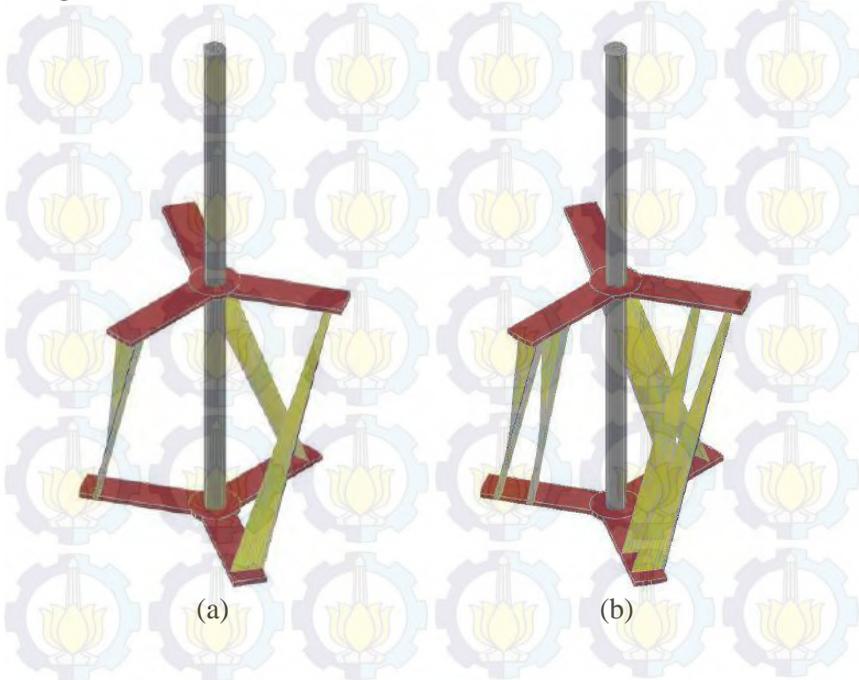


Gambar 3.3 Penempatan Foil 1, Foil 2, Foil 3 pada Turbin Heliks 9 foil beserta rangka

Variasi jumlah *foil* yang terpasang dalam satu lengan (*arm*) turbin dilakukan sebanyak 1 *foil*, 2 *foil*, dan 3 *foil*. Sehingga terdapat 3 variabel manipulasi yang divariasikan, yaitu Turbin Heliks 3 *foil* (1 *foil* dalam satu lengan turbin), Turbin Heliks 6 *foil* (2 *foil* dalam satu lengan turbin), dan Turbin Heliks 9 *foil* (3 *foil* dalam satu lengan turbin).

Pada Turbin Heliks 3 *foil*, *foil* dipasang pada jari-jari turbin atau R . Pada Turbin Heliks 6 *foil* jarak antar *foil* yang digunakan yaitu $(0,75 R, R)$. Pada Turbin Heliks 9 *foil* jarak antar *foil* yang digunakan yaitu $(0,5 R, 0,75 R, R)$. Sebagai catatan, maksud dari $0,5 R$ ialah bahwa *foil* terpasang pada jarak $0,5$ dari jari-jari turbin terhitung dari poros turbin. Demikian pula untuk $0,75 R$.

Desain *arm* Turbin Heliks harus dapat dipasang / mengakomodasi mulai dari Turbin Heliks 3 *foil*, Turbin Heliks 6 *foil*, dan Turbin Heliks 9 *foil*. Pada gambar 3.3 dapat dilihat bahwa apabila *foil* 3 (*foil* terdalam) dilepas, maka Turbin Heliks 9 *foil* menjadi Turbin Heliks 6 *foil*. Lalu, apabila *foil* 2 (*foil* tengah) dilepas, maka Turbin Heliks 6 *foil* menjadi Turbin Heliks 3 *foil*. Gambar 3.4 merupakan variasi jumlah *foil* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.





(c)

Gambar 3.4 (a) Turbin Heliks 3 *foil*, (b) Turbin Heliks 6 *foil*, (c) Turbin Heliks 9 *foil*

3.4 Fabrikasi Turbin

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan eksperimental yaitu dengan membuat turbin secara langsung dengan ukuran yang sebenarnya tanpa menggunakan pemodelan agar didapatkan hasil penelitian yang lebih valid dan terpercaya.

Berdasarkan parameter desain yang telah ditentukan maka dilakukan pembuatan/fabrikasi *foil*, *arm* (lengan turbin), *shaft* (poros), dan rangka. Selain itu, dilakukan pula penyesuaian mekanisme sambungan antar komponen dan penyesuaian *shaft* dengan alat ukur. Lengan turbin harus dapat mengakomodasi semua variasi pada penelitian ini. Setelah itu, dilakukan perakitan untuk semua variasi penelitian dan harus dipastikan bahwa semua komponen terpasang dengan baik. Apabila geometri turbin dan rangka sesuai dengan yang diharapkan, maka dapat dilanjutkan ke tahap berikutnya. Apabila belum, maka dilakukan perbaikan atau fabrikasi ulang hingga seluruh geometri serta dimensi turbin dan

rangka sesuai dengan yang telah direncanakan sebelumnya. Gambar 3.5 menunjukkan hasil fabrikasi Turbin Heliks 9 foil beserta rangka.



Gambar 3.5 Hasil fabrikasi Turbin Heliks 9 foil beserta rangka

3.5 Pengujian dan Pengambilan Data

Eksperimen Turbin Heliks dengan variasi jumlah *foil* dilakukan di lokasi yang telah ditetapkan pada tahap Survei dan Penetapan Lokasi Pengujian. Pada tahap ini, pertama-tama dilakukan pemetaan awal kecepatan arus air menggunakan *current meter* di berbagai titik lokasi pengujian. Setelah didapatkan variasi kecepatan arus yang sesuai pada lokasi pengujian tertentu, kemudian seluruh bagian turbin beserta rangka dimasukkan dalam arus air. Setelah turbin dimasukkan dalam arus air, kembali dilakukan pengambilan data kecepatan arus dengan *current meter*. Hal ini dilakukan untuk memastikan kecepatan arus setelah turbin dimasukkan apakah masih sesuai dengan kecepatan arus sebelum turbin dimasukkan dalam arus air.

Data kecepatan arus yang digunakan ialah kecepatan arus didepan turbin setelah turbin dimasukkan dalam saluran. *Current meter* ditempatkan 0,5 meter didepan rangka turbin, lalu dilakukan pengambilan data kecepatan arus sebanyak 30 data. Sebanyak 30 data dari 1 titik pengujian diambil nilai rata-ratanya. Cara yang sama juga diterapkan untuk titik lokasi pengujian yang lain, hingga didapatkan 3 variasi kecepatan arus. Pada 1 variasi kecepatan arus memerlukan 30 data, maka total terdapat 90 data kecepatan arus. Data-data kecepatan arus dapat dilihat pada bagian lampiran. Gambar 3.6 merupakan *current meter* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.



Gambar 3.6 *Current meter*

Setelah itu, dilakukan pengambilan data torsi turbin pada azimuth (Θ) 0° , 90° , 120° , 180° , dan 240° menggunakan *torque wrench* saat turbin belum berputar. *Torque wrench* akan membaca torsi *start* / torsi statis dari turbin dalam satuan Nm. Masing-masing azimuth dilakukan pengambilan data torsi sebanyak 10 data. Sehingga pada satu variasi kecepatan arus didapatkan total sebanyak 50 data torsi. Data torsi selengkapnya dapat dilihat pada bagian lambiran. Gambar 3.7 merupakan *torque wrench* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini.



Gambar 3.7 *Torque wrench*

Kemudian, dilakukan pengambilan data kecepatan sudut turbin saat turbin berputar menggunakan *tachometer*. *Tachometer* akan membaca kecepatan sudut turbin dalam satuan RPM (*rotation per minute*). Gambar 3.8 merupakan *tachometer* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini. Pengambilan data kecepatan sudut dilakukan sebanyak 30 data pada satu variasi kecepatan arus. Data kecepatan sudut selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran. Pengambilan data torsi dan kecepatan sudut selanjutnya juga dilakukan dengan cara yang sama, hingga didapatkan 150 data torsi (masing-masing kecepatan arus 50 data) dan 90 data kecepatan sudut turbin (masing-masing kecepatan arus 30 data).



Gambar 3.8 *Tachometer*

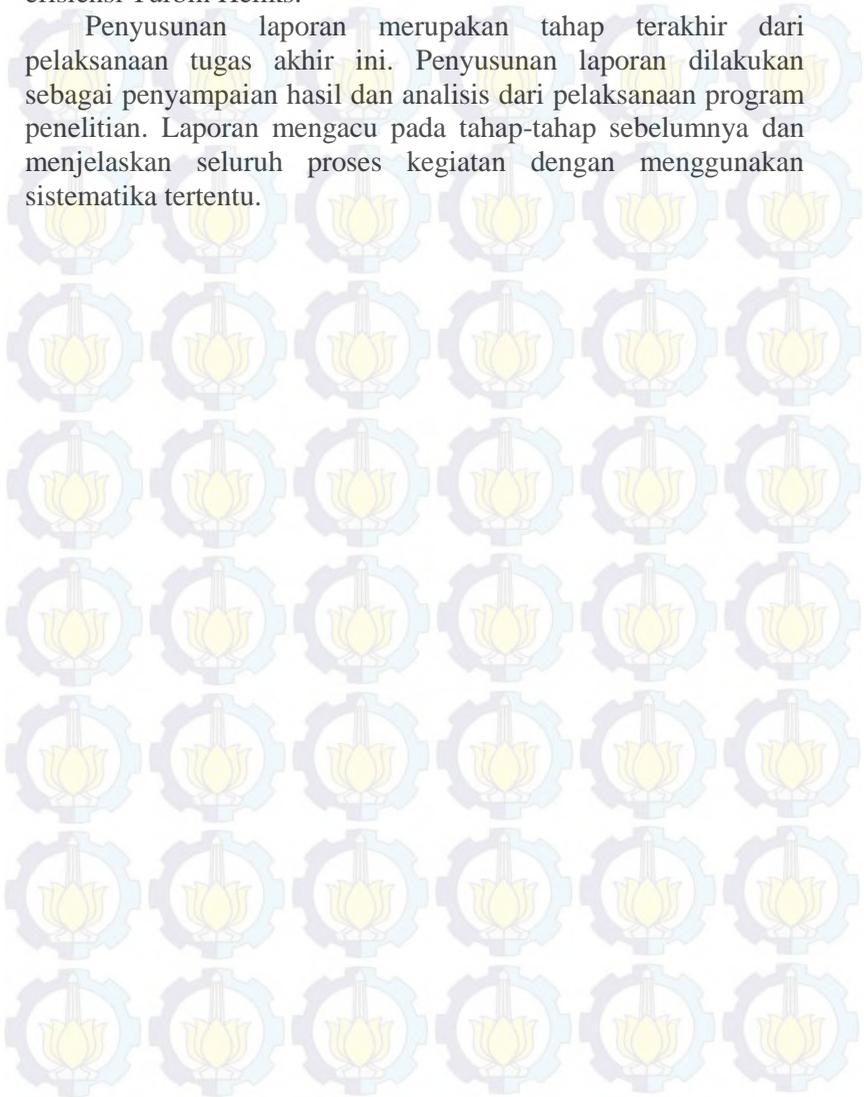
3.6 Analisis dan Pembahasan serta Penyusunan Laporan

Pada tahap ini, data-data yang telah terkumpul diolah lebih lanjut dalam bentuk tabel dan grafik. Nilai kecepatan arus sebanyak 30 data pada 1 titik lokasi pengujian dihitung nilai rata-ratanya. Demikian pula untuk 2 titik lokasi pengujian yang lain. Nilai torsi sebanyak 50 data dan nilai kecepatan sudut sebanyak 30 data pada 1 variasi kecepatan arus (1 lokasi) diambil nilai rata-ratanya. Demikian pula untuk nilai torsi dan kecepatan sudut pada 2 variasi kecepatan arus yang lain.

Kemudian dilakukan analisis untuk mengetahui pengaruh jumlah *foil* terhadap daya mekanik dan efisiensi Turbin Heliks *Cascade Foil* pada 3 variasi kecepatan arus. Sampai tahap ini,

didapatkanlah jumlah *foil* yang optimal untuk meningkatkan efisiensi Turbin Heliks.

Penyusunan laporan merupakan tahap terakhir dari pelaksanaan tugas akhir ini. Penyusunan laporan dilakukan sebagai penyampaian hasil dan analisis dari pelaksanaan program penelitian. Laporan mengacu pada tahap-tahap sebelumnya dan menjelaskan seluruh proses kegiatan dengan menggunakan sistematika tertentu.



BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

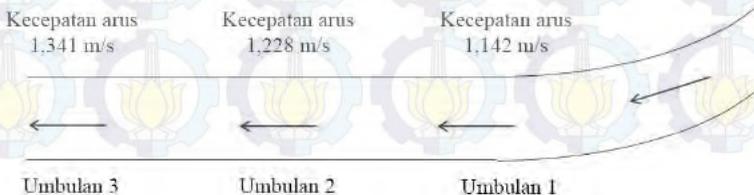
4.1 Analisis Data

Data yang diperoleh dalam penelitian ini ialah kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) dari 3 variasi jumlah *foil* (Turbin Heliks 3 *foil*, 6 *foil*, dan 9 *foil*) pada 3 variasi kecepatan arus (V). Terdapat 3 variasi kecepatan arus dan 3 variasi jumlah *foil*, sehingga keseluruhan didapatkan 9 variasi penelitian.

Masing-masing variasi telah dilakukan pengambilan data kecepatan sudut (ω) dan torsi (T). Pada setiap variasi kecepatan arus (V), telah dilakukan pengambilan data sebanyak 30 data kecepatan sudut (ω) dan 50 data torsi (T) untuk kemudian masing-masing diambil nilai rata-ratanya. Sebanyak 50 data torsi (T) diambil dari 5 azimuth (0° , 90° , 120° , 180° , dan 270°), dimana masing-masing azimuth diambil 10 data.

4.1.1 Kecepatan arus (V)

Lokasi pengujian, seperti pada gambar 4.1, terdapat 3 titik yang memiliki kecepatan arus yang berbeda-beda, yaitu di Umbulan 1, Umbulan 2, dan Umbulan 3. Masing-masing titik telah dilakukan pengambilan 30 data. Data selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran. Tabel 4.1 menunjukkan rata-rata kecepatan arus di setiap titik pengambilan data serta Reynold number turbin dalam Tugas Akhir ini. Reynold number turbin diperoleh menggunakan persamaan 2.14. Diameter turbin ialah 0,8 m, sedangkan viskositas kinematik ialah sebesar $8,96 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ (Fox, 2011).



Gambar 4.1 Lokasi pengujian

Tabel 4.1 Rata-rata kecepatan arus (V) dan Reynold number turbin

Lokasi	Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Reynold number turbin
Umbulan 1	1,142 m/s	1.019.643
Umbulan 2	1,228 m/s	1.096.429
Umbulan 3	1,341 m/s	1.197.321

4.1.2 Kecepatan Sudut (ω) dan Torsi (T)

Pada setiap variasi kecepatan arus dan variasi jumlah *foil*, telah dilakukan pengambilan data kecepatan sudut dan torsi turbin. Data selengkapnya dapat dilihat pada bagian lampiran. Tabel 4.2, 4.3, dan 4.4 menunjukkan rata-rata kecepatan sudut (ω) dan rata-rata torsi (T) pada beberapa kecepatan arus (V) dan variasi jumlah *foil*.

Tabel 4.2 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Heliks 3 *foil*

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	Rata-rata kecepatan sudut (rad/s)	Rata-rata Torsi (Nm)
1,142	78.180	8.185	8.834
1,228	86.607	9.068	9.736
1,341	90.263	9.451	11.004

Tabel 4.3 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Heliks 6 *foil*

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	Rata-rata kecepatan sudut (rad/s)	Rata-rata Torsi (Nm)
1,142	67.753	7.094	11.826
1,228	78.640	8.234	12.512
1,341	83.603	8.753	13.342

Tabel 4.4 Rata-rata kecepatan sudut (ω) dan torsi (T) Turbin Heliks 9 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	Rata-rata kecepatan sudut (rad/s)	Rata-rata Torsi (Nm)
1,142	64.067	6.708	14.124
1,228	73.577	7.703	14.822
1,341	78.440	8.213	16.264

4.1.3 Tip Speed Ratio (TSR) dan Coefficient of Torque (Ct)

Nilai *Tip Speed Ratio* (TSR) dianalisis menggunakan persamaan 2.9. Nilai rata-rata kecepatan sudut (ω) yang digunakan ialah kecepatan sudut dalam satuan rad/s. Adapun jari-jari turbin (R) dalam Tugas Akhir ialah 0,4 m.

Nilai *Coefficient of Torque* (Ct) dianalisis menggunakan persamaan 2.10. Diasumsikan air tempat pengujian memiliki temperatur 25 °C, maka densitas air (ρ) yang digunakan dalam Tugas Akhir ini ialah sebesar 997 kg/m³ (Fox, 2011). Area sapuan turbin (A) merupakan perkalian antara diameter dengan tinggi turbin, yaitu sebesar 0,64 m². Tabel 4.5, 4.6, dan 4.7 menunjukkan TSR dan Ct pada beberapa kecepatan arus (V) dan variasi jumlah foil.

Tabel 4.5 TSR dan Ct dari Turbin Heliks 3 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	TSR	Ct
1,142	2.867	0.053
1,228	2.954	0.051
1,341	2.819	0.048

Tabel 4.6 TSR dan Ct dari Turbin Heliks 6 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	TSR	Ct
1,142	2.485	0.071
1,228	2.682	0.065
1,341	2.611	0.058

Tabel 4.7 TSR dan Ct dari Turbin Heliks 9 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	TSR	Ct
1,142	2.349	0.085
1,228	2.509	0.077
1,341	2.450	0.071

4.1.4 Daya mekanik (P) dan Efisiensi

Daya mekanik dianalisis menggunakan persamaan 2.11, dimana daya mekanik (P) merupakan perkalian antara kecepatan sudut (ω) dalam satuan rad/s dengan torsi (T) dalam satuan Nm. Sedangkan efisiensi dianalisis menggunakan persamaan 2.13. Tabel 4.8, 4.9, dan 4.10 menunjukkan daya mekanik (P) dan efisiensi (η) turbin pada beberapa kecepatan arus.

Tabel 4.8 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Heliks 3 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Daya mekanik (watt)	Efisiensi (%)
1,142	72.310	15.218
1,228	88.283	14.943
1,341	103.994	13.517

Tabel 4.9 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Heliks 6 foil

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Daya mekanik (watt)	Efisiensi (%)
1,142	83.891	17.655
1,228	103.019	17.437
1,341	116.786	15.180

Tabel 4.10 Daya mekanik (P) dan Efisiensi (η) Turbin Heliks 9 *foil*

Rata-rata kecepatan arus (m/s)	Daya mekanik (watt)	Efisiensi (%)
1,142	94.741	19.939
1,228	114.181	19.327
1,341	133.571	17.361

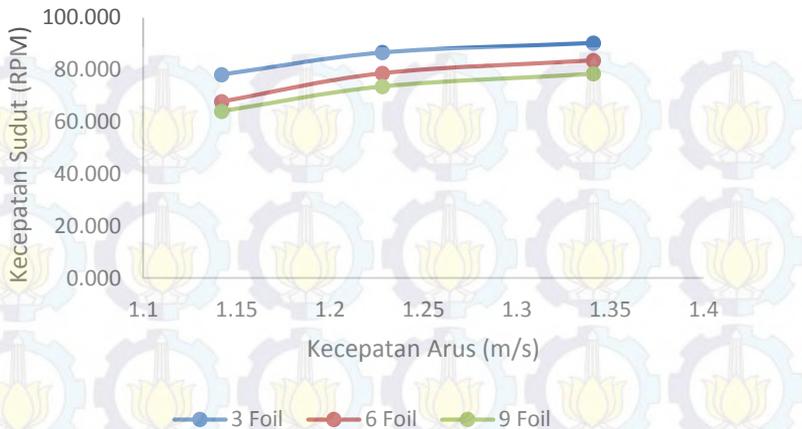
4.2 Pengaruh Kecepatan Arus terhadap Beberapa Variabel

Variabel bebas (variabel *independent*) dalam Tugas Akhir ini adalah variasi kecepatan arus (1,142 m/s, 1,228 m/s, dan 1,341 m/s) dan variasi jumlah *foil* (Turbin Heliks 3 *foil*, Turbin Heliks 6 *foil*, dan Turbin Heliks 9 *foil*). Variabel kontrol dalam Tugas Akhir ini terkait dengan parameter desain turbin, yaitu dimensi turbin (diameter dan tinggi), jumlah lengan turbin, diameter *shaft*, tipe *foil*, panjang *chord*, penempatan *foil* 1,2,3, dan kemiringan *foil* 1,2,3 seperti pada tabel 3.1. Parameter desain turbin tersebut harus dijaga / dikontrol sama untuk semua variasi jumlah *foil* turbin yang diteliti, baik pada Turbin Heliks 3 *foil*, 6 *foil* maupun 9 *foil*. Sedangkan variabel terikat (variabel *dependent*) dalam Tugas Akhir ini terkait dengan output turbin yaitu kecepatan sudut, torsi, TSR, Ct, daya mekanik, dan efisiensi turbin.

Berdasarkan pengambilan dan pengolahan data yang telah dilakukan dapat diketahui pengaruh kecepatan arus terhadap kecepatan sudut, TSR, torsi, Ct, daya mekanik, dan efisiensi pada berbagai variasi jumlah *foil*.

4.2.1 Kecepatan arus (V) terhadap Kecepatan Sudut (ω) dan Tip Speed Ratio (TSR)

Kecepatan sudut merupakan banyaknya putaran turbin dalam satuan waktu tertentu. Kecepatan sudut turbin dapat dinyatakan dalam satuan RPM (*rotation per minute*) atau rad/s. Gambar 4.2 merupakan grafik hubungan antara kecepatan arus terhadap kecepatan sudut turbin dalam satuan RPM.

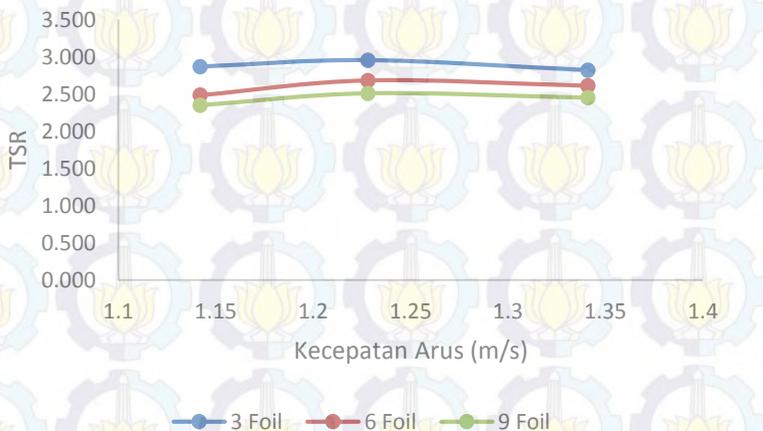


Gambar 4.2 Pengaruh kecepatan arus terhadap kecepatan sudut

Berdasarkan grafik pada gambar 4.2, hubungan antara kecepatan sudut dan kecepatan arus ialah sebanding. Semakin tinggi kecepatan arus, maka kecepatan sudut turbin juga akan semakin tinggi. Turbin Heliks 3 *foil* memiliki RPM tertinggi pada ketiga variasi kecepatan arus, disusul oleh Turbin Heliks 6 *foil*, kemudian 9 *foil*. Kecepatan sudut tertinggi sebesar 90,263 RPM didapatkan pada kecepatan arus 1,341 m/s oleh Turbin Heliks 3 *foil*. Kecepatan sudut Turbin Heliks 6 *foil* dan 9 *foil* pada ketiga variasi kecepatan arus memiliki perbedaan yang tidak terlalu signifikan. Peningkatan kecepatan arus berpengaruh positif terhadap kecepatan sudut, sedangkan penambahan jumlah *foil* berpengaruh negatif terhadap kecepatan sudut.

Analisis berikutnya ialah *Tip Speed Ratio* (TSR). Variabel TSR masih berhubungan dengan kecepatan sudut. TSR adalah perbandingan antara kecepatan tangensial *foil* dengan kecepatan arus. TSR menyatakan besarnya kecepatan sudut suatu turbin relatif terhadap kecepatan arus tertentu. Atau dengan kata lain, TSR menyatakan seberapa cepat turbin berputar terhadap kecepatan arus tertentu.

Tip Speed Ratio (TSR) merupakan variabel *non-dimensional*. Berdasarkan variabel ini, peneliti dapat membandingkan besarnya kecepatan sudut (relatif terhadap kecepatan arus) satu turbin dengan turbin yang lain, walaupun tipe dan dimensi turbin yang dibandingkan berbeda satu sama lain. Atau dengan kata lain variabel TSR merupakan variabel yang *comparable* untuk membandingkan besarnya kecepatan sudut relatif terhadap kecepatan arus satu turbin dengan turbin yang lain. Gambar 4.3 berikut menunjukkan pengaruh kecepatan arus terhadap TSR.



Gambar 4.3 Pengaruh kecepatan arus terhadap TSR

Dapat dilihat pada gambar 4.3 diatas bahwa TSR tertinggi didapatkan pada Turbin Heliks 3 foil, disusul oleh Turbin Heliks 6 foil dan Turbin Heliks 9 foil. Pada berbagai kecepatan arus, Turbin Heliks 3, 6 dan 9 foil memiliki nilai TSR yang relatif stabil. Pada Turbin Heliks 3 foil, TSR tertinggi didapatkan pada kecepatan arus 1,228 m/s. Demikian pula pada Turbin Heliks 6 foil dan 9 foil, TSR tertinggi juga didapatkan pada kecepatan arus 1,228 m/s.

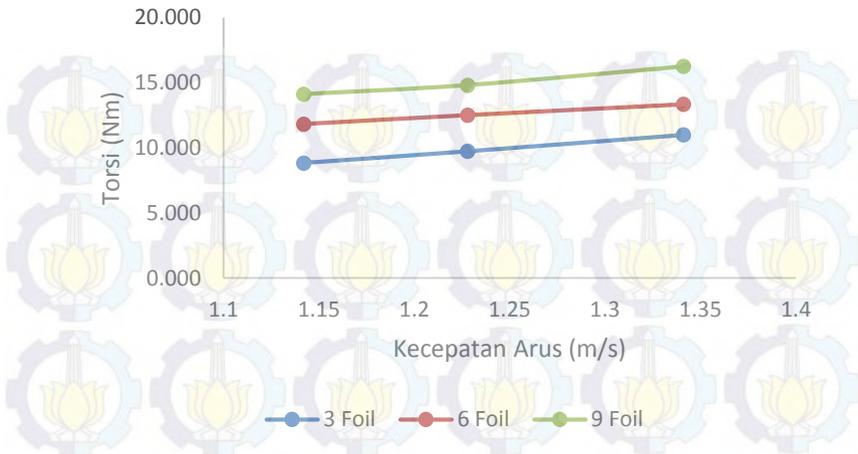
Pengaruh kecepatan arus terhadap nilai TSR lebih kecil daripada pengaruh jumlah foil terhadap nilai TSR. Atau

dengan kata lain, jumlah *foil* pada Turbin Heliks *Cascade* lebih berpengaruh terhadap TSR daripada kecepatan arus.

Penambahan *foil* dalam satu lengan turbin mengakibatkan massa / beban yang diterima oleh turbin saat berputar akan meningkat atau biasa disebut dengan momen inersia. Momen inersia terdiri dari variabel massa (kg) dan jari-jari (m). Turbin Heliks 3, 6, dan 9 *foil* memiliki jari-jari yang sama. Sehingga variabel yang membedakan diantara ketiganya ialah massa. Massa turbin akan meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *foil*. Sehingga Turbin Heliks 9 *foil* memiliki momen inersia (beban saat berputar) yang lebih tinggi daripada Turbin Heliks 6 *foil* dan 3 *foil*. Oleh karena itu, Turbin Heliks 9 *foil* memiliki kecepatan sudut dan TSR yang paling rendah diantara ketiga variasi turbin yang lainnya.

4.2.2 Kecepatan arus (V) terhadap Torsi (T) dan Coefficient of Torque (Ct)

Torsi turbin merupakan perkalian antara gaya dengan jari-jari turbin. Semakin besar gaya dan/atau jari-jari turbin, maka semakin besar torsi yang didapatkan. Torsi dapat pula dinyatakan sebagai kekuatan turbin dalam berputar. Dalam aplikasi desain turbin hidrokinetik, torsi turbin dapat ditingkatkan dengan cara memperbesar dimensi turbin, baik jari-jari maupun tinggi turbin. Akan tetapi, besarnya dimensi turbin juga harus memperhatikan kecepatan arus air yang tersedia. Gambar 4.4 merupakan grafik hubungan antara kecepatan arus terhadap torsi turbin.



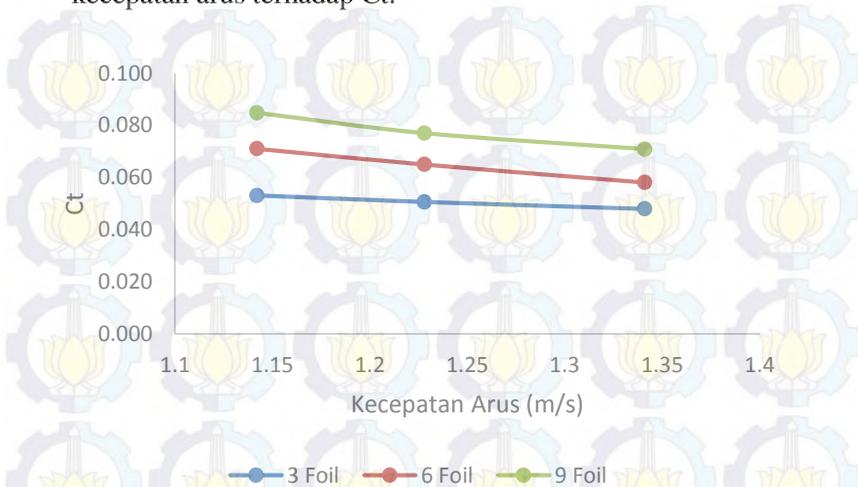
Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan arus terhadap torsi

Data torsi yang ditunjukkan pada gambar 4.4 merupakan data rata-rata torsi pada azimuth 0° , 90° , 120° , 180° , dan 240° . Dapat dilihat pada gambar 4.4, hubungan antara kecepatan arus dan torsi turbin ialah sebanding. Semakin tinggi kecepatan arus, maka torsi turbin akan semakin tinggi. Turbin Heliks 9 foil memiliki torsi tertinggi pada semua variasi kecepatan arus disusul oleh Turbin Heliks 6 foil dan Turbin Heliks 3 foil. Peningkatan jumlah foil dan kecepatan arus berpengaruh positif terhadap torsi Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil.

Analisis berikutnya ialah *Coefficient of Torque* (C_t). Variabel C_t masih berhubungan dengan torsi. Seperti TSR, variabel C_t juga merupakan variabel *non-dimensional*. C_t adalah koefisien yang menyatakan besarnya torsi suatu turbin terhadap kecepatan arus tertentu.

Berdasarkan koefisien ini, peneliti dapat membandingkan besarnya torsi satu turbin dengan turbin yang lain, walaupun tipe dan dimensi turbin yang dibandingkan berbeda satu sama lain. Atau dengan kata lain variabel C_t merupakan variabel yang *comparable* untuk membandingkan besarnya torsi satu turbin dengan turbin

yang lain. Gambar 4.5 berikut menunjukkan pengaruh kecepatan arus terhadap C_t .



Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan arus terhadap C_t

Berdasarkan grafik 4.5 diatas, C_t tertinggi didapatkan pada Turbin Heliks 9 foil, disusul oleh Turbin Heliks 6 foil dan Turbin Heliks 3 foil. Pada berbagai kecepatan arus, Turbin Heliks 3 foil memiliki nilai C_t yang relatif stabil. Pada Turbin Heliks 9 foil, C_t tertinggi didapatkan pada kecepatan arus 1,142 m/s. Demikian pula pada Turbin Heliks 6 foil dan 9 foil, C_t tertinggi juga didapatkan pada kecepatan arus 1,142 m/s. Pengaruh kecepatan arus terhadap nilai C_t lebih besar daripada pengaruh jumlah foil terhadap nilai C_t . Atau dengan kata lain, kecepatan arus lebih berpengaruh terhadap C_t Turbin Heliks Cascade daripada jumlah foil.

Pengaruh penambahan foil terhadap nilai C_t sebanding dengan pengaruh penambahan foil terhadap nilai torsi. Akan tetapi pengaruh penambahan kecepatan arus terhadap nilai C_t tidak sebanding dengan pengaruh penambahan kecepatan arus terhadap nilai torsi. Hal ini disebabkan C_t merupakan sebuah koefisien dimana nilai torsi dibandingkan dengan kecepatan arus (berhubungan dengan besarnya kecepatan arus).

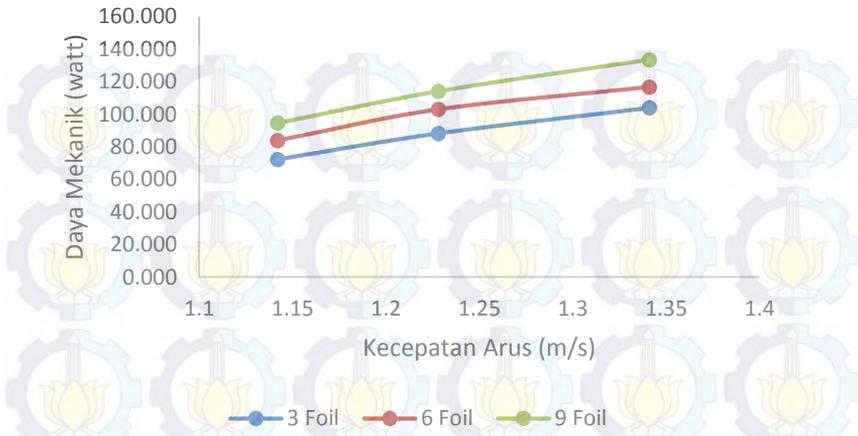
Sedangkan nilai torsi (T) merupakan nilai murni hasil pengukuran, tidak dibandingkan dengan kecepatan arus (tidak berhubungan dengan besarnya kecepatan arus). Sehingga *trending* kecepatan arus terhadap torsi berbeda dengan *trending* kecepatan arus terhadap Ct .

Turbin Heliks 9 *foil* memiliki torsi dan Ct paling tinggi diantara Turbin Heliks 6 dan 3 *foil* pada ketiga variasi kecepatan arus. Turbin Heliks 9 *foil* memiliki momen inersia lebih tinggi daripada Turbin Heliks 6 *foil* dan 3 *foil*. Secara umum dalam Tugas Akhir ini, peningkatan massa yang berdampak pada peningkatan momen inersia turbin menyebabkan peningkatan torsi dan Ct pada ketiga variasi kecepatan arus.

Turbin Heliks merupakan *lift device*, yaitu turbin yang memanfaatkan gaya *lift* untuk berputar. Gaya tangensial pada turbin *lift device* lebih besar dihasilkan oleh gaya *lift* daripada gaya *drag*. Total gaya tangensial pada *foil / blade* turbin menghasilkan torsi positif dan daya (Niblick, 2012). Gaya *lift* dihasilkan oleh *foil / blade*. Penambahan *foil* menyebabkan bertambahnya gaya *lift* yang bekerja pada turbin. Turbin Heliks 9 *foil* memiliki lebih banyak *foil*, sehingga memberikan gaya *lift* lebih besar dibandingkan dengan Turbin Heliks 6 dan 3 *foil*. Gaya *lift* yang lebih besar menyebabkan Turbin Heliks 9 *foil* juga memiliki torsi dan Ct lebih tinggi.

4.2.3 Kecepatan arus (V) terhadap Daya mekanik (P) dan Efisiensi

Daya mekanik merupakan perkalian antara kecepatan sudut (rad/s) dengan torsi (Nm). Semakin besar daya mekanik suatu turbin, maka potensi daya listrik yang dapat dihasilkan juga semakin besar. Gambar 4.6 merupakan grafik pengaruh kecepatan arus terhadap daya mekanik.



Gambar 4.6 Pengaruh kecepatan arus terhadap daya mekanik

Gambar 4.6 diatas menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan arus terhadap daya mekanik adalah sebanding. Semakin tinggi kecepatan arus, maka daya mekanik yang dihasilkan juga semakin tinggi. Daya mekanik tertinggi, yaitu sebesar 133,571 watt dihasilkan oleh Turbin Heliks 9 foil pada kecepatan arus 1,341 m/s. Sementara itu, daya mekanik terendah, yaitu sebesar 72,31 watt dihasilkan oleh Turbin Heliks 3 foil pada kecepatan arus 1,142 m/s. Turbin Heliks 9 foil menghasilkan daya mekanik tertinggi pada berbagai kecepatan arus, disusul oleh Turbin Heliks 6 foil dan 3 foil.

Peningkatan jumlah foil dan kecepatan arus berpengaruh positif terhadap daya mekanik Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil. Hal ini disebabkan karena semakin tinggi kecepatan arus, maka daya input dari arus air juga semakin tinggi. Semakin tinggi daya input turbin, maka secara umum daya output / daya mekanik turbin juga semakin besar.

Turbin Heliks 9 foil memiliki daya mekanik dan torsi tertinggi karena memiliki momen inersia lebih tinggi daripada Turbin Heliks 6 foil dan 3 foil. Peningkatan momen inersia menyebabkan peningkatan torsi. Walaupun peningkatan

momen inersia ini menyebabkan kecepatan sudut turbin berkurang, tetapi peningkatan torsi memberikan dampak lebih positif terhadap daya mekanik.

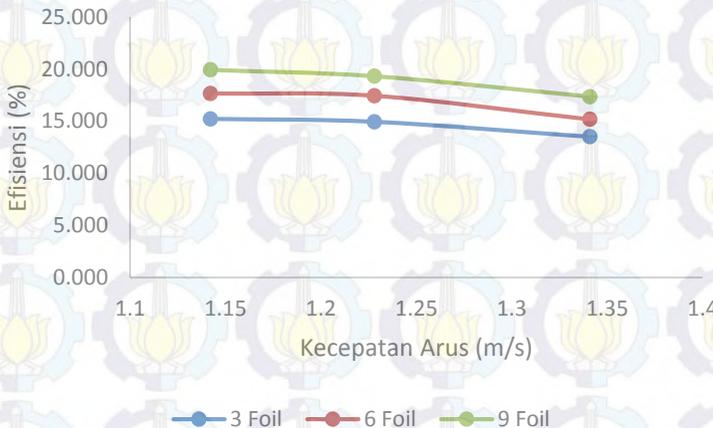
Selain itu, penambahan jumlah *foil* menyebabkan bertambahnya gaya *lift* yang bekerja pada turbin. Turbin Heliks 9 *foil* memiliki lebih banyak *foil*, sehingga memberikan gaya *lift* lebih besar dibandingkan dengan Turbin Heliks 6 dan 3 *foil*. Sehingga Turbin Heliks 9 *foil* memiliki daya mekanik lebih tinggi daripada Turbin Hecical 6 dan 3 *foil*.

Daya mekanik dipengaruhi oleh kecepatan sudut dan torsi. Pada kecepatan arus yang sama, peningkatan torsi dapat dilakukan dengan memperbesar dimensi turbin (diameter dan/atau tinggi turbin) dengan perbesaran tertentu. Akan tetapi, perbesaran dimensi turbin juga harus memperhatikan kecepatan arus air yang tersedia. Melalui Tugas Akhir ini, didapatkan bahwa peningkatan torsi dapat dilakukan dengan menambah jumlah *foil* dalam satu lengan yang sama tanpa memperbesar dimensi turbin. Peningkatan torsi mengakibatkan peningkatan daya mekanik. Sehingga didapatkanlah metode peningkatan daya mekanik dalam luas sapuan yang sama.

Analisis berikutnya ialah tentang efisiensi turbin. Efisiensi merupakan perbandingan antara daya mekanik (daya output turbin) dengan daya input arus air, dimana daya arus air sangat dipengaruhi oleh kecepatan arus (V). Efisiensi yang dimaksud pada Tugas Akhir ini ialah efisiensi mekanik dari turbin. Efisiensi menyatakan besarnya daya mekanik yang dapat dihasilkan oleh turbin terhadap daya arus air tertentu. Semakin besar efisiensi, maka semakin besar daya yang dapat dihasilkan / di-ekstraksi oleh turbin tersebut. Oleh karena itu, performansi turbin direpresentasikan dalam efisiensi. Semakin tinggi efisiensi turbin, maka performansi suatu turbin akan semakin baik.

Berdasarkan variabel ini, peneliti dapat membandingkan performansi satu turbin dengan turbin yang lain, walaupun

tipe dan dimensi turbin yang dibandingkan berbeda satu sama lain. Atau dengan kata lain, efisiensi merupakan variabel yang *comparable* untuk membandingkan besarnya performansi satu turbin dengan turbin yang lain. Gambar 4.7 adalah grafik pengaruh kecepatan arus terhadap efisiensi.



Gambar 4.7 Pengaruh kecepatan arus terhadap efisiensi

Berdasarkan gambar 4.7 diatas, pada berbagai kecepatan arus efisiensi tertinggi dihasilkan oleh Turbin Heliks 9 foil, disusul oleh Turbin Heliks 6 foil dan 3 foil. Efisiensi tertinggi sebesar 19,939 % didapatkan pada kecepatan arus 1,142 m/s oleh Turbin Heliks 9 foil. Sementara efisiensi terendah sebesar 13,517 % didapatkan pada kecepatan arus 1,341 m/s oleh Turbin Heliks 3 foil. Penambahan jumlah foil berpengaruh positif terhadap efisiensi Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil. Sedangkan peningkatan kecepatan arus berpengaruh negatif terhadap efisiensi Turbin Heliks 3, 6, dan 9 foil.

Hubungan antara kecepatan arus terhadap efisiensi adalah berbanding terbalik. Semakin tinggi kecepatan arus, maka efisiensi turbin 3, 6, dan 9 foil semakin rendah. Hal ini disebabkan karena peningkatan daya input tidak sebanding dengan daya output / daya mekanik yang dihasilkan oleh

turbin. Peningkatan kecepatan arus berdampak pada peningkatan daya input yang lebih besar daripada peningkatan daya mekanik. Secara teori bertambah besarnya kecepatan arus berbanding terbalik pangkat tiga terhadap efisiensi, sehingga efisiensi menurun lebih cepat secara eksponensial jika dibandingkan dengan peningkatan daya mekanik turbin (berupa torsi dan kecepatan sudut turbin).

Turbin Heliks 3, 6, dan 9 *foil* memiliki diameter dan tinggi yang sama, sehingga area sapuan ketiga turbin juga sama. Penambahan *foil* secara *cascade* dapat meningkatkan ekstraksi energi arus tanpa memperbesar dimensi turbin, sehingga didapatkan bahwa efisiensi Turbin Heliks 9 *foil* dan 6 *foil* (*cascade foil*) lebih tinggi dibandingkan dengan Turbin Heliks 3 *foil* (*non-cascade foil*).



“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut.

- a. Penambahan *foil* secara *cascade* dapat meningkatkan daya mekanik turbin dalam luas sapuan yang sama. Pada kecepatan arus 1,341 m/s, Turbin Heliks 3, 6, dan 9 *foil* menghasilkan daya mekanik secara berturut-turut sebesar 104 watt, 116,8 watt, dan 133,6 watt. Turbin Heliks 9 *foil* memiliki daya mekanik dan torsi tertinggi karena memiliki momen inersia dan gaya *lift* lebih tinggi daripada Turbin Heliks 6 *foil* dan 3 *foil*.
- b. Penambahan *foil* secara *cascade* dapat meningkatkan efisiensi Turbin Heliks. Pada kecepatan arus 1,142 m/s, Turbin Heliks 3, 6, dan 9 *foil* menghasilkan efisiensi secara berturut-turut sebesar 15,2 %, 17,6 %, dan 19,9 %. Penambahan *foil* secara *cascade* dapat meningkatkan ekstraksi energi arus air tanpa memperbesar dimensi turbin.

5.2 Saran

Berikut adalah saran yang diberikan oleh peneliti untuk penelitian selanjutnya dalam topik ini.

- a. Pengujian perlu dilakukan pada variasi kecepatan arus air yang lain.
- b. Perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui daya elektrik yang dibangkitkan melalui *pulley* / gearbox dan generator
- c. Perlu dilakukan analisis pengaruh massa jenis dari material *foil* turbin terhadap efisiensi / C_p yang dihasilkan oleh Turbin Hidrokinetik



“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, John, 2011. "Design and Manufacture of a Cross-Flow Helical Tidal Turbine", Capstone Project Report.
- Andrianto, M.W, 2009. "Studi Teknis Pemilihan Turbin Kobold pada Pembangkit Listrik Tenaga Arus Bawah Laut di Selat Madura", Tugas Akhir Jurusan Teknik Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Bachant, P., Wosnik, M., 2014. "Performance Measurements of Cylindrical- and Spherical-Helical Cross-Flow Marine Hydrokinetic Turbines, with Estimates of Exergy Efficiency", *Renewable Energy*, 74:318.
- Fox & McDonald's, 2011. *Introduction to Fluid Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- Gorban, A.N. & Gorlov, A., 2001. "Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow," *Journal of Energy Resources Technology*, 123:317.
- Gorlov, A., 1998. "Development of Helical Reaction Hydraulic Turbine", Technical Report, MIME Department of Northeast University.
- Han, Sang-Hun, et al, 2013. "Evaluation of Vertical Axis Turbine Characteristics for Tidal Current Power Plant Based on In Situ Experiment", *Ocean Engineering*, 65:83-89.
- Hantoro, R., et al, 2011. "An Experimental Investigation of Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine", *ITB J.Eng.Sci.*, 43:27-40.
- Jing, Fengmei, et al, 2014. "Experimental Research on Tidal Current Vertical Axis Turbine with Variable-Pitch Blades", *Ocean Engineering*, 88:228-241.
- Kadiman, Kusmayanto. 2006. *Buku Putih Penelitian, Pengembangan Dan Penerapan Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Energi Baru Dan Terbarukan Untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2005 - 2025*. Jakarta : Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia.

- Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaicoe, J.E., 2009. "Hydrokinetic Energy Conversion Systems and Assessment of Horizontal and Vertical Axis Turbine For River and Tidal Applications a Technology Status View", *Applied Energy*, 86:1823–1835.
- Lazauskas, L. & Kirke, B.K., 2012. "Modeling passive variable pitch cross flow hydrokinetic turbines to maximize performance and smooth operation", *Renewable Energy*, 45:41-50.
- Mohamed, M. H., 2012. "Performance Investigation of H-rotor Darrieus Turbine with New Airfoil Shapes", *Energy*, 47:522-530.
- Munson, Bruce R., Donald F. Young, and Theodore H., Okiishi. 2002. *Fundamental of Fluids Mechanic* 2nd edition. Canada : John Wiley & son, Inc.
- Niblick, A.L., 2012. "Experimental and Analytical Study of Helical Cross-Flow Turbines for a Tidal Micropower Generation System", Master of Science, University of Washington.
- Roy, Sukanta & Saha, Ujjwal K., 2015. "Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine", *Applied Energy*, 137:117-125.
- Samaraweera, Pathirathna, De Silva, Sugathapala, 2010. "Development of Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine for Stand-Alone Applications", *International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE)*. Kandy, 13-14 December.
- Setiaji, A.S., 2011. "Studi Numerik dan Eksperimental Performansi Turbin Vertikal Aksis Arus Sungai dengan Variasi Seri Airfoil dan Panjang Chord", Tugas Akhir Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Shiono, M., et al, 2002. "Output Characteristics of Darrieus Water Turbine with Helical Blades for Tidal Current Generations", *Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Jepang, 26–31 Mei. Kitakyushu : The International Society of Offshore and Polar Engineers.

- Tjiu, W., et al, 2013. "Initial Investigation on Movable-Fins Vertical Axis Wind Turbine", Latest Trends in Renewable Energy and Environmental Informatics.
- Tsai, J.S. & Chen, F., 2014. "The Conceptual Design of a Tidal Power Plant in Taiwan", Marine Science and Engineering, 2:506-533.
- Wright, C.R. & Hansen, M.C., 2011. "Optimization of Helical Turbine in Low Head Applications", Master of Science, The University of Utah.
- Ye Li, & Caisal, Sander M., 2010. "Three-Dimensional Effects and Arm Effects on Modeling a Vertical Axis Tidal Current Turbine", Renewable Energy, 35:2325-2334.
- Yuniarso, R.G.K & Sudargana, 2012. "Analisa Perancangan Turbin Darrieus pada Hydrofoil NACA 0015 dari Karakteristik CL dan CD pada Variasi Sudut Serang Menggunakan Regresi Linier pada Matlab", Jurnal Rotasi Teknik Mesin Universitas Diponegoro, 14:21-28.
- Zobaa, A. F. & Bansal, R. 2011. Handbook of Renewable Energy Technology. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.



LAMPIRAN A

Data Kecepatan Arus

Lokasi	Umbulan 1			Umbulan 2			Umbulan 3		
Kecepatan Arus (m/s)	1.139	1.167	1.131	1.232	1.228	1.231	1.433	1.341	1.317
	1.216	1.148	1.101	1.215	1.217	1.279	1.312	1.312	1.318
	1.143	1.145	1.141	1.212	1.135	1.212	1.324	1.317	1.328
	1.167	1.123	1.144	1.223	1.318	1.232	1.381	1.402	1.326
	1.143	1.138	1.132	1.244	1.289	1.212	1.421	1.345	1.303
	1.175	1.178	1.136	1.129	1.202	1.268	1.347	1.337	1.314
	1.174	1.122	1.135	1.231	1.265	1.235	1.426	1.324	1.337
	1.113	1.143	1.118	1.214	1.229	1.318	1.306	1.312	1.355
	1.126	1.138	1.131	1.143	1.272	1.235	1.376	1.378	1.318
	1.146	1.146	1.108	1.166	1.234	1.208	1.312	1.311	1.302
Rata-rata (m/s)	1.142			1.228			1.341		

LAMPIRAN B-1

Data kecepatan sudut Turbin Helical 3 foil pada kecepatan arus 1,142 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	78.8	75.2	77.8
	77.4	75.2	79.1
	78.7	75.5	79.7
	78.4	76.9	80
	77.8	76.1	80.2
	77.1	77.9	83.1
	76.7	77.9	79
	77.1	76.5	79.8
	77.1	76.5	84.2
	77.2	79.8	78.7
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	78.18		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	84.2		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	75.2		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 6 foil pada kecepatan arus 1,142 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	69.9	67.9	68.2
	68.3	67.5	67.8
	70.9	66.8	67.9
	68.8	66.9	67.8
	68.1	66.1	68.3
	68.3	65.9	68.7
	68.3	64.8	68.1
	67.9	65.9	67.7
	67.5	67.1	68
	67.1	67.8	68.3
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	67.75333333		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	70.9		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	64.8		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 9 foil pada kecepatan arus 1,142 m/s

	63.1	63.2	64.6
	63.4	63.1	65.1
	63.7	63.3	64.9
	65	62.8	64.4
	64.5	63	64.2
	64.3	64.5	64.1
	63.2	65.1	63.9
	63	65.3	63.8
	63.5	65	65.3
	63.8	64.7	64.2
Kecepatan sudut (RPM)			
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	64.06666667		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	65.3		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	62.8		

LAMPIRAN B-2

Data kecepatan sudut Turbin Helical 3 foil pada kecepatan arus 1,228 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	85.2	89.8	88.1
	86.4	86.9	88.6
	84.4	87.1	86
	88.2	86.5	85.2
	87.3	87.3	85.6
	88.1	84.2	84.4
	86.9	81.7	87.5
	88	87.4	87.4
	85.2	88	87
	87.2	85.8	86.8
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	86.60666667		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	89.8		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	81.7		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 6 foil pada kecepatan arus 1,228 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	76.9	78.8	79.8
	77.8	77.4	77.9
	79.3	78.1	76.2
	79.3	80.1	80.2
	77.7	78.3	78.8
	79.9	79.3	78
	80.1	79.9	78.1
	77.3	80.5	79.6
	78.7	80.3	77.3
	77.8	79.5	76.3
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	78.64		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	80.5		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	76.2		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 9 foil pada kecepatan arus 1,228 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	71.2	73.7	72.2
	71.9	74.3	73.9
	72.1	74.4	74.7
	73	73.4	75.3
	73.5	74.2	74.9
	73.6	75.1	73.3
	74.3	75.7	72.4
	73.7	73.8	73.4
	74.9	71.2	73.1
75.2	72.8	72.1	
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	73.5766667		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	75.7		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	71.2		

LAMPIRAN B-3

Data kecepatan sudut Turbin Helical 3 foil pada kecepatan arus 1,341 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	88.6	90.5	90.9
	90.2	90.6	90.4
	89.9	90.3	90.8
	91	91.2	91.3
	90.3	89.5	90.8
	88.6	89.9	91
	89.2	89.2	90.9
	89.7	90.2	91.3
	90	89.1	91
	90.4	90.6	90.5
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	90.26333333		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	91.3		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	88.6		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 6 foil pada kecepatan arus 1,341 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	84.5	83.1	83.2
	83.3	82.8	82.9
	83.3	84	83.5
	84.8	84.3	82.9
	84.7	82.6	83.1
	85.1	82.9	84.1
	84.6	83.4	83.6
	83.4	83.1	83.2
	83.3	83	83.7
	84.9	83.4	83.4
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	83.60333333		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	85.1		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	82.6		

Data kecepatan sudut Turbin Helical 9 foil pada kecepatan arus 1,341 m/s

Kecepatan sudut (RPM)	77.9	79.1	78.6
	79	78.9	78.3
	78.4	77.6	78.6
	78.1	77.6	79.2
	78.9	77.4	79.1
	78.3	78.4	79.1
	78.3	78.1	77.6
	78.1	78	79.1
	79.1	78.3	79.1
	79.1	78.3	77.6
Rata-rata kecepatan sudut (RPM)	78.44		
Nilai maksimum kecepatan sudut (RPM)	79.2		
Nilai minimum kecepatan sudut (RPM)	77.4		

LAMPIRAN C-1

Data torsi Turbin Helical 3 foil pada kecepatan arus 1,142 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	9.3	8.5	9.3	8.3	9.1
	9.1	8.7	8.9	8.1	9.2
	9.3	8.4	9	8.3	9
	9.4	8.7	9.3	7.8	9.1
	9.1	8.8	9.1	8.3	9
	9.2	8.5	9.3	8.2	9.5
	9.5	8.4	9.3	8	9.5
	9.2	8.2	8.7	8.3	9.4
	9	8.2	8.8	8.1	9.2
	9.2	8.4	9	8.2	9.3
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	9.23	8.48	9.07	8.16	9.23
Nilai torsi maksimum (Nm)	9.5	8.8	9.3	8.3	9.5
Nilai torsi minimum (Nm)	9	8.2	8.7	7.8	9
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	8.834				

Data torsi Turbin Helical 6 *foil* pada kecepatan arus 1,142 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	13.1	11.2	12.7	8.8	13.2
	13.2	10.6	13	9.1	13.3
	13.6	10.7	12.4	8.9	13.4
	13.3	10.6	13	9	13.5
	13.2	10.4	13.3	8.5	13
	13.6	10.5	12.9	8.6	12.9
	13.7	10.6	13.3	8.7	13.3
	13.5	11.1	12.6	8.8	13.4
	13.7	10.2	13.4	8.6	13.5
	13.6	10.1	13.5	8.7	13.5
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	13.45	10.6	13.01	8.77	13.3
Nilai torsi maksimum (Nm)	13.7	11.2	13.5	9.1	13.5
Nilai torsi minimum (Nm)	13.1	10.1	12.4	8.5	12.9
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	11.826				

Data torsi Turbin Helical 9 *foil* pada kecepatan arus 1,142 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	16.1	10	14.2	15.3	14.9
	16.3	10.4	14.6	15.2	14.5
	15.3	11.2	14.5	15.4	14.8
	15.6	10.5	14.4	15.5	14.4
	15.8	11	14.6	14.8	14.2
	16	10.8	14.2	15.3	14.5
	15.8	10.5	13.9	15.2	14.4
	15.9	10.6	14.3	15.1	14.7
	15.8	10.7	14.4	15.3	14.8
16.2	10.5	14.2	15.5	14.1	
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	15.88	10.62	14.33	15.26	14.53
Nilai torsi maksimum (Nm)	16.3	11.2	14.6	15.5	14.9
Nilai torsi minimum (Nm)	15.3	10	13.9	14.8	14.1
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	14.124				

LAMPIRAN C-2

Data torsi Turbin Helical 3 *foil* pada kecepatan arus 1,228 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	9.9	8.8	9.8	8.1	10.7
	10.1	9.7	10.3	8.2	10.8
	10.3	9.7	9.7	8.4	10.5
	10.4	9.6	9.6	9	10.2
	9.8	9.6	10.3	8.9	11.1
	10.5	9.9	9.8	8.7	10.2
	10.1	9.5	10.6	8.9	10.1
	10.6	8.9	10.5	8.5	10.2
	10.5	9.6	9.7	8.5	10.5
	9.7	9.2	10.2	8.1	10.3
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	10.19	9.45	10.05	8.53	10.46
Nilai torsi maksimum (Nm)	10.6	9.9	10.6	9	11.1
Nilai torsi minimum (Nm)	9.7	8.8	9.6	8.1	10.1
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	9.736				

Data torsi Turbin Helical 6 foil pada kecepatan arus 1,228 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	15.4	11.2	13.7	8.8	13.9
	15.2	11.1	13.4	9.2	13.6
	15.1	11.1	13.2	9.4	13.3
	15.2	10.8	12.7	9.1	13.4
	15.4	10.6	12.8	9.5	14.1
	15.1	10.8	12.3	9.3	14.7
	14.9	10.7	13.7	9.8	13.9
	14.8	10.9	13.6	9.5	14.5
	14.8	11.4	13.5	9.2	14.5
14.9	11	13.6	9.3	13.7	
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	15.08	10.96	13.25	9.31	13.96
Nilai torsi maksimum (Nm)	15.4	11.4	13.7	9.8	14.7
Nilai torsi minimum (Nm)	14.8	10.6	12.3	8.8	13.3
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	12.512				

Data torsi Turbin Helical 9 *foil* pada kecepatan arus 1,228 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	16.6	14.2	16.1	11.6	15.8
	16.9	13.8	15.7	11.2	15.6
	16.4	13.7	15.8	11.5	15.9
	16.8	13.5	16.2	10.9	16.2
	17.2	13.4	15.7	10.7	16.6
	16.9	13.8	16.4	11.1	16.5
	17.3	13.7	15.6	11.3	16.2
	17.1	14.1	16.4	11.2	16.4
	17.1	13.8	16.3	11.4	16.5
16.7	14.4	15.9	10.9	16.1	
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	16.9	13.84	16.01	11.18	16.18
Nilai torsi maksimum (Nm)	17.3	14.4	16.4	11.6	16.6
Nilai torsi minimum (Nm)	16.4	13.4	15.6	10.7	15.6
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	14.822				

LAMPIRAN C-3

Data torsi Turbin Helical 3 *foil* pada kecepatan arus 1,341 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	12.4	9.4	11.3	10.2	11.9
	12.3	9.7	12.1	10.1	11.7
	12.2	9.7	12.3	9.2	11.7
	11.8	9.9	11.7	9.4	12.4
	11.1	10.8	11.3	9.3	12.3
	11.6	10.6	11.5	8.9	12.1
	11.2	11	11.5	9.1	12.6
	11.5	10.2	11.6	9.5	12.5
	11.1	10.4	11.2	9.6	11.6
	11.6	10.1	10.8	9.6	12.6
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	11.68	10.18	11.53	9.49	12.14
Nilai torsi maksimum (Nm)	12.4	11	12.3	10.2	12.6
Nilai torsi minimum (Nm)	11.1	9.4	10.8	8.9	11.6
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	11.004				

Data torsi Turbin Helical 6 *foil* pada kecepatan arus 1,341 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	15.3	11.5	15.4	9.5	15.8
	15.4	11.2	15.1	9.4	15.2
	15.1	11.6	15.4	9.5	15.3
	14.8	11.1	14.7	10.1	15.4
	15.2	11.2	15.1	9.6	15.2
	15.8	11.3	15.3	9.8	14.8
	15.8	10.7	14.8	10.2	15.5
	15.7	10.9	15.1	10.1	15.3
	15.8	11.2	14.7	9.8	14.8
	15.6	10.9	14.9	10.3	14.9
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	15.45	11.16	15.05	9.83	15.22
Nilai torsi maksimum (Nm)	15.8	11.6	15.4	10.3	15.8
Nilai torsi minimum (Nm)	14.8	10.7	14.7	9.4	14.8
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	13.342				

Data torsi Turbin Helical 9 *foil* pada kecepatan arus 1,341 m/s

Azimuth (derajat)	0	90	120	180	240
Torsi (Nm)	17.7	14.7	17.2	12.1	17.4
	17.6	14.8	17.8	12.1	17.8
	17.9	14.6	17.9	12.2	17.8
	18.9	14.9	17.5	13.5	18.3
	18.3	13.8	17.7	13.7	17.9
	18.4	13.6	17.1	12.7	18.2
	18.5	14.2	17.8	12.1	18.6
	18.7	14.6	18.1	13.2	18.7
	18.5	14.2	18.6	12.4	18.5
18.8	14.9	18.4	12.1	18.2	
Rata-rata torsi per azimuth (Nm)	18.33	14.43	17.81	12.61	18.14
Nilai torsi maksimum (Nm)	18.9	14.9	18.6	13.7	18.7
Nilai torsi minimum (Nm)	17.6	13.6	17.1	12.1	17.4
Rata-rata torsi semua azimuth (Nm)	16.264				

LAMPIRAN F

Pengukuran kecepatan sudut turbin menggunakan Tachometer



Pengukuran torsi turbin menggunakan Torque wrench



BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Surabaya pada tanggal 11 Oktober 1993. Tamat SDN Dukuh Menanggal II/425 (2006), SMP Negeri 1 Surabaya (2009) dan SMA Negeri 5 Surabaya (2012). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan adalah Bidang

Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, serta Bidang Minat Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol. Selama menjadi mahasiswa, penulis bergabung dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu FUSI Ulul Albaab, Idjo Creative Crew dan *Zelena Electric Car*. Pada kegiatan akademik, penulis aktif sebagai asisten Laboraturium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Pengalaman *internship* yang dimiliki penulis dilakukan di PT. Filma Utama Soap. Pada program *internship* tersebut, penulis melakukan analisis efisiensi boiler. Korespondensi dengan penulis dapat dilakukan melalui alamat email abdiismail1993@gmail.com