



**TUGAS AKHIR TF 141581**

**RANCANG BANGUN TURBIN ARUS LAUT  
SUMBU VERTIKAL *STRAIGHT BLADE CASCADE*  
UNTUK MENGETAHUI PENGARUH VARIASI  
JUMLAH *BLADE* TERHADAP EFISIENSI TURBIN**

**SENO WIDYA MANGGALA**  
NRP. 2411 100 117

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

Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2016



FINAL PROJECT TF 141581

***DESIGN OF VERTICAL AXIS STRAIGHT BLADE  
CASCADE OCEAN CURRENTS TURBINE TO  
UNDERSTAND THE EFFECT OF BLADE  
VARIATION TOWARD TURBINE'S EFFICIENCY***

SENO WIDYA MANGGALA  
NRP. 2411 100 117

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

Department of Engineering Physics  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya  
2016

**RANCANG BANGUN TURBIN ARUS LAUT SUMBU  
VERTIKAL *STRAIGHT BLADE CASCADE* UNTUK  
MENGETAHUI PENGARUH VARIASI JUMLAH  
*BLADE* TERHADAP EFISIENSI TURBIN**

**TUGAS AKHIR**

Oleh:

**SENO WIDYA MANGGALA**  
**NRP: 2411 100 117**

**Surabaya, 21 Januari 2016**  
**Mengetahui/Menyetujui**

**Pembimbing I,**

**Pembimbing II,**

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

  
**Ir. Rockmono, M.T.**  
**NIPN. 19580908 198601 1 001**

**Ketua Jurusan**  
**Teknik Fisika FTI-ITS**

  
**Agus Muhammad Hatta, ST, MSi, Ph.D**  
**NIPN. 19780902 200312 1 002**

**RANCANG BANGUN TURBIN ARUS LAUT SUMBU  
VERTIKAL STRAIGHT BLADE CASCADE UNTUK  
MENGETAHUI PENGARUH VARIASI JUMLAH  
BLADE TERHADAP EFISIENSI TURBIN**

**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 :

**SENO WIDYA MANGGALA**  
NRP. 2411 100 117

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

 (Pembimbing I)

2. Ir. Roekmono, M.T.

 (Pembimbing II)

3. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.

 (Penguji I)

4. Ir. Matradji, M.Sc.

 (Penguji II)

5. Herry Sufyan Hadi, S.T., M.T.

 (Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI 2016**

**RANCANG BANGUN TURBIN ARUS LAUT SUMBU  
VERTIKAL *STRAIGHT BLADE CASCADE* UNTUK  
MENGETAHUI PENGARUH VARIASI JUMLAH  
*BLADE* TERHADAP EFISIENSI TURBIN**

**Nama** : Seno Widya Manggala  
**NRP** : 2411100117  
**Jurusan** : Teknik Fisika, FTI - ITS  
**Pembimbing I** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
**Pembimbing II** : Ir. Roekmono, M.T.

**Abstrak**— Telah dilakukan rancang bangun dan eksperimen tentang turbin sumbu vertikal dengan menggunakan perpaduan mekanisme fixed-pitch dan variabel passive-pitch yang disusun secara cascade untuk meningkatkan efisiensi turbin. Eksperimen ini dilakukan di Umbulan, Pasuruan, Jawa Timur. Tempat ini dipilih karena dapat merepresentasikan kecepatan aliran arus laut. Variasi kecepatan yang digunakan untuk eksperimen ini adalah 1.1 m/s, 1.2 m/s, 1.3 m/s dengan menggunakan variasi 3 jumlah *blade*, 6 jumlah *blade*, dan 9 jumlah *blade*. Hasil yang didapatkan dari eksperimen tersebut adalah nilai pengukuran RPM dan Torsi. Nilai rata – rata torsi maksimum ada di kecepatan 1.3 m/s pada variasi 9 *blade* dengan nilai torsi 31.21 Nm. Nilai RPM maksimum ada di kecepatan 1.3 m/s pada variasi 3 *blade* dengan nilai 68.4 RPM. Nilai terendah pengukuran RPM terletak di variasi 9 *blade* dengan kecepatan 1.1 m/s yaitu 57.4 RPM, sedangkan nilai torsi terendah terdapat di kecepatan aliran 1.1 m/s dengan variasi 3 *blade* dengan nilai torsi 16.56 Nm. Dari data hasil pengukuran tersebut dapat diketahui bahwa semakin meningkatnya kecepatan aliran akan berdampak pada peningkatan nilai RPM dan Torsi. Sebaliknya semakin banyak *blade* terpasang maka nilai RPM akan turun dan nilai Torsi



akan meningkat. Efisiensi turbin paling tinggi terjadi di kecepatan aliran 1.1 m/s dengan variasi 9 *blade* yakni 42%, dimana mengalami peningkatan 8% dari penelitian sebelumnya.

**Kata Kunci**— Energi Terbarukan, Turbin Sumbu Vertikal, *Darrieus*, Turbin *Cascade*, Efisiensi Turbin.

**DESIGN OF VERTICAL AXIS STRAIGHT BLADE  
CASCADE OCEAN CURRENTS TURBINE TO  
UNDERSTAND THE EFFECT OF BLADE VARIATION  
TOWARD TURBINE'S EFFICIENCY**

**Nama** : Seno Widya Manggala  
**NRP** : 2411100117  
**Department** : Engineering Physics, FTI,ITS  
**Lecture I** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
**Lecture II** : Ir. Roekmono, M.T.

**Abstract**— Prototype and experiment of cascade blade arrangement of fixed-pitch and passive variable pitch have been completed to increasing turbine's efficiency. The experiment has been tested at Umbulan, Pasuruan, East Java. This site has been chosen because the flow velocity could represent the sea current velocity. The used flow velocity were 1.1 m/s, 1.2 m/s, 1.3 m/s using variation of blade, there were 3 blades, 6 blades, and 9 blades. The obtained results are torque and RPM. The Maximum torque was 31.21 at 1.3 m/s with 9 blades. The Maximum RPM was 68.4 RPM at 1.3 m/s with 3 blades. The lowest measured RPM was 57.4 RPM at 9 blades and 1.1 m/s, whereas the lowest torque was 16.56 Nm at 1.1 m/s with 3 blade. Based on the experiment result, increasing value of flow velocity will rise the value of torque and RPM. Otherwise, if it uses more blades, it will decrease RPM and rise the torque. Turbine's efficiency reached at 1.1 m/s flow velocity with 9 blade installed at 42 which increases the efficiency 8% from the past research.

**Key Word** — Renewable Energy, Vertical axis Turbine, Darrieus, Cascade turbine, Turbine efficiency

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Rancang Bangun Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal *Straight Blade Cascade* untuk Mengetahui Pengaruh Variasi Jumlah Blade Terhadap Efisiensi Turbin**”. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Agus Muhamad Hatta, ST, MSi, Ph.D, selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS dan bapak Andi Rahmadiansyah, S.T, M.T., selaku dosen wali penulis yang telah sabar memberikan petunjuk, bimbingan, serta ilmu yang sangat bermanfaat.
2. Bapak Ir. Eko isdyanto dan Ibu Tjahyani, S.Pd selaku orang tua yang selalu memberi motivasi dalam pengerjaan Tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST, MT. dan bapak Ir. Roekmono, M.T. Selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan motivasi, bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Ir. Sarwono, MM., Selaku kepala Laboratorium Rekayasa Energi yang telah memberikan dukungan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
6. Bapak Irfan yang telah membiayai pengambilan data Tugas Akhir.
7. Bapak Anto, bapak Panji dan pihak PDAM yang telah mengizinkan untuk mengambil data.
8. Bapak dosen dan Teman – teman teknik fisika dan sistem perkapalan yang ikut dalam membantu

pengambilan data Tugas Akhir di umbulan Bapak Harsono, mas aank, Fahmi Sudra, Zain, Abdi , mas Iwang, Jamal, Okky, Tukul, Alan, Izef, Febryn, Arie Eko, dan Angga.

9. Rekan Nadhifa, Wilujeng, Aulia P, lufi, dan yulia yang membantu memberi saran, dan pengaturan format penulisan buku tugas akhir.
10. Teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis Sanif, Heru, Maya, Ajeng, Fajar, vivi, dkk.
11. Teman – teman Ex Aspay, dan Ex WPS Mupeng, Kencong, Bertus, Baul, Pong, dkk.
12. Teman-teman 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, dan 2014 lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 7 Januari 2016

Penulis

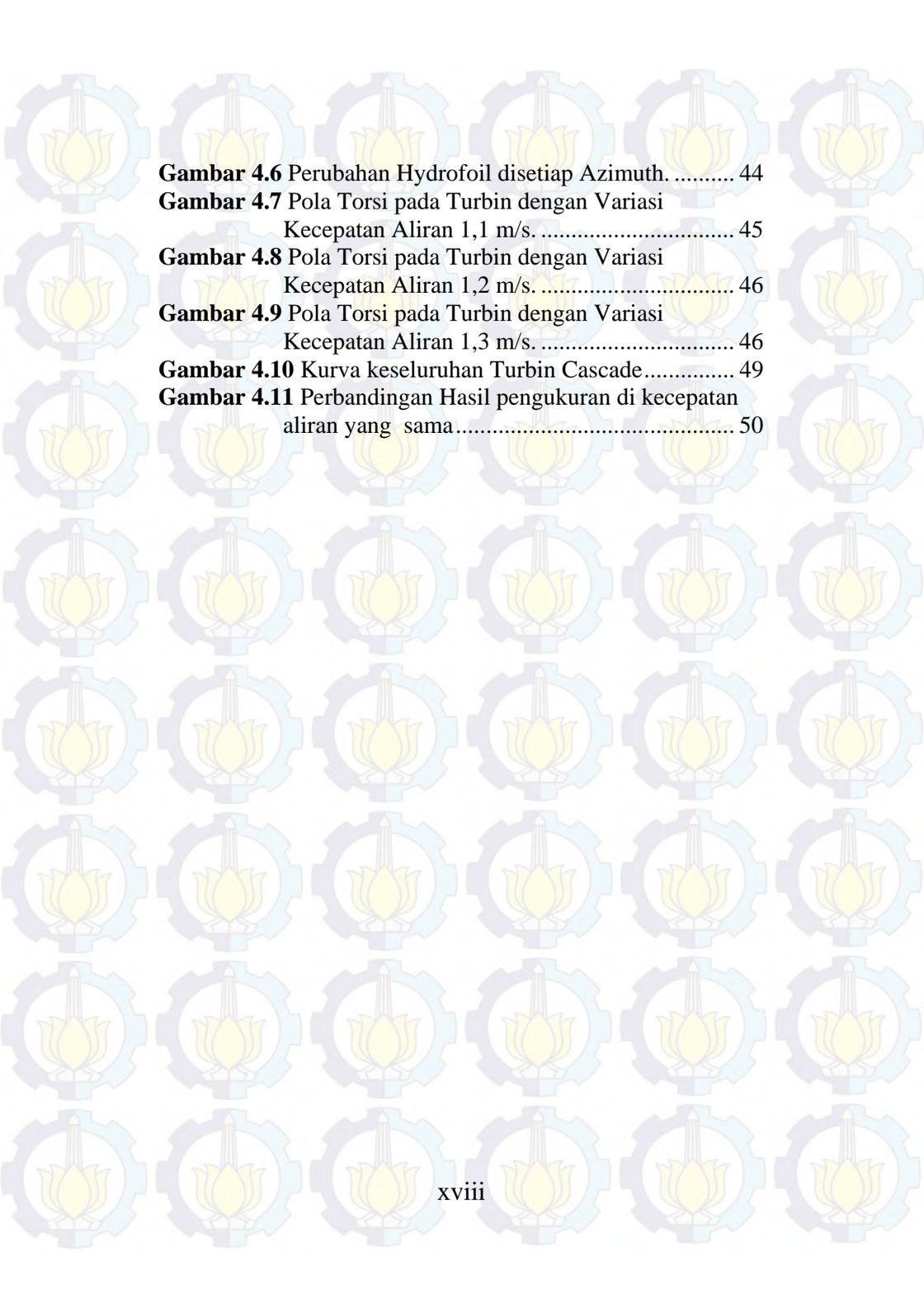
## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	ix
<i>ABSTRACT</i> .....	xi
<i>Abstract</i> .....	xi
KATA PENGANTAR .....	xiii
DAFTAR ISI .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvii
DAFTAR TABEL .....	xix
Daftar Simbol .....	xxi
BAB I .....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Permasalahan .....	3
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan .....	4
BAB II .....	5
LANDASAN TEORI .....	5
2.1 Energi arus laut .....	5
2.1.1. Daya Air .....	5
2.1.2. Pemanfaatan Energi Arus laut .....	6
2.2 Turbin Hidrokinetik .....	6
2.2.1 Prinsip Kerja Turbin Vertikal axis Darrieus .....	8
2.2.2 Performansi dan Efisiensi Turbin Vertical Axis .....	11
2.3 Aspect Ratio .....	12
2.4 <i>Airfoil</i> NACA 0018 .....	13
2.5 Mekanisme Pitch Turbin <i>Vertical Axis Darrieus</i> .....	14
2.6 Turbine Solidity .....	16
2.7 Reynold Number .....	16
BAB III .....	19
METODOLOGI PENELITIAN .....	19
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	19
3.2 Lokasi Pengambilan Data .....	21

3.3	Geometri Turbin.....	23
3.4	Fabrikasi Turbin.....	25
3.5	Eksperimen.....	26
BAB IV .....		31
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....		31
4.1	Hasil Pengujian .....	31
4.2	Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran dan Jumlah <i>Blade</i> .....	35
4.2.1	Pengaruh Variasi Kecepatan aliran .....	35
4.2.2	Pengaruh Variasi Jumlah <i>Blade</i> .....	37
4.3	Performansi dan Efisiensi Turbin.....	38
4.3.1	Daya Mekanik dan Performansi turbin .....	38
4.3.2	Karakteristik Variasi Jumlah <i>Blade</i> Terhadap Efisiensi Turbin.....	42
4.4	Profil Posisi Pergerakan <i>blade</i> .....	44
4.5	Pola Torsi pada turbin Vertical Axis Cascade .....	45
4.6	Pembahasan.....	47
BAB V .....		51
KESIMPULAN DAN SARAN.....		51
5.1	Kesimpulan .....	51
5.2	Saran.....	51
DAFTAR PUSTAKA .....		1

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Jenis – Jenis Turbin Hidrokinetik.....	7
<b>Gambar 2.2</b>	Prinsip Turbin Vertical Axis Darrieus[12]	9
<b>Gambar 2.3</b>	Gaya yang Berkerja Pada Turbin .....	10
<b>Gambar 2.4</b>	Kurva Umum Efisiensi Turbin .....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Luasan permukaan karakteristik.....	14
<b>Gambar 2.6</b>	Mekanisme Pergerakan <i>blade</i> A) mekanisme fixed pitch B) mekanisme passive variable pitch.....	15
<b>Gambar 3.1</b>	Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir ....	20
<b>Gambar 3.2</b>	Lokasi Eksperimen .....	22
<b>Gambar 3.3</b>	Alat ukur kecepatan aliran fluida.....	22
<b>Gambar 3.4</b>	Profil koordinat airfoil NACA 0018 (a) Tampak atas dan bawah; (b) Tampak tiga dimensi.....	24
<b>Gambar 3.5</b>	Prototype Turbin Straight Blade Vertical Axis Cascade .....	25
<b>Gambar 3.6</b>	Proses Fabrikasi hydrofoil.....	26
<b>Gambar 3.7</b>	Tahap Akhir Fabrikasi Turbin .....	26
<b>Gambar 3.8</b>	Variasi Jumlah Blade : a)Variasi Turbin 3 blade, b)Variasi Turbin 6 blade dan c)Variasi Turbin 9 blade .....	27
<b>Gambar 3.9</b>	Jarak Antara Hydrofoil .....	28
<b>Gambar 3.10</b>	Turbin direndam di kanal .....	29
<b>Gambar 3.11</b>	Torsi Meter Dan metode Pengambilan Data. ....	29
<b>Gambar 3.12</b>	Tachometer dan metode Pengambilan data. ...	30
<b>Gambar 4.1</b>	Perbandingan Rata-rata dari Hasil RPM untuk Setiap Variasi Jumlah Blade terhadap Variasi Kecepatan Aliran. ....	34
<b>Gambar 4.2</b>	Perbandingan Rata-rata dari Hasil Pengukuran Torsi untuk Setiap Variasi Jumlah Blade terhadap Variasi Kecepatan Aliran. ....	34
<b>Gambar 4.3</b>	Kurva Daya Mekanik Turbin.....	40
<b>Gambar 4.4</b>	Koefisien Performansi terhadap TSR Turbin ..	41
<b>Gambar 4.5</b>	Kurva efisiensi turbin .....	43



<b>Gambar 4.6</b> Perubahan Hydrofoil disetiap Azimuth. ....	44
<b>Gambar 4.7</b> Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,1 m/s. ....	45
<b>Gambar 4.8</b> Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,2 m/s. ....	46
<b>Gambar 4.9</b> Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,3 m/s. ....	46
<b>Gambar 4.10</b> Kurva keseluruhan Turbin Cascade.....	49
<b>Gambar 4.11</b> Perbandingan Hasil pengukuran di kecepatan aliran yang sama.....	50

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Hasil Pengukuran Kecepatan Aliran (m/s).....	23
<b>Tabel 3.2</b> Profil Airfoil NACA Simetris .....	23
<b>Tabel 4.1</b> Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,1 m/s.....	32
<b>Tabel 4.2</b> Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,2 m/s.....	32
<b>Tabel 4.3</b> Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,3 m/s.....	32
<b>Tabel 4.4</b> Rata – rata hasil pengukuran torsi dan RPM.....	33
<b>Tabel 4.5</b> Pengukuran Kecepatan Aliran Inlet dan outlet.....	33
<b>Tabel 4. 6</b> Nilai bilangan reynold pada variasi 9 foil .....	37
<b>Tabel 4.7</b> Nilai Solidity Tiap Variasi Jumlah Blade.....	37
<b>Tabel 4.8</b> Daya Air Di Umbulan .....	39
<b>Tabel 4.9</b> Daya mekanik Turbin.....	39
<b>Tabel 4.10</b> Nilai $C_p$ dan TSR .....	40
<b>Tabel 4.11</b> Nilai Efisiensi Turbin .....	42

## DAFTAR SIMBOL

$E_k$  = Energi Kinetik (joule)

$m$  = Massa (kg)

$\rho$  = Massa Jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = Volume ( $\text{m}^3$ )

$v$  = Kecepatan Aliran ( $\text{m/s}$ )

$S$  = Panjang *arm* (m)

$P_{\text{turbine}}$  = Daya mekanik Turbin (Watt)

$P_{\text{air}}$  = Daya mekanik Air (Watt)

$A$  = Luas sapuan turbin ( $\text{m}^2$ )

$W$  = Kerja (joule)

$F$  = Gaya (N)

$t$  = waktu (s)

$r$  = radius turbin (m)

$\omega$  = Kecepatan Sudut ( $\text{rad/s}$ )

RPM = *Revolution per minute*

TSR = *Tip Speed Ratio*

$q_\infty$  = Panjang dan luasan karakteristik

$L$  = Gaya lift (N)

$D$  = Gaya Drag (N)

$N$  = Gaya normal (N)

$\sigma$  = Turbine Solidity

$Z$  = Banyak jumlah foil

$d$  = Diameter (m)

$C$  = Panjang Chord (m)

$Re$  = Reynold number

$\mu$  = viskositas air (pada  $15^\circ \text{C}$  bernilai  $1.1375 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

$u_\infty$  = kecepatan Aliran inlet

$u_w$  = kecepatan Aliran Outlet

$u_r$  = kecepatan Aliran ditengah turbin

$w$  = kecepatan Aliran Relatif



*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi sumber daya alam yang sangat melimpah. Di Indonesia sangat banyak sekali sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan untuk berbagai kebutuhan manusia khususnya dalam hal energi. Beberapa contoh sumber daya alam yang melimpah di Indonesia adalah minyak bumi, batu bara, emas dan yang lain-lain. Sumber daya yang sangat melimpah inilah yang menyebabkan masyarakat Indonesia sangat bergantung terhadap sumber daya tersebut, namun keberadaan sumber daya alam tersebut termasuk dalam sumber daya yang tidak dapat diperbarui karena proses pembuatannya yang sangat lama sehingga sumber daya tersebut lama kelamaan akan habis. Maka diperlukannya sumber energi alternatif atau sumber energi yang terbarukan untuk mengatasi sumber daya alam yang lama kelamaan akan habis ini.

Pada tanggal 1 juni 2015 Menteri Energi Sumber Daya Mineral (ESDM), Sudirman Said meluncurkan Peringatan hari Nusantara ke-15 tahun 2015 di Pelabuhan Nelayan Nusantara Kejawan, Cirebon, Jawa Bara[1]. Peringatan hari Nusantara adalah sebuah momentum yang tepat untuk mengubah *mindset* bangsa Indonesia, mengenai ruang hidup dan ruang juang dari yang lebih berorientasi kepada matra darat tetapi juga berorientasi kepada matra laut yang seimbang. Potensi sumber daya alam laut yang dimiliki Indonesia, terkandung potensi energi dan sumber daya mineral yang besar, termasuk didalamnya adalah minyak dan gas, serta energi baru terbarukan. “Dari berbagai potensi energi tersebut, salah satu yang dapat dikembangkan adalah energi baru terbarukan yang bersumber dari arus laut, pasang surut,

gelombang, dan perbedaan temperature air laut”, jelas Sudirman[1].

Sebagai salah satu energi terbarukan, turbin arus laut memiliki beberapa keuntungan dari energi terbarukan lainnya, diantaranya adalah ramah lingkungan, energi yang dibangkitkan membutuhkan alat konversi yang kecil, tidak bising, dan memiliki densitas yang besar[2]. Besarnya densitas ini akan berpengaruh pada gaya dorong yang dihasilkan oleh arus tersebut, sehingga nilai daya yang dihasilkan pun akan meningkat seiring meningkatnya gaya dorong tersebut. Beberapa keuntungan ini dapat ditingkatkan lagi dengan modifikasi pada bentuk maupun *hydrofoil* turbin.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Khalid, Syed Shah[3] yang telah melakukan kajian dengan membandingkan kinerja turbin yang menggunakan *fixed variable-pitch* dan *passive variable-pitch*. Penelitian tersebut dapat digunakan dalam penentuan *hydrofoil* yang digunakan pada pemasangan *cascade*. Yang kedua Hantoro[4] telah melakukan investigasi tentang eksperimen pada *passive variable-pitch* vertikal aksis turbin arus laut menggunakan *3-straight bladed* NACA 0018. Kemudian pada tahun 2010 Lago, LI[5] telah meneliti tentang sistem pembangkit turbin air secara *cascade*. Beberapa efek yang ditimbulkan pada turbin arus laut dengan model-model yang dibuat oleh peneliti dijelaskan oleh Khan[6]. Kemudian Calcagno[7] telah mempresentasikan hasil dari penelitiannya tentang eksperimen dan pendekatan secara matematis untuk mengembangkan sebuah *prototype* vertikal aksis turbin arus laut dan *kobold* telah diaplikasikan pertama kali menggunakan *3-straight* NACA 0015. Kemudian yang terakhir Mecha Garynda[8] dengan mengembangkan pengaplikasian turbin air hingga pada analisa dan *prototype* mengenai mekanisme *passive-pitch* dengan *flapping wing* pada turbin vertikal aksis tipe *darrieus* menggunakan *3-straight* NACA 0018.

Pada tugas akhir ini, dilakukan analisis sebuah turbin arus laut yang memanfaatkan mekanisme *flapping wing* sebagai mekanisme *passive-pitch* yang dipasang secara *cascade* yang akan dijadikan terobosan model terbaru dari perkembangan vertikal aksis turbin arus laut tipe *darrieus* menggunakan *airfoil* NACA 0018. Penelitian ini akan difokuskan pada pembelajaran dan analisis pada kinerja turbin secara *cascade*. Pembelajaran dan analisis dilakukan dengan cara studi *experimental* untuk menganalisis fenomena fisis yang terjadi pada vertikal aksis turbin arus laut tersebut.

## 1.2. Permasalahan

Dari latar belakang diatas, maka permasalahan yang dapat diambil yaitu :

- 1) Bagaimana mendesain dan merancang turbin vertical aksis *straight blade* dengan mekanisme *passive-pitch* dan *fix-pitch* secara *cascade* menggunakan *airfoil* NACA 0018.
- 2) Apa pengaruh variasi aliran air dan jumlah *blade* terhadap efisiensi turbin .

## 1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- 1) Pada tugas akhir ini hanya membahas tentang pengaruh pemasangan *hydrofoil* secara *cascade* pada vertikal aksis turbin arus laut tipe *darrieus*.
- 2) Pada pemodelan *passive-pitch* pada vertikal aksis turbin arus sungai tipe *darrieus* ini hanya menggunakan *airfoil* NACA 0018.
- 3) Jenis sungai yang digunakan untuk pengambilan data adalah jenis aliran kanal terbuka.

4

- 4) Jumlah *blade* yang digunakan sebanyak 2 buah dengan dua variabel sudut *pitch* yaitu 20 derajat. dan 1 buah dengan *fix-pitch*.

#### 1.4. Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian tugas akhir ini ada dua macam, yaitu :

- 1) Mendapatkan desain dan merancang turbin *vertical aksis straight blade* dengan mekanisme *passive-pitch* dan *fix-pitch* secara *cascade* menggunakan *airfoil* NACA 0018.
- 2) Mengetahui pengaruh variasi aliran air dan jumlah *blade* terhadap efisiensi turbin.

## **BAB II LANDASAN TEORI**

Sumber daya alam yang terdapat di bumi Indonesia lama kelamaan akan habis seiring dengan jalannya perubahan alam yang terjadi. Penggunaan energi alternatif seperti energi terbarukan merupakan salah satu solusi atau upaya untuk mengurangi masalah tersebut. Turbin adalah salah satu sumber energi terbarukan yang biasa digunakan untuk menghasilkan sebuah produk listrik. Turbin dapat dimanfaatkan untuk ekstraksi energi fluida dengan berbagai massa jenis contohnya antara lain angin, uap, dan air. Turbin air atau biasa disebut turbin hidrokinetik digunakan di pembangkit listrik tenaga air (PLTA) yang berada di sungai, bendungan, dan di laut. Turbin yang berada dilaut memanfaatkan aliran arus laut.

### **2.1 Energi arus laut**

Indonesia merupakan negara pesisir yang memiliki 13.466 pulau[9]. Beberapa pulau – pulau tersebut dihuni dan sudah dialiri listrik, sebagian lainnya masih belur teraliri listrik dikarenakan infrastruktur yang memadai. Dalam hal ini masyarakat pesisir yang belum mendapat aliran listrik dari pembangkit yang disediakan oleh PLN dapat memanfaatkan energi arus laut. Energi arus laut tercipta dari selat, yaitu perairan yang diapit oleh dua daratan. Sesuai hukum kontinuitas bila luas penampang yang dilewati lebih kecil maka aliran air akan lebih besar. Air yang melewati perairan bebas kecepatan alirannya akan lebih kecil dibanding air yang melewati daerah selat. Keuntungan geografis ini menjadikan wilayah Indonesia dengan potensi energi arus laut tinggi.

#### **2.1.1. Daya Air**

Daya yang dihasilkan oleh aliran air dapat diperoleh dari beberapa faktor. Dari faktor – faktor yang ada maka dapat

dibuat relasi untuk daya air dengan substitusi antara persamaan energi kinetik dan persamaan massa jenis yang dijabarkan sebagai berikut:

$$Ek = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.1)$$

$$Ek = \frac{1}{2} \rho V v^2 \quad (2.2)$$

$$Ek = \frac{1}{2} \rho A S v^2 \quad (2.3)$$

$$\frac{Ek}{t} = \frac{1}{2} \rho A \frac{S}{t} v^2 \quad (2.4)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.5)$$

Faktor pertama yang mempengaruhi daya yang dihasilkan air mengalir adalah kecepatan aliran ( $v$ ), yang kedua adalah luas penampang ( $A$ ), dan massa jenis air ( $\rho$ ) dimana massa jenis untuk air tawar adalah  $1000 \text{ g/cm}^3$  dan untuk air laut adalah  $1030 \text{ g/cm}^3$ .

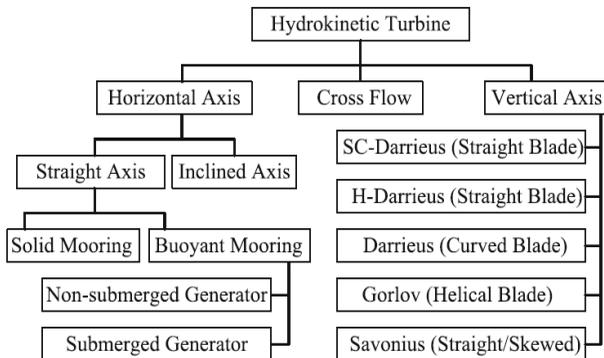
### 2.1.2. Pemanfaatan Energi Arus laut

Energi Arus laut sudah mulai dikembangkan oleh negara – negara kepulauan lainnya seperti inggris yang dimulai sejak tahun 1979, davis di kanada, dan Hilton di Australia<sup>[10]</sup>. Ekstraksi energi arus laut dapat dilakukan dengan dua cara yakni dilakukan dengan mengambil titik pasang surut air laut atau memanfaatkan penambahan kecepatan yang disebabkan penyempitan aliran oleh dua pulau. Dengan adanya aliran ini maka dapat dilakukan ekstraksi dengan turbin vertical aksis untuk kecepatan aliran rendah dan turbin horizontal untuk kecepatan tinggi.

## 2.2 Turbin Hidrokinetik

Teknologi turbin hidrokinetik sudah sangat populer digunakan untuk menghasilkan listrik yang biasa disebut Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Sistem pembangkit ini mempunyai cara kerja yang berbeda – beda tergantung dari kondisi dan tempat yang akan dimanfaatkan. Pada kasus ini turbin hidrokinetik akan diterapkan untuk mengekstraksi arus

laut. Turbin arus laut merupakan salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengekstrak potensi arus laut di Indonesia. Mekanisme turbin arus laut hampir sama seperti turbin angin, hanya berbeda pada fluida yang menggerakannya saja. Dimana turbin angin memanfaatkan aliran fluida angin sedangkan turbin arus laut memanfaatkan pergerakan massa fluida air laut untuk memutar turbin agar dapat menghasilkan listrik. Turbin arus laut dapat menghasilkan energi yang lebih besar dibandingkan dengan turbin angin karena perbedaan massa jenis yang sangat besar antara fluida angin dengan fluida air laut. Secara umum Turbin hidrokinetik dibagi menjadi tiga jenis yakni *Cross-Flow turbine*, *Horizontal Axis Turbine (HAT)* dan *Vertical Axis Turbine (VAT)*.



**Gambar 2.1** Jenis – Jenis Turbin Hidrokinetik

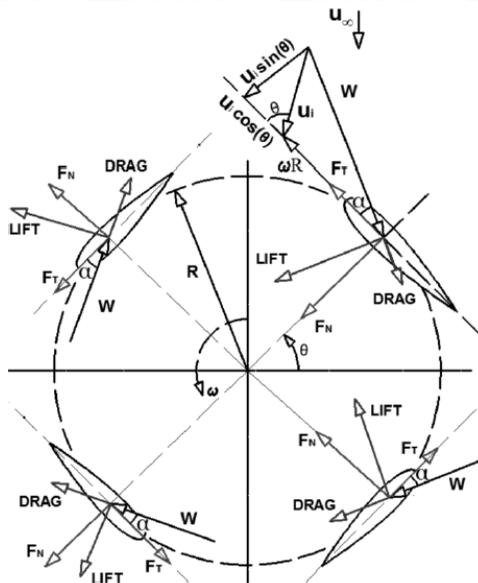
Masing-masing tipe yang disebutkan diatas masih dibagi kedalam model sudu/*blade* yang lebih spesifik. Untuk mendesign Turbin arus laut, turbin ini perlu diperhatikan tentang bentuk dan jumlah *blade* yang digunakan, bentuk dari *blade* itu juga tergantung dari karakteristik aliran disuatu tempat, ketika sudah diketahui karakteristik angin ini baru kemudian dapat ditentukan bentuk sudu/*blade* mana yang akan dipakai.

Salah satu perbedaan model Darrieus dan *Savonius* lebih mudah digerakkan dan sederhana ketimbang model HAWT yang sama-sama digunakan sebagai generator. Jenis *Savonius* memiliki daya putaran yang sangat rendah namun gaya dorong yang spontan akibat lengkungan bilahnya yang unik berfungsi menangkap angin. Sebab itulah kincir angin dengan model baling-baling *Savonius* tidak dapat berputar kencang bila kurang angin dan tidak baik diterapkan pada area yang tidak ada angin. Aplikasi *Savonius* banyak digunakan pada generator skala kecil seperti menyalakan pompa, dan selainnya. Jenis Turbin Darrieus memiliki Efisiensi dan performansi yang lebih tinggi, tetapi memiliki *self-start* yang buruk dan kurang tepat dilakukan di kecepatan aliran rendah.

### 2.2.1 Prinsip Kerja Turbin *Vertical axis Darrieus*

Turbin *vertical Axis Darrieus* merupakan turbin jenis lift yang menggunakan *blade* untuk menghasilkan gaya angkat. Turbin jenis darrieus dapat mengubah torsi ketika *blade* bergerak relatif lebih cepat terhadap aliran yang datang dan beroperasi pada TSR sampai mendekati 4<sup>[11]</sup>. sehingga memiliki efisiensi yang lebih besar daripada turbin yang memanfaatkan gaya *drag*. Prinsip kerja turbin ini arah arus datang dari depan rotor baling-baling. Ketika pergerakan rotor lebih cepat menyamai dengan kecepatan angin yang tak terganggu yaitu rasio kecepatan *blade* dengan kecepatan angin bebas,  $TSR > 4$ . Gambar 2.2 menunjukkan garis vektor percepatan dari bentuk airfoil baling-baling pada posisi angular yang berbeda-beda.

*Blade* pada turbin Darrieus akan berotasi dan terjadi perubahan aliran relatif. Pada sudut serang yang kecil gaya angkat kecil yang dihasilkan *blade* akan memiliki komponen tangensial pada arah rotasi. Karena sudut serang yang beresilasi maka *blade* pada turbin tipe darrieus selalu menghasilkan gaya yang berfluktuasi, bahkan dalam kondisi yang ideal.



**Gambar 2.2** Prinsip Turbin *Vertical Axis Darrieus*[12]

Aliran yang terjadi didalam ( $u_r$ ) dapat diketahui dengan mengetahui nilai kecepatan aliran *inlet* ( $u_\infty$ ) dan kecepatan aliran *outlet* ( $u_w$ ) dengan persamaan 2.6.

$$u_r = \frac{u_\infty + u_w}{2} \quad (2.6)$$

setelah diketahui nilai dari  $u_r$  maka dapat dihitung nilai kecepatan aliran relatif yang menuju *blade* ( $w$ ) dengan persamaan 2.7.

$$w = \sqrt{(u_r \sin(\vartheta))^2 + (u_r \cos(\vartheta) + \omega r)^2} \quad (2.7)$$

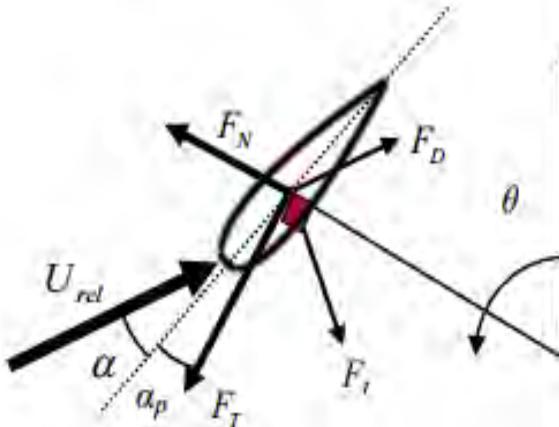
Besarnya torsi yang dapat dihasilkan oleh turbin dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.8 Dimana  $r$  adalah jari-jari turbin.

$$T = F_T * r \quad (2.8)$$

$F_T$  merupakan gaya tangensial yang berkerja tegak lurus dengan lintasan rotasi. Gaya  $F_T$  ini menyebabkan torsi yang akan memutar turbin sehingga dapat menghasilkan energi mekanik. Sementara itu, gaya  $F_N$  merupakan gaya normal yang dapat menyebabkan vibrasi pada turbin. Secara matematis, besarnya koefisien gaya tangensial dan gaya normal dituliskan pada persamaan 2.9 dan 2.10.

$$C_T = \frac{F_T}{0.5 \rho w^2 c} = C_L \sin(\alpha + \alpha_p) - C_D \cos(\alpha + \alpha_p) \quad (2.9)$$

$$C_N = \frac{F_N}{0.5 \rho w^2 c} = -C_D \sin(\alpha + \alpha_p) - C_L \cos(\alpha + \alpha_p) \quad (2.10)$$



**Gambar 2.3** Gaya yang Berkerja Pada Turbin

### 2.2.2 Performansi dan Efisiensi Turbin *Vertical Axis*

Berbagai variasi percobaan telah dilakukan untuk menaikan performa dan efisiensi turbin. Untuk mengetahui daya mekanik yang dihasilkan turbin maka diperlukan variabel tertentu yang perlu diukur secara langsung. Dari persamaan fisika dasar maka dapat diperoleh daya yang dihasilkan turbin adalah sebagai berikut :

$$W = F \cdot S \quad (2.11)$$

$$P = \frac{W}{t} \quad (2.12)$$

Dengan substitusi persamaan 2.6 dan 2.7 maka dihasilkan :

$$P = F \cdot \frac{S}{t} \quad (2.13)$$

$$P = F \cdot v \quad (2.14)$$

$$P = (F \cdot r) \left( \frac{v}{r} \right) \quad (2.15)$$

$$P_{turbin} = \tau \cdot \omega \quad (2.16)$$

Kecepatan sudut ( $\omega$ ) dapat dikonversi dari nilai RPM yakni:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60} \quad (2.17)$$

Berdasarkan hasil penurunan rumus diatas maka diperlukan nilai torsi terukur dan nilai RPM terukur. Setelah Didapat nilai daya mekanik dan daya air dari turbin maka didapatkan nilai efisiensi dari turbin yang merupakan hasil bagi antara daya mekanik turbin dan daya air. Sehingga koefisien daya ( $C_p$ ) dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}} \quad (2.18)$$

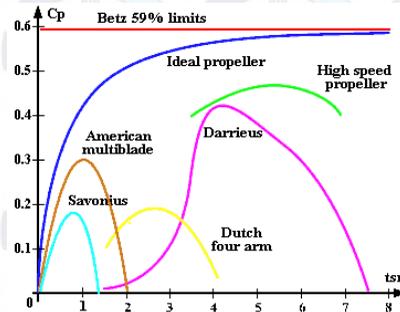
Dan persentase efisiensi turbin dapat diketahui dengan persamaan

$$\eta = C_p * 100 \quad (2.19)$$

Beberapa kelebihan turbin *vertical axis* adalah kemampuan untuk beroperasi pada kecepatan aliran yang *relative rendah* (*low* TSR). Nilai Tip Speed Ratio (TSR) adalah perbandingan antara kecepatan tangensial di ujung rotor terhadap kecepatan fluida yang mengalir turbin tersebut. Maka TSR dapat dijabarkan dengan persamaan berikut:

$$TSR = \frac{\omega r}{v_{air}} \quad (2.20)$$

Setelah data perhitungan didapat maka efisiensi dan performansi turbin dapat diketahui trennya setelah dibuat grafik antara  $C_p$  dan TSR. Nilai efisiensi turbin *darrieus* mencapai titik tertinggi pada TSR 4.5 dengan efisiensi 45% dan akan sampai mendekati TSR 8 maka nilai efisiensi akan turun ke 10% seperti yang di tunjukan gambar 2.3.



**Gambar 2.4** Kurva Umum Efisiensi Turbin

### 2.3 Aspect Ratio

*Aspect ratio* memiliki pengaruh yang besar pada kinerja turbin, Dalam penelitian ini *Aspect Ratio* diterapkan pada penentuan ukuran blade sebuah turbin. *Aspect ratio* merupakan perbandingan antara panjang span atau tinggi *blade* dan panjang *chord*. Adapun persamaan *aspect ratio* yang digunakan pada penentuan blade adalah sebagai berikut:

$$\text{Aspect Ratio} = \frac{\text{span}(m)}{\text{chord}(m)} \quad (2.21)$$

Sebuah *Aspect Ratio* yang tinggi menunjukkan sayap yang panjang dan memiliki luas sayap yang sempit, sedangkan *Aspect Ratio* yang rendah menunjukkan sayap yang pendek dan luasan sayap yang besar.

## 2.4 Airfoil NACA 0018

*Airfoil* adalah salah satu bentuk *body* aerodinamika sederhana yang berguna untuk dapat memberikan gaya angkat tertentu terhadap suatu bagian lainnya ketika melintasi atau dilintasi fluida yang mengalir. Pada turbin *vertical axis* darrieus airfoil adalah bentuk blade yang dapat menghasilkan gaya angkat (*lift*) atau efek aerodinamika ketika melawati suatu aliran.

Dalam perkembangannya, terutama eksperimental aerodinamik, gaya-gaya maupun momen aerodinamik lebih banyak dinyatakan dalam koefisien tak berdimensi (*dimension less coefficient*). Untuk itu dikenal lebih dahulu mengenai *dynamic pressure* dari *free stream* [13].

$$q_{\infty} = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 \quad (2.22)$$

Disamping  $q_{\infty}$ , dikenal juga apa yang disebut panjang dan luasan karakteristik (*characteristic surface/characteristic length*). Beberapa koefisien dari gaya dan momen didefinisikan sebagai berikut :

$$\text{Lift coefficient: } C_L = \frac{L}{q_{\infty}} \cdot S \quad (2.23)$$

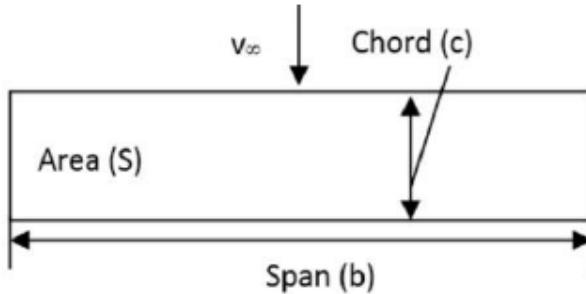
$$\text{Drag coefficient: } C_D = \frac{D}{q_{\infty}} \cdot S \quad (2.24)$$

$$\text{Normal force coefficient: } C_N = \frac{N}{q_{\infty}} \cdot S \quad (2.25)$$

$$\text{Axial force coefficient: } C_A = \frac{A}{q_{\infty}} \cdot S \quad (2.26)$$

$$\text{Momen coefficient: } C_M = \frac{M}{q_{\infty}} \cdot S \quad (2.27)$$

Contoh panjang dan luasan permukaan karakteristik:



**Gambar 2.5** Luasan permukaan karakteristik

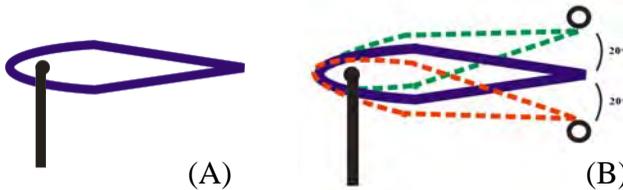
NACA (*National Advisory Committee for Aeronautics*) merupakan standar dalam perancangan suatu airfoil. Perancangan *airfoil* pada dasarnya bersifat khusus dan dibuat menurut selera serta sesuai dengan kebutuhan dari pesawat yang akan dibuat. Akan tetapi NACA menggunakan bentuk airfoil yang disusun secara sistematis dan rasional. NACA mengidentifikasi bentuk airfoil dengan menggunakan sistem angka kunci seperti seri “satu”, seri “enam”, seri “empat angka” dan seri “lima angka” [13] gambar airfoil ada pada gambar 2.4..

NACA 0018 merupakan seri “empat angka” yang artinya memiliki chamber dengan nilai 0 dan mempunyai maksimum *thickness* 18%, koefisien lift maksimum 1.077 dan sudut serang kritis  $15^{\circ}$  [13].

## 2.5 Mekanisme Pitch Turbin *Vertical Axis Darrieus*

Untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja turbin diperlukan berbagai macam percobaan yang dilakukan. Mekanisme pergerakan turbin merupakan salah satu cara untuk meningkatkan performa diantaranya yang sudah dilakukan oleh penelitian sebelumnya. *Pitch* yang digunakan pada turbin berkaitan dengan posisi foil terhadap pusat rotasi dan relative terhadap aliran. Tipe pitch dikelompokkan menjadi dua, yaitu fixed pitch dan variable pitch

*Fixed pitch* merupakan suatu cara yang digunakan pada sebuah turbin dimana pitch pada sebuah blade dikondisikan tidak dapat bergerak. *Fixed pitch* apabila diterapkan pada sebuah turbin memiliki beberapa sifat, yaitu dapat diterapkan dengan mudah dan perawatan yang tidak rumit. Namun pada jenis ini, turbin Akan memiliki sifat self start sangat berat. Hal ini dikarenakan bahwa pada fase awal terdapat turbin yang memiliki permukaan yang luas yang dapat menghilangkan gaya angkat yang disebut dengan stall yang dapat menurunkan efisiensi dan menimbulkan keadaan fatigue. Pada gambar 2.5 A ditunjukkan mekanisme *fixed pitch*.



**Gambar 2.6** Mekanisme Pergerakan foil A) mekanisme *fixed pitch* B) mekanisme *passive variable pitch*.

Pada *variable pitch*, terdapat dua macam tipe yaitu pasif dan aktif. Pada tipe aktif pitch, benda atau foil telah dikontrol untuk dapat bergerak dengan sudut serang tertentu yang terbaik yang dapat menghasilkan gaya yang maksimal. Sedangkan pada *passive pitch*, yaitu dengan menerapkan jarak sudut dalam interfal tertentu sebagai daerah dimana benda atau airfoil dibebaskan untuk bergerak. *Passive variable pitch* merupakan cara dimana pitch diberikan sebuah derajat kebebasan sebagai tempat untuk benda atau foil bergerak. Pada tipe pasif tersebut, maka foil dapat bergerak bebas pada lingkaran rotasi turbin sesuai dengan arah aliran fluida yang mengalir. Dengan penerapan *passive variable pitch*, efisiensi turbin akan meningkat dan turbin dapat berputar lebih mudah.

Pada gambar 2.5 B ditunjukkan mekanisme variabel *passive-pitch*.

## 2.6 Turbine Solidity

Bentuk dari turbin akan mempengaruhi performa dan efisiensinya. Pada turbin yang memanfaatkan gaya lift untuk berputar seperti contoh turbin darrieus, secara teori bernauli gaya lift yang dihasilkan akan lebih besar ketika nilai sapuan turbin lebih banyak. Dengan itu untuk mendapatkan hasil yang optimal perlu diketahui nilai *solidity* dari turbin. Nilai *Solidity* pada turbin merupakan seberapa banyak luas sapuan blade[14]. Berikut merupakan persamaan untuk menghitung nilai *solidity* dari suatu turbin.

$$\sigma = \frac{zC}{\pi D} \quad (2.28)$$

Pengaruh dari meningkatnya nilai *solidity* adalah meningkatnya nilai koefisien performansi pada kurva turbin hidrodinamik. Nilai koefisien performa akan turun bilamana diameter dari turbin meningkat, dimana artinya ada pengaruh nilai dari  $C_p$  seiring dengan meningkatnya nilai *solidity*.

## 2.7 Reynold Number

*Reynold Number* adalah rasio antara gaya inersia ( $vsp$ ) terhadap gaya viskos ( $\mu/L$ ) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen.

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (2.29)$$

Semakin besar nilai Reynold number maka dapat ditarik kesimpulan semakin turbulen aliran tersebut, semakin kecil nilai reynold number maka semakin laminar aliran tersebut. Nilai  $w$  adalah nilai kecepatan aliran relatif terhadap foil seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2 sehingga dapat

nilai kecepatan aliran relative dapat diperoleh dengan persamaan 2.30 dan 2.31. Nilai bilangan reynold dapat dihitung dengan persamaan 2.29.

$$w = v_{inlet} \sqrt{\frac{((1-a)\sin(\theta))^2 + ((1-a)\cos(\theta) + TSR)^2}{(1-a)^2}} \quad (2.30)$$

Dengan  $\alpha$  adalah

$$\alpha = \frac{v_{inlet} - v_{outlet}}{v_{inlet}} \quad (2.31)$$



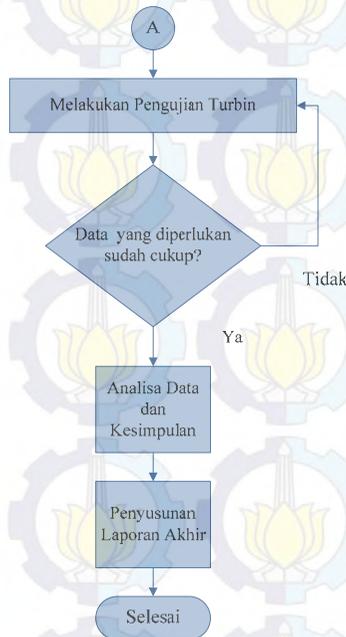
*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir penelitian Turbin Arus Laut Vertikal Aksis *Straight Blade Cascade* :





**Gambar 3.1** Skema diagram alir penelitian Tugas Akhir

Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan studi literatur. Studi literatur bertujuan untuk meningkatkan pengetahuan penulis pada topik penelitian ini. Literatur yang digunakan pada penelitian ini dirujuk jurnal, buku, laporan tugas akhir sebelumnya, dan *website*. Referensi yang digunakan mencakup materi turbin vertikal aksis arus laut, memahami tentang *airfoil* NACA 0018, pemahaman tentang aliran benda terendam, aliran kanal terbuka, pemahaman pengaruh turbin bila di *cascade*, pemahaman mekanisme *passive-pitch* pada turbin arus sungai, pemahaman tentang *flow separation*, aspek rasio pada perancangan turbin, pengambilan data mulai dari sungai yang akan digunakan tempat eksperimen, kecepatan

aliran sungai, dan lebar sungai serta kedalaman dan debit sungai.

Pengambilan data diawali dengan survei lokasi. Penentuan lokasi eksperimen ini juga berguna untuk menentukan dimensi ukuran dan material dari turbinnya sendiri. Setelah itu dilakukan fabrikasi turbin, ukuran dari turbin sendiri menyesuaikan dari hasil pengukuran agar mendapat hasil yang optimal. Langkah selanjutnya adalah penentuan variabel bebas yaitu kombinasi antara kecepatan aliran dan jumlah *hydrofoil* yang dipasang secara *cascade*. Setelah penentuan variabel bebas dilakukan verifikasi lagi agar tidak terjadi kesalahan pada pengambilan data. Pada pengambilan data dibutuhkan data RPM dan torsi pada setiap azimuth sebanyak 10 kali dan kemudian diambil data rata-rata nya. Kemudian didapatkan hasil ekseprimen dan hasil tersebut diolah dan dianalisa data nya. Setelah dianalisa datanya, data tersebut diambil kesimpulan bagaimana karakteristik dari turbin tersebut. Penyusunan laporan adalah tahap terakhir setelah analisa data dan kesimpulan diperoleh.

### **3.2 Lokasi Pengambilan Data**

Pengambilan data turbin arus sungai ini bertempat di daerah Umbulan, Pasuruan, Jawa Timur. Lokasi ini dibuat oleh pemerintah belanda pada tahun 1908 dalam rangka mengairi kota pasuruan, namun sekarang sudah menjadi hak milik pemerintah Indonesia yang dikelola oleh Perusahaan daerah air minum (PDAM) kota Pasuruan. Lokasi ini dipilih karena memiliki karateristik aliran yang sesuai untuk pengujian turbin arus laut, karena aliran yang cukup utuk merepresentasikan kondisi kecepatan arus laut. Pada sungai tersebut memiliki perbedaan kecepatan aliran pada setiap titik tertentu pada sungai tersebut. Metode pengambilan data kecepatan arus menggunakan alat pengukur arus seri CM-1BX merk *Dentan* seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.3.



**Gambar 3.2** Lokasi Eksperimen



**Gambar 3.3** Alat ukur kecepatan aliran fluida

Pengukuran arus sungai dilakukan dengan cara mengukur kecepatan aliran *inlet* dan *outlet* dengan jarak 50 cm dari muka turbin yang diambil sebanyak 10 data dan dirata-rata sehingga didapat kecepatan *inlet* dan *outlet*, berikut hasil rata-rata pengukuran yang diperoleh :

**Tabel 3.1** Hasil Pengukuran Kecepatan Aliran

Kecepatan Aliran (m/s)	3 Blade		6 Blade		9 Blade	
	inlet	Outlet	Inlet	Outlet	inlet	outlet
1.1	1.15	0.87	1.16	0.87	1.15	0.69
1.2	1.22	1.02	1.23	0.81	1.21	0.69
1.3	1.38	1.26	1.31	0.91	1.34	0.70

### 3.3 Geometri Turbin

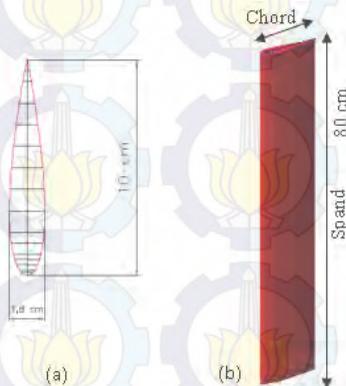
Setelah didapatkan hasil survei lokasi, maka didapatkan desain turbin yang optimal. Dari hasil pengukuran kanal aliran terbuka ini memiliki lebar 100cm. Dari acuan tersebut dibuat turbin dengan dimensi 80 cm<sup>2</sup> dengan aspek rasio 1 : 8 dengan ukuran *chord* 10cm menggunakan profil *hydrofoil* NACA 0018. Berikut Profil *Airfoil* NACA Simetris :

**Tabel 3.2** Profil *Airfoil* NACA Simetris

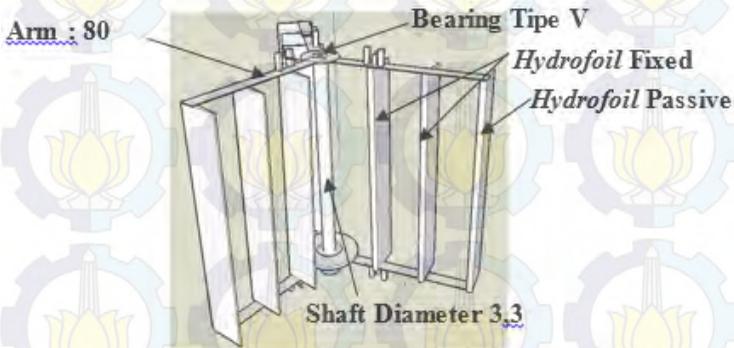
Distance From Nose (m)	NACA 0012	NACA 0015	NACA 0018	NACA 0021	NACA 0025
1.25	1.89	2.37	2.84	3.31	3.95
2.5	2.62	3.27	3.92	4.58	5.45
5	3.56	4.44	5.33	6.22	7.41
7.5	4.2	5.25	6.3	7.35	8.75
10	4.68	5.85	7.02	8.2	9.76
15	5.34	6.68	8.02	9.35	11.14

Distance From Nose (m)	NACA 0012	NACA 0015	NACA 0018	NACA 0021	NACA 0025
20	5.74	7.17	8.61	10.04	11.95
30	6	7.5	9	10.5	12.5
40	5.8	7.25	8.7	10.16	12.09
50	5.29	6.62	7.94	9.26	11.03
60	4.56	5.7	6.84	7.99	9.51
70	3.66	4.58	5.5	6.41	7.63
80	2.62	3.28	3.94	4.59	5.46
90	1.45	1.81	2.17	2.53	3.02
95	0.81	1.01	1.21	1.41	1.68
100	0.13	0.16	0.19	0.22	0.26

Dengan mengacu pada Tabel 3.2 maka dimensi airfoil dengan panjang *spand* 80 cm digambarkan pada gambar berikut :



**Gambar 3.4** Profil koordinat *airfoil* NACA 0018 (a) Tampak atas dan bawah; (b) Tampak tiga dimensi.



**Gambar 3.5** *Prototype Turbin Straight Blade Vertical Axis Cascade*

### 3.4 Fabrikasi Turbin

Langkah pertama dalam fabrikasi turbin ialah membuat *hydrofoil* turbin. *Hydrofoil* dibuat menggunakan material plat besi yang dilapisi dengan komposit fiber dengan resin, dengan hal ini maka rupa turbin dapat mendekati bentuk dari NACA 0018. Dalam tugas akhir ini mengulas tentang pengaruh penambahan *blade* pada turbin, maka dibutuhkan sebanyak 9 *blade*. 9 *blade* tersebut terdiri dari 6 *fix pitch* dan 3 *passive pitch* sehingga konstruksi dari rangka dan *arm* juga menyesuaikan. Berdasarkan hasil survei lokasi lebar kanal adalah 110 cm. Ukuran lebar sungai menentukan ukuran turbin dan rangka itu sendiri. Ukuran rangka yang dibuat dengan dimensi 100cm<sup>2</sup>. Dengan ukuran ini maka lebar rangka akan masuk seluruhnya didalam kanal. Berikut merupakan gambar turbin *cascade* dan mekanisme *passive-pitch* yang diletakan di posisi paling luar seperti yang ditunjukkan gambar 3.7.



**Gambar 3.6** Proses Fabrikasi *hydrofoil*

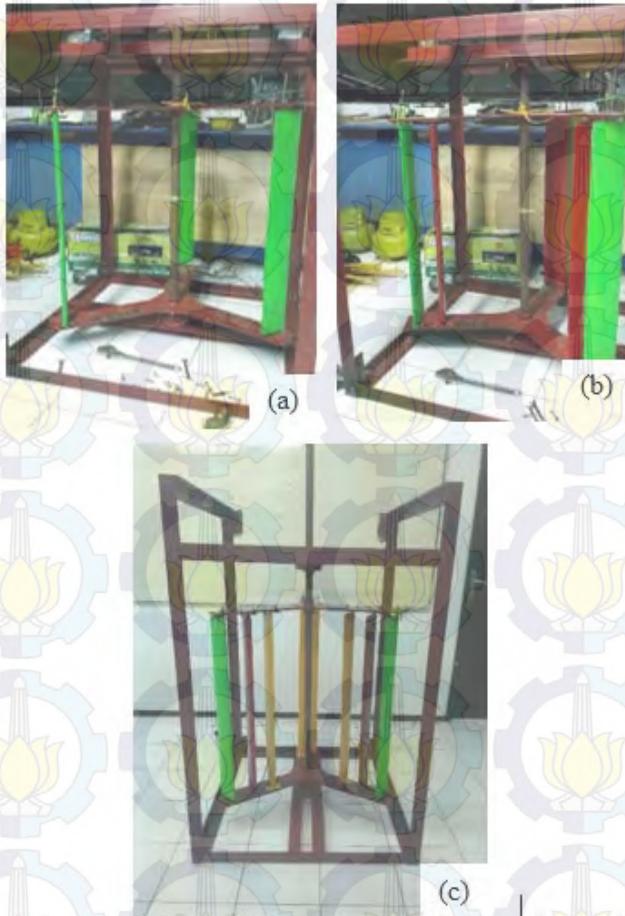


**Gambar 3.7** Tahap Akhir Fabrikasi Turbin

### 3.5 Eksperimen

Pada tahap ini pengambilan data yang dimaksud adalah pengambilan data RPM Torsi, dan kecepatan aliran pada titik *inlet* dan *outlet*. Pengambilan data dilakukan dengan variasi penambahan jumlah *blade*. 3 *blade*, 6 *blade*, 9 *blade* yang

dikombinasikan dengan 3 variasi kecepatan aliran, sehingga total pengambilan data menjadi 9 variasi. Variasi jarak antar



**Gambar 3.8** Variasi Jumlah Blade : a)Variasi Turbin 3 blade, b)Variasi Turbin 6 blade dan c)Variasi Turbin 9 blade

*hydrofoil* adalah  $1/2R$ ,  $3/4R$ , dan  $R$ . Posisi  $R$  turbin bergerak dengan mekanisme *passive-pitch*,  $1/2R$  dan  $3/4R$  bergerak dengan *Fixed Pitch*. Berikut merupakan gambar turbin setiap variasi penambahan jumlah *hydrofoil*.



**Gambar 3.9** Jarak Antara *Hydrofoil*

Pada gambar 3.8A, 3.8B, dan 3.8C merupakan konfigurasi pemasangan turbin sebelum direndam ke kanal. Pada gambar 3.8A blade dengan mekanisme *passive-pitch* dipasang pada jarak  $R$ . Pada gambar 3.8B blade *fixed-pitch* dipasang dengan jarak  $3/4 R$  untuk dilakukan variasi 6 blade. Pada gambar 3.8C blade *fixed pitch* ditambahkan dengan jarak  $1/2 R$  sehingga jumlah variasi menjadi 9 blade. Pada tahap selanjutnya merupakan tahap pengujian turbin dimana turbin direndam di kanal aliran terbuka dengan bantuan dua buah bambu dan turbin diikat agar tidak berputar seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10. setelah turbin seluruhnya terendam didalam air maka dipasang kunci torsi dan tali dilepas. Arm dari turbin diposisikan dan disesuaikan di azimuth tertentu. Data diambil pada sudut azimuth  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$ . Berikut dapat di representasikan oleh gambar 3.11.



**Gambar 3.10** Turbin direndam di kanal



**Gambar 3.11** Torsi Meter Dan metode Pengambilan Data.

Pengambilan data torsi menggunakan *Torque Wrench* seri 4603BN merek *JTN*. *Torque Wrench* ini dapat membaca nilai torsi sampai dengan 50 Nm. Sementara untuk Pengambilan data RPM menggunakan Tachometer Seri HT-3200 merek ONOSOKKI. Pada gambar 3.12 merupakan gambar alat ukur RPM dan cara menggunakannya. Tachometer digunakan dengan cara menempelkan bagian ujung tachometer ke ujung shaft seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3.12



**Gambar 3.12** Tachometer dan metode Pengambilan data.

Setelah data RPM dan Torsi disetiap azimuth diperoleh maka data disusun di sebuah tabel untuk dapat diolah dan dapat dianalisa performa dan performansi dari turbin tersebut.

## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada Bab ini dibahas mengenai pengujian dan analisa perancangan turbin *vertical axis straight blade cascade* dengan variasi jumlah *blade*. Pada tahap ini Akan diketahui performansi dari turbin dan pengaruh variasi jumlah *blade*.

### 4.1 Hasil Pengujian

Pada pengujian ini pengambilan data dilakukan dengan Cara mengukur nilai torsi menggunakan *Torque Wrench* dan nilai (*Revolution per minute*) RPM menggunakan *tachometer*. Pengambilan data dilakukan melakukan kombinasi antara variasi jumlah *blade* dan variasi kecepatan aliran. Perngujian dilakukan dengan memasang turbin pada posisi 3 *blade*, 6 *blade*, 9 *blade* yang dilakukan pada tiga variasi kecepatan aliran yang berbeda yaitu 1,1 m/s, 1,2 m/s, dan 1,3 m/s. Pada setiap pengujian dilakukan pengukuran torsi *startup* pada lima *azimuth* yang berbeda, sehingga akan diketahui profil hasil torsi yang dihasilkan turbin.

Pengambilan data torsi dilakukan pada lima *azimuth* yang berbeda yaitu : 0°, 90°, 120°, 180°, dan 240°. Pengukuran nilai kecepatan aliran air juga dilakukan dengan cara mengukur kecepatan dengan jarak 50 cm dari turbin, sehingga diperoleh data kecepatan *inlet* dan *outlet* aliran. Pada Tabel 4.1 sampai dengan Tabel 4.3 merupakan hasil pengukuran nilai torsi di Lima sudut azimuth dengan variasi jumlah blade dan variasi kecepatan aliran. Rata-rata data hasil pengukuran torsi pada tiga kecepatan aliran yang berbeda di lima sudut *azimuth* dapat dilihat lebih rinci pada Tabel pada Lampiran B.1.

Untuk mencari hasil torsi rata – rata yang dihasilkan turbin maka hasil pengukuran torsi dari lima *azimuth* dirata – rata, sehingga didapat nilai torsi turbin dalam satu putaran. Untuk mencari nilai RPM Turbin dibiarkan berputar di kanal, dan

**Tabel 4.1** Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,1 m/s.

Sudut Azimuth	Torsi (N.m)		
	3 Blade	6 Blade	9 Blade
0 <sup>0</sup>	14.6	20.1	26.6
90 <sup>0</sup>	28.3	33.6	37.7
120 <sup>0</sup>	13.9	25.1	32.6
180 <sup>0</sup>	11.3	18.3	25.6
240 <sup>0</sup>	14.6	20.7	26.2

**Tabel 4.2** Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,2 m/s.

Sudut Azimuth	Torsi (N.m)		
	3 Blade	6 Blade	9 Blade
0 <sup>0</sup>	14.7	21.3	27
90 <sup>0</sup>	28.3	33.8	38
120 <sup>0</sup>	14.6	25.2	33.1
180 <sup>0</sup>	12.6	18.9	25.8
240 <sup>0</sup>	15.1	22.2	26.9

**Tabel 4.3** Hasil pengukuran torsi di kecepatan 1,3 m/s.

Sudut Azimuth	Torsi (N.m)		
	3 Blade	6 Blade	9 Blade
0 <sup>0</sup>	15.6	22.8	29.2
90 <sup>0</sup>	28.5	33.9	40.3
120 <sup>0</sup>	15	28.1	33.6
180 <sup>0</sup>	13.1	19.4	26
240 <sup>0</sup>	16.9	22.4	27

memasang *Tachometer* pada *shaft*, Tabel 4.4 merupakan Hasil Pengukuran Rata-rata Torsi dan RPM.

**Tabel 4.4** Rata – rata hasil pengukuran torsi dan RPM

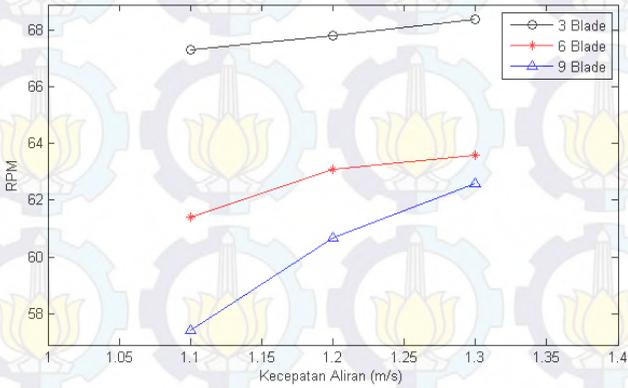
Kecepatan Aliran (m/s)	3 Blade		6 Blade		9 Blade	
	Torsi (Nm)	RPM	Torsi (Nm)	RPM	Torsi (Nm)	RPM
1.1	16.56	67.3	23.58	61.4	29.76	57.4
1.2	17.07	67.89	24.32	63.11	30.18	60.67
1.3	17.82	68.4	25.33	63.6	31.21	62.6

Pengambilan data kecepatan air diambil dengan cara merendam *current meter* tepat di tengah turbin sehingga dapat merepresentasikan kecepatan aliran di titik tersebut. Dari data hasil pengujian, dapat dijabarkan bahwa terdapat pengaruh peletakan turbin pada aliran kanal terbuka. Pada Tabel 4.5 merupakan hasil pengukuran kecepatan aliran di 0,5 meter *Inlet* dan *outlet* dengan variasi jumlah *blade*.

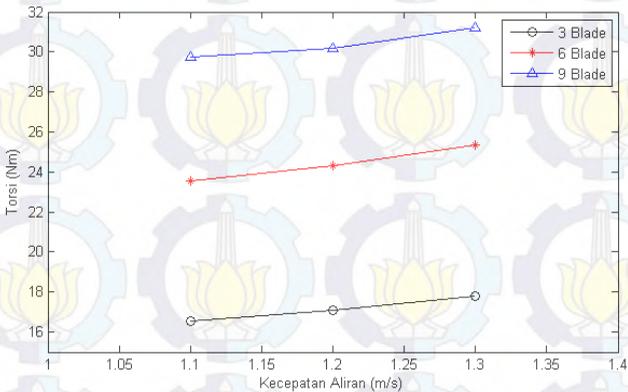
**Tabel 4.5** Pengukuran Kecepatan Aliran Inlet dan outlet

Posisi	3 Blade		6 Blade		9 Blade	
	<i>inlet</i> (m/s)	<i>outlet</i> (m/s)	<i>inlet</i> (m/s)	<i>outlet</i> (m/s)	<i>inlet</i> (m/s)	<i>outlet</i> (m/s)
Umbulan 1	1.15	0.87	1.16	0.87	1.15	0.69
Umbulan 2	1.22	1.02	1.23	0.81	1.21	0.69
Umbulan 3	1.38	1.26	1.31	0.91	1.34	0.70

Pengukuran *inlet* di letakan di tiga tempat yang berbeda yaitu umbulan 1, umbulan 2, dan umbulan 3 dengan acuan awal kecepatan aliran adalah 1,1 m/s, 1,2 m/s, dan 1,3 m/s. Dari data pada Tabel 4.4 dibuat grafik antara rata-rata kecepatan putar turbin (RPM) untuk setiap variasi jumlah *blade* dengan kecepatan aliran dan rata-rata torsi untuk setiap variasi jumlah *blade* dan kecepatan aliran arus sungai maka dihasilkan grafik sebagai berikut :



**Gambar 4.1** Perbandingan Rata-rata dari Hasil RPM untuk Setiap Variasi Jumlah Blade terhadap Variasi Kecepatan Aliran.



**Gambar 4.2** Perbandingan Rata-rata dari Hasil Pengukuran Torsi untuk Setiap Variasi Jumlah Blade terhadap Variasi Kecepatan Aliran.

Pada variasi 3 *blade* diperoleh nilai Torsi dan RPM maksimum pada kecepatan aliran 1,3 m/s yaitu sebesar 17,8

N.m dan 68,4 RPM. Sedangkan nilai Torsi dan RPM minimum terletak pada kecepatan aliran 1,1 m/s yaitu 16,6 N.m dan 67,3 RPM. Untuk variasi 6 *blade* nilai Torsi dan RPM maksimum pada kecepatan 1,3 m/s yakni sebesar 25,3 N.m dan 63,6 RPM. Nilai Torsi dan RPM minimum terletak pada kecepatan aliran 1,1 m/s yaitu 23,58 dan 61,4 RPM. Variasi terakhir menggunakan 9 *blade* dengan nilai Torsi dan RPM maksimum terletak pada kecepatan aliran 1,3 m/s yaitu 31,2 N.m dan 62,6 RPM, sedangkan untuk nilai Torsi dan RPM minimum terletak pada kecepatan aliran 1,1 m/s dengan nilai torsi dan RPM yaitu 29,76 N.m dan 57,4 RPM. Seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran, diikuti dengan kenaikan nilai torsi dan RPM, namun sebaliknya seiring dengan kenaikan variasi jumlah *blade* nilai RPM turun dan nilai torsi naik.

## **4.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Aliran dan Jumlah *Blade***

Berdasarkan hasil Pengukuran nilai Torsi dan RPM diketahui bahwa nilai torsi dan RPM berubah secara signifikan pada setiap variasi. Pada variasi kecepatan aliran nilai torsi dan RPM akan cenderung meningkat seiring bertambahnya nilai kecepatan aliran. Namun hal yang berbeda terjadi pada hasil pengukuran dengan variasi jumlah *blade*, seiring dengan penambahan jumlah *blade*, nilai torsi dan RPM secara signifikan juga berubah. Nilai torsi akan meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah *blade*, tetapi Nilai RPM akan selalu berkurang seiring dengan penambahan jumlah *blade*, hal ini akan dijelaskan pada Sub Bab 4.2.1 tentang pengaruh Variasi Kecepatan Aliran dan Sub Bab 4.2.2 Variasi Jumlah *blade*.

### **4.2.1 Pengaruh Variasi Kecepatan aliran**

Ekspерimen ini menggunakan tiga variasi kecepatan aliran, yaitu 1,1 m/s, 1,2m/s, 1,3 m/s. Hasil nilai kecepatan

yang diukur pada pengujian ini diperoleh karakteristik bahwa seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran akan berdampak pada naiknya nilai RPM. Hal ini dapat dijelaskan dengan hukum Bernoulli dan hukum Kontinuitas. Pada hukum Bernoulli disebutkan bahwa air mengalir merupakan jenis aliran yang tidak termampatkan dimana yang dicirikan dengan tidak berubahnya besaran kerapatan massa (densitas) dari fluida di sepanjang aliran tersebut. Pada *Turbin Vertical Axis Darrieus* nilai yang tidak berubah – ubah (konstan) adalah luas penampang, dari turbin, masa jenis air, dimensi turbin. Dengan demikian tekanan dari tiap *blade* akan mengatur gaya yang dihasilkan turbin.

Gaya yang dihasilkan oleh turbin dibedakan menjadi dua, yakni *lift* dan *drag*. Pada aliran kecepatan tinggi gaya *lift* mendominasi penyebab berputarnya turbin. Pengaruh luas penampang mempengaruhi kecepatan aliran secara signifikan. Hal ini sesuai dengan hukum Kontinuitas yang menyatakan bahwa luas penampang akan selalu berbanding terbalik dengan kecepatan aliran. Bilamana luas Penampang kecil maka aliran yang lewat akan lebih cepat. Pada turbin ini luas penampang turbin adalah  $80 \text{ cm}^2$  maka bilamana kecepatan aliran di kanal dengan lebar 1 m adalah 1,1m/s maka kecepatan aliran didalam turbin adalah 1.375 m/s. sehingga pengaruh dari luas penampang sangat berpengaruh pada kinerja turbin itu sendiri.

Energi yang dihasilkan air di kanal juga berubah-ubah sesuai dengan perubahan kecepatan aliran. Hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan daya air dimana massa jenis air dan luas penampang dianggap tetap, sehingga energi yang berubah sangat dipengaruhi kecepatan fluida itu sendiri. Peningkatan bilangan reynold juga berpengaruh dalam laju aliran air tersebut. Dengan menggunakan persamaan 2.23 maka pada saat posisi *blade* di azimuth  $0^\circ$  dengan variasi 9 jumlah *blade* maka diperoleh bilangan reynold seperti tabel 4.6

Dari hasil bilangan reynold diatas untuk setiap variasi kecepatan dapat dilihat bahwa aliran yang dihasilkan turbin pada eksperimen ini mengalami turbulen, karena batas

**Tabel 4. 6** Nilai bilangan reynold pada variasi 9 *blade*

v Inlet	v Outlet	Reynold Number
1.1499	0.6944	282096.5275
1.2108	0.6881	306496.1172
1.34	0.6964	342152.1716

Bilangan reynold untuk aliran laminar adalah kurang dari 2300. Semakin besar bilangan reynold Akan semakin turbulen aliran tersebut maka akan semakin kecil energi yang dapat diekstrak.

#### 4.2.2 Pengaruh Variasi Jumlah *Blade*

Variasi jumlah *blade* yang dilakukan pada pengujian yaitu, 3 *blade*, 6 *blade*, dan 9 *blade*. Pengaruh banyaknya *blade* mempengaruhi *Turbine Solidity*. *Turbine Solidity* merupakan indikator padatnya sebuah turbin dengan menggunakan nilai *Solidity*. Tabel 4.6 merupakan hasil perhitungan nilai *Solidity* tiap variasi turbin.

**Tabel 4.7** Nilai *Solidity* Tiap Variasi Jumlah *Blade*

Jumlah <i>blade</i>	Nilai <i>Solidity</i>
3 <i>Blade</i>	0.12
6 <i>Blade</i>	0.24
9 <i>Blade</i>	0.36

Semakin banyak *blade* didalam turbin maka nilai *solidity* akan semakin meningkat. Nilai *solidity* untuk 3 *blade* adalah 0,11, nilai *solidity* untuk 6 *blade* adalah 0,23, dan nilai 9 *blade*

adalah 0,35. Pada penelitian sebelumnya tentang turbin arus laut dengan variabel *pitch* yang dilakukan oleh Fengmei Jing performa terbaik turbin diperoleh dengan tingkat *solidity* 0,35 dengan nilai koefisien daya 0,25 lalu bila tingkat *solidity* ini ditingkatkan lagi ke nilai 0,38 koefisien performansi sebaliknya turun ke 0,24 .

Hal ini sesuai dengan hasil eksperimen ini dimana performansi terbaik ada pada nilai *solidity* 0,35 dengan 9 *blade* terpasang di turbin. Pengaruh dari meningkatnya nilai *solidity* adalah kemampuan dari turbin untuk mengekstraksi daya yang dihasilkan oleh air, tetapi ada titik dimana turbin sudah jenuh atau telah melewati batas maksimal dari kapasitas. Bila nilai *solidity* sudah mencapai batas ini performansi tidaklah terus naik, tetapi mengalami penurunan secara kuadratik. Maka dari itu diperlukan komposisi yang tepat agar nilai *solidity* menjadi optimal dan ekstraksi energi menjadi lebih banyak.

### **4.3 Performansi dan Efisiensi Turbin**

Percobaan demi percobaan tentang turbin telah dilakukan untuk meningkatkan kinerja dari turbin. Dengan menghitung nilai performansi dan efisiensi maka dapat dibandingkan hasil antara penelitian sebelum dan sesudah. Dalam sub-bab 4.3.1 dan 4.3.2 dapat dijabarkan hasil perhitungan performansi dan efisiensi turbin.

#### **4.3.1 Daya Mekanik dan Performansi turbin**

Turbin *vertical axis* merupakan salah satu jenis alat pengkonversi energi. Jenis turbin ini sudah banyak dibahas oleh penelitian sebelumnya. Tujuan awal dari penelitian ini adalah meningkatkan performansi dan efisiensi dari turbin sejenis yang sudah dibahas oleh penelitian sebelumnya.

Daya turbin adalah tingkat atau kemampuan dari turbin mengekstraksi energi yang tersedia di alam. Nilai daya mekanik dari turbin ini dapat diketahui dengan adanya data

dari turbin yaitu data RPM yang dikonversi menjadi kecepatan sudut ( $\omega$ ) dan rata-rata Torsi (T). Dari nilai daya mekanik tersebut dapat diketahui pula efisiensi dari turbin. Efisiensi dicari guna mengetahui seberapa banyak energi yang dapat di ekstraksi dari daya air.

Performa sebuah turbin diwakili oleh sebuah koefisien yang bernama koefisien performansi ( $C_p$ ),  $C_p$  merupakan hasil perhitungan efisiensi dari turbin itu sendiri dimana merupakan perbandingan daya yang dihasilkan turbin dengan daya yang dihasilkan oleh aliran air di kanal terbuka. Dengan menggunakan persamaan 2.5 Pada Tabel 4.7 merupakan nilai daya air dengan variasi kecepatan aliran.

**Tabel 4.8** Daya Air Di Umbulan

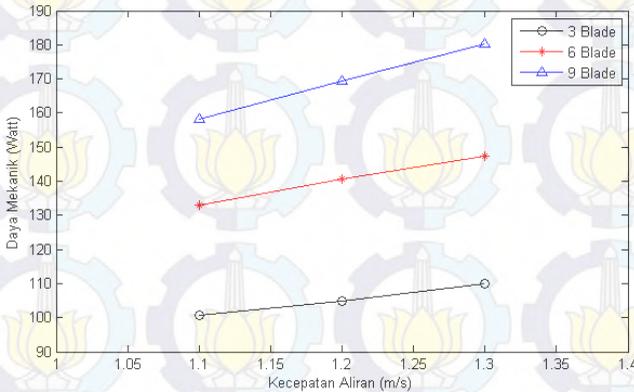
Kecepatan Aliran (m/s)	Daya Air (Watt)
1.1	425.9
1.2	553.0
1.3	703.0

Maka dengan persamaan 2.11 dapat diketahui daya mekanik turbin, yakni hasil perkalian data RPM yang dikonversi ke *rad/sec* dan torsi. Pada Tabel 4.8 merupakan hasil perhitungan daya mekanik turbin dengan variasi kecepatan aliran dan variasi jumlah *blade*.

**Tabel 4.9** Daya mekanik Turbin

Kecepatan Aliran (m/s)	Performansi (watt)		
	3 Blade	6 Blade	9 Blade
1.1 m/s	100.81	132.83	158.15
1.2 m/s	104.75	140.60	169.40
1.3 m/s	109.98	147.30	180.41

Untuk memudahkan analisa maka dari data diatas dapat dibuat sebuah grafik daya yang dihasilkan turbin terhadap kecepatan aliran. Berikut merupakan grafik antara daya keluaran turbin dan variasi kecepatan aliran.



**Gambar 4.3** Kurva Daya Mekanik Turbin

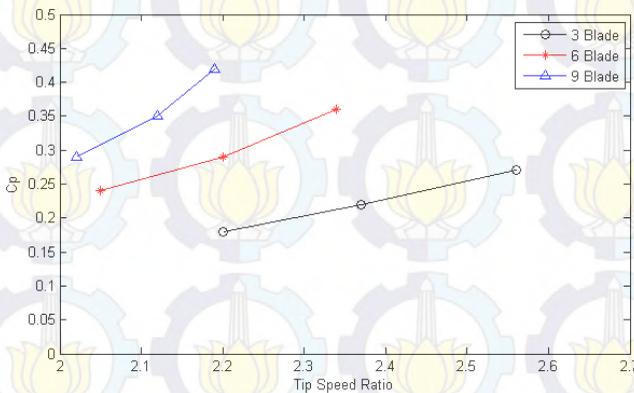
efisiensi dari turbin , pada penelitian sebelumnya dapat diplot grafik antara koefisiensi daya ( $C_p$ ) dan *Tip Speed Ratio* (TSR). TSR merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial di ujung *rotor* terhadap kecepatan fluida yang mengalir turbin tersebut. Setelah diketahui kecepatan tangensial turbin, daya air dan daya mekanik turbin dengan persamaan 2.13 dan 2.15 maka diperoleh nilai  $C_p$  dan TSR di setiap variasi kecepatan aliran dan variasi jumlah *blade*. Berikut merupakan hasil perhitungan nilai TSR dan  $C_p$  pada setiap variasi kecepatan aliran.

**Tabel 4.10** Nilai  $C_p$  dan TSR

Kecepatan Aliran	3 blade		6 blade		9 blade	
	$C_p$	TSR	$C_p$	TSR	$C_p$	TSR
1.1 m/s	0.27	2.56	0.36	2.34	0.42	2.19

1.2 m/s	0.22	2.37	0.29	2.20	0.35	2.12
1.3 m/s	0.18	2.20	0.24	2.05	0.29	2.02

Untuk mengetahui profil efisiensi tiap variasi kecepatan aliran dan variasi jumlah *blade* dilakukan dengan membandingkan nilai  $C_p$  dan TSR maka dapat dibuat grafik antara nilai  $C_p$  dan TSR. Pada Grafik 4.4 merupakan profil Performansi dari Turbin *Vertical Axis Straight Blade Cascade*.



**Gambar 4.4** Koefisien Performansi terhadap TSR Turbin

Kurva yang terbentuk pada Gambar 4.4 merepresentasikan meningkatnya performansi terhadap nilai TSR. Untuk turbin dengan variasi 9 *blade* efisiensi tertinggi diperoleh oleh nilai TSR 2,19 dengan nilai efisiensi 42% dan, nilai terendah pada nilai TSR 2,02. Pada turbin dengan 6 *blade* terpasang nilai efisiensi tertinggi terjadi di nilai TSR 2,34 dengan efisiensi 36%, nilai terendah yakni 24% dengan nilai TSR 2,05. Pada Turbin 3 *blade* nilai efisiensi tertinggi pada nilai TSR 2,56 dengan nilai efisiensi 27%, nilai efisiensi terendah yakni 18% dengan nilai TSR 2,2. Hal ini sesuai dengan kurva turbin *darrieus* oleh penelitian Faure TD

dan Takmasu Y. Pada kurva tersebut dijelaskan karakteristik turbin *darrieus* bahwa pada saat nilai TSR 2-6 nilai permormansi akan terus naik dengan profil eksponensial. Setelah mencapai nilai 6 dengan nilai efisiensi 50% maka nilai permormansi turbin akan turun secara eksponensial pula, sampai dengan nilai TSR 8 efisiensi turbin akan turun sampai 10%.

#### 4.3.2 Karakteristik Variasi Jumlah *Blade* Terhadap Efisiensi Turbin

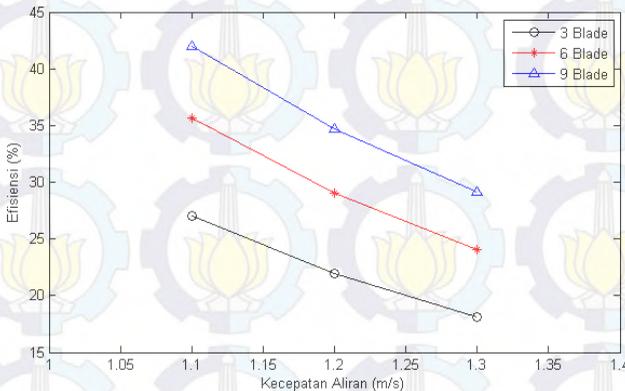
Pengembangan efisiensi turbin merupakan tujuan dari penelitian ini. Dengan diketahuinya efisiensi maka dapat diprediksi energi yang akan didapat dengan menggunakan turbin ini. Pada penambahan jumlah *blade* tidak selamanya akan menaikkan nilai efisiensi, karena pada suatu titik turbin akan jenuh dengan kata lain nilai *solidity* tinggi dan berubah karakteristiknya seperti benda pejal, pada masa seperti ini efisiensi turbin tidak akan lagi naik seiring dengan bertambahnya jumlah *blade*.

**Tabel 4.11** Nilai Efisiensi Turbin

Kecepatan Aliran (m/s)	Efisiensi Turbin (%)		
	3 <i>Blade</i>	6 <i>Blade</i>	9 <i>Blade</i>
1.1 m/s	27.00	35.61	42.02
1.2 m/s	21.96	29.08	34.69
1.3 m/s	18.16	24.01	29.11

Setelah didapatkan nilai efisiensi dari berbagai variasi jumlah *blade* maka dari data tersebut dapat olah lagi untuk mendapatkan *tren* penambahan efisiensi turbin dari pengaruh penambahan jumlah *blade*. Pada gambar 4.5 berisi tentang penurunan nilai efisiensi terhadap variabel kenaikan kecepatan aliran, hal ini disebabkan oleh kecenderungan turbin dalam ekstraksi energi terhadap nilai *solidity* turbin yaitu semakin cepat aliran yang lewat, energi yang didapat

selalu lebih besar, tetapi nilai RPM telah mencapai batas *steady*.



**Gambar 4.5** Kurva efisiensi turbin

Pada satu titik akan mencapai kesetimbangan, dimana bila sudah mencapai kesetimbangan maka bila kecepatan arus terus bertambah akan terjadi peristiwa *Overflow*. Peristiwa *Overflow* adalah ketika tinggi air sudah melebihi tinggi rangka turbin, sehingga akibatnya adalah aliran yang melewati turbin adalah konstan.

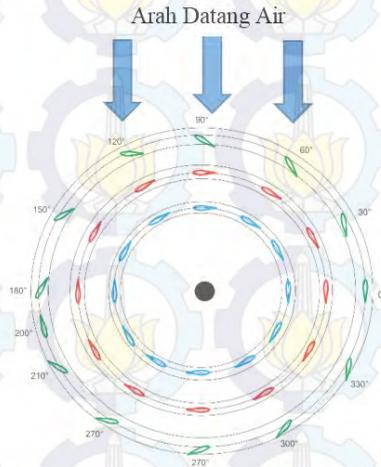
Pengaruh penambahan jumlah blade meningkatkan efisiensi. Rata – rata penambahan persentase dari variasi 3 *blade* ke 6 *blade* adalah 17.7 % dan penambahan efisiensi dari pemasangan 6 *blade* ke 9 *blade* adalah 13%. Dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak *blade* yang terpasang nilai peningkatan efisiensi turun, hal ini disebabkan semakin banyak *blade* terpasang maka semakin padat turbin tersebut.

Nilai Ekstraksi turbin juga mengalami peningkatan seiring dengan pertambahan jumlah *blade*. Hal ini dapat ditunjukkan oleh tabel 4.11 dimana semakin banyak jumlah *blade* maka kecepatan aliran keluaran turbin semakin melambat. Untuk variasi 3 *blade* pada kecepatan aliran inlet 1.22 m/s turun menjadi 1 m/s, untuk pemasangan 6 *blade*

kecepatan aliran turun menjadi 0.81 m/s, dan untuk pemasangan 9 *blade* kecepatan aliran di outlet adalah 0.69 m/s. hal ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan efisiensi disertai meningkatnya ekstraksi energi.

#### 4.4 Profil Posisi Pergerakan Blade

Eksperimen ini menggabungkan mekanisme *passive-pitch* dan *fixed-pitch*. Dengan perpaduan dua mekanisme ini diharapkan turbin dapat mengatasi masalah *self start* dan efisiensi turbin meningkat dari penelitian sebelumnya. Pergerakan *blade* sesungguhnya dapat dilihat pada penanda diatas turbin. Pada eksperimen ini *blade* dengan mekanisme *passive-pitch* terletak di urutan paling luar. Pada Gambar 4.1 merupakan mekanisme turbin dengan variasi 9 *blade* berputar dengan arah aliran tegak lurus dari sudut  $0^\circ$ .



**Gambar 4.6** Perubahan *Blade* disetiap Azimuth.

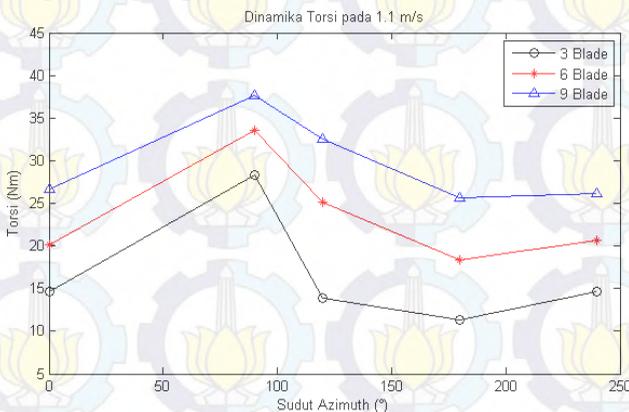
Mekanisme *passive-pitch* berguna untuk mengatasi masalah *self-start* yang buruk. Untuk jenis *blade passive-pitch*

pada sudut  $0^\circ$  dan  $200^\circ$  posisi *blade* berada ditengah – tengah *stopper*. Pada sudut *azimuth*  $0^\circ < azimuth < 200^\circ$  *blade* menyentuh *stopper* bagian dalam dengan sudut  $-20^\circ$ , sementara pada sudut *azimuth*  $200^\circ < azimuth < 360^\circ$  *blade* menyentuh *stopper* bagian luar dengan sudut  $20^\circ$ .

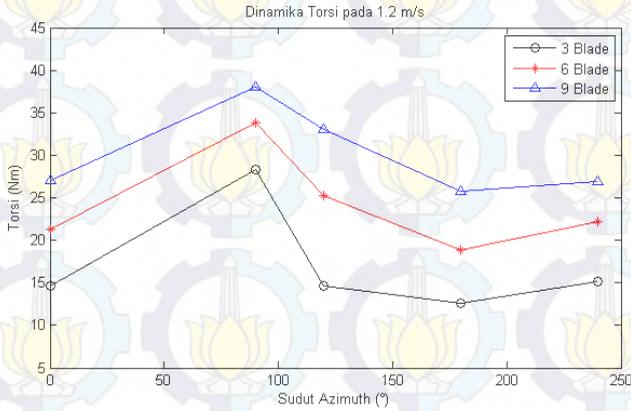
*Blade* akan mengikuti aliran air, sebagaimana dengan mekanisme ini akan ada gaya drag pada *blade* dan semakin kecilnya sudut serang. Dengan demikian posisi *stall* akan lebih kecil disbanding mekanisme *fixed-pitch* sehingga mekanisme ini dapat memperbaiki *self-start*. Pemasangan mekanisme *passive-pitch* ada kelebihan dan kekurangan. Dengan kelebihan memperbaiki *self-start* namun mekanisme ini memiliki kekurangan yaitu lebih mudah rusak hal ini disebabkan oleh pergerakan dari *blade* itu sendiri yang secara berulang membentur *stopper*, dengan demikian maka dipilih perpaduan antara *passive-pitch* dan *fixed-pitch*.

#### 4.5 Pola Torsi pada turbin Vertical Axis Cascade

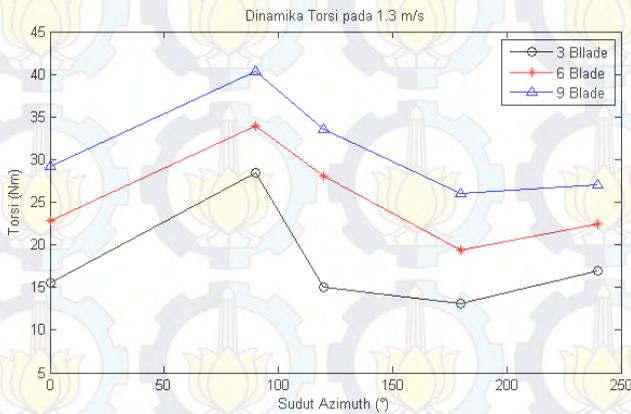
Dengan berputarnya turbin sebanyak  $360^\circ$  maka timbul Fluktuasi Torsi yang berkerja pada turbin tipe *cascade* terhadap posisi ( $\theta$ ). Fluktuasi ini diperlihatkan pada gambar 4.7 sampai dengan gambar 4.9



**Gambar 4.7** Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,1 m/s.



**Gambar 4.8** Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,2 m/s.



**Gambar 4.9** Pola Torsi pada Turbin dengan Variasi Kecepatan Aliran 1,3 m/s.

Turbin dengan mekanisme perpaduan antara *fixed-pitch* menghasilkan pola fluktuasi torsi yang periodik. Dalam satu rotasi terdapat tiga periode fluktuasi yang harmonik. Satu periode fluktuasi terjadi dalam posisi ( $\theta$ ) dengan interval  $120^\circ$ , karena dalam penelitian ini digunakan turbin *darrieus*

dengan tiga sudut. Dari data yang diperoleh, torsi paling besar terjadi di sudut *azimuth*  $90^\circ$  dan yang paling rendah terjadi di sudut *azimuth*  $180^\circ$ . Pada sudut  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ , dan  $240^\circ$  memiliki nilai torsi yang hampir serupa karena pada sudut tersebut bertepatan dengan interval  $120^\circ$ , sehingga posisi *blade* pada saat itu adalah sama satu dengan yang lain.

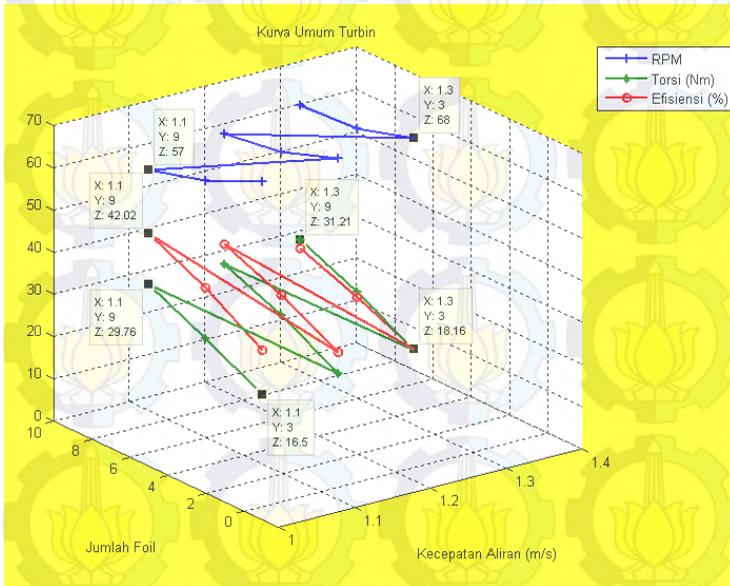
Pada sudut *azimuth*  $0^\circ$ ,  $120^\circ$ , dan  $240^\circ$  torsi yang didapat nilai yang tidak sama satu sama lain, hal ini berbeda dengan teori yang ada dimana pada sudut tersebut seharusnya nilai torsi sama persis satu sama lain. Hal ini disebabkan oleh error pengukuran yang terjadi pada alat ukur *Torque Wrench* dan fluktuasi dari kecepatan aliran itu sendiri terjadi gangguan sehingga mengakibatkan ketidak seragaman torsi yang dihasilkan.

Nilai Torsi tertinggi hasil pengukuran terjadi di sudut *azimuth*  $90^\circ$ . Sebaliknya pada sudut *azimuth*  $180^\circ$  torsi yang terukur paling kecil diantara sudut *azimuth* lainnya. Hal ini sesuai dengan teori dan pembuktian yang dilakukan oleh Simone Giorgetti[15] pada sudut *azimuth*  $90^\circ$  torsi meningkat karena sudut serang yang terjadi pada saat itu kecil dan berakibat pada meningkatnya gaya lift yang terjadi pada *blade*. Pada sudut *azimuth*  $180^\circ$  muka *blade* menghadap *outlet* sehingga tidak ada peningkatan kecepatan aliran pada *blade* tersebut dan tidak terjadi pula perbedaan tekanan.

#### 4.6 Pembahasan

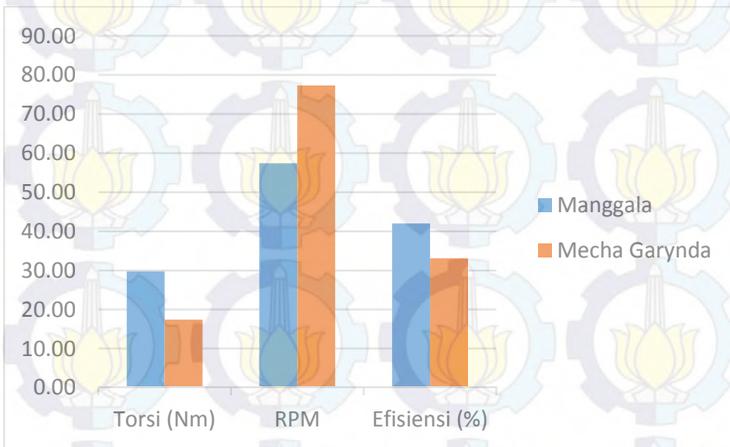
Berdasarkan hasil dan analisa pada sub-bab sebelumnya dapat diketahui Turbin *Darrieus* merupakan jenis turbin yang berkerja pada kecepatan aliran rendah hingga sedang. Jenis turbin ini juga terbukti lebih baik performanya dibanding jenis turbin vertikal lainnya yakni jenis *Savonius*. Pada eksperimen ini turbin merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya. Turbin ini menggunakan perpaduan mekanisme *passive-pitch* dan *fixed-pitch* yang dipasang secara *cascade* demi mendapat efisiensi yang lebih baik.

Percobaan ini dilakukan dengan variasi jumlah *blade* 3, 6, dan 9. Serta kecepatan aliran 1,1 m/s, 1,2 m/s, dan 1,3 m/s. pemilihan ini juga didukung oleh penelitian sebelumnya dimana menggunakan kecepatan aliran 1,1 m/s. Kesembilan variasi tersebut mempengaruhi hasil pengukuran RPM dan Torsi. Pada gambar 4.10 dapat dijelaskan bahwa pada kurva berwarna biru menunjukkan perubahan nilai RPM terhadap variasi kecepatan aliran dan variasi jumlah *blade*, nilai RPM akan naik bila kecepatan aliran meningkat dan akan turun ketika jumlah *blade* ditambah. Pada sumbu X merepresentasikan kecepatan aliran, sumbu Y merepresentasikan jumlah *blade*, dan untuk sumbu Z mencakup tiga variabel yakni efisiensi, torsi dan RPM yang dibedakan oleh warna. Warna merah merepresentasikan nilai efisiensi dimana semakin banyak jumlah *blade* dan semakin kecil nilai kecepatan aliran maka efisiensi turbin semakin tinggi. Warna hijau menunjukkan nilai Torsi. terlihat bahwa semakin cepat aliran air dan semakin banyak jumlah *blade* maka nilai torsi akan meningkat



**Gambar 4.10** Kurva keseluruhan Turbin Cascade

Dengan mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mecha Garynda [8] yang meneliti tentang peningkatan efisiensi turbin sumbu vertikal maka dapat dibuat perbandingan nilai Torsi, RPM, dan Efisiensi turbin antara turbin dengan variasi sudut pada mekanisme sudut *pitch* dan pada penelitian ini dengan variasi jumlah *blade*. Pada kasus ini akan dibandingkan nilai di satu kecepatan aliran yaitu 1,1 m/s dan satu variasi jumlah *blade* yaitu variasi dengan jumlah *blade* 9, dimana yang memiliki nilai efisiensi terbaik. Pada Grafik 4.10 merupakan perbandingan nilai Torsi, RPM, dan Efisiensi pada penelitian ini dan pada penelitian sebelumnya.



**Gambar 4.11** Perbandingan Hasil pengukuran di kecepatan aliran yang sama

Dari kurva batang diatas dapat ketahui bahwa untuk nilai Torsi mengalami peningkatan dari sebelumnya 17, 41 Nm menjadi 29, 76 Nm, nilai RPM mengalami penurunan dari nilai 77, 34 menjadi 57, 4, dan nilai Efisiensi Turbin Meningkatkan dari 33, 12% menjadi 42%. Adanya variasi jumlah *blade* maka efisiensi turbin dapat meningkat sebanyak 8, 8%.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengukuran, analisa, dan pembahasan yang telah dilakukan maka kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah:

1. Pengaruh Kecepatan Aliran yang dilakukan pada saat uji coba berpengaruh pada peningkatan nilai Torsi dan RPM. Semakin tinggi nilai Kecepatan Aliran maka semakin tinggi nilai Torsi dan RPM.
2. Jumlah blade yang banyak akan meningkatkan luas sapuan turbin, yang berakibat pada meningkatnya nilai torsi dan menurunnya nilai RPM
3. Dari Penelitian ini didapatkan nilai efisiensi tertinggi turbin 42% dengan variasi 9 *blade*.
4. Pada kecepatan aliran yang sama yakni 1.1 m/s dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, turbin pada penelitian ini dapat meningkatkan efisiensi sebesar 8.8 %.

#### 5.2 Saran

Beberapa saran yang perlu dipertimbangkan setelah dilakukan eksperimen mengenai variasi jumlah *blade* dan perpaduan antara variabel *passive-pitch* dan *fixed-pitch* adalah

1. Mencari tempat Pengambilan data dengan lokasi yang mempunyai nilai range kecepatan aliran yang lebih besar.
2. Untuk variasi jumlah blade lebih baik digunakan pemasangan 9 *blade*.
3. Pemasangan mekanisme variabel *active-pitch* dapat digunakan untuk meningkatkan performansi dan efisiensi turbin.



*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Idris, Muhammad, "*Dorong Pemanfaatan Energi Laut Menteri ESDM Luncuran Hari Nusantara*", DetikFinance, 2015.
- [2] Trimulyono, Andi, "*Perancangan Turbin Arus Laut Untuk daerah Pesisir Pantai Tipe Kobold dengan Bilah HLIFT dan NACA 0018 yang dimofikasi dengan Computational Fluid Dynamics*", Universitas Diponegoro, Semarang, 2012.
- [3] Shah Khalid, Syed. 2013. "Difference between Fixed and Variable Pitch Vertical Axis Tidal Turbine-Using CFD Analysis in CFX". Harbin Engineering University, China. Maxwell Scientific Organization. Research Journal Applied Science, Engineering and Technology 5(1); 319-325, 2013.
- [4] Hantoro, Ridho, "*An Experimental Investigation of Passive Variable Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine*", Institut Teknologi Bandung, Bandung, 2011
- [5] Lago L.I, Ponta F.L, Chen.L. 2010. "*Advances and trends in hydrokinetic turbine systems*". Mechanical Engineering, Michigan Technological University, USA. ELSEVIER, Energy for Sustainable Development 14 (2010) 287-296.
- [6] Khan, M.J,"*Hydrokinetic energi conversion systems and assessment of horizontal and vertikal axis turbines for river and tidal applications: A technology status review*" Power system technologies, Canada, 2009
- [7] Calcagno, G., "An Experimental Investigation and a Theoretical and Computational Methodology to Study an Innovative Technology for Marine Current Exploitation: the Kobold Turbine", Bollettino Della Comunità Scientifica in Australasia, December 2006
- [8] Garynda Adetama Gunawan, Mecha. 2014. "Studi Eksperimental Mekanisme Passive-Pitch Dengan

Flapping Wing Pada Turbin Vertikal Aksis Tipe Darrieus". Sukolilo, Surabaya.

- [9] Direktorat Jenderal Pengelolaan Ruang Laut Kementerian Kelautan dan Perikanan.2003. REKAPITULASI DATA PULAU DI INDONESIA SELISIH JUMLAH PULAU SEBELUM DAN SESUDAH VERIFIKASI, <[http://www.ppk-kp3k.kkp.go.id/info-ppk/public\\_html/assets/uploads/files/11%20Selisih%20Jumlah%20Pulau%20Sebelum%20dan%20Sesudah%20Verifikasi.pdf](http://www.ppk-kp3k.kkp.go.id/info-ppk/public_html/assets/uploads/files/11%20Selisih%20Jumlah%20Pulau%20Sebelum%20dan%20Sesudah%20Verifikasi.pdf)>.
- [10] Kirke, B.K. 2005. Developments in ducted current turbines <[www.cyberiad.net](http://www.cyberiad.net)>.
- [11] R Hantoro, I Utama, E Erwandi, A Sulisetyono.2011. Journal of Engineering and Technological Sciences 43 (1), 27-4
- [12] Koksai, Murat .2004. self-starting darrieus wind turbine.
- [13] Mariasa, Kadek Gilang..2013. "Karakteristik airfoil NACA "00XX" dengan variasi sudut serang". Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali.
- [14] Jing, Fengmei.2014. "Experimental research on tidal current vertical axis turbine with variable-pitchblades". Deep Water Engineering Research Centre, Ocean Engineering88(2014)228–241.
- [15] Giorgetti, Simone.2015. "CFD investigation on the aerodynamic interferences between medium-solidity Darrieus Vertical Axis Wind Turbines" Department of Energy, Systems, Territory and Constructions Engineering, University of Pisa, I.go Lucio Lazzarino, 56122 Pisa, Italy.

## Lampiran A

### Standart Operating Procedure Pengambilan data

1. Persiapkan turbin yang Akan diuji, sesuaikan dengan variasi yang ingin diambil datanya.
2. Pasang foil menggunakan Mur dan baut ukuran 10.
3. Persiapkan lokasi pengambilan data yang sudah diukur menggunakan alat ukur arus. Rentang waktu antara pengambilan data kecepatan air dan pengambilan data turbin harus kurang dari 10 menit.
4. Pastikan arm turbin sudah terikat ke rangka. Angkat turbin menggunakan 2 batang bambu dan masukan turbin ke kanal dengan posisi roda turbin di posisi outlet.
5. Pasang *Torque Wrench* di shaft turbin dan lepaskan tali antara arm dan kerangka turbin.
6. Sesuaikan arm turbin di sudut azimuth yang ingin diambil datanya. Setelah sesuai antara sudut azimuth turbin baca nilai torsi sebanyak 10 kali dengan jeda 1 detik
7. Ikat kembali arm ke kerangka turbin dan lepaskan *Torque Wrench*. Setelah itu lepas tali dan ukur nilai RPM dengan Tachometer.
8. Lakukan setiap variasi dengan melepas/memasang *blade* menggunakan kunci pas dan kunci ring 10.



*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*

## Lampiran B

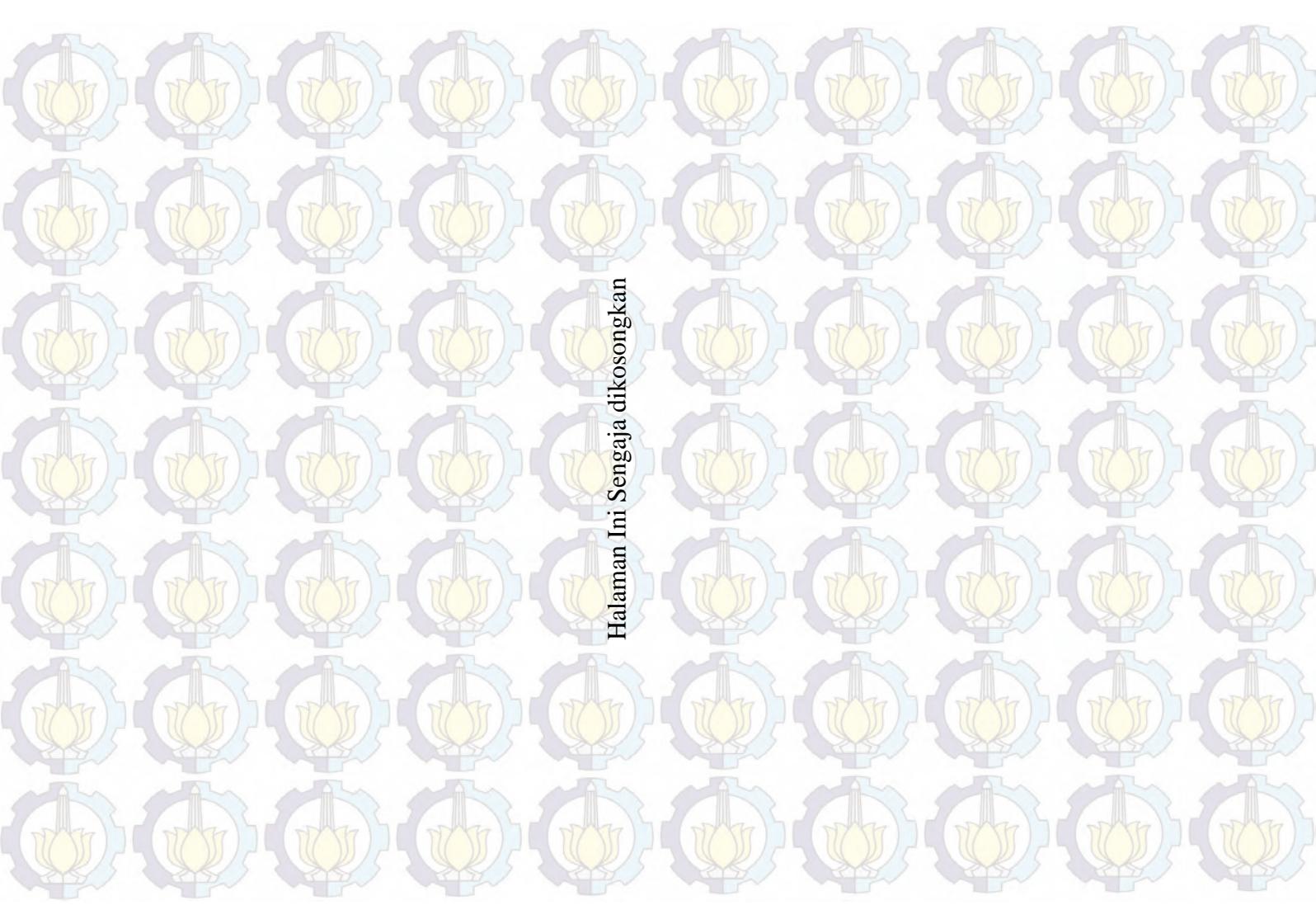
**Tabel B.1 Hasil Pengukuran Torsi**

Variasi Kecepatan Aliran 1.1 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.2 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.3 m/s			
Sudut Azimuth	Torsi (Nm)			Sudut Azimuth	Torsi (Nm)			Sudut Azimuth	Torsi (Nm)		
	3 foil	6 foil	9 foil		3 foil	6 foil	9 foil		3 foil	6 foil	9 foil
0°	12.67	20.46	26.62	0°	14.53	20.74	26.15	0°	15.54	23.29	28.83
	13.55	19.15	26.62		15.14	21.16	25.88		16.83	23.11	28.78
	15.33	19.67	26.62		14.71	21.75	29.53		12.74	23.44	29.54
	15.39	20.55	26.62		15.30	20.73	28.66		15.86	23.10	29.39
	15.45	21.04	26.62		15.40	22.58	27.31		15.32	25.79	29.75
	14.87	18.88	26.62		14.07	20.52	25.74		13.69	21.83	30.78
	15.18	21.26	26.62		14.82	21.33	26.13		14.57	21.15	30.22
	14.52	20.66	26.62		12.87	21.66	26.82		15.34	21.86	27.72
	15.86	19.93	26.62		16.15	21.09	27.79		18.58	21.91	26.67
13.64	19.80	26.62	14.37	21.88	25.67	17.77	22.57	29.90			
<b>Rata-rata</b>	<b>14.64751</b>	<b>20.14034</b>	<b>26.62</b>	<b>Rata-rata</b>	<b>14.73531</b>	<b>21.34378</b>	<b>26.96813</b>	<b>Rata-rata</b>	<b>15.62429</b>	<b>22.80441</b>	<b>29.15858</b>
90°	27.78	33.9	34.28	90°	27.08	33.88	38.19	90°	26.66	33.65	39.70
	27.70	33.9	35.14		29.00	35.48	37.18		28.57	35.01	41.14
	28.02	33.9	36.49		27.50	33.14	37.91		28.54	34.63	39.47
	28.05	33.9	38.98		27.27	34.78	38.34		30.73	33.79	40.97
	28.83	33.9	38.63		29.63	34.31	37.10		28.43	33.13	39.48
	29.53	33.6	38.81		27.88	33.77	37.71		27.99	32.96	40.18
	28.47	33.28	38.81		28.16	32.94	38.35		28.74	33.73	40.97
	27.79	33.5	38.5		29.20	33.72	36.16		28.75	33.56	39.59
	28.63	33.28	38.81		28.30	33.91	39.04		28.57	33.59	39.56
28.18	33.3	38.81	29.33	32.53	40.42	27.89	34.98	42.00			
<b>Rata-rata</b>	<b>28.29723</b>	<b>33.646</b>	<b>37.726</b>	<b>Rata-rata</b>	<b>28.33464</b>	<b>33.84555</b>	<b>38.03936</b>	<b>Rata-rata</b>	<b>28.48604</b>	<b>33.90418</b>	<b>40.30631</b>

Variasi Kecepatan Aliran 1.1 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.2 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.3 m/s			
Sudut	Torsi (Nm)			Sudut	Torsi (Nm)			Sudut	Torsi (Nm)		
Azimuth	3 foil	6 foil	9 foil	Azimuth	3 foil	6 foil	9 foil	Azimuth	3 foil	6 foil	9 foil
120°	12.97	26.95	32.64	120°	15.26	25.55	33.49	120°	15.6	29.08	33.00
	14.95	25.36	32.64		13.98	23.95	31.52		14.2	29.01	34.50
	14.31	23.96	32.64		14.73	25.40	31.98		15.2	27.35	32.38
	14.14	23.01	32.64		13.26	24.25	32.55		14.2	28.26	33.72
	14.52	24.87	32.64		16.18	26.52	33.11		15.3	27.06	33.19
	14.26	25.91	32.64		15.24	24.97	34.13		16.0	26.68	34.50
	13.06	25.52	32.64		15.09	26.64	32.71		13.0	28.92	33.19
	13.84	25.61	32.64		13.42	24.57	34.26		15.6	28.00	34.60
	13.85	24.62	32.64		14.62	25.59	33.48		16.1	27.95	32.53
13.47	25.34	32.64	13.74	24.94	34.17	14.6	28.91	34.06			
Rata-rata	13.93564	25.11	32.64	Rata-rata	14.55278	25.23607	33.14034	Rata-rata	14.98594	28.12	33.56746
180°	10.75	17.05	25.10	180°	13.13	18.02	24.92	180°	12.61	18.95	24.12
	11.05	18.41	26.35		12.34	19.61	26.20		12.90	20.70	25.74
	11.26	18.68	25.32		11.52	18.95	24.48		13.38	18.49	26.31
	11.49	18.86	26.93		13.16	17.88	25.28		12.68	19.00	25.71
	11.68	17.31	26.24		13.82	18.37	25.41		13.05	19.92	26.38
	12.01	18.45	25.31		12.71	19.25	26.40		13.18	19.15	27.54
	8.97	18.10	25.35		12.46	18.01	26.94		13.67	20.40	26.42
	11.54	18.83	25.35		12.69	19.98	26.30		12.98	20.03	25.77
	13.24	18.54	24.39		11.90	18.36	25.63		13.91	19.29	26.14
10.93	18.90	25.98	12.51	20.81	26.82	12.52	18.22	25.93			
Rata-rata	11.29338	18.31167	25.63115	Rata-rata	12.62312	18.92301	25.83677	Rata-rata	13.08913	19.41634	26.00599

## Lanjutan Tabel B.1

Variasi Kecepatan Aliran 1.1 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.2 m/s				Variasi Kecepatan Aliran 1.3 m/s			
Sudut Azimuth	Torsi (Nm)			Sudut Azimuth	Torsi (Nm)			Sudut Azimuth	Torsi (Nm)		
	3 foil	6 foil	9 foil		3 foil	6 foil	9 foil		3 foil	6 foil	9 foil
240°	16.48	20.87	27.51	240°	14.52	22.60	27.12	240°	19.03	22.01	25.41
	13.92	20.85	25.47		14.75	23.05	27.57		16.73	23.60	27.11
	14.32	22.01	25.55		14.64	21.80	27.41		15.94	22.20	27.79
	14.09	18.88	25.81		15.31	22.33	26.01		16.71	23.50	27.00
	13.63	20.50	23.68		14.81	21.76	27.76		15.80	22.30	27.09
	14.61	19.73	28.06		16.51	22.23	26.34		15.88	20.82	26.62
	14.53	20.62	26.95		15.01	22.44	26.40		17.49	21.01	25.52
	16.33	21.65	25.87		16.50	21.38	27.18		17.41	22.50	26.96
	14.55	21.83	27.99		13.98	22.27	26.69		17.42	23.80	27.96
13.74	19.99	24.91	15.23	22.60	26.87	16.67	22.29	28.74			
Rata-rata	14.6187	20.69067	26.17861	Rata-rata	15.12558	22.24622	26.93533	Rata-rata	16.90702	22.40308	27.01883



Halaman Ini Sengaja dikosongkan

**Tabel B.2 Hasil Pengukuran RPM**

Kecepatan Aliran (m/s)	RPM		
	3 blade	6 blade	9 blade
1.1	66	60	58
	67	61	59
	66	62	57
	68	62	58
	69	62	57
	66	61	56
	67	63	57
	68	60	56
	69	62	59
	67	61	57
Rata-rata	67.3	61.4	57.4
1.2	69	65	61
	68	64	62
	67	65	57
	67	63	62
	67	64	61
	68	62	58
	69	62	63
	69	63	62
	67	60	60
Rata-rata	67.88889	63.11111	60.66666667
1.3 m/s	69	63	62
	68	63	63
	68	64	63
	68	65	63

**Lanjutan Tabel B.2**

<b>Kecepatan Aliran (m/s)</b>	<b>RPM</b>		
	<b>3 blade</b>	<b>6 blade</b>	<b>9 blade</b>
	69	64	61
	68	64	62
	69	62	63
	68	64	64
	69	62	62
	68	65	63
<b>Rata-rata</b>	<b>68.4</b>	<b>63.6</b>	<b>62.6</b>

## Lampiran C Hasil Perhitungan nilai efisiensi Turbin

Diketahui :

$$\rho = \text{massa jenis} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$A = \text{luas penampang turbin} = 0.64 \text{ m}^2$$

$$r = \text{panjang lengan} = \text{radius turbin} = 0.4 \text{ m}$$

Nilai Torsi dan RPM terhadap kecepatan aliran air sebagai berikut:

Kecepatan Aliran (m/s)	3 Blade		6 Blade		9 Blade	
	Torsi (Nm)	RPM	Torsi (Nm)	RPM	Torsi (Nm)	RPM
1.1	16.56	67.3	23.58	61.4	29.76	57.4
1.2	17.07	67.89	24.32	63.11	30.18	60.67
1.3	17.82	68.4	25.33	63.6	31.21	62.6

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 3 blade dan kecepatan aliran 1.1 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi \text{RPM}}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 67.3}{60} = 7.05 \text{ rad/s}$$

$$P_{\text{turbin}} = \tau * \omega$$

$$P_{\text{turbin}} = 16.56 * 7.05 = 116.7 \text{ Watt}$$

$$P_{\text{air}} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{\text{air}} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 425.9 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{116.7}{425.9} = 0.274$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.274 * 100 = 27.4\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 6 *blade* dan kecepatan aliran 1.1 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 61.4}{60} = 6.43 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbine} = \tau * \omega$$

$$P_{turbine} = 23.58 * 6.43 = 151.7 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 425.9 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{151.7}{425.9} = 0.356$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.356 * 100 = 35.6\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 9 *blade* dan kecepatan aliran 1.1 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 57.4}{60} = 6.01 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbin} = \tau * \omega$$

$$P_{turbin} = 29.76 * 6.01 = 179.0 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 425.9 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{179.0}{425.9} = 0.42$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.42 * 100 = 42\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 3 *blade* dan kecepatan aliran 1.2 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 67.9}{60} = 7.11 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbine} = \tau * \omega$$

$$P_{turbine} = 17.07 * 7.11 = 121.4 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 553.0 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{121.4}{553.0} = 0.220$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.220 * 100 = 22.0\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 6 blade dan kecepatan aliran 1.2 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 63.1}{60} = 6.61 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbine} = \tau * \omega$$

$$P_{turbine} = 24.32 * 6.61 = 160.8 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 553 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbine}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{160.8}{553.0} = 0.291$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.291 * 100 = 29.1\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 9 *blade* dan kecepatan aliran 1.2 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 60.7}{60} = 6.36 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbine} = \tau * \omega$$

$$P_{turbine} = 30.18 * 6.36 = 191.8 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 533.0 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{191.8}{553.0} = 0.347$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.347 * 100 = 34.7\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 3 blade dan kecepatan aliran 1.3 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi \text{RPM}}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 68.4}{60} = 7.17 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbin} = \tau * \omega$$

$$P_{turbin} = 17.82 * 7.17 = 127.7 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 703 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{127.7}{703} = 0.182$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.182 * 100 = 18.2\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 6 blade dan kecepatan aliran 1.3 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 63.6}{60} = 6.66 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbin} = \tau * \omega$$

$$P_{turbin} = 25.33 * 6.66 = 168.8 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 703.0 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{168.8}{703.0} = 0.24$$

$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.24 * 100 = 24.0\%$$

Efisiensi Turbin Untuk variasi jumlah blade 9 blade dan kecepatan aliran 1.3 m/s adalah:

$$\omega = \frac{2\pi RPM}{60}$$

$$\omega = \frac{2 * \pi * 62.6}{60} = 6.56 \text{ rad/s}$$

$$P_{turbin} = \tau * \omega$$

$$P_{turbin} = 31.21 * 6.56 = 204.7 \text{ Watt}$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

$$P_{air} = \frac{1}{2} * 1000 * 0.64 * 1.1^3 = 703.0 \text{ Watt}$$

$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{air}}$$

$$C_p = \frac{204.7}{703.0} = 0.291$$


$$\eta = C_p * 100$$

$$\eta = 0.291 * 100 = 29.1\%$$

## Biodata Penulis



Penulis lahir di Jakarta 23 Desember 1993. Penulis menempuh pendidikan di SD Kartika XI-1 lulus tahun 2005, SMP Global Mandiri lulus tahun 2008, dan SMA Labschool Kebayoran lulus tahun 2011. Pendidikan sarjana mulai ditempuh di jurusan teknik fisika ITS tahun 2011. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif berkegiatan di ranah akademik sebagai asisten laboratorium pengukuran fisis selama periode 2013-2015. Selain itu penulis juga aktif di kejuaraan nasional seperti LKTI dan Program Kreatifitas Mahasiswa (PKM), serta kejuaraan Internasional di Ajang Mobil Surya di Australia. Bidang minat yang ditekuni penulis adalah elektronika, Instrumentasi, dan energi terbarukan. Semoga dengan adanya buku ini penulis berharap agar penelitian ini dapat bermanfaat untuk penelitian selanjutnya dan berdampak bagi perkembangan ilmu pengetahuan Negara Indonesia. Untuk menghubungi penulis dapat menggunakan email [Seno.manggala@gmail.com](mailto:Seno.manggala@gmail.com) .



*Halaman Ini Sengaja dikosongkan*