



SKRIPSI ME 141501

**OPTIMASI PELETAKAN
VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT**

GALUH CHANDRA KUSUMA
NRP 4213 105 022

Dosen Pembimbing
Irfan Syarif Arief, ST., MT

JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2015



FINAL PROJECT ME 141501

***OPTIMIZATION LAYING
OF VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
FOR OCEAN CURRENT POWER PLANT***

GALUH CHANDRA KUSUMA
NRP 4213 105 022

Supervisor
Irfan Syarif Arief, ST., MT

*DEPARTMENT OF MARINE ENGINEERING
Faculty of Marine Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya
2015*

LEMBAR PENGESAHAN

OPTIMASI PELETAKAN
VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Bidang Studi *Marine Manufacture and Design* (MMD)
Program S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

GALUH CHANDRA KUSUMA
NRP. 4213 105 022

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :



Irfan Syarif Arief, ST., MT
(1969 1225 1997 02 1001)

SURABAYA
Juli, 2015

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN
OPTIMASI PELETAKAN
VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Pada
Bidang Studi *Marine Manufacture and Design* (MMD)
Program S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

GALUH CHANDRA KUSUMA
NRP. 4213 105 022

Disetujui oleh Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan :



DR. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng
(1956 0807 1984 03 1001)

SURABAYA
Juli, 2015

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**OPTIMASI PELETAKAN
VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ARUS LAUT**

Nama Mahasiswa : Galuh Chandra Kusuma
NRP : 4213 105 022
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : 1. Irfan Syarif Arief, ST. MT

ABSTRAK

Vertical axis multiple turbine merupakan instalasi beberapa turbin sumbu vertikal. Pada pembangkit listrik tenaga arus laut untuk instalasi *vertical axis multiple turbine* dibutuhkan sebuah *array*. *Array* adalah susunan konfigurasi dari beberapa turbin yang terpasang dalam satu kesatuan dengan formasi dan jarak antar turbin yang telah direncanakan. Perancangan *array of vertical axis multiple turbine* selain untuk meningkatkan performa turbin juga untuk menekan biaya *monitoring* dan perawatan oleh sebab itu perlu dilakukan penentuan jarak antar turbin, berdasarkan jarak *wake* terpanjang yang mencapai 1,15 m pada kecepatan 2,5 m/s maka ditentukan jarak antar domain tabung pada turbin sebesar 3D (1,2 m) dan dilakukan simulasi dengan *software* ansys yang menghasilkan performansi tertinggi pada array 2 saat kecepatan arus laut 2,5 m/s dengan nilai sebagai berikut *force* 1326,9438 N, *torque* 265,3888 Nm dan *power* 2455,5183 Watt.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**OPTIMIZATION LAYING
OF VERTICAL AXIS MULTIPLE TURBINE
FOR OCEAN CURRENT POWER PLANT**

Student Name : Galuh Chandra Kusuma
NRP : 4213 105 022
Department : Department of Marine Engineering
Supervisor : 1. Irfan Syarif Arief, ST. MT

ABSTRACT

Multiple vertical axis turbine is several vertical axis turbine installation. At the power plant of ocean currents for the installation of multiple vertical axis turbine required a array. Array is configuration arrangement of several turbines that installed in a single unit with the formation and the distance between turbines that planned. Design array of multiple vertical axis turbine in addition to improving the performance of the turbine is also to reduce the cost of monitoring and maintenance therefore necessary to determine the distance between turbines, based on the longest distance wake reached 1.15 m at a speed of 2.5 m /s so determined distance between tube domain at the turbine of 3D (1.2 m) and conducted simulations with ANSYS software that produce the highest performance on the array 2 when the speed of ocean currents 2,5 m / s with the following values force 1326.9438 N, torque 265.3888 Nm and power 2455.5183 Watt.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayahnya Tugas Akhir ini yang berjudul **“Optimasi Peletakan *Vertical Axis Multiple Turbine* Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut”** dapat diselesaikan sesuai dengan harapan. Laporan Tugas Akhir ini diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan studi Strata-1 di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan.

Dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang tak terhingga atas bantuan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yang penulis sampaikan kepada :

1. Bapak Dr. Ir. A.A. Masroeri, M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Sistem Perkapalan yang telah memberikan manajemen yang baik kepada mahasiswa.
2. Bapak Irfan Syarif Arief, ST. MT. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang sudah banyak memberikan ilmu, mengarahkan dan membimbing dalam penyelesaian Tugas Akhir ini dengan baik.
3. Kedua orang tua dan seluruh keluarga yang telah mengingatkan dan memberikan support materiil dan doa dari beliau agar Tugas Akhir dapat penulis selesaikan dengan baik.
4. Civitas Akademik jurusan Teknik Fisika, Teknik Mesin beserta laborannya yang telah membantu dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
5. Mas Indra, Mas Syafi', Mas Pandhika, Agus, Gusti, Achwan, Elbas, Pepi, Aji, Herlan, Intan, Angga, Fivid, Fauzan, Aziz dan seluruh pengurus laboratorium MMD yang telah membantu dan memberi semangat dalam pengerjaan tugas akhir ini.

6. Teman-teman mahasiswa lintas jalur jurusan Teknik Sistem Perkapalan 2013, serta seluruh teman dari Jurusan Teknik Sistem Perkapalan yang terkait baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari sempurna sehingga penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun ke arah yang lebih baik. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penulisan	3
1.5 Manfaat Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Umum.....	5
2.2 Energi Laut.....	5
2.3 Konsep Turbin.....	9
2.4 Klasifikasi Turbin Air	9
2.5 Tipe - Tipe Turbin Arus Laut Sumbu.....	12
2.5.1 Konsep Savonius.....	12
2.5.2 Konsep Darrieus	13
2.5.3 Konsep Gorlov.....	14
2.6 Karakteristik Airfoil Aerodinamika.....	15
2.7 Gaya Angkat dan Seret pada VATT.....	17
2.8 Daya	19
2.9 Array Turbine	20
2.10 Computational Fluid Dynamic (CFD).....	21
2.11 Pemodelan Ansys	21

BAB III METODOLOGI	25
3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	25
3.2 Studi Literatur	25
3.3 Pengumpulan Data	25
3.4 Perancangan Model	26
3.5 Meshing.....	31
3.6 Pengaturan Kondisi Simulasi	32
3.7 Pengujian Model.....	33
3.8 Analisa Data dan Pembahasan	33
3.9 Evaluasi	34
3.10 Pengambilan Kesimpulan dan Saran.....	34
3.11 Diagram Alur Pengerjaan Tugas Akhir.....	35
 BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	 37
4.1 Validasi Hasil Simulasi	37
4.1.1 Validasi Kecepatan Sudut Turbin.....	37
4.2 Validasi Boundary Condition dan Meshing	43
4.3 Turbin Tunggal	44
4.3.1 Gaya Torsi dan Daya untuk Single Turbin	44
4.3.2 Profil Wake untuk Single Turbine	53
4.4 Multiple Turbine Array 1	53
4.4.1 Perancangan Array 1.....	55
4.4.2 Gaya Torsi dan Daya untuk Multiple Turbine.....	56
4.4.3 Profil Wake untuk Multiple Turbine Array 1	63
4.5 Multiple Turbine Array 2	65
4.5.1 Perancangan Array 2.....	65
4.5.2 Gaya Torsi dan Daya untuk Multiple Turbine.....	66
4.5.3 Profil Wake untuk Multiple Turbine Array 2	73
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 77
5.1 Kesimpulan.....	77
5.2 Saran.....	78

DAFTAR PUSTAKA	79
LAMPIRAN	81
BIODATA PENULIS	103

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

3.1 Kondisi batas simulasi.....	33
4.1 Tabel perbandingan hasil eksperimen	39
4.2 Tabel kecepatan sudut turbin.....	40
4.3 Tabel hasil simulasi kecepatan sudut	43
4.4 Tabel perbandingan torsi	44
4.5 Tabel perhitungan power.....	46

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR GAMBAR

2.1	Aplikasi energi pasang surut	6
2.2	Aplikasi energi angin.....	7
2.3	Aplikasi energi arus laut.....	8
2.4	Aplikasi energi panas laut	8
2.5	Aplikasi energi gelombang	9
2.6	Turbin dengan sumbu vertikal.....	11
2.7	Turbin dengan sumbu horisontal.....	12
2.8	Turbin savonius	13
2.9	Turbin darrieus	14
2.10	Turbin gorlov.....	15
2.11	Bentuk penampang airfoil	15
2.12	Pengaruh angle of attack (α).....	17
2.14	Gaya – gaya yang bekerja pada blade	18
3.1	Konsep model vertical axis tidal turbine	26
3.2	Modeling turbine VATT	27
3.3	Modeling domain tabung.....	28
3.4	Modeling domain laut	29
3.5	Modeling array 1	30
3.6	Modeling array 2	30
3.7	Hasil meshing.....	32
3.8	Diagram alur pengerjaan tugas akhir.....	35
4.1	Grafik hubungan kecepatan arus laut	38
4.2	Indikasi velocity bahwa turbin menyerap energi.....	40
4.3	Indikasi preassure bahwa turbin menyerap energi	41
4.4	Indikasi velocity bahwa turbin memberi energi	41
4.5	Indikasi preassure bahwa turbin memberi energi.....	42
4.6	Grafik hubungan force dengan sudut	47
4.7	Grafik hubungan torque dengan sudut	47
4.8	Grafik hubungan power dengan sudut.....	48
4.9	Grafik hubungan force dengan sudut	48
4.10	Grafik hubungan torque dengan sudut	49
4.11	Grafik hubungan power dengan sudut.....	49
4.12	Grafik hubungan force dengan sudut	50

4.13	Grafik hubungan torque dengan sudut	50
4.14	Grafik hubungan power dengan sudut.....	51
4.15	Grafik hubungan force dengan kecepatan	52
4.16	Grafik hubungan torque dengan kecepatan	52
4.17	Grafik hubungan power dengan kecepatan	53
4.18	Profil wake untuk single turbine	55
4.19	Formasi array 1.....	56
4.20	Grafik hubungan force dengan sudut	57
4.21	Grafik hubungan torque dengan sudut	57
4.22	Grafik hubungan power dengan sudut.....	58
4.23	Grafik hubungan force dengan sudut	58
4.24	Grafik hubungan torque dengan sudut	59
4.25	Grafik hubungan power dengan sudut.....	59
4.26	Grafik hubungan force dengan sudut	60
4.27	Grafik hubungan torque dengan sudut	60
4.28	Grafik hubungan power dengan sudut.....	61
4.29	Grafik hubungan force dengan kecepatan	62
4.30	Grafik hubungan torque dengan kecepatan	62
4.31	Grafik hubungan power dengan kecepatan	63
4.32	Profil wake untuk multiple turbine array 1.....	65
4.33	Formasi array 2.....	66
4.34	Grafik hubungan force dengan sudut	67
4.35	Grafik hubungan torque dengan sudut	67
4.36	Grafik hubungan power dengan sudut.....	68
4.37	Grafik hubungan force dengan sudut	68
4.38	Grafik hubungan torque dengan sudut	69
4.39	Grafik hubungan power dengan sudut.....	69
4.40	Grafik hubungan force dengan sudut	70
4.41	Grafik hubungan torque dengan sudut	70
4.42	Grafik hubungan power dengan sudut.....	71
4.43	Grafik hubungan force dengan kecepatan	72
4.44	Grafik hubungan torque dengan kecepatan	72
4.45	Grafik hubungan power dengan kecepatan	73
4.46	Profil wake untuk multiple turbine array 2.....	75

DAFTAR LAMPIRAN

Tabel perhitungan single turbine kecepatan 0,5 m/s	81
Tabel perhitungan single turbine kecepatan 1,5 m/s	82
Tabel perhitungan single turbine kecepatan 2,5 m/s	83
Tabel perhitungan array 1 kecepatan 0,5 m/s.....	84
Tabel perhitungan torque array 1 kecepatan 0,5 m/s.....	85
Tabel perhitungan power array 1 kecepatan 0,5 m/s.....	86
Tabel perhitungan array 1 kecepatan 1,5 m/s.....	87
Tabel perhitungan torque array 1 kecepatan 1,5 m/s.....	88
Tabel perhitungan power array 1 kecepatan 1,5 m/s.....	89
Tabel perhitungan array 1 kecepatan 2,5 m/s.....	90
Tabel perhitungan torque array 1 kecepatan 2,5 m/s.....	91
Tabel perhitungan power array 1 kecepatan 2,5 m/s.....	92
Tabel perhitungan array 2 kecepatan 0,5 m/s.....	93
Tabel perhitungan torque array 2 kecepatan 0,5 m/s.....	94
Tabel perhitungan power array 2 kecepatan 0,5 m/s.....	95
Tabel perhitungan array 2 kecepatan 1,5 m/s.....	96
Tabel perhitungan torque array 2 kecepatan 1,5 m/s.....	97
Tabel perhitungan power array 2 kecepatan 1,5 m/s.....	98
Tabel perhitungan array 2 kecepatan 2,5 m/s.....	99
Tabel perhitungan torque array 2 kecepatan 2,5 m/s.....	100
Tabel perhitungan power array 2 kecepatan 2,5 m/s.....	101

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi yang semakin meningkat yang tidak diimbangi oleh ketersediaan sumber-sumber energi, dampaknya semakin terasa akhir-akhir ini khususnya masalah energi listrik yang sedang dialami oleh masyarakat Indonesia, hampir semua kegiatan yang dilakukan masyarakat memerlukan energi listrik atau bisa diartikan listrik sudah menjadi bagian yang tidak terpisahkan bagi kehidupan masyarakat saat ini.

Isu tentang inovasi sumber-sumber energi pengganti atau yang biasa disebut sumber-sumber energi baru dan terbarukan (*renewable energy*) sebagai pengganti energi fosil semakin meningkat saat ini, hal ini muncul sebagai langkah antisipasi semakin berkurangnya persediaan sumber energi fosil tersebut. apabila ditinjau berdasarkan persediaanya maka energi arus laut (*ocean current energy*) merupakan salah satu yang cukup banyak tersedia dikarenakan 2/3 luas wilayah Indonesia terdiri dari lautan [1].

Untuk pemanfaatannya tipe-tipe energi laut yang dapat diaplikasikan antara lain energi pasang surut (*tidal energy*), energi angin (*offshore wind energy*), energi arus laut (*ocean current energy*), energi panas laut (*ocean thermal energy*) dan energi gelombang (*wave energy*) [1]. Wilayah Indonesia yang berpotensi untuk pengaplikasian sumber energi arus laut terdapat di 11 selat di Bali, Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur antara lain: selat Alas, selat Sape, selat Linta, selat Molo, selat Flores, selat Boleng, selat Lamkers, selat Panther, selat Alor dan selat Nusa Penida, berdasarkan data Kementerian energi

dan Sumber Daya Mineral rata-rata kecepatan arus lau di wilayah Indonesia kurang dari 1,5 meter per detik kecuali diselat-selat diantara pulau Bali, Lombok dan Nusa Tenggara Timur [2].

Berdasarkan potensi energi laut yang sangat melimpah di wilayah Indonesia dan belum dimanfaatkan secara maksimal maka dirancang sebuah tugas akhir yang membahas tentang optimasi peletakan *vertical axis multiple turbine* untuk pembangkit listrik tenaga arus laut yang diharapkan hasil dari tugas akhir ini memberi masukan dan referensi terhadap pengembangan potensi energi laut Indonesia.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang timbul berdasarkan perletakan turbin ini adalah :

1. Berapakah jarak yang optimal antar turbin agar mampu bekerja secara maksimal apabila dipasang disamping turbin yang lain?
2. Berapakah jarak yang optimal antar turbin agar mampu bekerja secara maksimal apabila dipasang dibelakang turbin yang lain?

1.3. Batasan Masalah

Dalam pembuatan tugas akhir ini ada beberapa batasan masalah yang dibahas. Hal ini bertujuan untuk membatasi permasalahan yang ada agar tidak meluas, sehingga pembahasan tujuan dapat terfokus. Batasan-batasan masalah dalam perletakan turbin ini antara lain:

1. Tugas akhir ini hanya menggunakan 3 jenis turbin vertikal axis dengan 3 jumlah blade.
2. Tugas akhir ini hanya difokuskan pada kecepatan arus laut tertentu.

3. Pada simulasi tugas akhir ini hanya menganalisa putaran turbin searah.
4. Tidak menganalisa kekuatan material turbin.
5. Tugas akhir ini tidak membahas tentang aspek ekonomi.
6. Pengaturan kondisi batas pada saat simulasi tugas akhir ini mengacu pada kondisi batas eksperimental.
7. Proses pengerjaan dibantu dengan software CFD.

1.4. Tujuan Penulisan

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui jarak optimal antar turbin saat bekerja secara maksimal apabila dipasang disamping turbin yang lain.
2. Mengetahui jarak optimal antar turbin saat bekerja secara maksimal apabila dipasang dibelakang turbin yang lain.

1.5. Manfaat Penulisan

Manfaat yang dapat diperoleh dari penulisan tugas akhir ini adalah :

1. Diharapkan mampu menentukan jarak yang optimal pada instalasi multiple turbin sehingga turbin 1 ke turbin yang lain mampu bekerja secara maksimal pada kecepatan arus laut tertentu, selain itu dengan instalasi *multiple turbine* ini akan memudahkan pada saat instalasi, pengawasan dan perawatan sehingga semua biaya bisa diminimalkan.
2. Sebagai referensi untuk penentuan jarak optimal peletakan *multiple turbine* untuk sistem pembangkit listrik tenaga arus laut diperairan lain.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

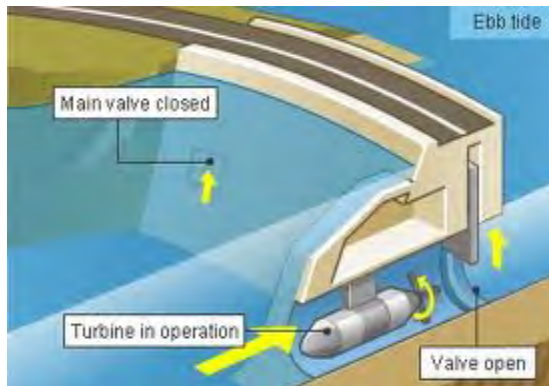
Energi listrik merupakan energi yang mempunyai peranan vital dalam kehidupan masyarakat, hampir semua kegiatan yang dilakukan oleh masyarakat memerlukan energi listrik, mulai dari kegiatan rumah tangga, industri sampai militerpun memerlukan energi listrik. pada umumnya listrik diperoleh dengan cara mengkonversikan energi kinetik menjadi energi listrik dengan menggunakan bantuan sebuah generator, selain itu energi kinetik dapat diperoleh dengan pembakaran sumber energi fosil yang akhir-akhir ini persediaanya semakin berkurang [2], berkurangnya persediaan sumber energi memicu timbulnya inovasi sumber-sumber energi pengganti atau yang biasanya disebut sumber-sumber energi baru dan terbarukan, apabila ditinjau berdasarkan persediaanya maka energi arus laut (*ocean current energy*) merupakan salah satu yang cukup banyak tersedia, tipe-tipe energi laut yang dapat dimanfaatkan antara lain energi pasang surut (*tidal energy*), energi angin (*offshore wind energy*), energi arus laut (*ocean current energy*), energi panas laut (*ocean thermal energy*) dan energi gelombang (*wave energy*) [1].

2.2. Energi Laut

Laut merupakan sumber energi yang mempunyai kandungan yang sangat besar, dalam pemanfaatanya untuk pembangkit listrik dibedakan menjadi beberapa tipe diantaranya energi pasang surut, energi angin, energi arus laut, energi panas laut dan energi gelombang namun dalam pemanfaatanya tidaklah mudah diperlukan biaya yang mahal dan teknologi yang memadai oleh sebab itu sampai

sekarang pengembangan lebih lanjut mengenai pengaplikasian sumber energi tersebut hanya sebatas pada studi - studi awal akan tetapi akan terus berkembang untuk kedepannya [1].

Pada aplikasi energi pasang surut gerakan air laut yang terjadi karena perbedaan ketinggian, baik saat pasang maupun surut dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dan dikarenakan gerakan air laut yang terjadi sangat besar maka pembangkit listrik yang memanfaatkan energi pasang surut ini berpotensi menghasilkan daya listrik yang besar pula [1].



Gambar 2.1 Aplikasi energi pasang surut [3]

Pada aplikasi energi angin ini adanya angin yang bergerak dengan jumlah besar di laut, sehingga dapat dimanfaatkan untuk memutar turbin angin yang pada umunya secara langsung dikopel dengan generator sehingga dapat dikonversi menjadi energi listrik.



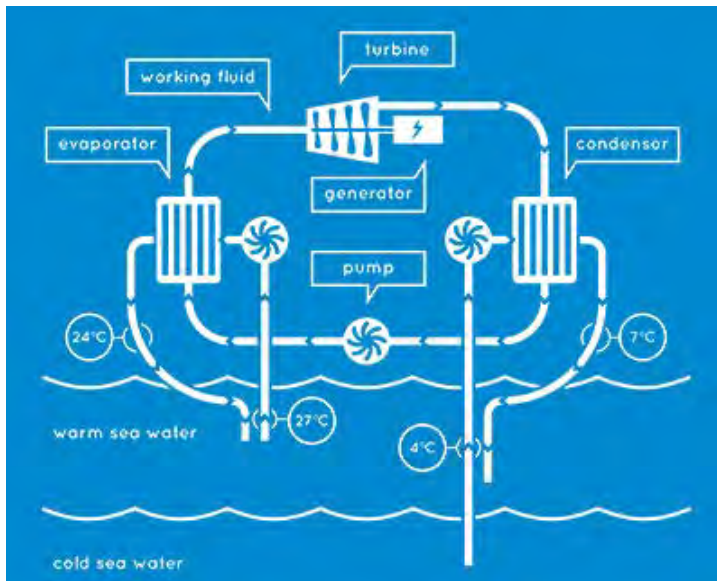
Gambar 2.2 Aplikasi energi angin [4]

Pada aplikasi energi arus laut ini adanya arus laut yang bergerak dengan kecepatan tertentu sehingga dapat dimanfaatkan untuk memutar turbin arus laut (*tidal turbine*) yang pada umumnya secara langsung dikopel oleh generator sehingga dapat dikonversi menjadi energi listrik



Gambar 2.3 Aplikasi energi arus laut [5]

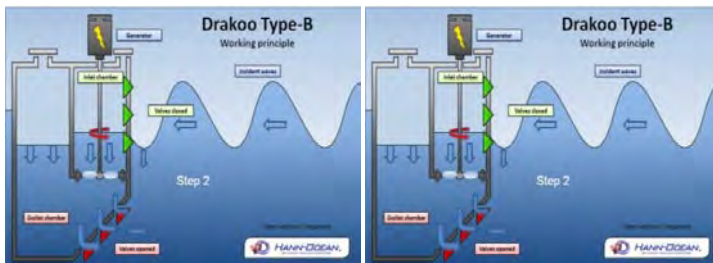
Pada aplikasi energi panas laut atau yang sering disebut *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC), disini adanya perbedaan temperatur yang kontras antara permukaan laut dan dalam laut dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik, dan berdasarkan survei yang dilakukan organisasi Internasional yang membidangi sistem energi laut (IEA/OES) pembangkit listrik tenaga panas laut ini mampu menghasilkan energi sebesar 10.000 Twh/year [1].



Gambar 2.4 Aplikasi energi panas laut [10]

Pada aplikasi energi gelombang ini adanya gelombang laut yang mengarah ke pantai dalam jumlah dan ketinggian tertentu dipecah oleh *Oscillating Wave Column* (OWC) yang merupakan nama salah satu bangunan yang terdapat pada konstruksi pembangkit listrik tenaga gelombang ini (PLTO) sehingga gelombang

tadi dapat disimpan disebuah reservoir yang pada prosesnya akan digunakan untuk memutar turbin sehingga apabila turbin berputar generatorpun ikut berputar sehingga bisa menghasilkan energi listrik [6].



Gambar 2.5 Aplikasi energi gelombang [6]

2.3. Konsep Turbin

Dalam sebuah sistem pembangkit listrik tenaga arus laut, turbin air merupakan salah satu komponen terpenting, turbin air adalah alat untuk mengubah energi mekanis dari air menjadi energi puntir atau rotasi, kemudian digunakan untuk memutar generator, yang akhirnya dapat menghasilkan listrik, sebenarnya prosesnya tidak semudah itu, karena terdapat berbagai macam sub-sistem yang dapat meningkatkan safety dan efisiensi dari turbin air itu sendiri, mengenai penjelasan lebih spesifik mengenai turbin air sebagai berikut.

2.4 Klasifikasi Turbin Air

Turbin air dapat diklasifikasikan berdasarkan :

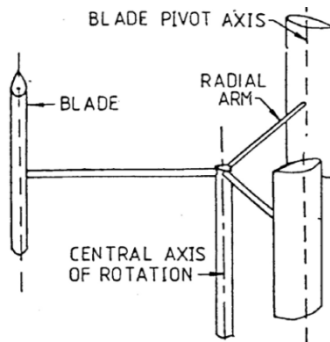
a. Letak sumbunya

Untuk jenis turbin yang diklasifikasikan berdasarkan letak sumbunya dibedakan menjadi 2, yaitu:

- Turbin dengan sumbu vertikal atau biasa yang disebut *vertical axis turbine* (VAT)
- Turbin dengan sumbu horisontal atau yang biasa disebut *horizontal axis turbine* (HAT)

Untuk turbin dengan sumbu vertikal sendiri merupakan turbin yang berputar tegak lurus dengan arah aliran fluida, yang mempunyai kelebihan dan kekurangan seperti yang diuraikan dibawah ini:

- Kelebihan dari VAT diantaranya:
 - Tidak bergantung terhadap arus
 - Pembuatan blade sangat mudah
 - Biaya instalasi lebih murah dari turbin sumbu horisontal
- Kekurangan dari VAT diantaranya:
 - Effisiensinya lebih rendah dari turbin sumbu horisontal.
 - Khusus untuk turbin darrieus dengan fixed blade tidak dapat berputar dengan sendirinya [3].
- Contoh pengaplikasian dari VAT pada umumnya terdapat pada Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL)



Gambar 2.6 Turbin dengan sumbu vertikal [5]

Untuk turbin dengan sumbu horisontal sendiri merupakan turbin yang berputar searah dengan arah aliran fluida, yang mempunyai kelebihan dan kekurangan seperti yang diuraikan dibawah ini:

- Kelebihan dari HAT diantaranya:
 - Effisiensinya lebih tinggi dari turbin sumbu vertikal.
 - Mempunyai *aero-hydro dynamics* yang baik.
- Kekurangan dari HAT diantaranya:
 - Bergantung terhadap arah arus
 - Membutuhkan sistem mekanisme yang kompleks untuk memutar turbin.
 - Biaya instalasi lebih mahal dari turbin sumbu vertikal [5].
- Contoh pengaplikasian dari HAT pada umumnya terdapat pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)



Gambar 2.7 Turbin dengan sumbu horisontal [5]

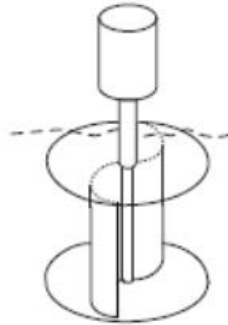
Setelah dijelaskan dan diketahui karakteristik kedua turbin sehingga dengan kelebihan dan kekurangan pada turbin dengan sumbu vertikal (VAT) akan menarik untuk dipelajari lebih lanjut pada tugas akhir ini.

2.5 Tipe-Tipe Turbin Arus Laut Sumbu Vertikal

Beberapa tipe untuk turbin arus laut sumbu vertikal atau *vertical axis tidal turbine* (VATT) antara lain:

2.5.1 Konsep savonius

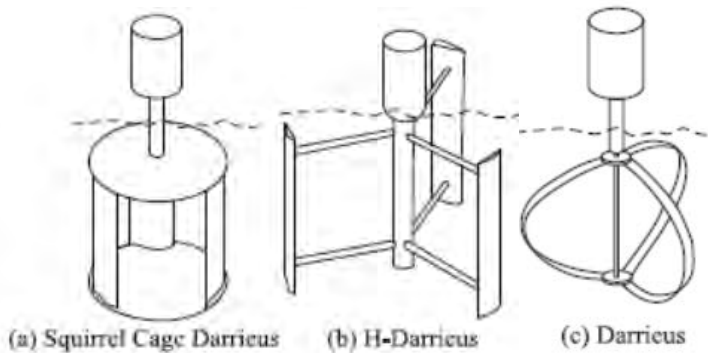
Turbin savonius ditemukan oleh ilmuwan Finlandia yang bernama Sigurd Johannes savonius, turbin telah mengalami perbaikan dari desain awal dan tidak diterapkan pada semua jenis turbin berbasis gaya drag, dengan mengandalkan variasi dari koefisien drag untuk beroperasi, untuk membuat gaya drag yang cukup untuk memutar blade maka koefisien drag harus lebih tinggi pada arah yang sama dengan aliran dan lebih rendah pada arah yang berlawanan dengan aliran [7].



Gambar 2.8 Turbin savonius [1]

2.5.2 Konsep darrieus

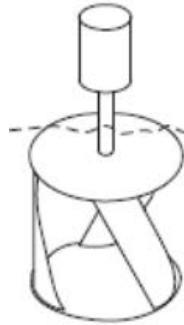
Pada tahun 1920 George Jean Marie Darrieus menemukan sebuah turbin dengan sumbu vertikal dengan blade yang tipis yang berputar tegak lurus terhadap arah alirannya [7]. blade ini sejajar dengan sumbu dan dapat dirancang lurus maupun melengkung untuk mengurangi pengaruh gayasentrifugal. Turbin darrieus mengkonversi energi kinetik dari aliran menjadi energi mekanik dan menggunakan lift hidrodinamik pada blade untuk membuat airfoil berputar lebih cepat dari aliran disekitar turbin, [4]. Turbin darrieus sendiri dibedakan menjadi tiga tipe antara lain squirrel cage darrieus (*straight blade*), H- darrieus (*straight blade*) dan darrieus (*curved blade*), [1]



Gambar 2.9 Turbin darrieus [1]

2.5.3 Konsep gorlov

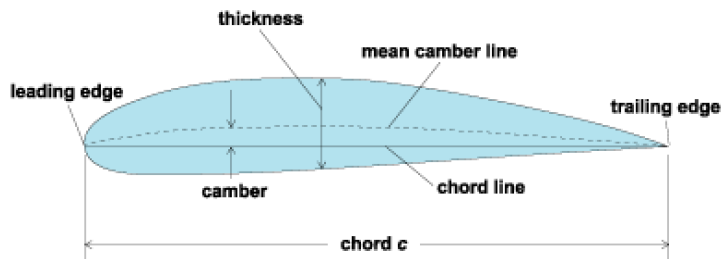
Turbin gorlov merupakan turbin yang dirancang seperti sangkar tupai, dengan memutar airfoil berbentuk blade dan memberikan torsi untuk berotasi, hal tersebut disebabkan percepatan blade di zona tekan yang lebih tinggi. Perancangan dari turbin gorlov ini juga mempertimbangkan posisi dari blade agar selalu optimal untuk mengurangi perilaku yang tidak teratur dari getaran. Pada beberapa uji coba yang dilakukan di laboratorium efisiensi turbin ini sekitar 35% dengan generator yang diletakkan di salah satu ujung sumbu sesuai dengan keperluan [4].



Gambar 2.10 Turbin gorlov [1]

2.6 Karakteristik Airfoil Aerodinamika

Airfoil merupakan salah satu bodi berbentuk blade, sayap maupun pisau [8] yang terdapat pada turbin maupun rotor yang mampu memberikan gaya angkat dan gaya seret terhadap bodi lainnya, dengan persamaan matematis sangat memungkinkan untuk menghitung besarnya gaya-gaya yang bekerja pada airfoil tersebut. Berdasarkan standart NACA telah terdapat data-data teknis pada tiap bentuknya, seperti yang ditunjukkan oleh gambar dibawah ini [2].



Gambar 2.11 Bentuk penampang airfoil [2]

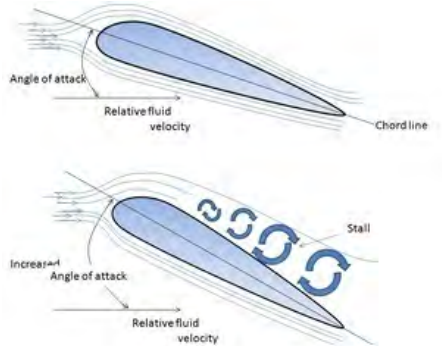
Airfoil section merupakan gambar penampang melintang dari sebuah airfoil yang tampak seperti gambar diatas yang pada umumnya terbuat dari pelat pipih dan apabila diletakan membentuk sudut lancip yang hampir menyerupai tetesan air, yang terdiri dari bagian-bagian berikut:

- Leading edge merupakan bagian ujung paling depan dari sebuah airfoil.
- Trailing edge merupakan bagian ujung paling belakang dari sebuah airfoil.
- Chamber line merupakan garis pembagi antara bagian atas dan bawah dari sebuah airfoil
- Chord line, merupakan garis yang menghubungkan antara leading edge dan trailing edge
- Chord, merupakan jarak antara leading edge dan trailing edge
- Maximum chamber, merupakan jarak terjauh antara chord line dan mean chamber line, untuk posisi maksimum chamber sendiri diukur dari leading edge dalam bentuk presentase chord.
- Maximum thickness, merupakan jarak terjauh antara permukaan bawah dan permukaan atas yang diukur tegak lurus terhadap chord line [2].

Pada standart NACA juga terdapat tipe airfoil yang tidak dapat menghasilkan gaya angkat apabila dilewati arus sejajar terhadap tali busurnya hal tersebut disebabkan karena sisi bagian atas blade dan bawah simetris. Tipe airfoil ini hanya akan menghasilkan gaya angkat apabila aliran udara yang melewatinya membentuk sudut tajam terhadap tali busurnya yang biasanya diaplikasikan sebagai stabilizer atau fin [2].

Setelah menentukan tipe airfoil yang digunakan pada perancangan sebuah blade sebagian besar menggunakan *blade element metode* dimana blade tersusun dari beberapa element foil 2D yang berfungsi untuk mengoptimalkan *angle of attack* dan gaya aerodinamiknya [9].

Besarnya (α) perlu ditentukan terlebih dahulu karena apabila nilainya terlalu kecil gaya yang bekerja pada blade tidak maksimal tetapi apabila nilainya terlalu besar, akan mengakibatkan aliran fluida yang tidak mengikuti bladenya fenomena ini disebut *stall* untuk lebih jelasnya lihat gambar berikut [9].

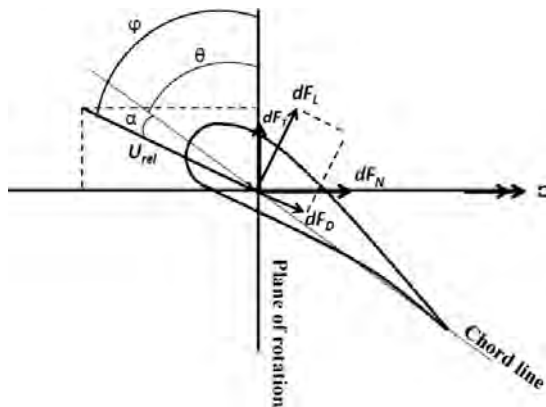


Gambar 2.12 Pengaruh *angle of attack* (α) terhadap bentuk aliran [10]

2.7 Gaya Angkat dan Seret pada VATT

Sebuah benda padat yang diletakan dalam aliran fluida akan menghasilkan gaya angkat dan gaya seret, hal serupa akan terjadi pada VATT apabila diletakan dibawah permukaan laut, adanya aliran fluida yang mengalir pada kedua belah sisi *airfoil* yang memiliki panjang lintasan berbeda akan mengakibatkan

perbedaan tekanan udara antara bagian atas dan bawah dari blade tersebut, dikarenakan kecepatan aliran fluida bagian bawah blade lebih tinggi dari bagian atas blade maka tekananpun bergerak dari bagian bawah blade ke bagian atas blade sehingga terjadilah gaya angkat, untuk definisinya gaya angkat sendiri adalah gaya yang tegak lurus terhadap aliran sedangkan gaya seret adalah gaya yang sejajar dengan aliran yang dijelaskan dengan gambar dan persamaan sebagai berikut [8].



Gambar 2.13 Gaya - gaya yang bekerja pada *blade* [11].

$$Cl = \frac{Fl}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 c} \quad (2.1)$$

Dimana :

- C_l = Coefisient of lift
- Fl = Force of lift
- ρ = Massa jenis fluida
- U = Kecepatan relatif
- c = chord length

$$Cd = \frac{Fd}{\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 c} \quad (2.2)$$

Dimana :

C_d = Coefisient of drag

Fd = Force of drag

ρ = Massa jenis fluida

U = Kecepatan relative

c = chord length

Pada blade juga bekerja gaya tangensial (F) yang terbentuk dari *force of drag* dan *force of lift* dan arahnya selalu tegak lurus dengan arah putaran turbin sehingga menghasilkan energi mekanik yang memutar turbin, selain itu torsi yang dihasilkan oleh sebuah turbin dapat dihitung dengan mengalikan gaya tangensial dengan panjang lengan turbin (r) yang ditulis seperti persamaan (2.8) [9].

$$T = F \cdot r \quad (2.3)$$

2.8 Daya

Persamaan yang digunakan untuk menghitung daya (*power*) air yang tersedia[8]:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (2.4)$$

Dimana :

P = Daya air (*Power*)

A = Luasan aliran air

ρ = Massa jenis fluida

U = Kecepatan relative

Daya (P) yang dihasilkan VATT merupakan daya mekanik oleh sebab itu untuk mendapatkan nilai kinerja, data yang dibutuhkan adalah torsi (T) dan kecepatan sudut turbin (ω), untuk persamaanya sebagai berikut [11]:

$$P = T \cdot \omega \quad (2.5)$$

Dikarenakan energi kinetic flux (KEF) tidak terserap sempurna oleh VATT maka terdapat gap antara daya yang dihasilkan oleh turbin dan energi kinetic flux, dan untuk menghitung 2 nilai tersebut digunakan persamaan dibawah ini [8]:

$$\eta = \frac{W}{KEF} \quad (2.6)$$

$$KEF = \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (2.7)$$

2.9 Array Turbine

Array merupakan susunan konfigurasi beberapa turbin (*multiple turbine*) pada pembangkit listrik tenaga arus laut, perancangan array akan berpengaruh terhadap kinerja turbin, *monitoring* dan biaya perawatan. Jarak antara turbin pada sebuah array tidak boleh terlalu jauh karena jarak yang terlalu jauh tidak akan menimbulkan hubungan kinerja yang harmonis antara turbin yang satu dengan yang lainnya atau kinerjanya sama saja dengan turbin tunggal, tetapi apabila jarak terlalu dekat juga akan mengakibatkan munculnya turbulensi antara aliran dari turbin satu dengan turbin yang lainnya sehingga untuk memperoleh

effisiensi array yang baik dari sebuah turbin perlu dilakukan optimasi jarak.

2.10 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Computational fluid dynamic (CFD) Merupakan metode pengujian berupa eksperimen dengan cara pemodelan sesuai kondisi sebenarnya yang pada umumnya digunakan untuk menyelesaikan permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida. Dalam metode ini dibagi menjadi beberapa tahapan diantaranya *pre-processor*, *solver* dan *post processor* apabila telah melewati tahapan tersebut akan diperoleh hasil yang merupakan data input untuk tahapan analisa data dan pembahasan, yang setelah itu akan dievaluasi apakah hasil bisa diterima atau tidak, apabila tidak bisa diterima maka bisa dilakukan perbaikan dan pengulangan tahapan sampai hasil bisa diterima.

2.11 **Pemodelan CFD**

Dalam pemodelan ini digunakan *software* CFD yang mampu mensimulasikan model seperti kondisi sebenarnya dengan demikian biaya yang besar untuk experiment dan dibagi oleh beberapa tahapan, diantaranya

a. Geometri Model

Pada tahapan awal ini dilakukan pembuatan sebuah model dan domain fluida serta pembuatan meshing yang dilakukan dengan menggunakan *software* CFD keduanya akan diujikan pada tahapan selanjutnya.

b. Pre Processor (CFX-pre)

Setelah model selesai dilanjutkan dengan tahap penginputan data atau yang disebut CFX-pre dimana parameter yang ada dimasukkan kedalam CFX agar pada saat simulasi hasil yang tepat dapat diperoleh.

c. Solver

Solver dibedakan menjadi 3 bagian yaitu *finite difference*, *finite element* dan *finite volume*. Pada tahapan ini dibagi lagi menjadi beberapa *sub* tahapan diantaranya:

- Penggunaan fungsi sederhana untuk estimasi variabel yang tidak diketahui
- Estimasi harus berdasarkan persamaan maupun referensi-referensi yang relevan dan bisa dipertanggung jawabkan.
- Penyelesaian persamaan aljabar

d. Post Processor (CFX-post)

Tahapan akhir yang merupakan hasil dari simulasi maupun perhitungan dari model, sehingga diperoleh data yang berupa visual maupun numerik, contohnya: datavisualisasi aliran fluida, temperature dan preassure.

BAB III

METODOLOGI

3.1 Identifikasi Perumusan Masalah

Tahapan awal dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah menentukan permasalahan yang terjadi dan mencari solusi dari permasalahan tersebut. Agar tugas akhir ini lebih terfokus pada tujuan yang ingin dicapai maka perlu ditentukan batasan-batasan dari permasalahan tersebut.

3.2 Studi Literatur

Mengumpulkan bahan pustaka yang terkait dengan pengerjaan tugas akhir sebagai referensi dan acuan dalam pengerjaan, bahan pustaka bisa bersumber dari buku, Internet, wawancara, tugas akhir, jurnal, paper, studi literatur ini juga bertujuan untuk membantu dalam menyelesaikan permasalahan yang ada berdasarkan teori maupun cara yang seharusnya dilakukan. Selain itu studi literatur juga dapat mencari tahu apakah penelitian serupa pernah dilakukan oleh orang lain.

3.3 Pengumpulan Data

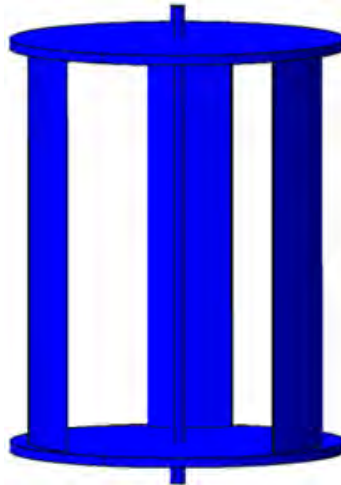
Mengumpulkan data - data yang dibutuhkan dalam peletakan multiple VATT untuk sistem pembangkit listrik tenaga arus laut.

Tempat yang direncanakan untuk pengumpulan data yang dibutuhkan untuk tugas akhir ini adalah :

- Laboratorium *Marine Manufacture and Design*.
- Laboratorium Energi.
- Laboratorium Komputasional.
- Ruang Baca Fakultas Teknologi Kelautan – ITS.

3.4 Perancangan Model

Dalam perancangan model VATT pada sistem pembangkit listrik tenaga arus laut. Model dirancang menggunakan *software* CFD berdasarkan model pembanding yang sesuai dengan kebutuhan tugas akhir ini, dengan spesifikasi berikut:



Gambar 3.1. Konsep model *vertical axis tidal turbine*

Dengan parameters sebagai berikut:

- Diameter (D) : 0,4 m (radius 0,2 m)
- Jumlah blades : 3
- Blade chord : 0,1 m
- Blade airfoil : NACA 0018
- Blade span : 0,8 m

Untuk lebih jelasnya dalam perancangan model ini dapat dilihat pada gambar berikut ini:



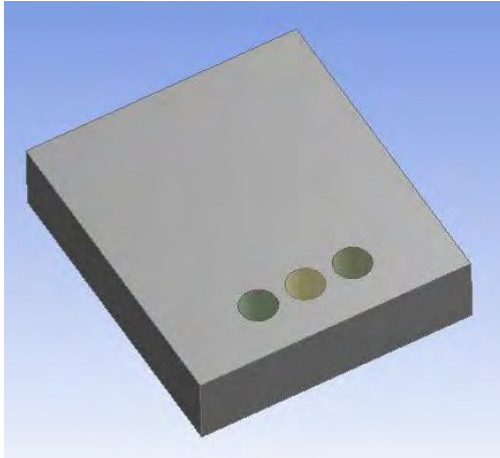
Gambar 3.2 *Modeling turbine VATT*



Gambar 3.3 *Modeling* domain tabung

Pada perancangan model domain tabung direncanakan sebagai berikut:

- (D) Diameter tabung $= \frac{3}{2} (D) \text{ turbin}$
 $= \frac{3}{2} \times 0,4$
 $= 0,6 \text{ m}$
- (T) Tinggi Tabung $= \frac{3}{2} (T) \text{ turbin}$
 $= \frac{3}{2} \times 0,8$
 $= 1,2 \text{ m}$



Gambar 3.4 *Modeling domain laut*

Pada perancangan model domain laut direncanakan sebagai berikut:

- (P) domain laut = (p1) + (D) tabung + (p2)

$$\begin{aligned}
 &= 20D \text{ turbin} + 0,6 \text{ m} + 3D \text{ turbin} \\
 &= 4 \text{ m} + 0,6 \text{ m} + 0,6 \text{ m} \\
 &= 5,2 \text{ m}
 \end{aligned}$$
- (l) domain laut = (2 x (0,5D turbin + D domain tabung + 3D)) + D domain tabung

$$\begin{aligned}
 &= (2 \times (0,2 + 0,6 + 1,2)) + 0,6 \\
 &= 4,6 \text{ m}
 \end{aligned}$$
- (T) tinggi domain laut = $\frac{3}{2}$ T turbin

Keterangan :

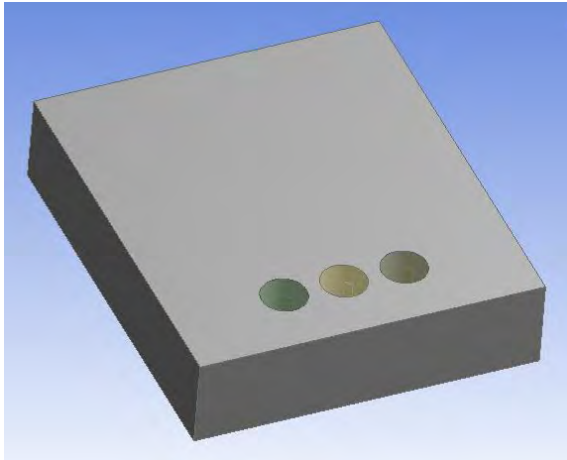
p1 = Panjang domain laut upstream

p2 = Panjang domain laut downstream

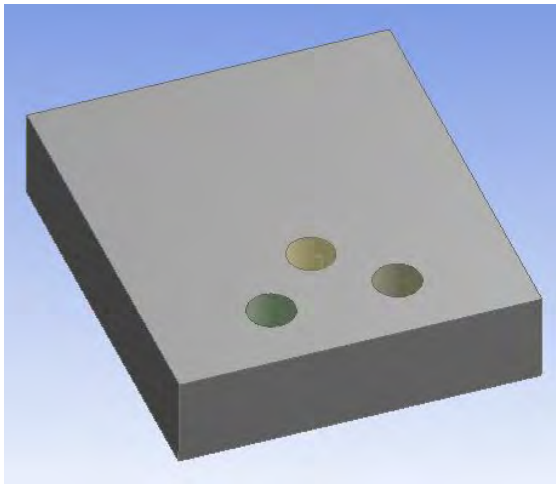
P = Panjang

D = Diameter

l = Lebar



Gambar 3.5 *Modeling array 1*



Gambar 3.6 *Modeling array 2*

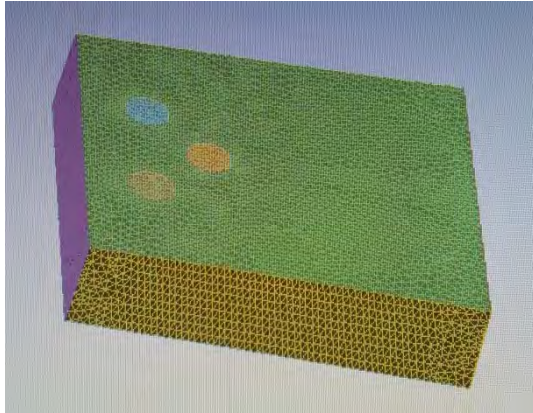
Pada perancangan model *array* turbin yang terdiri dari beberapa turbin disusun menjadi satu kesatuan (*array*) dimana pada *array* 01 turbin disusun secara berjajar menyamping dengan jarak $0,5D$ antar domain tabungnya sedangkan pada *array* 02 turbin disusun zigzag dengan jarak $0,5D$ antar domain tabungnya dimana jarak $0,5D$ sudah lebih panjang dari jarak awake terpanjang.

3.5 Meshing

Meshing merupakan proses merajut maupun membagi sebuah model menjadi bagian – bagian kecil yang berfungsi untuk *control volume* dimana besar kecilnya ukuran meshing sangat mempengaruhi hasil simulasi dimana untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat diperlukan *settingan meshing* yang tepat, pada tugas akhir ini untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan proses simulasi yang cepat dilakukan penyesuaian ukuran meshing sebagai berikut:

- Area free wall : Maksimal = 0,008
: Minimal = 0,1
- Area inlet, opening : Maksimal = 0,005
: Minimal = 0,1
- Area interface : Constant = 0,05
- Area turbin : Maksimal = 0,0005
: Minimal = 0,1

Hasil meshing ditunjukkan oleh gambar dibawah ini:



Gambar 3.7 Hasil meshing

3.6 Pengaturan Kondisi Simulasi

Dalam simulasi pengaturan kondisi batas sangat penting agar hasil yang diperoleh sesuai dengan kondisi sebenarnya, pada *software* CFD pengaturan kondisi batas masuk kedalam tahapan cfx-pre dimana pada tahapan tersebut terdapat beberapa model turbulensi seperti k-omega, k-epsilon, SST dan sebagainya, dari beberapa model turbulensi yang cocok untuk simulasi aerodinamika dan memiliki akurasi yang baik adalah model turbulensi SST oleh sebab itu pada simulasi ini dipilih model tersebut.

Tabel 3.1 Kondisi batas simulasi

No	Kondisi batas simulasi	Posisi	Kondisi
Domain laut (<i>Fluid Domain</i>)			
1	<i>Inlet</i>	Sisi depan domain laut	Kecepatan sesuai tabel 4.1 <i>Turbulence model low intensity</i>
2	<i>Opening</i>	Sisi kanan, kiri dan belakang	<i>Mass and momentum entrainment</i> <i>Zero gradient</i>
3	<i>Free wall laut</i>	Sisi atas dan bawah	<i>Free slip wall</i>
4	<i>Interface</i>	Sisi selubung dalam tabung	<i>Mesh connection</i> <i>GGI</i>
Domain tabung (<i>Fluid domain</i>)			
1	<i>Free wall tabung</i>	Sisi atas dan bawah	<i>Free slip wall</i>
2	<i>Interface</i>	Sisi selubung luar tabung	<i>Mesh connection</i> <i>GGI</i>
Turbin (<i>Immersed Solid</i>)			
1	Turbin	<i>Straight- blade darrieus</i>	<i>Wall</i>

3.7 Pengujian Model

Setelah pengerjaan model selesai dilakukan pengujian dengan pendekatan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) dimana beberapa model turbin diletakan secara berbaris maupun berjajar dengan jarak yang telah ditentukan pada saat *modeling*, setelah itu model harus melewati beberapa tahapan seperti *pre-processor*, *solver* dan *post processor* , berdasarkan tahapan tersebut diperoleh hasil yang merupakan data input untuk tahapan analisa data dan pembahasan.

3.8 Analisa Data dan Pembahasan

Berdasarkan data yang diperoleh pada tahapan pengujian model dapat dilakukan perhitungan daya berdasarkan teori dan cara penyelesaian masalah yang didapat pada saat studi literatur. Analisa data dan pembahasan ini bertujuan untuk menentukan jawaban dari

permasalahan yang ada sesuai dengan tujuan dilakukannya penelitian.

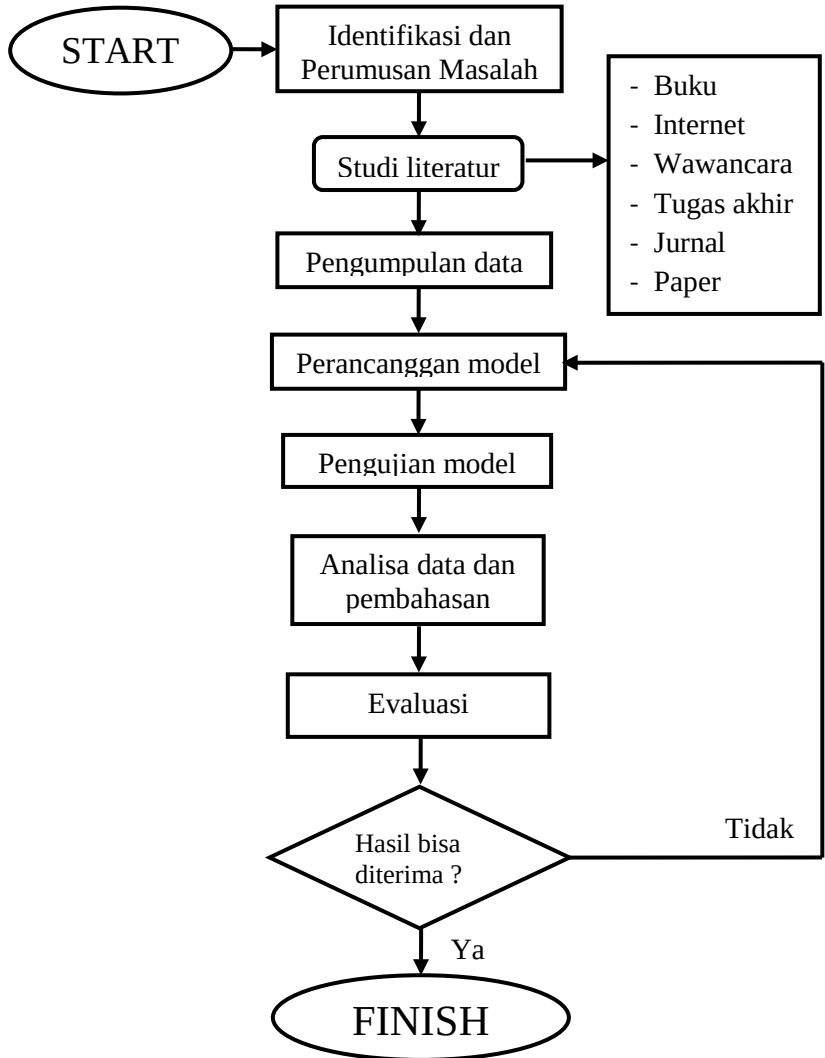
3.9 Evaluasi

Setelah tahapan analisa data dan pembahasan maka perlu dilakukan evaluasi, yang merupakan tahapan dimana layak diterima atau tidaknya hasil tugas akhir ini, apabila belum bisa diterima maka akan dilakukan pengulangan dan perbaikan pada tahapan pemodelan dan analisa data yang sudah dilakukan, sampai hasilnya bisa diterima.

3.10 Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pada tahap akhir akan dibuat kesimpulan yang merupakan hasil akhir dari pengerjaan tugas akhir ini dan juga juga merupakan jawaban dari permasalahan yang memberikan informasi penting dari seluruh pembuatan tugas akhir ini. Dan apabila ada kendala ataupun sesuatu yang belum bisa dikerjakan dalam tugas akhir ini karena keterbatasan waktu dan sebagainya sehingga memerlukan saran apa saja yang mungkin dapat membuat laporan tugas akhir ini bisa lebih baik untuk kedepanya.

3.11 Diagram Alur Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.8. Gambar diagram alur pengerjaan tugas akhir

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

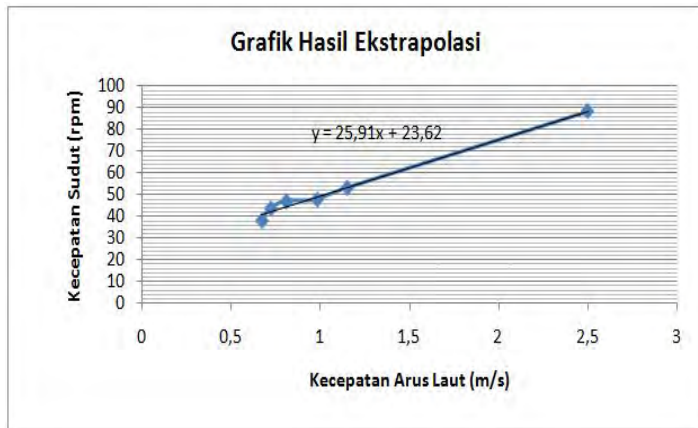
4.1. Validasi Hasil Simulasi

Validasi data adalah tahapan penting dalam simulasi pada sebuah penelitian. Melalui tahapan ini dapat diketahui kesesuaian antara hasil simulasi dengan kondisi sebenarnya. Dalam pengerjaan tugas akhir ini dilakukan 2 tahapan validasi, validasi yang pertama bertujuan untuk mengamati kesesuaian metode ekstrapolasi yang digunakan untuk menentukan kecepatan sudut turbin (*rpm*). Sedangkan validasi kedua bertujuan untuk mengamati kesesuaian *boundary condition* dan *mesh* yang digunakan pada simulasi.

4.1.1 Validasi Kecepatan Sudut Turbin

Kecepatan sudut turbin perdetik atau yang biasa disebut (rps) pada tugas akhir ini diperoleh berdasarkan data-data hasil eksperimen penelitian sebelumnya, yang telah dilakukan oleh Mecha Garinda A. G [8].

Pada penelitian tersebut kecepatan arus maksimal yang divariasikan hanya 1,15 m/s sehingga perlu dilakukan pendekatan dengan metode ekstrapolasi untuk mengetahui kecepatan sudut turbin dalam pengerjaan tugas akhir ini yang divariasikan pada saat kecepatan arus laut sebesar 0,5, 1,5 dan 2,5 m/s. Dengan metode ekstrapolasi dapat diketahui hubungan antara kecepatan sudut turbin dengan kecepatan arus laut sehingga dapat ditarik persamaan yang digunakan untuk memperkirakan kecepatan sudut turbin (*rpm*) saat kecepatan arus laut tertentu [9].



Gambar 4.1 Grafik hubungan kecepatan arus laut (m/s) dan kecepatan sudut turbin (rpm)

Dengan metode ekstrapolasi dihasilkan grafik yang ditunjukkan oleh gambar 4.1, berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa hasil eksperimen dengan hasil ekstrapolasi menunjukkan pola yang hampir sama, dimana apabila semakin besar kecepatan arus laut yang mengenai turbin semakin besar juga kecepatan sudut turbin yang dihasilkan sehingga hal tersebut menunjukkan bahwa hasil eksperimen dengan hasil ekstrapolasi mempunyai error yang kecil [9].

Hasil ekstrapolasi menghasilkan persamaan sebagai berikut :

$$y = 25,91x + 23,624 \quad (4.1)$$

Dimana :

y = kecepatan sudut turbin (rpm)

x = kecepatan arus laut (m/s)

setiap persamaan ekstrapolasi selalu mempunyai nilai error oleh sebab itu perlu dilakukan perhitungan proyeksi kecepatan turbin menggunakan persamaan 4.1 untuk mengetahui besarnya nilai error.

Tabel 4.1 Tabel perbandingan hasil eksperimen dengan hasil ekstrapolasi

No	Kecepatan air (m/s)	Kecepatan sudut eksperimen (rpm)	Kecepatan sudut ekstrapolasi (rpm)	Error
1	0,67	38,18	40,98	7,33%
2	0,72	43,79	42,28	3,46%
3	0,806	47,09	44,50	5,49%
4	0,98	47,89	49,01	2,34%
5	1,15	53,26	53,42	0,29%
6	2,5		88,40	
Rata-rata error				3,78%

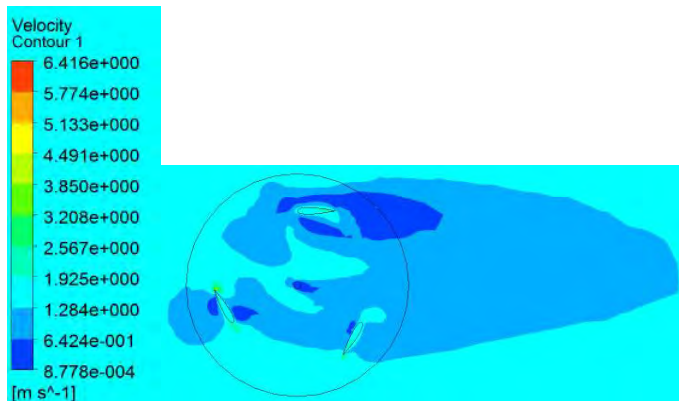
Hasil perhitungan nilai error dapat dilihat pada tabel 4.1 berdasarkan pendekatan metode ekstrapolasi ini diperkirakan bahwa kecepatan arus laut 0,67 m/s, maka kecepatan sudut turbin 40,98 rpm dan dari tabel tersebut juga terlihat bahwa pada tiap - tiap kecepatan memiliki nilai error yang berbeda. Besarnya perbandingan nilai error rata-rata antara hasil eksperimental dan hasil ekstrapolasi bernilai 3,78%, hal ini mengindikasikan bahwa persamaan ini valid digunakan untuk simulasi.

Berdasarkan persamaan diatas dapat diprediksikan kecepatan sudut turbin pada saat kecepatan arus laut 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2,5 m/s seperti tabel berikut:

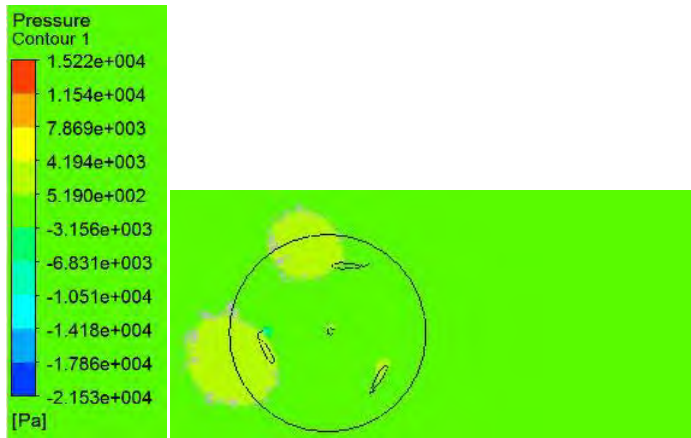
Tabel 4.2 Tabel kecepatan sudut turbin menggunakan persamaan hasil ekstrapolasi

No	Kecepatan Air (m/s)	Kecepatan Sudut Turbin (rpm)
1	0.5	36.58
2	1.5	62.49
3	2.5	88.40

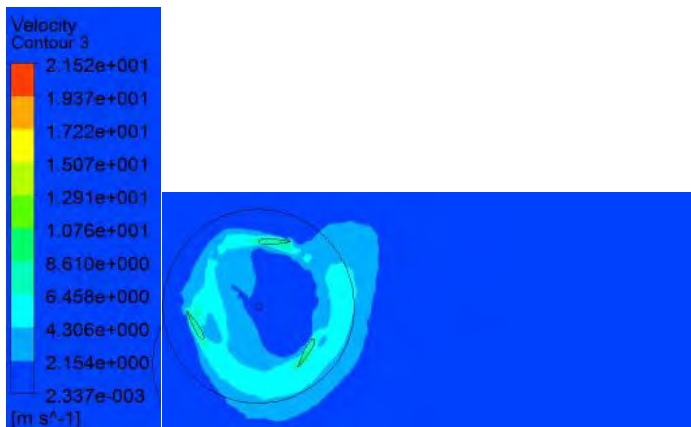
Selain dilakukan validasi menggunakan metode ekstrapolasi pada tugas akhir ini juga dilakukan validasi berdasarkan batas kemampuan maksimal turbin untuk menyerap energi arus laut, pada prosesnya rpm tertinggi hasil ekstrapolasi dinaikan secara bertahap sampai menunjukan bahwa turbin memberi energi terhadap lingkungan seperti *contour* yang terdapat pada variabel kecepatan (v) dan tekanan (p) berikut:



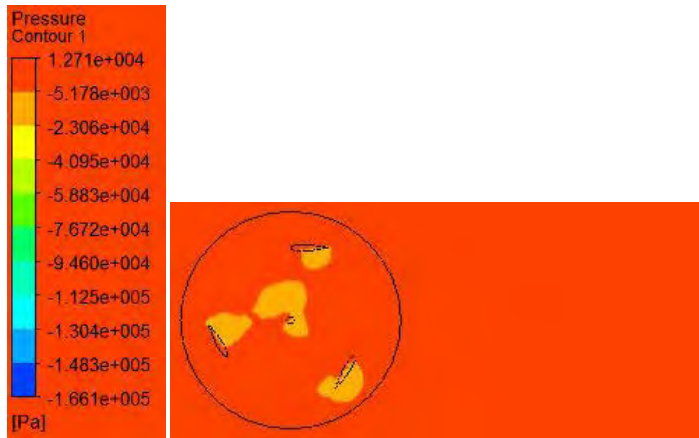
Gambar 4.2 Indikasi *velocity* bahwa turbin menyerap energi dari lingkungan



Gambar 4.3 Indikasi *preassure* bahwa turbin menyerap energi dari lingkungan



Gambar 4.4 Indikasi *velocity* bahwa turbin memberi energi kepada lingkungan



Gambar 4.5 Indikasi *preassure* bahwa turbin memberi energi kepada lingkungan

Berdasarkan gambar kontour diatas dapat dilihat bahwa pada variabel (p) apabila warna dibagian depan *blade* lebih cerah dari pada warna dibagian belakang *blade* dan pada variabel (v) apabila warna dibelakang *blade* lebih gelap dari pada warna dibagian depan *blade* maka dapat dinyatakan bahwa turbin menyerap energi dan sebaliknya, sehingga setelah dilakukan beberapa simulasi batas jangkauan nilai turbin masih menyerap energi dari lingkungan yaitu ≤ 249 rpm sedangkan memberi energi terhadap lingkungan yaitu ≥ 250 rpm. Pada simulasi tugas akhir ini digunakan rpm ≤ 249 sehingga dapat dinyatakan bahwa kecepatan sudut turbin pada simulasi ini valid, untuk lebih jelasnya dapat melihat tabel berikut:

Tabel 4.3 Tabel hasil simulasi validasi kecepatan sudut (rpm)

No	Kecepatan Sudut (Rpm)	Kecepatan Arus (m/s)	Kontur
1	62	1.5	Menyerap Energi
2	177	1.5	Menyerap Energi
3	199	1.5	Menyerap Energi
4	221	1.5	Menyerap Energi
5	243	1.5	Menyerap Energi
6	246	1.5	Menyerap Energi
7	249	1.5	Menyerap Energi
8	250	1.5	Memberi Energi
9	251	1.5	Memberi Energi
10	254	1.5	Memberi Energi
11	265	1.5	Memberi Energi

4.2. Validasi *Boundary Condition* dan *Meshing*

Boundary condition merupakan sebuah proses pengaturan kondisi-kondisi batas dari simulasi agar sesuai dengan kondisi sebenarnya, hal ini juga mempengaruhi kesesuaian hasil dari simulasi dengan kondisi sebenarnya.

Pada tugas akhir ini dilakukan validasi *boundary conditions* dengan cara membandingkan dengan hasil simulasi tugas akhir ini dengan hasil simulasi penelitian yang dilakukan Susilo (Susilo 2014) dimana pada penelitian tersebut dilakukan perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Mecha Garindra G. (Gunawan 2014) dikarenakan kondisi simulasi pada tugas akhir ini mempunyai kesamaan dengan eksperimen tersebut.

Validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai torsi yang dihasilkan pada tugas akhir ini dengan penelitian sebelumnya, dengan menggunakan 2 variasi kecepatan 0,6 m/s dan 0,7 m/s simulasi ini dilakukan.

Tabel 4.4 Tabel perbandingan torsi pada tugas akhir ini dengan penelitian sebelumnya

Kecepatan m/s	Penelitian sebelumnya		Tugas akhir Ini		Error
	Jumlah mesh	Torsi (N.m)	Jumlah mesh	Torsi (N.m)	
0,6 m/s	7786724	12,69	6583352	11,92	6,07%
0,7 m/s	7786724	16,05	6583352	17,09	6,48%
Error rata-rata					6,27%

Berdasarkan tabel 4.1 nilai error rata-rata yang terdapat pada *boundary condition* sebesar 6,27% sehingga *boundary condition* dan ukuran *mesh* tersebut dapat digunakan untuk melakukan simulasi pada tugas akhir ini, seperti yang terlihat pada tabel 4.2

4.3 Turbin Tunggal (*Single Turbine*)

4.3.1 Gaya Torsi dan Daya untuk *Single Turbin*

Berdasarkan simulasi dapat diketahui besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin, besarnya energi yang dihasilkan oleh turbin bergantung terhadap 2 parameter berikut yaitu gaya (*force*) dan torsi (*torque*), sehingga berdasarkan parameter tersebut dapat menghitung besarnya daya (*power*) yang dihasilkan oleh turbin.

Pada (v) arus laut 0.5 m/s dan sudut azimuth sebesar 30°, Diketahui :

$$FD_x \text{ (Force Drag Foil 1)} = 0,114 \text{ N}$$

$$FL_y \text{ (Force Lift Foil 1)} = 1,495 \text{ N}$$

Agar dapat dilakukan perhitungan *force*

(F) pada *foil* perlu dilakukan Proyeksi tegak lurus terhadap *axis* turbin :

$$\begin{aligned} F_x &= F_{Dx} \cdot \sin 60^\circ @ \text{Kuadran 4} \\ &= 0,114 \cdot (-1/2\sqrt{3}) \\ &= -0,0987 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_y &= F_{Ly} \cdot \cos 60^\circ @ \text{Kuadran 4} \\ &= 1,114 \cdot (1/2) \\ &= 0,557 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{x'} &= F_{Dx} \cdot \sin 30^\circ @ \text{Kuadran 1} \\ &= 0,459 \cdot (1/2) \\ &= 0,2295 \text{ N} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{y'} &= F_{Ly} \cdot \cos 30^\circ @ \text{Kuadran 1} \\ &= 1,459 \cdot (1/2\sqrt{3}) \\ &= 0,8297 \text{ N} \end{aligned}$$

Untuk menghitung *force* (F) foil 1

$$\begin{aligned} (F) \text{ foil 1} &= \sqrt{(\sum F_x)^2 + (\sum F_y)^2} \\ &= \sqrt{(0,648773104)^2 + (1,351707979)^2} \\ &= 1,499340188 \text{ N} \end{aligned}$$

Dengan tahapan yang sama (F) pada foil 2, foil 3 dan axis dapat diketahui sebagai berikut :

$$(F) \text{ foil 2} = 0,414204056 \text{ N}$$

$$(F) \text{ foil 3} = 0,160000047 \text{ N}$$

$$(F) \text{ axis} = 0,93823771 \text{ N}$$

Untuk menghitung *force* (F) turbin

$$\begin{aligned} (F) &= (F) \text{ foil 1} + (F) \text{ foil 2} + (F) \text{ foil 3} + (F) \text{ axis} \\ &= 3,011782 \text{ N} \end{aligned}$$

$$(r) \text{ Turbin} = 0,2 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{omega } (\omega) &= 36,81 \text{ rpm, diperlukan konversi satuan} \\ \text{dari rpm ke rad/s dengan persamaan :} \end{aligned}$$

$$\text{rpm} = 2\pi \text{ rad/s}$$

$$\text{rpm} = (2 \cdot 3,14)/60$$

$$\text{rpm} = 0,10467 \text{ rps}$$

$$36,81 \text{ rpm} = 36,81 \cdot 0,10467$$

$$= 3,85278 \text{ rps}$$

Setelah (F) diketahui besarnya (T) *torque* dapat dihitung dengan persamaan:

$$\begin{aligned}
 T &= F \cdot r \\
 &= (F_{foil} \cdot r_{foil}) + (F_{axis} \cdot r_{axis}) \\
 &= (2,0735442 \cdot 0,2) + (0,9382377 \cdot 0,01) \\
 &= 0,424091 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Sehingga setelah T diketahui besarnya P (Daya) pada sudut azimuth sebesar 30° dapat dihitung dengan persamaan :

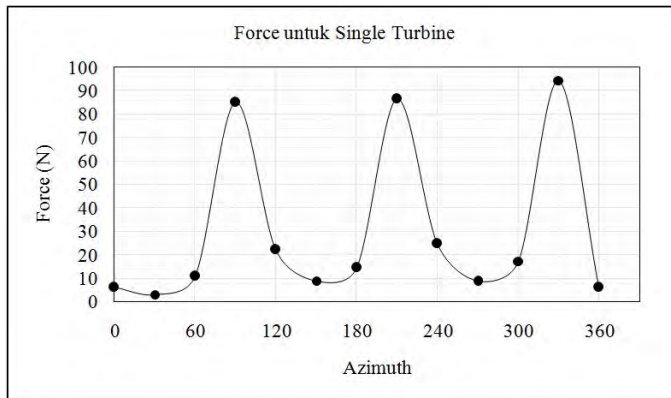
$$\begin{aligned}
 P \text{ (Power)} &= T \times \omega \\
 &= 0,424091 \times 3,85278 \\
 &= 1,63393 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

Dengan tahapan yang sama dilakukan perhitungan P , sehingga memperoleh hasil seperti yang disajikan tabel berikut :

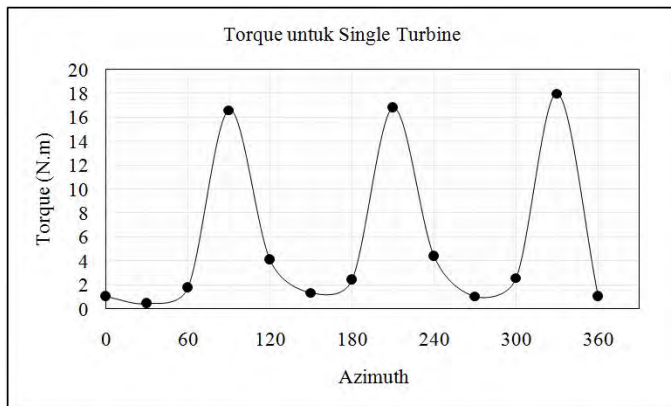
Tabel 4.5 Perhitungan *power* pada tiap-tiap sudut azimuth

Sudut Azimuth (°)	Force of Foil 1 F(N)	Force of Foil 2 F(N)	Force of Foil 3 F(N)	Force of Axis F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
0	1.885184606	2.54475323	0.576000022	1.21697206	6.22290992	1.0134	3.904243
30	1.499340188	0.414204056	0.160000047	0.93823771	3.011782	0.4241	1.63393
60	5.86576059	2.263396894	0.497815924	2.20923683	10.83621024	1.7475	6.732683
90	58.6386651	22.78496542	1.586007881	1.87781415	84.88745255	16.621	64.03592
120	8.430445836	4.461876959	7.459003285	1.83786887	22.18919495	4.0886	15.75265
150	2.3091663	0.815060734	3.52601418	2.25363795	8.903879162	1.3526	5.211211
180	3.194729723	1.790097763	6.810004699	2.79448546	14.58931765	2.3869	9.196244
210	10.21303334	23.30945396	50.30400064	2.62833217	86.45482011	16.792	64.69427
240	4.244573006	13.81736332	3.602013881	3.01050245	24.67445265	4.3629	16.80927
270	0.155455924	4.534611913	0.364020715	3.72984441	8.783932966	1.0481	4.038161
300	2.605270715	6.749555797	3.36119609	4.6003568	17.3163794	2.5892	9.975649
330	13.49645969	56.18296438	20.05530233	4.5337092	94.2684356	17.992	69.32031
360	1.885184606	2.54475323	0.576000022	1.21697206	6.22290992	1.0134	3.904243

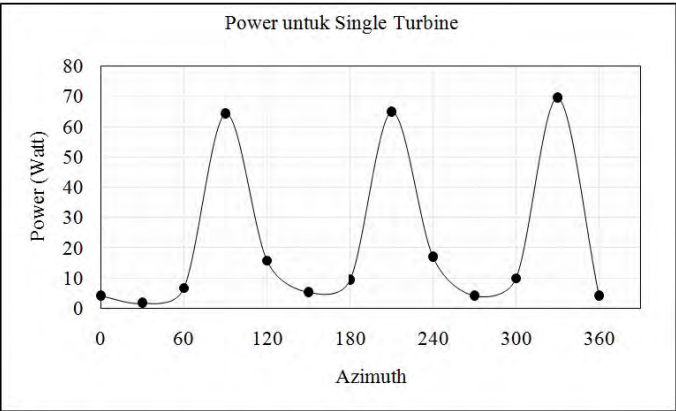
Berdasarkan tabel akan dibuat sebuah grafik yang akan membahas parameter gaya, torsi dan daya pada kecepatan arus laut 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2,5 m/s dengan variasi sudut azimuth yang telah ditetapkan :



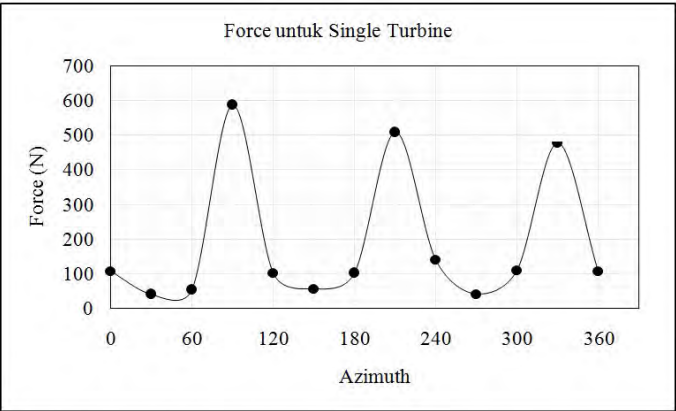
Gambar 4.6 Grafik hubungan *force* dengan sudut azimuth single turbine pada (v) arus laut = 0,5 m/s



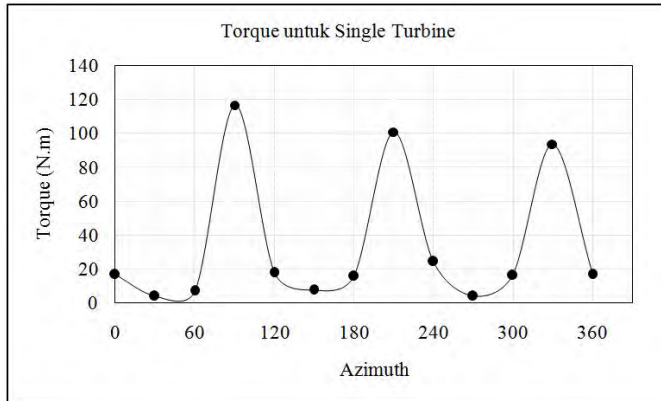
Gambar 4.7 Grafik hubungan *torque* dengan sudut azimuth pada (v) arus laut = 0,5 m/s



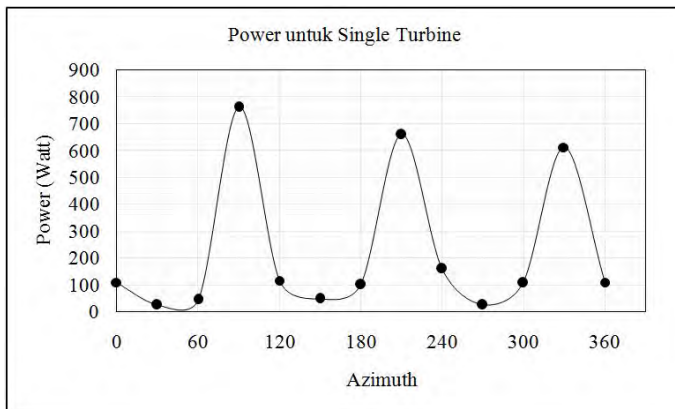
Gambar 4.8 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 0,5 m/s



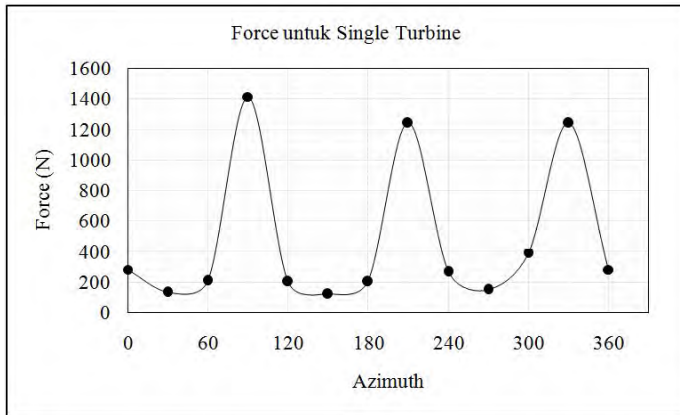
Gambar 4.9 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



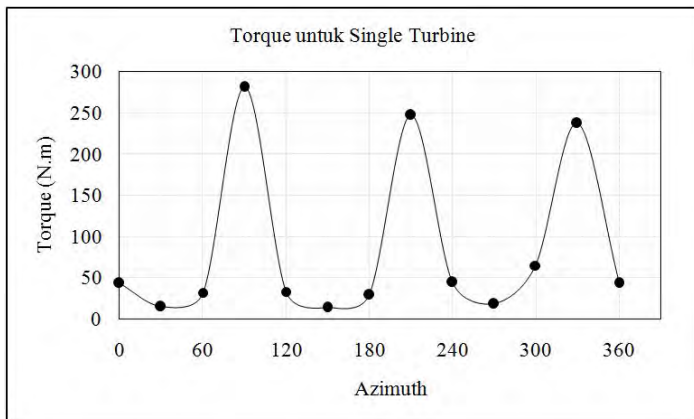
Gambar 4.10 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



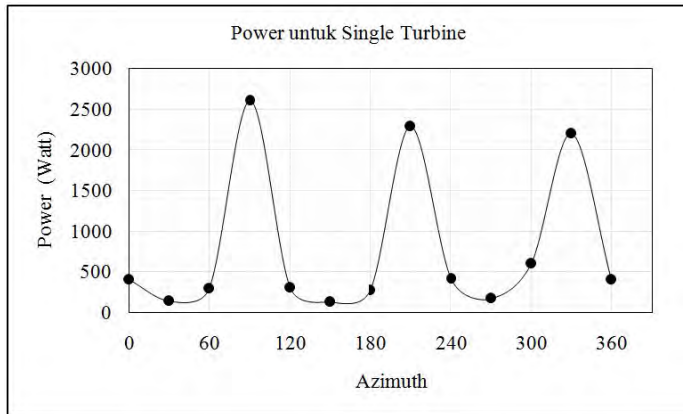
Gambar 4.11 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



Gambar 4.12 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



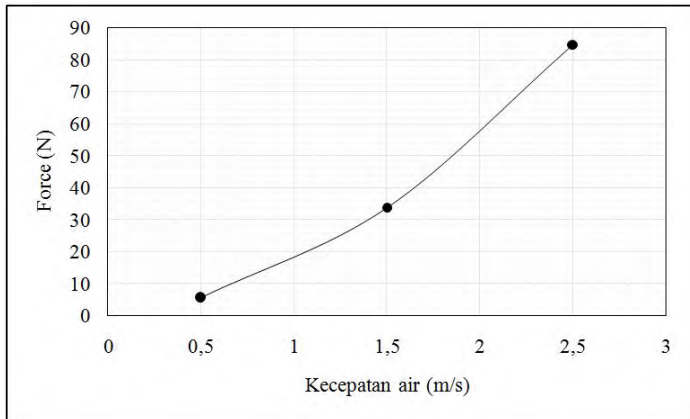
Gambar 4.13 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



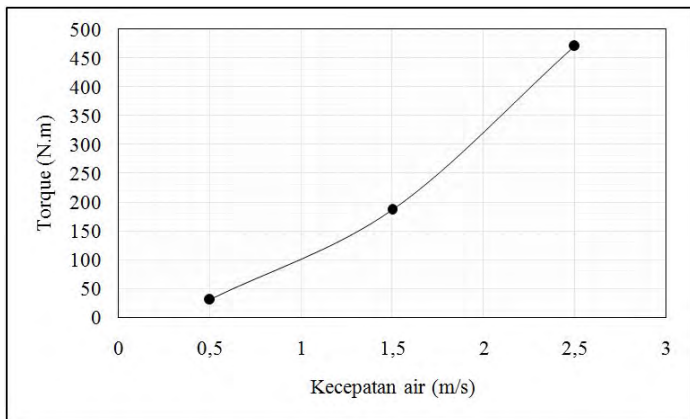
Gambar 4.14 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *single turbine* pada (v) arus laut = 2,5 m/s

Grafik sebelumnya menunjukkan bahwa torsi dan gaya yang dihasilkan pada tiap-tiap sudut azimuth mempunyai nilai yang berbeda hal ini disebabkan karena perbedaan sudut serang (*angle of attack*) pada saat kecepatan arus laut sebesar 0,5, 1,5 dan 2,5 m/s dan turbin berputar sebesar 360°.

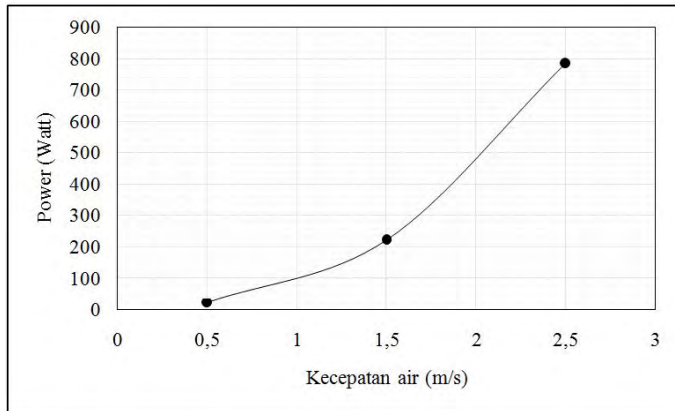
Pada sebuah *blade* yang berputar akan menghasilkan gaya, torsi dan daya dimana gaya, torsi dan daya total merupakan rata – rata gaya, torsi dan daya yang dihasilkan turbin pada tiap-tiap sudut azimuth. Untuk mengetahui hubungan gaya, torsi dan daya rata - rata pada variasi kecepatan arus laut sebesar 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2.5 m/s sebagaimana yang telah ditetapkan pada tugas akhir ini dapat melihat gambar dibawah ini.



Gambar 4.15 Grafik hubungan *force* dengan kecepatan arus laut pada *single turbine*



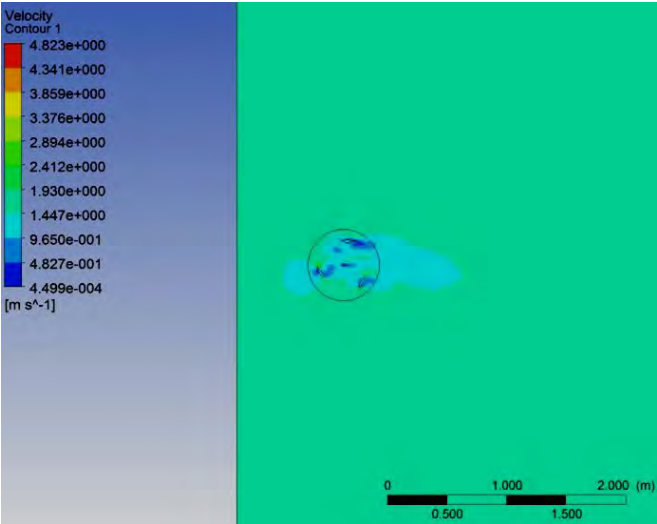
Gambar 4.16 Grafik hubungan *torque* dengan kecepatan arus laut pada *single turbine*



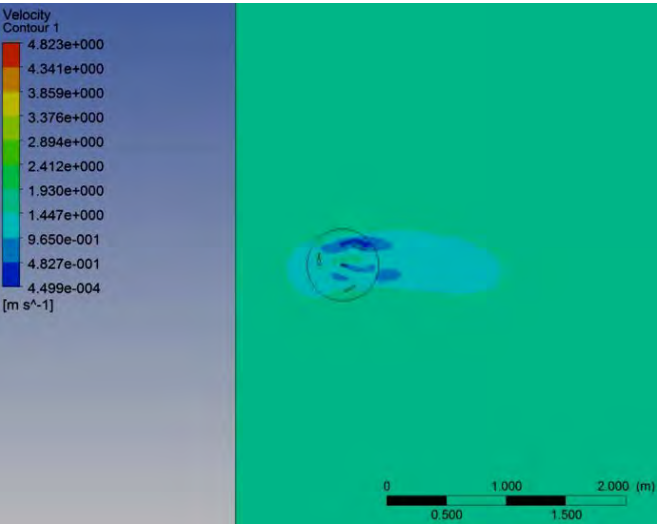
Gambar 4.17 Grafik hubungan *power* dengan kecepatan arus laut *single turbine*

4.3.2 Profil *Wake* untuk Single Turbin

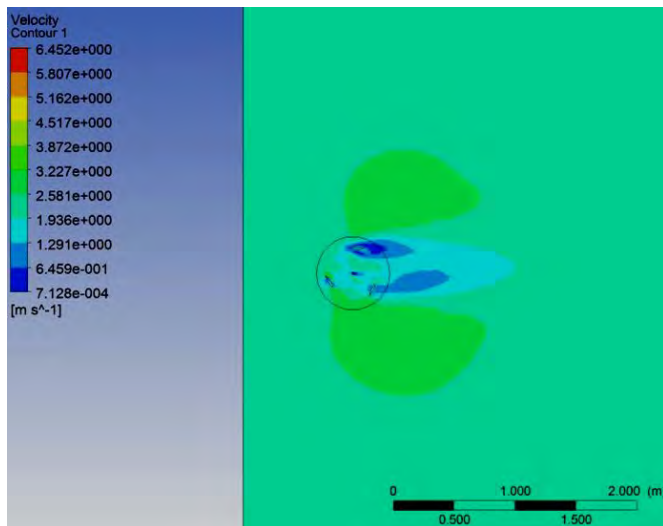
Pada saat turbin berputar akan menimbulkan *wake* atau olakan pada bagian belakang turbin. Hal tersebut dikarenakan ekstraksi yang dilakukan oleh turbin terhadap aliran air. Sehingga kecepatan air pada daerah sekitar turbin akan menurun, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.18 Profil *wake* untuk *single turbine* pada (v) arus laut (a) = 0,5 m/s, (b) = 1,5 m/s, (c) = 2,5 m/s

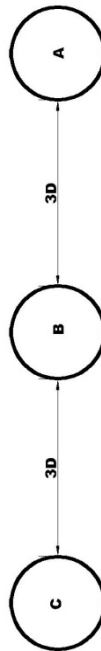
Perbedaan kecepatan pada daerah *wake* dibelakang turbin mengakibatkan *turbulence mixing*. Hal ini mengakibatkan pertukaran momentum energi dari lingkungan ke daerah *awake* sehingga perbedaan kecepatan di daerah *awake* kembali ke nilai semula (sama dengan lingkungan). Berdasarkan pengamatan pada gambar diatas bahwa *wake* terpendek terjadi pada (v) arus laut = 0,5 m/s dengan panjang = 0.3 m sedangkan *wake* terpanjang pada saat kecepatan arus laut 2,5 m/s sebesar 1,1 m dari domain turbin atau kurang dari 3D.

4.4 Multiple Turbine Array 1

4.4.1 Perancangan Array 1

Array merupakan susunan konfigurasi beberapa turbin (*multiple turbine*) pada pembangkit listrik tenaga arus laut, perancangan *array* akan berpengaruh terhadap kinerja turbin, *monitoring* dan biaya perawatan, ada

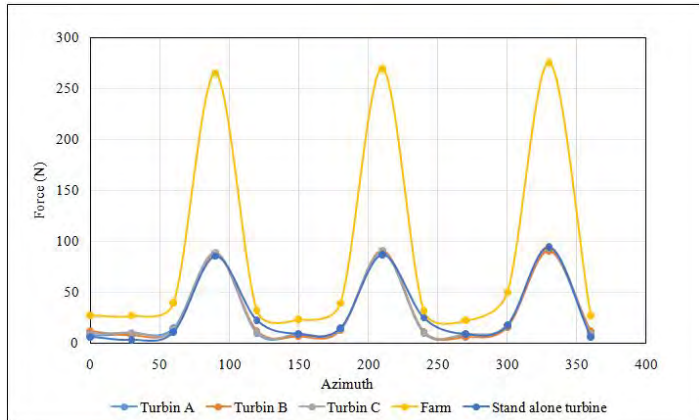
beberapa tipe konfigurasi *array* salah satunya adalah dengan meletakkan beberapa turbin secara sejajar dengan jarak yang mempertimbangkan dimana kecepatan yang diakibatkan awake kembali ke kecepatan normal (*laminar*), dimana pada pembahasan sebelumnya awake terpanjang sebesar 1,15 m dari domain tabung sehingga pada jarak konfigurasi *array* ditentukan sebesar 1,2 m atau sama dengan 3D, untuk lebih jelasnya lihat gambar berikut.



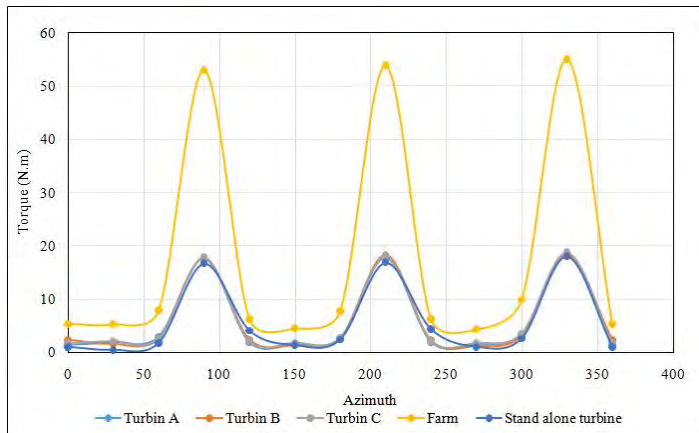
Gambar.4.19 Formasi *array* 1

4.4.2 Gaya, Torsi dan Daya untuk *Multiple Turbine Array I*

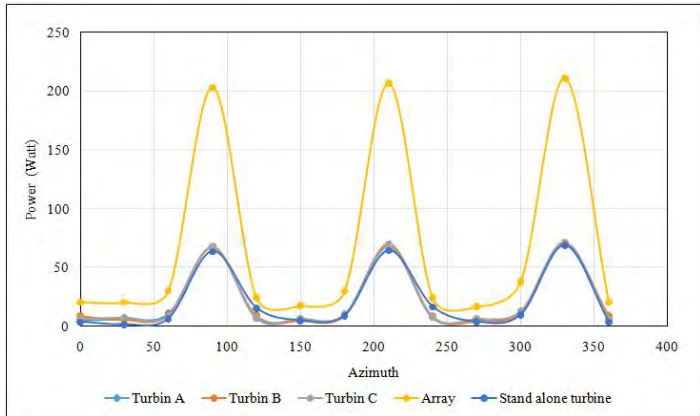
Berdasarkan simulasi dapat diketahui besarnya energi yang dihasilkan oleh *multiple turbine* yang dirancang dengan *array I*



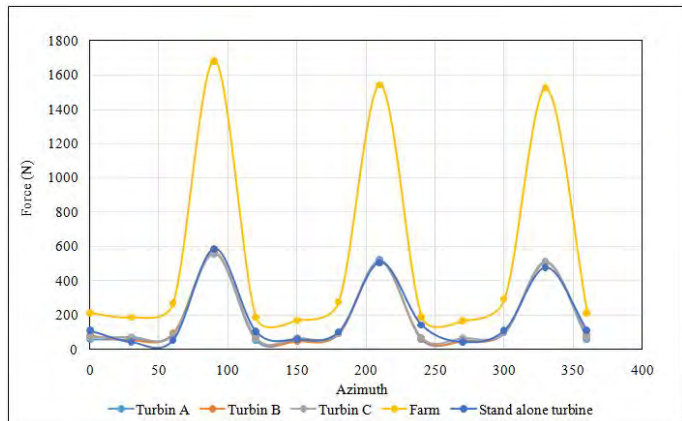
Gambar 4.20 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 0,5 m/s



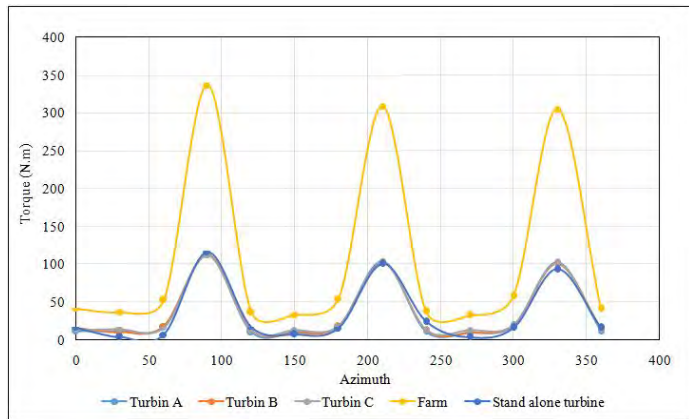
Gambar 4.21 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 0,5 m/s



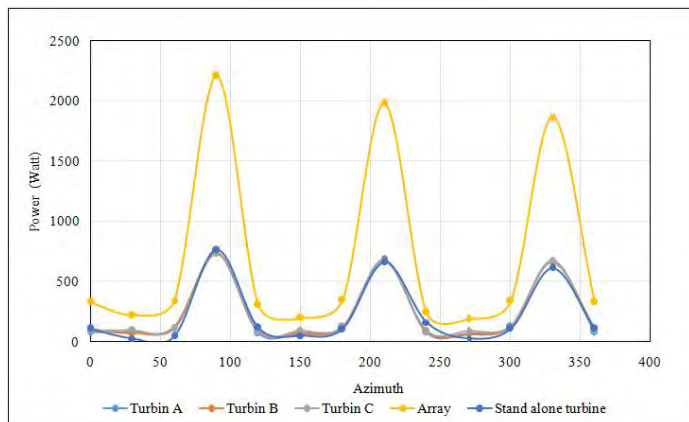
Gambar 4.22 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array* 1 pada (v) arus laut = 0,5 m/s



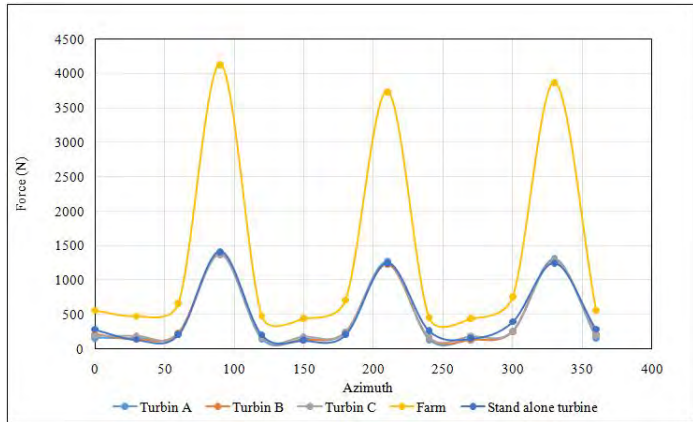
Gambar 4.23 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array* 1 pada (v) arus laut = 1,5 m/s



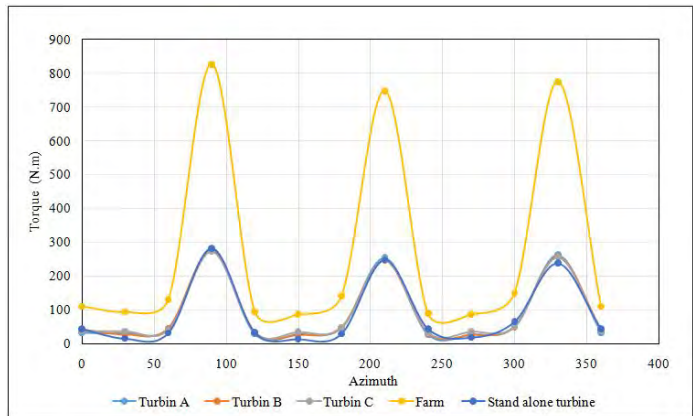
Gambar 4.24 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



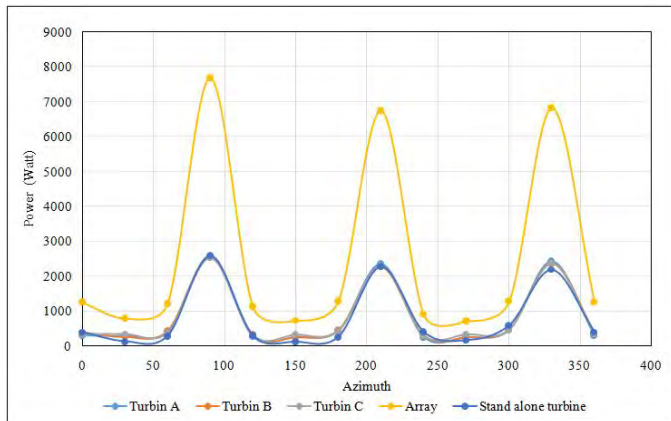
Gambar 4.25. Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



Gambar 4.26 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



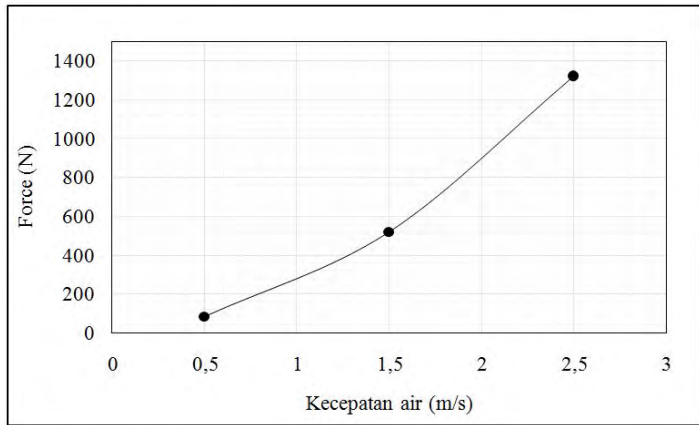
Gambar 4.27 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



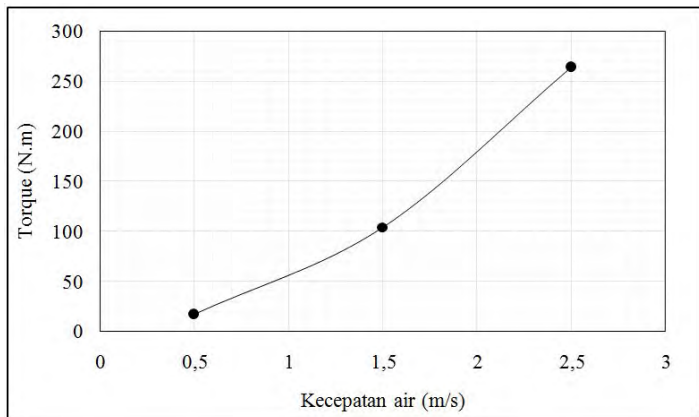
Gambar 4.28 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth multiple turbine array 1* pada (v) arus laut = 2,5 m/s

Grafik diatas menunjukkan bahwa gaya, torsi dan daya yang dihasilkan pada tiap-tiap sudut azimuth mempunyai nilai yang berbeda hal ini disebabkan karena perbedaan sudut serang (*angle of attack*) pada saat kecepatan arus laut sebesar 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2,5 m/s dan turbin berputar sebesar 360° sehingga membentuk pola sinusoidal yang terdiri dari 3 gelombang yang menunjukkan jumlah *blade*

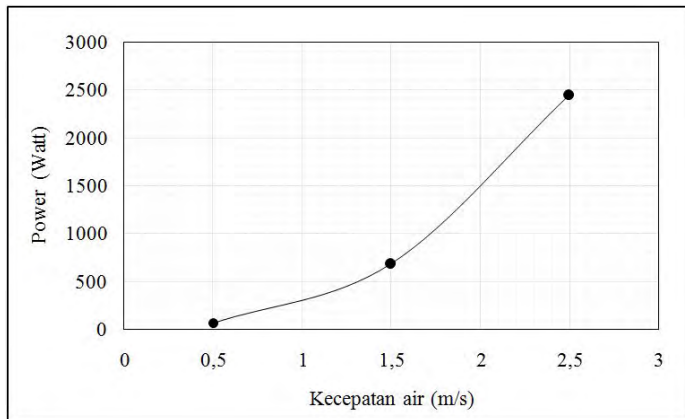
Pada *multiple turbine array I* sebuah *blade* yang berputar akan menghasilkan gaya, torsi dan daya dimana gaya, torsi dan daya total merupakan rata – rata gaya, torsi dan daya yang dihasilkan turbin pada tiap-tiap sudut azimuth. Untuk mengetahui hubungan gaya, torsi dan daya rata - rata pada variasi kecepatan arus laut sebesar 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2.5 m/s sebagaimana yang telah ditetapkan pada tugas akhir ini dapat melihat gambar dibawah ini.



Gambar 4.29 Grafik hubungan *force* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array 1*



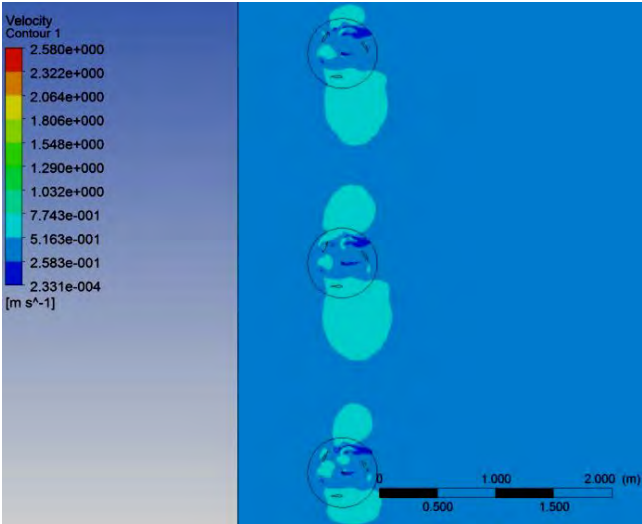
Gambar 4.30 Grafik hubungan *torque* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array 1*



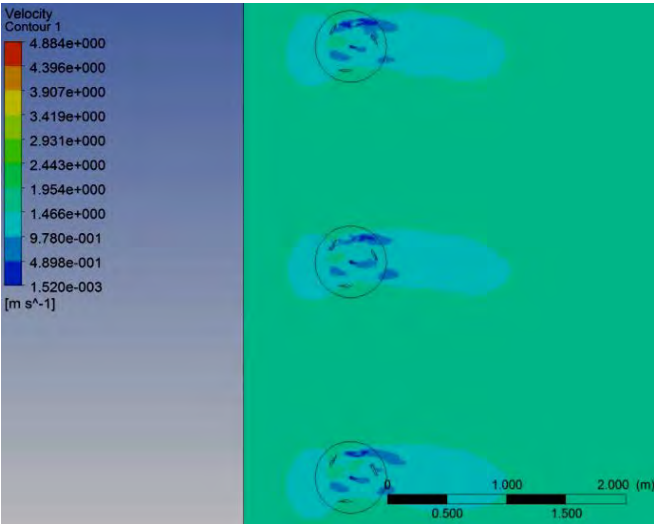
Gambar 4.31 Grafik hubungan *power* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array* 1

4.4.3 *Profil Wake* untuk Perancangan *Multiple Turbine Array I*

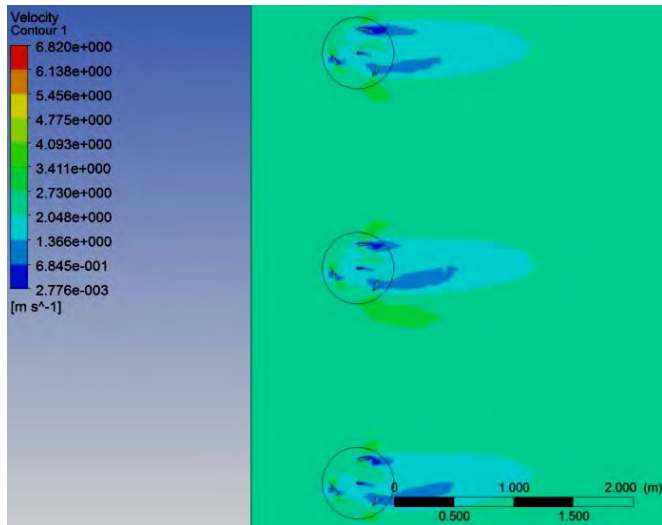
Berdasarkan hasil simulasi bentuk dan panjang *wake* yang ditimbulkan pada perancangan *multiple turbine array* 1 hampir sama dengan *single turbine* dimana panjang *wake* yang ditimbulkan sangat dipengaruhi oleh kecepatan arus laut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.32 Profil wake untuk *multiple turbine array* 1 pada (v) arus laut (a) = 0,5 m/s, (b) = 1,5 m/s, (c) = 2,5 m/s

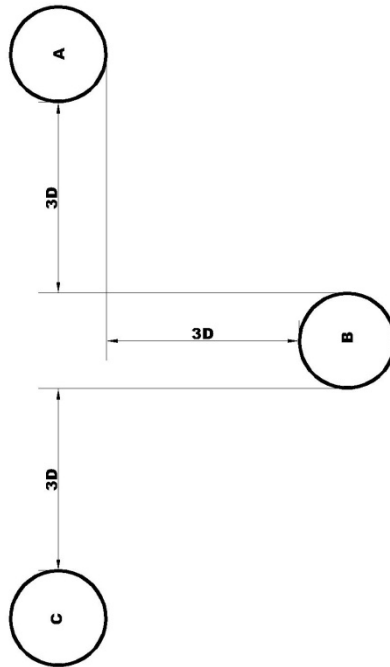
Berdasarkan pengamatan pada gambar diatas bahwa wake terpendek terjadi pada (v) arus laut = 0,5 m/s dengan panjang = 0.3 m s edangkan untuk wake terpanjang terjadi pada saat (v) arus laut = 2,5 m/s dengan panjang = 1,15 m dari domain tabung oleh sebab itu pada perancangan awal *multiple turbine array* 1 direncanakan jarak antar 1,2 m atau sama dengan jarak 3D antar domain tabung sudah mampu mengoptimalkan kinerja turbin.

4.5 Multiple Turbine Array 2

4.5.1 Perancangan Array 2

Dalam perancangan sebuah *array* juga mempertimbangkan kondisi *area* turbin tersebut diletakan, oleh sebab itu untuk *area* yang sempit diperlukan konfigurasi yang berbeda yaitu dengan cara meletakan tubin yang 1 d ibelakang turbin yang lainnya

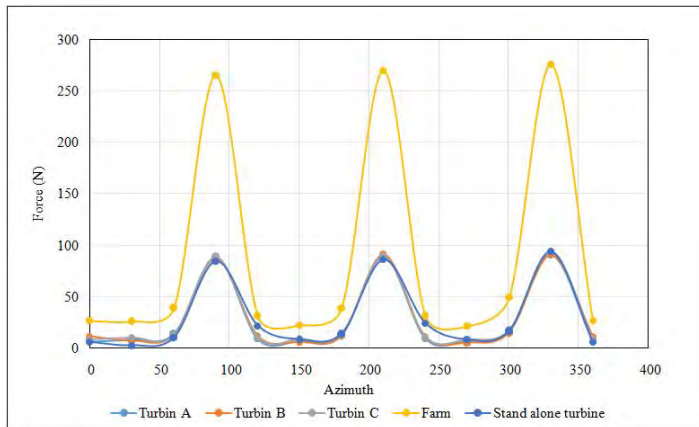
atau yang biasa disebut konfigurasi *array multiple turbine* secara *zig-zag* dengan variasi jarak antar domain tabung $0,5D$ yang pada tugas akhir ini disebut *array II*.



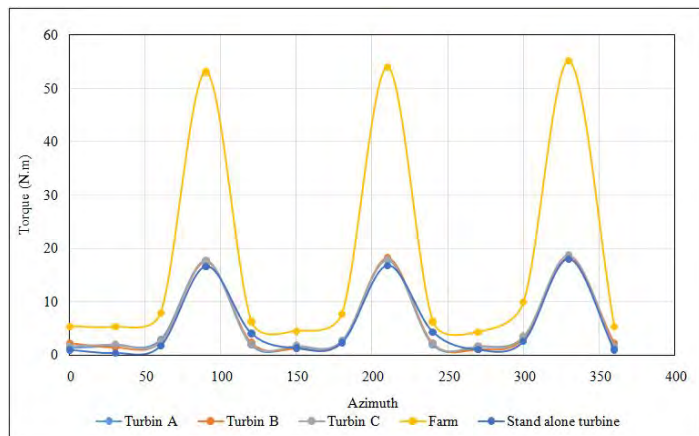
Gambar.4.33. Formasi *array 2*

4.5.1 Gaya, Torsi dan Daya untuk *Multiple Turbine Array 2*

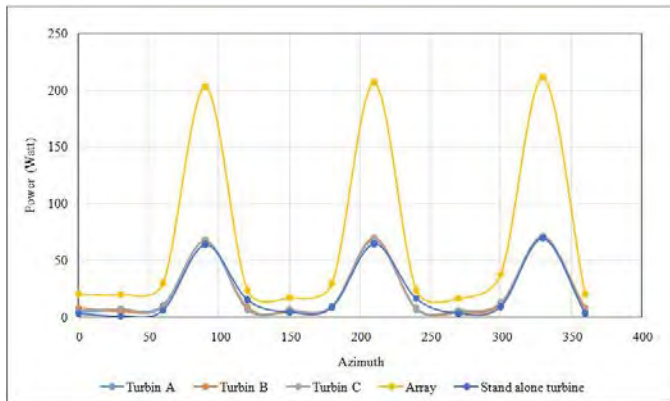
Berdasarkan simulasi dapat diketahui besarnya energi yang dihasilkan oleh *multiple turbine* yang dirancang dengan *array II*, pada konfigurasi ini besarnya gaya, torsi dan daya yang dihasilkan oleh turbin a, b dan c mempunyai nilai yang berbeda



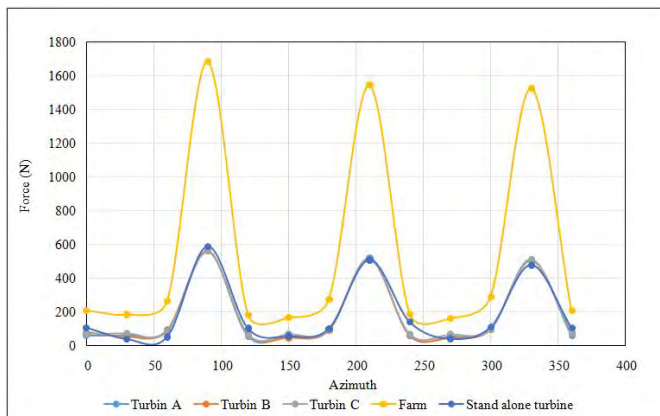
Gambar 4.34 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 0,5 m/s



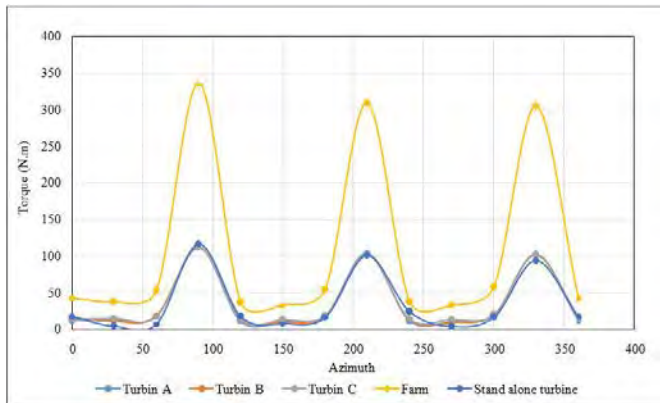
Gambar 4.35 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 0,5 m/s



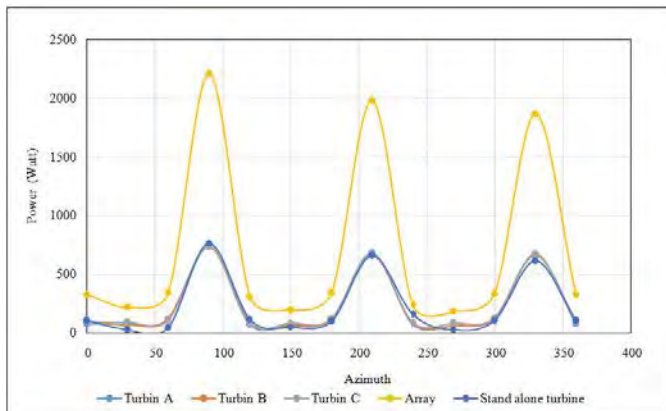
Gambar 4.36 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 0,5 m/s.



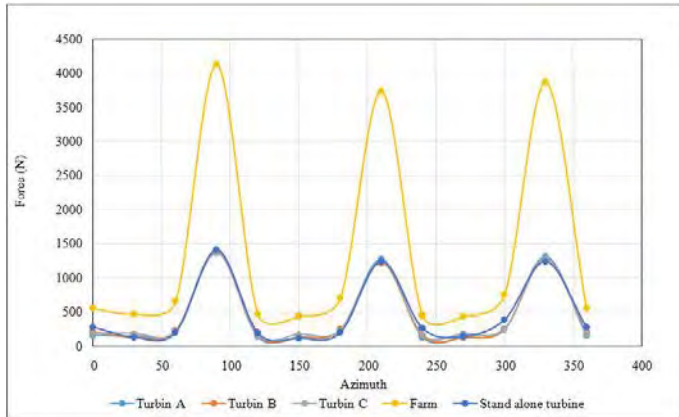
Gambar 4.37 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



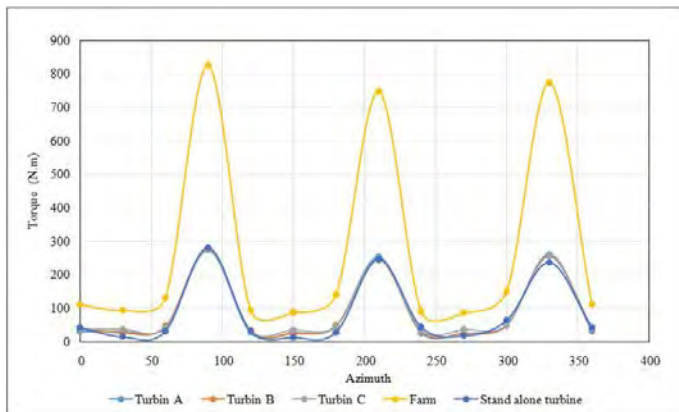
Gambar 4.38 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



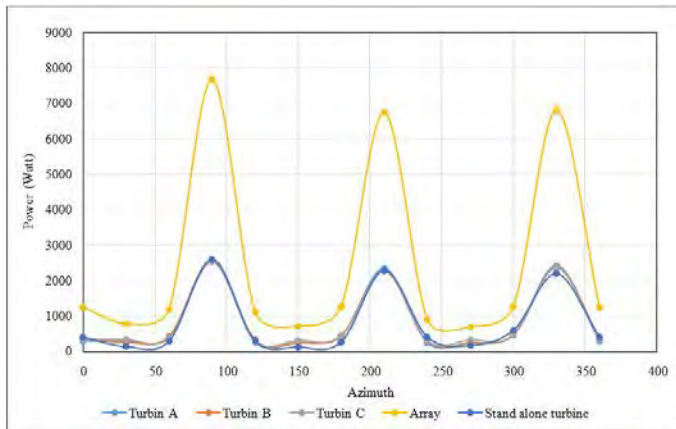
Gambar 4.39 Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 1,5 m/s



Gambar 4.40 Grafik hubungan *force* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



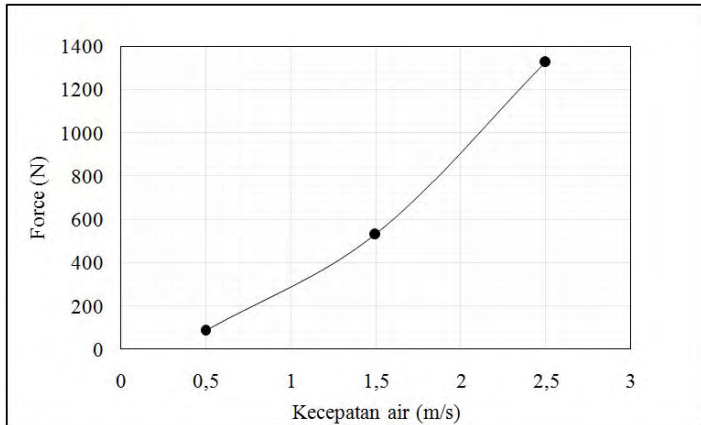
Gambar 4.41 Grafik hubungan *torque* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (v) arus laut = 2,5 m/s



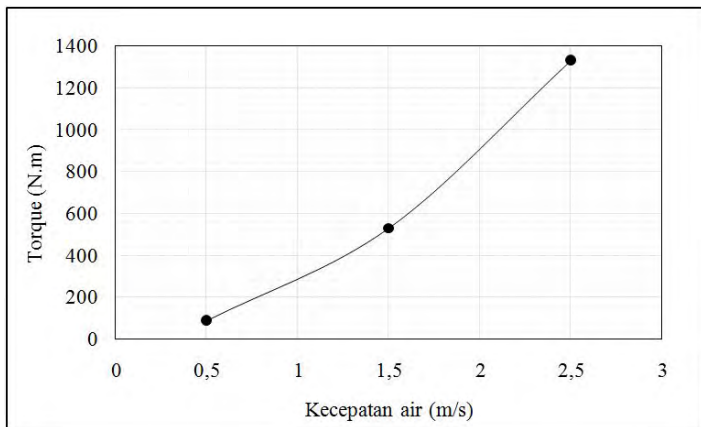
Gambar 4.42. Grafik hubungan *power* dengan *sudut azimuth* *multiple turbine array 2* pada (*v*) arus laut = 2,5 m/s

Grafik diatas menunjukkan bahwa gaya, torsi dan daya yang dihasilkan pada tiap-tiap sudut azimuth mempunyai nilai yang berbeda hal ini disebabkan karena perbedaan sudut serang (*angle of attack*) pada saat kecepatan arus laut sebesar 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2,5 m/s sehingga turbin berputar sebesar 360° sehingga membentuk pola sinusoidal yang terdiri dari 3 gelombang yang menunjukkan jumlah *blade*.

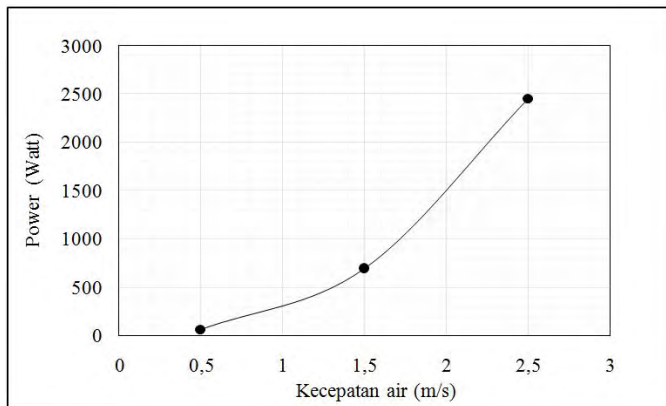
Pada *multiple turbine array II* sebuah *blade* yang berputar akan menghasilkan gaya, torsi dan daya dimana gaya, torsi dan daya total merupakan rata – rata gaya, torsi dan daya yang dihasilkan turbin pada tiap-tiap sudut azimuth. Untuk mengetahui hubungan gaya, torsi dan daya rata - rata pada variasi kecepatan arus laut sebesar 0,5 m/s, 1,5 m/s dan 2.5 m/s sebagaimana yang telah ditetapkan pada tugas akhir ini dapat melihat gambar dibawah ini.



Gambar 4.43 Grafik hubungan *force* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array 2*



Gambar 4.44 Grafik hubungan *torque* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array 2*

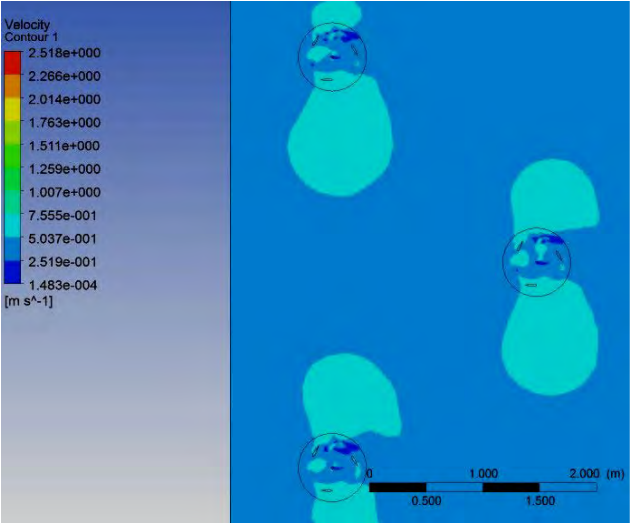


Gambar 4.45 Grafik hubungan *power* dengan kecepatan arus laut pada *multiple turbine array 2*

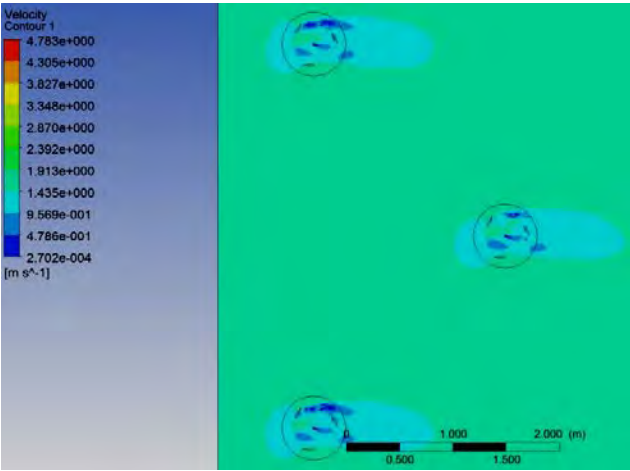
Berdasarkan grafik diatas bahwa parameter gaya, torsi dan daya akan meningkat bersamaan dengan meningkatnya kecepatan arus laut, oleh sebab itu untuk memperoleh daya yang besar maka perlu dilakukan perancangan peletakan turbin yang optimal.

4.5.3 *Profil Wake* untuk Perancangan *Multiple Turbine Array 2*

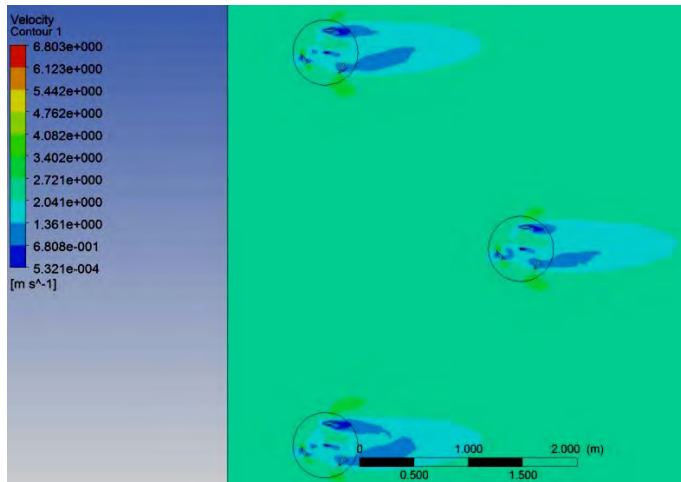
Berdasarkan hasil simulasi bentuk dan panjang *wake* yang ditimbulkan pada perancangan *multiple turbine array 2* hampir sama dengan *single turbine* dimana panjang *wake* yang ditimbulkan sangat dipengaruhi oleh kecepatan arus laut.



(a)



(b)



Gambar 4.46 Profil *wake* untuk *multiple turbine array* 2 pada (v) arus laut (a) = 0,5 m/s, (b) = 1,5 m/s, (c) = 2,5 m/s

Berdasarkan pengamatan pada gambar diatas bahwa *wake* terpendek terjadi pada (v) arus laut = 0,5 m/s dengan panjang = 0,3 m s edangkan untuk *wake* terpanjang terjadi pada saat (v) arus laut = 2,5 m/s dengan panjang = 1,15 m dari domain tabung oleh sebab itu pada perancangan awal *multiple turbine array* 1 direncanakan jarak antar 1,2 m atau sama dengan jarak 3D antar domain tabung sudah mampu mengoptimalkan kinerja turbin.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, kesimpulan yang dapat diambil dari tugas akhir ini adalah:

1. *Wake* terpanjang sebesar 11,5 m terjadi pada saat kecepatan arus laut 2,5 m/s.
2. *Force* terbesar dihasilkan oleh *array* 2 dengan formasi zigzag dan jarak antar domain tabung sebesar 3D. Besar *force* yang dihasilkan adalah 1326,9438 N.
3. *Torque* terbesar dihasilkan oleh *array* 2 dengan formasi zigzag dan jarak antar domain tabung sebesar 3D. Besar torsi yang dihasilkan adalah 265,3888 Nm.
4. *Power* terbesar dihasilkan oleh *array* 2 dengan formasi zigzag dan jarak antar domain tabung sebesar 3D. Besar daya yang dihasilkan adalah 2455,5183 Watt.
5. Besarnya *force*, *torque* dan *power* pada setiap turbin berbanding lurus terhadap kecepatan arus laut yang menabrak *blade*, semakin besar kecepatan arus laut yang menabrak *blade* maka *force*, *torque* dan *power* yang dihasilkan semakin besar.
6. Peletakan antar VATT yang paling optimal yaitu pada jarak 3D (1,2 m) antar domain tabung dikarenakan *wake* (penurunan kecepatan) akan kembali ke kecepatan normal setelah melewati jarak 1,15 m.

5.2 Saran

Selama pengerjaan tugas akhir ini peneliti merasa terdapat kekurangan oleh sebab itu berikut merupakan saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya:

1. Perlu dilakukan analisis pengaruh pertambahan waktu terhadap panjang *wake* yang ditimbulkan oleh turbin.
2. Perlu dilakukan simulasi dengan menggunakan software yang berbeda untuk membandingkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan.
3. Perlu dilakukan penelitian eksperimental untuk memperkuat hasil simulasi yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ariana, I., Made, dkk., 2011. “*Respon Getaran Model Vertical Axis Turbin (VAT) Akibat Pengaruh Kecepatan Aliran Arus Laut*”. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

- [2] Yulianto, S., Eko. 2013. “*Analisa Putaran dan Torsi Turbin Arus Laut Akibat Pengaruh Variasi Diameter dan Jumlah Blade*”. Jurusan Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya

- [3] Munawroh, 2013. “*Energi Pasang Surut Sebagai Sumber Energi Alternatif Bagi Pulau-Pulau Kecil di Nusantara*”. Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta

- [4] Guitet, L., Kusulja, M. & Maitre, T., 2005. “*Setting Up of An Experiment to Test Vertical Axis Water Turbines*”. (<http://www.ifremer.fr/dtmsi/.../mp/.../4.3.LEG I.pdf>). diakses pada tanggal 27 Januari 2015

- [5] Coiro, D. P., 2007. “*Experiment on Horizontal and Vertical Axis Water Turbines for Harnessing Marine Currents: Technological and Economical Aspects*”. (http://www.islenet.net/docs/coiro_islenet2007.pdf). diakses pada tanggal 27 Januari 2015

- [6] Hartanto, E., S. 2013. “*Perencanaan Oscilating Wave Column (OWC) Menggunakan Fluida Cair*”. Jurusan Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- [7] Goude, Anders, 2012. “*Fluid Mechanics of Vertical Axis Turbine*”. Faculty of Science and Technology Uppsala University. Uppsala
- [8] Gunawan M., G., Adetama. 2014 “Studi Eksperimental Mekanisme *Passive-Pitch* Dengan *Flapping Wing* Pada Turbin Vertikal Aksis Tipe *Darrieus*”. Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- [9] Septyaningrum, Erna. 2015 “Analisis Profil Wake Di Belakang Turbin Arus Laut Tipe *V-Blade Darrieus* Berbasis *Computational Fluid Dynamics*”. Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- [10] “Pengaruh *angle of attack* (α) terhadap bentuk aliran” (http://qph.is.quoracdn.net/main-qimgfcb44356d842938658685ce4e9354faa?convert_to_webp=true) diakses pada tanggal 15 Maret 2015
- [11] Hantoro, Ridho, dkk., 2011. “*An Experimental Investigation of Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine*”, Institut Teknologi Bandung. Bandung

LAMPIRAN

Tabel Perhitungan *Single Turbine* dengan Kecepatan 0,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Foil 1 F(N)	Force of Foil 2 F(N)	Force of Foil 3 F(N)	Force of Axis F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	1.885184606	2.54475323	0.576000022	1.216972062	6.22290992	1.013357292	3.904242708
2	30	1.499340188	0.414204056	0.160000047	0.93823771	3.011782	0.424091235	1.633930229
3	60	5.86576059	2.263396894	0.497815924	2.209236834	10.83621024	1.74748705	6.732683156
4	90	58.6386651	22.78496542	1.586007881	1.877814155	84.88745255	16.62070582	64.03592297
5	120	8.430445836	4.461876959	7.459003285	1.837868875	22.18919495	4.088643905	15.75264546
6	150	2.3091663	0.815060734	3.52601418	2.253637948	8.903879162	1.352584622	5.211210981
7	180	3.194729723	1.790097763	6.810004699	2.794485462	14.58931765	2.386911291	9.196244086
8	210	10.21303334	23.30945396	50.30400064	2.628332171	86.45482011	16.79158091	64.6942671
9	240	4.244573006	13.81736332	3.602013881	3.01050245	24.67445265	4.362895065	16.80927485
10	270	0.155455924	4.534611913	0.364020715	3.729844414	8.783932966	1.048116155	4.038160958
11	300	2.605270715	6.749555797	3.36119609	4.600356798	17.3163794	2.589208088	9.975649139
12	330	13.49645969	56.18296438	20.05530233	4.533709199	94.2684356	17.99228237	69.32030568
13	360	1.885184606	2.54475323	0.576000022	1.216972062	6.22290992	1.013357292	3.904242708
14	Average					29.87397516	5.494709315	21.16990616

Tabel Perhitungan *Single Turbine* dengan Kecepatan 1,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Foil 1 F(N)	Force of Foil 2 F(N)	Force of Foil 3 F(N)	Force of Axis F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	17.59811768	34.57589179	29.81970753	24.7512588	106.7449758	16.646	108.877
2	30	7.878203246	3.878493585	6.486876944	20.9464337	39.19000748	3.8582	25.2349
3	60	20.70335164	8.27859124	4.106309064	18.8707745	51.95902645	6.8064	44.5178
4	90	362.185202	217.9000301	2.16785243	4.53951874	586.7926032	116.5	761.956
5	120	30.66438429	38.34095515	18.27664776	14.7182473	102.0002345	17.604	115.138
6	150	7.560177086	7.03577135	20.84708501	20.2066276	55.64966103	7.2907	47.6855
7	180	26.11066579	5.470531376	44.66892074	24.2982002	100.5483181	15.493	101.334
8	210	131.3343097	88.01547739	284.0740025	4.17299465	507.5967842	100.73	658.814
9	240	43.27346384	54.00389215	23.00763402	19.7010412	139.9860312	24.254	158.636
10	270	10.74819415	2.525722395	4.362679682	22.9893062	40.62590243	3.7572	24.5745
11	300	16.57219796	44.78876129	18.21611251	30.0012133	109.578285	16.215	106.059
12	330	40.07098511	306.1967442	121.0030145	9.96792378	477.2386676	93.554	611.9
13	360	17.59811768	34.57589179	29.81970753	24.7512588	106.7449758	16.646	108.877
14	Average						186.5119594	221.046

Tabel Perhitungan *Single Turbine* dengan Kecepatan 2,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Foil 1 F(N)	Force of Foil 2 F(N)	Force of Foil 3 F(N)	Force of Axis F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	41.66396277	84.89526381	87.14131515	67.01717525	280.717717	43.4103	401.655
2	30	45.76678473	8.861851615	17.727691	57.72524861	130.081576	15.0485	139.237
3	60	118.4852052	21.99938742	15.94697938	49.37163096	205.803203	31.78	294.046
4	90	833.4020973	566.4368324	4.739470466	7.841947726	1412.420348	280.994	2599.91
5	120	66.89853152	94.42763498	1.150840857	37.91334026	200.3903476	32.8745	304.173
6	150	16.48093312	9.622303882	39.62840963	54.53571241	120.267359	13.6917	126.683
7	180	104.5043237	23.17124174	13.57597552	60.87441761	202.1259585	28.8591	267.019
8	210	342.5125597	227.0729015	663.6390051	9.470720344	1242.695187	246.74	2282.97
9	240	76.96627224	95.17431952	46.61928243	44.93645758	263.6963318	44.2013	408.974
10	270	28.77404977	48.21785431	10.2413799	60.73793444	147.9712184	18.054	167.046
11	300	61.16962625	175.0094183	83.57807394	69.47456048	389.2316789	64.6462	598.141
12	330	364.8062939	413.0421756	405.1250152	58.414114	1241.387599	237.179	2194.51
13	360	41.66396277	84.89526381	87.14131515	67.01717525	280.717717	43.4103	401.655
14	Average					470.5774031	84.6837	783.539

Tabel Perhitungan Array 1 dengan Kecepatan 0,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	7.628905642	12.96577866	9.133498561	29.72818286	5.945637	22.9072
2	30	8.390380132	7.475710367	8.264507367	24.13059787	4.82612	18.594
3	60	12.78217446	12.58729659	13.18346402	38.55293506	7.710587	29.7072
4	90	89.53982206	88.44905451	88.18342923	266.1723058	53.23446	205.101
5	120	9.982299333	14.03931585	11.34916839	35.37078358	7.074157	27.2552
6	150	7.532212775	6.463607383	6.907181364	20.90300152	4.1806	16.1069
7	180	12.7613081	11.06672619	12.62189803	36.44993233	7.289986	28.0867
8	210	89.62226891	88.6501512	86.7063972	264.9788173	52.99576	204.181
9	240	8.143501435	10.05325635	8.997230894	27.19398868	5.438798	20.9545
10	270	6.563079676	5.381946794	6.090572849	18.03559932	3.60712	13.8974
11	300	14.07894179	12.34560621	14.57517146	40.99971946	8.199944	31.5926
12	330	89.04556976	86.3537456	87.07462609	262.4739414	52.49479	202.251
13	360	7.628905642	12.96577866	9.133498561	29.72818286	5.945637	22.9072
14	Average				84.20907601	16.84182	64.8878

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada Array 1 dengan Kecepatan 0,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	1.525781128	2.593155731	1.826699712
30	1.678076026	1.495142073	1.652901473
60	2.556434891	2.517459318	2.636692803
90	17.90796441	17.6898109	17.63668585
120	1.996459867	2.80786317	2.269833679
150	1.506442555	1.292721477	1.381436273
180	2.552261621	2.213345239	2.524379606
210	17.92445378	17.73003024	17.34127944
240	1.628700287	2.010651271	1.799446179
270	1.312615935	1.076389359	1.21811457
300	2.815788357	2.469121243	2.915034292
330	17.80911395	17.27074912	17.41492522
360	1.525781128	2.593155731	1.826699712
Average	5.595374919	5.67381499	5.572625292

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada *Array 1* dengan Kecepatan 0,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	5.878499016	9.990858537	7.037872117
30	6.465257753	5.760453477	6.368265738
60	9.84938122	9.699216912	10.1585973
90	68.99544713	68.15494965	67.95027049
120	7.691920645	10.81807906	8.7451698
150	5.803991747	4.980571451	5.322370043
180	9.833302527	8.527532268	9.725879257
210	69.05897704	68.30990591	66.8121346
240	6.275023892	7.746597003	6.932870248
270	5.057220423	4.147091394	4.693127452
300	10.84861307	9.512980942	11.23098582
330	68.61459805	66.54039679	67.09587558
360	5.878499016	9.990858537	7.037872117
Average	21.55774858	21.85996092	21.47009927

Tabel Perhitungan Array 1 dengan Kecepatan 1,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	68.89652646	108.3348195	72.10578369	249.3371297	49.86742593	326.1638834
2	30	56.2137933	50.81028877	59.21653464	166.2406167	33.24812334	217.4633405
3	60	88.15691736	86.46456242	84.29045598	258.9119358	51.78238715	338.688917
4	90	567.8269492	560.5251237	557.8452273	1686.1973	337.2394601	2205.755157
5	120	64.51289244	103.1290665	65.89165392	233.5336129	46.70672258	305.4909238
6	150	51.13188471	45.15594569	52.76408878	149.0519192	29.81038384	194.9783927
7	180	89.32343289	85.44508954	87.32129581	262.0898182	52.41796365	342.8459814
8	210	511.3052611	501.8733715	498.1504883	1511.329121	302.2658242	1977.005895
9	240	54.5288228	74.66508077	53.54879982	182.7427034	36.54854068	239.0501161
10	270	47.30834239	42.84253262	50.49978631	140.6506613	28.13013226	183.9885057
11	300	87.22781471	84.16813266	84.03511609	255.4310635	51.08621269	334.1355045
12	330	481.3949972	477.6813227	466.2104793	1425.286799	285.0573598	1864.451869
13	360	68.89652646	108.3348195	72.10578369	249.3371297	49.86742593	326.1638834
14	Average				520.7799854	104.1559971	681.2447977

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada Array 1 dengan Kecepatan 1,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	13.7793053	21.6669639	14.4211567
30	11.2427587	10.1620578	11.8433069
60	17.6313835	17.2929125	16.8580912
90	113.56539	112.105025	111.569045
120	12.9025785	20.6258133	13.1783308
150	10.2263769	9.03118914	10.5528178
180	17.8646866	17.0890179	17.4642592
210	102.261052	100.374674	99.6300977
240	10.9057646	14.9330162	10.70976
270	9.46166848	8.56850652	10.0999573
300	17.4455629	16.8336265	16.8070232
330	96.2789994	95.5362645	93.2420959
360	13.7793053	21.6669639	14.4211567
Average	34.4111409	35.837387	33.9074691

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada *Array 1* dengan Kecepatan 1,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	90.1251998	141.715377	94.3233062
30	73.5346122	66.4661582	77.4625702
60	115.320179	113.106369	110.262368
90	742.78806	733.236367	729.73073
120	84.3908629	134.905607	86.1944539
150	66.8868456	59.0695763	69.0219709
180	116.846126	111.772772	114.227083
210	668.850683	656.512602	651.642609
240	71.3304618	97.6711841	70.0484702
270	61.8851781	56.0433451	66.0599825
300	114.104798	110.102354	109.928352
330	629.724349	624.866403	609.861117
360	90.1251998	141.715377	94.3233062
Average	225.070197	234.39873	221.775871

Tabel Perhitungan Array 1 dengan Kecepatan 2,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	189.8885356	291.244053	193.6478761	674.7804647	134.9560929	1248.685749
2	30	142.6373974	130.1638615	152.3973041	425.198563	85.03971259	786.8327754
3	60	218.8882575	216.5742073	212.6877844	648.1502492	129.6300498	1199.406357
4	90	1396.255216	1382.796652	1373.167942	4152.21981	830.4439619	7683.710439
5	120	171.1215502	264.8372094	168.8283266	604.7870861	120.9574172	1119.162535
6	150	132.1229079	114.9144191	142.1210778	389.1584048	77.83168095	720.1402224
7	180	231.6229793	231.3927294	227.8885182	690.904227	138.1808454	1278.522878
8	210	1235.976035	1212.976086	1197.01046	3645.96258	729.1925161	6746.878061
9	240	144.4741984	202.9317057	139.5664686	486.9723727	97.39447454	901.1456221
10	270	126.1469986	112.6508134	139.535242	378.3330541	75.66661081	700.1078388
11	300	233.8567118	227.1229865	227.3191643	688.2988625	137.6597725	1273.701634
12	330	1252.113608	1228.440941	1205.376361	3685.93091	737.1861821	6820.839723
13	360	189.8885356	291.244053	193.6478761	674.7804647	134.9560929	1248.685749
14	Average				1318.88285	263.77657	2440.601506

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada Array 1 dengan Kecepatan 2,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	37.97770712	58.2488106	38.72957523
30	28.52747948	26.0327723	30.47946082
60	43.77765151	43.31484145	42.53755688
90	279.2510431	276.5593305	274.6335883
120	34.22431003	52.96744188	33.76566531
150	26.42458159	22.98288382	28.42421555
180	46.32459587	46.27854589	45.57770365
210	247.1952069	242.5952172	239.4020919
240	28.89483969	40.58634114	27.91329371
270	25.22939973	22.53016269	27.9070484
300	46.77134235	45.4245973	45.46383285
330	250.4227216	245.6881881	241.0752723
360	37.97770712	58.2488106	38.72957523
Average	87.1537374	90.88138027	85.74145232

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada Array 1 dengan Kecepatan 2,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	351.3900011	538.9490617	358.3466858
30	263.9514548	240.8690934	282.0122272
60	405.0541798	400.7720144	393.5801629
90	2583.779585	2558.874424	2541.056431
120	316.6615694	490.0830216	312.4179438
150	244.494322	212.6498986	262.9960019
180	428.6198674	428.1937884	421.7092223
210	2287.181892	2244.620334	2215.075836
240	267.3504674	375.5264742	258.2686805
270	233.4358619	208.4610813	258.2108955
300	432.7534041	420.2926006	420.6556289
330	2317.044579	2273.23815	2230.556993
360	351.3900011	538.9490617	358.3466858
Average	806.3928604	840.8830003	793.3256457

Tabel Perhitungan Array 2 dengan Kecepatan 0,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	6.72545689	11.49071443	8.649783999	26.86595532	5.37319	20.5724
2	30	8.965396509	7.329484933	10.2645652	26.55944664	5.31189	20.3377
3	60	14.45084809	12.64050496	12.37492364	39.46627669	7.89326	30.221
4	90	88.34590271	87.7436671	88.90677468	264.9963445	52.9993	202.919
5	120	9.347989259	11.83421985	10.3704059	31.55261501	6.31052	24.1611
6	150	7.618202737	6.170651225	8.919778987	22.70863295	4.54173	17.3889
7	180	13.29468412	12.26391827	13.36010087	38.91870325	7.78374	29.8017
8	210	88.97095399	91.05761008	89.5462348	269.5747989	53.915	206.425
9	240	9.686161162	11.12736495	10.73683073	31.55035684	6.31007	24.1594
10	270	7.634816089	5.577967681	8.57844691	21.79123068	4.35825	16.6864
11	300	16.44490477	15.47120104	17.58629167	49.50239747	9.90048	37.906
12	330	90.72120182	90.98567868	93.67558579	275.3824663	55.0765	210.872
13	360	6.72545689	11.49071443	8.649783999	26.86595532	5.37319	20.5724
14	Average				86.59501383	17.319	66.3094

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada Array 2 dengan Kecepatan 0,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	1.345091378	2.298142886	1.7299568
30	1.793079302	1.465896987	2.05291304
60	2.890169619	2.528100991	2.474984729
90	17.66918054	17.54873342	17.78135494
120	1.869597852	2.366843969	2.07408118
150	1.523640547	1.234130245	1.783955797
180	2.658936824	2.452783653	2.672020173
210	17.7941908	18.21152202	17.90924696
240	1.937232232	2.225472991	2.147366145
270	1.526963218	1.115593536	1.715689382
300	3.288980954	3.094240207	3.517258333
330	18.14424036	18.19713574	18.73511716
360	1.345091378	2.298142886	1.7299568
Average	5.675876539	5.772056886	5.871069341

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada *Array 2* dengan Kecepatan 0,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	5.149960327	8.79891499	6.623497133
30	6.865174676	5.612489565	7.860001842
60	11.06561169	9.679357119	9.475990531
90	67.65010934	67.18895264	68.07959219
120	7.158141759	9.061951283	7.941048443
150	5.833572722	4.725122696	6.830243455
180	10.18028914	9.390989125	10.23038145
210	68.12873693	69.72657575	68.56925323
240	7.417093963	8.520683277	8.221635077
270	5.846294252	4.271280409	6.568871375
300	12.59254331	11.84693811	13.46655043
330	69.46897404	69.67149491	71.73126796
360	5.149960327	8.79891499	6.623497133
Average	21.73126634	22.09951268	22.47860233

Tabel Perhitungan Array 2 dengan Kecepatan 1,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	58.66743284	80.77597744	69.49345832	208.9368686	41.78737372	273.3153323
2	30	60.55847891	52.60364653	72.26582999	185.4279554	37.08559109	242.5627588
3	60	90.79641146	91.00862926	83.18826844	264.9933092	52.99866183	346.6441075
4	90	562.2282343	561.6931563	558.2718235	1682.193214	336.4386428	2200.517316
5	120	54.12966984	67.28261844	62.82451685	184.2368051	36.84736102	241.0045865
6	150	54.2785278	47.17540585	65.51931507	166.9732487	33.39464974	218.421714
7	180	91.24479449	90.29786644	92.52767272	274.0703337	54.81406673	358.5179811
8	210	519.9352985	511.0512517	512.386857	1543.373407	308.6746815	2018.923795
9	240	57.10347873	64.88029559	66.47833306	188.4621074	37.69242148	246.5318058
10	270	52.25661082	45.78800823	65.62116535	163.6657844	32.73315688	214.0951405
11	300	95.33531722	98.24676106	97.85219775	291.434276	58.28685521	381.2321709
12	330	512.8992525	503.5035159	508.5051181	1524.907887	304.9815773	1994.768604
13	360	58.66743284	80.77597744	69.49345832	208.9368686	41.78737372	273.3153323
14	Average				529.8163127	105.9632625	693.0654342

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada *Array 2* dengan Kecepatan 1,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	11.73348657	16.15519549	13.89869166
30	12.11169578	10.52072931	14.453166
60	18.15928229	18.20172585	16.63765369
90	112.4456469	112.3386313	111.6543647
120	10.82593397	13.45652369	12.56490337
150	10.85570556	9.435081171	13.10386301
180	18.2489589	18.05957329	18.50553454
210	103.9870597	102.2102503	102.4773714
240	11.42069575	12.97605912	13.29566661
270	10.45132216	9.157601646	13.12423307
300	19.06706344	19.64935221	19.57043955
330	102.5798505	100.7007032	101.7010236
360	11.73348657	16.15519549	13.89869166
Average	34.89386062	35.30897093	35.76043099

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada Array 2 dengan Kecepatan 1,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	76.74427692	105.6649947	90.90606068
30	79.21799966	68.81209251	94.53266659
60	118.7729649	119.0505721	108.8205705
90	735.4642468	734.7642984	730.2887708
120	70.80832023	88.01400796	82.18225828
150	71.0030449	61.71128061	85.70738851
180	119.3595055	118.1208062	121.0376694
210	680.1398425	668.5184076	670.265545
240	74.69843101	84.87147179	86.96190296
270	68.35812677	59.89639248	85.8406213
300	124.7104165	128.5189461	128.0028083
330	670.9358218	658.6450333	665.1877491
360	76.74427692	105.6649947	90.90606068
Average	228.2274827	230.9425614	233.8953902

Tabel Perhitungan *Array* 2 dengan Kecepatan 2,5 m/s

No	Sudut Azimuth (°)	Force of Turbine A F(N)	Force of Turbine B F(N)	Force of Turbine C F(N)	Force of Turbine F(N)	Torque T (Nm)	Power P (Watt)
1	0	160.1542738	209.6655124	186.268136	556.0879222	111.2175844	1029.044407
2	30	153.8593896	135.5302916	185.3076573	474.6973385	94.9394677	878.4305895
3	60	223.0155724	228.5806056	206.0800833	657.6762613	131.5352523	1217.034306
4	90	1384.744033	1380.313177	1367.488061	4132.54527	826.5090541	7647.302573
5	120	140.3359308	169.3822159	162.3142864	472.0324332	94.40648663	873.4991645
6	150	138.0914185	127.8693886	173.6370964	439.5979034	87.91958068	813.4788509
7	180	232.8804109	242.9449994	231.5032634	707.3286737	141.4657347	1308.916426
8	210	1269.890667	1225.922393	1242.382064	3738.195125	747.639025	6917.555
9	240	134.2354069	156.440361	163.2590578	453.9348257	90.78696514	840.0094212
10	270	132.1354486	127.0219305	178.0814451	437.2388242	87.44776484	809.1133591
11	300	247.6911768	253.9928715	251.357098	753.0411464	150.6082293	1393.507662
12	330	1311.952868	1280.413866	1279.439018	3871.805753	774.3611505	7164.802357
13	360	160.1542738	209.6655124	186.268136	556.0879222	111.2175844	1029.044407
14	Average				1326.9438	265.38876	2455.518348

Tabel Perhitungan *Torque* Turbin pada Array 2 dengan Kecepatan 2,5 m/s

Torque	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	32.03085477	41.93310249	37.25362719
30	30.77187792	27.10605831	37.06153147
60	44.60311448	45.71612113	41.21601666
90	276.9488066	276.0626354	273.4976121
120	28.06718617	33.87644318	32.46285729
150	27.61828369	25.57387771	34.72741927
180	46.57608218	48.58899988	46.30065268
210	253.9781335	245.1844787	248.4764129
240	26.84708138	31.28807221	32.65181155
270	26.42708973	25.4043861	35.61628901
300	49.53823536	50.79857431	50.27141961
330	262.3905736	256.0827733	255.8878036
360	32.03085477	41.93310249	37.25362719
Average	87.52524416	88.42681731	89.43669851

Tabel Perhitungan *Power* Turbin pada *Array* 2 dengan Kecepatan 2,5 m/s

Power	Turbine A	Turbine B	Turbine C
0	296.3665515	387.9874285	344.6904274
30	284.7178262	250.7997081	342.9130553
60	412.6918035	422.9899346	381.352568
90	2562.478065	2554.278736	2530.545773
120	259.6925756	313.4429198	300.3636691
150	255.5390905	236.623156	321.3166044
180	430.9467529	449.571341	428.3983323
210	2349.941146	2268.577562	2299.036293
240	248.4035154	289.493931	302.1119748
270	244.5175286	235.0549292	329.5409013
300	458.3541739	470.0155021	465.1379857
330	2427.777529	2369.414396	2367.610433
360	296.3665515	387.9874285	344.6904274
Average	809.8302391	818.1720748	827.5160342

“Halaman ini sengaja dikosongkan “

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Galuh Chandra Kusuma, lahir di Tuban pada tanggal 02 Maret 1991, merupakan anak ketiga dari dua bersaudara dari pasangan Sukartja dan Sri Martini. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN 1 Kebonsari, SMPN 1 dan SMAN 2, Tuban. Penulis melanjutkan pendidikan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Program Studi D3 Desain Konstruksi Kapal pada tahun 2009 dan melanjutkan pendidikan di Teknik Sistem Perakapalan, Institut

Teknologi Sepuluh Nopember pada tahun 2013 dan terdaftar dengan NRP 4213105022. Saat masa perkuliahan, penulis juga aktif baik sebagai panitia maupun peserta dalam beberapa event yang diselenggarakan oleh jurusan dan institut. Tahun 2015, penulis menyelesaikan studi Strata-1 di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”