



TUGAS AKHIR

PENGARUH JARAK PENEMPATAN POSISI
TURBIN DENGAN PERMUKAAN AIR
TERHADAP PERFORMA TURBIN SAVONIUS
TIPE CROSS-FLOW

DAVE JOHANNES PUTRA
NRP 04311740000096

DOSEN PEMBIMBING
Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Dendy Satrio, S.ST., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2021



FINAL PROJECT – MO184804

EFFECT OF TURBINE POSITION DISTANCE
WITH WATER SURFACE ON CROSS-FLOW
TYPE SAVONIUS TURBINE PERFORMANCE

DAVE JOHANNES PUTRA
NRP. 0431174000096

SUPERVISORS :

Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.

Dr. Dendy Satrio, S.ST

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2021

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Teknik (S.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Dave Johannes Putra

NRP: 04311740000096

Judul Tugas Akhir:

**Pengaruh Jarak Penempatan Posisi Turbin Dengan Permukaan Air Terhadap
Performa Turbin Savonius Tipe Cross-Flow**

Tanggal Ujian: 12 Januari 2022

Periode Wisuda: Maret 2022

Disetujui oleh:
Pembimbing:

Suntoyo S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197107231995121001

Dr. Dendy Satrio S.ST
NIP. 1993202011013



Penguji:

Silvianita, S.T., M.Sc., Ph.D
NIP. 198308062006042001

Wimala L. Dhanista, ST., MT
NIP. 198804242015042000

Sylia
Wibol

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRAK

Pengaruh Jarak Penempatan Posisi Turbin Dengan Permukaan Air Terhadap Performa Turbin Savonius Tipe Cross-Flow

Nama Mahasiswa : Dave Johannes Putra
NRP : 04311740000096
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Dendy Satrio S.ST

Ketersediaan energi dalam jumlah yang cukup merupakan aspek utama yang akan menentukan berjalan atau tidaknya aktivitas manusia di era globalisasi ini. Meningkatnya populasi sama artinya dengan meningkatnya permintaan, jika ketersediaan energi tidak dapat dipenuhi, maka bisa saja terjadi kelangkaan energi yang dampaknya akan sangat buruk bagi perekonomian dunia. Upaya untuk memenuhi semua pasokan energi dan membebaskan Indonesia dari krisis energi dimana pada tahun 2005, dilaporkan telah terjadi krisis energi, yaitu defisit listrik di Sumatera dan Jawa lebih dari 75 MW, Sulawesi sekitar 24 MW, dan wilayah lainnya di bawah 10 MW (DESDM, 2005). Secara umum potensi listrik yang bersumber dari energi terbarukan di Indonesia cukup besar dan belum dimanfaatkan secara optimal Energi arus laut adalah salah satu alternatif energi baru terbarukan, walaupun memang tidak bisa dieksploitasi terus menerus dengan kekuatan yang sama, karena pembangkit utama arus laut adalah pasang surut yang diakibatkan oleh gaya gravitasi bulan dan matahari. Turbin vertical tipe Savonius telah banyak dikembangkan namun berbeda halnya dengan turbin crossflow yang belum banyak dikembangkan. Jarak rendaman turbin mempengaruhi performa turbin karena adanya factor turbulensi di dekat muka perairan (*Free surface*) dan dekat dasar perairan. Arah putar turbin juga dapat mempengaruhi turbulensi pada turbin sehingga diperlukan perbandingan performa antara arah putar turbin searah jarum jam (*Clockwise*) dan berlawanan arah jarum jam (*Counter-Clockwise*). Analisis dilakukan dengan pendekatan numerik (CFD) menggunakan Ansys Fluent. Hasil penelitian menunjukkan terdapat peningkatan rata-rata performa pada turbin Savonius tipe crossflow sebesar % pada kedalaman 0.66h dari total kedalaman. Hasil torsi yang dihasilkan rata rata lebih tinggi apabila turbin yang memiliki arah putar berlawanan arah jarum jam diletakan pada kedalaman 0,33h atau dekat dengan permukaan air.

Kata Kunci : Savonius, *Cross-Flow*, CFD, Jarak Rendaman, Arah Putar, Performa Turbin

ABSTRACT

Effect Of Turbine Position Distance With Water Surface On Cross-Flow Type Savonius Turbine Performance

Name : Dave Johannes Putra
NRP : 04311740000096
Department : Ocean Engineering
Supervisors : Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D.
Dr. Dendy Satrio S.ST

Availability of energy in sufficient quantities is the main aspect that will determine whether human activities run in this era of globalization. Increasing population is the same as increasing demand, if the availability of energy cannot be met, there could be a shortage of energy which will have a very bad impact on the world economy. Efforts to meet all energy supplies and free Indonesia from the energy crisis where in 2005, it was reported that an energy crisis had occurred, namely electricity deficits in Sumatra and Java of more than 75 MW, Sulawesi around 24 MW, and other areas below 10 MW (DESDM, 2005). In general, the potential for electricity sourced from renewable energy in Indonesia is quite large and has not been utilized optimally. Ocean current energy is one of the new renewable energy alternatives, although it cannot be exploited continuously with the same strength, because the main generator of ocean currents is the tidal wave. caused by the gravitational force of the moon and sun. The Savonius type vertical turbine has been widely developed, but it is different from the crossflow turbine which has not been widely developed. Turbine immersion distance affects turbine performance because of the turbulence factor near the water surface (free surface) and near the bottom of the water. The direction of turbine rotation can also affect the turbulence of the turbine, so it is necessary to compare the performance between the turbine rotation direction clockwise (Clockwise) and counterclockwise (Counter-Clockwise). The analysis was carried out using a numerical approach (CFD) using Ansys Fluent. The results showed that there was an increase in the average performance of the Savonius turbine crossflow type by % at a depth of 0.66h from the total depth. The average torque produced is higher if the turbine which has a counterclockwise rotation direction is placed at a depth of 0.33 h or close to the water surface.

Keywords : Savonius, Cross-Flow, CFD, Immersion Distance, Rotation Direction, Turbine Performance

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan bimbingan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Pengaruh Jarak Penempatan Posisi Turbin Dengan Permukaan Air Terhadap Performa Turbin Savonius Tipe Cross-Flow”

Tugas akhir ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana (S-1) pada Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan dan penulisan ini masih jauh dari kesempurnaan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pihak lain. Harapan penulis semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan wawasan dan referensi bagi pembaca dalam mengetahui informasi mengenai Pengaruh Konfigurasi Jarak Rendaman dan Arah Putar Turbin Terhadap Performa Turbin Hidrokinetik Savonius Tipe Cross-Flow.

Surabaya, Januari 2022

Dave Johannes Putra

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah ikut andil dalam pengerjaan Tugas Akhir ini hingga selesai. Penulis mengucapkan terim kasih kepada:

1. Tuhan YME, karena berkat rahmat serta hidayahnya penulis masih diberikan kesehatan serta rezeki yang tiada akhir.
2. Kedua orang tua dari penulis serta adik dari penulis yang selalu memberikan doa serta dukungan.
3. Bapak Suntoyo, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Dr. Dendy Satrio S.ST selaku dosen pembimbing atas bimbingannya sejak awal, baik dalam hal ilmu ataupun pelajaran hidup yang berharga bagi penulis kedepannya.
4. Bapak Drs.Mahmud Mustain M.Sc,Ph.D.. selaku dosen wali yang selalu memberikan bantuan serta kemudahan selama penulis menjalankan perkuliahan.
5. Damian Triyoga Irdana, Kevin Alief Adityaputra, Rizandhi Aulia Adhipradana, Hadian Bagas Widyawan, Lazuardy Iqbal Ramadhan, Fisko Albatinusa Suwarno, dan Firdaus Yusri sebagai rekan peneliti energi laut yang selalu bersama penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
6. Felicitas Maelika sebagai sahabat penulis yang telah banyak membantu penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.
7. Navramerta P-57 L-35 sebagai keluarga bagi penulis saat merantau ke kampus ITS.
8. Keluarga Besar HIMATEKLA atas dukungannya selama menjalankan perkuliahan.

Serta pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis untuk menyelesaikan perkuliahan serta Tugas Akhir di kampus tercinta. Semoga Tuhan YME senantiasa membalas kebaikan kalian dengan berlipat ganda,

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	2
KATA PENGANTAR.....	6
UCAPAN TERIMA KASIH.....	7
DAFTAR ISI.....	8
BAB I PENDAHULUAN.....	9
1.1 LATAR BELAKANG.....	9
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	11
1.3 TUJUAN.....	11
1.4 MANFAAT.....	11
1.5 BATASAN MASALAH.....	11
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN.....	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	13
2.1 STUDI LITERATUR.....	13
2.2 DASAR TEORI.....	15
2.2.1 Energi Arus Laut.....	15
2.2.2 Turbin Hidrokinetik.....	15
2.2.3 Pengaruh Free Surface terhadap Turbin Hidrokinetik.....	18
2.2.4 Computational Fluid Dynamic (CFD).....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	20
3.1 Diagram Alir.....	20
3.2 Penjelasan Diagram Alir.....	22
3.2.1. Studi Literatur dan Perumusan Masalah.....	22
3.2.2. Modelling Turbin dan Boundary Condision.....	22
3.2.3. Simulasi CFD.....	22
3.3 Variabel Penelitian.....	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Studi Sensitivitas Mesh.....	35
4.2 Studi Rotasi Turbin.....	36
4.3 Validasi Model Simulasi.....	37
4.4 Variasi.....	47
4.5 Variasi Arah Perputaran Turbin.....	57
BAB V.....	65
KESIMPULAN.....	65
5.1 Kesimpulan.....	65
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	66

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Ketersediaan energi dalam jumlah yang cukup merupakan aspek utama yang akan menentukan berjalan atau tidaknya aktivitas manusia di era globalisasi ini. Konsumsi masyarakat Indonesia akan kebutuhan energi, terutama sektor energi listrik semakin meningkat. Sedangkan di sisi lain persediaan minyak bumi kita semakin menipis. Karena itu upaya pencarian energi pengganti untuk masa depan harus dilakukan. Solusi yang ditawarkan bagi Bangsa Indonesia adalah laut, mengingat luas lautannya adalah 80 % dari luas teritorialnya (Guring, 1995). Melihat semakin pesatnya arus globalisasi, tidak heran jika hampir semua alat yang dipergunakan dalam aktivitas kehidupan manusia telah didominasi oleh perangkat elektronik.

Meningkatnya populasi sama artinya dengan meningkatnya permintaan, jika ketersediaan energi tidak dapat dipenuhi, maka bisa saja terjadi kelangkaan energi yang dampaknya akan sangat buruk bagi perekonomian dunia. Upaya untuk memenuhi semua pasokan energi dan membebaskan Indonesia dari krisis energi dimana pada tahun 2005, dilaporkan telah terjadi krisis energi, yaitu defisit listrik di Sumatera dan Jawa lebih dari 75 MW, Sulawesi sekitar 24 MW, dan wilayah lainnya di bawah 10 MW (DESDM, 2005). Kondisi lain yang juga telah menjadi isu internasional adalah perubahan iklim akibat pemanasan global. Kondisi inilah yang membuat banyak peneliti terpacu untuk terus meningkatkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Sumber energi tersebut umumnya dapat berasal dari sinar matahari, geothermal, angin, gelombang, dan arus. Pemanfaatan energi arus laut merupakan salah satu cara yang potensial untuk penghematan konsumsi energi fosil sebagai sumber utama pembangkit listrik pada dunia industry (Awalia, 2014).

Secara umum potensi listrik yang bersumber dari energi terbarukan di Indonesia cukup besar dan belum dimanfaatkan secara optimal. Sampai tahun 2009, sebagian besar kebutuhan tenaga listrik di Indonesia masih dipasok dari pembangkit listrik berbahan bakar fosil. Minyak Bumi masih menduduki peringkat tertinggi, yaitu 51,66%. Gas alam menduduki tingkat kedua, yakni 28,57%. Sisanya dipasok dari energi minyak sebesar 15,34% dan energi terbarukan 4,43% (Yuningsih, 2011). Salah satu sumber energi yang terbarukan dan ramah terhadap lingkungan tersebut adalah tenaga air. Wilayah Indonesia mempunyai prospek yang bagus untuk pembangkitan energi arus laut karena Indonesia mempunyai banyak pulau dan selat sehingga arus laut akibat interaksi Bumi-Bulan-Matahari mengalami percepatan saat melewati selat-selat tersebut.

Energi arus laut adalah salah satu alternatif energi baru terbarukan, walaupun memang tidak bisa dieksploitasi terus menerus dengan kekuatan yang sama, karena pembangkit utama arus laut adalah pasang surut yang diakibatkan oleh gaya gravitasi bulan dan matahari. Kecepatan arus akan besar ketika pasang purnama dan berkurang pada pasang perbani. Sehingga sangat direkomendasikan turbin arus dapat berputar dalam kondisi kecepatan arus yang kecil, akan lebih efisien dibandingkan turbin yang hanya bisa berputar pada kecepatan arus yang cepat saja (Sugito, 2017). Indonesia dengan banyaknya selat dan perubahan pasang surut yang besar sangat berpotensi untuk kajian energi dari laut. Ada banyak selat di Indonesia yang berpotensi sebagai pembangkit listrik. Contohnya adalah berbagai selat yang berada di selatan Indonesia mulai dari Selat Lombok sampai ke timur seperti Selat Alas dengan perairannya yang tidak terlalu dalam dan jauh dari jalur kapal (Theoyana, 2015). Teknologi yang banyak berkembang saat ini untuk pemanfaatan energi arus laut yaitu menggunakan turbin. Turbin arus laut pada dasarnya memiliki prinsip yang hampir sama dengan turbin angin yang telah banyak digunakan. Namun, massa jenis air memiliki kerapatan massa jenis yang jauh lebih tinggi sampai 830 kali lipat dari massa jenis udara. Hal tersebut menunjukkan bahwa turbin arus laut tidak memerlukan kecepatan arus laut yang besar

untuk dapat menghasilkan energi yang signifikan seperti turbin angin. Hal tersebut juga menyebabkan *blade*/daun turbin arus laut dapat menjadi lebih kecil dibandingkan turbin angin.

Turbin pembangkit bersarkan sumbu putarnya terhadap aliran air dapat dibagi menjadi tiga (3) jenis, yaitu sumbu vertical, horizontal, dan sumbu *crossflow*. Teknologi yang paling sering digunakan adalah turbin sumbu vertical dan sumbu horizontal. Turbin vertikal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan turbin tipe lain seperti desain yang sederhana, biaya produksi yang tidak terlalu mahal, peletakkan generator lebih mudah, proses instalasi sederhana, dan dapat menangkap arus dari segala arah (Satrio, Utama, dan Mukhtasor, 2016). Banyak jenis turbin sumbu vertical yang dikembangkan untuk keperluan pembangkit listrik, salah satunya adalah tipe Savonius. Turbin savonius memiliki keuntungan seperti minimalnya suara bising pada saat operasional, design struktur yang simple dan mudah dibuat dengan biaya yang rendah, tetapi juga memiliki kelemahan seperti rendahnya efisiensi operasional, variasi torsi yang besar, dan pengaruh torsi negative pada kinerja turbin. Kekurangan ini harus dapat diatasi supaya turbin tipe savonius ini dapat digunakan sebagai teknologi yang dapat menghasilkan energi dari arus laut secara maksimal.

Turbin sumbu cross-flow pada dasarnya memiliki bentuk yang sama seperti turbin sumbu vertikal, namun memiliki sumbu rotor yang paralel terhadap permukaan air tetapi tegak lurus terhadap arah arus air. Karena memiliki bentuk yang hampir sama dengan turbin sumbu vertikal, penulis mengambil hipotesis bahwa turbin cross-flow memiliki keuntungan yang sama, yaitu bentuk struktur yang sederhana, Tip speed ratio yang lebih rendah, memiliki suara operasi yang lebih rendah, pemasangan lebih mudah, serta biaya yang relatif lebih murah dibandingkan dengan sumbu horizontal (Sun, et.al., 2020). Dengan berbagai keuntungan yang dimiliki, turbin cross-flow dinilai cocok untuk digunakan pada perairan Indonesia yang memiliki kecepatan arus relative rendah. Meskipun demikian, diperlukan analisis lebih lanjut pengaruh konfigurasi rotor turbin pada saat cross-flow dengan vertikal terhadap performa turbin arus laut.

Sudah banyak penelitian telah dilakukan untuk mengatasi kekurangan dari turbin Savonius dan meningkatkan performa dari turbin tersebut. Seperti yang dilakukan oleh Tremblay dan Dumas (2020) yang menganalisa tentang jarak penempatan posisi turbin dengan permukaan air. Saat turbin diletakan dekat dengan permukaan (*free-surface*), terdapat interaksi antara turbin dengan gelombang permukaan, vortex, dan turbulensi yang merumitkan aliran fluida di sekitar turbin. Pada sebuah penelitian yang dilakukan terhadap turbin sumbu vertical didapatkan bahwa semakin dalam jarak rendaman turbin, semakin tinggi koefisien daya (C_p) (Tremblay, 2020) sehingga dapat menghasilkan daya yang lebih besar. Selain itu juga ada penelitian yang dilakukan terhadap turbin horizontal, variasi jarak rendaman juga menyebabkan kenaikan pada koefisien gaya axial dan koefisien daya serta fluktuasi yang semakin kecil (Wang, et.al., 2020).

Penelitian yang dilakukan oleh Myers & Bahaj (2010) memiliki pernyataan yang berlawanan mereka menyebutkan bahwa 15 meter bagian atas perairan mengalami efek turbulensi karena gelombang, dan sepertiga bagian bawah perairan memiliki fluktuasi turbulen yang tinggi karena adanya pengaruh *boundary layer* bawah sehingga bagian tengah dari sepertiga kedalaman air merupakan lokasi paling cocok untuk turbin diletakan. Dari pernyataan yang berlawanan tersebut, maka diperlukanya identifikasi secara akurat terhadap performa hidrodinamik turbin *crossflow* akibat perbedaan jarak rendaman mengingat turbin *crossflow* yang selama ini digunakan hanya didesain untuk diletakan pada dasar perairan saja.

Pada penelitian tugas akhir ini untuk mengetahui pengaruh jarak rendaman masih belum diteliti oleh orang lain sehingga penting untuk diteliti maka, penulis akan melakukan analisis numerik pengaruh jarak penempatan posisi turbin dengan permukaan air terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow. Penelitian ini juga dilakukan guna mengetahui pengaruh arah putaran blade terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow. Analisis

menggunakan metode numerik Computational Fluid Dynamics (CFD) dengan bantuan *software* CFD Ansys Fluent.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang menjadi bahan kajian dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Bagaimana pengaruh jarak penempatan turbin dengan permukaan air terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow?
2. Bagaimana pengaruh arah putaran turbin terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow?

1.3 TUJUAN

Tujuan dari tugas akhir ini antara lain:

1. Mengidentifikasi pengaruh jarak penempatan turbin dengan permukaan air terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow.
2. Mengidentifikasi pengaruh arah putaran turbin terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow.

1.4 MANFAAT

Penelitian ini dilakukan guna untuk mengetahui pengaruh jarak penempatan turbin dengan permukaan air terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow. Selain itu juga dapat memberikan informasi apakah arah putaran turbin akan berpengaruh terhadap performa turbin savonius tipe cross-flow. Diharapkan penelitian ini mampu memberikan informasi tambahan dan kedepannya akan menjadi referensi dalam bidang turbin air khususnya tipe cross-flow yang masih belum banyak dikembangkan.

1.5 BATASAN MASALAH

Batasan Masalah dari tugas akhir ini adalah:

1. Fluida adalah Air Laut.
2. Arus yang digunakan adalah arus seragam berkecepatan rendah.
3. Simulasi CFD dilakukan secara 2 dimensi.
4. Reynolds Number $10^4 - 10^5$.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistemasi penulisan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan latar belakang penelitian, rumusan masalah yang akan diangkat, tujuan dari penelitian, manfaat yang didapat dari penelitian, Batasan masalah, dan sistematika dalam penulisan proposal tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini menjelaskan referensi pendukung yang digunakan sebagai acuan dalam mengerjakan dan menyelesaikan tugas akhir ini. Referensi yang digunakan berasal dari jurnal, literatur-literatur relevan, tugas akhir, dan buku yang sesuai dengan bahasan tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan tahapan-tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini. Mulai dari studi literatur, simulasi CFD, validasi, Analisa dan pembahasan, serta pengambilan kesimpulan. Kemudian pada bab ini juga dijelaskan variable-variabel yang digunakan dalam penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN HASIL PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan penjelasan tentang studi kasus yang dibahas dalam tugas akhir ini. Analisis hasil dan pembahasan ini akan dijelaskan perhitungan serta menampilkan hasil perhitungan dari masalah yang diangkat dalam tugas akhir ini. Kemudian hasil dari perhitungan dan analisa akan ditinjau kembali berdasarkan teori, codes dan standard, apakah telah memenuhi persyaratan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi kesimpulan yang berupa uraian singkat dari keseluruhan hasil analisis. Uraian singkat ini menjawab rumusan masalah yang ada di Bab I. Pada bab ini terdapat pula saran yang dapat dimanfaatkan untuk penelitian kedepannya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisi daftar referensi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 STUDI LITERATUR

Energi baru terbarukan semakin lama semakin berkembang dengan baik, disebabkan juga karena cadangan minyak dan gas bumi yang semakin menipis. Energi arus laut menjadi salah satu alternatif utama untuk dikembangkan karena potensi dan ketersediaannya di Indonesia sangat melimpah. Salah satu cara untuk mengekstrak energi tersebut adalah dengan menggunakan turbin arus laut. Ada tiga jenis turbin yang sering sudah banyak berkembang, dibedakan berdasarkan sumbu putarnya, yaitu turbin horizonatal, turbin vertical, dan turbin cross-flow (Khan, 2009). Turbin vertikal memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan turbin tipe lain seperti desain yang sederhana, biaya produksi yang tidak terlalu mahal, peletakkan generator lebih mudah, proses instalasi sederhana, dan dapat menangkap arus dari segala arah (Satrio, Utama, dan Mukhtasor, 2016). Namun dalam pengaplikasiannya diperlukan riset untuk dapat meningkatkan efisiensi dari turbin tersebut agar dapat mengekstrak energi yang terkandung dalam badan air lebih optimal. Maka table di bawah ini merupakan beberapa penelitian terkait Turbin Savonius tipe Cross-flow.

Penulis	Judul	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Utama
1. Tremblay, <i>et.al.</i> , 2020	Two-Way Interaction Between River and Deployed Cross-Flow Hydrokinetic Turbine	Mengetahui pengaruh antara free-surface air, riverbed, dan turbin (tipe H-Darrieus) terhadap aliran sungai.	Studi numerik menggunakan metode CFD 2D & 3D turbin. Desain turbin menggunakan desain eksisting. Aliran sungai dimodelkan berdasarkan Linear Momentum Actuator Disk Theory (LMADT). Simulasi dilakukan dalam 3 kondisi: 1. Simulasi 2D pada horizontal riverbed variasi immersion depth turbin & arah rotasi, 2. Simulasi 2D pada riverbed yang lereng, 3. Simulasi 3D dengan 2 orientasi: vertical-axis dan cross-flow	Kondisi dan variasi yang dijalankan relatif kecil pengaruhnya daripada blockage effect. Hasil optimal pada masing-masing simulasi: 1. dengan horizontal riverbed, semakin dalam (immersion depth) turbin diletakkan, semakin tinggi Cp; 2. dengan riverbed lereng, semakin dekat terhadap permukaan, semakin tinggi Cp yang dihasilkan; 3. Tidak ada pengaruh antara 2 orientasi turbin (vertikal dan cross-flow)
2. Bourget <i>et.al.</i> , 2018	Hydrokinetic turbine array modeling for performance analysis and deployment optimization	Membahas tentang pengembangan metodologi pemodelan numerik yang memungkinkan studi pengoptimalan <i>farm</i> dilakukan dengan biaya yang lebih efektif	Studi numerik dengan menggunakan metode RANS 3D dari susunan turbin dimana turbin secara sederhana dan seluruhnya diwakili oleh penggerak yang sesuai	Froude effect masih diurutan kedua terpenting setelah blockage effect terutama pada performa turbin. Hasil pun juga menunjukkan, melalui nilai V, bahwa ada sedikit dampak dalam menempatkan turbin di dekat permukaan bebas (<i>free-surface</i>)

Penulis	Judul	Tujuan	Metode Penelitian	Hasil Utama
3. Forbush, et.al, 2016	Performance Characterization of a Cross-Flow Hydrokinetic Turbine in Sheared Inflow	Mengetahui performa turbin pada sheared flow arus sungai. Sungai sendiri memiliki variasi batimetri yang dapat meningkatkan shear horizontal atau vertikal.	Turbin dilakukan test pada arus sungai, RivGen turbine specification: Crossflow helical hydrokinetic turbine dengan 2 rotor dengan panjang 4.1 m secara simetris dengan jarak 2.8 m.	Assesment survei instalasi, peletakan, dan post-instalasi secara akurat sangat dipertimbangkan untuk commissioning turbin arus sungai. Turbin yang awalnya didesain memiliki C_p 19% setelah dilakukan pengujian pada sheared flow, C_p menjadi 27% sehingga dapat dikatakan uji numerik tidak dapat secara akurat memprediksi kecepatan aliran sungai.
4. Dudhgaonkar, et. al., 2016	Energy Extraction from Ocean Currents Using Straight Bladed Cross-Flow Hydrokinetic Turbine	Mengetahui performa turbin pada saat dilakukan open sea trial di Andaman Selatan, India	Open sea trial turbin arus laut cross-flow pada Selat Andaman, India. Desain Turbin: Design water velocity (V) = 1.2 m/s, number of blades (z) = 3, Seawater density: 1020 kg/m ³ , Transmission efficiency = 0.7, Generator efficiency = 0.7, Length of Turbine (L) = 1 m, Tip speed ratio at peak powe = 1.5, Solidity Ratio = 0,36. Turbin dipasang pada sebuah floating platform yang telah didesain khusus.	Hasil dari trial turbin di arus laut crossflow pada selat Andaman, India. Cut-in speed = 0.8 m/s, Max. Power generated = 304 W saat kecepatan arus 1,8 m/s. Coef. Performance = 0.22 sesuai dengan tes-tes yang dilakukan sebelumnya.

Penelitian yang dilakukan oleh Tremblay (2020) membahas tentang pengaruh antara free-surface air, riverbed, dan turbin (tipe H-Darrieus) terhadap aliran sungai. Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan metode CFD 2D & 3D turbin. Simulasi ini dilakukan dalam 3 kondisi: 1. Simulasi 2D turbin sumbu vertical pada horizontal riverbed variasi immersion depth turbin & arah rotasi, 2. Simulasi 2D pada riverbed yang miring, 3. Simulasi 3D dengan 2 orientasi: vertical-axis dan cross-flow. Hasil optimal pada masingmasing simulasi: 1. Dengan horizontal riverbed, semakin dalam (immersion depth) turbin diletakkan, semakin tinggi C_p ; 2. Dengan riverbed lereng, semakin dekat terhadap permukaan, semakin tinggi C_p yang dihasilkan; 3. Tidak ada pengaruh antara 2 orientasi turbin.

Bourget, Tremblay, dan Dumas (2018) meneliti tentang pengembangan metodologi pemodelan numerik yang memungkinkan studi pengoptimalisasian *farm* sehingga dapat dilakukan dengan biaya yang lebih efektif. Studi numerik dengan menggunakan metode RANS 3D dari susunan turbin dimana turbin secara sederhana dan seluruhnya diwakili oleh penggerak yang sesuai. Froude effect masih diurutan

kedua terpenting setelah blockage effect terutama pada performa turbin. Hasil pun juga menunjukkan, melalui nilai V , bahwa ada sedikit dampak dalam menempatkan turbin di dekat permukaan bebas (*free-surface*).

Penelitian yang dilakukan Forbush (2016) meneliti tentang performa turbin pada sheared flow arus sungai. Ketika survei instalasi, peletakan, dan post-instalasi secara akurat sangat dipertimbangkan untuk *commissioning* turbin arus sungai. Turbin pada awalnya yang didesain memiliki koefisien performa (C_p) 19% setelah dilakukan penhujian pada *sheared flow*, koefisien performa (C_p) menjadi 27% sehingga dapat dikatakan uji numerik sulit secara akurat memprediksi kecepatan aliran sungai. Maka dari itu ketika menentukan kondisi perairan secara nyata perlu untuk dilakukan sebelum melakukan uji numerik sehingga didapatkan hasil yang lebih akurat.

Pada sebuah uji coba *open sea trial* pada sebuah turbin cross-flow di Andaman Selatan (Dudhgaonkar, et.al., 2016), percobaan yang dilakukan berhasil dengan hasil performa yang lebih baik dari yang ditargetkan. Turbin yang diuji merupakan bentuk crossflow yang dipasang pada sebuah anjungan terapung dengan kedalaman 2 m dari permukaan air. Dari open sea trial didapatkan cut-in speed turbin 0,8 m/s dengan daya listrik maksimum 304 W pada kecepatan arus 1,8 m/s, jauh lebih besar dari desain yang direncanakan yaitu 100 W. Koefisien performa turbin mencapai 0,22.

2.2 DASAR TEORI

2.2.1 Energi Arus Laut

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia yang memiliki wilayah laut terbesar. Sekitar dua per tiga wilayah Indonesia adalah laut. Indonesia memiliki pantai kedua terpanjang di dunia. Secara geografis, Indonesia dikelilingi lautan seluas 3,25 juta km² dan 2,55 juta km² merupakan Zona Ekonomi Eksklusif dengan berbagai gugusan selat. Sektor kelautan sangat penting untuk ditelisik karena laut menyimpan potensi besar sebagai sumber energi alternatif.

Energi laut sendiri merupakan istilah yang digunakan untuk menggambarkan segala bentuk energi terbarukan yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan sumber daya laut, meliputi energi gelombang, energi pasang surut, arus sungai, energi arus laut, angin lepas pantai, energi gradien salinitas, dan energi laut gradien termal (Busaeri, 2011). Indonesia memiliki potensi teoritis yang berasal dari laut mencapai 4,680 giga watt (Mukhtasor, 2011). Secara teknis, energi laut adalah energi yang dapat dihasilkan dari energi kinetik pergerakan mekanik air laut, energi potensial dari perbedaan ketinggian muka air laut serta perbedaan temperatur air laut. Energi laut dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan teknologi yang telah berkembang pesat di dunia internasional. Energi-energi tersebut merupakan energi terbarukan karena berasal dari proses alam yang berkelanjutan (Kementerian ESDM, 2012).

2.2.2 Turbin Hidrokinetik

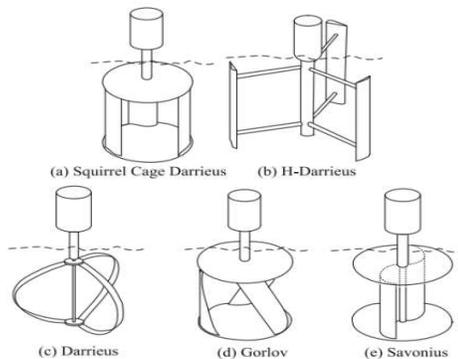
Untuk dapat mengkonversi energi kinetic yang terkandung dalam badan air menjadi energi dalam bentuk lain, yang pada kasus ini adalah energi listrik, diperlukan sebuah system yang mampu melakukannya. Dari berbagai system yang ada, turbin adalah teknologi yang paling banyak dipergunakan. Turbin air adalah mesin berputar yang berguna untuk mengubah energi kinetic air menjadi energi mekanik/ energi kinetic dalam air ditangkap guna memutar rotor turbin yang dipasang dengan generator guna menghasilkan listrik.

2.2.2.1 Tipe Turbin

Jika Turbin dibedakan berdasarkan sumbu putarnya, turbin pada umumnya dibagi menjadi tiga jenis, yaitu sumbu Horizontal, sumbu Vertikal, dan turbin cross-flow. turbin yang masih jarang dikembangkan adalah turbin tipe cross-flow.

Turbin cross-flow sendiri memiliki konfigurasi yang hamper sama dengan turbin tipe vertical dimana keduanya memiliki arah aliran fluida tegak lurus terhadap rotor. Namun, berbeda dengan sumbu vertical yang memiliki rotor tegak lurus juga dengan permukaan air, tipe cross-flow memiliki rotor yang sejajar terhadap permukaan air. Turbin cross-flow lebih memanfaatkan gaya drag air. Meskipun demikian tidak menutup kemungkinan terdapat gaya lift yang bekerja pada turbin tipe cross-flow sehingga diperlukannya penelitian lebih lanjut

Minimnya penelitian terhadap turbin cross-flow membuat penulis menggunakan pendekatan yang paling memungkinkan yaitu dengan menyamakan dengan turbin tipe vertical mengingat perbedaanya hanya pada arah sumbu rotor turbin terhadap permukaan air. Turbin sumbu vertical sendiri memiliki berbagai keuntungan yaitu mampu bekerja pada segala arah aliran fluida, bentuk struktur yang sederhana, memiliki suara operasional yang tidak bising, mampu beroperasi pada arus turbulen. Pemasangan lebih mudah, serta biaya yang relative lebih murah dibandingkan dengan sumbu horizontal (Sun, 2020). Walaupun turbin vertical memiliki banyak kelebihan tetapi apabila dibandingkan dengan turbin horizontal, turbin vertical memiliki kekurangan seperti, torsi mulai yang rendah, fluktuasi torsi, dan juga efisiensi yang lebih rendah (Khan, 2009)



Gambar 2.1 Turbin Vertikal (Khan et al., 2009)

2.2.2.2 Energi Hidrokinetik Arus Laut

Mengacu pada hukum kekekalan energi yang dimana energi tidak dapat dihilangkan atau dimusnahkan melainkan dapat diubah menjadi bentuk lain, air yang mengalir juga memiliki energi yang dapat dimanfaatkan yaitu energi hidrokinetik. Energi hidro kinetik adalah energi yang didapatkan dari badan air dengan menangkap energi kinetic yang terdapat di dalamnya untuk dikonversi menjadi bentuk energi listrik. konsep energi hidrokinetik sama dengan rumus energi kinetic pada umumnya yang bergantung pada kecepatan aliran fluida serta massa jenis fluida. hubungan untuk energi kinetic per satuan

volume air sebanding dengan kecepatannya, sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{EK}{V} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (2.1)$$

dimana:

E_k : Energi kinetic air (J/m^3)

V : volume air (m^3)

ρ : Massa jenis air laut (kg/m^3)

v : kecepatan fluida (m/s)

Dari persamaan energi hidro kinetic ini, maka besar daya (*power*) yang dapat dimanfaatkan secara teoritis dapat dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.2)$$

dimana:

P : Daya (watt)

ρ : Massa jenis air laut (kg/m^3)

v : kecepatan fluida (m/s)

Daya atau *power* adalah bentuk energi kinetic per satuan waktu. Daya dan energi kinetic ini bergantung pada kecepatan fluida air dan massa jenis air. Perlu diperhatikan bahwa massa jenis air laut berkisar antara 1020 kg/m^3 hingga 1029 kg/m^3 .

2.2.2.3 Parameter Performa Turbin

2.2.2.3.1 Tip Speed Ratio (TSR)

Tip Speed Ratio (TSR) adalah parameter tanpa dimensi yang menyatakan perbandingan antara kecepatan rotasi turbin terhadap kecepatan aliran bebas dari fluida yang melewati turbin air (Pol, 2014)

$$\gamma = \frac{\omega R}{v_\infty} \quad (2.3)$$

Dimana :

γ : Tip Speed Ratio

ω : kecepatan angular turbin

R : radius turbin

v_∞ : kecepatan arus laut

2.2.2.3.2 Koefisien Daya (CP)

Daya yang telah diekstrak oleh turbin secara mekanis dari energi kinetic air dapat menunjukkan nilai performa dari suatu turbin, atau biasa

disebut efisiensi turbin. Rasio daya aktual yang dapat diekstraksi dari aliran air terhadap daya yang dihasilkan turbin dinamakan koefisien daya. Besar daya yang diekstrak oleh turbin dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_T = M\omega \quad (2.4)$$

dimana :
 P_T : Daya (watt)
 M : total momen yang dihasilkan turbin
 ω : kecepatan angular turbin

Penggabungan dari persamaan (2.2) dan (2.4) dilakukan guna mendapatkan koefisien daya (C_p) sebagai berikut

$$C_p = \frac{P_T}{P_A} = \frac{M\omega}{\left(\frac{1}{2}\right)\rho A v_\infty^3} \quad (2.5)$$

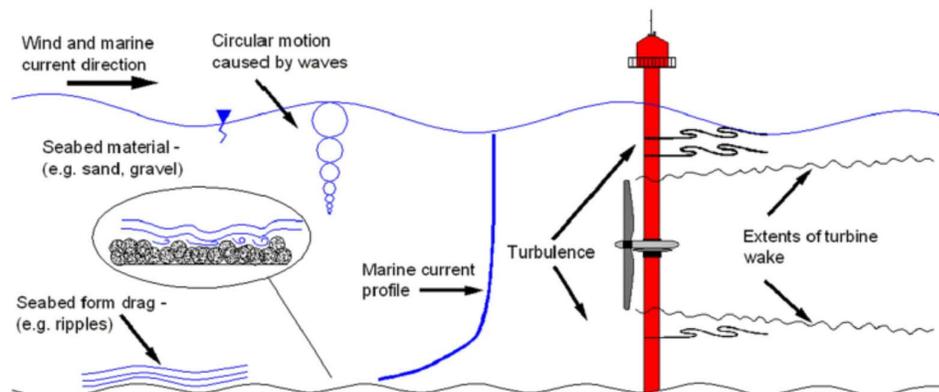
dimana:

C_p : koefisien daya
 M : total momen yang dihasilkan turbin
 ω : kecepatan angular turbin
 ρ : Massa jenis air laut (kg/m^3)
 A : luas penampang aliran air (m^2)
 v : kecepatan fluida (m/s)

Tetapi turbin arus laut tidak mungkin dapat menangkap seluruh energi yang berada di badan air laut melainkan hanya sebagian saja, karena diperlukan untuk mengalirkan kembali aliran fluida setelah mengenai turbin. Secara teoritis, efisiensi maksimum dari system turbin dapat mencapai angka 59% atau yang dapat dikenal sebagai *Betz Limit*.

2.2.3 Pengaruh Free Surface terhadap Turbin Hidrokinetik

Energi arus laut mengkonversi energi potensial menjadi daya. Mengurangi energi potensial pada kanal maka mengurangi juga kedalaman kanal pada outlet, yang menyebabkan aliran semakin tinggi untuk mengkonservasi massa, maka pada energi arus laut, energi kinetik pada aliran juga meningkat. Aliran wake dapat juga terpengaruh kedekatan turbin terhadap permukaan air (*free-surface*) atau dasar laut karena adanya boundary yang dapat mengakibatkan peningkatan aliran di atas dan bawah turbin (Myers & Bahaj, 2010).



Gambar 2.2 Faktor yang mempengaruhi performa turbin (Myers et.al, 2012)

Pada permukaan perairan sampai hingga kedalaman 15 meter akan mengaami efek turbulensi karena gelombang, dan sepertiga bagian bawah perairan memiliki

fluktuasi turbulen yang tinggi dikarenakan adanya pengaruh *boundary layer* bawah (Myers & Bahaj, 2010) sehingga bagian tengah dari sepertiga kedalaman air merupakan lokasi yang cocok sebagai penempatan turbin (Gambar 2.2). Banyak perairan yang dapat digunakan sebagai tempat turbin diletakan tetapi dikarenakan tidak memiliki kedalaman lebih dari 15 meter maka turbin dapat mengalami efek dari adanya *free surface*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Bourget (2018) pengaruh dari Free surface terhadap turbin adalah deformasi local yang dihasilkan turbin pada saat berada di dekat permukaan, adanya perubahan kecepatan pada saat turbin diletakan dengan jarak yang sama dengan permukaan air dan permukaan tanah. Turbin yang diletakan dekat permukaan air memiliki deformasi local lebih sehingga menyebabkan kenaikan kecepatan. Sehingga untuk mengkonfirmasi kejadian ini simulasi CFD penuh sangat disarankan.

2.2.4 Computational Fluid Dynamic (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan metode yang sering digunakan untuk menganalisis hubungan antara benda padat dengan aliran fluida. Dalam Analisis CFD, simulasi yang dilakukan berdasarkan sifat fisik dari fluida kerja seperti kecepatan, tekanan, suhu kepadatan, dan viskositas. Software yang akan saya gunakan dalam penelitian ini adalah *Ansys 18.1*. Agar dapat menghasilkan solusi analisis dari fenomena fisik aliran fluida secara virtual, berbagai sifat fisik nyata harus dipertimbangkan secara bersamaan.

Dalam menganalisis masalah aliran fluida terdapat tiga tahapan dalam proses simulasi CFD yaitu:

a. Pre-processing adalah suatu proses awal pada simulasi CFD, dimana pada proses ini dilakukan pendefinisian geometri yang telah dibuat sebelumnya pada design modeler. Pendefinisian tersebut dilakukan dalam bentuk domain dan kondisi batas atau boundary condition. Pada tahapan ini juga dilakukan pendefinisian kondisi awal dan pemasukan nilai parameter fisika yang sesuai dengan kondisi sebenarnya. Selanjutnya dilakukan tahapan berikutnya yaitu solving.

b. Solver Iteration adalah tahapan dalam simulasi CFD yang dilakukan dengan cara menghitung data parameter fisika yang telah dimasukkan bersamaan dengan model geometri. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan metode numerik seperti elemen hingga, beda hingga dan volume hingga. Pada tahapan ini akan dilakukan proses iterasi data hingga mendapatkan nilai error sesuai dengan batas error yang telah ditentukan atau dapat dikatakan sudah konvergen. Lalu tahapan selanjutnya adalah proses post – processing.

c. Post-processing adalah tahapan terakhir dalam simulasi CFD, dimana dalam tahapan ini kita dapat mengetahui profil aliran, seperti kontur kecepatan, tekanan, suhu dan lain-lain. Lalu kita juga dapat mengetahui nilai variable yang ingin ditinjau, seperti nilai gaya dalam arah sumbu x dan y, lalu nilai torsi dalam arah sumbu x dan y.

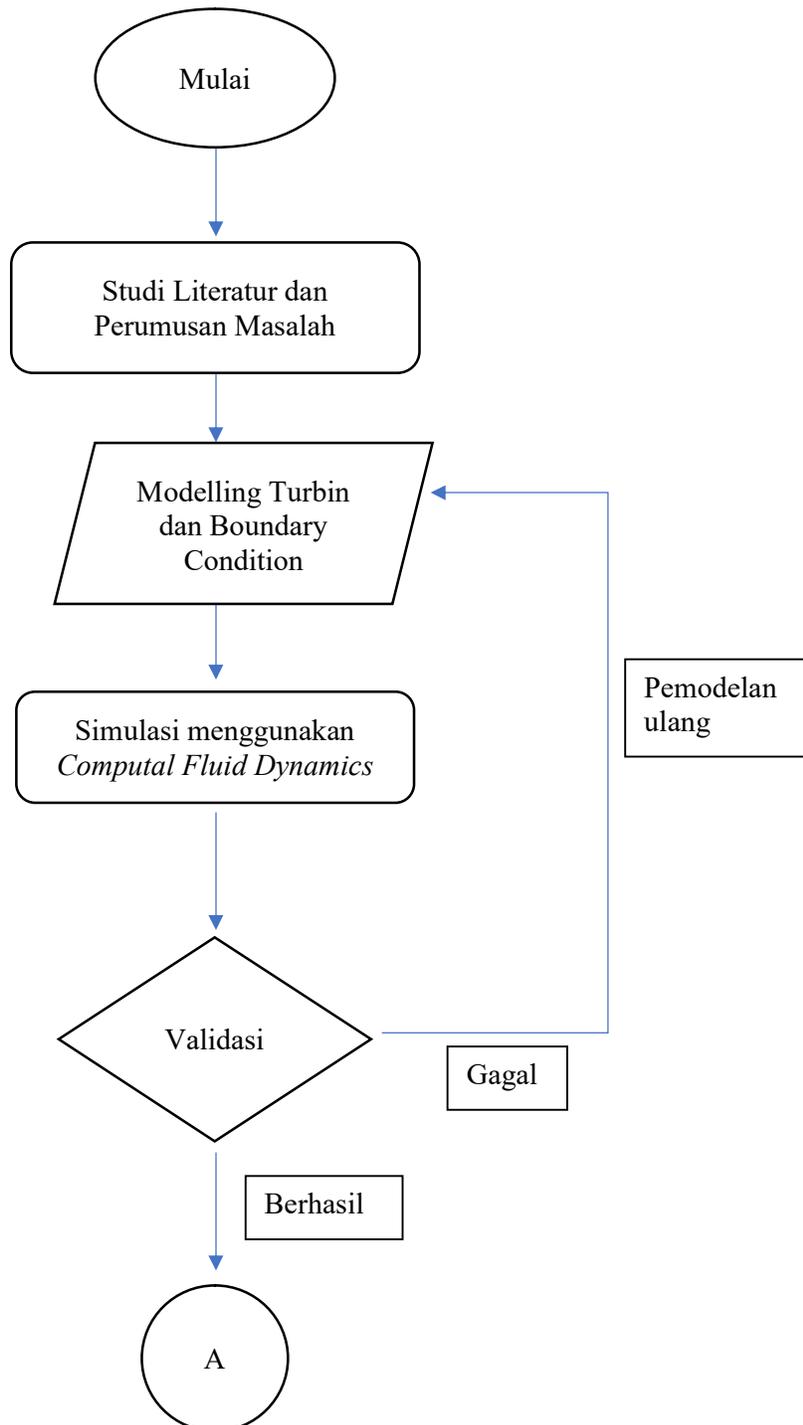
Pemodelan matematis serta metode numerik dari suatu kasus fisik digunakan dalam perangkat lunak untuk menganalisis aliran fluida. Suatu keandalan dari analisis CFD bergantung pada keseluruhan proses struktur sehingga verifikasi dari model matematis sangatlah penting untuk memberikan akurasi luaran analisis. Kelebihan menggunakan CFD daripada pendekatan secara eksperimen yaitu biaya yang lebih murah, pengurangan waktu dan biaya desain baru, kemampuan untuk mengendalikan

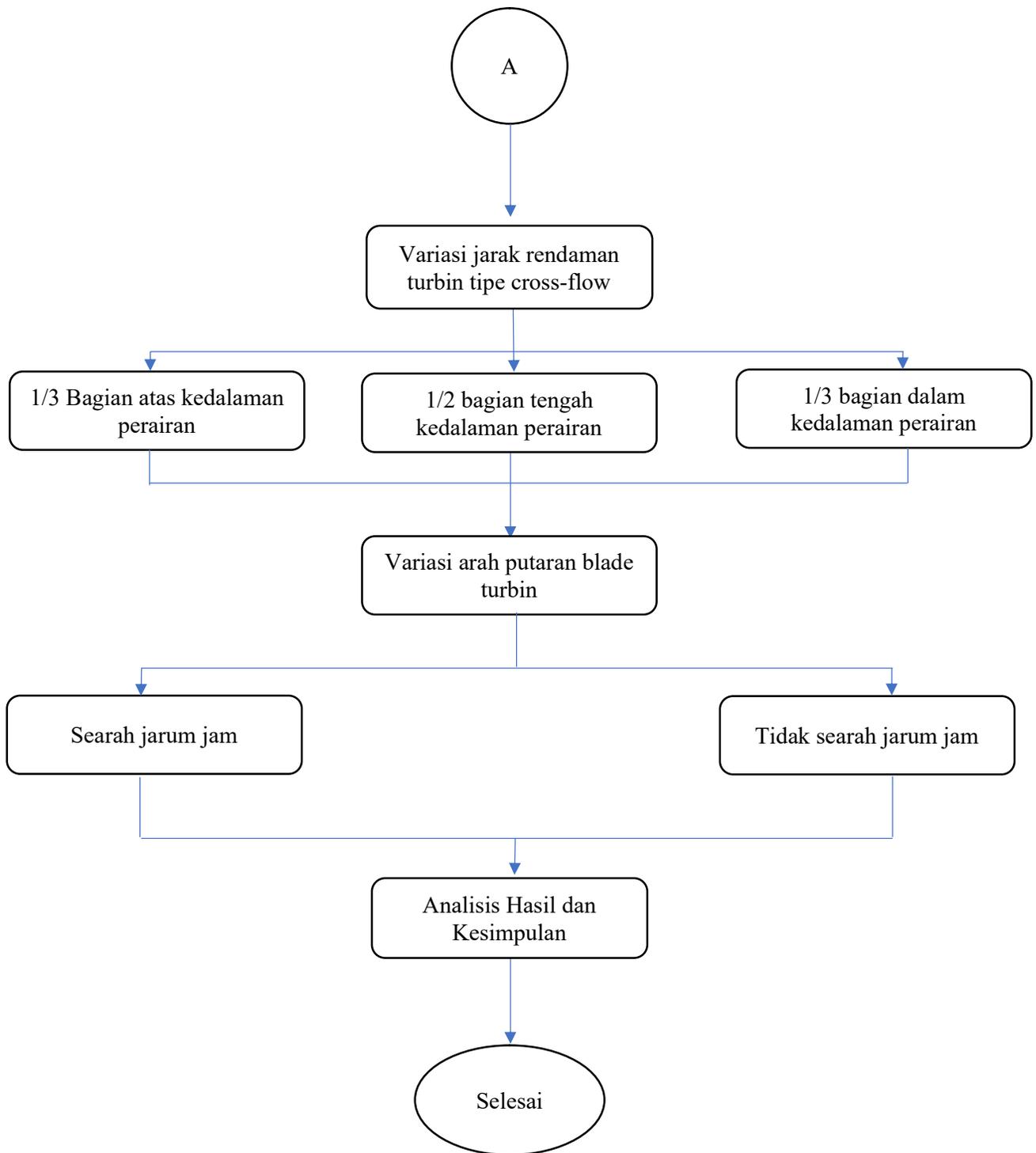
variabel eksperimen yang sulit/tidak mungkin dilakukan (seperti sistem yang sangat besar), kemampuan untuk mempelajari sistem dalam kondisi penuh risiko, serta secara praktis tingkat detail hasil yang tidak terhingga (Versteeg & Malalasekera, 1995).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Pada gambar 3.1 menunjukan tahapan dari pelaksanaan penelitian seperti dibawah ini





3.2 Penjelasan Diagram Alir

Tugas akhir ini berupa penelitian *Pengaruh Jarak Penempatan Posisi Turbin Dengan Permukaan Air Terhadap Performa Turbin Savonius Tipe Cross-Flow*. Adapun metodologi dari Langkah-langkah untuk pengerjaan dan penyelesaian tugas akhir ini dijelaskan dalam diagram alir sebagai berikut:

3.2.1. Studi Literatur dan Perumusan Masalah

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari berbagai bahan acuan seperti jurnal, buku dan referensi lain seperti Tugas Akhir terdahulu dan artikel internet dalam memahami dan menganalisa permasalahan pada penelitian ini.

3.2.2. Modelling Turbin dan Boundary Condition

Modelling dilakukan terlebih dahulu sebelum menggunakan simulasi CFD. Beberapa hal yang dimodelkan adalah dimensi dari turbin dan *boundary conditions* dalam simulasi. Permodelan ini dimodelkan menggunakan AutoCAD sedangkan profile dari foil didapatkan dari airfoilstool.

3.2.3. Simulasi CFD

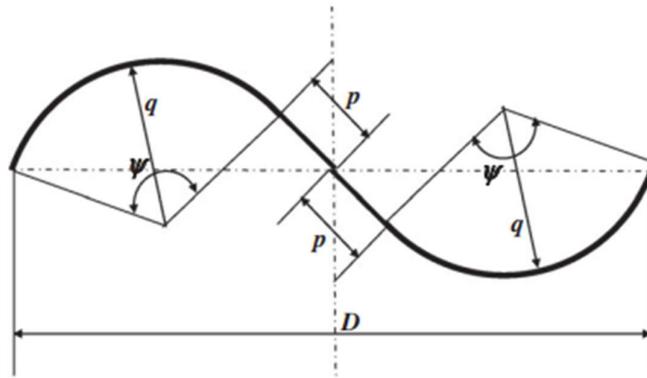
Simulasi menggunakan *Computational Fluid Dynamics* Ansys Fluent. Setelah simulasi dilakukan validasi berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan. Simulasi CFD sendiri terdiri dari beberapa tahapan, pertama adalah pembuatan geometri, kemudian meshing, lalu pre-processing, solver iteration. dan post-processing.

3.2.3.1 Pembuatan Geometri

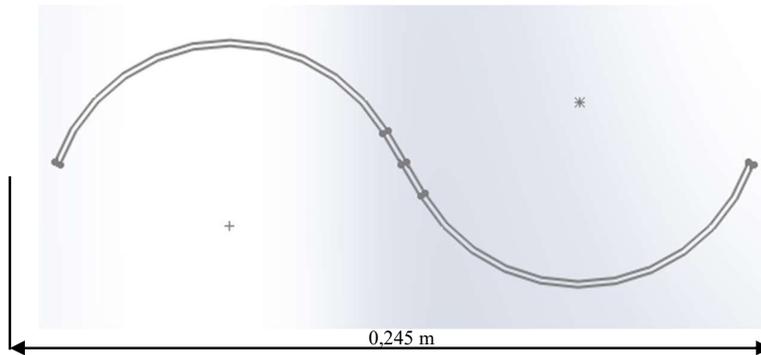
Pembuatan geometri adalah langkah pertama yang dilakukan dalam simulasi CFD. Dalam penelitian ini, geometri yang dibuat adalah turbin dan juga *boundary conditions* sebagai batasan simulasi numerik.

1) Geometri *Blades*

Blades/bilah adalah komponen penting dalam sebuah turbin yang berguna sebagai penangkap energi kinetik arus dan diubah menjadi energi mekanik. Bahan yang digunakan untuk pembuatan bilah adalah plat aluminium dengan tebal 0,001 m. Geometri dari bilah dibuat dengan menggunakan *software* Solidworks 2018 dengan mengacu pada desain bilah yang digunakan oleh Golecha et al dengan ukuran $\Psi = 124^\circ$ dan $p/q = 0,2$.



Gambar 3-2 Desain *Blades* (Golecha et al, 2011)



Gambar 3.3 Desain *Blades* yang telah dibuat di SolidWorks 2018

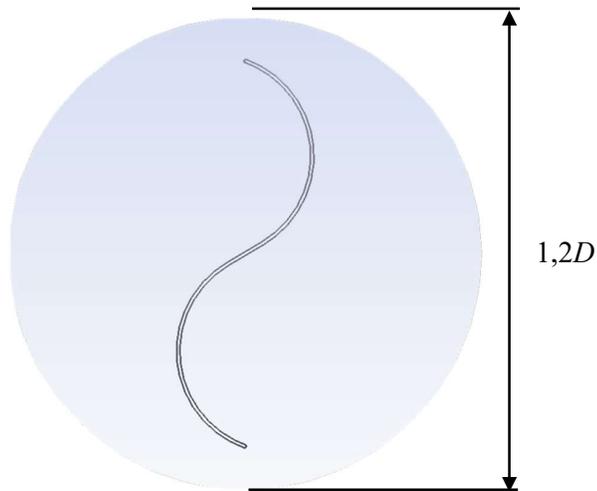
a. Geometri Turbin

Setelah membuat geometri dari bilah, lalu dilakukan pembuatan dari geometri turbin yang akan digunakan untuk simulasi. Geometri yang digunakan memakai skala 1:1 dengan turbin yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan oleh Golecha (2011) dengan spesifikasi sebagai berikut:

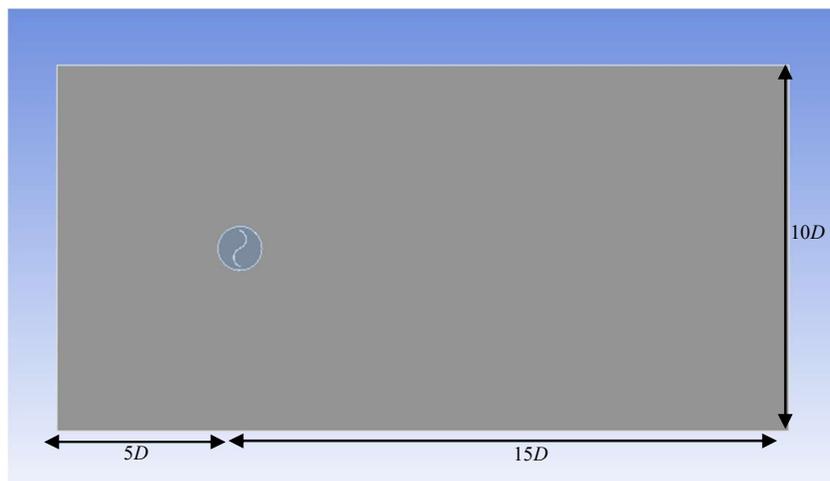
Tabel 3.1 Dimensi Turbin

Parameter	Nilai
Diameter rotor (D)	0,245 m
Tinggi rotor (H)	0,17 m
Tebal plat rotor (t)	0,002 m

Dari dimensi diatas lalu dibuat model 2D nya dengan *software* SolidWorks 2018.



Gambar 3.4 Model Turbin 2D

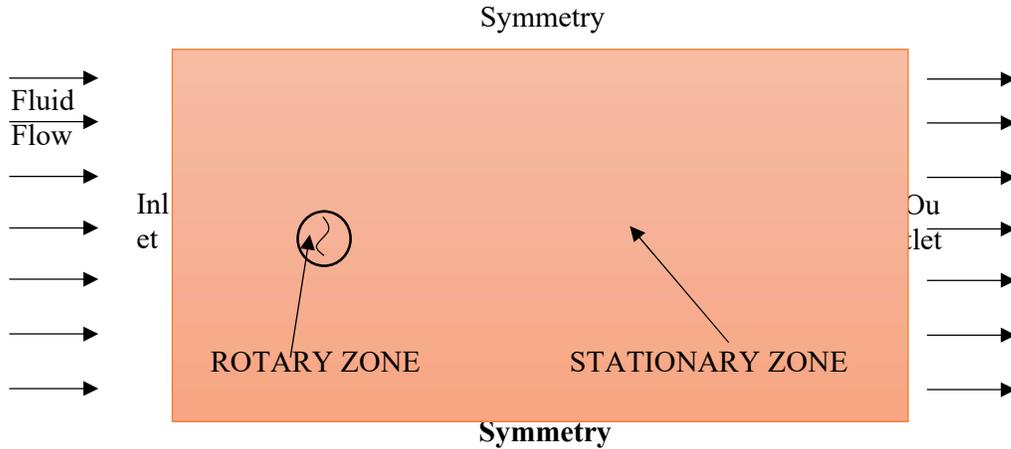


Gambar *Error! No text of specified style in document.*-1 Model Turbin dan Domain 2D

2) *Boundary Conditions*

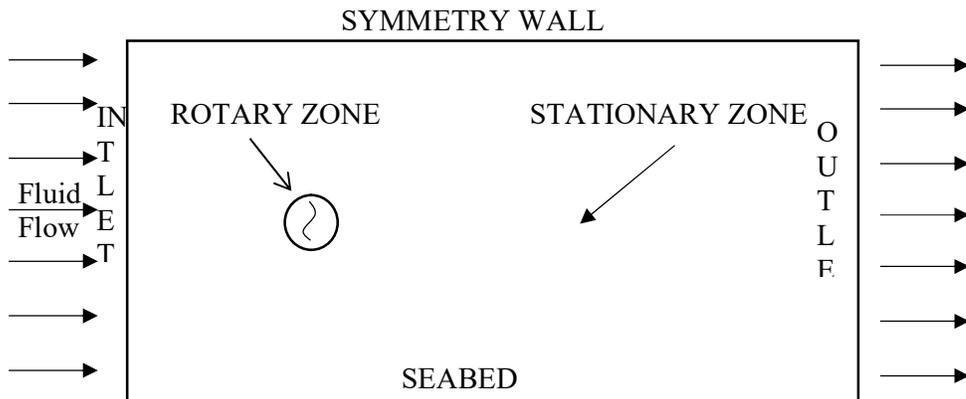
Boundary conditions adalah batas-batas dalam perhitungan yang digunakan dalam simulasi numerik. Daerah berbentuk lingkaran merupakan *rotary zone* yang merupakan model dari turbin, serta daerah persegi panjang merupakan *stationary zone* yang merupakan fluida. *Boundary conditions*

dalam penelitian ini mengacu pada penelitian Satrio (2018), yang mana ukurannya adalah sebagai berikut:



Gambar 3.6 *Boundary Conditions* Turbin Vertikal

Selanjutnya, dibuat juga *boundary conditions* untuk turbin tipe *cross-flow*. Daerah *boundary conditions* yang dibuat menyerupai turbin vertikal, hanya saja sedikit di modifikasi di bagian *symmetry* bawah yang diubah menjadi *seabed*. Ukurannya adalah sebagai berikut:

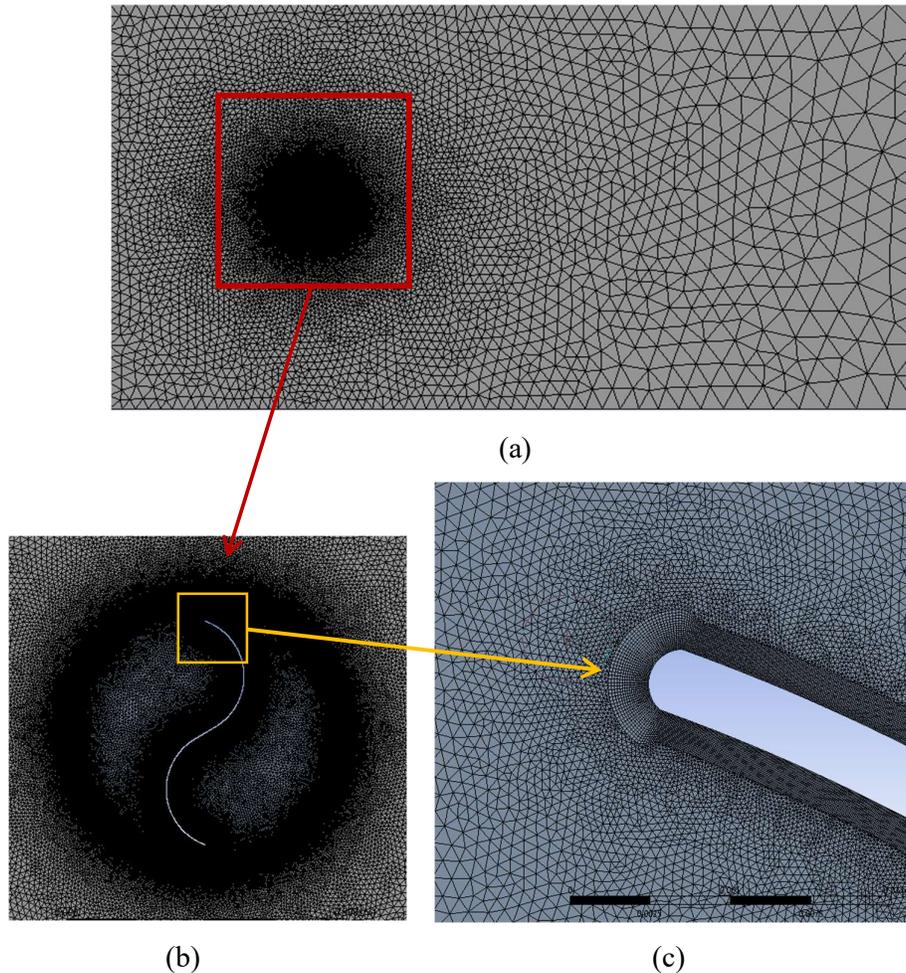


Gambar 3.7 *Boundary Conditions* Turbin *Cross-flow*

b. Meshing

Meshing adalah proses pembagian komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil. Semakin banyak elemen *mesh* yang digunakan, maka hasilnya pun akan semakin akurat. Namun, semakin banyak elemen yang digunakan maka waktu perhitungan yang diperlukan akan semakin lama, sehingga perlu adanya studi sensitivitas mesh yaitu cara menentukan jumlah mesh yang akan digunakan dengan mencari hasil perhitungan yang akurat dengan jumlah mesh minimum.

Dalam penelitian ini, digunakan jenis *mesh* berupa *triangular meshing* untuk seluruh komponen dari model yang dibuat. Untuk daerah bilah, *meshing* dibuat lebih kecil agar lebih akurat dan juga ditambahkan *inflation layer* untuk mendapatkan nilai y^+ .



Gambar 3.8 Meshing; (a) Stationary Zone, (b) Rotary Zone, (c) Blades

c. Solver Iteration

Solver iteration adalah tahap dalam simulasi CFD yang dilakukan dengan cara menghitung data parameter fisika yang telah dimasukkan bersamaan dengan model geometri yang telah dibuat sebelumnya. Dalam proses ini ada beberapa pengaturan yang perlu diinput terlebih dahulu sebelum memulai proses perhitungan.

1) General dan Model

Pada penelitian ini, fluida yang digunakan merupakan air dengan massa jenis $998,2 \text{ kg/m}^3$ dengan asumsi air yang digunakan pada eksperimen memiliki massa jenis yang sama. Perhitungan dilakukan dengan pendekatan SST $k-\omega$ (omega) sehingga diperlukan model turbulen untuk menyelesaikan persamaan tersebut.

2) Rotary Zone

Pada *rotary zone* digunakan teknik *sliding mesh* dengan mengatur *mesh* menjadi *mesh motion*, kemudian diinput juga *rotational velocity* turbin sesuai dengan kondisi operasi yang akan dilakukan dari eksperimen.

3) Input Boundary Conditions

Pada input ini dimasukkan kecepatan aliran pada inlet sesuai dengan kondisi operasi yang akan dilakukan berdasarkan data eksperimen, kemudian

diatur juga kondisi pada *blades wall* menjadi *moving wall*. Blades juga diatur *shear condition* nya menjadi *no slip* dan *motion* nya menjadi *rotation*.

4) Solution Method

Dalam proses ini dipilih metode yang akan digunakan untuk menjalankan proses penyelesaian permasalahan numerik. Pada penelitian ini, konfigurasi pengaturan *solution method* adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2 *Solution Method*

Pressure-Velocity Coupling Scheme		SIMPLE
Spatial Discretization	Gradient	Least Square Cell Based
	Pressure	Second Order
	Momentum	Second Order Upwind
	Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
	Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind
Transient Formulation		Second Order Implicit

5) Residual Monitor

Residual monitor dilakukan untuk menentukan maksimum *error* pada tiap iterasi dalam perhitungan. Jika *error* pada iterasi sudah dibawah dari maksimum *error* yang diberikan, maka iterasi dinyatakan sudah konvergen. Konvergensi akan menghentikan iterasi dan melanjutkan perhitungan untuk *time step* berikutnya. Pemberian toleransi nilai *error* yang lebih kecil akan memberikan hasil yang lebih baik meskipun akan memakan waktu yang lebih lama. Pada penelitian ini, konfigurasi *residual monitor* yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.3 *Residual Monitor*

Residual	Absolute Criteria
Continuity	0,0001
x-Velocity	0,0001
y-Velocity	0,0001
k	0,0001
epsilon	0,0001

6) Input Number of Time Steps dan Time Step Sizes

Time step adalah jarak aktu antar komputasi. Dalam satu *time step*, iterasi dilakukan sesuai dengan jumlah yang telah ditentukan dan akan berhenti secara otomatis bila iterasi sudah konvergen. Dalam simulasi perlu ditentukan terlebih dahulu banyaknya *time step* yang akan digunakan serta besar ukuran dari *time step* tersebut.

Dalam menentukan banyaknya *time step*, faktor yang memengaruhi adalah banyaknya jumlah putaran dan besarnya perubahan sudut dalam satu

putaran yang ditentukan. Dalam penelitiannya, Satrio (2018) mengatakan bahwa banyaknya putaran turbin untuk mendapatkan hasil yang relevan minimal sebanyak 4 kali putar dengan perubahan sudut antara 1° hingga 5°. Semakin kecil perubahan sudut yang digunakan akan membuat jumlah *time step* semakin banyak dan berdampak pada waktu yang dibutuhkan untuk proses kalkulasi. Pada penelitian ini, banyaknya putaran turbin sebanyak 4 kali dengan perubahan sudut sebesar 1° untuk mendapatkan hasil terbaik. Perhitungan banyaknya *time step* dan ukuran *time step* dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$NTS = N \frac{360^\circ}{\theta} \quad (III.1)$$

$$TSS = \frac{N}{(\Omega \cdot 0,15915) \cdot NTS} \quad (III.2)$$

Keterangan:

NTS = *Number of Time Steps*

N = Jumlah putaran turbin

θ = Perubahan sudut

TSS = *Time Step Sizes*

Ω = Kecepatan sudut

Berikut adalah pengaturan yang dilakukan pada solver Ansys Fluent untuk tiap konfigurasi turbin baik vertikal maupun cross-flow secara keseluruhan:

Tabel 3.4 Pengaturan Solver Ansys Fluent Turbin Vertikal

Parameter			
General	Type	Pressure-based	
	Velocity Formulation	Absolute	
	Time	Transient	
Models	Viscous Model	k-omega SST	
Fluid Material	Type	Water-liquid	
	Density	998,2	Kg/m ³
	Viscosity	0,001003	Kg/ms
Cell Zone Condition	Rotary Zone	Mesh motion	
	Stationary Zone	-	
Inlet/Outlet	Turbulent Intensity	5%	
	Turbulent Viscosity Ratio	10%	

Blade Wall	Wall Motion	Moving Wall	
	Shear Condition	No-slip	
	Motion	Rotational	
Top/Bottom Boundary Conditions	Type	Symmetry	
Residual Monitor	Continuity	0,0001	
	x-velocity	0,0001	
	y-velocity	0,0001	
	k	0,0001	
	epsilon	0,0001	
Solution Method	Scheme	SIMPLE	
	Gradient	Least Square Cell Based	
	Pressure	Second order	
	Momentum	Second order upwind	
	Turbulent Kinetic Energy	Second order upwind	
	Turbulent Dissipation Rate	Second order upwind	
	Transient Formulation	Second order implicit	

Tabel 3.5 Pengaturan Solver Ansys Fluent Turbin Cross-flow

Parameter			
General	Type	Pressure-based	
	Velocity Formulation	Absolute	
	Time	Transient	
	Gravity	-9,81	m/s²
Models	Viscous Model	k-omega SST	
Fluid Material	Type	Water-liquid	
	Density	998,2	Kg/m ³
	Viscosity	0,001003	Kg/ms
Cell Zone Condition	Rotary Zone	Mesh motion	
	Stationary Zone	-	
Inlet/Outlet	Turbulent Intensity	5%	
	Turbulent Viscosity Ratio	10%	
Blade Wall	Wall Motion	Moving Wall	
	Shear Condition	No-slip	
	Motion	Rotational	
Top Boundary Conditions	Type	Symmetry	
Bottom Boundary Conditions	Type	Wall	
	Shear Condition	No-slip	
	Roughness Height	0	
Residual Monitor	Continuity	0,0001	
	x-velocity	0,0001	
	y-velocity	0,0001	
	k	0,0001	
	epsilon	0,0001	

Solution Method	Scheme	SIMPLE
	Gradient	Least Square Cell Based
	Pressure	Second order
	Momentum	Second order upwind
	Turbulent Kinetic Energy	Second order upwind
	Turbulent Dissipation Rate	Second order upwind
	Transient Formulation	Second order implicit

d. Post Processing

Post processing adalah tahap terakhir dalam simulasi CFD, dimana dalam tahap ini kita dapat mengetahui profil aliran; seperti kontur kecepatan, tekanan, suhu dan lain-lain. Kita juga dapat mengetahui nilai variabel yang ingin ditinjau, seperti nilai gaya dalam arah sumbu x dan y, lalu nilai torsi dalam sumbu x dan y.

4. Validasi

Validasi mempertimbangkan ukuran mesh dan *boundary layer* serta membandingkan torsi yang didapatkan dari hasil simulasi dengan hasil eksperimen. Jika nilai torsi memiliki nilai error lebih dari 10% maka model tersebut tidak dapat dijalankan untuk semua variasi penelitian sehingga harus melakukan pemodelan ulang sampai mendapatkan nilai error lebih rendah dari 10%.

4.1 Validasi Turbin Cross-Flow

Selanjutnya, proses pengerjaan pada tahap ini berpaku pada tahap sebelumnya. komputer kembali digunakan untuk melakukan simulasi dengan menyesuaikan konfigurasi yang dibutuhkan pada tipe *cross-flow*

5. Variasi Jarak Rendaman Turbin tipe Cross-flow

Setelah model dari CFD valid, maka turbin tipe cross-flow, divariasikan jarak rendamannya (*immersion depth*) terhadap *free-surface area*.

6. Variasi Arah Putar *Blade* Turbin

Setelah memvariasikan jarak rendaman turbin, maka turbin divariasikan arah putaran bladenya, searah jarum jam (clock-wise) atau tidak searah jarum jam (counter clock-wise)

7. Analisis Hasil Simulasi dan Kesimpulan

Analisis dilakukan setelah proses simulasi menggunakan software CFD selesai dan hasilnya telah tervalidasi. Beberapa hal yang dianalisa berupa pengaruh jarak rendaman terhadap performa turbin dan juga pengaruh arah putaran blade terhadap performa turbin. Setelah semua kegiatan selesai, kesimpulan dapat ditarik dari hasil

simulasi yang telah dilakukan dapat digunakan sebagai referensi dalam pengembangan teknologi konversi arus laut dengan pengaturan jarak rendaman dan arah putaran blade turbin.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel – variabel yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah sebagai berikut:

a. Variabel Tetap

Variabel tetap pada penelitian ini adalah:

1. Dimensi Turbin pada Tabel III.5
2. Kecepatan Arus = 0,54 m/s
3. Model turbulensi adalah SST k- ω (omega)
4. Reynolds Number (Re) adalah 10^5

b. Variabel bebas

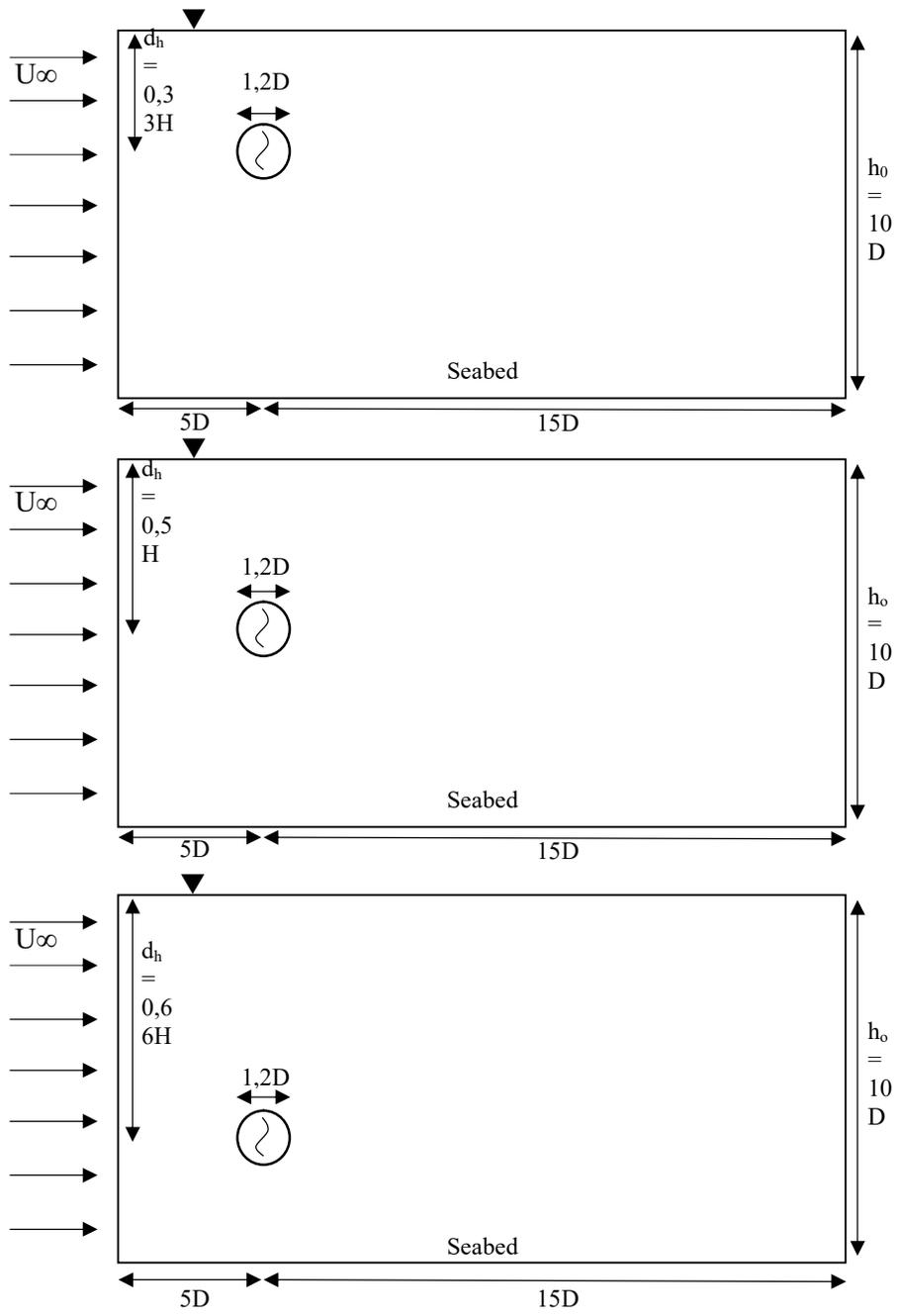
Variabel bebas yang digunakan adalah:

1. Jarak rendaman antara free-surface dan turbin

Variabel jarak rendaman (immersion depth) yang digunakan untuk penelitian yaitu 0,33h, 0,5h, 0,66h, dan 0,75h, di mana h adalah kedalaman perairan. Diameter turbin adalah 0,25h. Angka tersebut didapatkan dari penelitian terdahulu (Myers *et.al*, 2008). Sehingga variasi kedalaman yang akan dilakukan adalah sebagai berikut:

Tabel 3.6 Tabel Variasi Jarak Rendaman

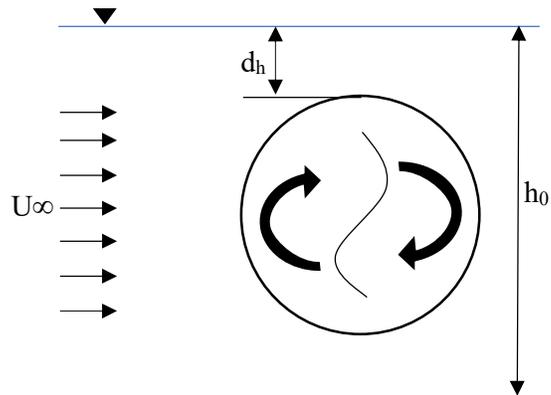
No	Variasi Immersion Depth	
1	0.33 H	0.8167 m
2	0.5 H	1.2250 m
3	0.66 H	1.6333 m



Gambar 3.9 Variasi Jarak Rendaman

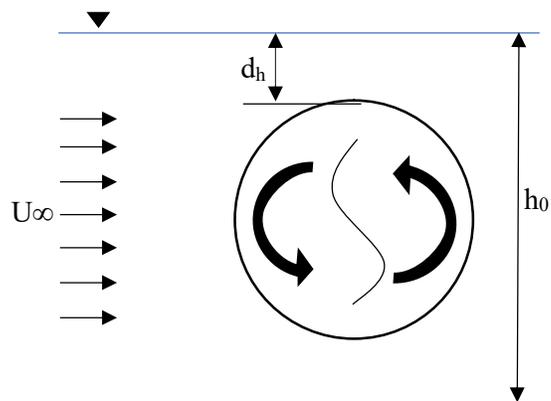
2. Arah putaran *blade*

a. Searah Jarum Jam (*Clockwise*)



Gambar 3.10 Contoh Turbin dengan Arah Putar **Clockwise**

b. Sebaliknya Arah Jarum Jam (*Counter-Clockwise*)



Gambar 3.11 Contoh Turbin dengan arah putar **Counterclockwise**

c. Variabel Terikat

Variabel terikat yang digunakan adalah:

1. *Tip Speed Ratio* (TSR)
2. Koefisien daya (C_p)
3. Koefisien Torque (C_t)

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

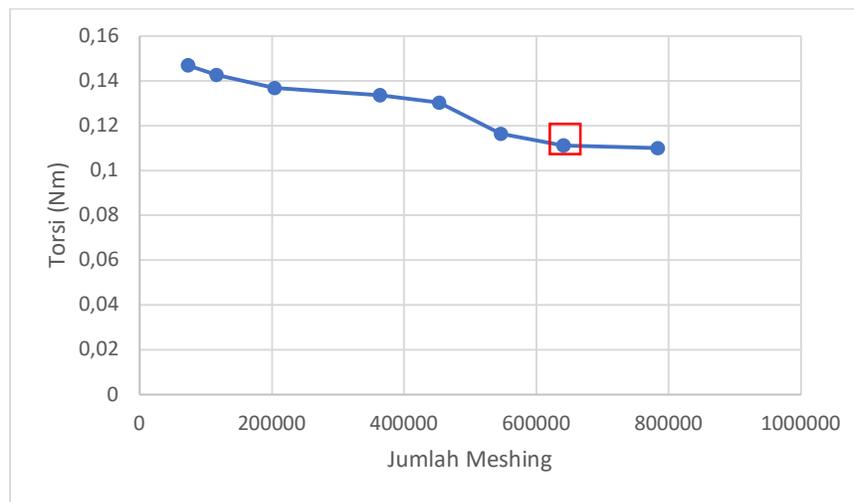
4.1 Studi Sensitivitas Mesh

Dalam Simulasi Numerik, penentuan Jumlah *mesh* Dalam simulasi numerik, penentuan jumlah mesh sangat penting dalam pelaksanaannya karena semakin teliti mesh yang digunakan maka hasil yang didapat akan semakin akurat. Namun, semakin banyaknya jumlah mesh maka waktu yang dibutuhkan untuk memproses perhitungannya pun lebih banyak. Maka dari itu, dibutuhkan planning agar mendapatkan jumlah mesh yang tepat dengan waktu yang sesingkat-singkatnya. Salah satu cara untuk mengetahui jumlah mesh dengan tepat adalah dengan cara studi sensitivitas mesh.

Pertama-tama, dilakukan simulasi terlebih dahulu dengan menggunakan mesh dengan ketelitian yang kecil, kemudian dilanjutkan dengan simulasi menggunakan mesh yang ketelitiannya lebih baik dari sebelumnya hingga hasil yang didapatkan mulai landai dan tidak terlalu jauh dengan hasil sebelumnya ketika ketelitiannya ditingkatkan. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan model validasi pada kecepatan arus $v = 0.54$ m/s. Berikut adalah table uji independensi mesh yang dilakukan:

Tabel 4.1 Variabel Studi Sensitifitas Mesh

No.	Jumlah Mesh	Torque (Nm)
1	73000	0,146
2	116000	0,142
3	204000	0,136
4	363000	0,133
5	453000	0,130
6	545901	0,116
7	640511	0,111
8	783000	0,110



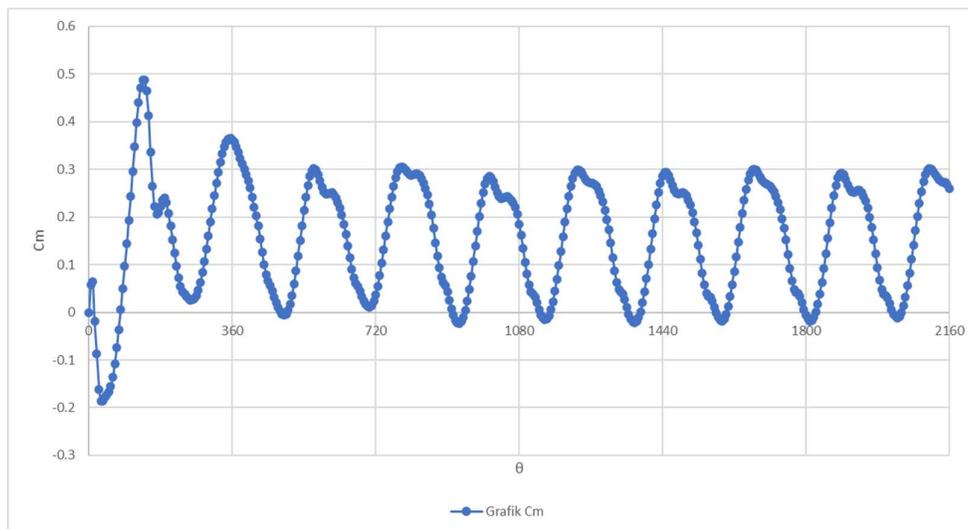
Gambar 4.1 Grafik Torsi dalam Fungsi Jumlah Mesh

Dapat terlihat dari table 4.1 dan gambar 4.1 bahwa torsi yang dihasilkan mulai konstan pada jumlah meshing diatas 545901. Pada penelitian kali ini menggunakan jumlah meshing 640511

4.2 Studi Rotasi Turbin

Jumlah rotasi turbin berpengaruh terhadap banyaknya time step yang digunakan dalam perhitungan. Semakin banyak rotasi turbin, maka time step yang dibutuhkan pun semakin banyak. Hal ini akan memberi dampak pada lama waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan perhitungan. Menurut Satrio (2018), jumlah rotasi yang dibutuhkan dalam perhitungan minimal sebanyak 4 putaran, karena wake sudah terbentuk secara utuh. Pada grafik dibawah ini, dapat dilihat bahwa pada putaran pertama (0° - 360°) terjadi sedikit fluktuasi sehingga rata-rata torsi pada putaran pertama belum bisa mencerminkan hasil yang sebenarnya. Meskipun pada putaran kedua dan ketiga terlihat sudah stabil, namun wake yang terjadi belum terbentuk secara utuh dan berada dekat dengan turbin (Satrio, 2018). Setelah putaran keempat (1080° - 1440°) terjadi, wake sudah terbentuk dan barulah dapat dijadikan parameter untuk validasi.

Koefisien momen yang terjadi pada tiap putaran dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 4.2 Grafik Cm Terhadap θ

```
Reversed flow on 20 faces (50.0% area) of pressure-outlet 8.  
!38620 solution is converged  
38620 5.6859e-05 1.9699e-05 2.5366e-05 2.7710e-05 8.8850e-05 0:00:01 12  
Flow time = 4.32755708694458s, time step = 1443  
1437 more time steps
```

Gambar 4.3 Screenshot Keterangan Konvergen

Dalam table dibawah ini, jika dibandingkan rata-rata Cm dan Torsi yang dihasilkan tiap putaran, dapat dilihat bahwa masih terdapat *error* pada putaran pertama terhadap putaran kedua. Setelah putaran kedua, dapat dilihat bahwa Cm yang dihasilkan sudah stabil dan tidak ada perbedaan yang terlalu jauh.

Tabel 4.2 Hasil rata-rata koefisien momen dan torsi simulasi numerik

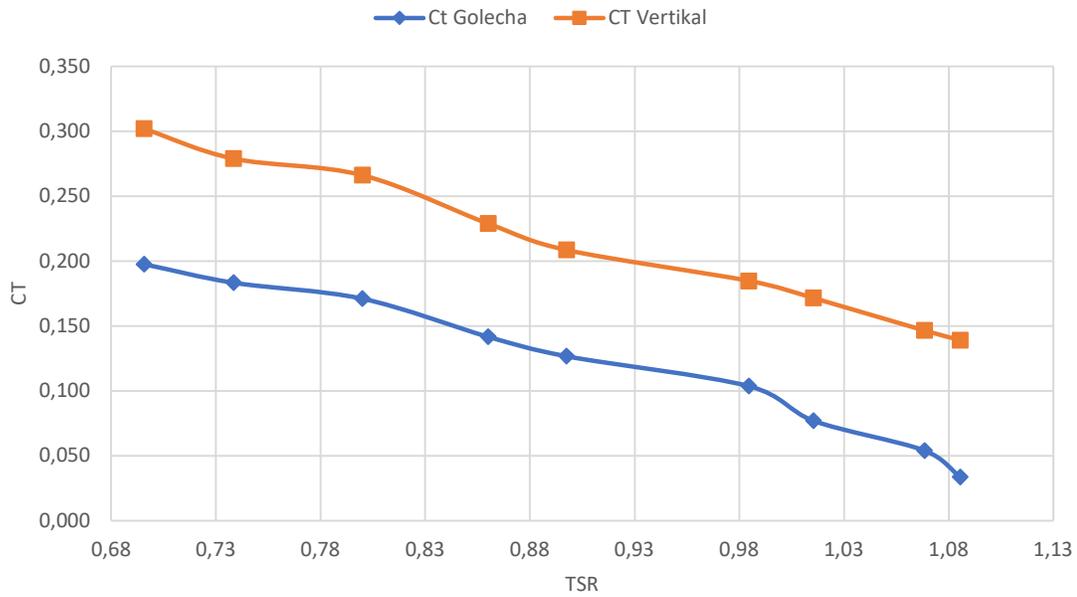
Average Hasil Cm, Torque, Ct dan Cp						
	1rev	2rev	3rev	4rev	5rev	6rev
Cm	0,14	0,16	0,18	0,13	0,16	0,16
Torque	0,11	0,12	0,14	0,10	0,12	0,12
Ct	0,27	0,29	0,34	0,24	0,30	0,30
Cp	0,19	0,20	0,24	0,17	0,21	0,21
Error previous comp		7,10%	14,66%	41,35%	19,76%	1,29%

4.3 Validasi Model Simulasi

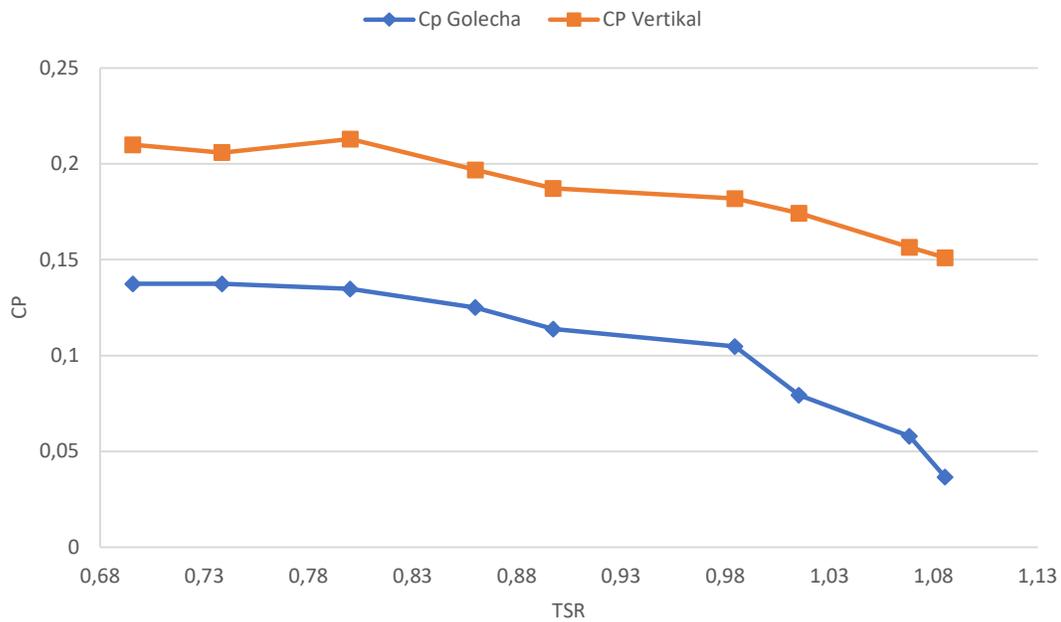
Uji validasi model dilakukan agar dapat memastikan bahwa hasil simulasi sesuai dengan kondisi sebenarnya. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan model tubulen *standar* k-e. Simulasi dilakukan dengan kondisi operasi pada TSR yang tertera pada Tabel 4.3. Simulasi yang dilakukan menggunakan *setup* dan *boundary conditions* yang sama dengan eksperimen yang dilakukan oleh Prabowoputra (2020) agar dapat diketahui validitasnya. Hasil perhitungan model adalah sebagai berikut:

Tabel 4.3 Hasil rata-rata CT & CP simulasi numerik dan validitas

TSR	Ct Golecha	CT Vertikal	Cp Golecha	CP Vertikal	Persentase Error
0,70	0,198	0,302	0,137	0,210	35%
0,74	0,183	0,279	0,137	0,206	34%
0,80	0,171	0,266	0,135	0,213	36%
0,86	0,142	0,229	0,125	0,197	38%
0,90	0,127	0,209	0,114	0,187	39%
0,98	0,104	0,185	0,105	0,182	44%
1,02	0,077	0,172	0,079	0,174	55%
1,07	0,054	0,147	0,058	0,157	63%
1,09	0,034	0,139	0,037	0,151	76%



Gambar 4.3 Grafik Validasi CT



Gambar 4.4 Grafik Validasi CP

Dikarenakan eksperimen acuan dan studi yang dilakukan masih dalam bentuk turbin vertikal, maka selanjutnya adalah dengan mengubahnya menjadi *cross flow*. Ada beberapa settingan dari *cross flow* yang berbeda dari turbin vertikal, antara lain adalah penggunaan *gravity* serta penambahan dasar laut/*seabed* berupa dinding *no slip*. Maka dari itu, langkah-langkah sebelumnya perlu di lakukan ulang dengan penambahan settingan tersebut agar mendapatkan hasil turbin *cross flow* yang diinginkan. Hasil perhitungan model adalah sebagai berikut:

Tabel 4.5 Perhitungan Data Eksperimen Dengan Model Turbin Cross-Flow

TSR	Ct Data (Golecha, 2011)	Ct Cross-flow	Cp Data (Golecha, 2011)	Cp Cross-flow	Persentase Error
0.7	0.197	0.278	0.137	0.193	29%
0.74	0.183	0.286	0.137	0.212	36%
0.8	0.171	0.267	0.135	0.214	36%
0.86	0.141	0.237	0.125	0.204	40%
0.9	0.126	0.210	0.114	0.188	40%
0.98	0.103	0.185	0.105	0.183	44%
1.015	0.077	0.174	0.079	0.177	56%
1.068	0.054	0.149	0.058	0.159	64%
1.086	0.033	0.138	0.037	0.150	76%



Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Ct Data Terhadap Crossflow

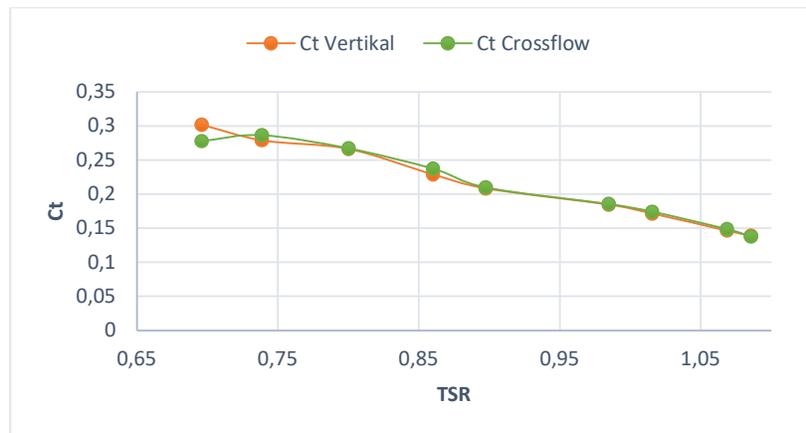


Gambar 4.6 Grafik Perbandingan CP Data Terhadap Crossflow

Selanjutnya dapat kita bandingkan perhitungan yang dihasilkan setelah mensimulasikan turbin vertikal dan turbin crossflow, dapat dilihat pada tabel IV.5 berikut:

Tabel 4.6 Perbandingan Turbin Vertikal Dengan Turbin Crossflow

TSR	Ct Vertikal	Ct Cross-flow	Cp Vertikal	Cp Crossflow	Selisih	Persentase
0.7	0.302	0.278	0.210	0.193	-0.016	9%
0.74	0.279	0.286	0.206	0.212	0.006	3%
0.8	0.266	0.267	0.213	0.214	0.001	0%
0.86	0.229	0.237	0.197	0.204	0.007	4%
0.9	0.209	0.210	0.187	0.188	0.001	1%
0.98	0.185	0.185	0.182	0.183	0.001	0%
1.015	0.172	0.174	0.174	0.177	0.003	1%
1.068	0.147	0.149	0.157	0.159	0.002	2%
1.086	0.139	0.138	0.151	0.150	-0.001	1%



Gambar 4.7 Perbandingan CT Pada Turbin Vertikal dan Crossflow



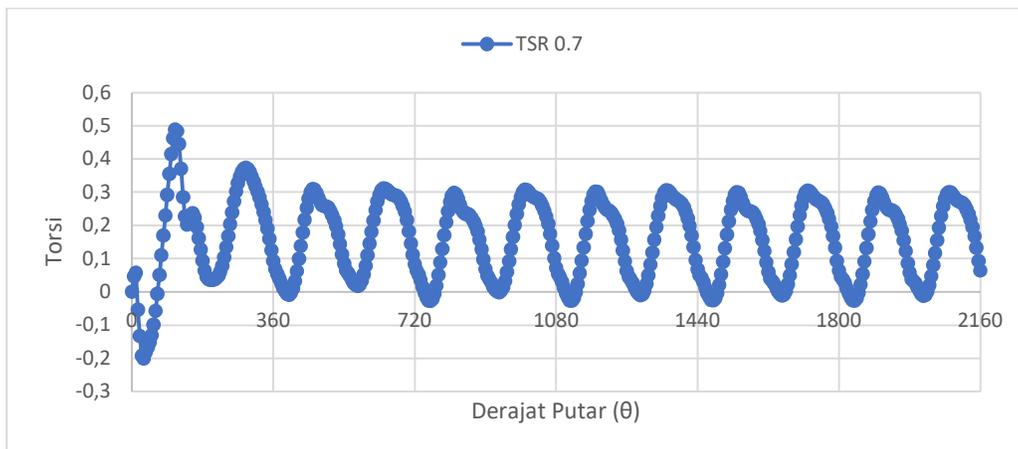
Gambar 4.8 Perbandingan CP Pada Turbin Vertikal dan Crossflow

Dari tabel dan grafik sebelumnya, bisa dilihat bahwa konfigurasi turbin cross-flow secara garis besar berada diatas konfigurasi turbin vertikal dengan selisih yang kecil.

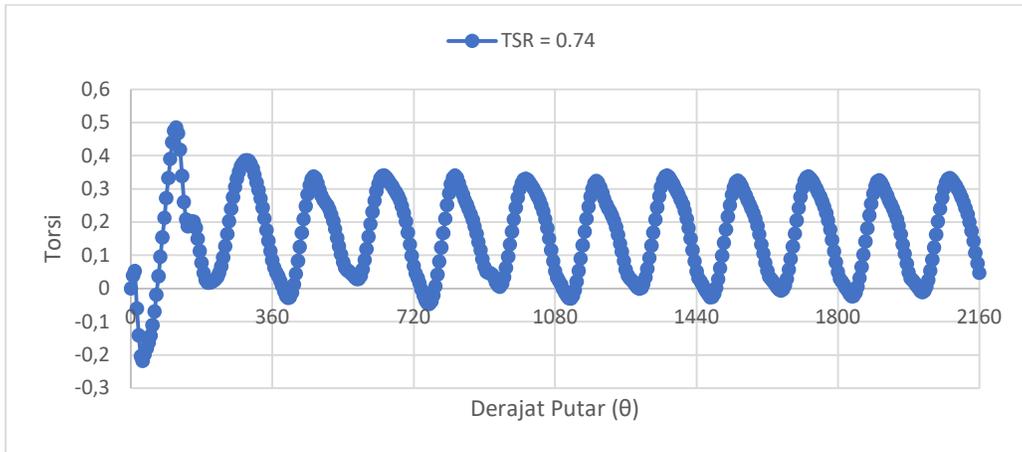
Berdasarkan hasil-hasil yang telah didapatkan, dapat dilihat bahwa studi numerik menunjukkan C_t dan C_p berada diatas data eksperimen. Hasil C_t dan C_p yang didapat memiliki eror diatas 29% sehingga belum dapat menyentuh hasil yang diinginkan yaitu dibawah 10%. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, salah satunya adalah simulasi yang dilakukan menggunakan 2 dimensi sedangkan data eksperimen acuan menggunakan 3 dimensi. Hal ini dapat menyebabkan overestimasi terhadap simulasi yang dilakukan karena ada variabel yang tidak dapat didefinisikan dalam studi numerik yang dilakukan. Hal tersebut sesuai dengan pendapat yang dikemukakan oleh Mauro et al (2019), yaitu kondisi yang didapat sangat tidak stabil, berhubungan pada operasi rotor, serta membutuhkan sensitivitas studi secara spesifik pada temporal dan spasial.

Jika dilihat berdasarkan “tren” dari grafiknya, terlihat bahwa grafik yang dihasilkan dari studi numerik pada turbin vertikal dan cross-flow memiliki persentase eror yang cukup stabil. Tren grafik dari tiap studi numerik pun terlihat cukup serupa dengan grafik yang didapat pada data eksperimen. Jika menimbang dari simulasi numerik pada turbin 2D yang dilakukan oleh Maitre et al (2013), beliau memperoleh hasil berupa torsi puncak yang memiliki eror sebesar 60%. Hasil studi numerik yang didapatkan oleh penulis masih berada di bawah angka eror tersebut, sehingga dapat dikatakan valid dan dapat dilanjutkan pada tahap berikutnya.

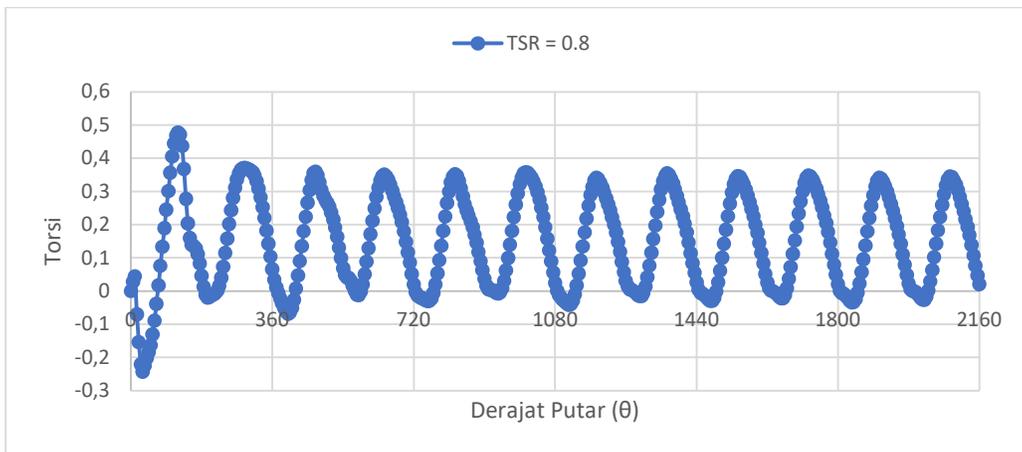
Grafik fluktuasi torsi pada tiap kondisi tersebut dapat dilihat pada gambar-gambar dibawah ini:



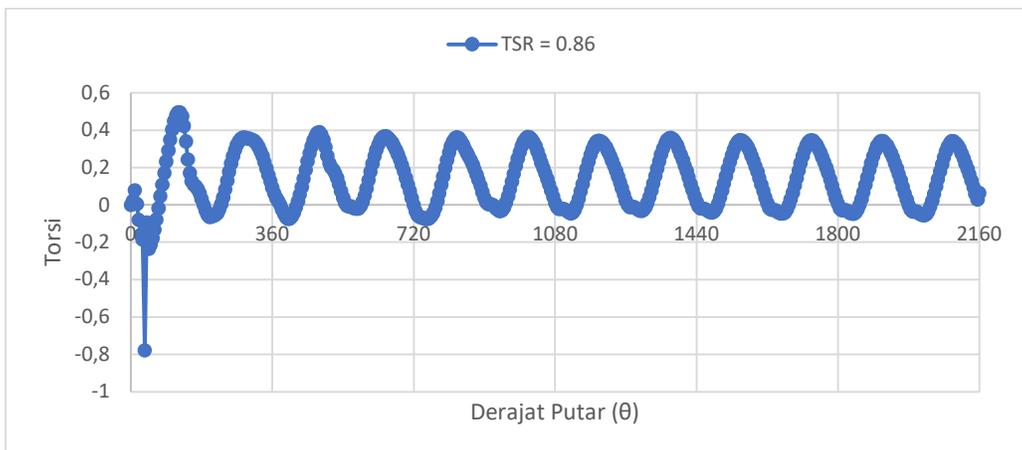
Gambar 4.9 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar Pada TSR 0,7



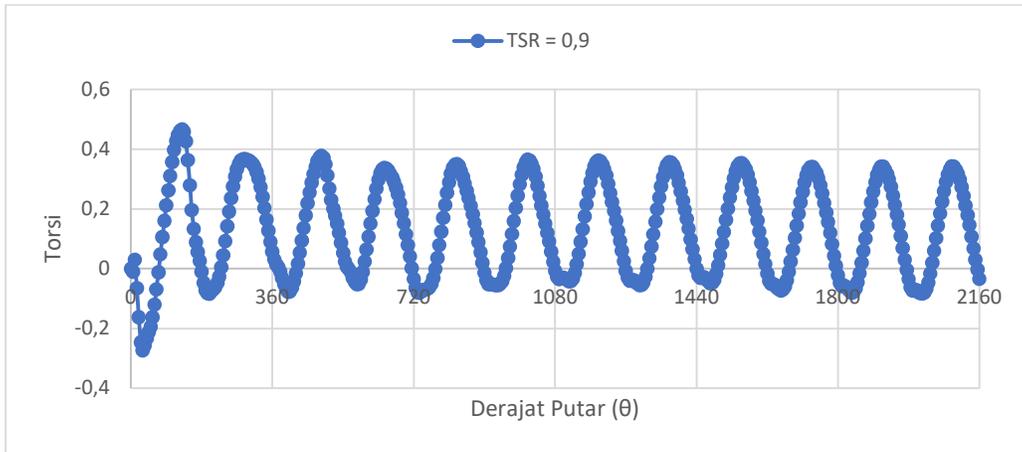
Gambar 4.10 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 0,74



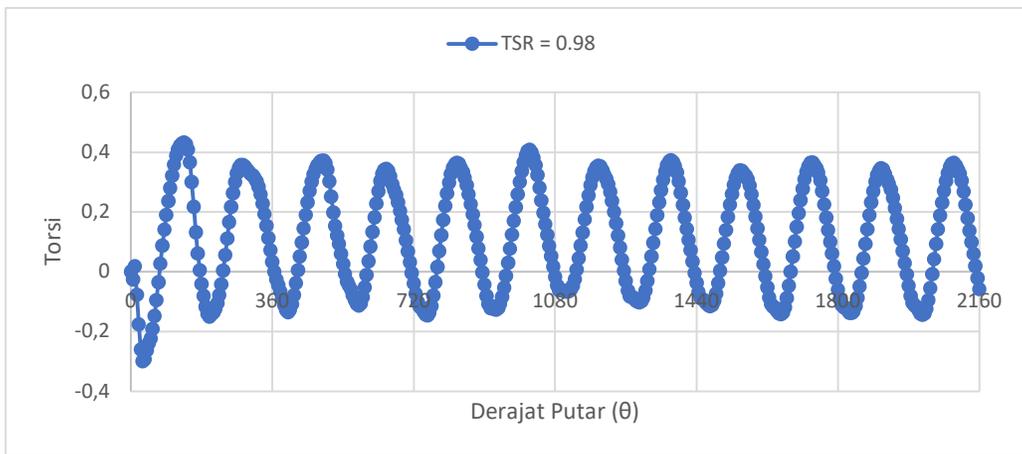
Gambar 4.11 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 0,8



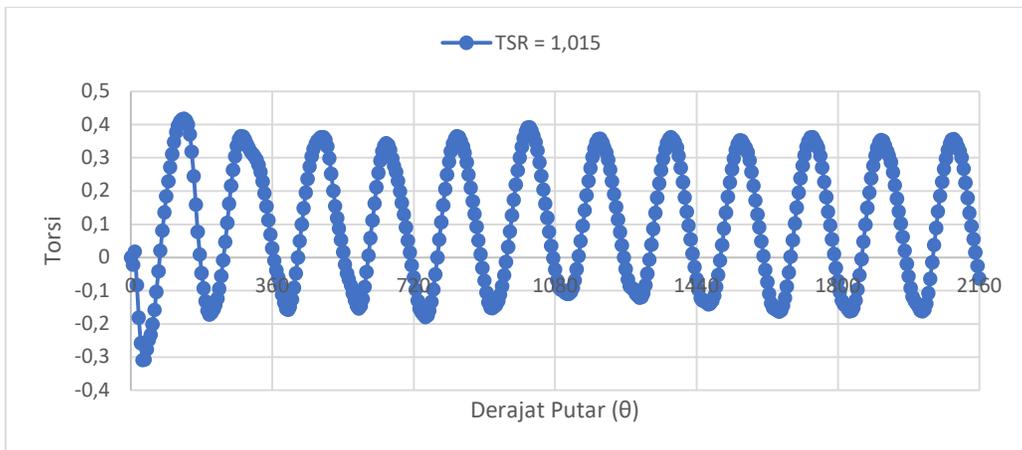
Gambar 4.12 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 0,86



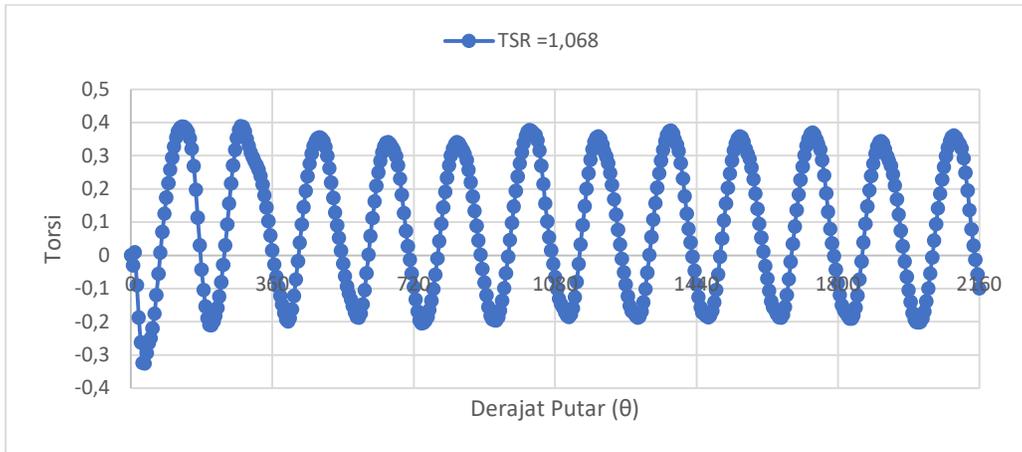
Gambar 4.13 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 0,9



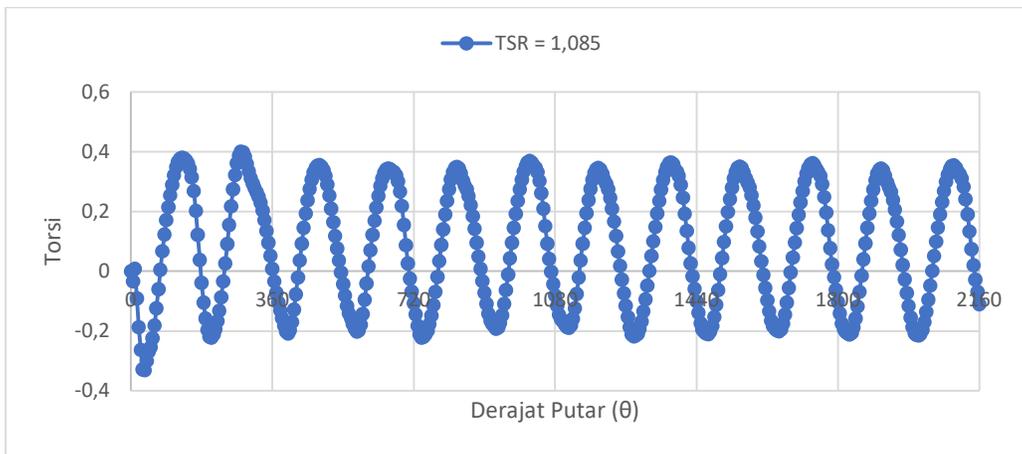
Gambar 4.14 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 0,98



Gambar 4.15 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 1,015

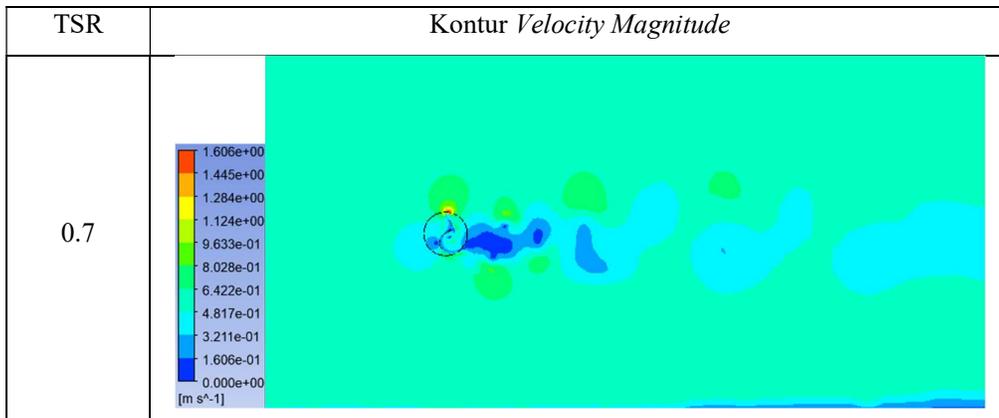


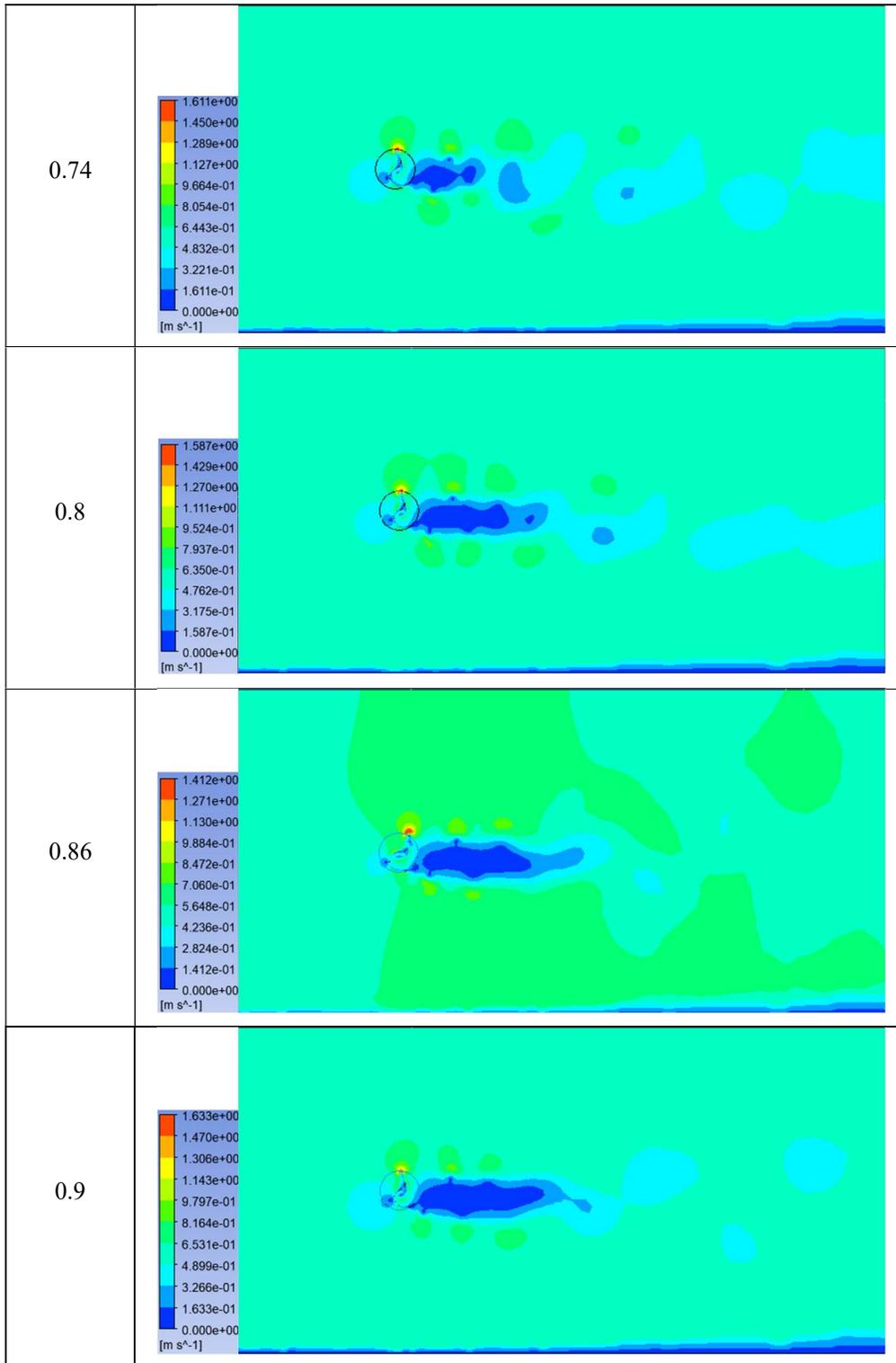
Gambar 4.16 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 1,068

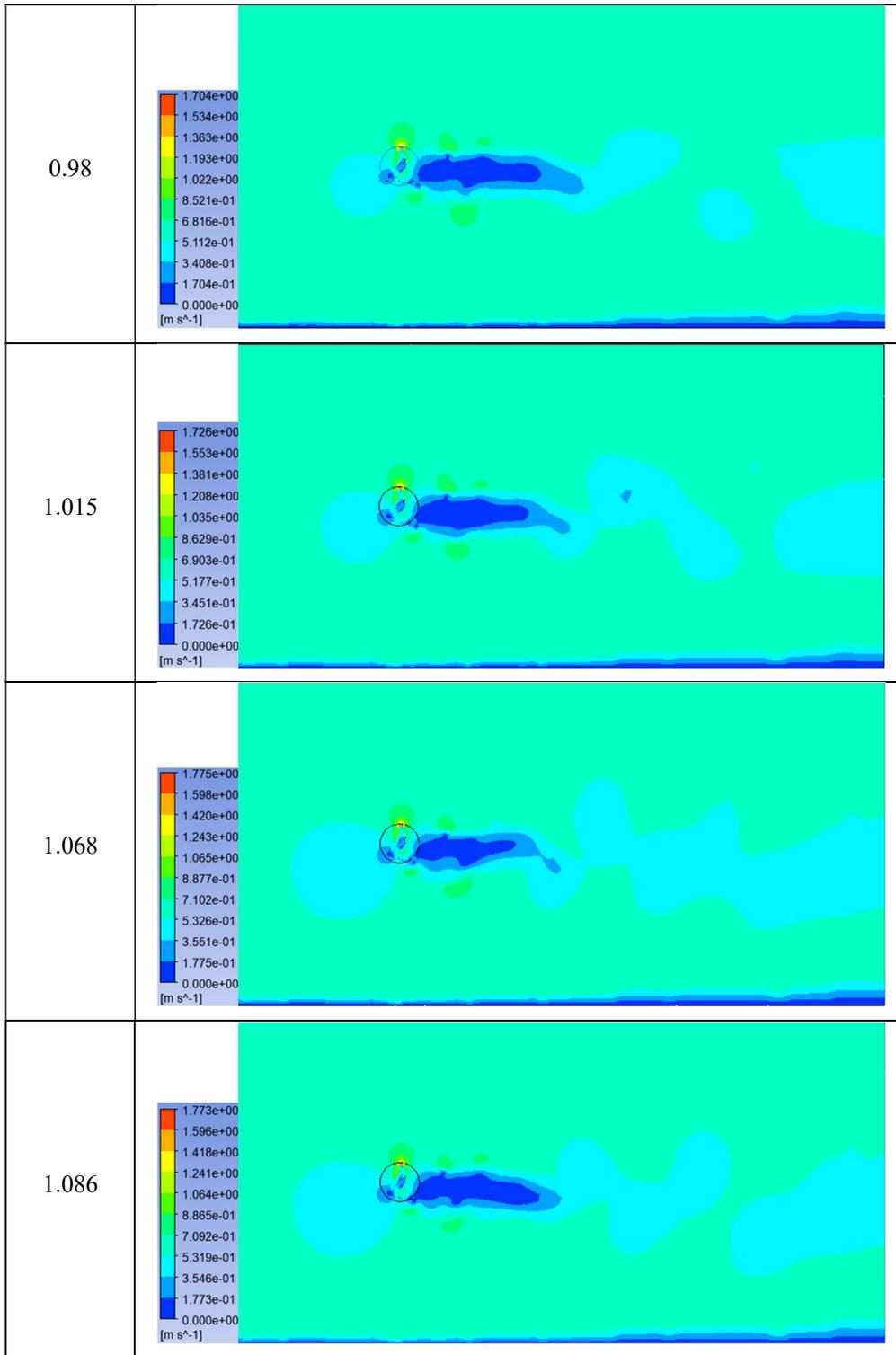


Gambar 4.17 Grafik Torsi Terhadap Derajat Putar pada TSR 1,086

Aliran yang mengenai *blade* turbin pada tiap kondisi operasi sedikit mengalami turbulensi sehingga adanya torsi negatif di beberapa titik. Kontur *velocity magnitude* dari tiap kondisi ditunjukkan pada tabel IV.7 dibawah ini:







Pada gambar yang terdapat dalam tabel tersebut, terlihat bahwa masih terjadi turbulensi di area rotasi turbin pada TSR rendah yaitu 0,7 , 0,74 dan 0,8 sehingga perputaran turbin belum stabil. Hal ini menyebabkan ketidakstabilan, sehingga dapat dilihat bahwa pola yang dihasilkan belum stabil. Ketidakstabilan tersebut menyebabkan koefisien momen yang didapat masih terdapat fluktuasi sehingga torsi

yang dihasilkan memiliki bentuk grafik yang sedikit berbeda dari torsi yang dihasilkan pada TSR yang lebih tinggi.

Semakin meningkatnya TSR maka turbulensi yang dihasilkan semakin sedikit. Hal ini dapat dilihat pada area turbin, bahwa hanya terjadi sedikit perubahan kecepatan pada area *returning blade* yang berada terpusat pada 2 titik saja. Rotasi yang dihasilkan kini lebih stabil sehingga wake yang dihasilkan pun stabil dan utuh. Hal ini menjadikan koefisien momen yang didapat lebih stabil sehingga torsi yang dihasilkan pun lebih baik dan stabil.

4.4 Variasi Jarak Rendaman

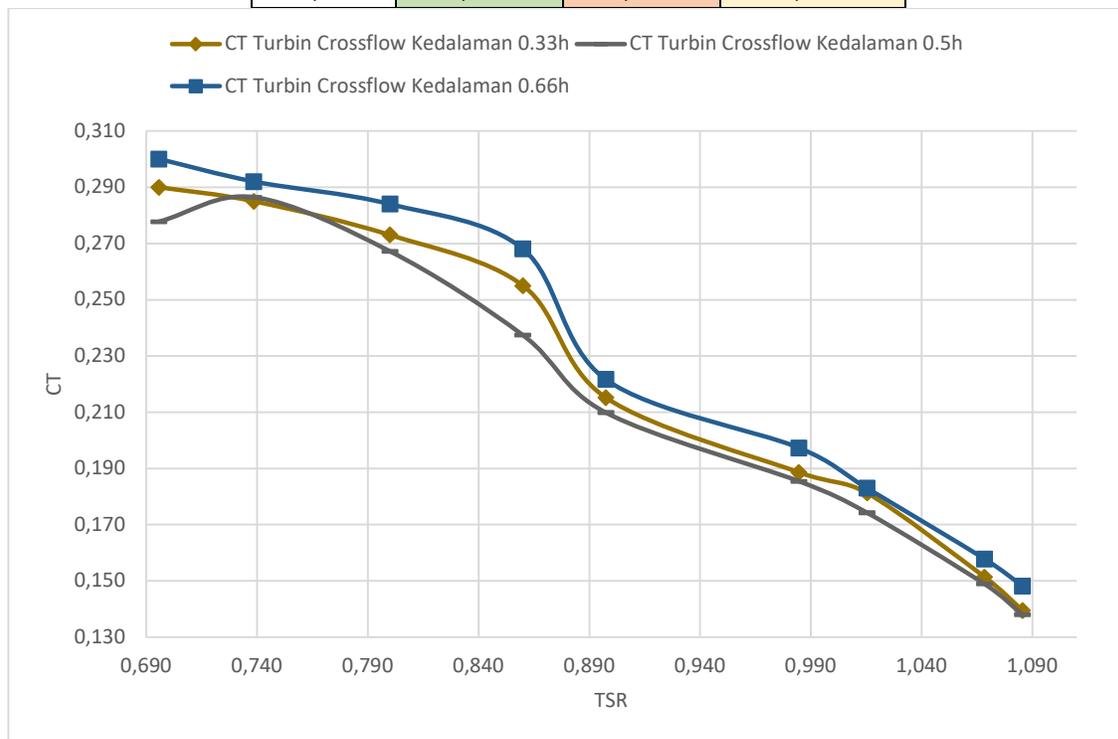
Setelah hasil numerik turbin telah tervalidasi, turbin akan dibandingkan dalam bentuk perbedaan jarak rendaman turbin. Penentuan jarak rendaman turbin dari muka air adalah hal yang lumayan penting untuk dilakukan. Hal tersebut dikarenakan adanya efek turbulensi *free-surface* di dekat muka air dan juga turbulensi di dekat dasar air (Myers & Bahaj, 2010). Terjadinya turbulensi dapat mengganggu kinerja turbin yang dapat berakibat pada performa turbin.

Pada penelitian kali ini, terdapat tiga (3) variasi jarak rendaman yang dilakukan. Variable jarak rendaman (*immersion depth*) yang digunakan untuk penelitian yaitu $0.33h$, $0,5h$ dan $0,67h$. Kedalaman perairan adalah $2,45m$. Tiga jarak rendaman tersebut dipilih guna mengetahui performa turbin crossflow pada kedalaman yang dekat dengan permukaan air hingga dekat dasar perairan

Performa turbin crossflow pada masing-masing jarak rendaman dinilai dengan hasil CT dan CP yang dihasilkan dari simulasi numerik pada masing-masing kedalaman dan masing-masing TSR. Berikut merupakan hasil yang didapatkan dari simulasi yang dilakukan:

Tabel 4.5 Perbandingan Performa CT Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman

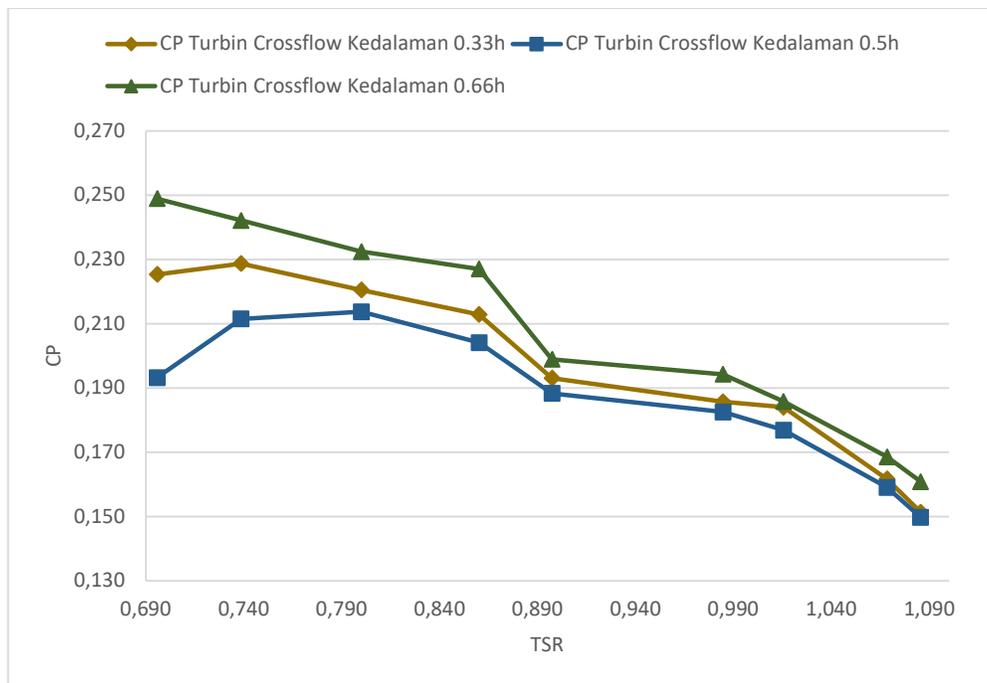
TSR	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.33h	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.5h	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.66h
0,70	0,29	0,278	0,300
0,74	0,285	0,286	0,292
0,80	0,273	0,267	0,284
0,86	0,255	0,237	0,268
0,90	0,215	0,210	0,222
0,98	0,189	0,185	0,197
1,02	0,181	0,174	0,183
1,07	0,151	0,149	0,158
1,09	0,139	0,138	0,148



Gambar 4.14 Grafik Perbandingan Rata Rata CT Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman

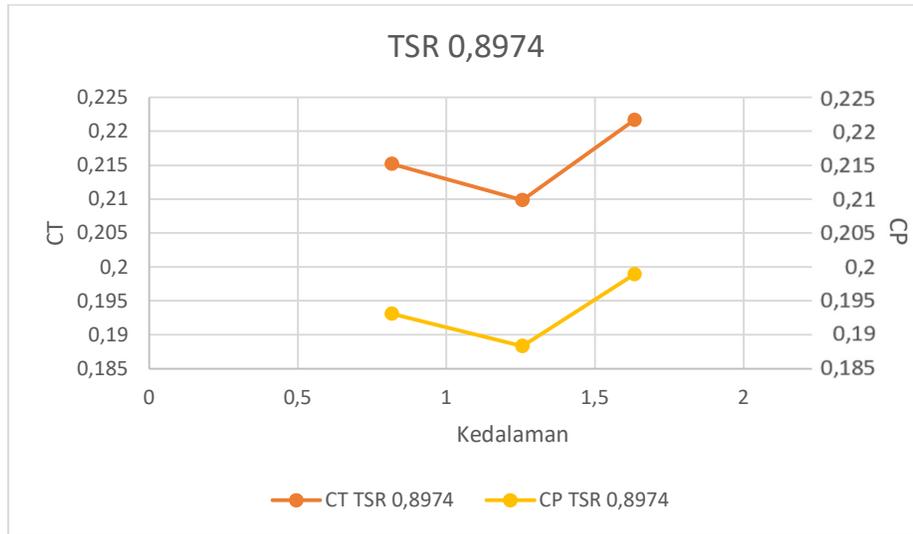
Tabel 4.6 Perbandingan Performa CP Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman

TSR	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.33h	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.5h	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.66h
0,70	0,225	0,193	0,249
0,74	0,229	0,212	0,242
0,80	0,221	0,214	0,232
0,86	0,213	0,204	0,227
0,90	0,193	0,188	0,199
0,98	0,186	0,183	0,194
1,02	0,184	0,177	0,186
1,07	0,162	0,159	0,169
1,09	0,151	0,150	0,161

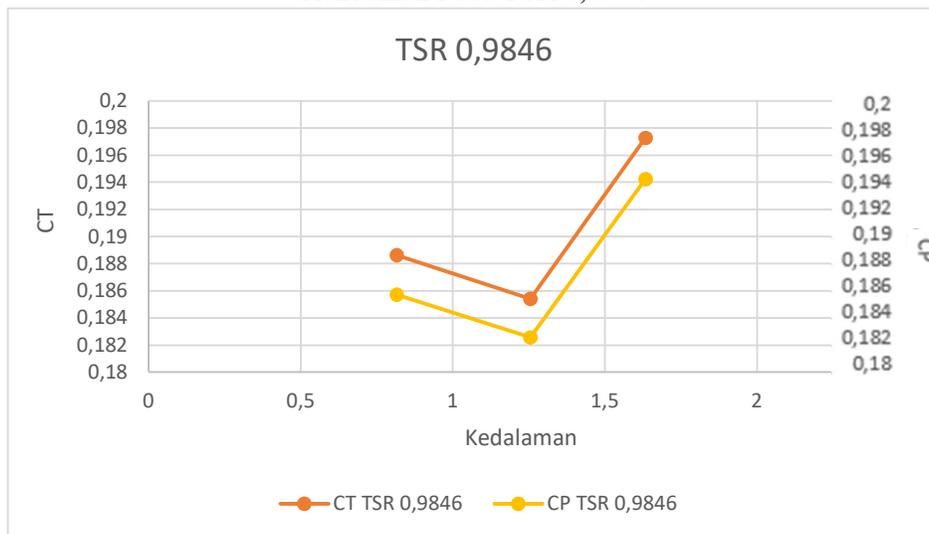


Gambar 4.15 Grafik Perbandingan Rata Rata CP Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman

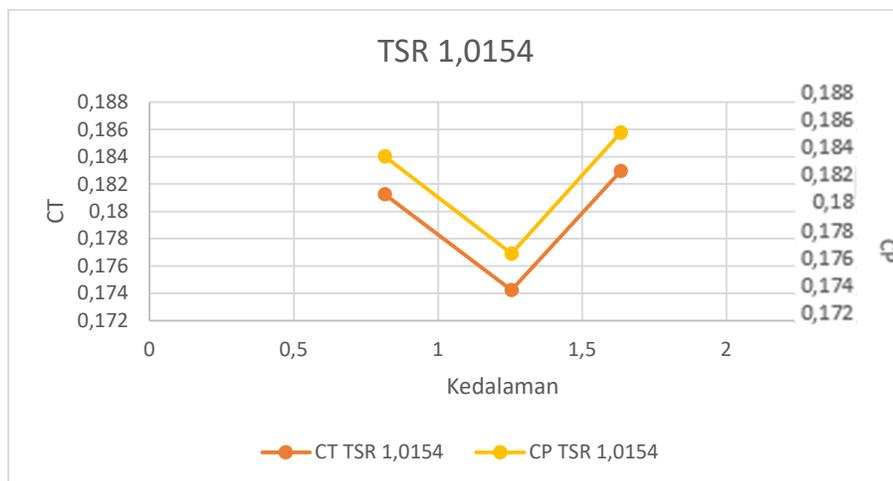
Hasil simulasi numerik turbin *crossflow* dengan variasi jarak rendaman dapat dilihat pada table 4.5 dan grafik pada gambar 4.14. Terlihat bahwa pada kedalaman 0.66h dan 0.33h memiliki nilai CT dan CP yang relative lebih tinggi dibandingkan jika diletakan ditengah perairan, kemudian pada kedalaman 0.66h, turbin memiliki nilai CT dan CP yang konstan dan lebih tinggi dibandingkan ketiga kedalaman. Secara garis besar, turbin dengan konfigurasi *crossflow* rata-rata menghasilkan CT paling besar apabila diletakan di dasar perairan. Hal tersebut linear dengan hasil numerik yang dilakukan oleh Tremblay & Dumas(2020), dimana didapatkan bahwa semakin dalam turbin diletakan maka, semakin tinggi *output* yang didapatkan dari turbin



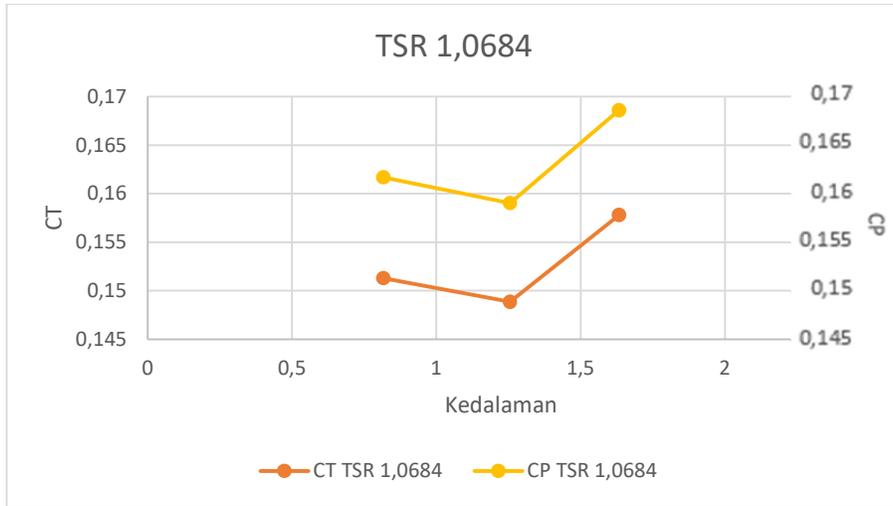
Gambar 4.16 Grafik Perbandingan Rata-Rata Torsi Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman Pada TSR 0,8974



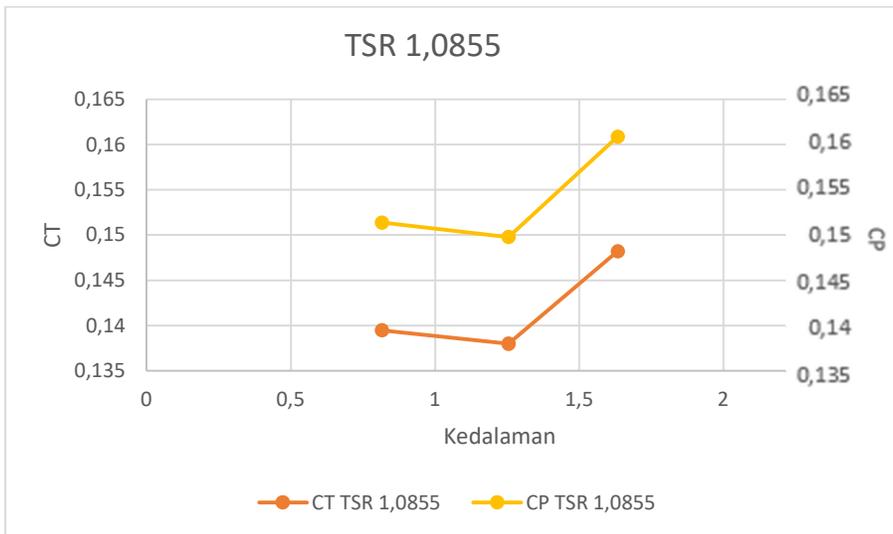
Gambar 4.17 Grafik Perbandingan Rata-Rata Torsi Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman Pada TSR 0,9846



Gambar 4.18 Grafik Perbandingan Rata-Rata Torsi Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman Pada TSR 1,0154

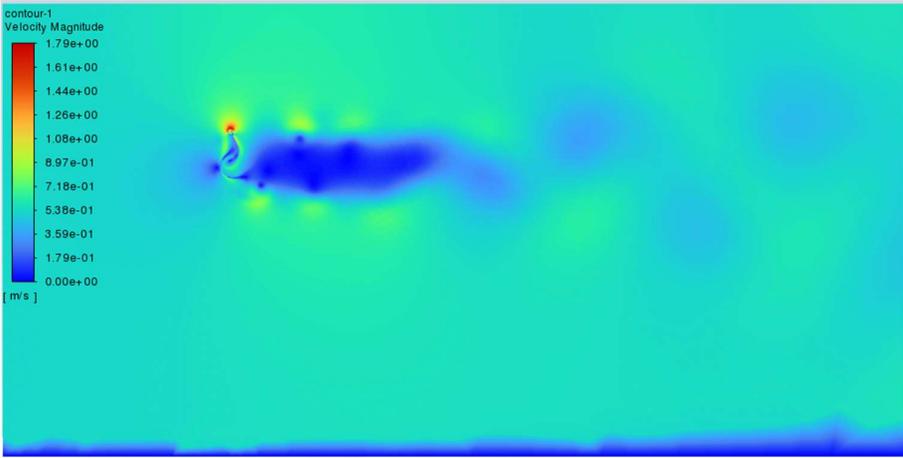
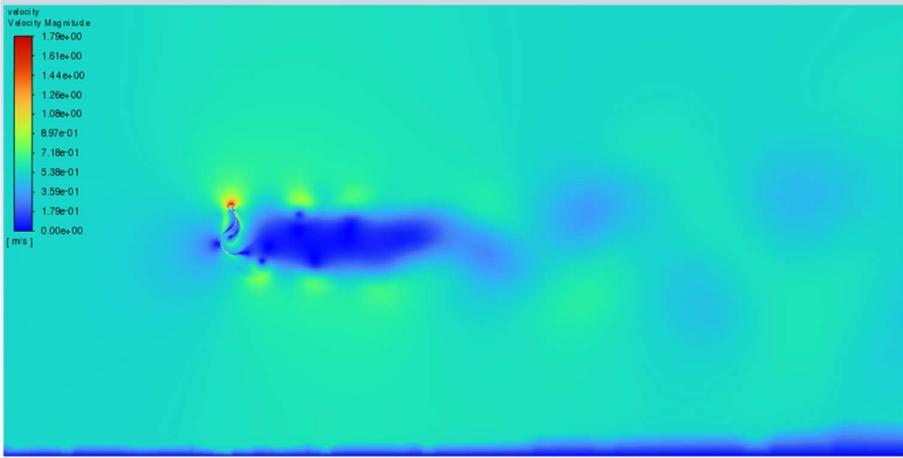
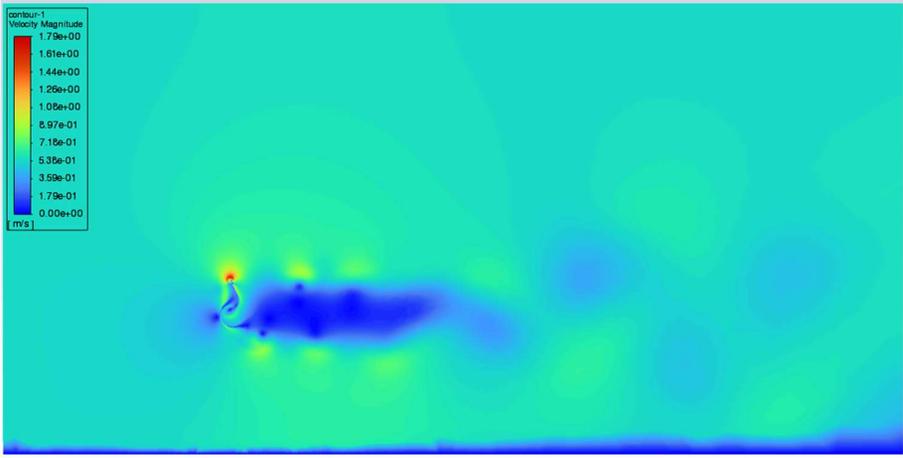


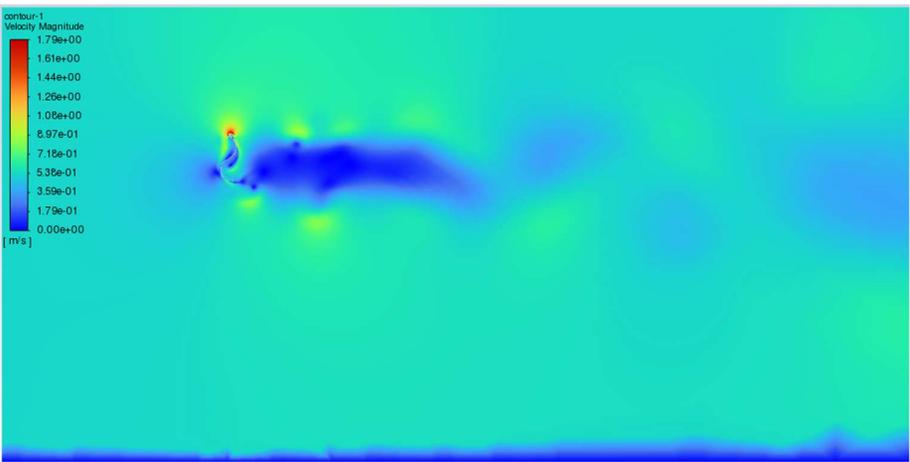
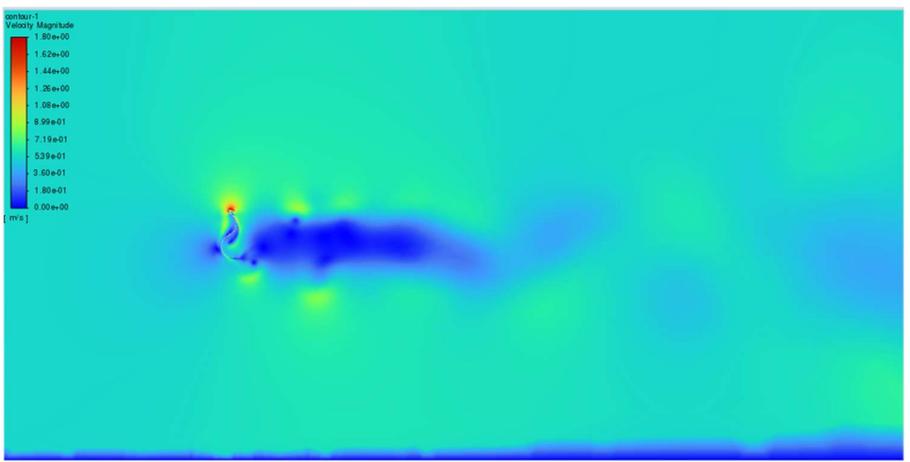
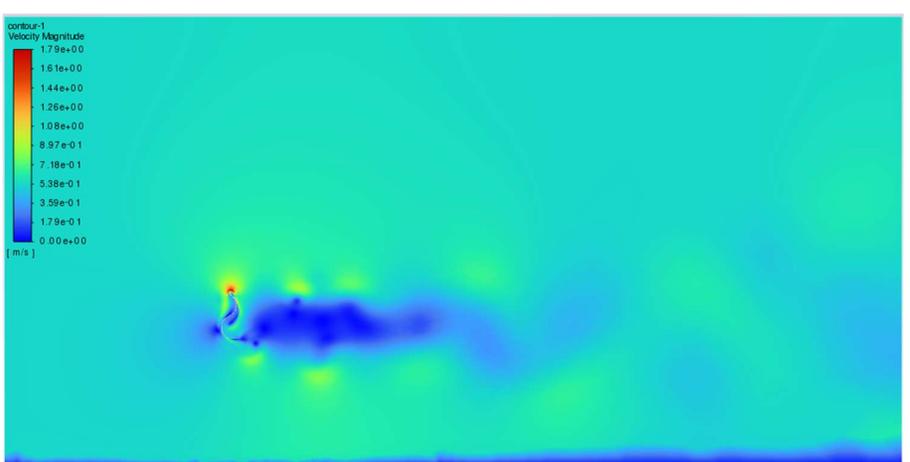
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Rata-Rata Torsi Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman Pada TSR 1,0684



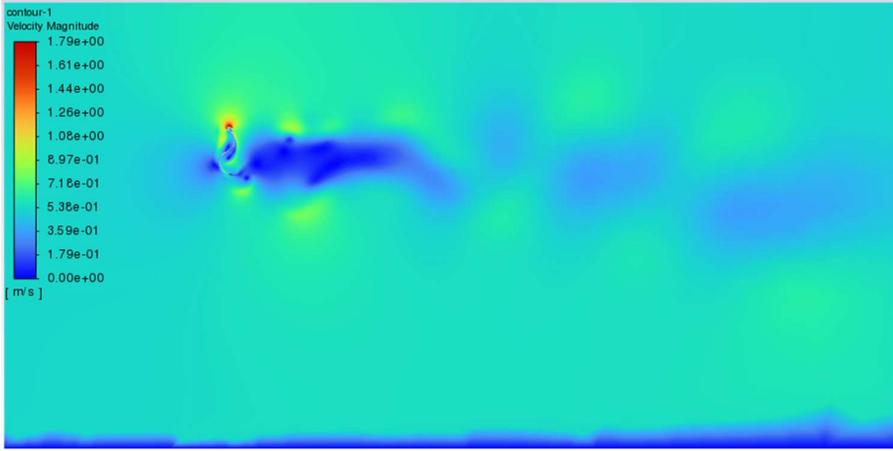
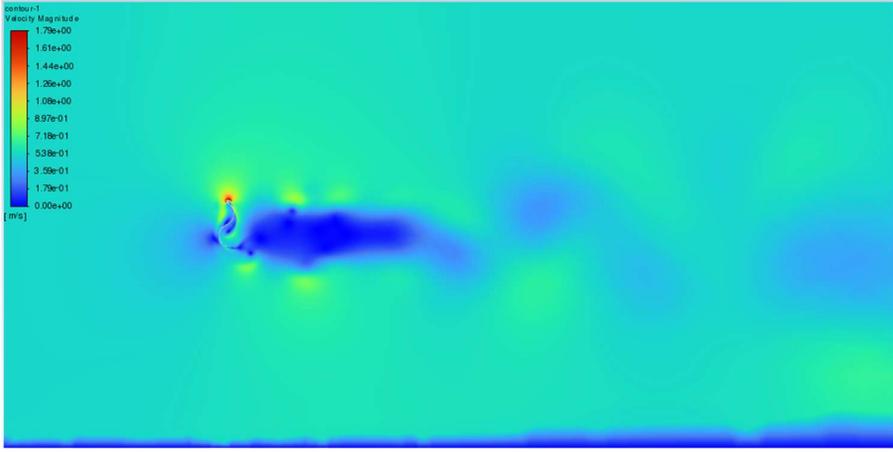
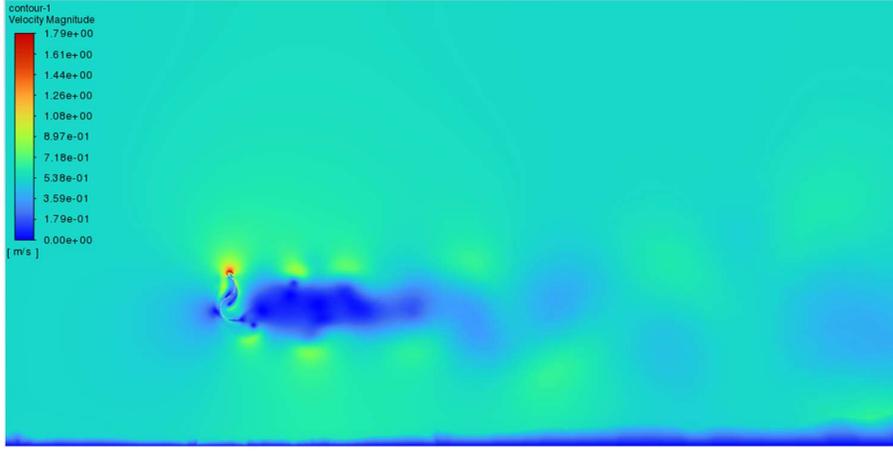
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Rata-Rata Torsi Turbin Crossflow Variasi Jarak Rendaman Pada TSR 1,0855

Tabel 4.7 Tabel Perbandingan Contour Kedalaman Tiap TSR

	Kedalaman	Contour
<p>TSR 0.8974</p>	<p>0.33h</p>	
	<p>0.5h</p>	
	<p>0.66h</p>	

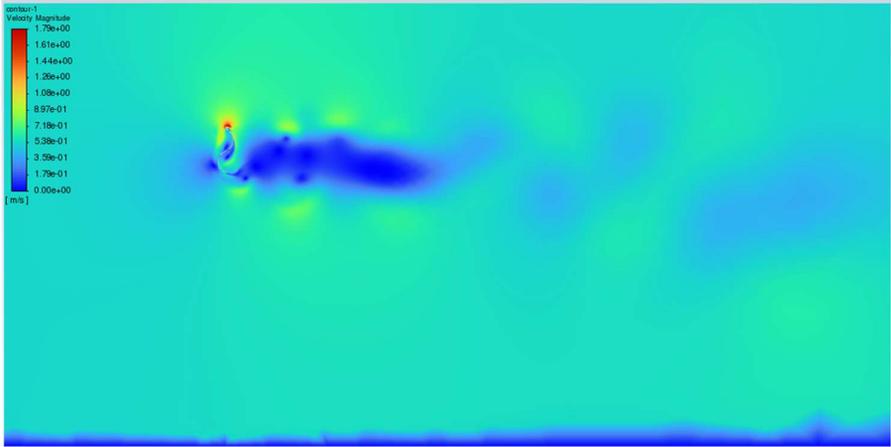
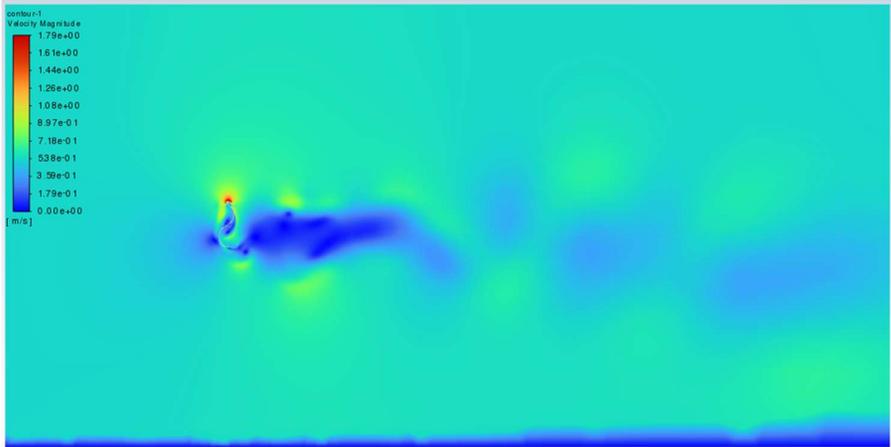
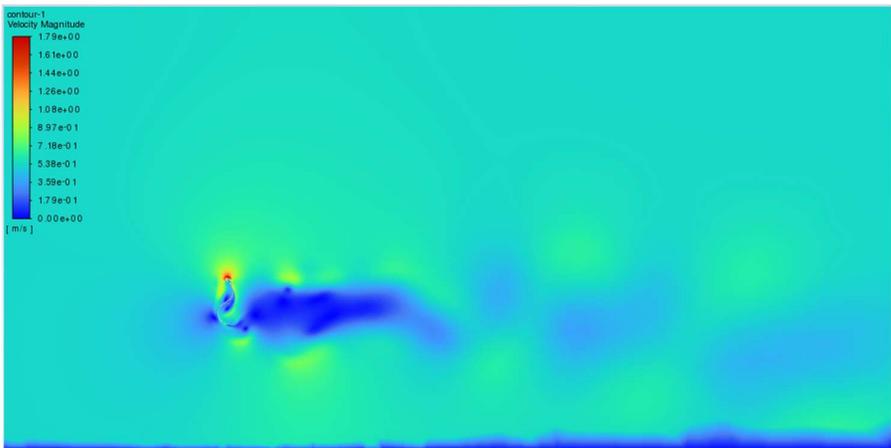
Kedalaman	Contour
0.33h	 <p>contour-1 Velocity Magnitude 1.79e+00 1.61e+00 1.44e+00 1.26e+00 1.08e+00 8.97e-01 7.16e-01 5.35e-01 3.59e-01 1.79e-01 0.00e+00 [m/s]</p>
0.5h	 <p>contour-1 Velocity Magnitude 1.80e+00 1.62e+00 1.44e+00 1.26e+00 1.08e+00 8.99e-01 7.19e-01 5.39e-01 3.59e-01 1.80e-01 0.00e+00 [m/s]</p>
0.66h	 <p>contour-1 Velocity Magnitude 1.79e+00 1.61e+00 1.44e+00 1.26e+00 1.08e+00 8.97e-01 7.18e-01 5.38e-01 3.59e-01 1.79e-01 0.00e+00 [m/s]</p>

TSR 0.9846

Kedalaman	Contour	
TSR 1.0154	0.33h	
	0.5h	
	0.66h	

Kedalaman	Contour
0.33h	
0.5h	
0.66h	

TSR 1.0684

	Kedalaman	Contour
TSR 1.0855	0.33h	
	0.5h	
	0.66h	

Seperti yang bisa dilihat pada grafik perbandingan rata rata torsi turbin crossflow diatas dihasilkan di masing masing TSR menunjukkan seiring semakin dalam turbin diletakan perairan semakin dalam perairan, semakin tinggi hasil CT dan CP yang didapatkan. Maka dari itu kecenderungan kinerja turbin lebih baik seiring

semakin dalamnya turbin diletakkan dalam perairan. Hal ini sesuai dengan penelitian (Tremblay et al, 2020) yang melakukan studi numerik turbin crossflow pada perairan sungai dimana hasilnya adalah semakin dalam turbin diletakkan, maka semakin baik kinerja turbin.

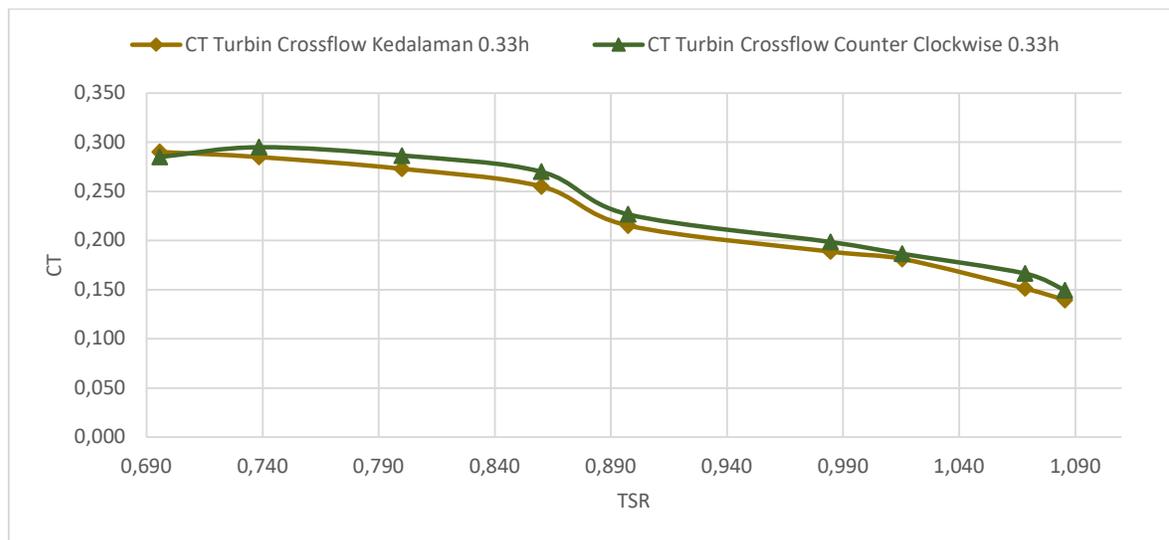
4.5 Variasi Arah Perputaran Turbin

Setelah hasil numerik turbin variasi kedalaman dilakukan, pada penelitian kali ini, penulis memvariasikan arah putar turbin. Variabel arah putar turbin yang digunakan pada penilitan ini yaitu searah jarum jam (*clockwise*) dan berlawanan arah jarum jam (*counter-clockwise*)

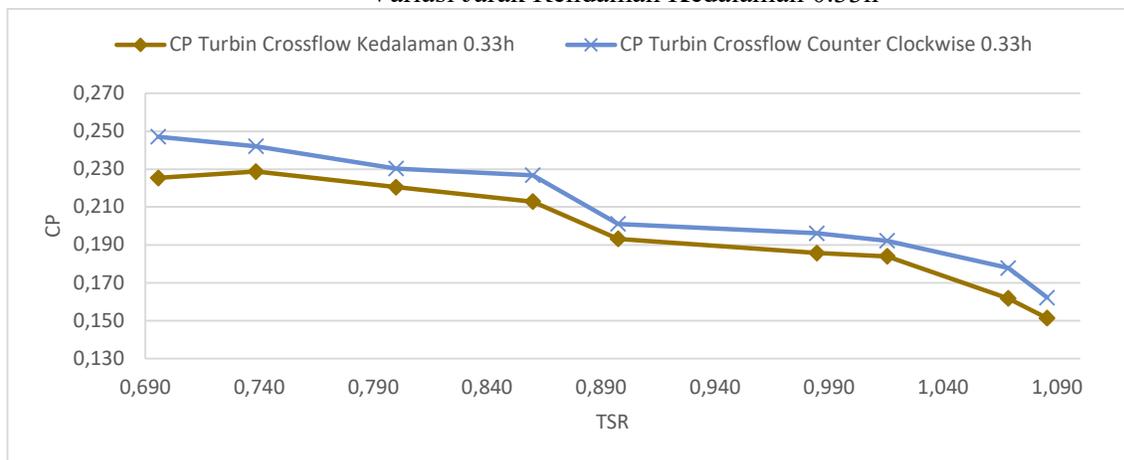
Peforma turbin crossflow pada masing-masing jarak rendaman yang sudah diubah arah putarnya dinilai dengan hasil CT dan CP yang dihasilkan dari simulasi numerik pada masing masing kedalaman dan masing masing arah putar turbin. Berikut merupakan hasil yang didapatkan dari simulasi yang dilakukan:

Tabel 4.8 Perbandingan Performa CT & CP Turbin Crossflow Variasi Arah Putar Turbin Terhadap Variasi Jarak Rendaman

TSR	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.33h	CT Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.33h	Selisih	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.33h	CP Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.33h	Selisih
0,70	0,29	0,285	2%	0,225	0,247	10%
0,74	0,285	0,295	4%	0,229	0,242	6%
0,80	0,273	0,287	5%	0,221	0,230	4%
0,86	0,255	0,270	6%	0,213	0,227	7%
0,90	0,215	0,227	5%	0,193	0,201	4%
0,98	0,189	0,199	5%	0,186	0,196	6%
1,02	0,181	0,187	3%	0,184	0,192	4%
1,07	0,151	0,166	10%	0,162	0,178	10%
1,09	0,139	0,149	7%	0,151	0,162	7%



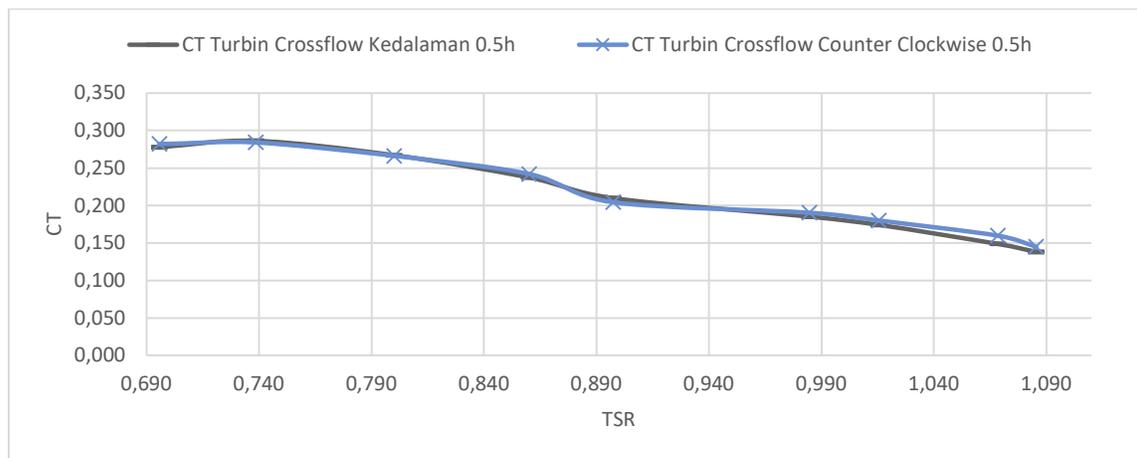
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Rata Rata CT Turbin Crossflow Counter Clockwise Variasi Jarak Rendaman Kedalaman 0.33h



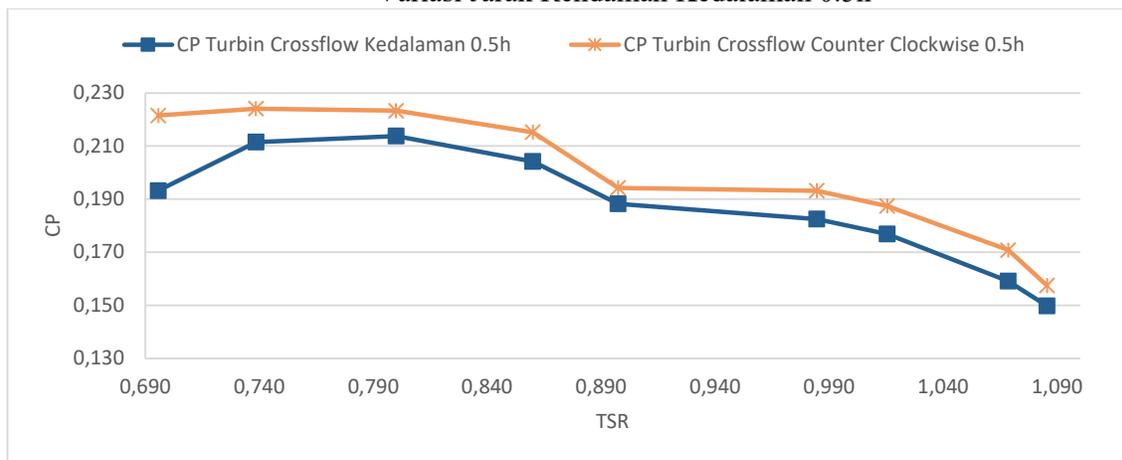
Gambar 4.22 Grafik Perbandingan Rata Rata CP Turbin Crossflow Counter-clockwise Variasi Jarak Rendaman 0.33h

Tabel 4.9 Perbandingan Performa CT Turbin Crossflow Variasi Arah Putar Turbin Terhadap Variasi Jarak Rendaman

TSR	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.5h	CT Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.5h	Selisih	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.5h	CP Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.5h	Selisih
0,70	0,278	0,282	2%	0,193	0,222	15%
0,74	0,286	0,284	1%	0,212	0,224	6%
0,80	0,267	0,266	0%	0,214	0,223	4%
0,86	0,237	0,242	2%	0,204	0,215	5%
0,90	0,210	0,204	3%	0,188	0,194	3%
0,98	0,185	0,191	3%	0,183	0,193	6%
1,02	0,174	0,180	3%	0,177	0,187	6%
1,07	0,149	0,160	7%	0,159	0,171	7%
1,09	0,138	0,145	5%	0,150	0,157	5%



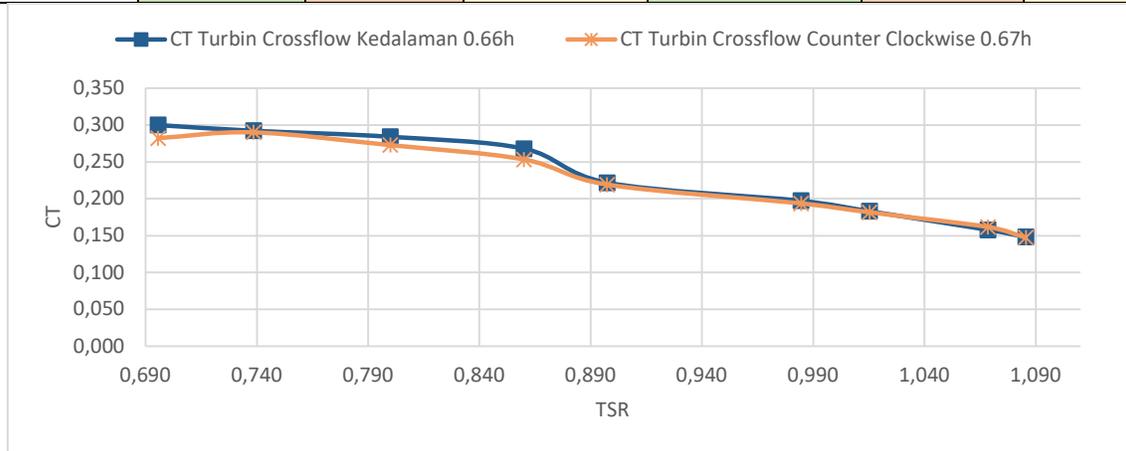
Gambar 4.23 Grafik Perbandingan Rata Rata CT Turbin Crossflow Counter Clockwise Variasi Jarak Rendaman Kedalaman 0.5h



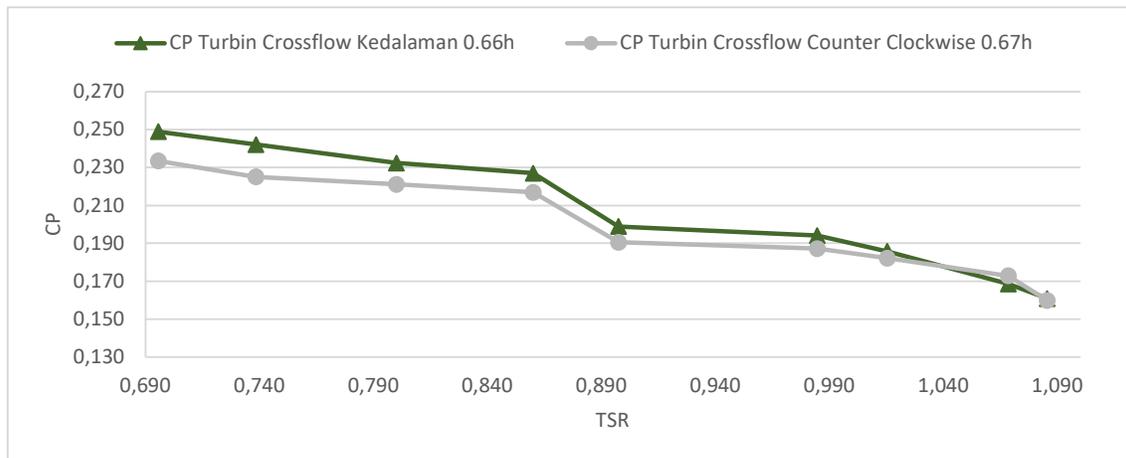
Gambar 4.24 Grafik Perbandingan Rata Rata CP Turbin Crossflow Counter-clockwise Variasi Jarak Rendaman 0.5h

Tabel 4.10 Perbandingan Performa CT Turbin Crossflow Variasi Arah Putar Turbin Terhadap Variasi Jarak Rendaman

TSR	CT Turbin Crossflow Kedalaman 0.66h	CT Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.67h	Selisih	CP Turbin Crossflow Kedalaman 0.66h	CP Turbin Crossflow Counter Clockwise 0.67h	Selisih
0,70	0,300	0,282	6%	0,249	0,233	6%
0,74	0,292	0,290	1%	0,242	0,225	7%
0,80	0,284	0,273	4%	0,232	0,221	5%
0,86	0,268	0,253	6%	0,227	0,217	4%
0,90	0,222	0,219	1%	0,199	0,191	4%
0,98	0,197	0,194	2%	0,194	0,187	4%
1,02	0,183	0,181	1%	0,186	0,182	2%
1,07	0,158	0,162	3%	0,169	0,173	3%
1,09	0,148	0,147	1%	0,161	0,160	1%



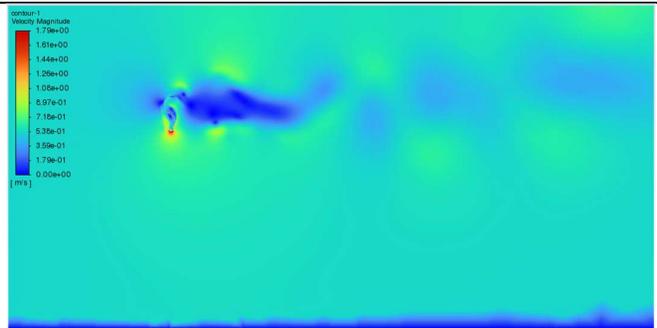
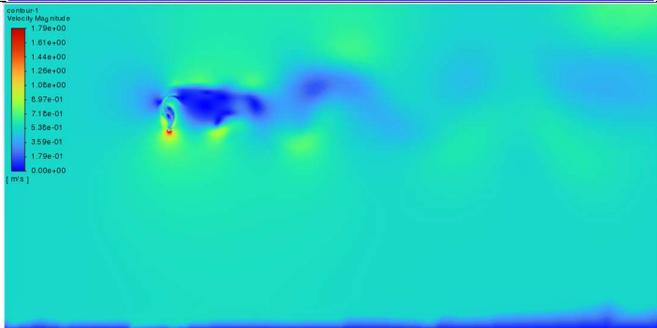
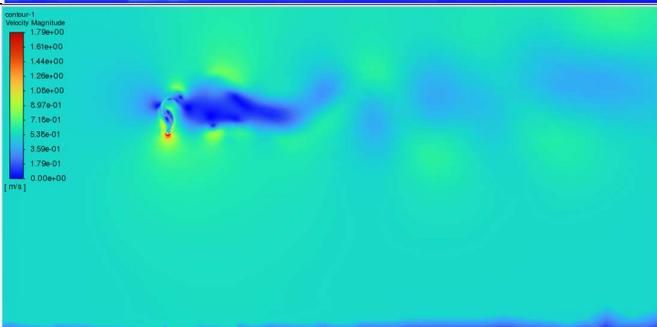
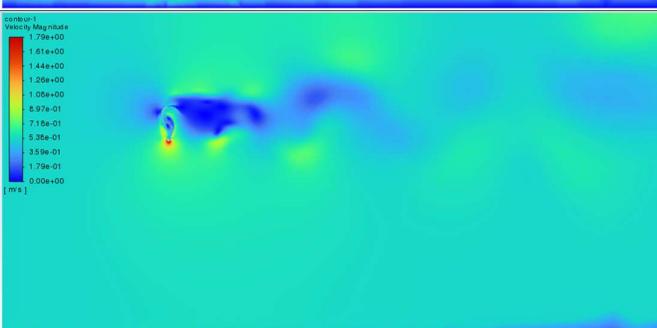
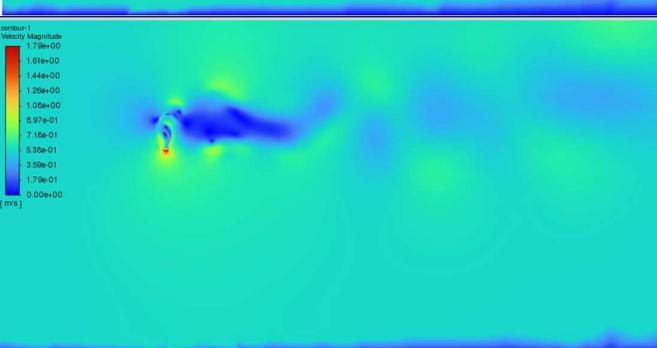
Gambar 4.25 Grafik Perbandingan Rata Rata CT Turbin Crossflow Counter Clockwise Variasi Jarak Rendaman Kedalaman 0.66h



Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Rata Rata CP Turbin Crossflow Counter-clockwise Variasi Jarak Rendaman 0.66h

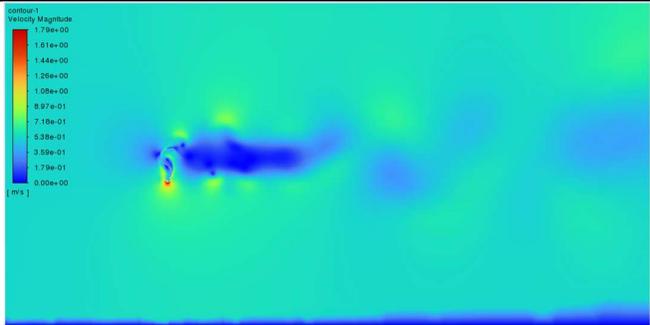
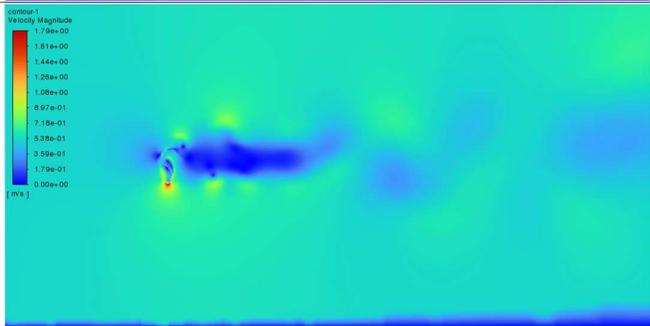
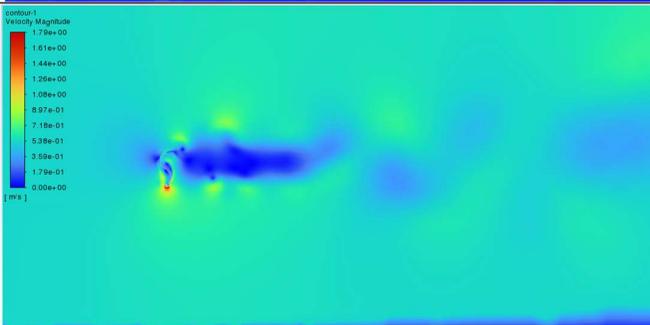
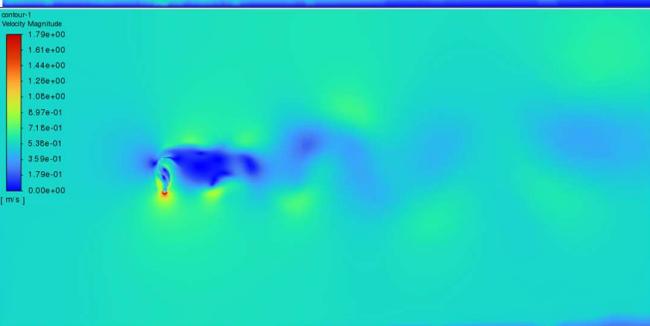
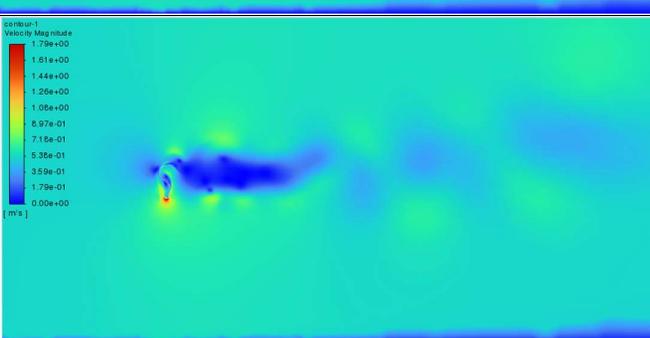
Hasil simulasi numerik turbin *crossflow* dengan variasi arah putar turbin dapat dilihat pada table 4.7,4.8&4.9 dan grafik pada gambar 4.21-4.26. Terlihat bahwa pada kedalaman 0.33h memiliki nilai CT dan CP yang relative lebih tinggi dibandingkan jika diletakan ditengah perairan, kemudian pada kedalaman 0.33h, turbin memiliki nilai CT dan CP yang konstan dan lebih tinggi dibandingkan ketiga kedalaman. Secara garis besar, turbin dengan konfigurasi *crossflow* rata-rata menghasilkan CT paling besar apabila diletakan di dekat permukaan perairan.

Tabel 4.11 Tabel Contour Turbin Crossflow dengan Arah Putar Counter-flow Tiap TSR Pada Kedalaman 0.33h

TSR	Contour
0.8974	
0.9846	
1.0154	
1.0684	
1.0855	

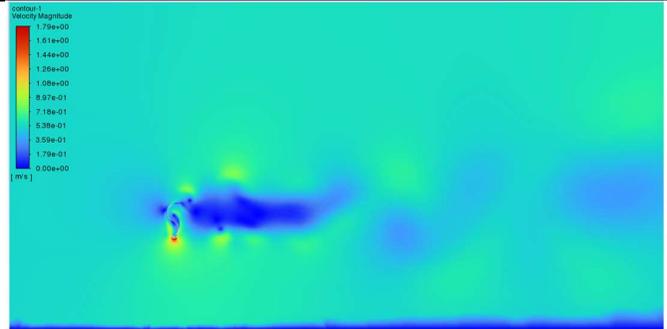
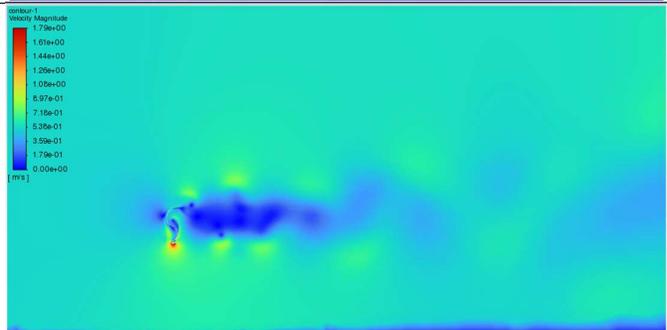
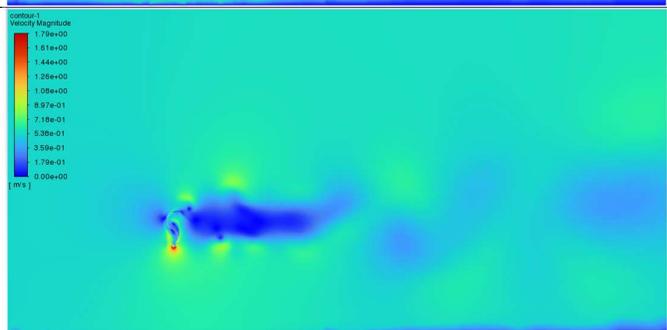
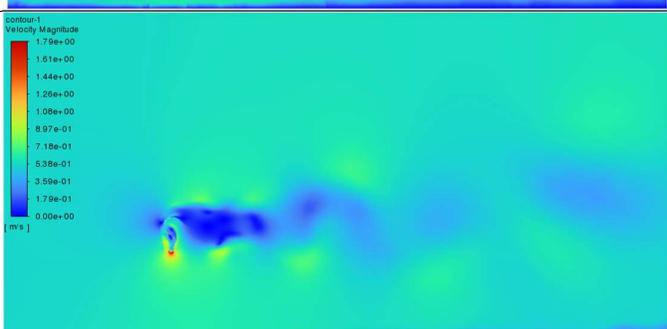
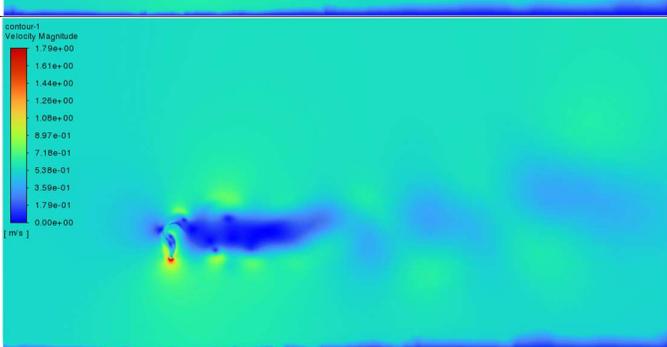
Kedalaman 0.33h

Tabel 4.12 Tabel Contour Turbin Crossflow dengan Arah Putar Counter-flow Pada Tiap TSR Pada Kedalaman 0.5h

TSR	Contour
0.8974	
0.9846	
1.0154	
1.0684	
1.0855	

Kedalaman 0.5h

Tabel 4.13 Tabel Contour Turbin Crossflow dengan Arah Putar Counter-flow Pada Tiap TSR Pada Kedalaman 0.66h

TSR	Contour
0.8974	
0.9846	
1.0154	
1.0684	
1.0855	

Kedalaman 0.66h

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

- b. Pada variasi jarak rendaman, didapatkan bahwa pengaturan jarak rendaman turbin sebesar 0.66h menghasilkan performa lebih baik daripada diletakan di tengah perairan. Peningkatan performa pada variasi jarak rendaman 0.66h adalah sebesar 6%
- c. Pada variasi arah putar turbin menjadi counter clockwise, didapatkan bahwa pengaturan jarak rendaman turbin sebesar 0.33h menghasilkan performa lebih baik daripada diletakan di dekat dasar perairan seperti pada variasi jarak rendaman tanpa diubah arah putarnya. Peningkatan performa pada variasi arah putar turbin counter-clockwise pada kedalaman 0.33h adalah 10%,

5.2 Saran

Dari penelitian yang dilakukan, masih banyak yang dapat dikembangkan lagi untuk topik – topik berikutnya. Pengembangan pada variasi jumlah bilah pada turbin crossflow, penambahan deflector pada turbin, dan pengaruh variasi susunan beberapa turbin.

DAFTAR PUSTAKA

- Awalia, W.R. 2014. *Studi Konsep Pemanfaatan Arus Laut di Selat Lalang Sebagai Sumber Energi Terbarukan untuk FSO Ladinda*. Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Basumatary, M., Biswas, A., 2016. "Numerical simulation of two-bladed Savonius water turbine with deflector" *Int. J. Renewable Energy Technology*, Vol. 7, No. 4, 2016
- Busaeri. 2011. Aspek Penting dalam Pengembangan Teknologi Energi Kelautan (Ocean Energy Device). <http://oceanenergydevelopment.blogspot.com/-2011/03/teknologi-pengembangan-energi-kelautan.html>.
- Bourget, S., Tremblay, O.G., Dumas,G. 2018 "Hydrokinetic turbine array modeling for performance analysis and deployment optimization" NRC Research Press
- Guring, R.O.S. 1995. *Studi Teknis Pemanfaatan Arus Laut Sebagai Sumber Energi Alternatif*. Departemen Teknik Permesinan Kapal. Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Khan, M.J, G. Bhuyan, M.T. Iqbal, & J.E. Quaicoe. 2009. 'Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review', *Applied Energy*, vol. 86, issue 10, pp. 1823-1835
- Maldar, R.N., Ng, C.Y., Oguz, E. 2020 "A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications" *Energy Conversion and Management* 226 (2020) 113495
- Mukhtasor, 2011, "Strategi Pengembangan Energi Laut di Indonesia", ASELI, Jakarta.
- Myers, L.E. and A. S. Bahaj. 2010. "Experimental analysis of the flow field around horizontal axis tidal turbines by use of scale mesh disk rotor simulators". *Ocean Engineering*, 37:218-227.
- Pond, S., and Pickard, G. (1983). *Introductory dynamical Oceanography*; Second edition. New York: Pergamon Press.
- Satrio, Dendy, I Ketut Aria Pria Utama, and Mukhtasor. 2016. "Vertical Axis Tidal Current Turbine: Advantages and Challenges Review." In *Proceeding of Ocean, Mechanical and Aerospace -Science and Engineering-*.
- Sugito, L.B. 2017. *Studi Arus Laut pada Selat Alas untuk Pemetaan Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut*. Departemen Teknik Kelautan. Fakultas Teknologi Kelautan. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sun, X. et al., 2020. "Effects of blade shape and its corresponding moment of inertia on self-starting and power extraction performance of the novel bowl-shaped floating straight-bladed vertical axis wind turbine". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*.
- Talukdar, Kulkarni, and Saha, 2020. "Performance estimation of Savonius wind and Savonius hydrokinetic turbines under identical power input" *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10, 064704 (2018)
- Theoyana, T.A., Purwanto. Pranowo, W.A. 2015. *Potensi Energi Arus Laut pada Berbagai Kedalaman untuk Pembangkit Listrik di Selat Badung, Bali*. Universitas Diponegoro.
- Tremblay, O. G., G. Dumas, 2020. "Two-way interaction between river and deployed cross-flow hydrokinetic turbines". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. 1995. "An Introduction to Computational Fluid Dynamics" *The Finite Volume Method*. Essex: Longman Scientific & Technical.
- Wang, S.Q, Y. Zhang, Y.Y. Xie, G. Xu, K. Liu, & Y. Zheng. 2020. "Hydrodynamic Analysis of Horizontal Axis Tidal Current Turbine under the Wave-Current Condition". *Journal of Marine Science and Engineering*.

Yuningsih, A., Masduki, A. 2011. *Potensi Energi Arus Laut untuk Pembangkit Tenaga Listrik di Kawasan Pesisir Flores Timur, NTT*. Jurnal Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan.