SKRIPSI – ME 184834

STUDI PENGARUH PENERAPAN TIP RAKE TERHADAP PERFORMA TURBIN TWISTED BLADE SAVONIUS MENGGUNAKAN METODE COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS

Muhammad Taufiq Fathurrahman
NRP. 04211640000028

Dosen Pembimbing
Ir. Irfan Syarief Arief, S.T., M.T.
Achmad Baidowi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

SKRIPSI – 184834

STUDI PENGARUH PENERAPAN *TIP RAKE* TERHADAP PERFORMA TURBIN *TWISTED BLADE* SAVONIUS MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

STUDY OF TIP RAKE APPLICATION EFFECT TOWARDS TWISTED BLADE SAVONIUS HYDROTURBINE PERFORMANCE USING COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS APPROACH

MUHAMMAD TAUFIQ FATHURRAHMAN
NRP. 04211640000030

DOSEN PEMBIMBING
Irfan Syarif Arief, S.T., M.T.
Achmad Baidowi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH PENERAPAN *TIP RAKE* TERHADAP PERFORMA TURBIN *TWISTED BLADE* SAVONIUS MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar sarjana teknik pada:

Bidang studi *Marine Manufacturing and Design* (MMD)

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Disusun oleh :

MUHAMMAD TAUFIQ FATHURRAHMAN

04211640000030

Mengetahui/menyetujui

Dosen Pembiming

1. Irfan Syarif Arief, S.T., M.T.
   NIP. 1969 1225 1997 02 1001 .....

2. Achmad Baidowi, ST., MT.
   NIP: .....

Surabaya, Juli 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI PENGARUH PENERAPAN TIPE *RAKE* TERHADAP PERFORMA TURBIN *TWISTED BLADE* SAVONIOUS MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi *Marine Manufacturing and Design (MMD)*

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Penulis:

Muhammad Taufiq Fathurrahman

NRP. 04211640000030

Disetujui Oleh,

Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 197903192008011008

SURABAYA

AGUSTUS, 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGARUH PENERAPAN *TIP RAKE* TERHADAP PERFORMA TURBIN *TWISTED BLADE* SAVONIUS MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama mahasiswa : Muhammad Taufiq Fathurrahman
NRP : 04211640000030
Pembimbing : 1. Irfan Syarif Arief, S.T., M.T.
2. Achmad Baidowi, ST., MT.

ABSTRAK

Pada tahun 2018, nilai rata-rata rasio elektrifikasi berada di angka 90% pada sebuah provinsi di Indonesia, dan ditargetkan mencapai 97% pada tahun 2019. Namun, masih ada provinsi di Indonesia bagian timur dengan rasio elektrifikasi di bawah 75%. Selain permasalahan di tingkat provinsi, elektrifikasi wilayah 3T masih sulit untuk diwujudkan. Terlepas dari permasalahan yang ada, berdasarkan data dari ASELI, potensi pemanfaatan sumber daya laut sebagai energi listrik di Indonesia mencapai 727.000 MW. Dari besarnya potensi tersebut, pemanfaatan energi arus laut memiliki prospek yang baik. Riset potensi energi arus laut juga dimiliki di beberapa wilayah 3T, salah satunya adalah Desa Sabangmawang. Dua selat kecil di sana memiliki potensi kecepatan arus laut mulai dari 0.2 hingga 0.9 m/s. Berdasarkan data di atas, maka penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut merupakan solusi yang tepat. Berdasarkan data tersebut, jenis turbin yang digunakan pada pembangkit adalah Turbin Savonius, dengan karekteristrik yang cocok untuk arus berkecepatan rendah dan putaran tidak tergantung arah arus. Namun, Turbin Savonius memiliki kelemahan berupa efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan Turbin Darrieus. Salah satu metode yang diteliti menerapkan *Twisted Blade* pada Savonius, dimana hasil penelitian menunjukkan peningkatan pada efisiensi dan kemampuan *self starting* tertinggi pada sudut *twist* 45^0. Dengan tujuan meningkatkan efisiensi lebih jauh lagi, maka tip rake diterapkan pada model Turbin SavoniusHasil simulasi CFD yang dilakukan menggunakan Fine Marine menunjukkan bahwa penerapan sudut *tip rake* 0^0 dan 5^0 menyebabkan penurunan nilai *Coefficient of Performance* (Cp) dan penurunan nilai *Coefficient of Torque* (Ct), yang mana menunjukkan turunnya performa turbin. Maka, nilai Cp tertinggi diraih pada model turbin dengan *tip rake* 0^0 dengan kecepatan aliran 0.56 m/s (0,057), dan nilai Cp terendah berada pada model turbin dengan *tip rake* 5^0 dengan kecepatan aliran 0,34 m/s (0,015). Sedangkan, nilai Ct tertinggi berada pada model turbin dengan *tip rake* 0^0 dengan kecepatan aliran 0.56 m/s (0,021), dan nilai Ct terendah berada pada model turbin dengan *tip rake* 5^0 dengan kecepatan aliran 0,9 m/s (0,008).

Kata Kunci : *coefficient of performance, coefficient of torque* , rasio elektrifikasi, *tip rake,* turbin savonius

Halaman ini sengaja dikosongkan

STUDI PENGARUH PENERAPAN *TIP RAKE* TERHADAP PERFORMA TURBIN *TWISTED BLADE SAVONIUS* MENGGUNAKAN METODE *CO MPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama of Student	**: Muhammad Taufiq Fathurrahman**
NRP	**: 04211640000030**
Department	**: Departement of Marine Engineering ITS**
Supervisor 1	**: Irfan Syarif Arief, S.T., M.T.**
Supervisor 2	**: Achmad Baidowi, S.T., M.T.**

ABSTRACT

In 2018, the average amount of electrification ratio are stated in 90% in almost every province, which is aimed to reach 97% in 2019. However, there are several province in East Indonesia that still has electrification ratio below 75%. Beside the problem in regional level, the electrification in underdeveloped area (3T area) were still difficult to be manifested. Apart from the electrification constrains, Indonesia has a promising potency of renewable energy, which is based from ASELI, the potency of sea resource exploitation as electrical energy reaching 727.000 MW. From that big potency, ocean energy extraction has a great prospect. Lated journal and research showed that ocean energy also existed in underdeveloped area, and the one of it was Sabangmawang Village. Two small strait in that area has potency of sea current speed from 0.2 – 0.9 m/s. Based on the data above, the application of renewable sea current power plant is the exact solution. Also based on the data, the turbine applied as power plant is Savonius Turbine, with it's character that suitable for low current speed and the rotation undepend to current direction. As the payoff, Savonus Turbine has disadvantages due to lower efficentcy compared to Darrieus Turbine. To overcome this, several research conducted and one of them is applying twisted blade in Savonius Turbine, with result of increasement in best efficientcy and best self starting capability in 45^0 angle twist. The CFD result conducted using Fine Marine showed the application of *tip rake* 0^0 and 5^0 angle caused decreased value of *Coefficient of Performance* (Cp) and decreased value of *Coefficient of Torque* (Ct), which means the turbine performance is decrease. Highest value of Cp reached by turbine appling 0^0 *tip rake* with current speed of 0.56 m/s (0,058) , and lowest value of Cp reached by turbine applying *tip rake* 5^0 with current speed of 0.34 m/s (0,015). While the highest value of Ct reached by turbine applying 0^0 *tip rake* with current speed of 0.56 m/s (0,021), and lowest value of Ct reached by turbine applying *tip rake* 5^0 with current speed of 0,9 m/s (0,008).

Keywords : coefficient of performance, coefficient of torque , electrification ratio, tip rake, savonius turbine

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **Studi Pengaruh Penerapan *Tip Rake* Terhadap Performa Turbin *Twisted Blade* Savonius Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics*** Tugas akhir ini merupakan bagian dari kurikulum dan syarat kelulusan untuk kelulusan program studi sarjana Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, yang harus ditempuh oleh mahasiswa. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengaplkasikan dan mengembangkan pengetahuan yang didapatkan selama perkuliahan. Penulisan laporan tugas akhir ini didasarkan pada simulasi serta didukung oleh teori, literatur, dan bimbingan dosen yang ada di Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS.

Dengan terselesaikannya laporan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Almarhum Heddy Sukandi, S. H. selaku ayah kami, yang di penghujung hayatnya mengizinkan saya berkuliah di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, yang kehangatan dan kasih sayangnya masih terasa walaupun sudah tiada.
2. Henny Ismawati, ibunda penulis yang mana dukungan dan doanya tidak pernah putus sama sekali selama penulis melaksanakan studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan - ITS.
3. Ira Nazwa Fazzira, adik penulis yang mau jadi *engineer* juga yaitu di jurusan Teknik Sipil, namun belum tau kerasnya dunia teknik.
4. Bapak Irfan Syarif Arief, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing penulis dalam menyelesaikan tugas akhir dan memberikan motivasi untuk terus belajar dan mengembangkan diri.Terima kasih Pak lisensi Team Viewernya.
5. Bapak Achmad Baidowi, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing kedua yang telah membimbing dan selalu tabah menghadapi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir, memberikan motivasi, dan pelajaran baik akademik dan non akademik berupa karakter, etika, sikap maupun tata cara pengerjaan skripsi dengan baik.
6. Bapak Bapak Beny Cahyono, S.T., M.T., Ph. D. selaku dosen wali yang telah banyak memberikan bimbingan dan pendidikan baik akademik maupun non akademik sehingga kami sebagai mahasiswa wali dapat belajar bekerja keras, pantang menyerah, kritis, dan bekerja sama.
7. Mas Rizqi Mubarok dan Mas Bagas Bimantoro, duet maut yang memiliki visi dan *passion* penulis, sehingga kami membuat tim yang solid di ajang lomba karya tulis ilmiah, serta pelajaran kuliah dan kehidupan di DTSP.

8. Danar Adi Irfanto, Muchammad Rifki Abdillah, Fitricia Putri R., M. Triantoro, dan Wahid Fajar Sidik, yang telah banyak membantu penulis mengembangkan iklim keilmiahan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
9. Joshua Jonathan A. S., Pius Anggara B., Gita Surya Yahya, Reyhan Ibrahim, Renaldy Febian, dan Nina Khoirunnisa selaku teman satu kontrakan penulis di KTT- BME sekaligus teman seperjuangan penulis berkuliah di Departemen Teknik Sistem Perkapalan.
10. Anson Novendra Pradana, yang mendapat pengakuan *master* CFD dari penulis, yang membantu penulis menyelesaikan kendala pada *Software* Numeca.
11. Kepada Seluruh Pejuang Tugas Akhir Lab MMD, kita semua tahu susahnya *running* seperti apa.
12. Pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas segala bantuannya sehingga laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan.
13. Komputer MMD yang saya *tuning* jadi kencang dan buat *running*.

Terlepas dari itu semua, penulis menyadari bahwa terdapat banyak kekurangan dalam penulisan dan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga laporan ini dapat bermanfaat sebagai wacana bagi mahasiswa di Departemen Teknik Sistem Perkapalan – ITS.

Surabaya, 17 Januari 2020

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN iii
LEMBAR PENGESAHAN v
ABSTRAK vii
DAFTAR ISI xiii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL xxvii
BAB 1 PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan 4
1.4 Batasan Masalah 4
1.5 Konstribusi 4
1.6 Keterbaharuan 5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA 9
2.1 State of The Art 9
2.2 Arus Laut 20
2.3 *Current Rose* 21
2.4 Potensi Energi Arus Laut Desa Sabangmawang 22
2.5 Pembangkit Listrik *Tenaga Arus Laut* 23
2.6 Turbin Hidrokinetik (Turbin Arus) 24
2.6.1 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik 24
2.6.2 Kalkulasi Daya yang Dihasilkan Oleh Turbin Hidrokinetik 26
2.7 Gaya *lift* dan Gaya *Drag* Pada Turbin Hidrokinetik 27
2.7.1 Tegangan Geser, Tekanan, Gaya *Lift* dan *Drag* 27
2.7.2 Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift* 29
2.7.3 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Gaya *Drag* dan *Lift* 30
2.8 Turbin Savonius 32
2.8.1 Sejarah Turbin Savonius 32
2.8.2 Model Turbin Savonius 33
2.8.3 Parameter Performa Turbin Savonius 34

2.8.4 Parameter Dimensional Turbin Savoius 36
2.9 Turbin Savonius Tipe *Twisted Blade* 38
2.10 *Tip Raked Propeller* 41
2.10.1 *Propeller* CLT 42
2.10.2 *Propeller* Kappel 43
2.10.3 Sudut *Tip Rake* 44
2.10.4 Perbandingan Performa *Propeller Tip Rake* dengan *Propeller* Konvensional 44
2.11 *Permanent Magnet Generator* 46
2.12 Metode Elemen Hingga 46
2.13 Prosedur Simulasi *Finite Element Method* 47
2.13.1 *Marine Computational Fluid Dnamics (CFD)* 48
2.14 Perangkat Lunak Yang Digunakan Dalam Penelitian 48
2.14.1 NUMECA FINE MARINE 48
BAB 3 METODE PENELITIAN 51
3.1 Diagram Alur Penelitian 51
3.2 Prosedur Penelitian 52
3.2.1 Studi Literatur 52
3.2.2 Perumusan Masalah 52
3.2.3 Pengumpulan Data Eksis 53
3.2.4 Verifikasi Dimensi dan Jumlah *Cell* 54
3.2.5 Pembuatan Model 3 Dimensi dari Turbin Savoniu *Twisted Blade*, dan *Twisted Blade* dengan *Tip Rake* 56
3.2.6 Simulasi CFD Menggunakan NUMECA Pada Seluruh Variasi Model Turbin 57
3.2.7 Analisa Data Perhitungan Efisiensi Dan Daya Yang Dihasilkan Berdasarkan Data Hasil Simulasi 58
3.2.8 Kesimpulan dan Saran 59
BAB 4 ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN 63
4.1 Data Kecepatan Arus Laut Yang Digunakan Pada Simulasi CFD 63
4.2 Proses Verifikasi 64
4.2.1 Verifikasi Dimensi Turbin 64
4.2.2 Verifikasi Hasil Penelitian Omar Yaakob dan Jumlah Cell Yang Digunakan Saat *Running* 64

4.3 *Preliminary Design* 65
4.3.1 Jumlah *Blade* Turbin 65
4.3.2 Dimensi Turbin Savonius 66
4.3.3 Material Turbin 66
4.3.4 Analisa *Center of Gravity* Turbin 70
4.3.5 Variasi Sudut Tip Rake 72
4.4 Model 3D Turbin Savonius yang Dibuat Menggunakan Solidworks 74
4.5 Proses Pembuatan Domain Komputasi 72
4.6 Proses *Meshing* Pada Model Turbin 74
4.6.1 Tahapan *Initial Mesh* 76
4.6.2 Tahapan *Adapt To Geometry* 77
4.6.3 *Snap To Geometry* 79
4.6.4 *Optimize* 79
4.6.5 *Viscous Layer* 80
4.6.6 Pengaturan *Boundary Condition* Pada *Software* HEXPRESS ™ ". 82
4.6.7 Pengecekan Kualitas *Meshing* 84
4.7 Proses *Running* Menggunakan Solver Numeca 85
4.7.1 Pengaturan *General Parameter* 85
4.7.2 Pengaturan *Fluid Model* 85
4.7.3 Pengaturan *Flow Model* 86
4.7.4 Pengaturan *Boundary Condition* 86
4.7.5 Pengaturan *Body Definition* 88
4.7.6 Pengaturan *Body Motion* 88
4.7.7 Pengaturan *Mesh Management* 91
4.7.8 Initial Solution 92
4.7.9 Pengaturan *Control Variables* 93
4.7.10 Pengaturan *Output Parameter* 94
4.7.11 *Task Manager* 95
4.8 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran pada Setiap Model dan Variasi Menggunakan 2000 *Time Step* 97
4.8.1 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Omar Y. (*Helical* 180^0) .. 97
4.8.2 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 98

4.8.3 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 99
4.8.4 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 100
4.8.5 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 101
4.8.6 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 102
4.8.7 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 103
4.8.8 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 104
4.8.9 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 105
4.8.10 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 106
4.9 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran pada Setiap Model dan Variasi Menggunakan 250 *Time Step* dan *Time Value* Dipercepat 10 kali 110
4.9.1 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Omar Y. (*Helical* 180^0) 111
4.9.2 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 111
4.9.3 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 112
4.9.4 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 113
4.9.5 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 113
4.9.6 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 114
4.9.7 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 114
4.9.8 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s 115
4.9.9 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s 116
4.9.10 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s 116

4.10 Analisa Hasil Simulasi 119
4.10.1 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 119
4.10.2 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 123
4.10.3 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 125
4.10.4 Grafik Perbandingan Performa Keseluruhan Model Variasi Turbin 127
4.10.5 Investigasi Terhadap Proses Verifikasi Hasil Simulasi Model Turbin Omar Yaakob 130
4.10.6 Analisa Penurunan Performa Turbin Savonius Dengan Penerapan *Tip Rake* 137
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN 149
5.1 Kesimpulan 149
5.2 Saran 150
DAFTAR PUSTAKA 155
LAMPIRAN – LAMPIRAN 161
LAMPIRAN A. Tabulasi Hasil Simulasi 161
LAMPIRAN B. Tampilan CF View Seluruh Model Turbin 162
B.1 Tampilan CF View Model Turbin Omar Yaakob *(Helical* 180^0*)* 162
B.2 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 0^0 166
B.3 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 5^0 170
B.4 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 10^0 174

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Data *Current Rose* Penelitian Selat di Desa Sabangmawang 2
Gambar 2.1 Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp Turbin Angin Sebagai Fungsi Terhadap *Tip Speed Ratio* 10
Gambar 2.2. Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp antara *dua blade* dengan *tiga blade* terhadap *Tip Speed Ratio* 12
Gambar 2.3. Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp, Nilai Ct, pada Aspect Ratio Yang Sama Antara Turbin *Single Stage, Two Stage,* Dan *Three Stage.* 13
Gambar 2.4 Tabel Performa Turbin Savonius Pada Berbagai Variasipa 14
Gambar 2.5 Perbandingan Performa Turbin Savonius Konvensional dengan *Tapered Blade* 15
Gambar 2.6 Contoh Plot *Current Rose* 21
Gambar 2.7. Lokasi Stasiun Penelitian Selat Lampa 22
Gambar 2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut Terapung 24
Gambar 2.9 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik 24
Gambar 2.10 Jenis pemasangan turbin sumbu horizontal 25
Gambar 2.11 Jenis Turbin Sumbu Vertikal 25
Gambar 2.12 Gaya-gaya dari fluida yang bekerja di sekeliling benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*) 28
Gambar 2.13 Gaya Tekanan Dan Gaya Geser Pada Sebuah Elemen Kecil Dari Permukaan Sebuah Benda 28
Gambar 2.14 Gaya *Drag* pada *Turbin Savonius* 31
Gambar 2.15 *Gaya* lift *pada Turbin Lift Device* 31
Gambar 2.16 Tampak atas Dan Tampak Depan Turbin Savonius 33
Gambar 2.17 Kurva Koefisien Daya Cp Terhadap *Tip Speed Ratio* Dari Tubin Sumbu Vertikal 35
Gambar 2.18 Gambar Savonius rotor : (a) Tampak depan (*Single Step*), (b) Tampak atas dari turbin Savonius kovensional (tanpa *shaft*), (c) Tampak atas dengan *shaft*. (d) Turbin Savonius *two step*. 37
Gambar 2.19 Tampak atas dan samping bentuk turbin dengan sudut putaran berbeda (garis tebal: garis kontak pelat atas dan garis putus: pelat bawah. 40
Gambar 2.20 Bentuk *Winglet* Pesawat Terbang 41
Gambar 2.21 *Propeller* FP CLT 5 *Blade* yang Dipasang pada Kapal Kontainer 43
Gambar 2.22 *Propeller Kapple* Yang dipasang Pada Kapal 44
Gambar 2.23 Perbandingan Grafik KT, 10KQ, J antara Kappel *propeller* dan *propeller* Konvensional 45
Gambar 2.24 Perbandingan Grafik KT, antara Kappel *propeller* dan *propeller* Konvensional 45
Gambar 2.25 Jenis generator yang paling sering diaplikasikan pada turbin. 46
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir 52
Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Verifikasi Tugas Akhir 54
Gambar 3.3 Diagram Pembuatan Model 3D 56

Gambar 3.4 Perbandingan Model 3 Dimensi dari Turbin Savonius Konvensional (Atas) dan *Twisted Blade* (Bawah) 45^0 57
Gambar 4.1 Turbin Savonius 2 *Blade* Yang Dianalisa Oleh Omar Yaakob..... 64
Gambar 4.2 Turbin Savonius 2 *Blade* Yang Dianalisa Oleh Omar Yaakob..... 66
Gambar 4.3 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Omar Yaakob (Helical 180) Yang Akan Dianalisa 66
Gambar 4.4 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 Yang Akan Dianalisa 67
Gambar 4.5 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 Yang Akan Dianalisa 67
Gambar 4.6 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 Yang Akan Dianalisa 68
Gambar 4.7 Material *C-Fibre Glass* Pada Turbin Helical 180 68
Gambar 4.8 Material *C-Fibre Glass* Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 69
Gambar 4.9 Material C-Fibre Glass Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 69
Gambar 4.10 Material C-Fibre Glass Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 . 69
Gambar 4.11 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius Omar Yaakob (Helical 180) 70
Gambar 4.12 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 71
Gambar 4.13 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 71
Gambar 4.14 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 10^0 72
Gambar 4.15 Savonius *Twisted Blade* 180^0 Omar Yaakob 75
Gambar 4.16 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 0^0 75
Gambar 4.17 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 5^0 75
Gambar 4.18 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 10^0 75
Gambar 4.19 Ukuran minimum Domain, dinyatakan dalam diameter turb**in** 73
Gambar 4.20 Ukuran Domain Komputasi simulasi, dinyatakan dalam meter. ... 73
Gambar 4.21 Ukuran Domain Komputasi simulasi, dinyatakan dalam meter. ... 73
Gambar 4.22 Domain Simulasi turbin pada *software* HEXPRESS ™ " 74
Gambar 4.23 Domain Simulasi turbin pada *software* HEXPRESS ™ " 76
Gambar 4.24 Pengaturan *Global Refinement* HEXPRESS ™ " 77
Gambar 4.25 Pengaturan *Curve Refinement* HEXPRESS ™ " 77
Gambar 4.26 Pengaturan *Surface Refinement* HEXPRESS ™ " 78
Gambar 4.27 Pengaturan *Box Refinement* HEXPRESS ™ " 78
Gambar 4.28 Pengaturan *Snap to Geometry* HEXPRESS ™ " 79
Gambar 4.29 Perbangingan Bentuk *Cell* (1) Normal *Cell*, (2) *Twisted Cell*, (3) *Concave (Neg. Volume) Cell*, (4) *Contrary Convex cell* 80
Gambar 4.30 Pengaturan *Optimize* HEXPRESS ™ " 80
Gambar 4.31 Pengaturan *Computed First Layer Thickness* 81
Gambar 4.32 Pengaturan *Viscous Layer* di HEXPRESS ™ " 81
Gambar 4.33 Perbandingan Hasil *Mesh* pada HEXPRESS ™ " 82

Gambar 4.34 Pengaturan *Boundary Condition* di HEXPRESS ™ "..... 83
Gambar 4.35 Fitur *Mesh Quality* di HEXPRESS ™ " 84
Gambar 4.36 Pengecekan *Negative Cell, Concave Cell,* dan *Twisted Cell*..... 84
Gambar 4.37 Pengaturan *General Parameter* pada FINE MARINE..... 85
Gambar 4.38 Pengaturan *Fluid Model* pada FINE MARINE 85
Gambar 4.39 Pengaturan *Fluid Model* pada FINE MARINE 86
Gambar 4.40 Pengaturan *Boundary Condition Inlet* pada FINE MARINE 87
Gambar 4.41 Pengaturan *Boundary Condition Outlet* pada FINE MARINE 87
Gambar 4.42 Pengaturan *Body Definition* pada FINE MARINE 88
Gambar 4.43 Pengaturan *Motion Definition* pada *Body Motion*..... 89
Gambar 4.44 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Helical* 180^0.... 89
Gambar 4.45 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 0^0..... 90
Gambar 4.46 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 5^0..... 90
Gambar 4.47 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 10^0... 91
Gambar 4.48 Pilihan *Rigid Motion* pada Pengaturan *Mesh Management*..... 92
Gambar 4.49 Pengaturan *Initial Solution* pada FINE MARINE 93
Gambar 4.50 Pengaturan *Control Variable* pada FINE MARINE 93
Gambar 4.51 Pengaturan *Motion & Variables* pada Pengaturan *Output Parameters* 94
Gambar 4.52 Pengaturan *Probe Variables, Optional Output Variables* dan *Mean Flow Variables* pada Pengaturan *Output Parameters* 95
Gambar 4.53 Tampilan *Task Manager* pada FINE MARINE..... 96
Gambar 4.54 Tampilan *Solver* saat *Running* pada FINE MARINE 96
Gambar 4.55 Tampilan Notifikasi *Running* yang Berhasil pada FINE MARINE 97
Gambar 4.56 Grafik Torsi Model Turbin *Helical* 180^0..... 97
Gambar 4.57 Grafik Putaran Model Turbin *Helical* 180^0 98
Gambar 4.58 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s..... 98
Gambar 4.59 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s.... 99
Gambar 4.60 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s.... 99
Gambar 4.61 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s.. 100
Gambar 4.62 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s 100
Gambar 4.63 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s.... 101
Gambar 4.64 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s..... 101
Gambar 4.65 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s.. 102
Gambar 4.66 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s..... 102
Gambar 4.67 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s.. 103
Gambar 4.68 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s 103
Gambar 4.69 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s.... 104
Gambar 4.70 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s.... 104
Gambar 4.71 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s 105
Gambar 4.72 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s.... 105
Gambar 4.73 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s.... 106
Gambar 4.74 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s.. 106

Gambar 4.75 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s .. 106
Gambar 4.76 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 109
Gambar 4.77 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 109
Gambar 4.78 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 109
Gambar 4.79 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 110
Gambar 4.80 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Helical* 180^0 dengan *Time Step* 250 111
Gambar 4.81 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250 111
Gambar 4.82 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250 112
Gambar 4.83 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250 113
Gambar 4.84 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250 113
Gambar 4.85 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250 114
Gambar 4.86 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250 115
Gambar 4.87 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250 115
Gambar 4.88 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250 116
Gambar 4.89 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250 116
Gambar 4.90 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 122
Gambar 4.91 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 122
Gambar 4.92 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 124
Gambar 4.93 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 124
Gambar 4.94 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 126
Gambar 4.95 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 126
Gambar 4.96 Grafik Cp vs TSR Pada Seluruh Model Turbin 127
Gambar 4.97 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 128
Gambar 4.98 Grafik Cp vs TSR Pada Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 dan 10^0 128
Gambar 4.99 Grafik Ct vs TSR Pada Seluruh Model Turbin 129
Gambar 4.100 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan *Tip Rake* 5^0 dan 10^0 129

Gambar 4.101 Grafik Ct vs TSR Pada Seluruh Model Turbin dengan *Tip Rake* 0^0 130
Gambar 4.102 Grafik Cp vs TSR dan Ct vs TSR Pada Jurnal Omar Yaakob ... 131
Gambar 4.103 Pengukuran Nilai Cp pada Grafik Cp vs TSR Dalam Jurnal Penelitian Omar Yaakob 131
Gambar 4.104 Pengukuran Nilai Ct pada Grafik Ct vs TSR Dalam Jurnal Penelitian Omar Yaakob 132
Gambar 4.105 Setup Eksperimen *Stirred Tank,* Konfigurasi Turbin (Kiri) dan Konfigurasi *Stirred Tank* (Kanan) 133
Gambar 4.106 Grafik TSR vs *Wind Speed* dan Grafik Cp Vs *Wind Speed* pada Penelitian Swapnil 133
Gambar 4.107 Tabel yang Menunjukkan RPM, Cp pada Variasi Turbin, dan Kecepatan Angin yang Digunakan Dalam Penelitian Swapnil 134
Gambar 4.108 Grafik Cp vs TSR dan Grafik Ct Vs TSR pada Penelitian Kamoji 135
Gambar 4.109 Tabel Reynold Number dan Kecepatan Angin Serta Pengaruhnya Terhadap Nilai Cp Maksimum Penelitian Kamoji 136
Gambar 4.110 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 138
Gambar 4.111 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 138
Gambar 4.112 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 138
Gambar 4.113 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 139
Gambar 4.114 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 139
Gambar 4.115 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 139
Gambar 4.116 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 140
Gambar 4.117 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 141
Gambar 4.118 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 141
Gambar 4.119 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 141
Gambar 4.120 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 142
Gambar 4.121 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 142
Gambar 4.122 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 143

Gambar 4.123 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 143
Gambar 4.124 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 144
Gambar 4.125 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 144
Gambar 4.126 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 144
Gambar 4.127 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s 144

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Tabel *State of The Art* Penelitian Turbin Savonius 17
Tabel 3.1 Matriks Perbandingan Pengembangan Turbin Savonius yang Akan Dianalisa..... 55
Tabel 3.2 Simulasi Pada Turbin Savonius *Twisted Blade* 45^0..... 58
Tabel 3.3 Simulasi Pada Turbin Savonius Helical 180^0 Omar Yaakob 58
Tabel 4.1 Jumlah *Cell* Hasil Meshing Pada Seluruh Variasi Model..... 82
Tabel 4.2 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Omar Yaakob (180^0)..... 107
Tabel 4.3 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Dengan Sudut Tip Rake 0^0, 5^0, dan 10^0 107
Tabel 4.4 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Omar Yaakob (180^0)..... 117
Tabel 4.5 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Dengan Sudut Tip Rake 0^0, 5^0, dan 10^0 117
Tabel 4.6 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 0^0 120
Tabel 4.7 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 0^0 121
Tabel 4.8 Tabel *Tip Speed Ratio* Model Turbin *Tip Rake* 0^0 121
Tabel 4.9 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 5^0 123
Tabel 4.10 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 5^0 123
Tabel 4.11 Tabel *Tip Speed Ratio* Model Turbin *Tip Rake* 5^0..... 124
Tabel 4.12 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 10^0 125
Tabel 4.13 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 10^0 125
Tabel 4.14 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 10^0 126
Tabel 4.15 Tabel Hasil Simulasi Model Turbin Omar Yaakob (Helical 180^0) .. 137

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

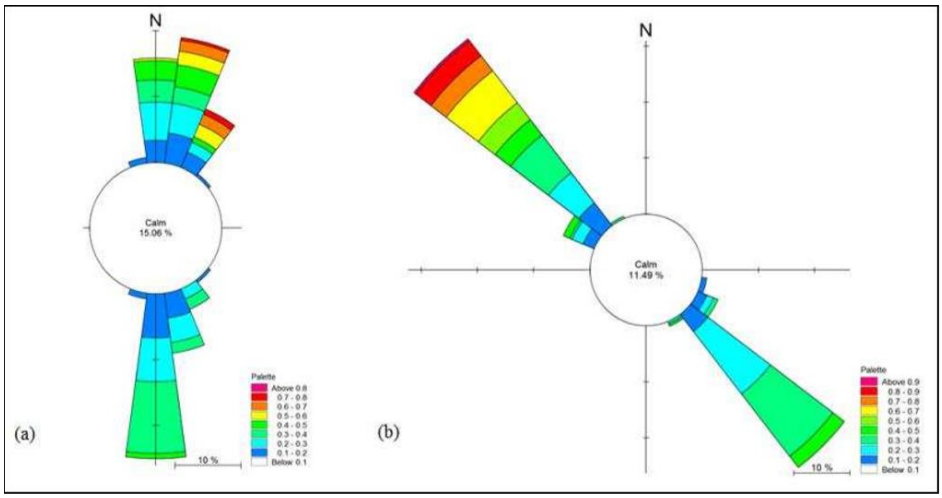
BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nilai rata-rata rasio elektrifikasi sebuah provinsi di Indonesia pada tahun 2018 pada angka diatas 90%, dan ditargetkan berada pada angka 97% pada akhir tahun 2019 [1]. Namun, dari sekian banyak provinsi di Indonesia yang rasio elektrifikasinya tinggi, masih terdapat provinsi di Indonesia bagian timur dengan rasio elektrifikasi yang rendah, yaitu di bawah 75%, dimana salah satu provinsi yang mengalami hal ini adalah Nusa Tenggara Timur (Rasio elektrifikasi hanya 70%). Selain permasalahan di tingkat provinsi, dalam mewujudkan rasio elektrifikasi yang tinggi, elektrifikasi wilayah pedesaan masih sulit untuk diwujudkan. Hingga tahun 2018 masih terdapat desa yang tidak memiliki akses listrik sama sekali, yaitu sebanyak 2.281 desa [2]. Hal ini terjadi karena kondisi geografis Indonesia yang menantang, dimana desa yang belum terjangkau listrik tersebut berada di daerah tertinggal, terdepan dan terluar (3T) di Indonesia. Sulit dijangkaunnya daerah 3T ini menyebabkan proses perluasan jaringan listrik PLN memerlukan waktu lama membutuhkan biaya besar untuk dilaksanakan. Pada daerah 3T yang sudah memiliki akses listrik, listrik juga belum sepenuhnya dapat dinikmati selama 24 jam (hanya beberapa jam) dan tegangan listrik yang rendah banyak dialami oleh masyarakat di daerah tersebut [3]. Listrik yang hanya beberapa jam tersebut pun disuplai oleh PLTD, dimana menggunakan bahan bakar diesel untuk bisa beroperasi. Menurut Wakil Menteri ESDM, Arcandra Tahar, di tahun 2019 saat ini Indonesia memiliki cadangan minyak bumi 3,3 miliyar barel. Dengan asumsi produksi konstan 800.000 per hari tanpa adanya temuan cadangan baru, maka dalam 11 sampai 12 tahun ke depan Indonesia tidak bisa memproduksi minyak bumi lagi.

Di samping itu, potensi energi terbarukan sangat menjanjikan Berdasarkan data dari Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI), potensi teknis pemanfaatan sumber daya laut sebagai energi listrik di Indonesia mencapai 727.000 MW. Dari besarnya potensi tersebut, pemanfaatan energi arus laut memiliki prospek yang baik [4].

Riset dan jurnal menunjukkan bahwa potensi energi arus laut juga dimiliki di beberapa wilayah 3T, dimana salah satunya adalah Desa Sabangmawang, Kecamatan pulau tiga, Kabupaten Natuna, yang dilewati Selat Lampa dan dua selat kecil yang diapit oleh Pulau Lagong, Pulau Sentanau dan Pulau Setahi.



Gambar 1.1 Data *Current Rose* Penelitian Selat di Desa Sabangmawang

Sumber : Sutopo, 2015

Penelitian dilakukan pada tahun 2015 di kedua selat kecil ini (dalam bentuk dua stasiun pengamatan). Data hasil pengamatan di sana adalah sebagai berikut. Hasil pengukuran pada stasiun satu menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,7387 m/s pada arah 20^0 (U-TL) , minimum 0,001 m/s pada arah 90^0 (T), dan kecepatan rata – rata arus 0,268401 m/s.

Hasil pengukuran pada stasiun dua menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,9065 m/s pada arah 317.2^0 (U-BL), minimum 0,003 m/s pada arah 180 (S), d an kecepatan rata – rata arus 0,33859 m/s [4]

Berdasarkan data di atas, maka penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) merupakan salah satu solusi yang tepat bagi masyarakat yang tinggal di daerah 3T dengan adanya potensi arus laut. Arus yang ada di Desa Sabangmawang termasuk kategori arus berkecepatan rendah. Oleh karena itu, jenis turbin yang tepat untuk diterapkan adalah turbin berjenis Savonius, yang memiliki karekteristrik cocok untuk arus berkecepatan rendah, putaran tidak tergantung arah

arus, memiliki torsi yang bagus, serta perawatan yang murah, karena komponen lebih sedikit dari turbin lain [5].

Karena memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan turbin Darrieus, banyak peneliti yang berusaha untuk terus meningkatkan performa turbin Savonius, yang risetnya masih berlanjut hingga saat ini. Dalam perkembangannya, saat ini terdapat jenis turbin savonius dengan *blade* yang terpilin, yang dikenal sebagai *Twisted Savonius*. Menurut teori, derajat putar blade Turbin Savonius memiliki pengaruh terhadap torsi dan nilai *Coefficient of Performance* turbin [6]. Saha dan Rajkumar (2006) telah menginvestgasi turbin Savonius dengan tiga *blade* dan menggunakan konfigurasi *twisted blades* [7]. Hasil eksperimen menunjukkan adanya peningkatan pada efisiensi dan kemampuan *self* starting, dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional. Sudut putar *blade* untuk performa maksimal juga diperoleh dari eksperimen ini. Maka, dalam penelitian ini tugas akhir ini, digunakan turbin berjenis *Twisted Savonius*.

Turbin Savonius memiliki prinsip kerja berputar karena gaya drag yang dihasilkan dari arus laut. Sedangkan *propeller* bekerja dengan cara diputar untuk menghasilkan *thrust.* Pada pengembangannya, terdapat *propeller* berjenis *tip rake*, dimana melalui penerapan *tip rake*, thrust dan torsi dari *propeller* bisa meningkat [8]. Oleh karena itu, pada tugas ini akhir akan dianalisa penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 0^0, 5^0 dan 10^0 pada turbin *Twisted* Savonius terhadap performa turbin dengan menggunakan metode simulasi *Computational Fluid Dynamics.*

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian yang tercantum pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 0^0, 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius pada variasi sudut rake terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Power* ?
2. Bagaimana pengaruh penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 0^0, 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Torque* ?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui dan memahami pengaruh penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 0^0, 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Power.*
2. Mengetahui dan memahami pengaruh penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 0^0, 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Torque.*

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah didefinisikan supaya lingkup penelitian ini lebih fokus. Penelitian ini memiliki batasan masalah sebagai berikut:

1. Turbin *Twisted Savonius* didefinisikan menggunakan material C-*Class Fiber* .
2. Dimensi yang digunakan pada turbin ini adalah tinggi 1500 mm dan diameter 750 mm dengan Aspect Ratio sama dengan 2.
3. *Blade* turbin *twisted savonius* berjumlah dua yang didefinisikan menurut penelitian sebelumnya sebagai jumlah blade yang paling efisien
4. Variasi kecepatan yang digunakan pada simulasi adalah data kecepatan maksimum, minimum, dan rata-rata berdasarkan jurnal yang meneliti selat di Desa Sabangmawang.
5. Tidak dilakukan kajian dari segi ekonomis.

1.5 Konstribusi

Kontribusi dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagi Masyarakat :

Memberikan solusi elektrifikasi bagi masyarakat yang tinggal di daerah 3T melalui penerapan energi terbarukan dalam bentuk pembangkit listrik tenaga arus laut (PLTAL).

2. Bagi Akademisi :

- Sebagai referensi tentang potensi dan bahan pertimbangan penerapan pembangkit listrik tenaga arus laut pada daerah 3T.

- Sebagai referensi tentang pengaruh derajat putar *blade* dan penerapan *tip rake* terhadap performa (Cp dan Ct) dari turbin *twisted savonius*.
- Memberikan referensi tentang riset dan pengembangan dari bentuk *blade* dari Turbin Savonius.

3. Bagi Pemerintah :

Memberikan solusi alternatif mengatasi sulitnya elektrifikasi di daerah 3T yang ada di Indonesia, dengan konsep energi bersih dari arus laut yang berkelanjutan, serta tidak bergantung pada persediaan maupun harga bahan bakar fossil. Penerapan PLTAL ini juga sekaligus menjawab poin nomor 7 dari *Sustainable Development Goals* 2030, yaitu Energi yang Terjangkau dan Bersih.

1.6 Keterbaharuan

Keterbaharuan dari penelitian ini adalah penerapan *tip rake* pada Turbin Savonius dan analisa pengaruhnya terhadap performa turbin. Belum pernah ada referensi penelitian yang membahas penerapan *tip rake* ini pada Turbin Savonius.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2
KAJIAN PUSTAKA

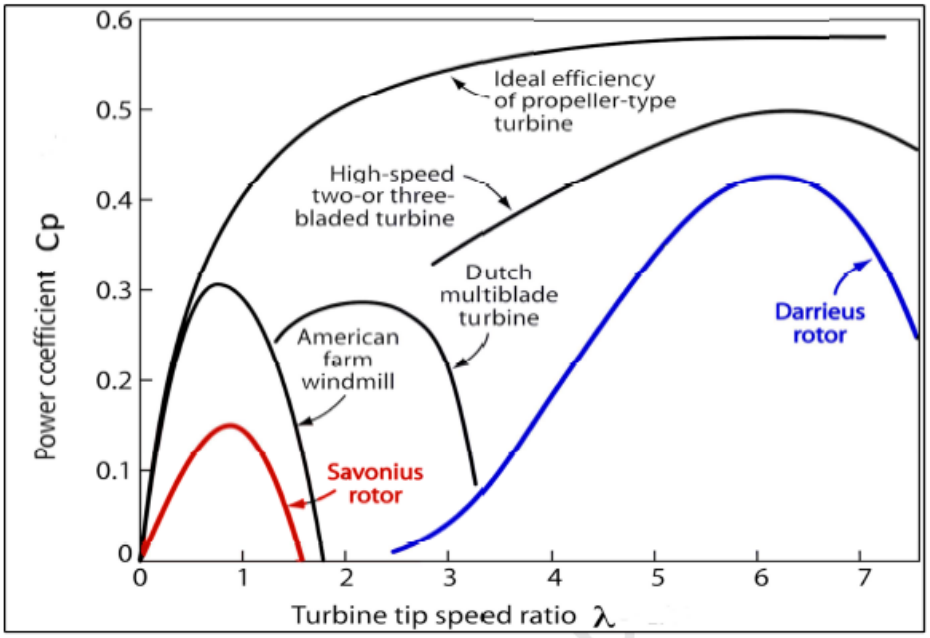
2.1 State of The Art

State of the art merupakan jalur atau peta penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya terhadap tema penelitian yang akan dilakukan pada penelitian tugas akhir ini. *State of the art* berfungsi untuk menganalisa dan memperkaya pembahasan penelitian, serta membedakannya dengan penelitian tugas akhir ini. Dalam penelitian ini disertakan jurnal internasional penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan performa turbin Savonius dan penerapan *tip rake* pada *propeller*. Jurnal tersebut antara lain ;

1 Penelitian dengan judul *Summary Of Savonius Wind Turbine Development And Future Applications For Small-Scale Power Generation*, diambil dari *AIP JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY 4, 042703 (2012)*, yang diteliti oleh J. P. Abraham, B. D. Plourde G. S. Mowry, W. J. Minkowycz, dan E. M. Sparrow pada tahun 2012 di USA [9]. Penelitian ini meneliti tentang turbin untuk elektrifikasi skala kecil, yang memiliki rancangan berbeda dengan turbin tipe lain yang dirancang khusus untuk elektrifikasi skala besar. Turbin yang dianalisa pada penelitian ini adalah turbin Savonius, yang termasuk jenis turbin *Drag Devices*. Penelitian ini juga menjelaskan sejarah turbin Savonius dan potensinya pada pengaplikasian elektrifikasi lokal. Berdasarkan penelitian ini, dapat diketahui bahwa untuk produksi daya skala kecil (beberapa kW saja), turbin angin sumbu horisontal besar (HAWT) tidak sesuai, dimana turbin yang lebih cocok adalah jenis VAWT, atau turbin angin sumbu vertikal. VAWT sendiri secara garis besar memiliki dua varian, yaitu turbin Savonius. Karena sifat turbin Darrieus yang bekerja dengan memanfaatkan gaya *lift*, maka karakteristik turbin ini similiar dengan HAWT. Turbin Savonius sangat berbeda performanya dengan turbin Darrieus, dimana peforma turbin diukur melalui *power coefficient* yang juga berperan sebagai effisiensi turbin. Turbin HAWT dengan ukuran besar dapat mencapai nilai Cp sebesar 0.5 (50%), sedangkan turbin VAWT tipe Savonius memiliki efisiensi yang rendah, yaitu hanya 15%.

Namun, disamping dari rendahnya performa turbin VAWT, turbin jenis ini memiliki potensi sebagai berikut ini.

- VAWT memiliki dimensi yang lebih kecil sehingga dapat diterapkan pada lahan terbatas dan dapat dipasang berdekatan,
- Pada turbin VAWT, sistem kontrol tidak diperlukan, karena dapat berputar pada kondisi angin dari segala arah. Maka, rotor turbin tidak perlu diarahkan sesuai dengan arah angin seperti HAWT.
- Turbin Savonius mampu berputar dengan kecepatan angin yang lebih rendah dibandingkan turbin lainnya. Maka, turbin ini lebih mampu menghasilkan daya untuk kecepatan angin yang rendah.



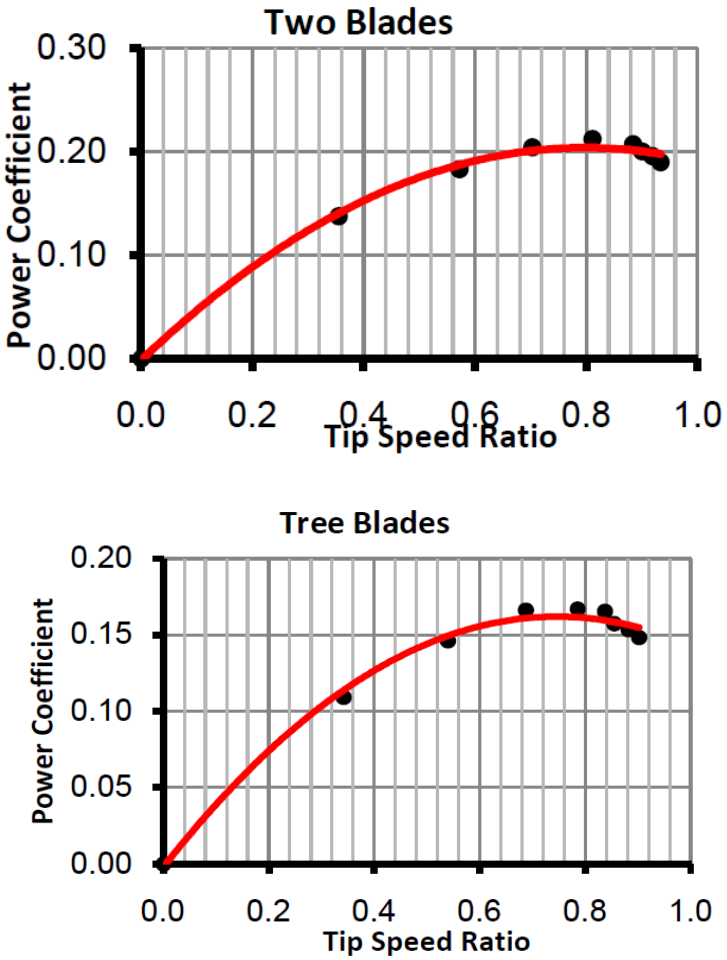
Gambar 2.1 Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp Turbin Angin Sebagai Fungsi Terhadap *Tip Speed Ratio*

Sumber : Pallotta, 2019

Turbin jenis VAWT bisa diterapkan di tempat yang lebih terbatas dibandingkan dengan HAWT. Contoh aplikasinya adalah penerapan VAWT pada desa terpencil Sistem VAWT yang *compact* dan stabil dengan baterai yang bisa mensuplai secara *intermitten* sangat potensial untuk dikembangkan.

2 Penelitian dengan judul *Performance Investigation of A Mix Wind Turbine Using A Clutch Mechanism At Low Wind Speed Condition*, diambil dari artikel *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* yang diteliti oleh M. J. Jamanun, M. S. Misaran, M. Rahman, W. Muzammil pada tahun 2017 di Malaysia [10]. Penelitian ini meneliti tentang perbandingan performa turbin Savonius dan turbin Darrieus dengan penerapan mekanisme kopling pada kondisi kecepatan angin yang rendah. Jurnal ini membahas bagaimana cara meningkatkan efisiensi *self starting* pada turbin Savonius dan turbin Darrieus dengan penerapan kopling. Pada penelitian ini disebutkan bahwa turbin Savonius memiliki kemampuan *self starting* dan bisa menghasilkan torsi untuk berputar dari gaya *drag* yang dihasilkan dari geometrinya. Namun, dari segi efisiensi, turbin Savonius 20% lebih rendah nilai efisiensinya dibandingkan dengan turbin Darrieus. Menurut penelitian tersebut, kemampuan *self-starting* adalah faktor kritis untuk turbin angin untuk penempatan dengan kecepatan angin yang rendah dan bervariasi.

3 Penelitian dengan judul *Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed*, diambil dari jurnal *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER),* telah diteliti oleh Mohammed Ali Hadi pada tahun 2013 [11]. Pada penelitian ini, turbin Savonius diteliti menggunakan terowongan angin untuk mengetahui pengaruh jumlah blade terhadap performanya. Hasil menunjukkan untuk turbin dengan diameter 200 mm dan tinggi 200 mm dan aspect ratio 1 memiliki performa terbaik pada jumlah blade dua. Hal ini disebabkan penambahan jumlah blade dapat menyebabkan torsi balik yang mengurangi torsi bersih yang memutar turbin Savonius. Turbin Savonius dengan dua *blade* memiliki nilai Cp tertinggi sebesar 0.21 pada TSR 0.8, sementara turbin dengan tiga *blade* memiliki nilai Cp 0.17 pada TSR 0.8. Hal ini juga berlaku pada koefisien torsi, dimana turbin dengan dua *blade* lebih baik dibanding tiga *blade*.



Gambar 2.2. Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp antara *dua blade* dengan *tiga blade* terhadap *Tip Speed Ratio*
Sumber : Ali, 2013

4 Penelitian dengan judul *Experimental Investigations On Single Stage, Two Stage And Three Stage*, diteliti oleh M. A. Kamoji, S. B. Kedare1 and S. V. Prabhu, yang diambil dari jurnal *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* pada tahun 2008 [12]. Kamoji dkk. menguji turbin Savonius *single stage, two stage* dan *three stage* dengan beragam nilai *aspect ratio*. Pengujian menunjukkan hasil adanya penurunan performa seiring bertambahnya jumlah *stages*, untuk nilai *aspect ratio* yang sama. Selain itu, pada penelitian ini juga ditemukan bahwa turbin dengan tiga *stage* cocok diterapkan pada area dengan kecepatan angin yang rendah serta *intermitten*, karena memiliki kemampuan *self starting* yang sangat baik, karena torsi statisnya yang stabil.

Table III. Details of number of stages, blockage, stage aspect ratio, rotor aspect ratio and their comparison at a given Reynolds number.

No. of stages	Blockage ratio (%)	Stage aspect ratio	Comparison of performance at Re = 100 000			Rotor aspect ratio	Comparison at Reynolds number	
			Cp_{max}	Ct	TSR			
Single	20	1.0	15.4	19.7	0.78	1.0	100 000 and 120 000	80 000
	28	1.0	15.4	19.5	0.79	1.0		
	35	1.0	16.1	20.7	0.78	1.0		
Two	32	0.5	14.5	17.5	0.83	1.0	100 000 and 120 000	
	22	1.0	13.7	18.9	0.72	2.0		
Three	31	0.33	13.1	18.8	0.70	1.0	81 500	
	17	1.0	13.2	17.1	0.77	3.0		

Gambar 2.3. Perbandingan Efisiensi atau Nilai Cp, Nilai Ct, pada Aspect Ratio Yang Sama Antara Turbin *Single Stage, Two Stage,* Dan *Three Stage.*
Sumber : Kamoji, 2008

5 Penelitian dengan *On The Performance Analysis Of Savonius Rotor With Twisted Blades* yang dilakukan oleh Saha dan Rajkumar pada tahun 2006, diambil dari jurnal Renewable Energy 31 (2006) halaman 1776–1788 [7]. Penelitian ini telah menginvestgasi turbin Savonius dengan tiga *blade* dan menggunakan konfigurasi *twisted blades.* Penelitian dilakukan dengan cara eksperimen turbin angin. Hasil eksperimen menunjukkan adanya peningkatan pada efisiensi dan kemampuan *self starting*, dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional. Hal ini terjadi karena gaya maksimum bergerak menuju ujung blade karena efek dari *twist.*

6 Penelitian dengan *Optimum Design Configuration Of Savonius Rotor Through Wind Tunnel Experiments* yang dilakukan oleh Saha dkk. pada tahun 2008, diambil dari jurnal Journal of *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. melakukan penelitian yang mirip seperti diatas dengan menggunakan bentuk turbin *semicircular* dan *twisted blades* [13]. Berbagai eksperimen telah dilakukan untuk mengoptimasi parameter turbin Savonius mulai dari jumlah *stage*, jumlah *blade*, dan juga geometri *blade*. Dari penelitian tersebut, didapatkan beberapa hal terkait jumlah *blade* dan geometri *blade* yang optimal. Eksperimen telah dilakukan pada variasi jumlah *blade* antara dua dan tiga, serta bentuk blade konvensional dan *twisted blade*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Cp turbin turun ketika jumlah *blade* dinaikkan dari dua menjadi tiga. Hal ini terjadi karena fluida yang menabrak *blade* terpantul kembali dari *blade* pada arah negatif terhadap putaran turbin. Dari penelitian ini didapatkan pula bahwa performa Savonius twisted-bladed lebih baik dari Savonius dengan blade konvensional (*Semi circular*).

Table 1
Performance of Savonius rotor system

Rotor system	No. of blades	Blade shape	Blade height (m)	Blade chord (m)	Aspect ratio	Projected area (m^2)	Free stream velocity (m/s)	Max. power coefficient (C_p)
Single-stage	2	Semicircular	0.173	0.109	1.58	0.0377	8.23	0.18
		Twisted						0.19
	3	Semicircular						0.15
		Twisted						0.16
Two-stage	2	Semicircular	0.122	0.077	1.58	0.0377	7.30	0.29
		Twisted						0.31
	3	Semicircular						0.26
		Twisted						0.28
Three-stage	2	Semicircular	0.100	0.063	1.58	0.0377	8.23	0.23
		Twisted						0.24
	3	Semicircular						0.20
		Twisted						0.21

Gambar 2.4 Tabel Performa Turbin Savonius Pada Berbagai Variasipa
Sumber : Saha, 2008

7 Penelitian berjudul *Performance 'S' Type Savonius Wind Turbine with Variation of Fin Addition on Blade*, dilakukan oleh Pamungkas, S, F, pada tahun 2018, yang diambil dari *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [14]. Pada penelitian ini, dilakukan penambahan *fin* pada turbin Savonius dua *blade* dengan bentuk *blade* semi *circular* (konvensional). Hasil dari eksperimen pada penelitian ini menyatakan bahwa penambahan fin dapat meningkatkan performa turbin Savonius dalam memproduksi energi listrik. Hal ini ditunjukkan pada hasil penelitian, dimana penambahan 1 fin dapat miningkatkan daya listrik sebesar 22.71%, penambahan 2 fin meningkatkan daya listrik sebesar 8.79%, dan penambahan 3 fin meningkatkan daya sebesar 3.93%.

8 Penelitian dengan judul *Effects Of Blade Tapering On The Performance Of Vertical Axis Wind Turbines Analysed Through Advanced Visualization Techniques*, dilaksanakan oleh Zahariev pada tahun 2019, diambil dari jurnal *International Journal of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management* [15]. Penelitian ini meneliti tentang pengaruh blade *tapering* pada peforma turbin Savonius konvensional. Terdapat tiga jenis bentuk, yaitu Delta, Rhomb, dan Cross. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa *blade tapering* memberikan efek penurunan pada performa turbin.

Alasan utamanya adalah 70 % *blade* bekerja pada aspect ratio yang rendah dimana efisiensinya rendah, dan hanya 30% *blade* yang bekerja pada aspect ratio yang tinggi. Efisiensi keseluruhan berkurang dibandingkan dengan bentuk blade konvensional karena zona efisiensi yang lebih tinggi tidak sepenuhnya mengimbangi zona efisiensi yang lebih rendah.

Table 2. Performance characteristics of the baseline VAWT

λ	Cm	Cp
0.4	0.304	0.122
0.5	0.260	0.130
0.6	0.230	0.138
0.7	0.203	0.142
0.8	0.175	0.140
0.9	0.141	0.127
1	0.107	0.107

Table 3. Revolution average Cp and Cm of the tapered blade VAWTs

Blade Shape	Average Cp	Average Cm
Delta	0.129	0.120
Rhomb	0.114	0.142
Cross	0.127	0.143

Gambar 2.5 Perbandingan Performa Turbin Savonius Konvensional dengan *Tapered Blade*
Sumber : Zahariev, 2019

9 Penelitian dengan judul *A Numerical Comparison Of End-Plate Effect Propellers And Conventional Propellers*, dilaksanakan oleh Hsun-jen Cheng, Yi-chung Chien, Ching-yeh Hsin, Kuan-kai Chang, Po-fan Chen, pada tahun 2010 [8]. Penelitian ini meneliti tentang peforma *propeller* non – konvensional dengan modifikasi pada ujung baling – baling, yaitu Kappel *propeller*, serta komparasi performanya dengan propeller konvensional. Hasil komputasi menunjukkan bahwa *propeller* Kappel memiliki efek skala yang lebih besar baik untuk gaya dorong maupun torsi. Namun, data eksperimental menunjukkan bahwa *propeller* Kappel memiliki efek skala yang lebih besar hanya untuk torsi.

10 Penelitian dengan judul *Development of Contra-Rotating Propeller with Tip-Raked Fins*, dilaksanakan oleh Yasuhiko, pada tahun 2011 diambil dari *Second International Symposium on Marine Propulsors* [16]. Penelitian in meneliti tentang penerapan tip rake pada *contra rotating propeller* terhadap peformanya. Dari penelitian ini, didapatkan bahwa efisiensi pada *contra rotating propeller* dengan tip *rake* meningkat 1.5 % dibandingkan dengan CRP konvensional tanpa *curved rake.*

11 Penelitian dengan judul *Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation* telah dilaksanakan oleh Omar Yaakob pada tahun 2012 di Universiti Teknologi Malaysia [17]. Penelitian ini menelti tentang verifikasi peforma Turbin Savonius dengan menggunakan fluida air (*Marine*). Verifikasi dilakukan berdasarkan data eksperimen dan data CFD sebelumnya, dengan variasi satu *stage* dan dua *stage*, serta simulasi 1D, 2D, dan 3D dengan jumlah *cell* 35.000 sampai 45.000 untuk simulasi 2D, dan jumlah *cell* 800.000 hingga 1.500.000 *cells* untuk simulasi 3D. Dari Simulasi tersebut, didapatkan bahwa untuk kasus 3D dan 2D untuk turbin dengan satu *stage* dan dua *stage* telah divalidasi. Selain itu, untuk penelitian lanjutan, diperlukan simulasi dengan skala penuh untuk mendapatkan hasil yang optimal. Oleh karena itu, tugas akhir ini menggunakan jumlah cell domain yang sama dengan penelitian Omar Yaakob, yaitu sebanyak 1.500.000 *cell* pada simulasi 3D.

12 Penelitian dengan judul *Comparison of Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using Computational Fluid Dynamics* telah dilakukan oleh Omar Yaakob pada tahun 2013 di Universiti Teknologi Malaysia [18]. Penelitian ini meneliti tentang perbandingan antara Turbin Savonius konvensional dengan Turbin Savonius Helical, atau *twisted blade* dengan sudut putar 180 derajat. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui kecepatan angular kedua turbin yang menyatakan karakteristiknya sebagai turbin air. Dari penelitian ini, didapatkan bahwa efisiensi Turbin Savonius Helical lebih baik dibandingkan Turbin Savonius Konvensional, karena turbin helical tidak menciptakan torsi negatif yang signifikan. Karena sedikitnya referensi tentang turbin Savonius yang digunakan sebagai turbin hidrokinetik, maka pada penelitian tugas akhir ini akan menggunakan dimensi yang sama dengan turbin pada penelitian Omar Yaakob, yaitu diameter 0.75 m, dan tinggi 1.5 meter.

Tabel 2.1 Tabel *State of The Art* Penelitian Turbin Savonius

No.	Judul Jurnal dan Peneliti	Peneliti, Tahun dan Tempat Penelitian	Metode Penelitian	Objek Penelitian	Perbandingan yang dijadikan alasan tinjauan penelitian
1.	*Summary Of Savonius Wind Turbine Development And Future Applications For Small-Scale Power Generation*	Abraham dkk, 2012, USA	Kuantitatif	Turbin Savonius konvensional	Hasil penelitian merupakan dasaran untuk penggunaan VAWT tipe Savonius pada penelitian ini sebagai objek penelitian, dibandingkan dengan HAWT
2.	*Performance Investigation of A Mix Wind Turbine Using A Clutch Mechanism At Low Wind Speed Condition*	2017, Malaysia	Kuantitatif	Turbin Savonius dengan penambahan mekanisme kopling	Hasil penelitian merupakan dasaran untuk penggunaan turbin Savonius pada penelitian ini sebagai objek penelitian, dibandingkan Turbin Darius
3.	*Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed*	Mohammad Ali, 2013, Iraq	Kuantitatif	Turbin Savonius dengan variasi jumlah *blade* dua dan tiga	Hasil penelitian ini digunakan sebagai batasan masalah Turbin Savonius dengan variasi jumlah *blade* dua dan tiga
4.	*Experimental Investigations On Single Stage, Two Stage And Three Stage*	M. A. Kamoji , 2008, USA	Kuantitatif	Turbin Savonius konvensional dengan modifikasi *Single Stage, Two Stage And Three Stage*	Hasil pengujian dijadikan dasaran penelitian penulis menggunakan *aspect ratio* yang sama dengan *single stage*

No.	Judul Jurnal dan Peneliti	Peneliti, Tahun dan Tempat Penelitian	Metode Penelitian	Objek Penelitian	Perbandingan yang dijadikan alasan tinjauan penelitian
5.	*On The Performance Analysis Of Savonius Rotor With Twisted Blades*	Saha dan Rajkumar, *2006,* India	Kuantitatif	Turbin Savonius dengan modifikasi geometri *blade* menjadi *twisted blade*	Hasil penelitian merupakan dasaran untuk penggunaan turbin Savonius dengan modifikasi *twisted blade* pada penelitian tugas akhir ini
6.	*Optimum Design Configuration Of Savonius Rotor Through Wind Tunnel*	Saha dkk., 2008, India	Kuatitatif	Turbin Savonius menjadi *twisted blade* dan divariasikan jumlah *blade*	Hasil penelitian jadi dasaran untuk turbin Savonius *twisted blade* dengan *blade* dua
7.	*Performance 'S' Type Savonius Wind Turbine with Variation of Fin Addition on Blade*	Pamungkas, S, F, pada tahun 2018, Indonesia	Kuatitatif	Turbin Savonius dengan tambahan sirip (*fin*) pada *blade*	Hasil penelitian sebagair referensi modifikasi *blade* selain dengan *twisted blade*
8.	*Effects Of Blade Tapering On The Performance Of Vertical Axis Wind Turbines Analysed Through Advanced Visualization Techniques*	*Martin Zahariev, Taimoor Asim, Rakesh Mishra, Blaise Nsom, 2019, United Kingdom*	Kuantitatif	Turbin Savonius konvensional dengan modifikasi *tapered blade*	Hasil penelitian sebagai referensi modifikasi *blade* selain dengan *twisted blade,* yaitu *tapered blade*

No.	Judul Jurnal dan Peneliti	Peneliti, Tahun dan Tempat Penelitian	Metode Penelitian	Objek Penelitian	Perbandingan yang dijadikan alasan tinjauan penelitian
9.	*A Numerical Comparison Of End-Plate Effect Propellers And Conventional Propellers*	Hsun-jen Cheng, dkk., 2010, China	Kuantitatif	Perbandingan antara *propeller* konvensional dengan *tip rake* (Kappel Propeller)	Hasil penelitian sebagai referensi pengembangan turbin Savonius *twisted blade,* yaitu penambahan *tip rake* yang secara teori dapat meningkatkan *thrust* dan *torsi*
10.	*Development of Contra-Rotating Propeller with Tip-Raked Fins,*	Yasuhiko, 2011, Jepang	Kuantitatif	Penambahan *tip rake* pada *contra rotating propeller* dan pengaruhnya terhadap performa	Hasil penelitian sebagai dasaran *peneran tip rake* pada turbin Savonius
11.	*Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation*	Omar Yaakob, 2012, Malaysia	Kuantitatif	Validasi hasil eksperimen Turbin Savonius sebagai turbin *marine current*	Hasil penelitian dijadikan dasaran untuk pembuatan jumlah cell dalam domain CFD
12.	*Comparison of Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using CFD*	Omar Yaakob, 2013, Malaysia	Kuantitatif	Perbandingan performa antara Turbin Savonius konvensional dengan Turbin Savonius HElicaldengan sebagai turbin *marine current*	Hasil penelitian dijadikan dasaran untuk pembuatan dimensi turbin yang akan dianalisa pada tugas akhir ini.

Berdasarkan *State of The Art* penelitian Turbin Savonius, diperoleh bahwa pengembangan performa Turbin Savonius dimulai dari bentuk konvensional,, variasi jumlah *blade*, variasi *aspect ratio*, variasi *stage*, dan variasi *twisted blade*. Berdasarkan seluruh penelitian yang dilakukan tersebut, diketahui bahwa peningkatan efisiensi tertinggi berada pada modifikasi *twisted blade* dengan sudut *twist* 45.. Selain itu, dari penelitian terdahulu diperoleh juga *aspect ratio* optimum dari Turbin Savonius, yaitu bernilai 1. Oleh karena itu, pada penelitian tugas akhir ini akan menganalisa Turbin Savonius *twisted blade* dengan nilai *aspect ratio* satu.

Untuk penerapan *tip rake* pada Turbin Savonius belum pernah ditemukan pada penelitian sebelumnya, dimana penerapan *tip rake* yang diteliti hanya pada lingkup *propeller*. Penerapan *tip rake* pada *propeller* diketahui memiliki pengaruh positif pada torsi. Maka, pada penelitian tugas akhir ini akan dianalisa Turbin Savonius *twisted blade* 45^0 dengan penerapan *tip rake* pada ujung *bladenya*. Berdasarkan objek penelitian tersebut, penelitian tugas akhir yang diajukan ini memiliki poin *novelty* atau keterbaharuan penelitian.

2.2 Arus Laut

Arus laut merupakan gerakan pada sumbu vertikal maupun vertikal dari suatu massa air laut hingga air laut tersebut mencapai kondisi keseimbangannya (Surbakti, 2015). Gerakan ini terjadi karena resultan dari gaya yang bekerja.

Secara umum, gaya yang bekerja dalam terbentuknya arus adalah gaya primer dan gaya sekunder. Pergerakan dan kecepaan arus dipengaruhi oleh gaya primer. Pada arus laut, gaya primer ini terdiri dari gravitasi, tiupan angin, perbedaan densitas atau pergerakan gelombang panjang serta tekanan atmosfir. Sedangkan gaya sekunder mempengaruhi arah gerakan dan kondisi aliran arus laut. Gaya sekunder terdiri dari gesekan lapisan air laut dan gaya Coriolis (Pickard, 1988).

Jika ditinjau dari letaknya arus laut dibedakan menjadi tiga , yaitu :

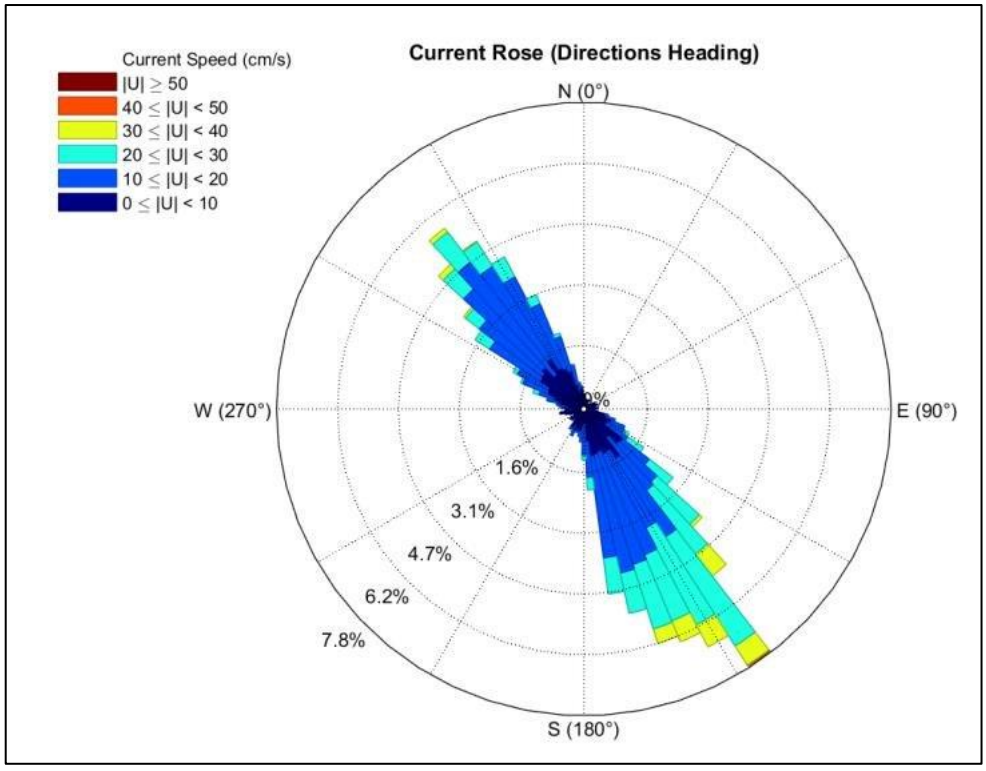
- Arus Permukaan : berada pada permukaan laut dengan kedalaman < 20 m
- Arus Sedang : berada pada kedalaman 20 - 40 m
- Arus Dalam : berada pada kedalaman > 40 m

Di dunia, potensi global lautan sebagai sumber energi arus laut sangat besar, mencapai 2,8 x 10^{14} (280 triliun) Watt-jam (Duxbury dkk., 2000). Karena Selain sifat arus laut yang stabil dan dapat diprediksi membuat arus laut menarik untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik yang ramah lingkungan.

2.3 *Current Rose*

Current Rose merupakan sebuah media yang menggambarkan secara detail dari hasil pengamatan terhadap arus laut, yang menunjukkan frekuensi terjadinya arus, dan distribusi arah dan kecepatan arus dalam arah mata angin.

Biasanya, *Current Rose* dipresentasikan dalam delapan atau enam belas arah, dimana frekuensi arusnya terdistribusi berdasaekan kecepatan arus. Untuk mendapatkan hasil *Current Rose* yang lebih presisi, dibutuhkan lebih banyak pengamatan lapangan dibandingkan kalkulasi. Agar bisa dikategorikan presisi, maka paling tidak harus dilakukan 80 kali pengamatan pada suatu area yang akan diplot kedalam *Current Rose* [19].



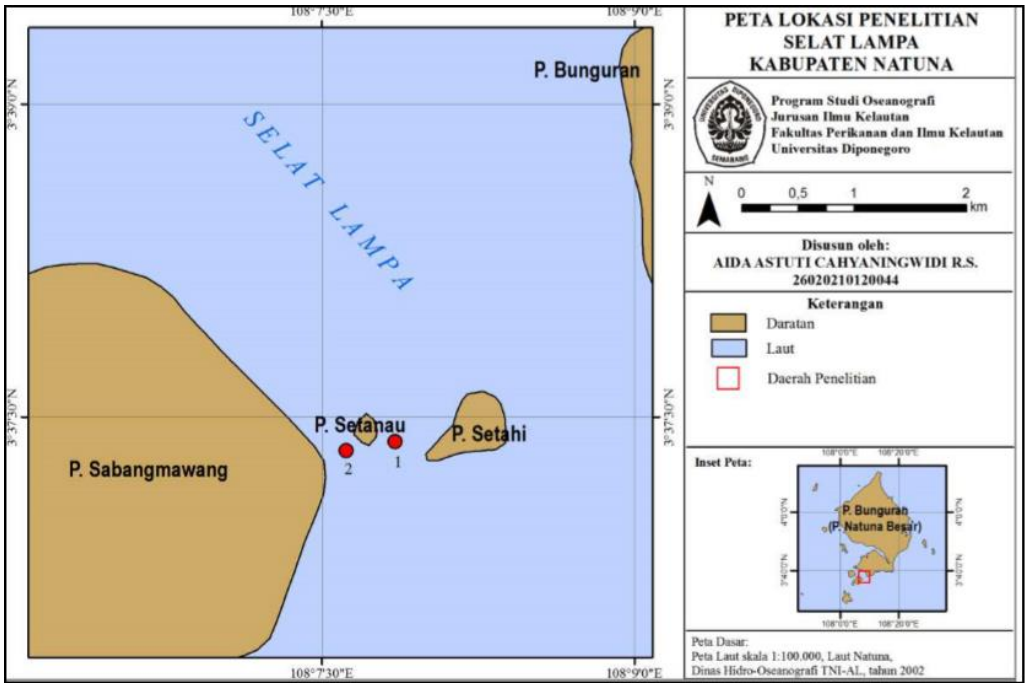
Gambar 2.6 Contoh Plot *Current Rose*

Sumber : Al-Anzi, 2016

Jika batas - batas area di mana proses arus terbentuk dipilih dengan baik dan termasuk area dengan karakteristik arus yang identik, maka *Current Rose* membentuk informasi terbaik yang dapat diberikan kepada navigator kapal. *Current Rose* memberikan jumlah informasi yang cukup tentang distribusi arah dan kecepatan arus, dan memungkinkan navigator untuk memilih arus yang diharapkan dengan benar dalam kaitannya dengan pengamatan kondisi cuaca aktual. Untuk tujuan ilmiah, *Current Rose* memberikan informasi yang jelas tentang stabilitas atau variabilitas arus.

2.4 Potensi Energi Arus Laut Desa Sabangmawang

Di Indonesia, potensi energi terbarukan sangat menjanjikan Berdasarkan data dari Asosiasi Energi Laut Indonesia (ASELI), potensi teknis pemanfaatan sumber daya laut sebagai energi listrik di Indonesia mencapai 727.000 MW. Dari besarnya potensi tersebut, pemanfaatan energi arus laut memiliki prospek yang baik. Potensi energi arus laut juga dimiliki wilayah Sabangmawang. Desa Sabangmawang dilewati Selat Lampa dan dua selat kecil diantara Pulau Lagong, Pulau Sentanau dan Pulau Setahi, seperti gambar di bawah.



Gambar 2.7. Lokasi Stasiun Penelitian Selat Lampa

Sumber : Al-Anzi, 2016

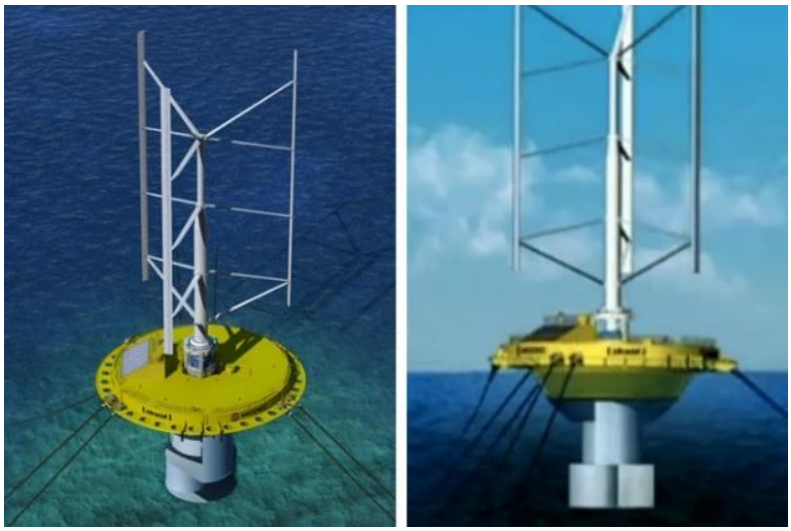
Pada 20 Mei hingga 3 Juni 2014, penelitian dilakukan di kedua selat kecil ini (dalam bentuk dua stasiun pengamatan). Pada penelitian tersebut, pengukuran arus laut dilakukan dengan teknik akustik menggunakan ADCP Argonaut SonTek XR yang diletakkan kedalaman kurang lebih 20 meter pada di masing-masing stasiun pengamatan. Perekaman data arus laut dilakukan selama 7 x 24 jam dengan interval perekaman setiap 1 jam [4]. Data arus laut hasil pengukuran di lokasi tersebut disajikan dalam bentuk *current rose*. *Current rose* prosentasi adanya arus dan juga menunjukkan arah bergerak arus pada kecepatan tertentu.

Berdasarkan data *current rose*, arus di kedua stasiun pengamatan memiliki pergerakan bolak-balik dimana arus di stasiun pengamatan ke-satu memiliki arah pergerakan dominan utara-selatan dan arus di stasiun pengamatan ke-dua memilki arah pergerakan dominan barat laut – tenggara. Morfologi garis pantai di sekitar lokasi penelitian mempengaruhi arah pergerakan arus laut. Data hasil penelitian dan pengolahan data *current rose* adalah :

- Hasil pengukuran pada stasiun satu menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,7387 m/s pada arah 20^0 (U-TL) , minimum 0,001 m/s pada arah 90^0 (T), dan kecepatan rata – rata arus 0,268401 m/s.
- Hasil pengukuran pada stasiun dua menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,9065 m/s pada arah 317.2^0 (U-BL), minimum 0,003 m/s pada arah 180 (S), dan kecepatan rata – rata arus 0,33859 m/s [4].

2.5 Pembangkit Listrik *Tenaga Arus Laut*

Indonesia memiliki potensi energi arus laut yang cukup menjajikan. Potensi ini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik melalui implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (PLTAL) [5]. Prinsip kerja dari PLTAL pada dasarnya adalah menggunakan turbin arus laut untuk menyerap energi kinetik dari arus laut untuk memutar turbin yang terhubung melalui poros ke generator listrik. Maka, energi listrik dihasilkan dengan berputarnya generator.



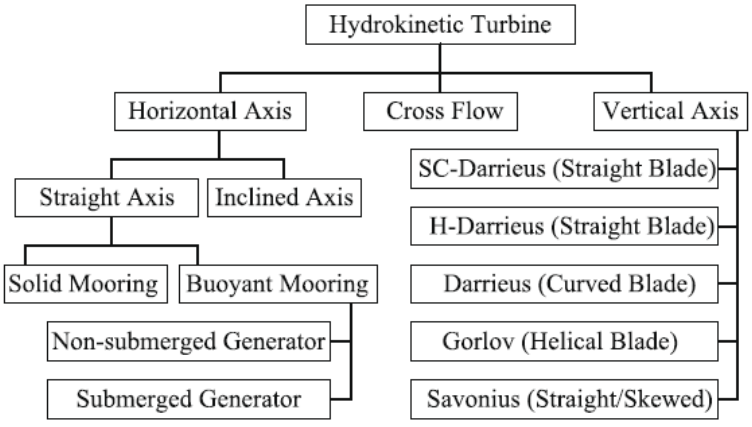
Gambar 2.8 Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut Terapung
Sumber : Inhabitat, 2013

2.6 Turbin Hidrokinetik (Turbin Arus)

Turbin Hidrokinetik adalah sebuah teknologi untuk mengkonversi energi kinetik pada arus air (*hydrokinetic energy*) baik arus sungai maupun arus laut menjadi energi mekanik putaran [20]. Teknologi turbin hidrokinetik ini banyak mengadopsi desain dan konsep turbin angin yang sudah ada sebelumnya.

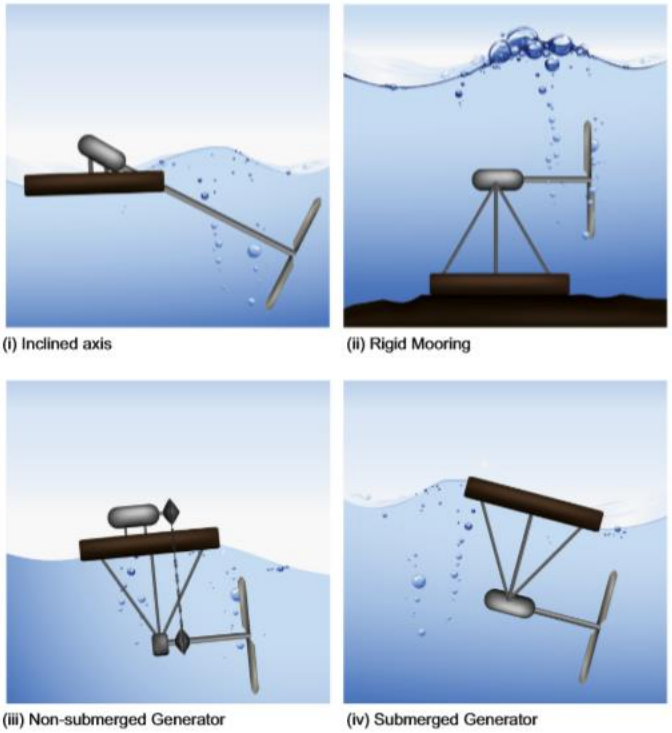
2.6.1 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik

Berdasarkan sumbu putarnya, turbin hidrokinetik diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu turbin sumbu horizontal *(Horizontal Axis)*, turbin sumbu vertical *(Vertical Axis)*, dan turbin *crossflow*. Gambar di bawah ini adalah tabel lebih detail mengenai turbin hidrokinetik [21].

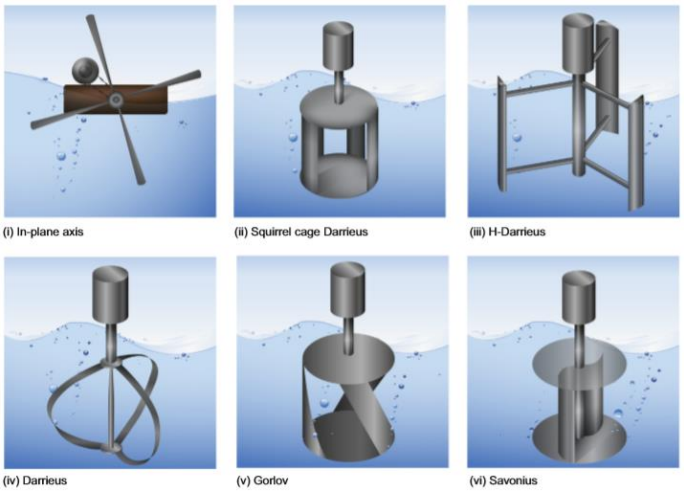


Gambar 2.9 Klasifikasi Turbin Hidrokinetik
Sumber : Khan, 2009

Turbin jenis sumbu horizontal memiliki sumbu putar yang sejajar dengan arah arus air dan bekerja menggunakan rotor berbentuk baling – baling (*propeller)*. Sedangkan turbin jenis sumbu vertikal aksis memiliki sumbu putar yang tegak lurus dengan arah arus air. Gambar di bawah ini menunjukkan jenis – jenis pemasangan turbin bertipe horizontal dan vertikal pada PLTAL.



Gambar 2.10 Jenis pemasangan turbin sumbu horizontal
Sumber : Vermaak, 2014



Gambar 2.11 Jenis Turbin Sumbu Vertikal
Sumber : Vermaak, 2014

Kedua jenis turbin tersebut memiliki beberapa keunggulan dan kekurangan. Turbin sumbu horizontal memiliki keunggulan efisiensi yang lebih tinggi, dan memiliki kemampuan *self starting* yang lebih baik dari turbin sumbu vertikal. Sedangkan kekurangannya adalah generator dan *gearbox* harus dipasang dekat dengan rotor sehingga membuat perawatan yang lebih rumit, serta tidak dapat menerima aliran fluida yang arahnya bervariasi, sehingga memerlukan bagian tambahan berupa *tail fin* yang digunakan untuk mengarahkan turbin [22].

Turbin sumbu vertikal memiliki keunggulan berupa kemudahan dalam perawatan, karena generator dan *gearbox* dapat diletakkan jauh dari rotor turbin atau berada dipermukaan air laut (tidak tercelup). Turbin jenis ini juga dapat menerima arah aliran fluida yang bervariasi (*multi- directional*), dapat beroperasi pada aliran fluida dengan kecepatan rendah, serta desain *blade* yang sederhana sehingga biaya fabrikasi *blade*dapat diturunkan. Kekurangan dari turbin jenis ini adalah tidak performa *self starting* yang buruk, sehingga dapat mengakibatkan *blade* pada turbin patah dan menimbulkan getaran pada *blade*. Kekurangan lainnya adalah sumbu vertikal memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan turbin sumbu horizontal [22].

2.6.2 Kalkulasi Daya yang Dihasilkan Oleh Turbin Hidrokinetik

Secara teori, arus listrik yang dihasilkan oleh turbin hidrokinetik dinyatakan dalam bentuk daya yang dihasilkan dalam satuan watt atau kilowatt. Kalkulasi daya yang dihasilkan oleh sebuah turbin hidrokinetik telah dikembangkan dan diuji validitasnya dalam sebuah persamaan.

Pengaruh variabel seperti kecepatan angin, jari-jari turbin, dan kecepatan putaran turbin terhadap daya yang dihasilkan telah dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya. Di bawah ini merupakan persamaan yang menyatakan daya dari sebuah turbin hidrokinetik [23].

$$P = \tfrac{1}{2} \rho A V^3 Cp \qquad (2.1)$$

Keterangan :
P = daya listrik yang dihasilkan (watt)
ρ = rapat massa air (kg/m^3)
A = luas penampang (m^2)
V = kecepatan fluida (m/s)
Cp= koefisien daya

Luas permukaan turbin pada persamaa diatas merupakan adalah luas penampang turbin, yang didapatkan melalui hasil perkalian antara tinggi turbin dan diameter turbin. Sedangkan koefisien daya merupakan nilai efisiensi dari turbin ketika mengonversi energi kinetik sebuah fluida menjadi energi mekanik putaran yang dipengaruhi nilainya oleh jenis turbin hidrokinetik yang digunakan. Maka, besarnya daya yang dihasilkan sebuah turbin hidrokinetik tergantung pada kecepatan arus, dimensi, dan jenis turbin yang digunakan.

2.7 Gaya *lift* dan Gaya *Drag* Pada Turbin Hidrokinetik

Ketika sebuah benda bergerak dengan kecepatan tertentu melewati sebuah fluida, maka antara fluida dan benda tersebut akan terjadi interaksi. Interaksi ini dapat dipahami sebagai gaya akibat pertemuan antar-muka fluida dengan benda.

2.7.1 Tegangan Geser, Tekanan, Gaya *Lift* dan *Drag*

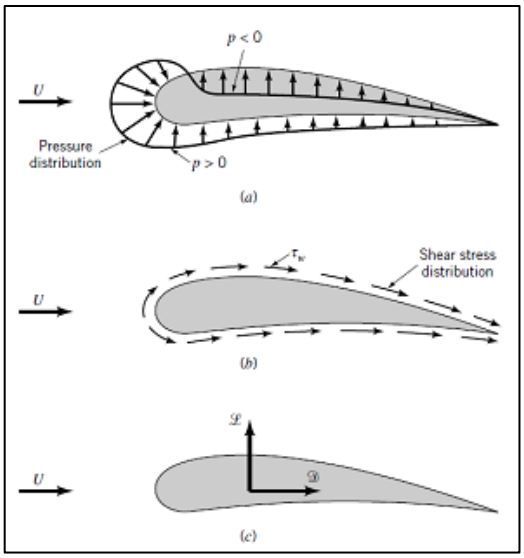
Pada benda yang melewati fluida, dalam hal ini air laut, gaya yang terjadi akibat efek viskos dan tegangan normal *p* tergambar dalam tegangan geser dinding, $\boldsymbol{\tau_w}$, yang ditunjukan pada Gambar 2.12 (a) dan 2.12 (b). Dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa disepanjang permukaan benda, nilai $\boldsymbol{\tau_w}$ dan *p* bervariasi arah dan besar nilainya.

Secara teori, akan didapatkan hasil yang detail apabila tegangan geser dan tekanan di seluruh permukaan benda dapat diketahui, meskipun informasi tersebut sulit untuk didapatkan. Namun dalam prakteknya, demikian, hanya efek gaya resultan secara keseluruhanlah yang diperlukan dalam kalkulasi. Gaya resultan atau gaya hidrodinamik yang bekerja pada arah yang tegak lurus terhadap kecepatan fluida dan *angle of attack* disebut sebagai gaya angkat (*lift*), *L* , sedangkan gaya resultan yang bekerja pada arah sejajar terhadap kecepatan fluida disebut sebagai gaya hambat (*drag*), D_r, seperti yang ditunjukan pada Gambar 2.12 (c) [24].

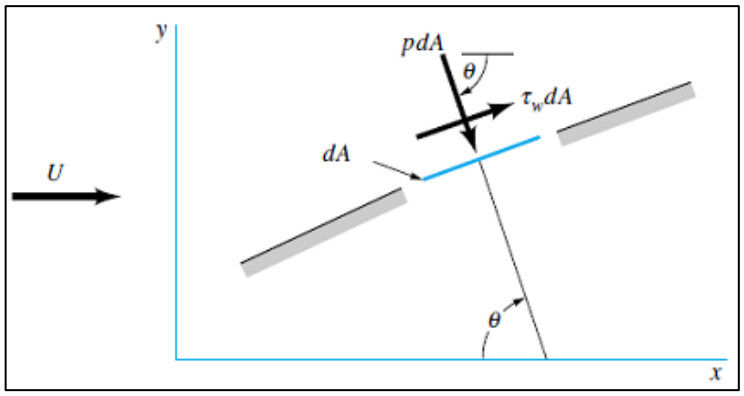
Khusus untuk proyeksi benda tiga dimensi, gaya aksial yang tegak lurus terhadap gaya D_r dan L. Resultan dari tegangan geser dan distribusi tekanan pada suatu benda dapat diperoleh dengan cara integrasi terhadap pengaruh dari kedua gaya ini pada permukaan benda seperti dalam Gambar 2.13. Komponen sumbu *x* dan *y* dari gaya pada elemen luasan *dA* adalah :

$$dF_x = (pdA)\,cos\theta + (\tau_w dA)\,sin\theta \qquad (2.2)$$

$$dF_y = -(pdA)sin\theta + (\tau_w dA)\,cos\theta \qquad (2.3)$$



Gambar 2.12 Gaya-gaya dari fluida yang bekerja di sekeliling benda dua dimensi: (a) gaya tekanan (b) gaya viskos (c) gaya resultan (*lift* dan *drag*)
Sumber : Munson, 2002



Gambar 2.13 Gaya Tekanan Dan Gaya Geser Pada Sebuah Elemen Kecil Dari Permukaan Sebuah Benda
Sumber : Munson, 2002

Maka untuk nilai *x* dan *y* dari gaya pada benda adalah :

$$D_r = \int dF_x = \int p\,cos\theta\,dA + \int \tau_w\,sin\theta\,dA \qquad (2.4)$$

$$= \int dF_y = -\int p\, sin\theta\, dA + \int \tau_w\, cos\theta\, dA \qquad (2.5)$$

Bentuk benda harus diketahui dahulu (dalam bentuk θ sebagai suatu fungsi dari lokasi di sepanjang benda) dan distribusi spesifik dari $\boldsymbol{\tau_w}$ dan $\boldsymbol{\rho}$ di sepanjang permukaan benda, untuk dapat melakukan pengintegralan dan menentukankan *lift* dan *drag*. Walaupun distribusi tekanan dapat diperoleh secara eksperimental tanpa banyak kesulitan, pada prakteknya sulit untuk mengukur distribusi tegangan geser dinding.

Meskipun persamaan 4 dan 5 berlaku untuk bentuk benda apapun, kesulitan penerapan persamaan ini terletak pada bagaimana mendapatkan distribusi tegangan geser dan tekanan yang sesuai pada permukaan benda. Untuk menetahui tegangan geser, hasil peneilitan terbatas hanya tersedia untuk kondisi bentuk benda sederhana.

2.7.2 Koefisien *Drag* dan Koefisien *Lift*

Tanpa adanya nilai yang rinci dari distribusi tegangan geser dan tekanan pada benda, persamaan 4 dan 5 diatas tidak dapat digunakan. Maka, solusi praktis dari permasalahan ini adalah menggunakan koefisien lift dan drag non-dimensional dan menentukan nilai - nilai perkiraannya melalui sebuah metode, baik menggunakan penyederhanan analisis, teknik numerik, maupun eksperimen yang sesuai [24]. *Koefisien lift*, C_L dan *koefisien drag*, C_D, didefinisikan sebagai berikut .

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (2.6)$$

$$C_D = \frac{D_r}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \qquad (2.7)$$

Berdasarkan dua persamaan di atas, gaya *lift* dan gaya *drag* dapat diketahui melalui persamaan di bawah ini.

$$FI = \frac{Cl.\rho\, .v^2.A}{2} \qquad (2.8)$$

$$Fd = \frac{Cd.\rho\, .v^2.A}{2} \qquad (2.9)$$

Dimana :

F_L = *lifting force (N)*

c_L = koefisien *lift*

F_d = *drag force (N)*

C_d = koefisien *drag*

ρ = massa jenis *(kg/m^3)*

v = kecepatan aliran *(m/s)*

A = *body area (m^2)*

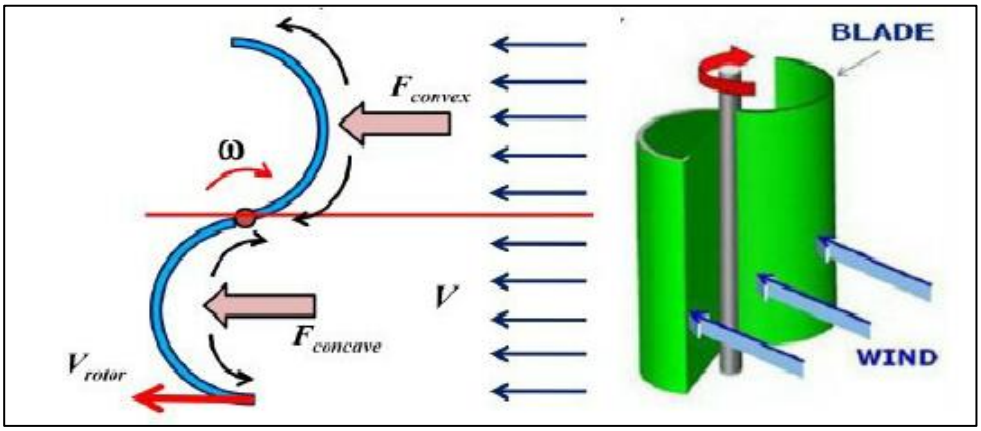
2.7.3 Klasifikasi Turbin Berdasarkan Gaya *Drag* dan *Lift*

Ketika sebuah benda solid dilewati oleh suatu aliran fluida, akan dihasilkan gaya *lift* dan gaya *drag*. Didefinisikan bahwa komponen yang sejajar terhadap aliran adalah gaya *drag*, sedangkan komponen yang tegak lurus terhadap aliran adalah gaya angkat. Begitu pun pada sebuah foil atau blade turbin, gaya *lift* dihasilkan oleh perubahan aliran disekitar foil tersebut. Gaya angkat akan bekerja saat kondisi tekanan fluida dibawah foil lebih tinggi daripada tekanan udara diatas foil. Kondisi ini menyebabkan perbedaan tekanan udara yang kemudian mengalir dari permukaan bawah foil, sekitar ujung foil menuju permukaan atas foil. Komponen gaya *drag* dan gaya *lift* merupakan komponen hidrodinamis total [20].

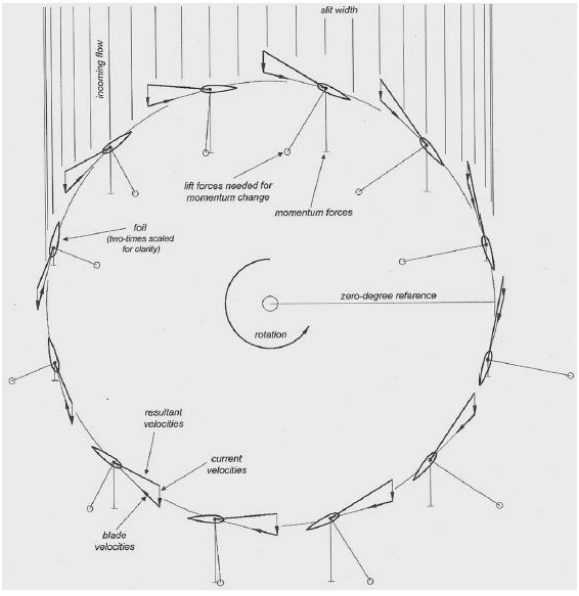
Setiap *foil* atau *blade* turbin yang dilewati aliran fluida akan mengalami gaya *lift* dan gaya *drag*. Desain *foil* sebuah turbin akan menyesuaikan terhadap gaya manakah yang lebih banyak dimanfaatkan antara gaya *lift* dan gaya *drag*. Oleh karena itu, berdasarkan gaya dominan yang bekerja, turbin *Vertical Axis* dibagi menjadi dua jenis, yaitu *lift device* dan *drag device*. Turbin Darrieus dan Gorlov termasuk tipe turbin *lift device*, dan Turbin Savonius termasuk tipe turbin *drag device* [20].

Prinsip kerja Turbin tipe *drag device* adalah menangkap arus, sehingga turbin ini secara desain memiliki *blade* berukuran lebar. Turbin tipe memiliki desain salah satu sisi *blade* yang searah dengan arah arus dibuat memiliki koefisien *drag* tinggi, sedangkan sisi yang lain *blade* yang berlawanan dengan arah arus dibuat dengan koefisien *drag* yang rendah.

Melalui desain seperti ini, gaya dorong atau gaya *drag* pada sisi *blade* yang searah dengan arah arus fluida lebih besar daripada sisi *blade* yang berlawanan dengan arah arus sehingga menghasilkan torsi yang bernilai positif yang membuat turbin dapat berputar. Turbin tipe *drag device* memiliki RPM dan efisiensi yang rendah karena *blade* tidak dapat bergerak lebih cepat daripada arus. Disamping RPM yang rendah, turbin tipe tipe ini memiliki kemampuan *self start* yang lebih baik dibandingkan turbin tipe *lift device* [25]. Gaya *drag* yang bekerja pada turbin tipe Savonius dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.14 Gaya *Drag* pada *Turbin Savonius*
Sumber : Ali MH, 2013



Gambar 2.15 *Gaya* lift *pada Turbin Lift Device*
(Lazauskas, 2012)

2.8 Turbin Savonius

2.8.1 Sejarah Turbin Savonius

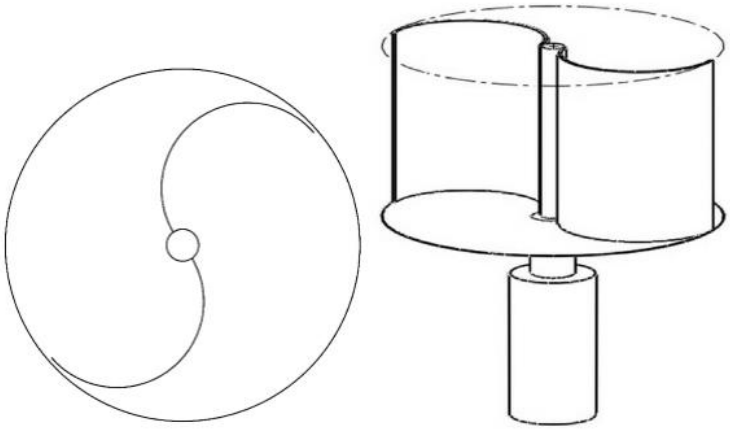
Bangsa Eropa telah bereksperimen sejak awal abad ke-19 dengan bilah melengkung pada turbin angin vertikal. Penyebutan paling awal tentang bilah melengkung ini diungkapkan Uskup Czanad Italia, Fausto Veranzio, yang juga seorang insinyur. Dia menulis dalam bukunya yang berjudul Machinae Novae tentang beberapa jenis turbin angin sumbu vertikal dengan bilah melengkung atau berbentuk huruf V. Tak satu pun dari contoh desain turbin sebelumnya atau yang lainnya mencapai perkembangan sejauh yang dibuat oleh Turbin Savonius.

Pada tahun 1922, seorang insinyur Finlandia bernama Sigurd Johannes Savonius muncul dengan sebuah ide untuk membuat rancangan turbin angin sumbu vertikal. Sebagai aturan, rotor terdiri dari dua bagian seperti pisau yang disusun dalam bentuk huruf S. Maka, selalu ada cekung dan sisi cembung dari turbin yang menghadap angin. Resistansi aliran dengan ukuran berbeda muncul dan dua jarak yang berbeda harus ditutup dengan kecepatan yang sama. Keuntungan besar turbin Savonius adalah torsi awal. Tidak ada rotor lain yang memulai dengan efek gaya lemah seperti rotor pada turbin Savonius. Karena output maksimum dicapai dengan sangat cepat, muncul pemikiran untuk menggunakan turbin savonius sebagai pembangkit listrik [26].

Dalam biografinya yang berbahasa Finlandia, disebukan bahwa ia berniat untuk mengembangkan tipe turbin yang mirip dengan tipe Flettner, tetapi memiliki kemampuan *autorotationary*. Dia bereksperimen dengan rotornya (yang kemudian diberi nama Savonius) di perahu dayung kecil di danau di negaranya. Tidak ada penelitian resmi yang diketahui saat itu, tetapi efek Magnus pada turbin ini dikonfirmasi oleh Felix Van König. Referensi penelitian lainnya adalah kedua paten Savonius, yaitu paten US1697574, yang diajukan pada 1925, dan paten US1766765 pada 1928 oleh Sigurd Johannes Savonius.

2.8.2 Model Turbin Savonius

Turbin angin Savonius adalah turbin angin sumbu vertikal yang menghasilkan tenaga melalui gaya *drag* pada permukaan rotornya. Bentuk konvensional rotor Savonius adalah " huruf S" yang terbentuk dari dua geometri *scoop* setengah lingkaran. Tampilan turbin Savonius ditunjukkan pada gambar di bawah. *Blade* dapat dibuat dari lembaran plastik atau aluminium yang dibentuk menjadi setengah melingkar [23].



Gambar 2.16 Tampak atas Dan Tampak Depan Turbin Savonius
Sumber : Yadav, 2016

Savonius mengidentifikasi performa dari 30 model berbeda dari S-rotor di terowongan angin dan udara terbuka. Ia menyebutkan bahwa nilai maksimum dari *power coefficient* (Cp) adalah 0,31 didapatkan dari eksperimen terowongan angin, dan dari eksperimen udara terbuka, didapatkan nilai maksimum Cp adalah 0,37. Setengah abad kebelakang, banyak peneliti yang mencari tahu performa dari desai9n turbin Savonius yang berbeda dan mendapatkan angka Cp diantara 0,15 sampai 0,35 [27].

Turbin Savonius memiliki karakteristik putaran yang rendah, oleh karena itu dibutuhkan sebuah *gearbox*. Gearbox berfungsi untuk meningkatkan kecepatan rotasi yang rendah dari poros rotor menuju tingkat kecepatan yang dibutuhkan oleh generator untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. Rasio roda gigi yang optimal pada gearbox dapat dicapai melalui kombinasi roda gigi berjenis *planetary, helical*, dan *spur* atau *worm*.

Energi mekanik rotasi rotor turbin dikonversi menjadi energi listrik oleh generator. Generator bekerja berdasarkan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, yang menyebutkan bahwa konduktor yang bergerak dalam medan magnet menghasilkan gaya elektromagnetik. Generator dapat digunakan untuk menghasilkan arus AC atau DC sesuai kebutuhan aplikasi sistem pembangkit listrik [23].

2.8.3 Parameter Performa Turbin Savonius

Untuk mengukur performa sebuah turbin Savonius, terdapat beberapa parameter berikut ini, yaitu *Coefficient of Torque* (Ct) dan *Coefficient of Power* (Cp) dibandingkan dengan *Tip Speed Ratio* atau TSR (λ). Berikut adalah penjelasan lebih detail dari masing – masing parameter.

2.9.3.1 *Tip Speed Ratio*

TSR adalah parameter yang terkait dengan kecepatan fluida yang diukur dan diameter rotor turbin. Definisi TSR sendiri ialah rasio antara kecepatan di ujung blade turbin dan kecepatan fluida yang melalui *blade* turbin. Nilai rasio dapat diperoleh dari persamaan di bawah [28].

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{Vrotor}{V} = \frac{\omega.\text{d}}{V} = \frac{\omega.\text{r}}{V} \tag{2.10}$$

Dimana :

TSR = *Tip Speed Ratio*

λ = *Tip Speed Ratio*

Vrotor = Kecepatan di ujung *blade* turbin (m/s)

V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

ω = Kecepatan anguler turbin Savonius (rad/sec)

d = Diameter satu blade turbin Savonius (m)

r = Radius turbin Savonius (m)

2.9.3.2 *Coefficient Of Power*

Coefficient of power atau koefisien daya turbin (Cp) adalah rasio antara daya maksimum yang diperoleh dari fluida (Pt) dan total daya yang tersedia dari fluida (Pa), seperti persamaan di bawah [27].

$$Cp = \frac{Pt}{Pw} = \frac{Pt}{\frac{1}{2}\rho AV^3} = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad (2.11)$$

Pt = Tω

A = Tinggi (H) x Diameter (D) turbin

Dimana :

Cp = *Coefficient of power*

Pt = Daya maksimum yang diperoleh dari fluida (Watt)

Pw= Total daya yang tersedia dari fluida (Air Laut) (Watt)

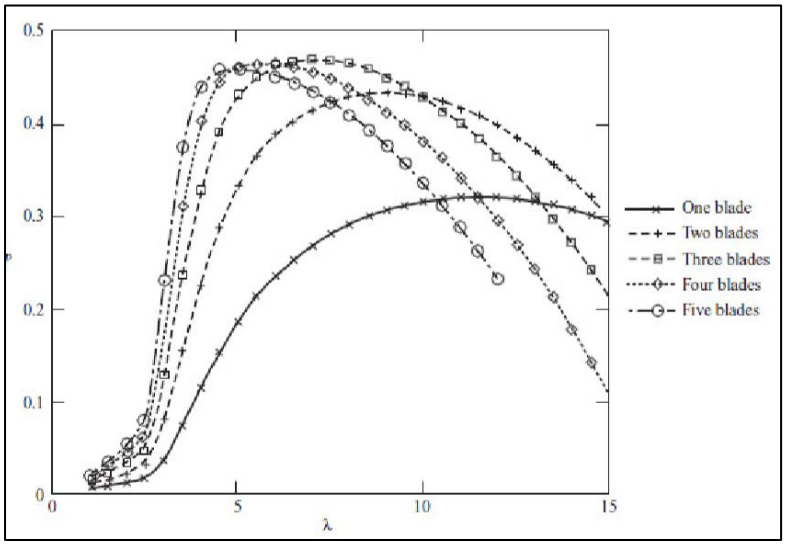
ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3)

A = *Swept Area* dari turbin Savonius (m)

V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

ω = Kecepatan *anguler* turbin Savonius (rad/sec)

Hubungan antara koefisien daya dengan *tip speed ratio* TSR atau λ sebagai efek dari soliditas kinerja turbin ditunjukkan pada gambar di bawah. Kurva menunjukkan bahwa turbin dengan blade tunggal memiliki soliditas yang lebih kecil dan bentuk kurva Cp relatif datar yang disebabkan oleh gaya *drag* yang lebih tinggi. Turbin dengan tiga bilah memberikan soliditas optimal dengan maksimum Cp dan hasilnya menghasilkan lebih banyak energi [27].



Gambar 2.17 Kurva Koefisien Daya Cp Terhadap *Tip Speed Ratio* Dari Tubin Sumbu Vertikal

Sumber :Wenehenubun, 2015

2.9.3.3 *Coefficient Of Torque*

Coefficient of torque atau koefisien torsi turbin (Ct) didefinisikan sebagai rasio antara torsi aktual yang dihasilkan pada rotor turbin (T) dan torsi teoritis yang tersedia dari fluida air laut (Tw), seperti persamaan di bawah ini [27].

$$Ct = \frac{T}{Tw} = \frac{4T}{\rho AdV^2} = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho ArV^2} \quad (2.12)$$

Dimana :

Ct = *Coefficient of Torque*
T = Torsi aktual yang dihasilkan pada rotor turbin (Nm)
Tw = Torsi teoritis yang tersedia dari fluida air laut (Nm)
ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3)
A = *Swept Area* dari turbin Savonius (m)
V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)
d = Diameter turbin Savonius (m)
r = Radius turbin Savonius (m)

2.9.3.4 Daya yang Dihasilkan Oleh Turbin Savonius

Dengan adanya nilai kefisien daya Cp, maka daya yang dihasilkan oleh tubrin Savonius dapat diperoleh melalui persamanan :

$$P = 0.5\ x\ Cp\ x\ A\ x\ \rho\ x\ V^3 \quad (2.13)$$

Dimana :

P = Daya yang diserap dari air laut (Watt)
Cp = Koefisien daya
A = *Swept Area* dari turbin Savonius (m)
ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3)
V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

2.8.4 Parameter Dimensional Turbin Savoius

2.9.4.1 *Aspect Ratio*

Aspect ratio (Aα) adalah sebuah rasio yang merepresentasikan tinggi turbin (H) relatif terhadap diameter (D). Rasio ini juga memiliki peran penting yang mempengaruhi performa dari turbin Savonius [29].

$$A\alpha = \frac{H}{D} \tag{2.14}$$

Dimana :

$A\alpha$ = *Aspect ratio*

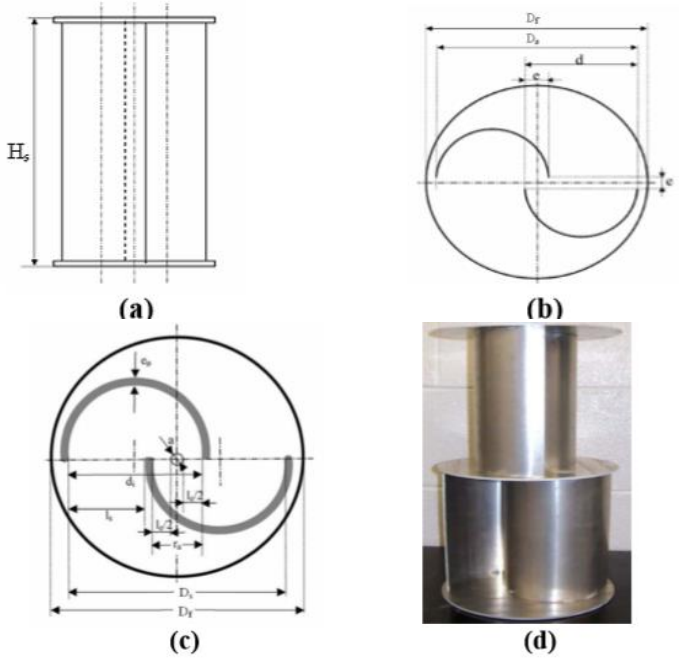
H = Tinggi rotor Turbin Savonius (m)

D = Diameter rotor Turbin Savonius (m)

Secara umum, nilai Aα dipilih lebih besar dari 1 untuk meningkatkan efisiensi turbin [21].

2.9.4.2 *End Plate* dan *Overlap Ratio*

Telah diketahui bahwa penggunaan *end plate* atau pelat ujung pada kedua sisi rotor turbin menghasilkan kinerja hidrodinamik yang lebih baik. Pengaruh diameter dari pelat ujung (Df) ini yang relatif terhadap diameter (Ds) telah dipelajari pada eksperimen sebelumnya. Nilai kefisien daya yang lebih tinggi ada pada nilai Df sekitar 10% lebih besar dari Ds [29].



Gambar 2.18 Gambar Savonius rotor : (a) Tampak depan (*Single Step*), (b) Tampak atas dari turbin Savonius kovensional (tanpa *shaft*), (c) Tampak atas dengan *shaft*. (d) Turbin Savonius *two step*.
Sumber : Alam, 2009

Selain plat ujung, parameter lainnya yang berpengaruh terhadap performa turbin Savonius adalah *overlap ratio* (β). *Overlap ratio* didefinisikan sebagai rasio antara jarak *overlap blade* turbin (e) seperti pada gambar di atas, terhadap diameter (d) turbin Savonius, seperti pada persamaan berikut [29].

$$\beta = \frac{e}{d} \tag{2.15}$$

Untuk desain turbin dengan *central shaft*, β dapat diperoleh pada persamaan di bawah ini :

$$\beta = \frac{(r_a - a)}{d} \tag{2.16}$$

Dimana :

β = *Overlap Ratio*
e = Jarak *overlap* antar *blade* (m)
d = Diameter rotor Turbin Savonius (m)
r_a = Jarak *overlap* antar *blade* (m)
a = Diameter *shaft* Turbin Savonius (m)

Efesiensi terbaik dari turbin Savonius diperoleh dari nilai β antara 20% sampai 30%.

2.9 Turbin Savonius Tipe *Twisted Blade*

Terdapat jejak penelitian yang sangat panjang tentang pengembangan performa turbin Savonius yang berawal dari bentuk konvensional, hingga sampai kepada bentuk *twisted blade*.

2.9.1 Peta Jalan Penelitian Turbin Savonius

Pada turbin Savonius dengan dua *blade* konvensional, torsi starting hampir mendekati nol nilainya apabila arah air 90^0 terhadap ujung lancip blade. Inilah alasan mengapa banyak peneliti lebih condong untuk menggunakan turbin Savonius yang dikembangkan menjadi *double step*, yang mana antara rotor *step* satu memiliki sudut relatif sebesar 90^0 terhadap rotor *step* dua. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan turbin Savonius *double-step* memiliki performa sedikit lebih baik dibandingkan tipe turbin *single-step* atau turbin Savonius konvensional, dari segi torsi maupun daya [30].

Para peneliti telah menemukan metode untuk meningkatkan kemampuan starting dari turbin Savonius dan menginvestigasi kelayakan dari turbin Savonius yang diterapkan sebagai turbin angin. Hayashi et al. (2005) merancang turbin savonius dengan *three stage*, dengan perbedaan sudut fase120^0 antar *stage* yang berdekatan. Khan (1978) menguji desain yang mirip seperti ini menggunakan tipe *double stage* dengan perbedaan fase 90^0 [31].

Turbin dengan rotor tiga *stage* dan dua *stage* sedikit meningkatkan kemampuan *starting* turbin dengan mengurangi variasi torsi (lebih stabil) dan mengurangi *range* dari torsi *starting* negatif.

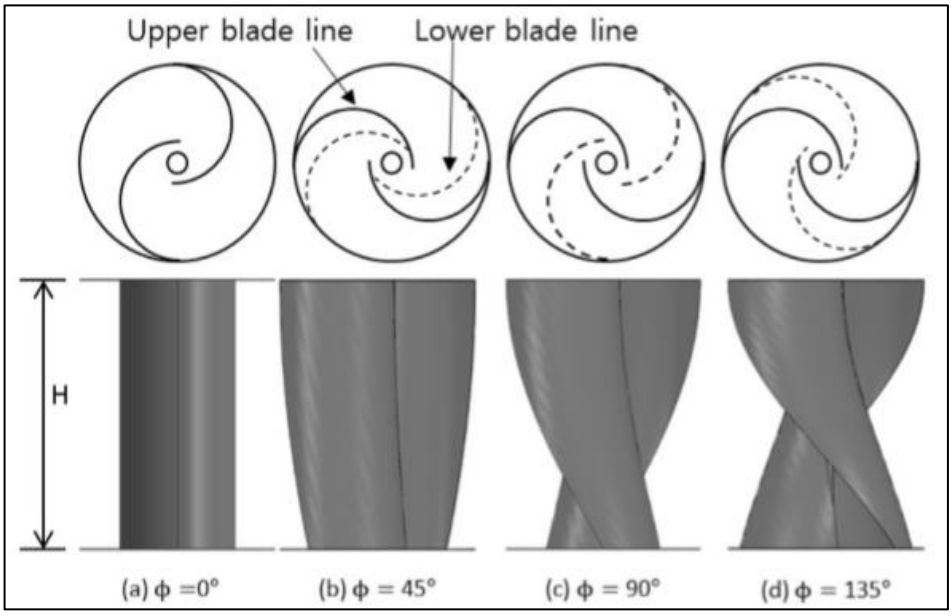
Usaha lainnya yang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan *starting* dari turbin Savonius dilakukan Ali (2013) dengan membandingkan turbin Savonius konvensional dengan dua *blade* dan tiga *blade*. Hasilnya menunjukkan bahwa turbin dengan dua *blade* lebih efisien dari tiga *blade* [11]. Hal ini dikarenakan peningkatan jumlah *blade* memberikan kontribusi peningkatan torsi *negative* secara dignifikan, seiring bertambahnya area *projected* dari turbin.

Kamoji dkk. (2008) menguji turbin Savonius *single stage*, *two stage* dan *three stage* dengan beragam nilai *aspect ratio*. Pengujian menunjukkan hasil adanya penurunan performa seiring bertambahnya jumlah stages, untuk nilai *aspect ratio* yang sama [12].

Saha dkk. (2008) melakukan penelitian yang mirip seperti diatas dengan menggunakan bentuk turbin *semicircular* dan *twisted blades*. Berbagai eksperimen telah dilakukan untuk mengoptimasi parameter turbin Savonius mulai dari jumlah stage, jumlah blade, dan juga geometri *blade* [13].

Saha dan Rajkumar (2006) telah menginvestgasi turbin Savonius dengan tiga *blade* dan menggunakan konfigurasi *twisted blades.* Hasil eksperimen menunjukkan adanya peningkatan pada efisiensi dan kemampuan *self* starting, dibandingkan dengan turbin Savonius konvensional. Sudut putar *blade* untuk performa maksimal juga diperoleh dari eksperimen ini [7].

Sharma dkk. (2005) menguji tiga desain dari turbin Savonius dengan material dan *overlap ratio* yang berbeda. Penelitian lebih detail dilakukan oleh Akwa dkk (2012) dalam beberapa konfigurasi yang mungkin pada turbin Savonius, termasuk variasi jarak *blade*, overlap, bentuk geometri, profil, jumlah, serta ketebalan dari *blade*. Peningkatan performa sebesar 50% dikonfirmasi dari hasil penelitian tersebut [23].



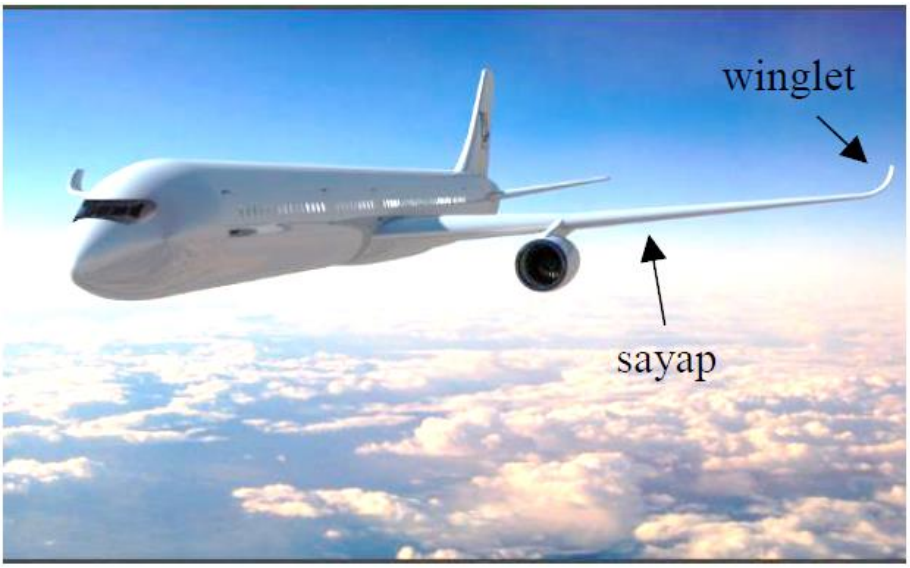
Gambar 2.19 Tampak atas dan samping bentuk turbin dengan sudut putaran berbeda (garis tebal: garis kontak pelat atas dan garis putus: pelat bawah.
Sumber : Lee, 2016

Deb dkk. (2013) melakukan analisis yang serupa menggunakan FLUENT 6.2 pada turbin Savonius dengan *blade* yang sudut memiliki sudut putar 45^0. Penelitian lainnya yang menarik dilakukan oleh D'Alessandro dkk. (2010) menggunakan perangkat lunak FLUENT yang dikombinasikan perangkat lunak MATLAB. Data *Computational Fluid Dynamics* (CFD) diimpor menuju MATLAB dan kecepatan angular pun telah dihitung dan dimasukkan kembali sebagai parameter CFD berikutnya. Model matematika telah divalidasi dengan cara membandingkan hasil simulasi dengan pengujian di *Environmental Wind Tunnel Laboratory at Polytechnic University of Marche* ketika mereka menguji model turbin Savonius [23].

El-Aksary dkk. (2015) menganalisa tiga desain berbeda dari *end plate* turbin Savonius pada FLUENT 6.3 untuk meningkatkan performa (Alam, 2009). Oleh karena itu, penelitian tugas akhir ini terfokus yang belum pernah dilakukan pada optimasi desain, yaitu turbin Savonius melalui variasi *stage*, *twisted blade*, dan *aspect ratio* terhadap parameter performanya apabila diterapkan di Selat Lampa [23].

2.10 *Tip Raked Propeller*

Tip Rake Propeller (TRP) merupakan propeller yang dimana pada ujung daun *propeller* dibengkokkan. Ada dua jenis TRP yagn dikembangkan berdasarkan penelitian yang terdahulu, yaitu *Forwad Tip Rake Propeller* (FTRP) ujung daun propeller dibengkokkan kearah *suction side*, dan *Backward Tip Rake Propeller* (BTRP) dimana ujung daun dibengkokkan ke arah *pressure side*. FTRP dsebut juga dengan istilah Kappel Propeller, sedangkan BTRP memiliki istilah lain sebagai *Contracted and Tip Loaded* (CLT). Teori pada Kappel *Propeller* dan CLT mengacu kepada teori *winglet* pada sayap pesawat, yang berfungsi untuk mengurangi turbulensi pada pesawat .



Gambar 2.20 Bentuk *Winglet* Pesawat Terbang
Sumber : Salahudin M. et.al, 2013

Berikut ini adalah penjelasan lebih detail mengenai *propeller* Kappel, CLT, dan perbandingan performanya dengan *propeller* biasa.

2.10.1 *Propeller* CLT

Contracted and Loaded Tip propellers (CLT) telah dikembangkan sejak tahun 80-an, setelah uji coba pertama kali dilakukan pada *Tip Vortex Free propellers* (TVF), dian berdasarkan uji coba tersebut, didapatkan hasil sebagai berikut :

- Bagian ujung plat yang terletak di *suction side* bersifat kurang penting dan merugikan.
- Geometri plat bagian tip harus disesuaikan sesuai dengan kontraksi *fluid vein* yang melintasi piringan *propeller*.

Setelah uji coba tersebut, SISTMAR, sebuah perusahaan di Madrid telah melakukan pengembangan desain dan pemasaran dari *propeller* CLT. *Propeller* ini memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. Tip *Chord*-nya terbatas
2. Ujung plat dicocokkan dengan *blade tip*, yang terletak di *pressure side*.
3. Ujung *blade* menerima beban yang substansial.
4. Gaya dorong meningkat dari akar *tip of blade.*
5. *Low to moderate skew.*

Propeller CLT telah digunakan pada lebih dari 280 kapal, mulai dari kapal niaga, kapal penumpang, hingga kapal dengan fungsi khusus, seperti kapal patroli, katamaran, *Landing crafts*, *Oceanographic*, dan *Yachts*. Pengaplikasian juga sangat luas, yaitu dapat digunakan untuk muatan hingga 300.000 DWT, daya hingga 22 MW per *propeller*, dan kecepatan hingga 36 knot. Berikut ini dalah keuntungan menggunakan *propeller* CLT dibandingkan dengan *propeller* konvensional [32].

1. Efisiensi lebih tinggi 5 % hingga 8 % (Penghematan bahan baar, mengurangi emisi, *top speed* lebih tinggi, dan daya jelajah kapal lebih jauh).
2. Pencegahan terjadinya kavitasi pada *tip vortex* (Lebih minim suara, minim getaran, minim pulsa tekanan, dan rasio area yang lebih kecil).
3. Gaya dorong yang lebih besar (Diameter optimal *propeller* yang lebih kecil, dan manuver yang lebih baik).

Gambar 2.21 *Propeller* FP CLT 5 *Blade* yang Dipasang pada Kapal Kontainer
Sumber : SINM, 2014

2.10.2 *Propeller* Kappel

Konsep *propeller* Kappel pertama kali diajukan Prof. Jens J. Kappel dan Prof. Poul Andersen di awal tahun 90-an dan didasarkan pada prinsip *non-planar lifting surfaces* yang diaplkasikan pada desain sayap pesawat modern untuk mendapatkan rasio *lift* dan *drag* yang bagus.

Propeller Kappel pertama kali dipasanf pada kapal MV Nordamerika di tahun 2000 melalui Kapriccio R&D Project. *Propeller* Kappel terlihat mirip dengan *propeller* konvensional, karena *winglet* terintegrasi penuh dengan *blade propeller*. *Propeller* Kappel memiliki karakteristik sebagai berikut :

1. *Winglet* telah terintegrasi dengan daun *propeller*.
2. Ujung daun propeller dibengkokkan ke arah *suction side*.
3. *The winglet is loaded.*
4. *Low to moderate skew.*

Propeller Kappel memiliki keuntungan yang sama dengan *propeller* CLT, dibandingkan dengan *propeller* konvensional. Peningkatan efisiensi yang didapat dari penggunaan *propeller* Kappel tergantung kepada jenis kapalnya. *Propeller* tipe ini paling efisien ketika digunakan pada kapal dengan koefisien blok yang besar, yaitu *tanker, bulk carrier,* dll. [32].

Gambar 2.22 *Propeller Kapple* Yang dipasang Pada Kapal
Sumber : SINM, 2014

2.10.3 Sudut *Tip Rake*

Dalam penerapannya, *tip rake* pada *propeller* memiliki sudut tertentu yang memiliki pengaruh terhadap performa *propeller* itu sendiri. Setidaknya ada dua penelitian yang membahas tentang pengaruh sudut ini, yaitu :

1. Penelitian yang dilakukan oleh Okazaki pada tahun 2015 yang meneliti tentang variasi sudut *tip rake* terhadap performa *propeller*, dengan variasi sudut $0^0 – 5^0$, dan $0^o – 10^0$.
2. Penelitian yang dilakukan oleh Ghassemi pada tahun 2018 yang meneliti juga tentang pengaruh sudut *tip rake* terhadap performa *propeller*, dengan variasi sudut $0^0 – 6^0$.

Pada penelitian tugas akhir ini, variasi sudut tip rake yang akan dianalisa pada Turbin Savonius Twisted Blade adalah 0^0, 5^0 dan 10^0.

2.10.4 Perbandingan Performa *Propeller Tip Rake* dengan *Propeller* Konvensional

Penelitian telah dilakukan dari segi performa untuk melihat perbandingan antara *Propeller Tip Rake* dengan *Propeller* Konvensional. Berikut ini adalah penelitian yang membahas tentang perbandingan performasalah satunya dibahas oleh Cheng.

Penelitian yang dilakukan oleh Cheng, pada tahun 2010 yang membandingkan performa *propeller* Kapple dengan *propeller* konvensional. Dari penelitian ini, didapatkan hasil bahwa Kedua hasil komputasi dan data eksperimental memprediksi bahwa kepercayaan akan meningkat ketika jumlah Reynolds meningkat, dan torsi akan menurun ketika jumlah Reynolds meningkat. Dari segi performa, dari penelitian ini juga didapatkan bahwa bahwa *propeller* Kappel memiliki efek skala yang lebih besar baik untuk gaya dorong maupun torsi. Namun, data eksperimental menunjukkan bahwa *propeller* Kappel memiliki efek skala yang lebih besar hanya untuk torsi. Perbandingan performa secara lebih jelas dapat dilihat dari grafik KT, 10KQ, J antara Kappel *propeller* dan *propeller* Konvensional di bawah ini.

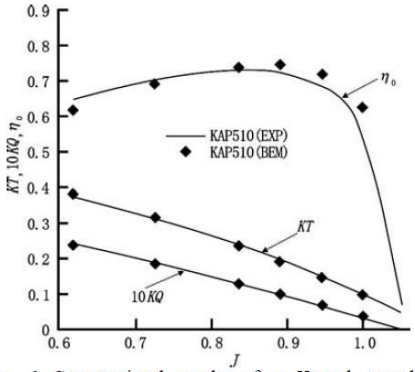


Fig. 6 Computational results of a Kappel propeller KAP510 from the potential flow method

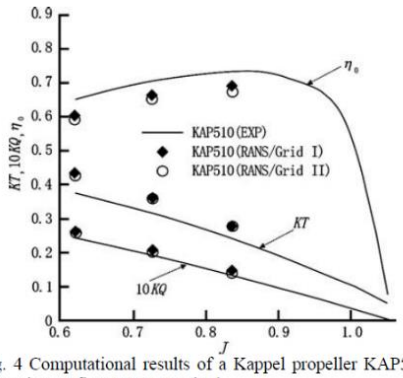


Fig. 4 Computational results of a Kappel propeller KAP510 from viscous flow RANS method

Gambar 2.23 Perbandingan Grafik KT, 10KQ, J antara Kappel *propeller* dan *propeller* Konvensional
Sumber : Cheng, 2010

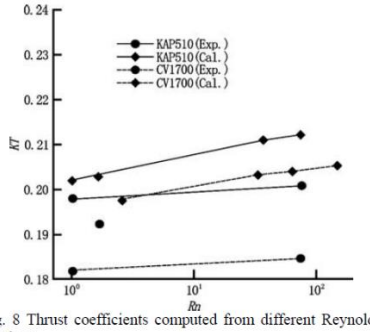


Fig. 8 Thrust coefficients computed from different Reynolds numbers

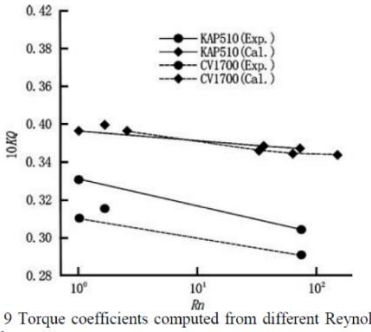


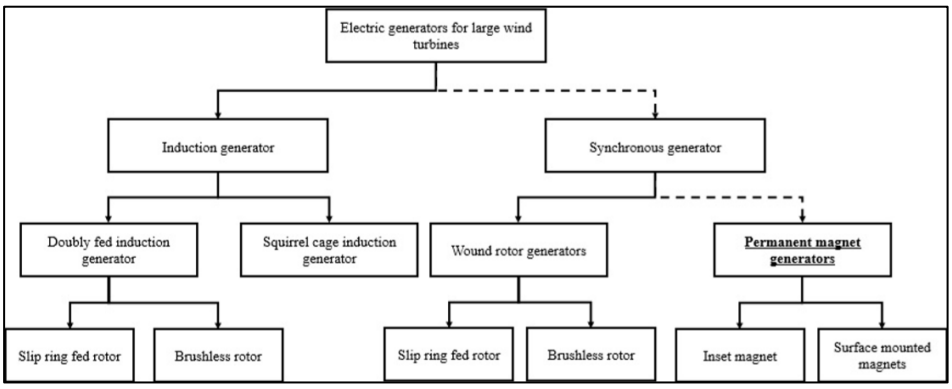
Fig. 9 Torque coefficients computed from different Reynolds numbers

Gambar 2.24 Perbandingan Grafik KT, antara Kappel *propeller* dan *propeller* Konvensional
Sumber : Cheng, 2010

2.11 *Permanent Magnet Generator*

Konversi energi mekanik dari turbin sumbu vertikal (pada penelitian ini menggunakan turbin Savonius) menjadi energi listrik dilakukan dilakukan dengan menggunakan generator yang digabungkan dengan poros rotor turbin. Untuk aplikasi listrik dengan tegangan tinggi, sistem arus listrik *Alternating Current* (AC) digunakan, sedangkan untuk aplikasi listrik tegangan rendah, sistem arus listrik *Direct Current* (DC) digunakan. Pemilihan generator memegang peranan yang sangat penting untuk aplikasi turbin.

Beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan generator adalah sumber, jenis beban, dan kecepatan putaran turbin. Jenis generator sering diaplikasikan pada turbin air adalah generator induksi dan sinkronous, seperti pada gambar di bawah [23].



Gambar 2.25 Jenis generator yang paling sering diaplikasikan pada turbin.
Sumber : Yadav, 2016

2.12 Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga atau *Finite Element Method* (FEM) adalah sebuah metode untuk melakukan pendekatan atau taksiran numerik sebagai solusi sebuah permasalahan nilai batas, yang merupakan sepaket persamaan diferensial biasa yang solusinya mengacu kepada kondisi batasan tertentu.

Basis dari *finite element analysis* (FEA) bergantung pada penguraian domain menjadi sejumlah sub-domain (elemen) yang mana solusi perkiraan sistematis dibangun dengan menerapkan metode residual variasional atau tertimbang.

Efek dari hal tersebut, FEA dapat mengurangi masalah menjadi sejumlah terbatas yang tidak diketahui dengan membagi domain menjadi elemen dan dengan mengekspresikan variabel bidang yang tidak diketahui dalam hal fungsi perkiraan yang diasumsikan dalam setiap elemen. Fungsi-fungsi ini (juga disebut fungsi interpolasi) didefinisikan dalam hal nilai-nilai variabel lapangan pada titik-titik tertentu, disebut sebagai *node*.

Metode elemen hingga diaplikasikan sebagai prosedur numerik yang dapat digunakan untuk mendapatkan solusi untuk permasalahhan di bidang teknik yang melibatkan analisa perpindahan panas, elektromagnetik, dan aliran fluida.

2.13 Prosedur Simulasi *Finite Element Method*

Sebelum Simulasi *FEM* dapat dilakukan, model dari benda yang akan dianalisa perlu dibuat terlebi dahulu. Perangkat lunak yang digunakan untuk membuat model tergantung pada kompabilitas *solver* dengan tipe extension data model tersebut, dimana ada kemungkin CAD dari model harus dihubungkan dengan *solver*. Hal ini berfungsi sebagai basis grafik dari tampilan model, standar seperti IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) atau STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*). Belakangan ini, penggambaran model tiga dimensi pada perangkat lunak simulasi.

Sekarang tergantung kepada preferensi penggambar, untuk penggunaan perangkat lunak. Namun, disarankan untuk mengambil data CAD asli untuk simulasi guna mengurangi jam kerja. Untuk prosedur simulasi yang akan dilakukan pada penilitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut, menyesuaikan dengan keutuhan simulasi. [33].

1. Membuat model 3 dimensi dari turbin Savonius
2. Memilih tipe elemen
3. Membuat *meshing*
4. Memasukkan parameter input
5. Menentukan batasan
6. Pemecahan masalah
7. Pengecekan hasil berupa torsi dan RPM

2.13.1 *Marine Computational Fluid Dnamics (CFD)*

Compuidational fluid dynamics (CFD) mengacu kepada sebuah metode untuk mencari solusi numerik (salah satu FEM) yang berhubungan persamaan aliran fluida, dengan bantuan komputer. Meski awalnya metode ini dikembangkan di bidang aeronautika, belakangan ini metode ini juga banyak digunakan dalam industri kelautan untuk menganalisa kapal, bangunan apung, ataupu pembangkit listrik tenaga arus laut. Oleh karena itu, terdapat fokusan khusus berupa *Marine* CFD yang berkaitan dengan metode CFD di bidang kelautan.

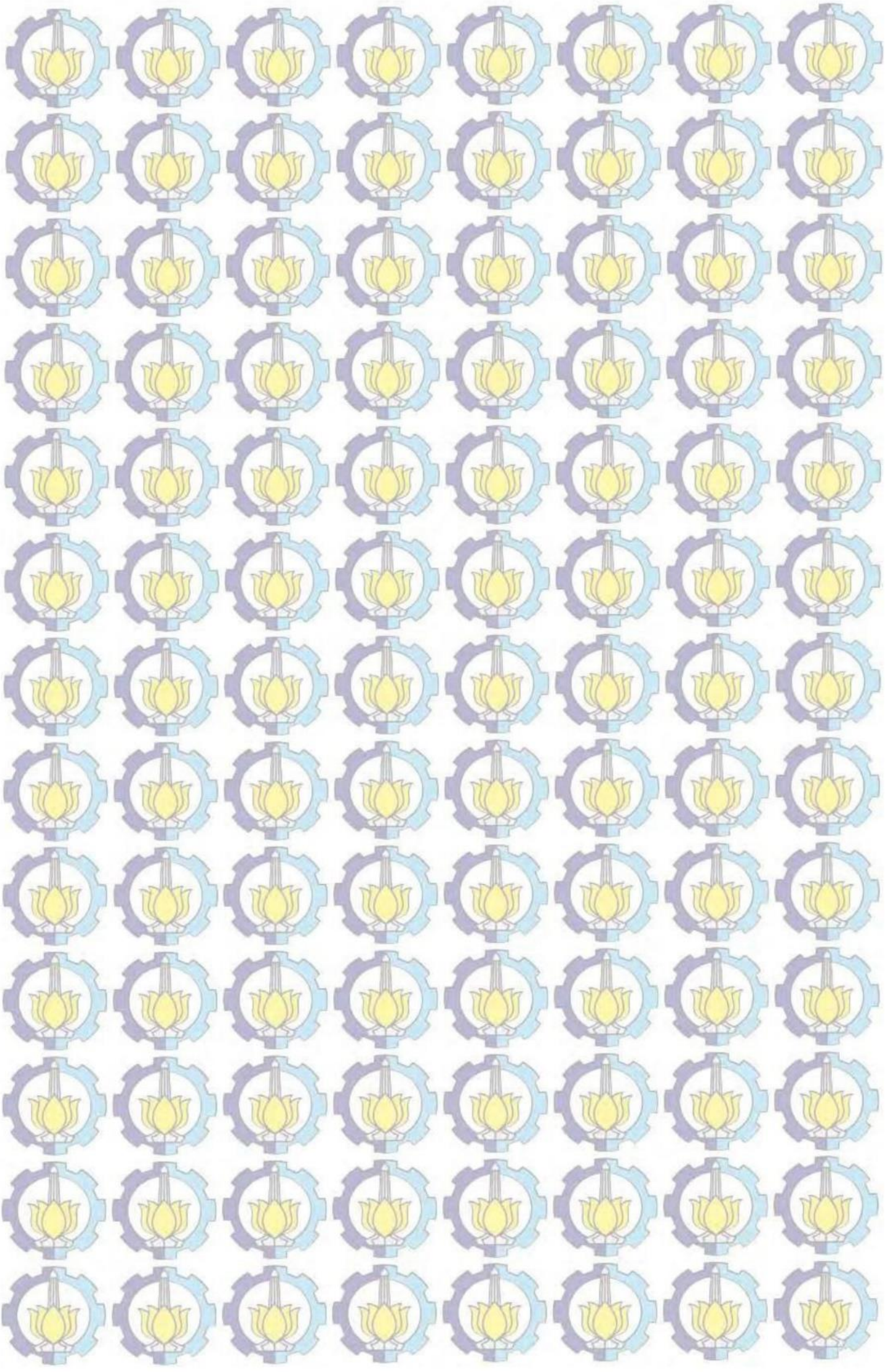
Marine CFD digunakan dalam berbagai cara dan pada semua tahap desain : dari awal desain untuk perhitungan *high-end* di mana penentuan kinerja turbin yang akurat dibutuhkan. Fisika aliran di sekitar turbin seperti pola arus atau bidang bangun dapat disimulasikan dengan CFD, yang juga dapat digunakan untuk memprediksi perilaku turbin sebagai interaksi dengan arus laut. Hasil simulasi dan informasi yang dikumpulkan digunakan untuk pengembangan performa turbin Savonius di masa yang akan datang [34].

2.14 Perangkat Lunak Yang Digunakan Dalam Penelitian

Dalam penelitian tugas akhir ini, terdapat dua perangkat lunak yang digunakan dalam pengerjaan, yaitu perangkat lunak NUMECA FINE MARINE untuk mensimulasikan turbin Savonius.

2.14.1 NUMECA FINE MARINE

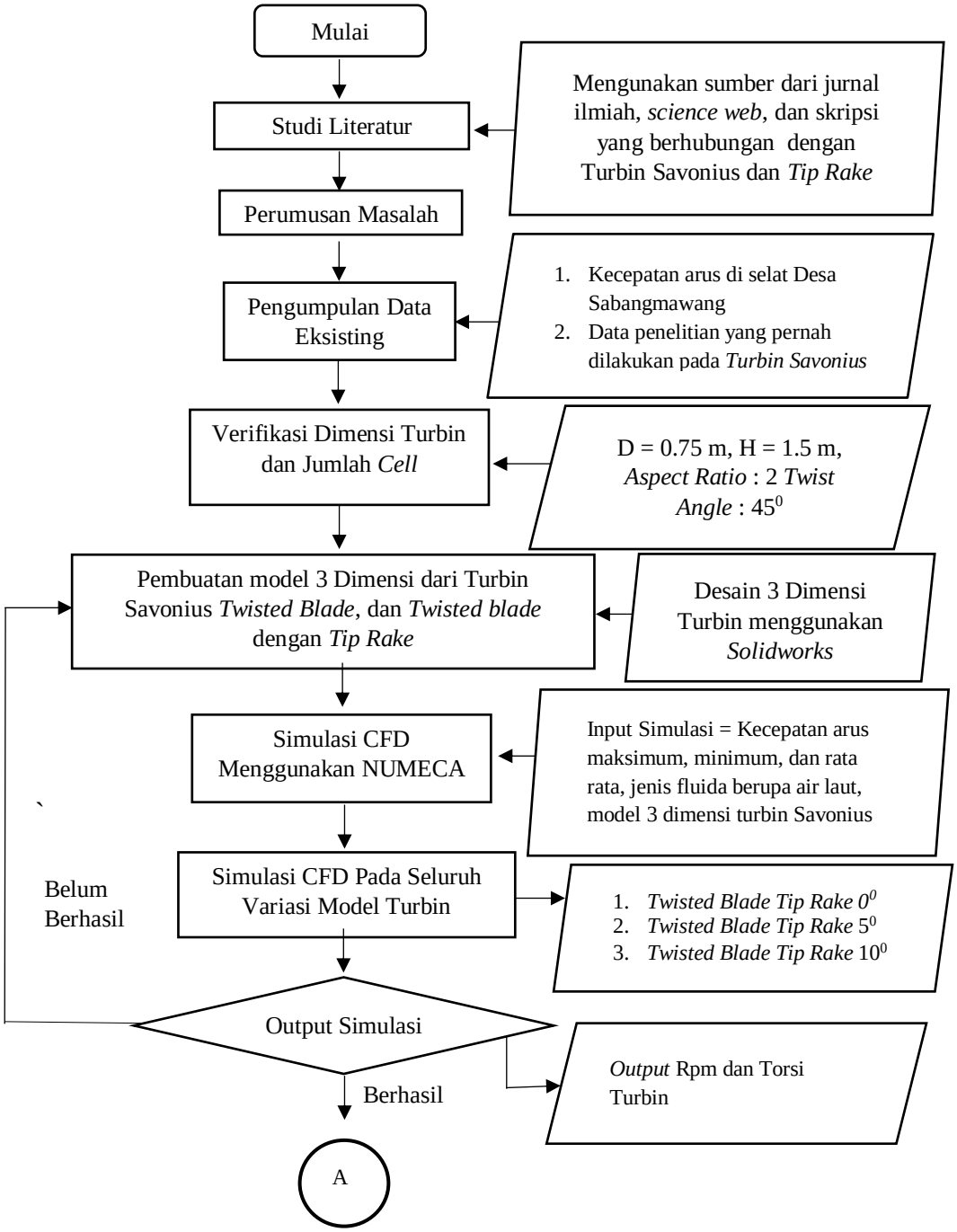
FINE ™/Marine adalah sebuah perangkat lunak CFD terintegrasi yang unik untuk simulasi aliran mono-fluida dan multi-fluida untuk segala jenis kapal, kapal atau kapal pesiar termasuk berbagai jenis pelengkap. Antarmuka pengguna grafis yang kuat dan dapat disesuaikan mendorong pengguna ke dalam seluruh proses simulasi dan mengintegrasikan fitur-fitur khusus untuk aplikasi yang berbeda. Saat ini, NUMECA FINE MARINE merupakan perangkat lunak paling akurat yang ada di pasaran (NUMECA, 2014).

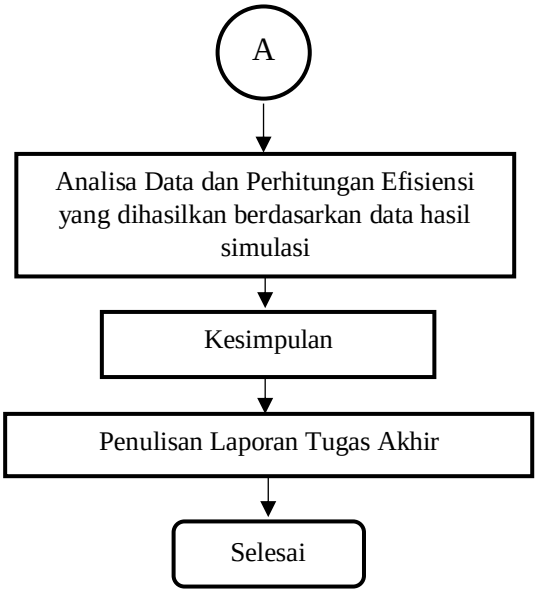


BAB 3
METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alur Penelitian

Alur pengerjaan Tugas Akhir ini disajikan dalam metodologi penelitian sebagai berikut pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

3.2 Prosedur Penelitian

Berikut adalah penjelasan lebih detail mengenai diagram metodologi penelitian di atas :

3.2.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari teori dasar yang menunjang penelitian tugas akhir dan studi mendalam mengenai referensi mengenai materi yang berhubungan dengan Turbin Savonius dan pengembangannya untuk meningkatkan efisiensi, serta penambahan *tip rake* pada *propeller* dan pengaruhnya terhadap performa. Literatur – literatur tersebut didapatkan dari *text book*, journal, artikel, internet, dan lain-lain.

3.2.2 Perumusan Masalah

Pada tahap ini, dilakukan perumusan masalah yang eksisting yang berhubungan dengan latar belakang serta objek penelitian. Berdasarkan penelitian sebelumnya, didapatkan bahwa Turbin Savonius memiliki permasalahan efisiensi yang rendah, namun cocok untuk penerapan listrik skala kecil dan kecepatan fluida yang rendah.

Juga berdasarkan penelitian sebelumnya, didapatkan bahwa penerapan *tip rake* pada *propeller* dapat meningkatkan *thrust* dan torsi. Dengan melihat serta latar belakang sulitnya elektrifikasi daerah 3T di Indonesia, maka inti rumusan permasalahan pada tugas akhir ini adalah menganalisa performa turbin Savonius dengan modifikasi *twisted blade* dan penerapan *tip rake*.

3.2.3 Pengumpulan Data Eksis

Pada tahap ini, data - data mengenai peforma, dimensi berupa diameter,tinggi, dan *aspect ratio,* serta modifikasi apa saja yang telah dilakukan pada turbin Savonius untuk meningkatkan performanya. Hal ini penting karena dalam penelitian turbin energi terbarukan, belum ada standar yang menyebutkan tentang pengaturan dimensi turbin. Pada tahap ini juga menjelaskan data kecepatan arus laut yang akan dijadikan input pada simulasi CFD, yaitu data kecepatan arus maksimal, minimal, dan rata – rata . Data yang diperoleh dari selat di Desa Sabangmawang adalah sebagai berikut :

- Hasil pengukuran pada stasiun satu menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,7387 m/s pada arah 20^0 (U-TL) , minimum 0,001 m/s pada arah 90^0 (T), dan kecepatan rata – rata arus 0,268401 m/s.
- Hasil pengukuran pada stasiun dua menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,9065 m/s pada arah 317.2^0 (U-BL), minimum 0,003 m/s pada arah 180 (S), dan kecepatan rata – rata arus 0,33859 m/s.

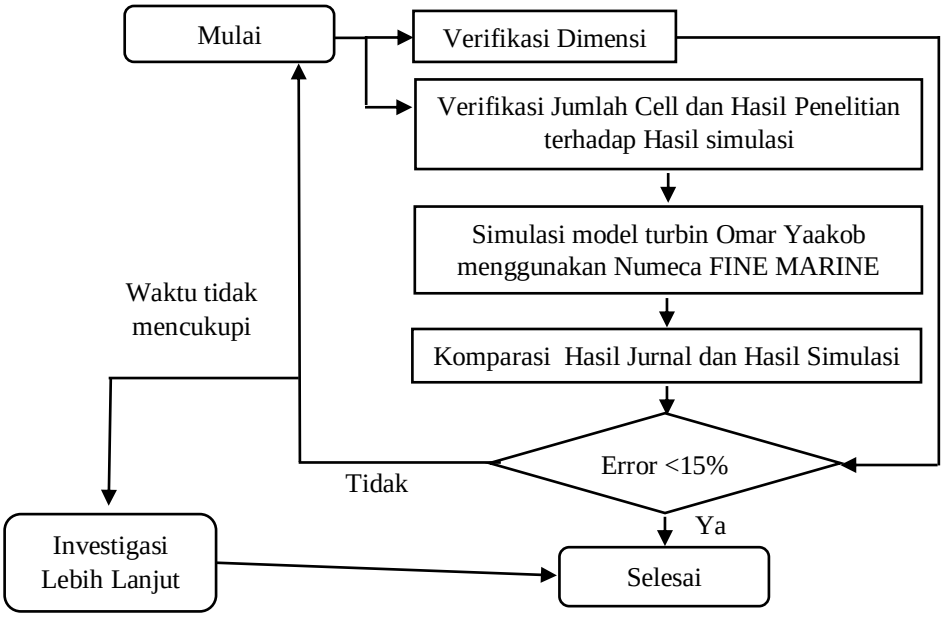
Selain kedua data pada selat di Desa Sabang Mawang tersebut, terdapat juga data rata – rata kecepatan arus di Malaysia, yaitu 0.56 m/s, sesuai dengan penelitian dan analisa yang dilakukan oleh Omar Yaakob dari Universitas Teknologi Malaysia, sebagai validasi dan pembanding terhadap model turbin *Twisted* Savonius dengan *Tip Rake* yang akan dianalisa pada penelitian ini.

Dari seluruh data kecepatan di atas, maka kecepan arus laut yang akan digunakan adalah hasil pengukuran pada stasiun dua, yaitu kecepatan maksimum 0.9 m/s, kecepatan rata – rata 0.34 m/s, dan kecepatan arus di Malaysia sebesar 0.56 m/s. Sedangkan untuk kecepatan minimum 0.003 m/s diabaikan karena terlalu rendah.

3.2.4 Verifikasi Dimensi dan Jumlah *Cell*

Proses verifikasi pada penelitian tugas akhir ini diperlukan sebagai proses yang mengacu pada pengertian verifikasi pada definisi verifikasi dalam ISO 9000:2005 pada poin 3.8.4, yaitu "verifikasi : konfirmasi, melalui penyediaan bukti objektif, bahwa persyaratan yang ditentukan telah dipenuhi". Bukti objektif yang tersedia adalah berupa dimensi, dan jumlah *cell* yang dinyatakan dalam penelitian Turbin Savonius yang dilaksanakan oleh Omar Yaakob. Selain itu, persyaratan yang perlu dipenuhi adalah terdapat *software* yang keakuratannya memenuhi untuk melakukan simulasi CFD, dimana di Laboratorium MMD, *software* yang disepakati adalah Numeca FINE MARINE.

Dalam jurnal penelitian Omar Yaakob, tidak disebutkan mengenai *software* yang digunakan untuk mensimulasikan model turbin. Oleh karena itu, untuk mengetahui relevansi hasil simulasi menggunakan FINE MARINE, dalam penelitian ini dibuatlah perbandingan antara hasil simulasi Turbin Savonius pada jurnal penelitian Omar Yaakob dan hasil simulasi model turbin yang sama, yang di *running* menggunakan Numeca FINE MARINE. Makna *error* dalam diagram dibawah merupakan ukuran seberapa jauh perbedaan dari perbandingan hasil simulasi tersebut.



Gambar 3.2 Diagram Alir Proses Verifikasi Tugas Akhir

Dasaran ditentukannya parameter verifikasi pada penelitian tugas akhir ini adalah jurnal penelitian Omar Yaakob yang menyebutkan bahwa dimensi model turbin savonius yang digunakan memiliki diameter 0.75 m dan tinggi 1.5 m. Sedangkan untuk jumlah *cell* yang digunakan pada simulasi 3 dimensi adalah sebanyak 800.000 hingga 1.500.000 *cell*. Apabila setelah dilakukan beberapa kali *running* simulasi *error* masih bernilai lebih dari 15%, maka akan diinvestigasi lebih lanjut apa yang menjadi penyebabnya.

Selain itu, dimensi turbin yang ditentukan sebagai parameter kunci adalah berdasarkan desain Turbin Savonius yang disimulasikan oleh Omar Yaakob, karena pada penelitiannya, fluida yang digunakan adalah berupa air laut, tidak seperti penelitian lain dimana Turbin Savonius dijadikan *wind turbine*. Faktor dimensi lainnya juga mempertimbangkan turbin Savonius yang dianalisa pada penelitian sebelumnya, yaitu dengan penambahan fin dan *tapered blade* pada tahap studi literasi. Hasil dari studi literasi tersebut adalah berupa matriks di bawah ini.

Tabel 3.1 Matriks Perbandingan Pengembangan Turbin Savonius yang Akan Dianalisa

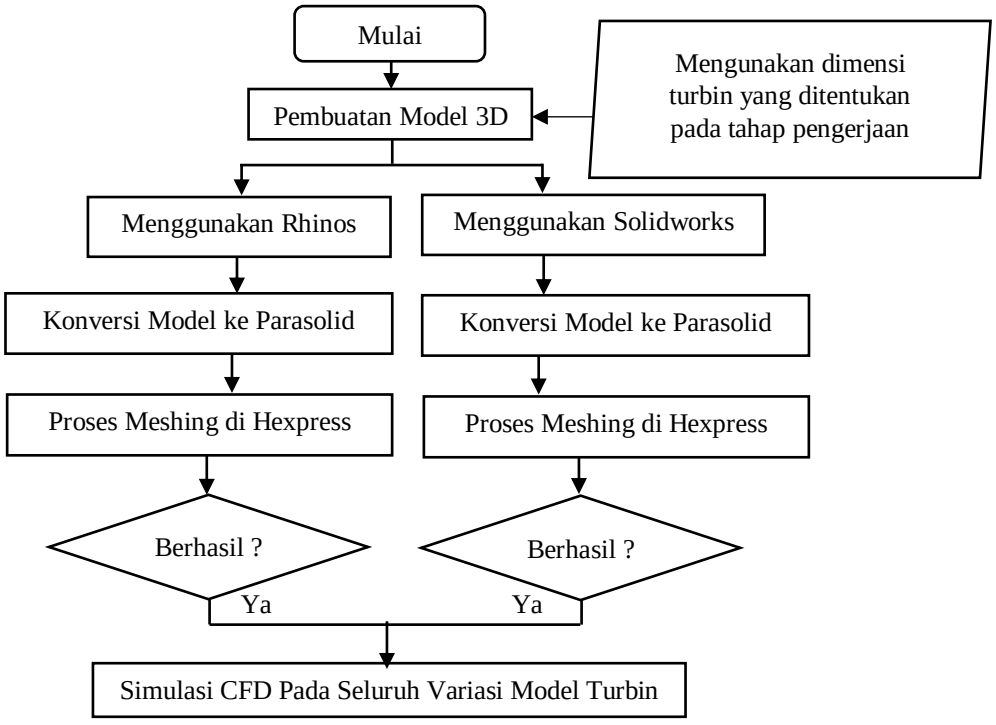
		Blade Improvement			
		Fin Addition	Twisted Blade	Tapered	Tip Rake
Parameter	Cp Improvement	17 % - 22% increase	7% - 27% increase (Highest)	0.33% Decrease	To Be Discovered
	Ct Improvement	0.07 % - 12% increase (Highest)	0% - 8% increase	20% Decrease	To Be Discovered
	Manufacture	Easy to manufacture, could use simple tools	Hard to manufacture, need moulding	Hard to manufacture, need moulding	To Be Discovered
	Time to Man.	Short, due to simple geometry	Medium due to advance geometry	Long due to very advance geometry	To Be Discovered
	Cost of Fabrication	Low	High	High	To Be Discovered
	Self Starting Capability	Yes	Yes (Best)	Yes	To Be Discovered

Oleh karena itu, supaya penelitian ini *apple to apple*, maka dimensi Turbin Savonius yang dianalisa dan disimulasikan pada penelitian ini adalah sama dengan dimensi turbin pada penelitian Omar Yaakob, yaitu sebagai berikut :

- Diameter Turbin : 750 mm
- Tinggi Turbin : 1500 mm
- *Aspect Ratio* : 2
- Jumlah *Blade* : 2
- *Twist Angle* : 45^0
- Jumlah *Stage* : 1

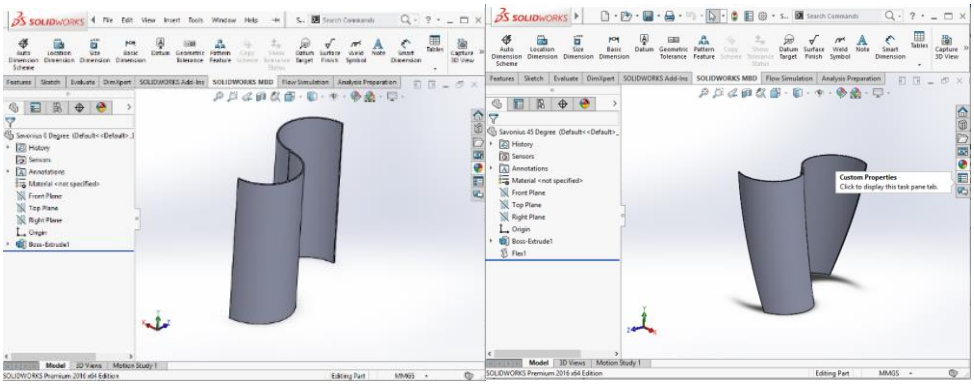
3.2.5 Pembuatan Model 3 Dimensi dari Turbin Savoniu *Twisted Blade*, dan *Twisted Blade* dengan *Tip Rake*

Dalam tahap pembuatan model 3 dimensi dari turbin, dimensinya mengikuti parameter kunci dari tahap sebelumnya. Pembuatan model turbin harus berbentuk solid agar nantinya dapat disimulasikan menggunakan *computational fluid dynamics* yaitu dengan *software* Numeca. Pengerjaan pada tahap ini digambarkan dalam diagram alir di bawah ini.



Gambar 3.3 Diagram Pembuatan Model 3D

Rincian dari diagram alir di atas adalah sebagai berikut. Dimulai dari penggunaan data dimensi turbin yang lengkap, proses selanjutnya adalah pembuatan *surface* menggunakan *software* Solidworks atau Rhinos dan menyolidkan turbin tersebut dengan disimpan dalam bentuk *parasolid* (*x_t) menggunakan *software* Rhinos atau Solidwork yang akan dijadikan input pada software *Hexpress* Numeca. Pada tahapan Hexpress ini, apabila sampai pada tahapan *Viscous Layer* tidak masalah, maka model dikatakan berhasil dibuat, dan metode pembuatan model ini berlaku pada seluruh model variasi. Model variasi yang dibuat pada Tugas Akhir ini adalah dengan Turbin Savonius *Twisted Blade*, dan *Twisted blade* dengan *Tip Rake* dengan sudut *twist* 45º.



Gambar 3.4 Perbandingan Model 3 Dimensi dari Turbin Savonius Konvensional (Atas) dan *Twisted Blade* (Bawah) 45^0

3.2.6 Simulasi CFD Menggunakan NUMECA Pada Seluruh Variasi Model Turbin

Setelah model 3 dimensi turbin dengan variasi modelnya seleai, tahap selanjutnya adalah mensimulasikannya dengan metode CFD. Pada proses ini dimasukkan data input kecepatan arus dan jenis fluida, dan model turbin sebagai objek yang dianalisa. Simulasi model dilakukan menggunakan *software* Numeca Fine Marine 7.2. Proses Simulasi CFD menggunakan Cfx Solver untuk mengetahui hasilnya.

Pengerjaan simulasi CFD ini memiliki tahapan sebagai berikut :

1. Simulasi model Turbin Savonius pada penelitian Omar Yaakob, yaitu *Helical* 180 derajat, dengan kecepatan sebesar 0.56 m/s, yang hasilnya akan dibandingkan dengan Turbin Savonius *Twisted Blade* 45^0 dengan *Tip Rake.*

2. Simulasi model Turbin Savonius *Twisted Blade* dengan sudut Tip Rake 0 derajat pada variasi kecepatan 0.56 m/s, 0.9 m/s, dan 0.34 m/s.
3. Simulasi model Turbin Savonius *Twisted Blade* dengan sudut Tip Rake 5 derajat pada variasi kecepatan 0.56 m/s, 0.9 m/s, dan 0.34 m/s.
4. Simulasi model Turbin Savonius *Twisted Blade* dengan sudut Tip Rake 10 derajat pada variasi kecepatan 0.56 m/s, 0.9 m/s, dan 0.34 m/s.

Seluruh variasi simulasi CFD pada turbin Savonius terangkum dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3.2 Simulasi Pada Turbin Savonius *Twisted Blade* 45^0

Kecepatan	Variasi	Torsi	RPM
0.9 m/s	0^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	5^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	10^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
0.56m/s	0^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	5^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	10^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
0.34 m/s	0^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	5^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi
	10^0 Sudut *Tip Rake*	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi

Tabel 3.3 Simulasi Pada Turbin Savonius *Helical* 180^0 Omar Yaakob

Kecepatan	Torsi	RPM
0.56 m/s	Hasil Simulasi	Hasil Simulasi

3.2.7 Analisa Data Perhitungan Efisiensi Yang Dihasilkan Berdasarkan Data Hasil Simulasi

Hasil simulasi akan dijadikan input perhitungan *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* pada seluruh model yang disimulasikan. Hasil perhitungan ini akan di plot ke dalam grafik, supaya terlihat jelas perbedaan hasil perhitungan antar variasi turbin. Jika hasil yang didapatkan logis, dapat dilanjutkan ke tahap selanjutnya, begitu juga dengan sebaliknya.

3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini adalah mengambil kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan ini berisi jawaban dari permasalahan yang ada dalam penelitian. Sehingga memberikan hasil yang jelas dalam penelitian. Adapun saran yang dapat dicantumkan pada penelitian, apabila terdapat kekurangan yang terdapat dalam penelitian tugas akhir ini.

BAB 4
ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan secara detail tentang data yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini, Perhitungan pada tahap mengenai perhitungan yang dilakukan pada tahap preliminary desain , pembuatan model 3 dimensi dari turbin savonius, sampai ke tahap analisa hasil simulasi CFD. Perhitungan pada preliminary desain nantinya akan dimensi dan geometri turbin savonius yang akan digunakan sebagai model. Setelah dimensi utama turbin diperoleh, selanjutnya model 3d turbin akan dibuat, tanpa dan dengan variasi *tip rake* yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Semua model akan disimulasikan menggunakan *software* Numeca Fine Marine. *Output* simulasi yang akan dicari yaitu parameter performa turbin berupa nilai RPM dan Torsi. Pada akhir bab ini, akan dijelaskan tentang analisa hubungan antara performa turbin savonius terhadap pengaruh variasi *tip rake*, serta kesesuaiannya dengan hipotesa penulis pada bab sebelumnya, yaitu mengetahui perubahan performa pada turbin Savonius.

4.1 Data Kecepatan Arus Laut Yang Digunakan Pada Simulasi CFD

Data yang dijadikan acuan dalam melakukan simulasi adalah data potensi arus laut, yang ada di Desa Sabangmawang yang terletak di Kepulauan Natuna dan juga kecepatan arus laut rata – rata di Malaysia, seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Data kecepatan tersebut adalah data hasil pengukuran pada stasiun dua menunjukkan kecepatan arus maksimal 0,9065 m/s, minimum 0,003 m/s dan kecepatan rata – rata arus 0,33859 m/s. Selain data pada selat di Desa Sabang Mawang tersebut, terdapat juga data rata – rata kecepatan arus di Malaysia, yaitu 0.56 m/s, sesuai dengan penelitian dan analisa yang dilakukan oleh Omar Yaakob dari Universitas Teknologi Malaysia. Oleh karena itu, kecepatan arus yang digunakan dalam simulasi ini adalah 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

4.2 Proses Verifikasi

Proses Verifikasi pada penelitian tugas akhir ini diperlukan sebagai proses yang mengacu pada kebenaran pada penelitian yang telah dilakukan untuk dijadikan pembanding terhadap penelitian yang dilakukan . Maka, penelitian ini menggunakan Verifikasi hasil penelitian yang berjudul *Comparison of Conventional and Helical Savonius Marine Current Turbine Using Computational Fluid Dynamics* dan *Validation Study for Savonius Vertical Axis Marine Current Turbine Using CFD Simulation*, yang dilaksanakan oleh Omar Yaakob. Parameter yang diverifikasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

4.2.1 Verifikasi Dimensi Turbin

Dalam penelitiannya, Omar Yaakob meneliti Turbin Savonius dua blade dengan dimensi sebagai berikut.

Table 1: Dimensions and Condition for Model Simulation

No.	Specification	Value
1	Height of Rotor, H	1.5 m
2	Diameter of Rotor, DR	0.75 m
3	Diameter of Paddles, D_B	0.375 m

Gambar 4.1 Turbin Savonius 2 *Blade* Yang Dianalisa Oleh Omar Yaakob
Sumber : Yaakob, 2013

Oleh karena itu, seluruh model turbin yang dianalisa pada penelitian ini memiliki diameter 0.75 meter, dan tinggi 1.5 meter.

4.2.2 Verifikasi Hasil Penelitian Omar Yaakob dan Jumlah *Cell* Yang Digunakan Saat *Running*

Dalam jurnal penelitian Omar Yaakob, tidak disebutkan perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi. Untuk Lab MMD, perangkat lunak yang teruji validitasnya adalah NUMECA FINE Marine. Oleh karena itu, metode verifikasi yang dilakukan adalah melakukan simulasi pada model turbin Omar Yaakob, dan hasil yang didapat dari simulasi diperbandingkan dengan hasil pada jurnal penelitian.

Selain itu, jurnal penelitian Omar Yaakob juga menyebutkan bahwa untuk simulasi 3D, jumlah *cell* yang digunakan antara 800.000 sampai dengan 1.500.000. Karena jumlah *cell* mempengaruhi hasil simulasi, maka, jumlah *cell* juga akan diverifikasi bersamaan dengan hasil simulasi turbin Omar Yaakob. Simulasi dikatakan valid ketika perbedaan jumlah cell dan hasil simulasi berada di bawah batas 15%. Setelah simulasi model Omar Yaakob dinyatakan valid, maka proses *meshing*, pengaturan *running*, dan jumlah *cell* akan diterapkan pada *running* model turbin savonius pada seluruh variasi model dan kecepatan.

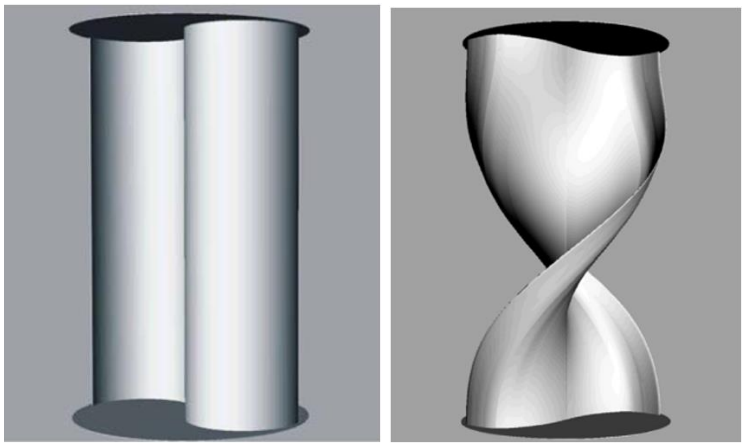
4.3 *Preliminary Design*

Pada tahapan *preliminary design* akan ditentukan dimensi utama dari turbin savonius yang akan dibuat model 3 dimensinya. Dalam hal ini, penentuan dimensi yang spesifik diperlukan, karena belum adanya standar pembuatan turbin energi terbarukan di dunia ini. Hal ini dikarenakan turbin energi terbarukan masih dikembangkan hingga saat ini dalam mencari performa yang paling optimal. Oleh karena itu penentuanjumlah *blade* turbin, dimensi turbin, dan material turbin didasarkan pada kesimpulan hasil penelitian pada turbin savonius yang terdahulu, dan hasil Verifikasi.

4.3.1 Jumlah *Blade* Turbin

Dalam tugas akhir ini, jumlah blade ditentukan sebanyak dua *blade*, dikarenakan berdasarkan penelitian terdahulu, efisiensi tertinggi dari turbin savonius dicapai dengan kondisi menggunakan dua *blade*.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ali pada tahun 2013, ia dengan membandingkan turbin Savonius konvensional dengan dua *blade* dan tiga *blade*. Hasilnya menunjukkan bahwa turbin dengan dua *blade* lebih efisien dari tiga *blade*. Jumlah blade sebanyak dua juga digunakan pada Turbin Savonius yang disimulasikan oleh Omar Yaakob. Maka, dapat disimpulkan secara empiris bahwa jumlah *blade* sebanyak dua merupakan konfigurasi yang optimal untuk Turbin Savonius.

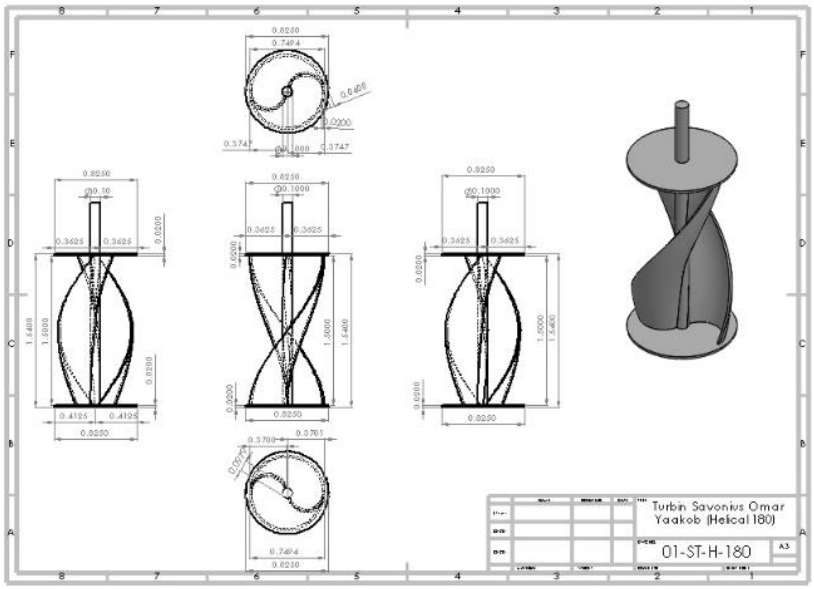


Gambar 4.2 Turbin Savonius 2 *Blade* Yang Dianalisa Oleh Omar Yaakob
Sumber : Yaakob, 2013

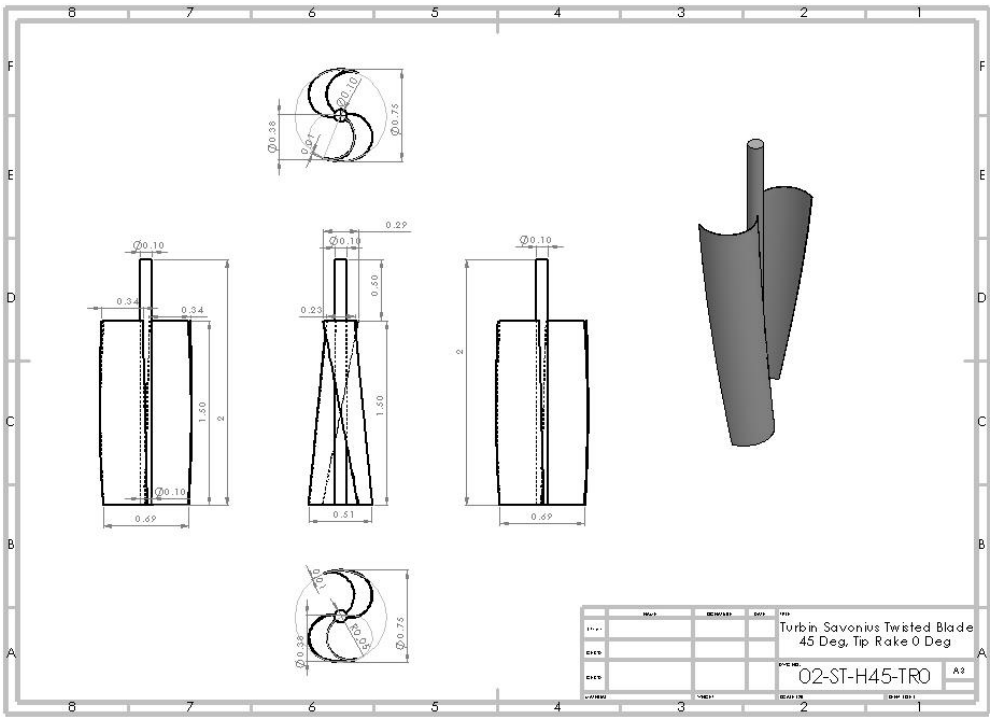
Hal ini juga didukung teori pada penelitian sebelumnya. Hal ini dikarenakan peningkatan jumlah *blade* memberikan kontribusi peningkatan torsi *negative* secara dignifikan, seiring bertambahnya area *projected* dari turbin.

4.3.2 Dimensi Turbin Savonius

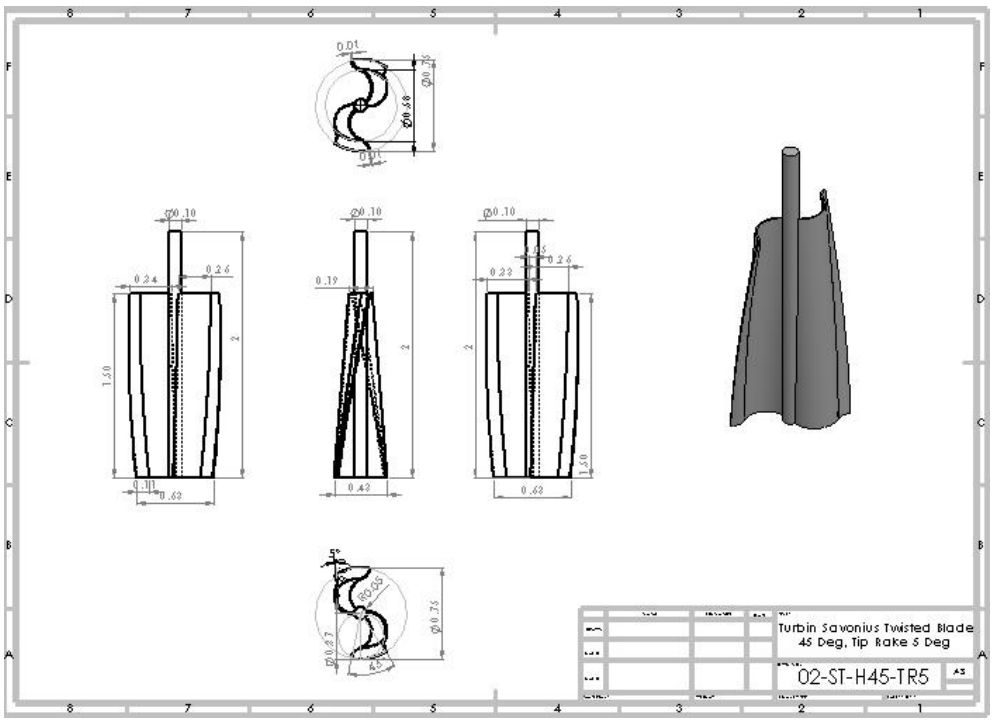
Dimensi turbin yang akan disimulasikan adalah sama dengan dimensi turbin pada penelitian Omar Yaakob, agar penelitian ini terVerifikasi dan perbandingan penelitan menjadi *apple to apple*.



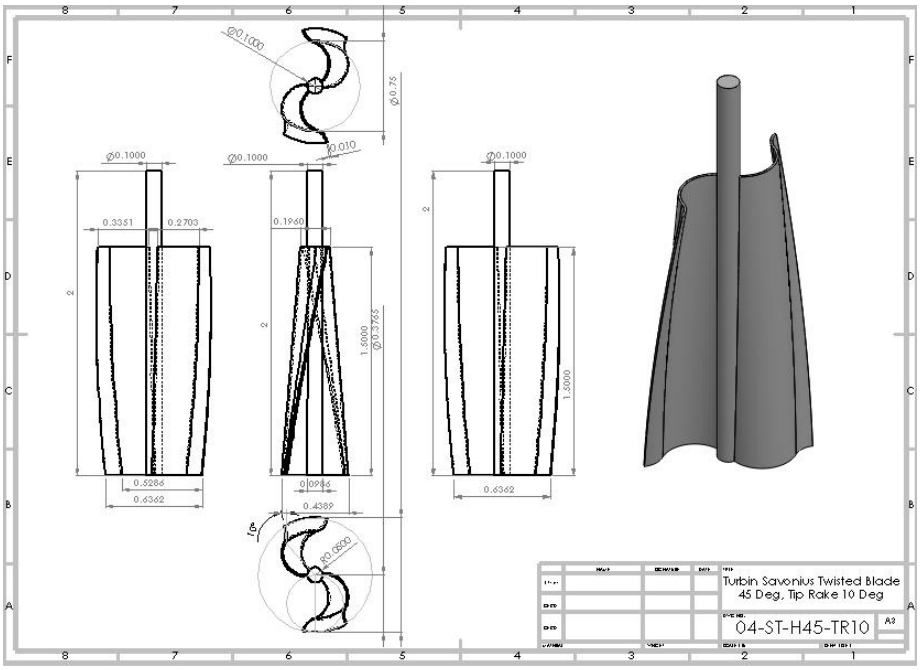
Gambar 4.3 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Omar Yaakob (Helical 180) Yang Akan Dianalisa



Gambar 4.4 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0 Yang Akan Dianalisa



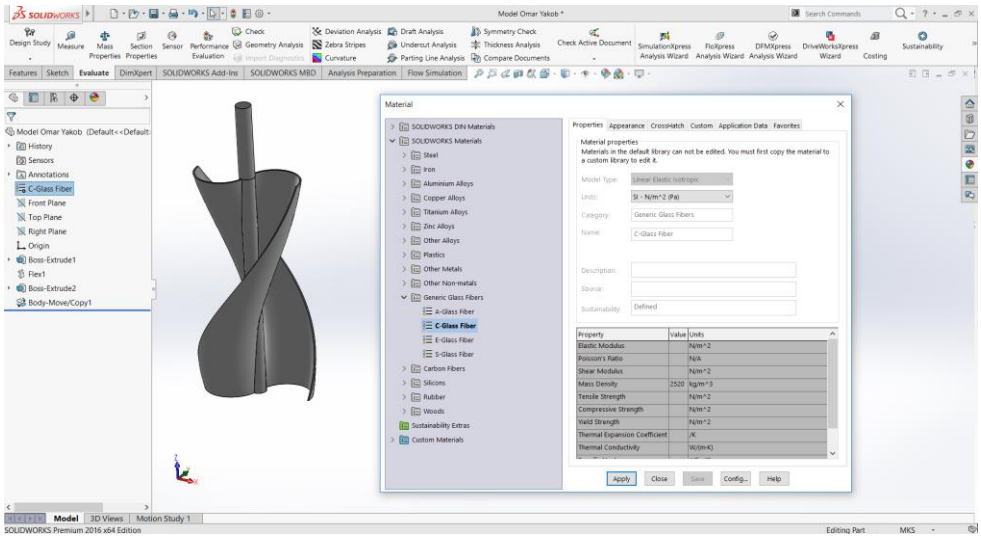
Gambar 4.5 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 Yang Akan Dianalisa



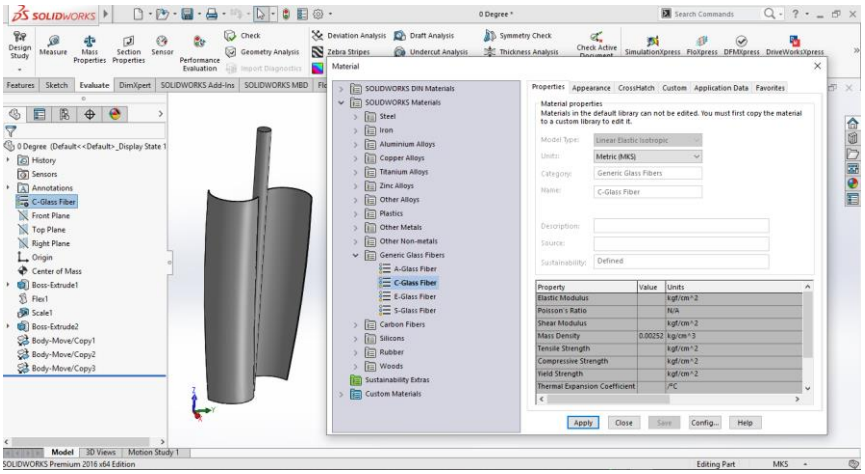
Gambar 4.6 Dimensi Turbin Savonius 2 *Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 10^0 Yang Akan Dianalisa

4.3.3 Material Turbin

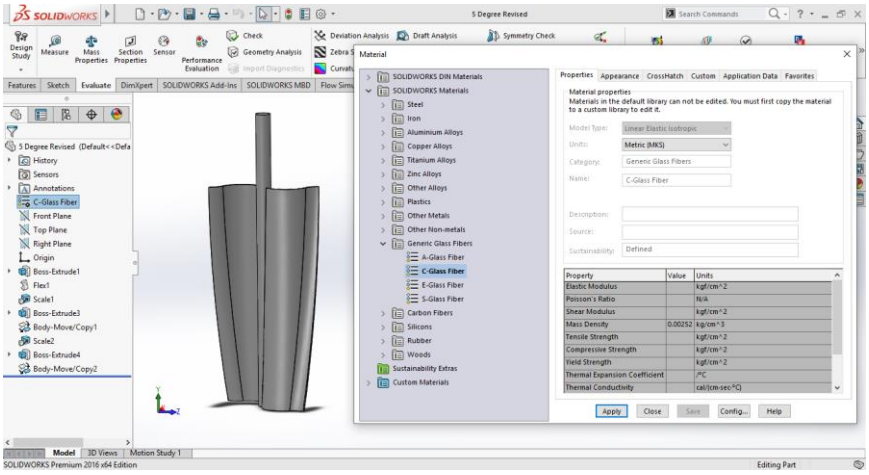
Material turbin savonius pada penelitian ini disesuaikan dengan kondisi penerapannya, yaitu di laut, tepatnya selat Lampa. Oleh karena itu, dipilih material C-Class Fibre Glass yang memliki ketahanan terhadap paparan unsur kimia dan korosi. Material turbin diatur menggunakan *Software* Solidworks, Seperti pada gambar di bawah ini.



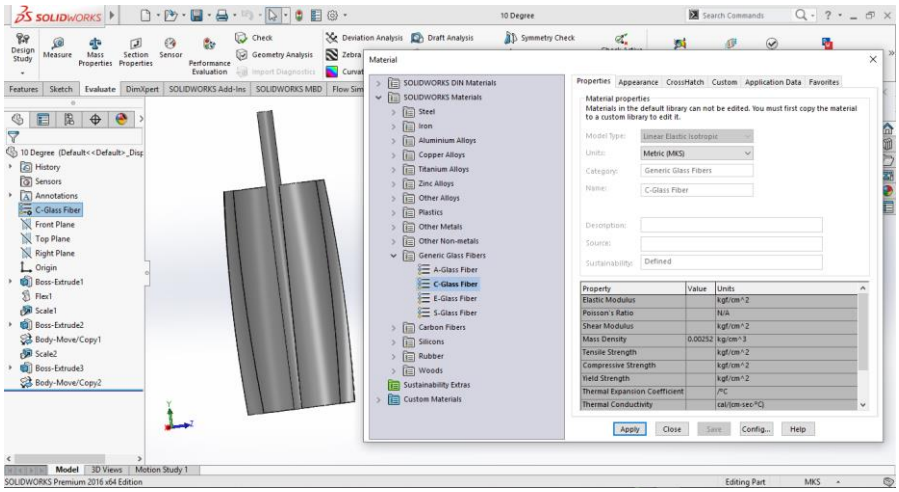
Gambar 4.7 Material *C-Fibre Glass* Pada Turbin Helical 180



Gambar 4.8 Material *C-Fibre Glass* Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0



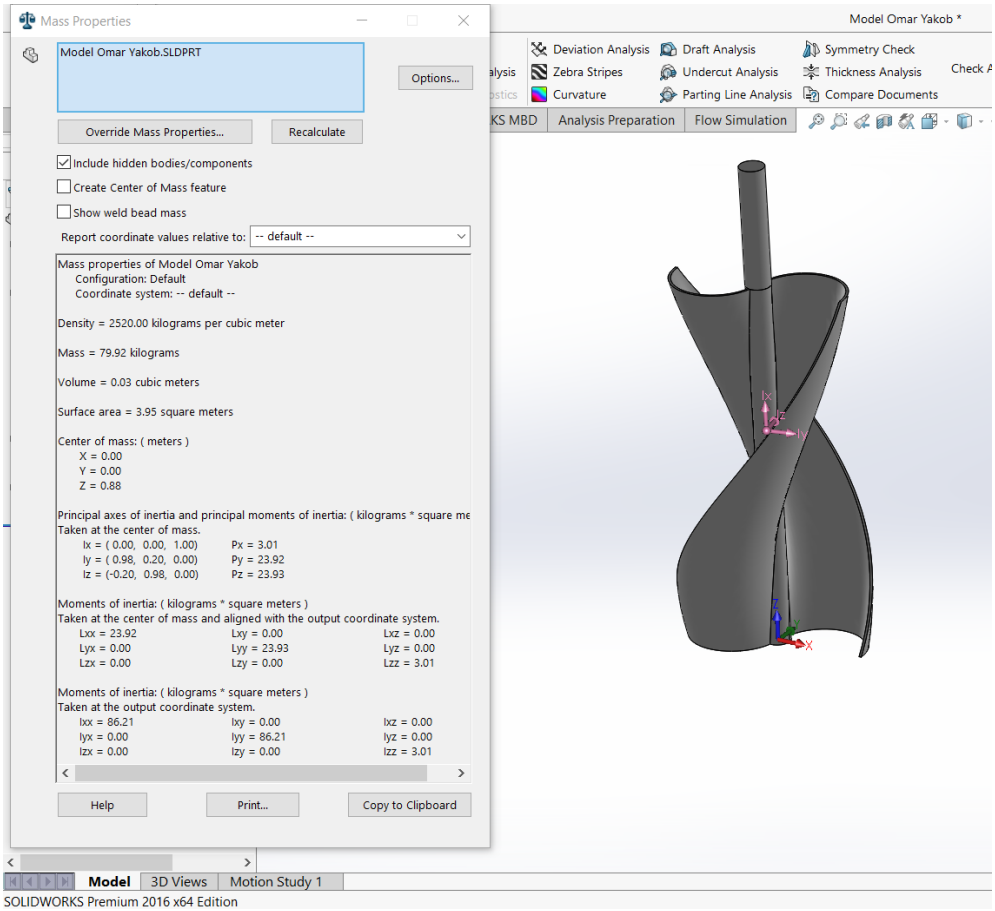
Gambar 4.9 Material C-Fibre Glass Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0



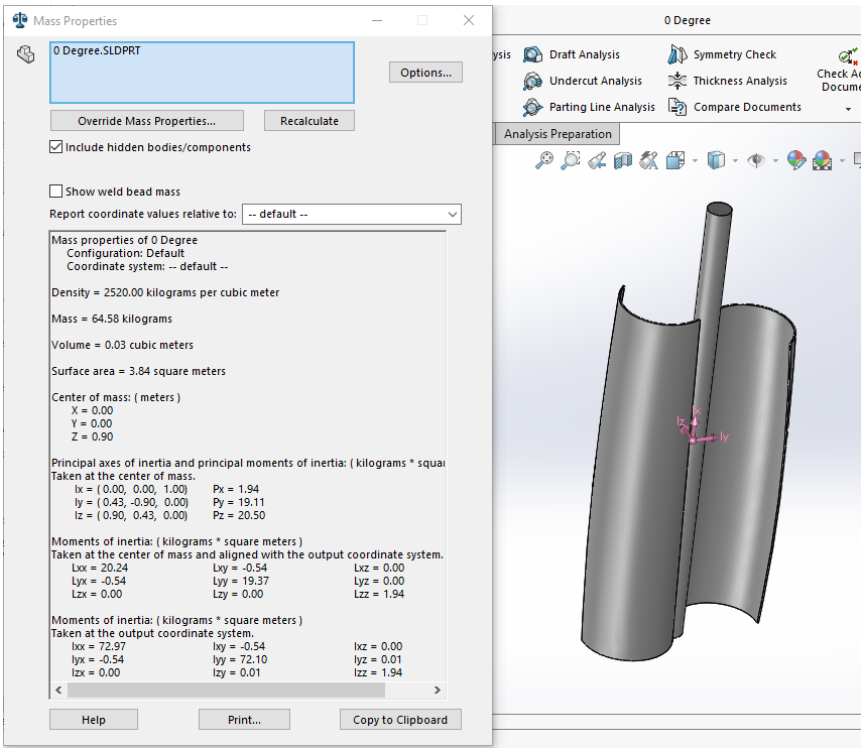
Gambar 4.10 Material C-Fibre Glass Pada Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 10^0

4.3.4 Analisa *Center of Gravity* Turbin

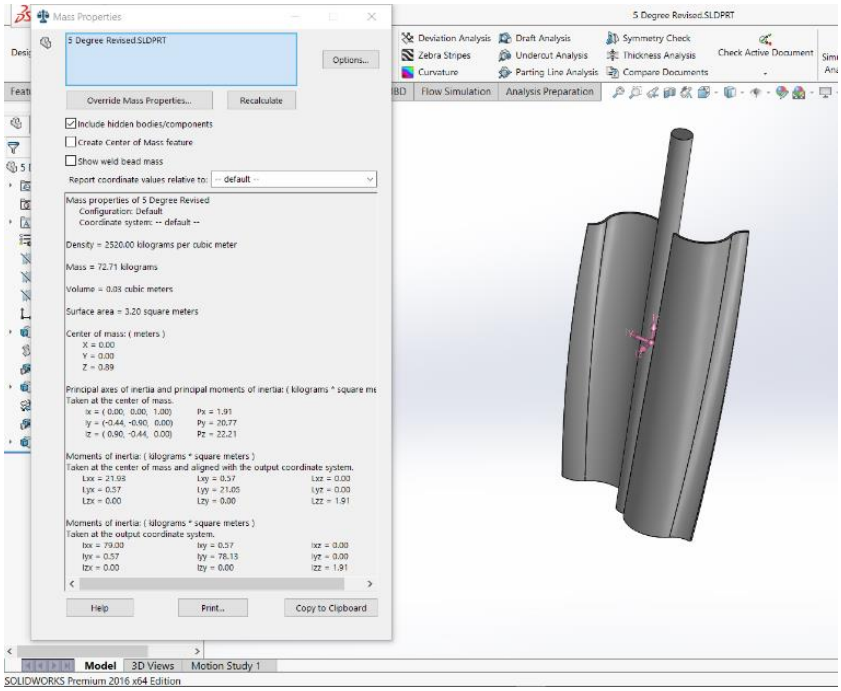
Pusat massa atau pusat gravitasi dari turbin pada penelitian ini dihitung menggunakan *software* Solidworks. Hal ini dilakukan dengan mempertimbangkan kesalahan yang bias terjadi apabila menggunakan perhitungan kasar dan manual serta ke presisian kalkulasi untuk geometri turbin yang rumit. Hasil perhitungan pusat massa dan pusat gravitasi turbin ini akan dijadikan input dalam simulasi CFD menggunakan Numeca. Hasil perhitungan *centre of gravity* turbin dapat dilihat pada gambar di bawah.



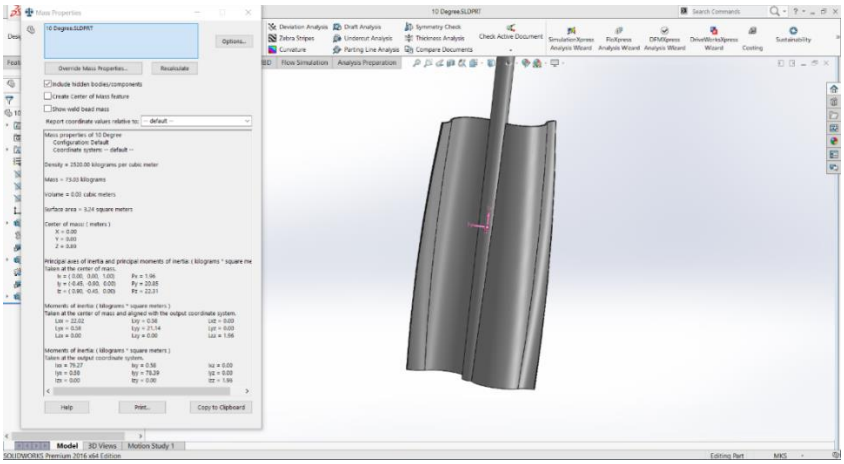
Gambar 4.11 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius Omar Yaakob (Helical 180)



Gambar 4.12 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* dengan Sudut *Tip Rake* 0^0



Gambar 4.13 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* Dengan Sudut *Tip Rake* 5^0



Gambar 4.14 Perhitungan Pusat Massa atau Pusat Gravitasi Model Turbin Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 10^0

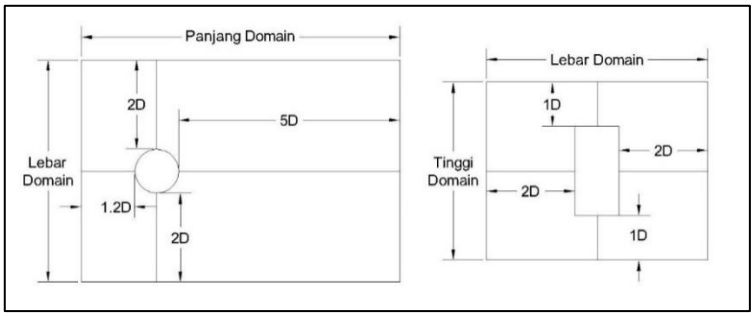
4.3.5 Variasi Sudut Tip Rake

Variasi sudut tip rake yang diunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah 0^0, 5^0, 10^0. Variasi ini dipilih berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dilakukan pada *propeller* dengan *tip rake*, dimana penelitian yang dilakukan tersebut menggunakan sudut 0^0, 5^0, dan 10^0.

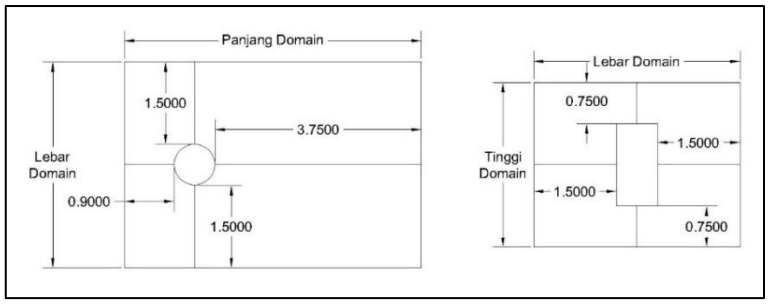
4.4 Proses Pembuatan Domain Komputasi

Permulaan dari setiap simulasi adalah membuat domain komputasi yang sesuai (domain komputasi bersifat kedap air), dalam banyak kasus, dapat didefinisikan sebagai pelengkap bagian padat, atau batasan ruang yang disimulasikan pada sebuah model. Proses ini dilakukan menggunakan sub perangkat lunak dari FINE MARINE, yaitu HEXPRESS ™ ".

Untuk pembuatan domain, setelah berkonsultasi dengan dosen pembimbing, maka ditentukan domain yang dibuat dan berlaku pada seluruh variasi model simulasi memiliki dimensi sebagai berikut.

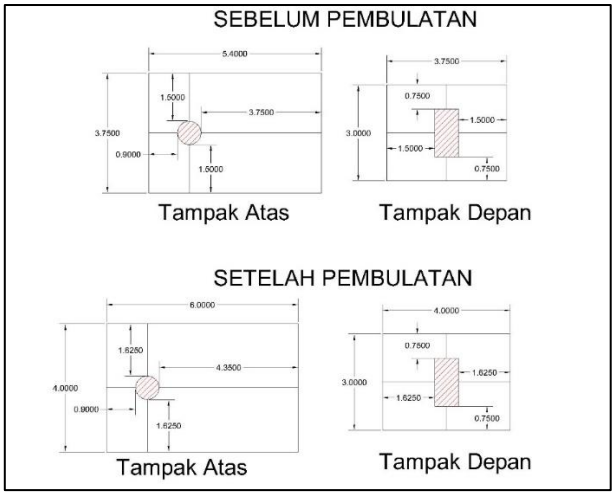


Gambar 4.15 Ukuran minimum Domain, dinyatakan dalam diameter turb**in**



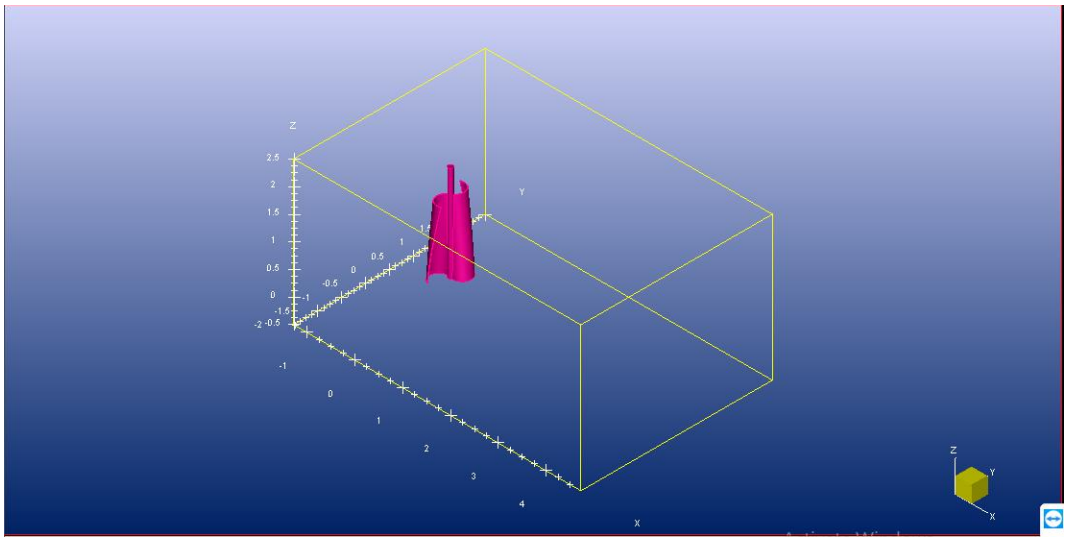
Gambar 4.16 Ukuran Domain Komputasi simulasi, dinyatakan dalam meter.

Agar *cell* pada proses meshing nanti memiliki dimensi yang merata, maka dimensi domain komputasi dibulatkan menjadi seperti gambar di bawah.



Gambar 4.17 Ukuran Domain Komputasi simulasi, dinyatakan dalam meter.

Maka, ukuran domain yang digunakan pada simulasi memiliki panjang 6 meter, lebar 4 meter, dan tinggi 3 meter yang berlaku pada seluruh model variasi. Hasil akhir pembutan domain di HEXPRESS ™ " terlihat pada gambar di bawah.

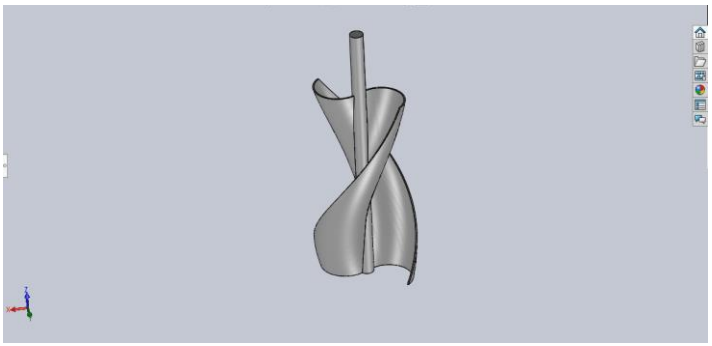


Gambar 4.18 Domain Simulasi turbin pada *software* HEXPRESS ™ "

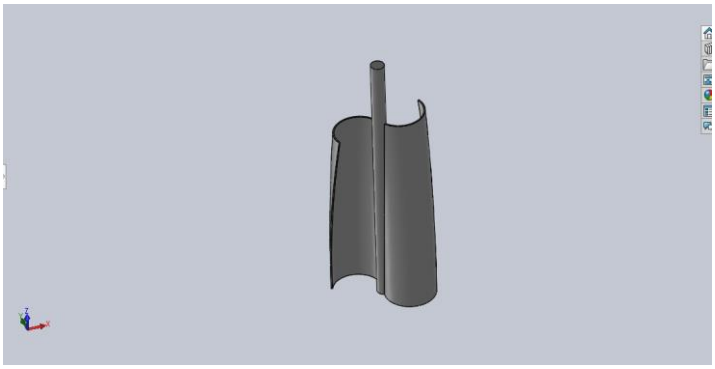
Gambar diatas merupakan sampel domain pada model variasi turbin dengan *tip rake* 0^0. Untuk model variasi yang lainnya juga memiliki domain yang sama. Sementara itu, proses yang dilakukan pada pembuatan domain ini adalah mengimport file *parasolid* model turbin (parasolid.x_t), membuat kotak dengan ukuran 6 meter di sumbu x, 4 meter di sumbu y, dan 3 meter di sumbu z. Selanjutnya, kotak ini digeser sejauh x = -1.275 m, y = -2 m, z = -1 m, terhadap titik acuan 0,0,0 yang berada di pusat turbin bagian bawah. Langkah terakhir adalah menlakukan *substract*, dan *create* domain, agar domain ini bisa dilanjutkan menuju tahap *meshing*.

4.5 Model 3D Turbin Savonius yang Dibuat Menggunakan Solidworks

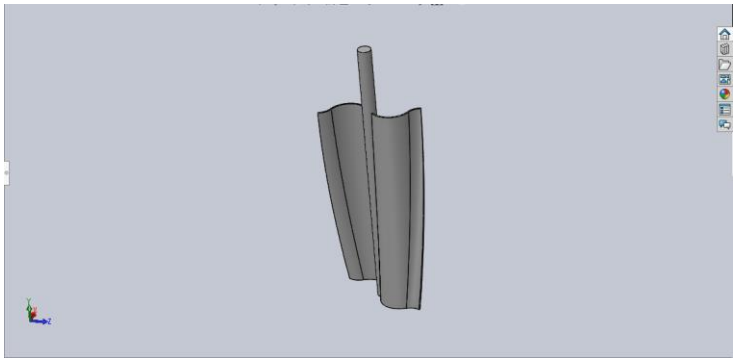
Setelah melakukan pembuatan model turbin dengan menggunakan *sotware* Solidworks dan Rhinos, yang berhasil tanpa mengalami *error* saat proses *meshing* adalah model yang dibuat menggunakan Solidworks. Oleh karena itu, keseluruhan pembuatan model Turbin Savonius pada penelitian tugas akhir ini dibuat menggunakan Solidworks yang hasilnya dapat dilihat di bawah ini.



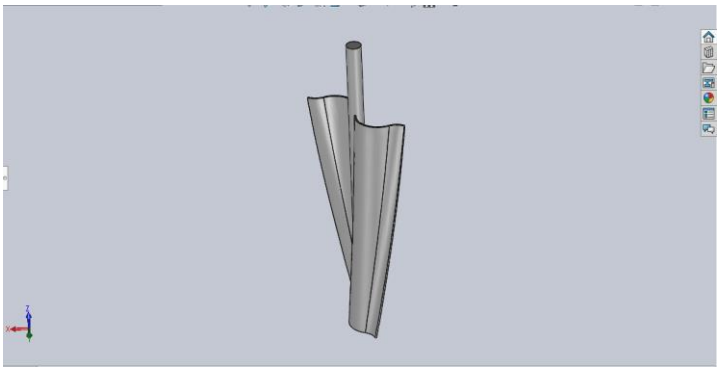
Gambar 4.19 Savonius *Twisted Blade* 180^0 Omar Yaakob



Gambar 4.20 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 0^0



Gambar 4.21 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 5^0



Gambar 4.22 Savonius *Twisted Blade* Degnan Sudut *Tip Rake* 10^0

4.6 Proses *Meshing* Pada Model Turbin

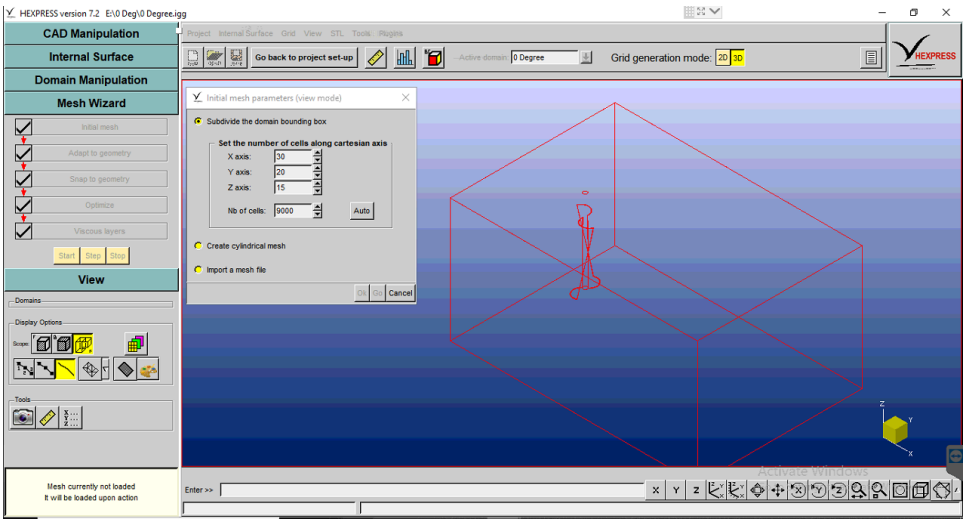
Meshing merupakan sebuah proses membagi geometri benda dan domain simlasi menjadi beberapa area kecil (*cell*) yang mengandung informasi. Proses meshing menentukan jumlah *cell*, besar *file* hasil simulasi (*running*), dan juga lamanya waktu simulasi (*running*).

Proses meshing pada HEXPRESS™ dilakukan pada fitur mesh wizard yang sangat mudah digunakan. Di dalam mesh wizard sendiri, proses running dibagi menjadi lima tahap, yaitu *Initial mesh, Adapt to geometry, Snap to geometry, Optimize* dan tahap *viscous layer* [35].

4.6.1 Tahapan *Initial Mesh*

Pada tahap ini, jumlah *cell* di sumbu x, y, z perlu didefinisikan jumlahnya sebagai meshing awal. Dengan mempertimbangkan dimensi domain, maka jumlah *cell* yang dimasukkan adalah 2.5 kali dari jumlah *default*, yaitu 2.5 dikalikan terhadap x = 12, y = 8, z = 6. Oleh karena itu, jumlah *cell* menjadi x = 30, y = 20, z = 15, dengan jumlah total = 30 x 20 x 15 = 9000 *cell*.

Tahapan dan konfigurasi ini berlaku pada seluruh variasi model. Maka, jumlah *cell* pada tahap *initial mesh* pada seluruh model variasi adalah 9000 *cell*.



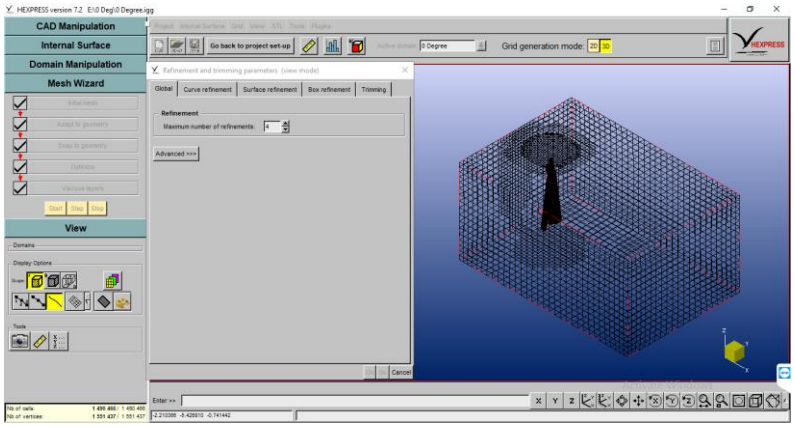
Gambar 4.23 Domain Simulasi turbin pada *software* HEXPRESS ™ "

4.6.2 Tahapan *Adapt To Geometry*

Proses yang dilakukan pada tahap ini adalah menambah jumlah cell melalui metode *cell refinement*, yaitu memperbaiki *meshing* supaya lebih detail, agar hasil *running* yang didapat lebih akurat. Standar minimum jumlah *cell* yang diperlukan dalam *running* adalah tidak kurang dari satu juta.

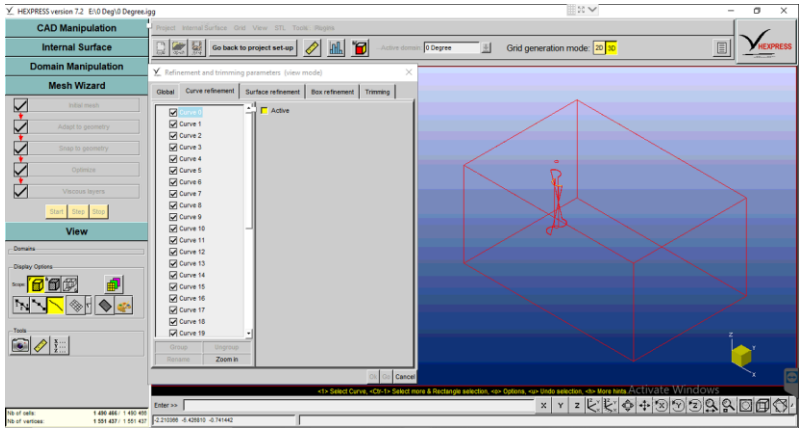
Dalam tahap *Adapt to Geometry* ini, terdapat empat *refinement* yang dilakukan, yaitu :

1. Global *Refinement* : Merupakan *refinement* yang memperbaiki *cell* secara keseluruhan, pada turbin (*geometry*) dan juga domain. Dalam kasus tugas akhir ini, level global *refinement* yang digunakan adalah 4.



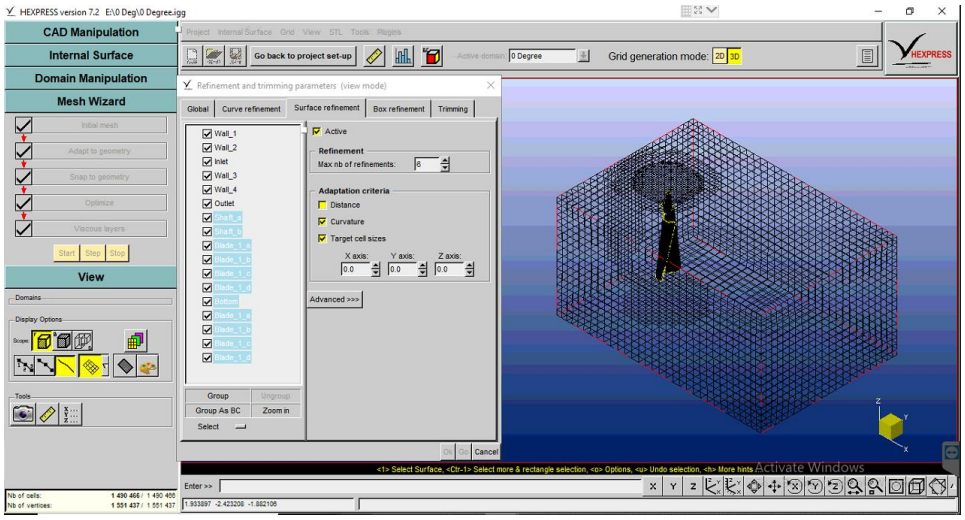
Gambar 4.24 Pengaturan *Global Refinement* HEXPRESS ™ "

2. *Curve Refinement* : Merupakan *refinement* yang memperbaiki *cell* pada kurva dan garis yang ada pada model (*geometry*) dan juga domain. Dalam kasus tugas akhir ini tidak menggunakan *curve refinement* sama sekali.



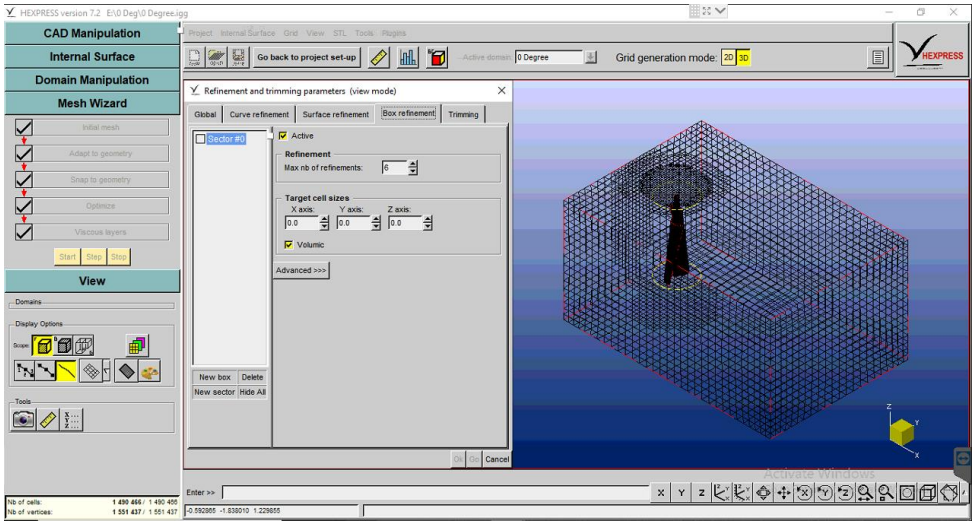
Gambar 4.25 Pengaturan *Curve Refinement* HEXPRESS ™ "

3. *Surface Refinement* : Merupakan *refinement* yang memperbaiki cell pada bidang luasan *surface* yang ada pada model (*geometry*) dan juga domain. Dalam kasus tugas akhir ini , *surface refinement* yang digunakan adalah 6, dan hanya pada *surface* model turbin, tidak digunakan pada *surface* domain.



Gambar 4.26 Pengaturan *Surface Refinement* HEXPRESS ™ "

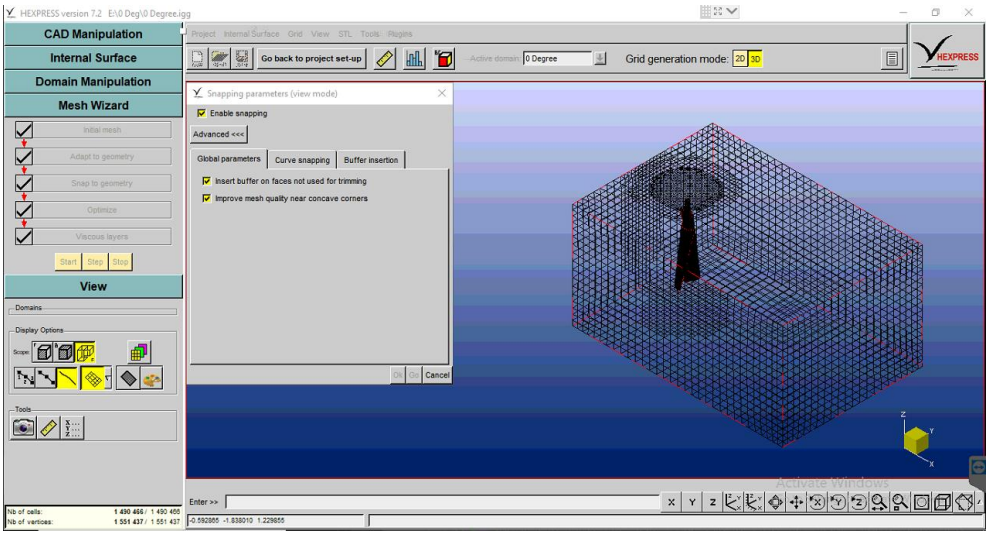
4. *Box Refinement* : Merupakan refinement yang memperbaiki cell pada dengan membuat sebuah objek volumetrik. Pada tugas akhir ini, dibuat objek volumetrik berupa tabung, karena mengikuti bentuk turbin, dengan *box refinement* level 6.



Gambar 4.27 Pengaturan *Box Refinement* HEXPRESS ™ "

4.6.3 *Snap To Geometry*

Snap To Geometry merupakan sebuah proses otomatis yang berfungsi untuk mengadaptasi atau menyesuaikan *mesh* dan *cell* terhadap benda yang akan disimulasikan, dalam kasus ini adalah turbin. Proses ini berjalan melalui basis algoritma yang canggih, yang dapat menyesuaikan *cell* pada pojok – pojok dan kurva dengan dimensi yang lebih rapat atau kecil, sehingga ketajaman kualitas *meshing* dapat meningkat.

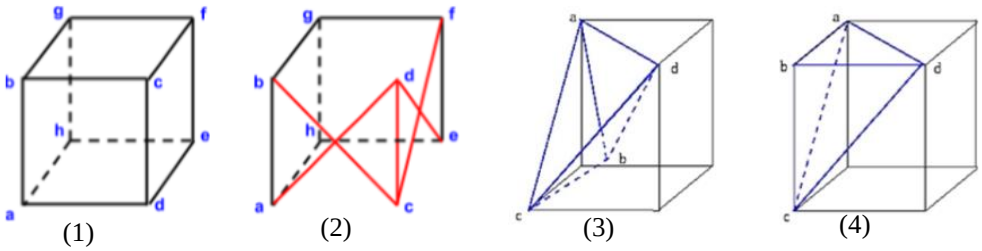


Gambar 4.28 Pengaturan *Snap to Geometry* HEXPRESS ™ "

Dalam proses ini, fungsi yang diaktifkan adalah *buffer insertion*, dan *improve mesh quality*. *Buffer insertion* berfungsi untuk menambahkan lapisan *cell* tambahasn (isian) untuk menciptakan meshing yang sesuai dengan geometri benda. Untuk proses *improve mesh quality*, proses ini berfungsi mengeliminasi *cell* yang bentuknya terdistorsi pada proses *meshing*. Dua proses ini dapat meningkatkan atau menurunkan kualitas *meshing*.

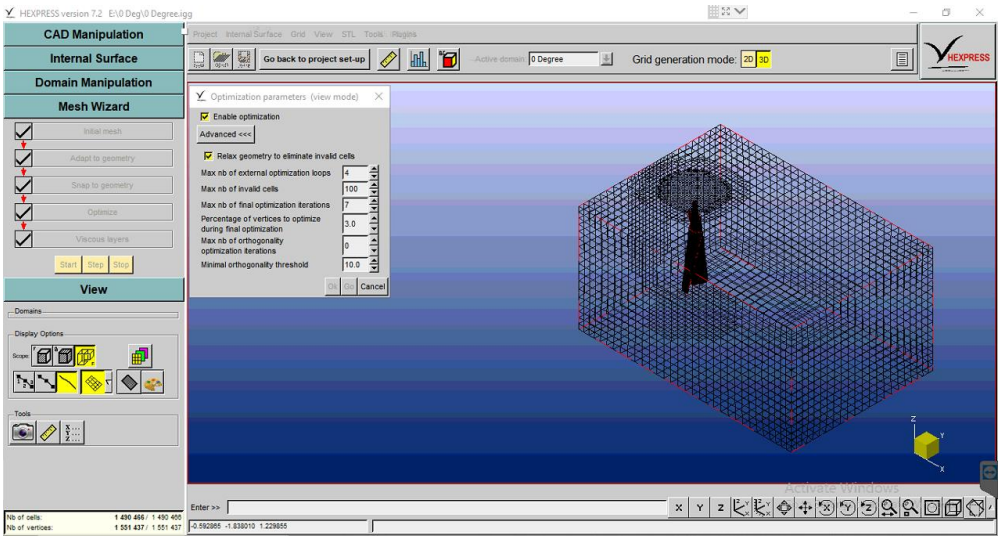
4.6.4 *Optimize*

Ketika melaksanakan fungsi *snap to geometry*, ada kemungkinan cell mengalami penrunan kualitas, terutama *cell* yang terletak di bagian pojok atau kurva geometri yang bentuknya sulit. Beberapa *cell* mengalami *twisted*, *concave*, dan *negative volume* yang menyebabkan gagalnya *running*.



Gambar 4.29 Perbangingan Bentuk *Cell* (1) Normal *Cell*, (2) *Twisted Cell*, (3) *Concave (Neg. Volume) Cell*, (4) *Contrary Convex cell*

Fitur *Optimize* yang diaktifkan pada penelitian ini adalah fungsi *relax geometry to eliminate invalid cells*. Tujuan dari fungsi ini adalah mengeliminasi jumlah *cell* yang invalid (*Twisted, Concave,Negative Volume)* yang tidak dapat dihilangkan pada proses optimization awal. Pengaturan ini berlaku pada seluruh model variasi.

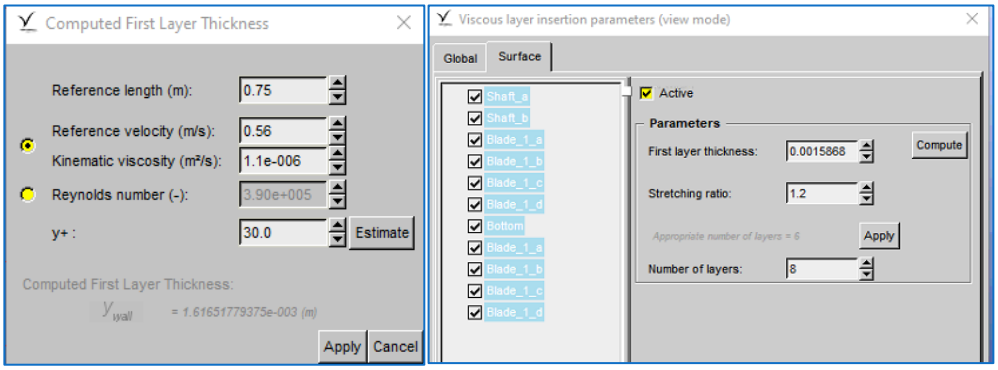


Gambar 4.30 Pengaturan *Optimize* HEXPRESS ™ "

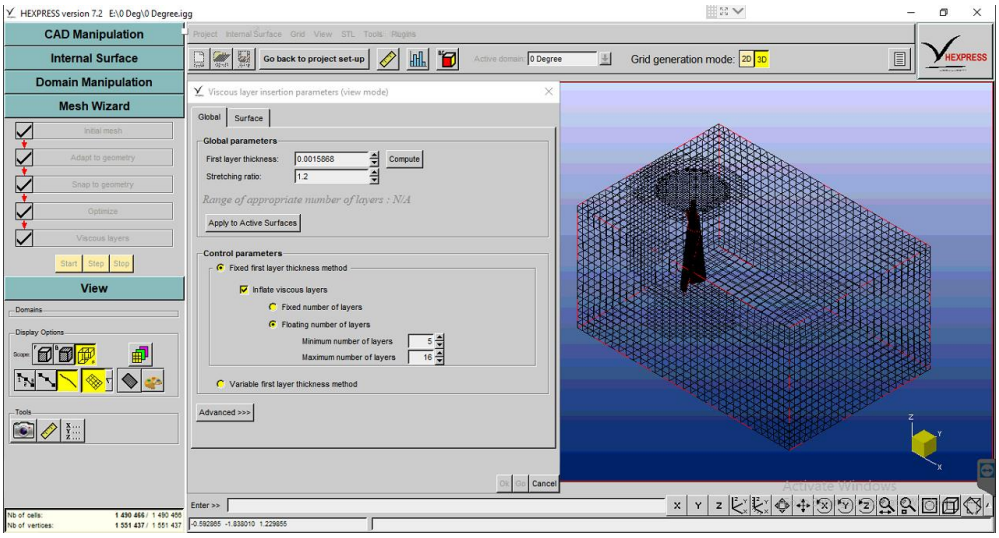
4.6.5 *Viscous Layer*

Viscous Layer merupakan sebuah proses dimana lapisan *cell* dengan rasio aspek tinggi di tambahkan pada ruang batas ujung antara benda (turbin) dengan fluida, untuk mendapatkan solusi *running* yang akurat pada *boundary layer*.

Pada proses ini, pengaturan yang dilakukan adalah pada *global parameter* dan *surface*. Pada *Global Parameter* dan *Surface*, pengaturan dilakukan pada *Computed First Layer Thickness*. Untuk *Reference Length*, nilainya merupakan diameter turbin (panjang *chord* benda) yaitu 0.75 m, dan *Reference Velocity* memiliki nilai 0.56 m/s, sesuai dengan kecepatan arus yang disimulasikan. Sedangkan untuk *Reynold Number* bernilai 3.9 x 10^5 dan *Kinematic Viscocity* bernilai 1.1 x 10^{-6}, sesuai dengan kondisi fluida air laut bersuhu 19^0 Celcius yang disimulasikan.



Gambar 4.31 Pengaturan *Computed First Layer Thickness*



Gambar 4.32 Pengaturan *Viscous Layer* di HEXPRESS ™ "

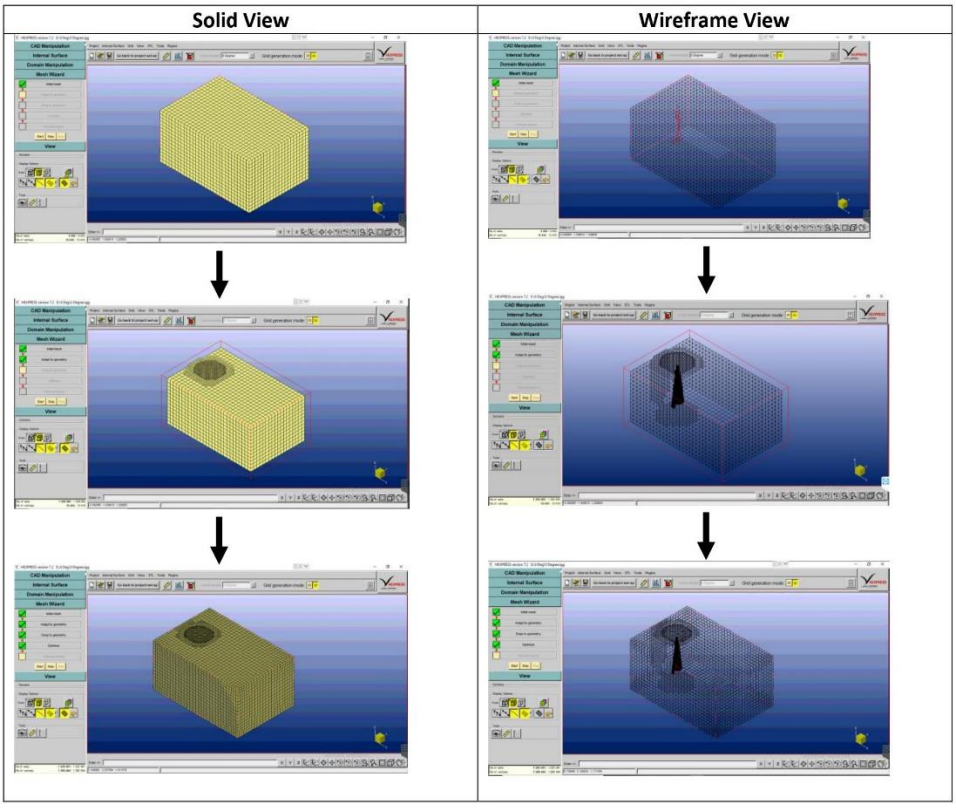
Pengaturan *Viscous Layer* merupakan pengaturan terakhir yang ada di HEXPRESS ™, sehingga jumlah *cell* pada setiap model variasi dapat diketahui. Berikut adalah tabel jumlah *cell* per model variasi.

Tabel 4.1 Jumlah *Cell* Hasil Meshing Pada Seluruh Variasi Model

Model	Jumlah *Cell*	*Error* (%)
180^0 Omar Yaakob	1.457.456	2,836267
Tip Rake 0 Degree	1.490.466	0,6356
Tip Rake 5 Degree	1.521.068	1,40453
Tip Rake 10 Degree	1.519.401	1,2934

Perhitungan *error* dilakuakn dengan mencari selisih jumlah cell pada setiap variasi model, dengan jumlah *cell* pada jurnal Omar Yaakob (1.500.000), dibagi dengan 1.500.000 dan dinyatakan dalam persen.

Untuk lebih memahami perbedaan antara meshing pada kondisi *initial mesh* hingga *viscous layer*, gambar dibawah ini merupakan perbandingan kedua kondisi tersebut.



Gambar 4.33 Perbandingan Hasil *Mesh* pada HEXPRESS ™ "

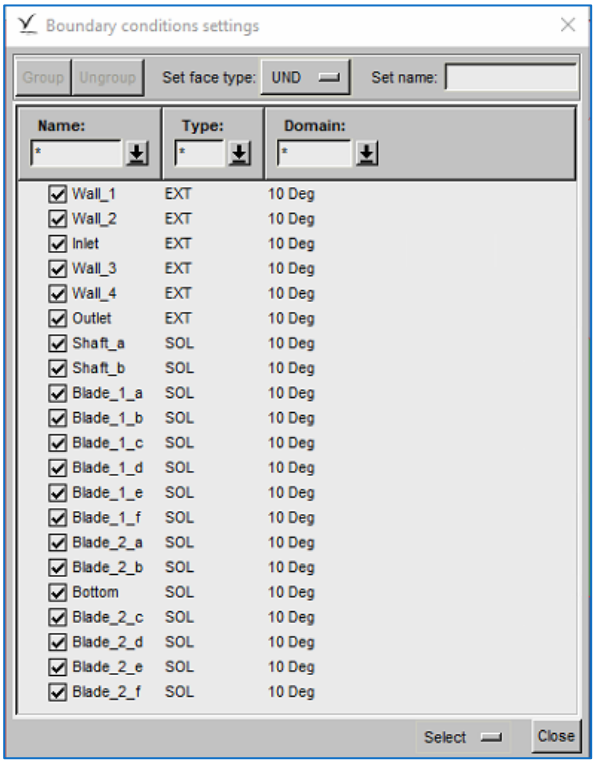
4.6.6 Pengaturan *Boundary Condition* Pada *Software* HEXPRESS ™ "

Pengaturan berikutnya sebelum memasuki tahap *running* adalah pengaturan *boundary condition*.

Pada bagian ini, setiap *face* pada benda (turbin) dan domain didefinisikan sesuai fungsi. Tipe – tipe *face* tersebut adalah sebagai berikut :

1. UND : *undefined type*, sebuah *face* tidak didefinisikan.
2. INL : *inlet*, sebuah *face* didefinisikan sebagai jalur masuk aliran.
3. OUT : *outlet*, sebuah *face* didefinisikan sebagai jalur keluar aliran.
4. EXT : *external used to impose far field conditions*, sebuah *face* didefinisikan sebagai kondisi lingkungan eksternal.
5. SOL : *solid used for walls*, sebuah *face* didefinisikan sebagai benda solid.
6. MIR : *mirror used to impose asymmetry plane*, Sebuah *face* didefinisikan sebagai cerminan, atau komposisinya sama dengan *face* lainnya.

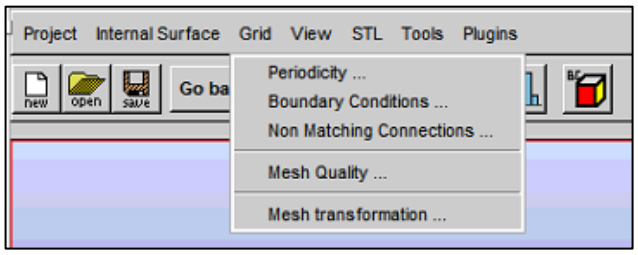
Dalam penelitian ini, *face* yang digunakan adalah fungsi EXT dan SOL. Fungsi EXT digunakan ntuk mendefinisikan domain, karena simulasi penelitian ini menggunakan kondisi air laut. Sedangkan SOL digunakan untuk mendefinisikan seluruh bagian turbin yang merupakan benda solid.EXT digunakan pada seluruh dinding domain dengan rincian *Wall_1, Wall_2, Inlet, Wall_3, Wall_4,* dan Outlet. Sedangkan SOL digunakan pada seluruh bagian turbin dimulai dari *Shaft_a* hingga *blade_2_f* seperti pada gambar di bawah.



Gambar 4.34 Pengaturan *Boundary Condition* di HEXPRESS ™ "

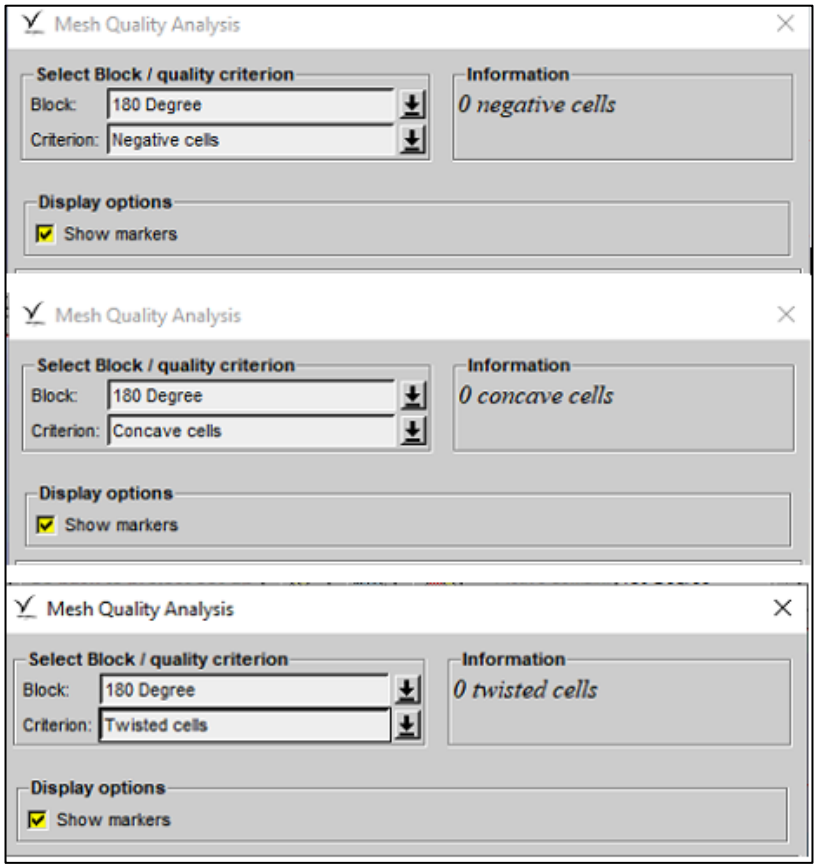
4.6.7 Pengecekan Kualitas *Meshing*

HEXPRESS ™ memiliki sebuah fitur untuk mengecek kualitas *meshing* yang dihasilkan dengan menggunakan fitur *Mesh Quality*. Fitur ini terdapat pada menu bar *Grid*, seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.35 Fitur *Mesh Quality* di HEXPRESS ™ "

Terdapat tiga parameter yang dicek pada hasil *meshing*, yaitu *Negative Cell*, *Concave Cell*, dan *Twisted Cell*. Demi kelancaran proses *running*, ketiga parameter ini harus bernilai 0 saat dicek, dan berlaku bagi seluruh model variasi.



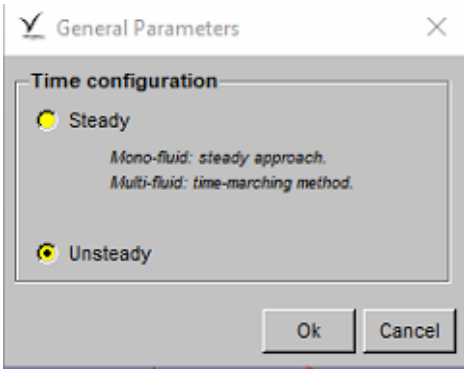
Gambar 4.36 Pengecekan *Negative Cell*, *Concave Cell*, dan *Twisted Cell*

4.7 Proses *Running* Menggunakan Solver Numeca

Setelah tahap *meshing* menggunakan HEXPRESS ™ " selesai, tahapn selanjutnya adalah *running* menggunakan Solver Numeca [36][36]. Sebelum melakukan *running*, terdapat rangkaian pengaturan yang perlu dilakukan. Pengaturan tersebut akan dijabarkan secara detail pada subbab ini.

4.7.1 Pengaturan *General Parameter*

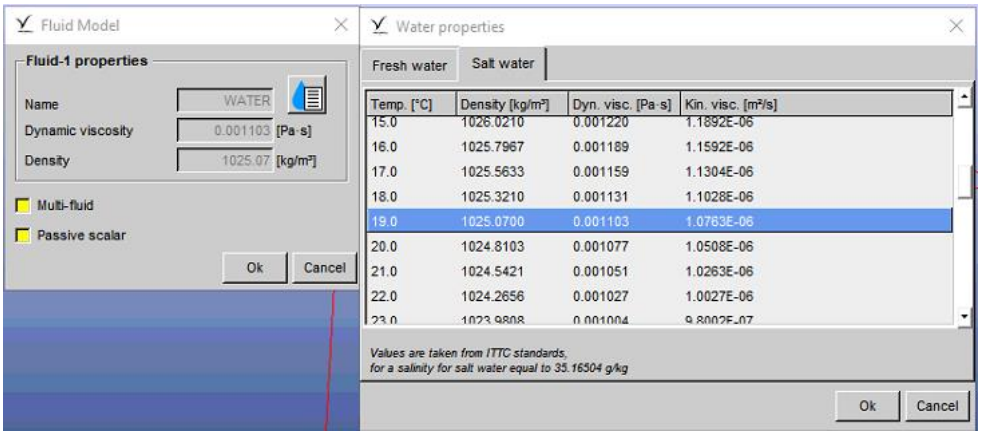
Pengaturan yang dilakukan pertama kali adalah *General Parameter*, dimana simulasi ini menggunakan pengaturan *Unsteady*. Pengaturan ini berlaku pada seluruh model variasi.



Gambar 4.37 Pengaturan *General Parameter* pada FINE MARINE

4.7.2 Pengaturan *Fluid Model*

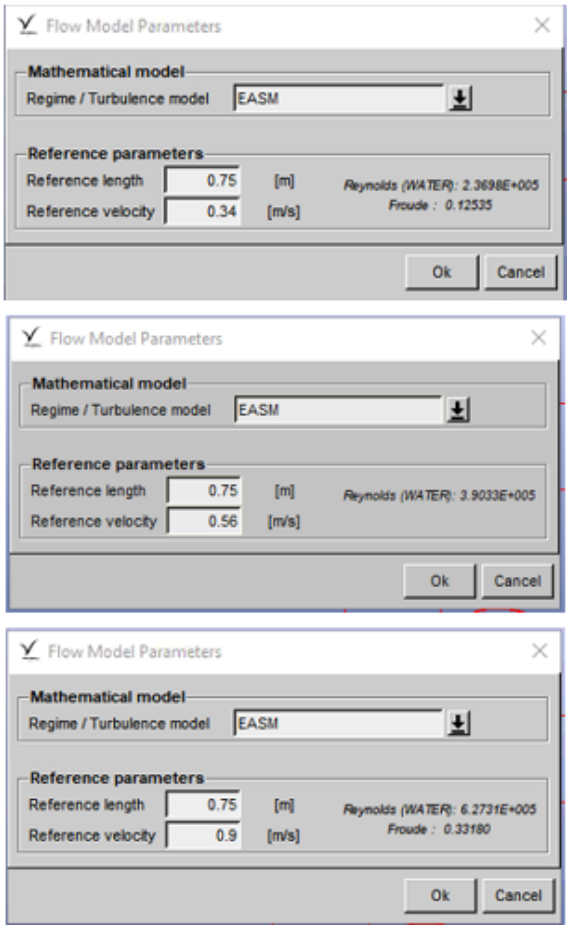
Pengaturan ini berfungsi untuk menentukan fluida apa yang digunakan dalam mensimulasikan turbin. Dalam penelitian ini, fluida yang digunakan adalah air laut dengan *density* 1025.07 kg/m^3 dan suhu 19^0 Celcius.



Gambar 4.38 Pengaturan *Fluid Model* pada FINE MARINE

4.7.3 Pengaturan *Flow Model*

Pengaturan berikutnya adalah pengaturan *Flow Model*, dimana pada pengaturan ini terdapat *turbulence model* berfungsi untuk menentukan algoritma perhitungan apa yang akan digunakan pada simulasi. Dalam penelitian tugas akhir ini, *turbulence model* yang digunakan adalah *Explicit Algebraic Stress Model* (EASM), karena benda yang dianalisa adalah benda berputar. Selain itu, untuk *Reference Length* memiliki nilai 0.75 m sesuai dengan diameter turbin, dan *Reference Velocity* memiliki nilai yang sesuai dengan variasi kecepatan simulasi, yaitu 0.34 untuk kecepatan aliran 0.34 m/s, 0.56 untuk kecepatan aliran 0.56 m/s, dan 0.9 untuk kecepatan aliran 0.9 m/s.

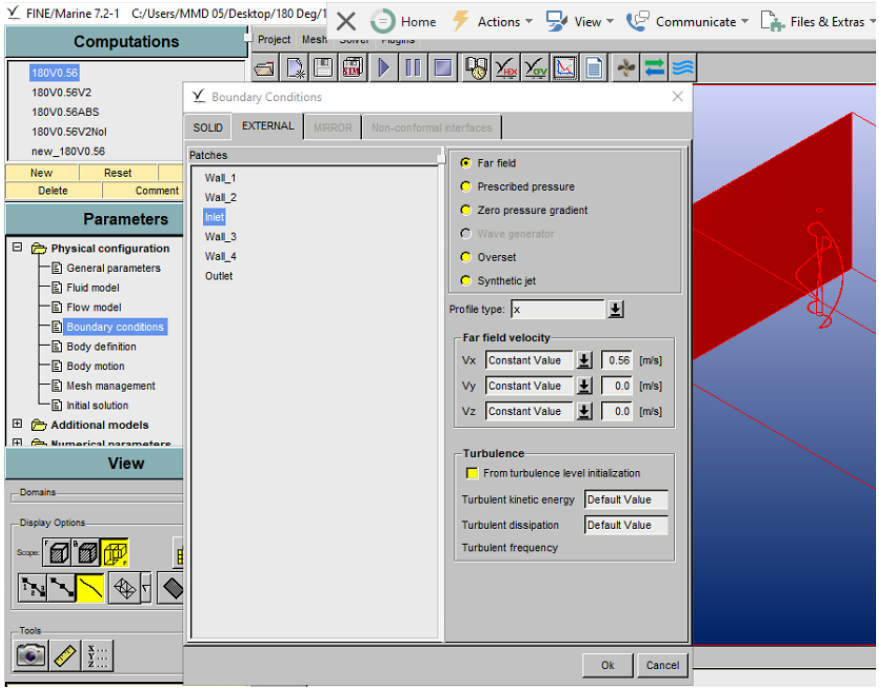


Gambar 4.39 Pengaturan *Fluid Model* pada FINE MARINE

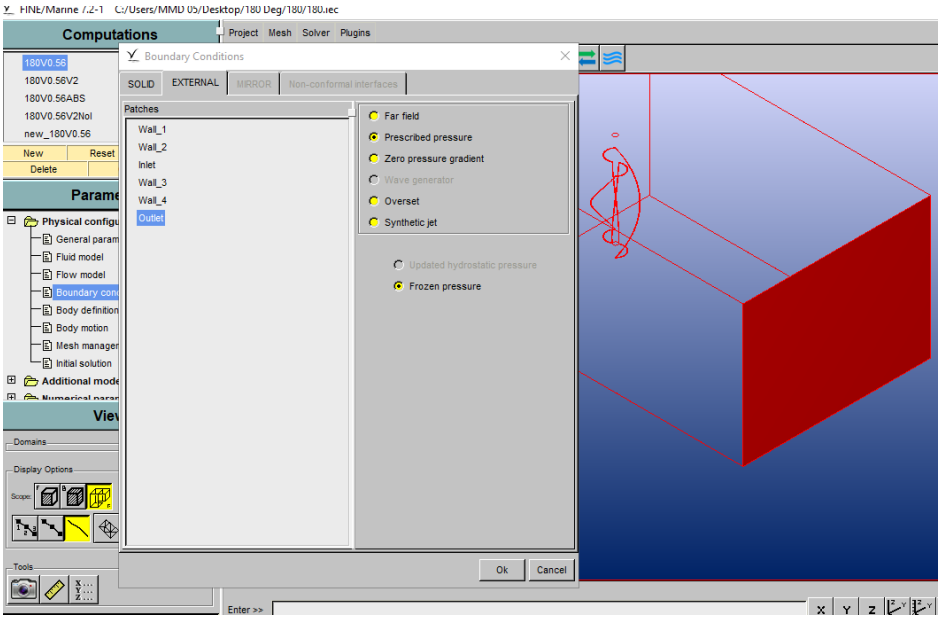
4.7.4 Pengaturan *Boundary Condition*

Pengaturan *boundary condition* ini berfungsi untuk mendefinisikan kondisi *boundary* pada *surface* yang ada, baik domain maupun turbin.

Pada penelitian ini, *boundary condition* yang diatur adalah pada inlet domain yang didefinisikan *far field*, dimana nilai Vx adalah sesuai dengan kecepatan aliran simulasi pada variasi model, yaitu 0.34 m/s, 0.56 m/s, dan 0.9 m/s. Untuk sisi *outlet* didefinisikan sebagai *prediscribed pressure*, sedangkan sisi domain lainnya terdefinisi sebagai *far field* dengan nilai kecepatan 0 m/s.



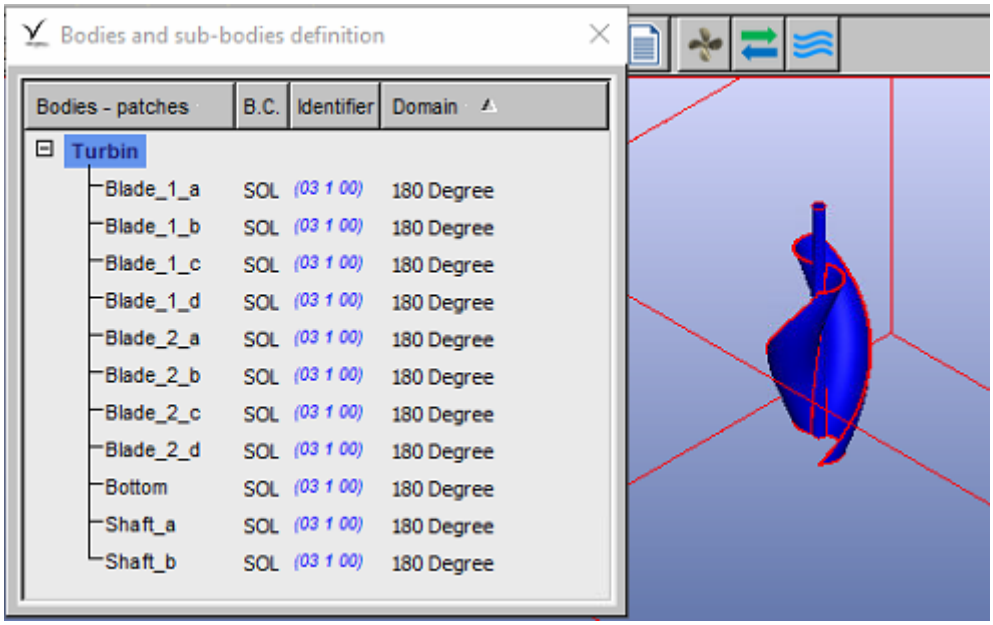
Gambar 4.40 Pengaturan *Boundary Condition Inlet* pada FINE MARINE



Gambar 4.41 Pengaturan *Boundary Condition Outlet* pada FINE MARINE

4.7.5 Pengaturan *Body Definition*

Pengaturan *Body Definition* berfungsi untuk mendefinisikan sebuah *surface* sesuai dengan pengaturan pada *Boundary Condition*, dan *menggroup* beberapa *surface* menjadi satu bagian. Dalam penelitian tugas akhir ini, surface yang dijadikan satu sebagai solid adalah turbin. Pengaturan ini berlaku pada seluruh model variasi turbin.

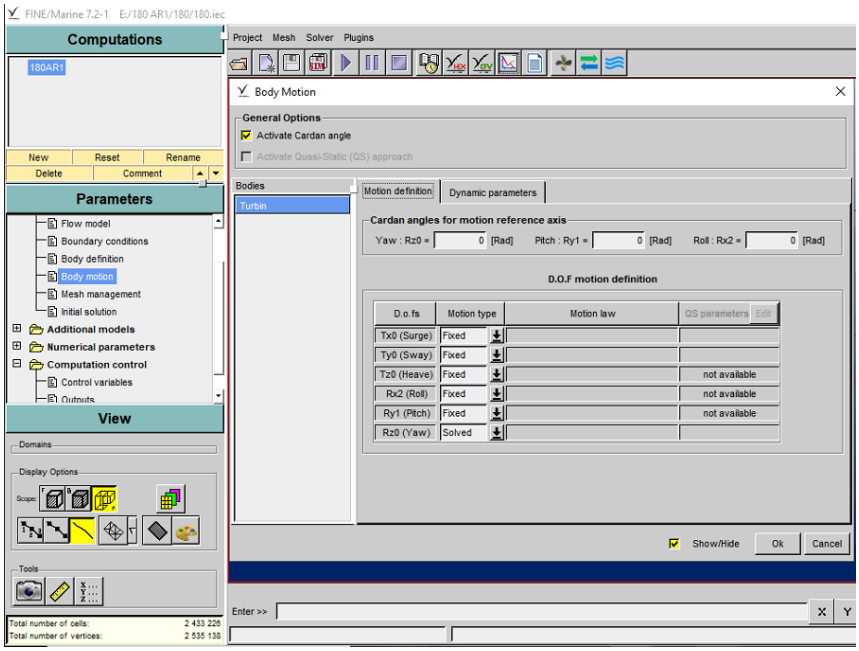


Gambar 4.42 Pengaturan *Body Definition* pada FINE MARINE

4.7.6 Pengaturan *Body Motion*

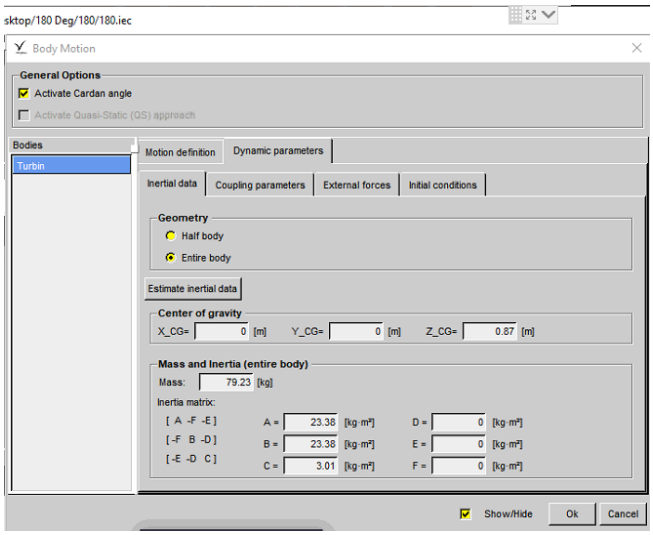
Pengaturan *body motion* pada FINE MARINE berfungsi untuk mengatur gerakan gerakan yang disimulasikan pada benda (turbin). Pengaturan terbagi menjadi dua bagian, yaitu *motion definition* dan *dynamic parameters*.

Pada bagian *motion definition*, terdapat pengaturan *Six Degree of Freedom* (enam derajat kebebasan gerak), dimana pada penelitian tugas akhir ini, gerakan yang diaktifkan hanyalah *yawing*, yang diganti dari *fixed* menuju *Solved*. *Solved* memiliki makna bahwa gerakan ini yang akan dicari nilainya dari simulasi, atau dalam kata lain, menjadi *output*. Sedangkan untuk gerakan *surge*, *sway*, *heave*, *pitch* dan *roll* diatur sebagai *fixed*, yang memiliki makna benda tidak ditinjau terhadap gerakan tersebut.

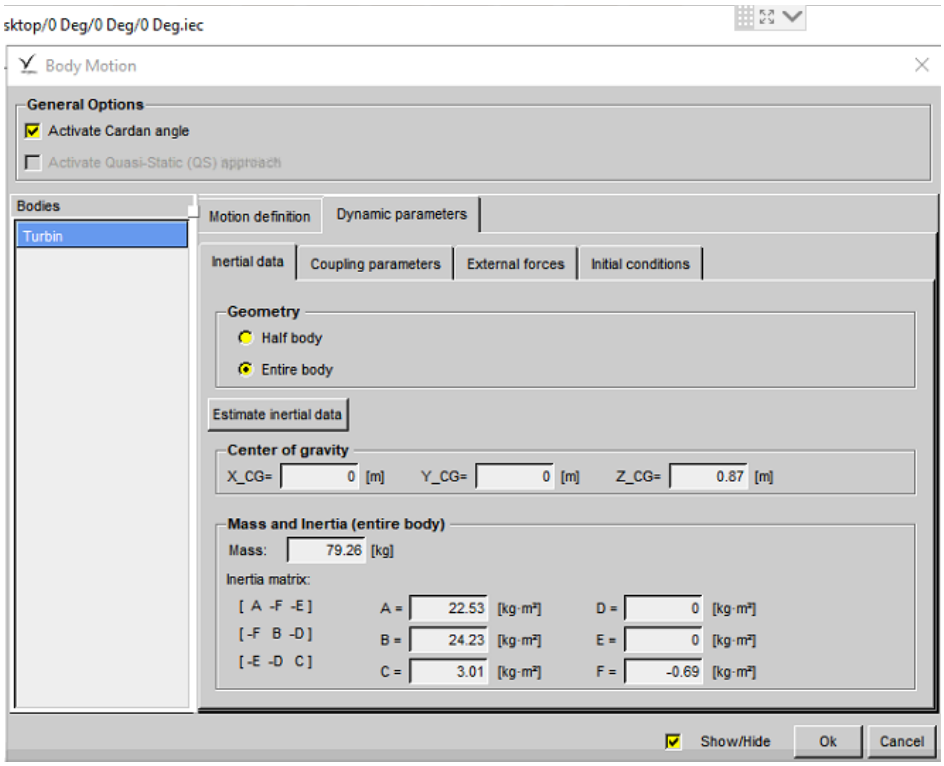


Gambar 4.43 Pengaturan *Motion Definition* pada *Body Motion*

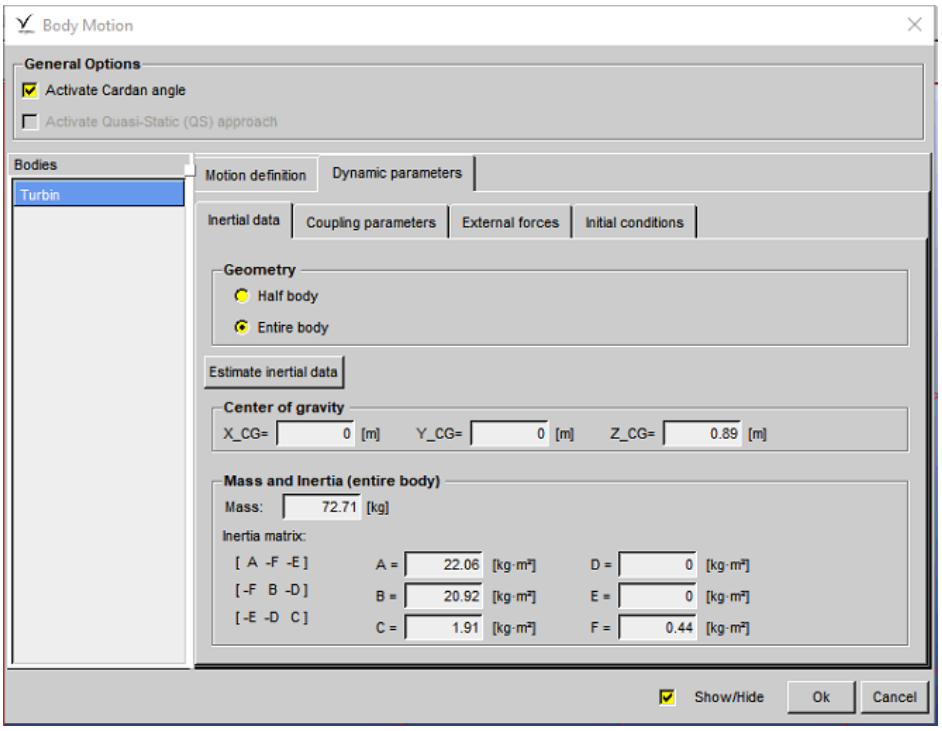
Selanjutnya, pengaturan yang dilakukan adalah pada menu *Dynamic Parameter*. *Geometry* yang dipilih adalah *entire body*. Untuk *Centre of Gravity* serta *inertia matrix*, nilainya diisi sesuai dengan hasil perhitungan momen inersia pada model Omar Yaakob (Helical 180^0), model dengan sudut *tip rake* 0^0, sudut *tip rake* 5^0, serta sudut *tip rake* 10^0. Nilai momen inersia dan *centre of gravity* masing – masing model turbin pada pengaturan *Body Motion* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



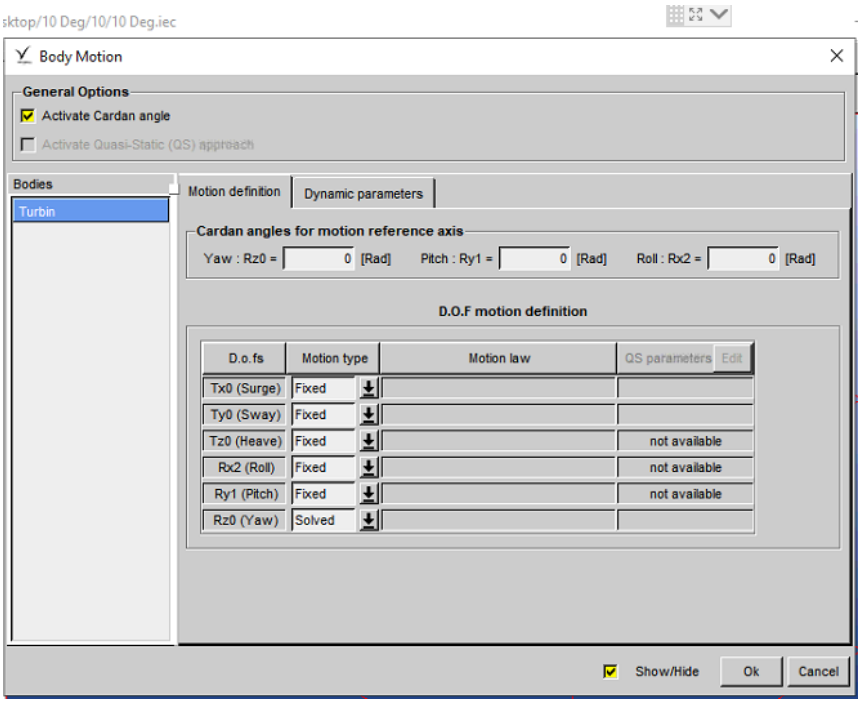
Gambar 4.44 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Helical* 180^0



Gambar 4.45 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 0^0



Gambar 4.46 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 5^0



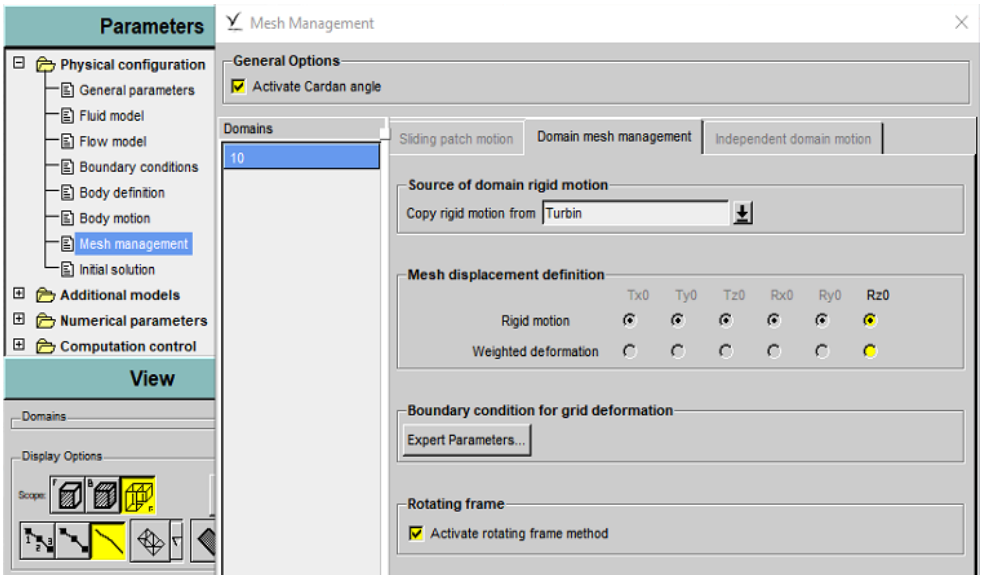
Gambar 4.47 *Centre of Gravity* dan *Inertia Matrix* pada Model *Tip Rake* 10^0

4.7.7 Pengaturan *Mesh Management*

Mesh Management merupakan sebuah pengaturan yang berfungsi untuk menentukan karakter mesh pada saat *running*. Bagian yang perlu diperhatikan pada pengaturan ini adalah pilihan *Rigid Motion* dan dan *Weighted Deformation.* Pada *Rigid Motion, meshing* akan mengikuti pergerakan *body* (turbin) tanpa mengalami deformasi, yang mana dapat digunakan untuk menganalisa gerakan dengan amplitudo atau putaran yang berubah – ubah, sehingga pengatura pada mesh tidak perlu dilakukan lagi. Sedangkan pada *Weighted Deformation*, *meshing* akan otomatis membentuk mesh yang mengikuti bentuk *body* (turbin) menggunakan teknik deformasi *mesh*, sehingga *mesh* yang berdeformasi butuh pengaturan khusus.

Pada awal penelitian, pilihan yang digunakan *weighted deformation*, sesuai dengan *default* dari *software* FINE MARINE. Ternyata, pilihan ini menyebabkan simulasi mengalami *crash* dengan *error code Face Orientation Problem* di tengah jalan, sehingga pada seluruh variasi model turbin, simulasinya gagal tanpa bisa menampilkan hasil sama sekali.

Setelah melakukan pengecekan *meshing*, model, dimensi, dan pengaturan lainnya, akhirnya proses simulasi yang berjalan lancar sampai akhir, adalah yang menggunakan pilihan *rigid motion*. Maka, *rigid motion* ini digunakan pada seluruh variasi model turbin, dan hasilnya berjalan lancer. Maka, *rigid motion* merupakan pengaturan yang tepat untuk menganalisa benda berputar, yaitu turbin pada penelitian inilah salah satunya.

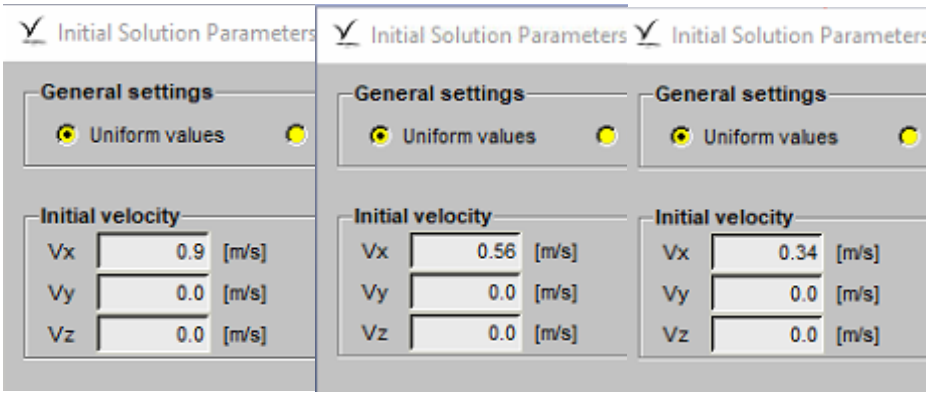


Gambar 4.48 Pilihan *Rigid Motion* pada Pengaturan *Mesh Management*

4.7.8 Initial Solution

Initial Solution merupakan sebuah pengaturan kondisi awal simulasi. Oleh karena itu, pengaturan yang dipilih adalah *Uniform Values*, bukan *Restart From Previous Computation.* Untuk bagian *initial velocity*, merupakan kecepatan awal, yaitu kecepatan aliran yang divariasikan pada setiap model.

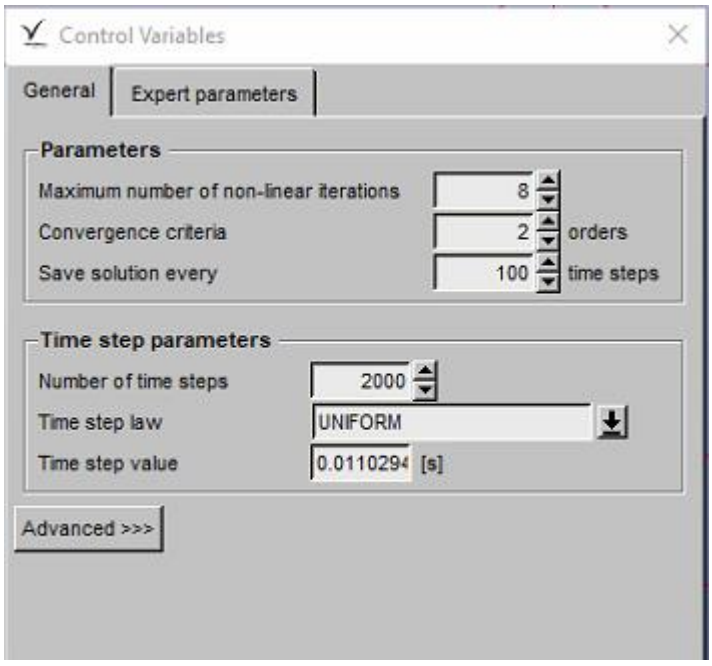
Pada model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, sudut *tip rake* 5^0, serta sudut *tip rake* 10^0, variasi kecepatan yang digunakan adalah 0.34 m/s, 0.56 m/s, dan 0.9 m/s. Maka, kecepatan tersebut yang menjadi input pada *initial velocity* bagian Vx, dimana aliran fluida air laut yang disimulasikan memiliki arah sejajar dengan sumbu x.



Gambar 4.49 Pengaturan *Initial Solution* pada FINE MARINE

4.7.9 Pengaturan *Control Variables*

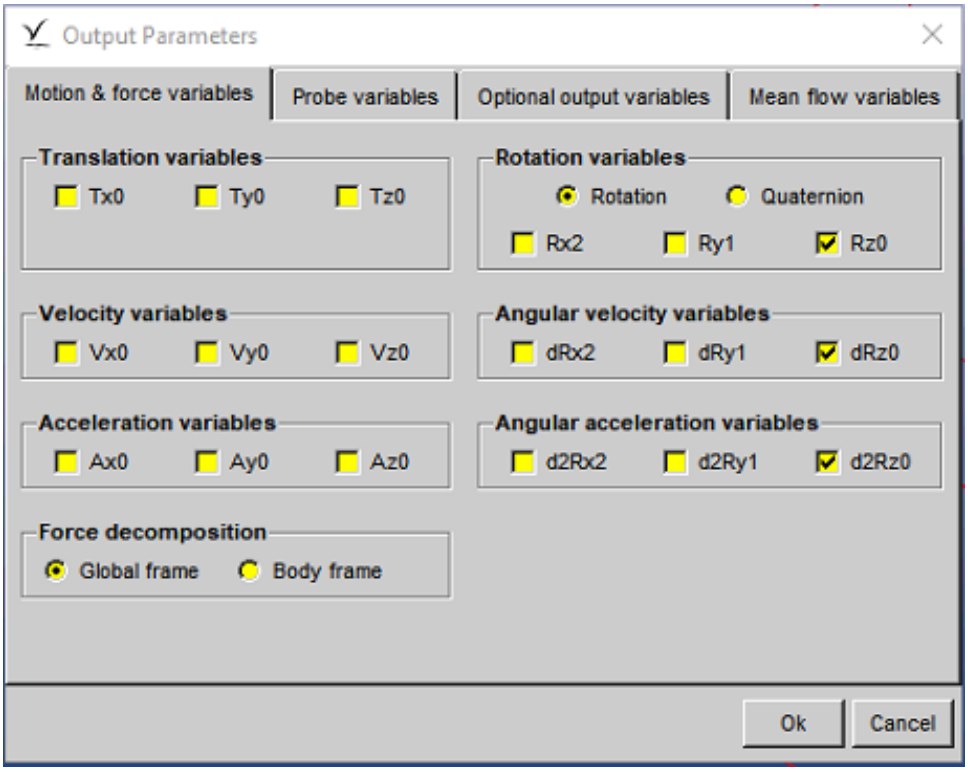
Pengaturan selanjutnya adalah *Control Variables*, yang mana berfungsi untuk mengatur jalannya running. Pengaturan yang dilakukan adalah pada bagian *save solution* dan *number of time step*, dimana *save solution* memiliki 100 *time step* supaya *file* hasil *running* menjadi lebih *compact*, dan number of *time step* yang dimasukkan adalah sebesar 2000 *time step*, supaya grafik hasil *running* sudah menjadi stabil, atau stasioner. Pengaturan ini berlaku pada seluruh model variasi turbin.



Gambar 4.50 Pengaturan *Control Variable* pada FINE MARINE

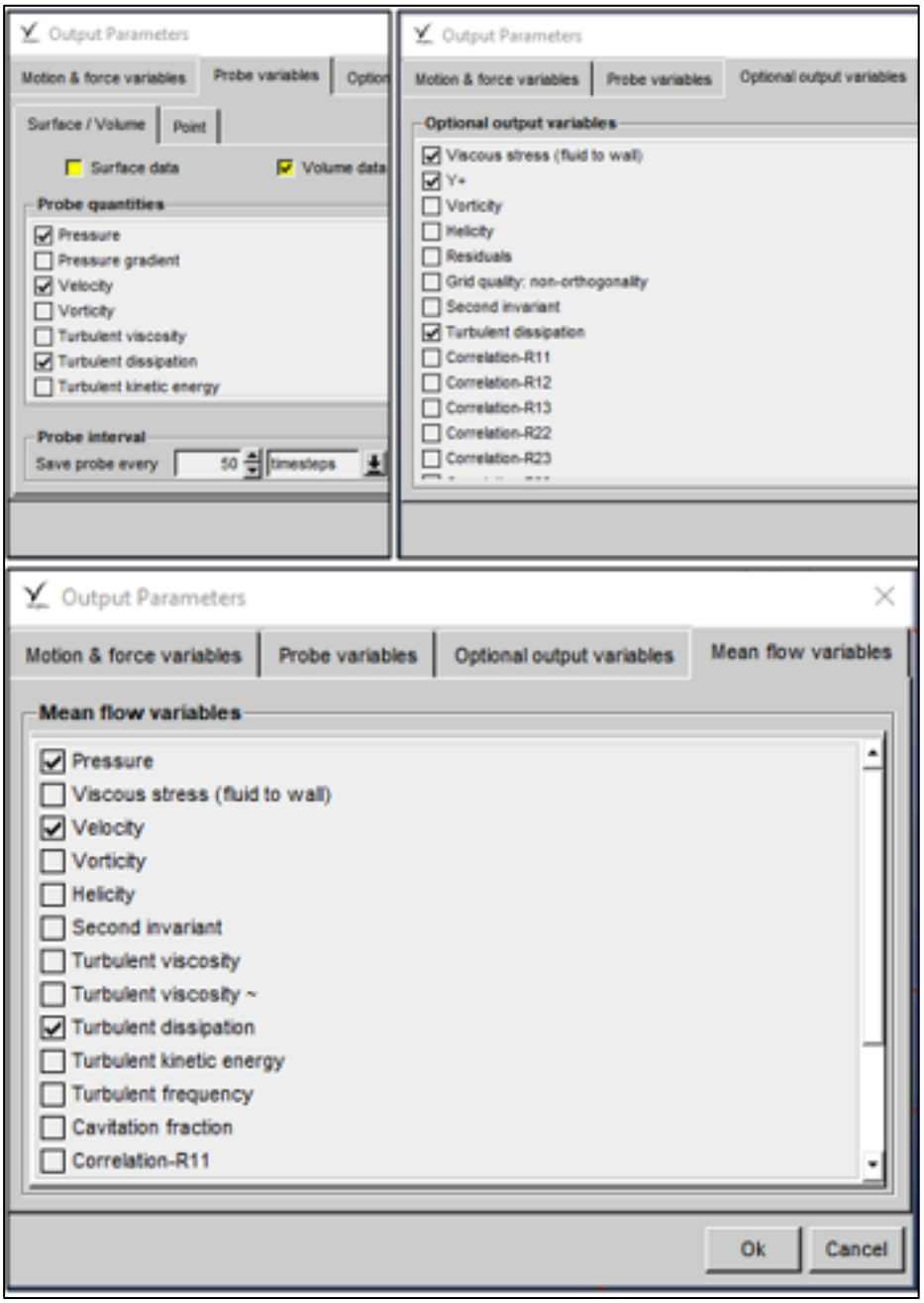
4.7.10 Pengaturan *Output Parameter*

Pengaturan *Output Parameter* merupakan pengaturan yang berfungsi untuk mengatur output hasil simulasi apa saja yang akan ditampilkan pada hasil analisa. Terdapat tiga bagian yang perlu diatur, yaitu *Probe Variables*, *Optional Output Variables*, dan *Mean Flow Variables*. Sedangkan untuk bagian *motion & force variables* dibiarkan pada pengaturan *default*, yaitu hanya Rz0, dRz0, dan d2Rz0 yang diaktifkan seperti gambar di bawah ini,



Gambar 4.51 Pengaturan *Motion & Variables* pada Pengaturan *Output Parameters*

Lalu, untuk bagian *Probe Variables*, *parameter output* yang diaktifkan adalah *Pressure*, *Velocity*, dan *Turbulent Dissipation*. Parameter ini penting daam menganalisa torsi dan RPM dari turbin. Untuk bagian *optional output variables* dan *mean flow variables*, parameter output yang diaktifkan sama seperti *Probe Variables*, seperti pada gambar di bawah. Selain itu, pengaturan ini diterapkan pada seluruh model dan variasi turbin.

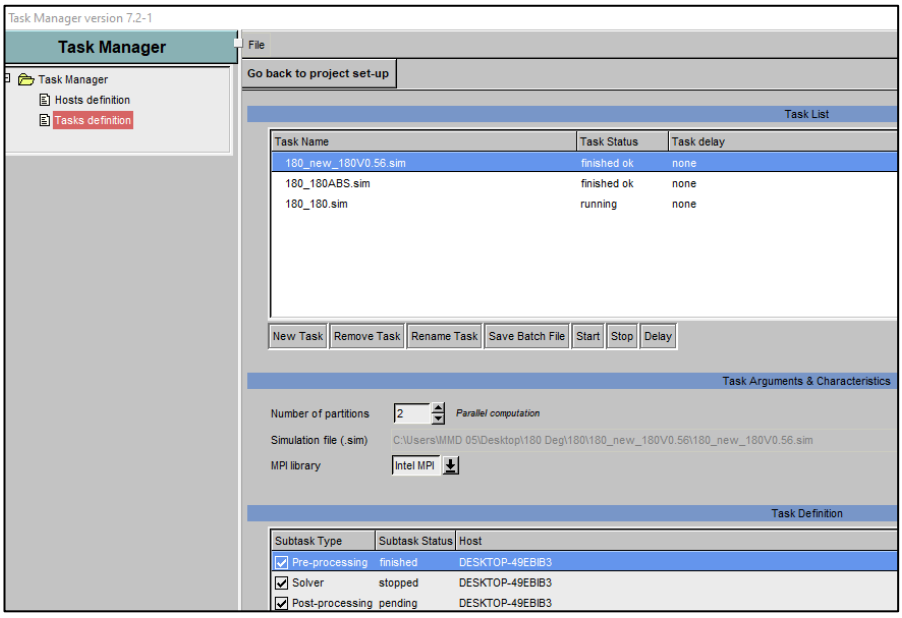


Gambar 4.52 Pengaturan *Probe Variables, Optional Output Variables* dan *Mean Flow Variables* pada Pengaturan *Output Parameters*

4.7.11 *Task Manager*

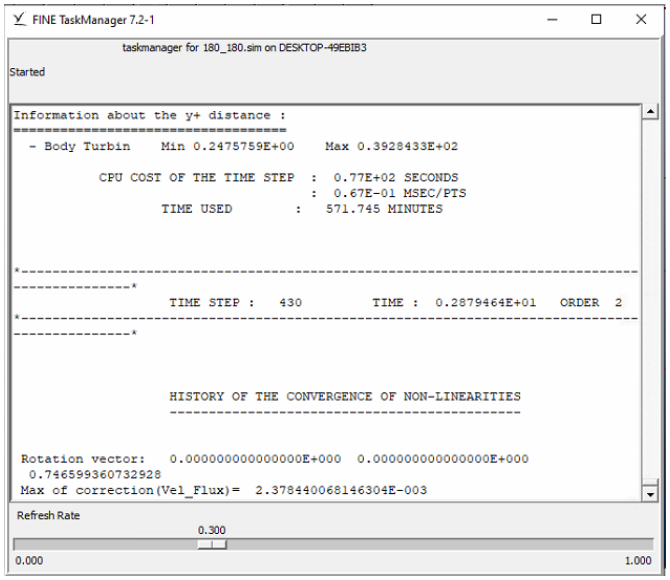
*Task Manage*r merupakan sebuah panel yang berisi status *running*, pengaturan untuk memulai *running*, memberhentikan *running*, membuat fungsi *running* baru, serta menghapus *running* yang lama.

Pada *Task Manager* juga terdapat kolom *parallel computation*, dimana jika nilainya semakin tinggi, maka kecepatan *running* akan bertambah dikarenakan semain banyaknya komputasi paralel yang dilakukan.



Gambar 4.53 Tampilan *Task Manager* pada FINE MARINE

Ketika pengaturan keseluruhan sudah tepat, maka ketika tombol *start* di klik, *solver* akan muncul dan proses *running* dimulai. Tampilan Solver dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.54 Tampilan *Solver* saat *Running* pada FINE MARINE

Ketika *running* sukses tanpa adanya *error*, maka pada *Task Manager* akan menampilkan notifikasi sebagai berikut.

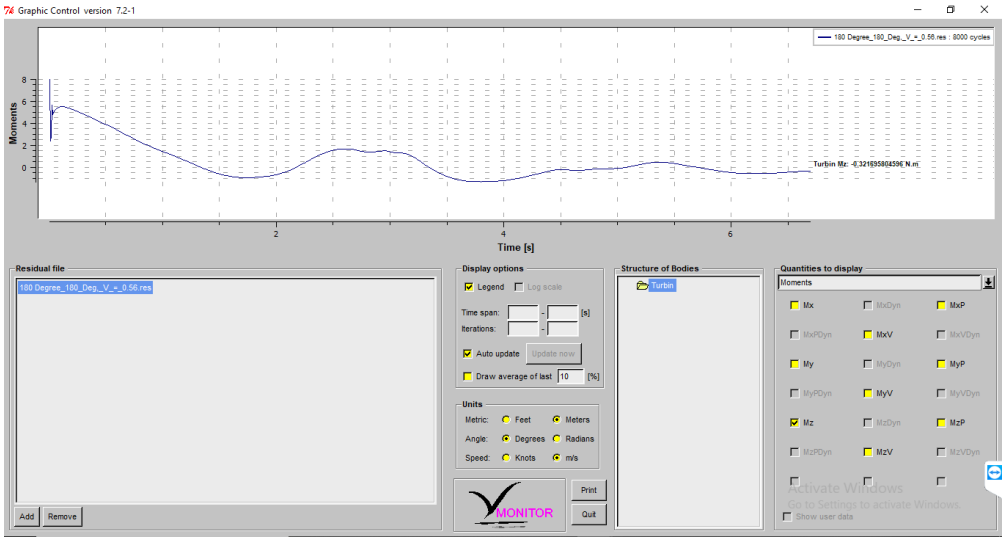
Gambar 4.55 Tampilan Notifikasi *Running* yang Berhasil pada FINE MARINE

4.8 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran pada Setiap Model dan Variasi Menggunakan 2000 *Time Step*

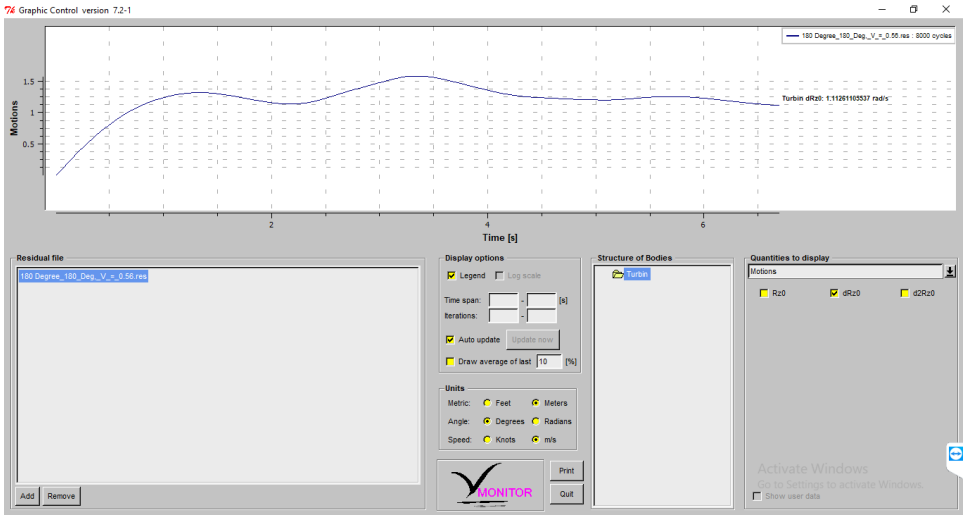
Berikut ini merupakan hasil *running* dari seluruh model dan variasi turbin yang menggunakan 2000 *Time Step*. Dalam penelitia ini, terdapat beberapa kendala pada hasil simulasi, sehingga dilakukan beerapa kali simulasi denga pengaturan yang berbeda, yang akan dijelaskan lebih detail pada setiap subbab di bawah ini.

4.8.1 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Omar Y. (*Helical* 180^0)

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.56 Grafik Torsi Model Turbin *Helical* 180^0

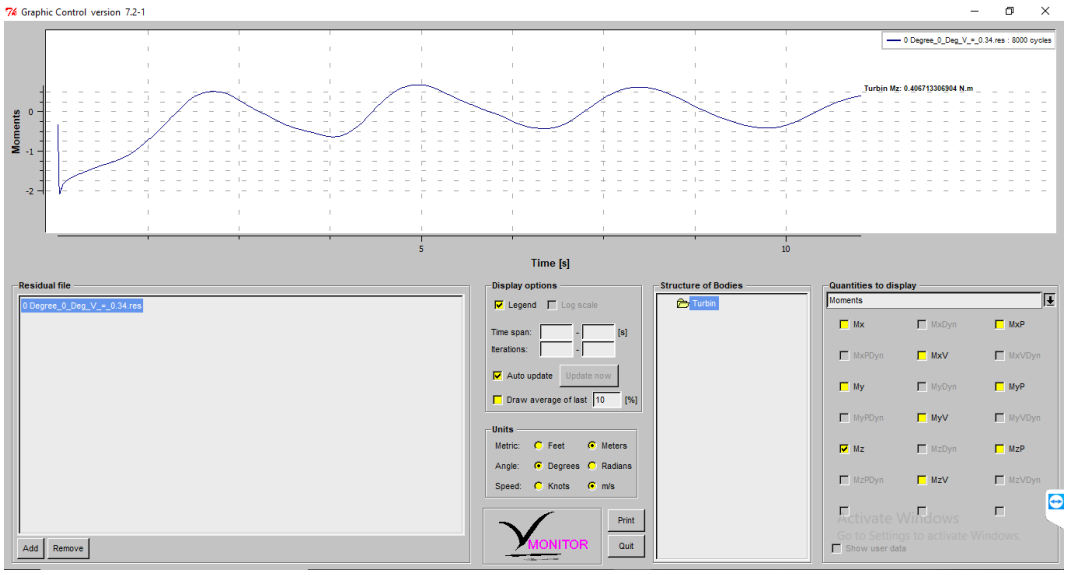


Gambar 4.57 Grafik Putaran Model Turbin *Helical* 180^0

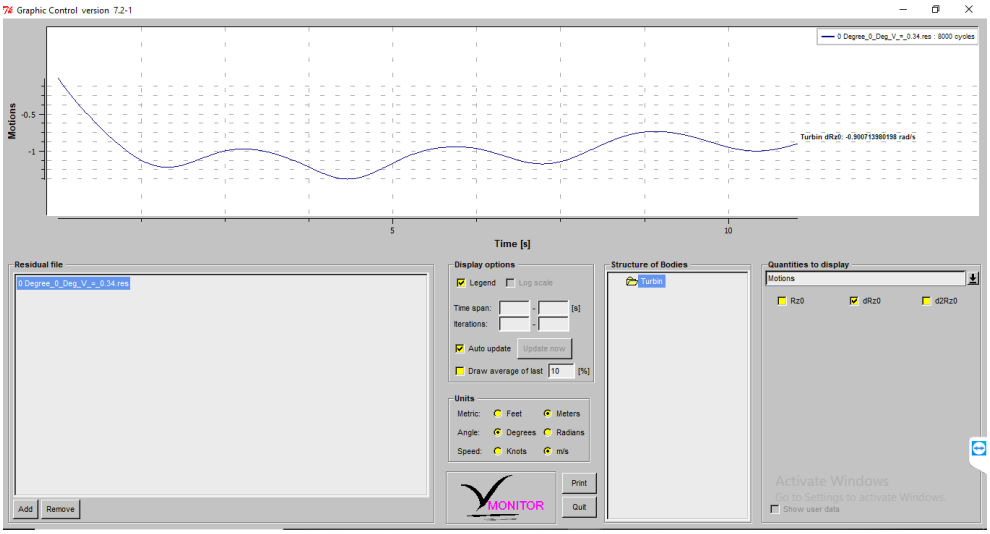
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,321 Nm dan nilai putaran sebesar 1,113 Rad/s (10,625 RPM) untuk turbin model Omar Yaakob ini.

4.8.2 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



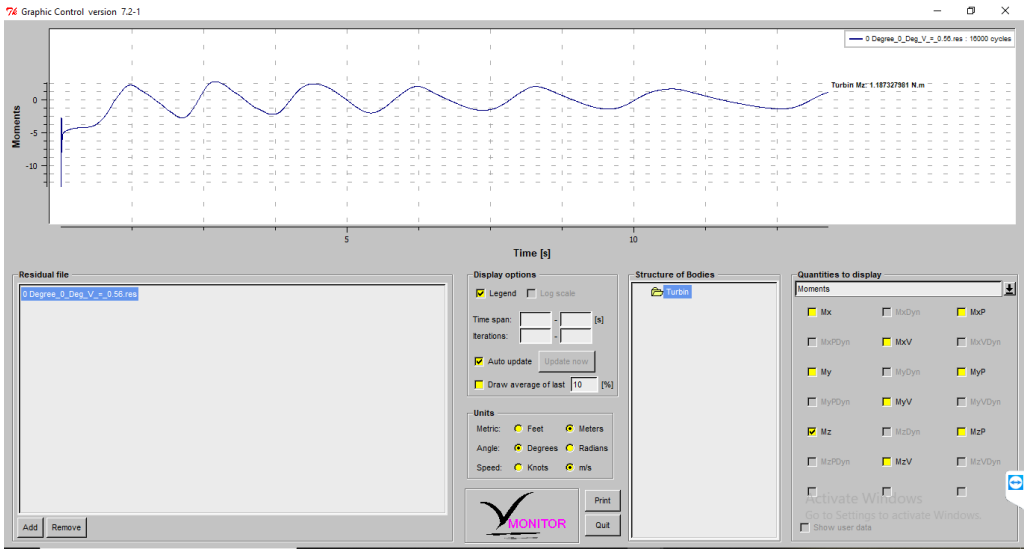
Gambar 4.58 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s



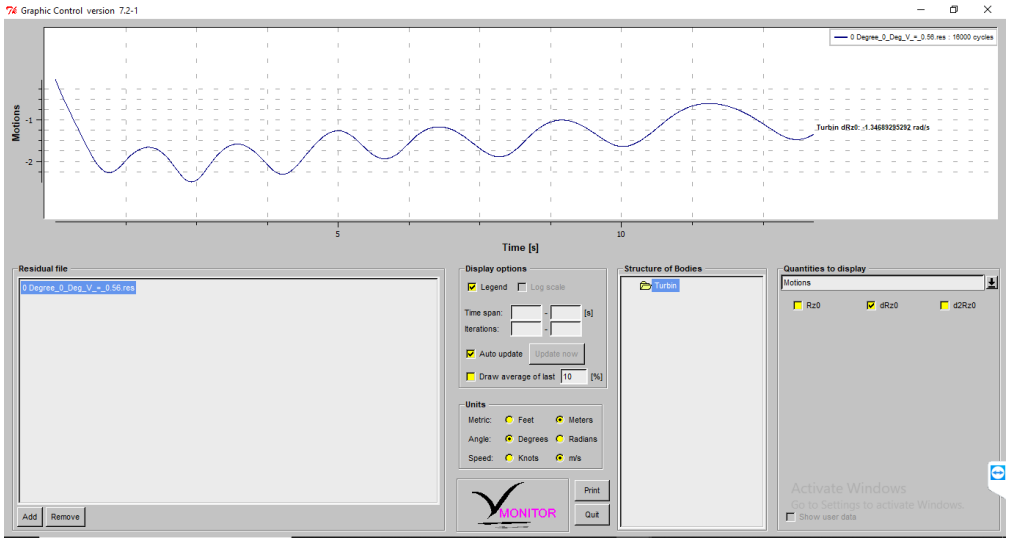
Gambar 4.59 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,407 Nm dan nilai putaran sebesar – 0,901 Rad/s (-8,601 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

4.8.3 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s



Gambar 4.60 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s

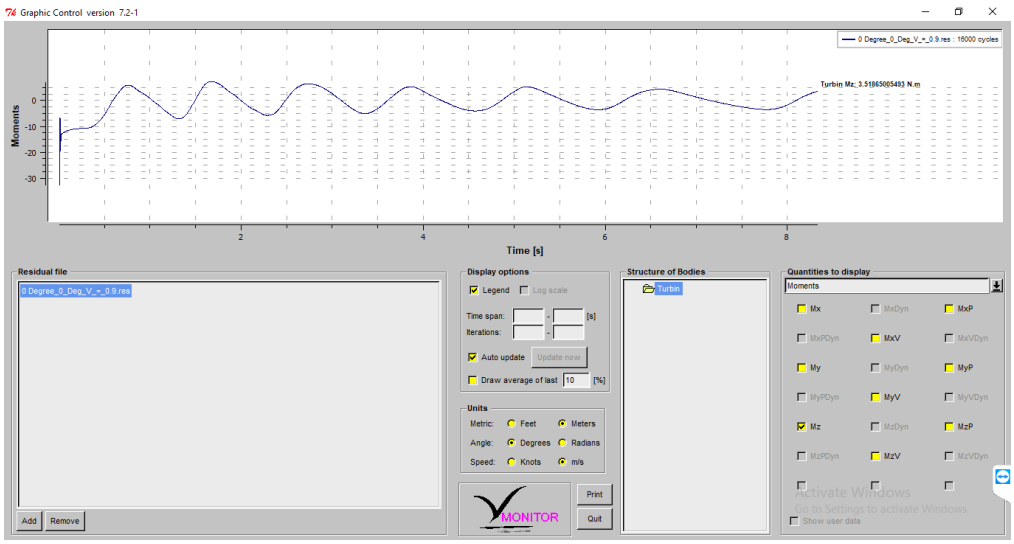


Gambar 4.61 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s

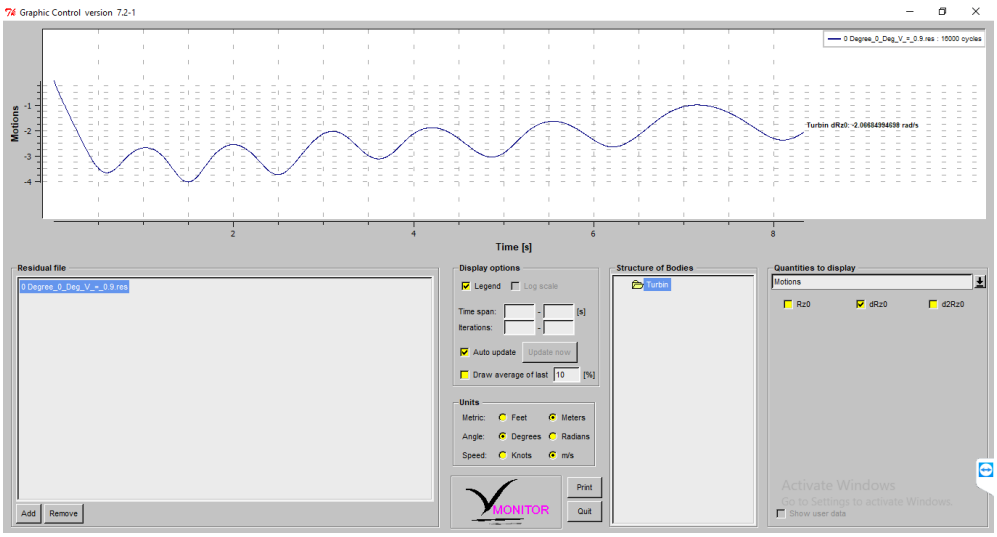
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -1,187 Nm dan nilai putaran sebesar -1,347 Rad/s (-8,601 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

4.8.4 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.62 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s

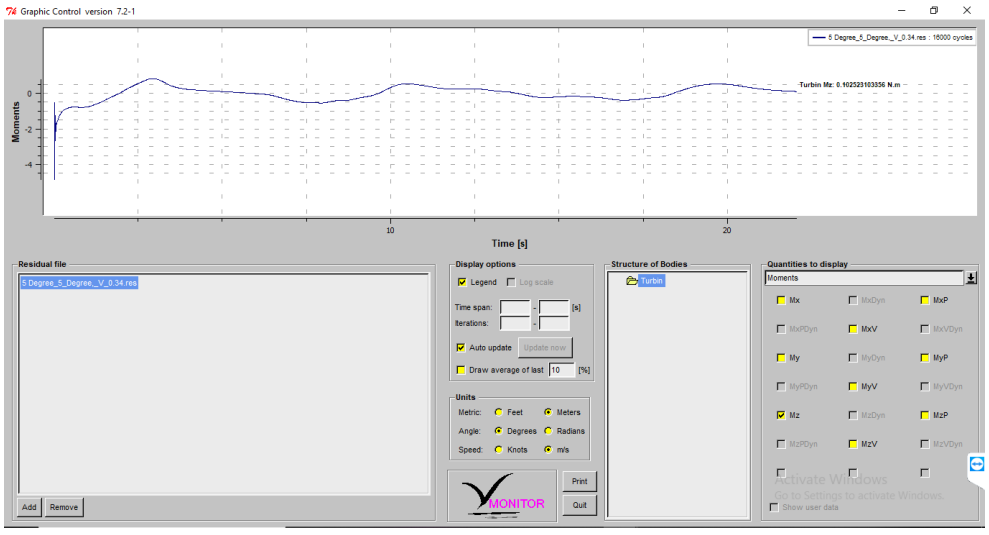


Gambar 4.63 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s

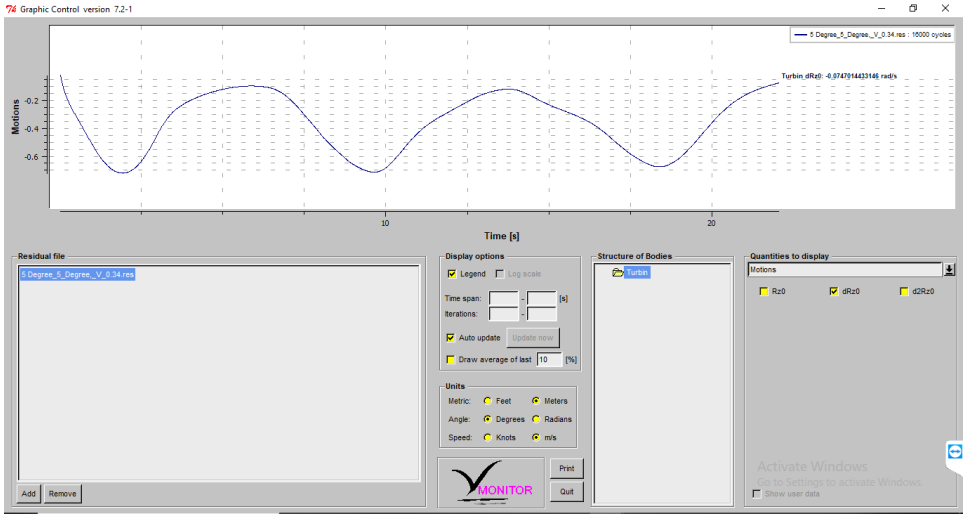
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -3,518Nm dan nilai putaran sebesar -2,067 Rad/s (-19,737 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

4.8.5 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.64 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s

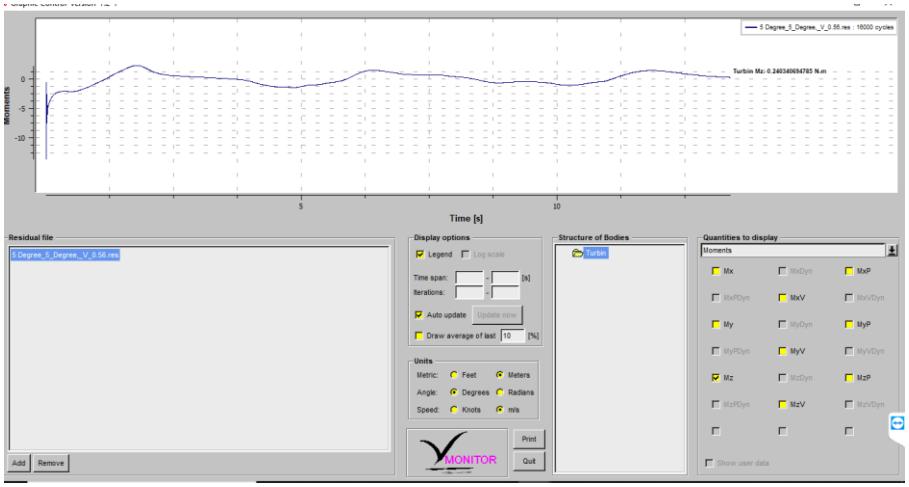


Gambar 4.65 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s

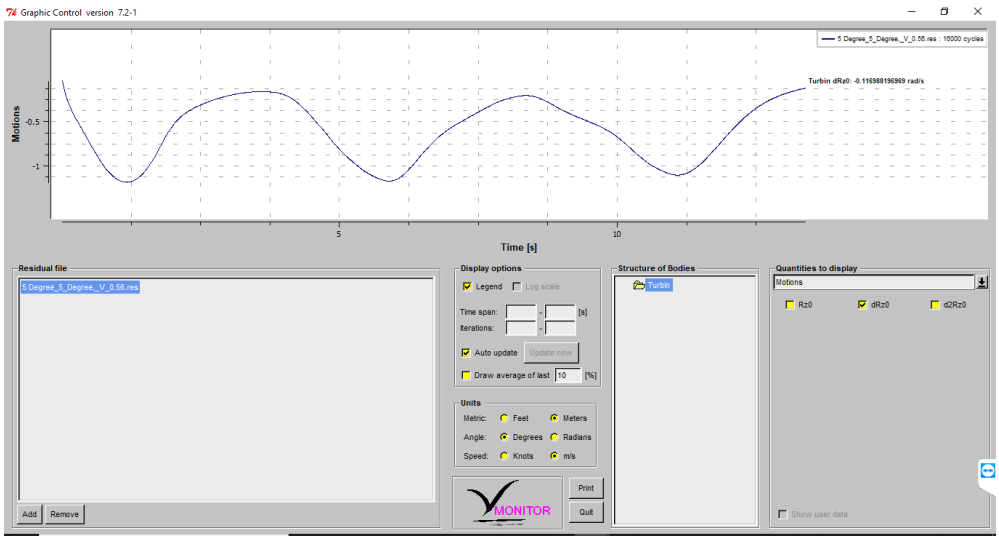
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,103 Nm dan nilai putaran sebesar - 0,075 Rad/s (-0,713 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

4.8.6 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.66 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s

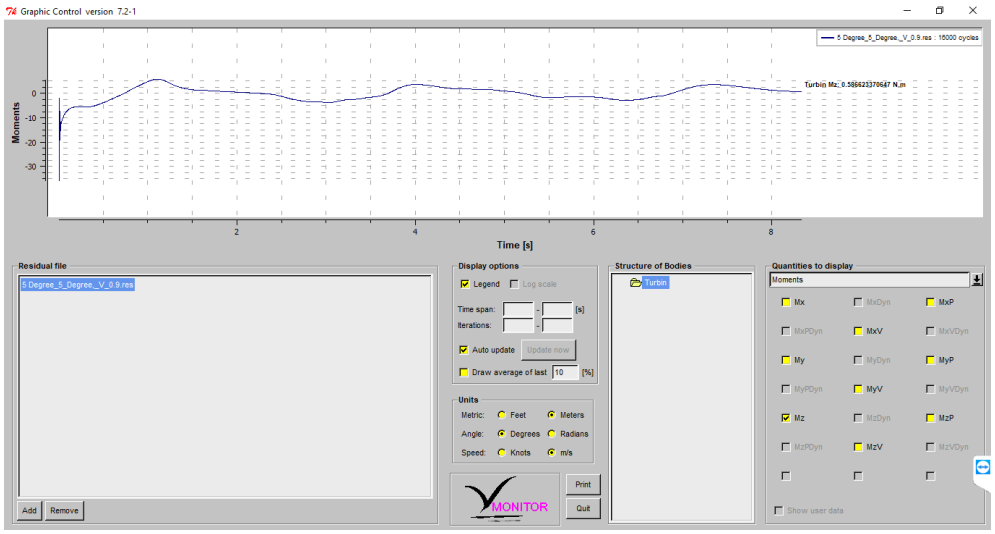


Gambar 4.67 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s

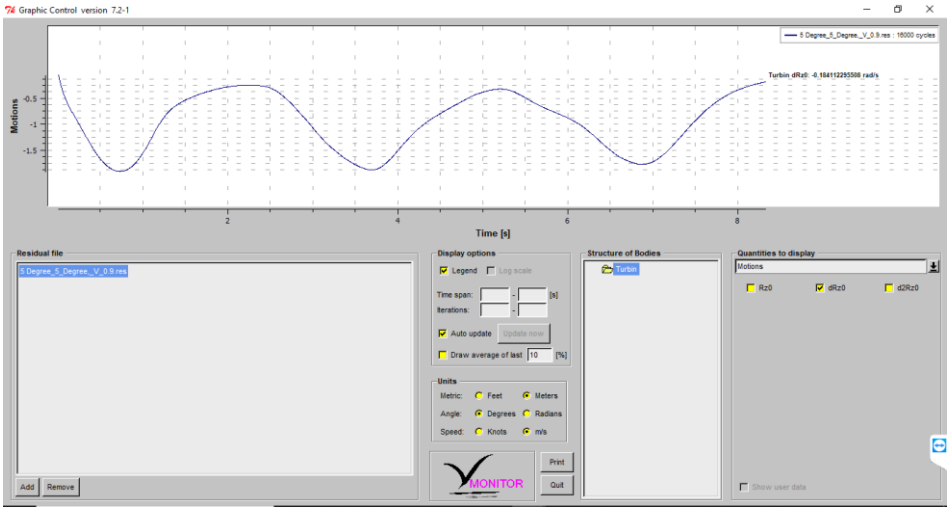
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,340340695 Nm dan nilai putaran sebesar -0,117 Rad/s (-1,117 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

4.8.7 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.68 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s

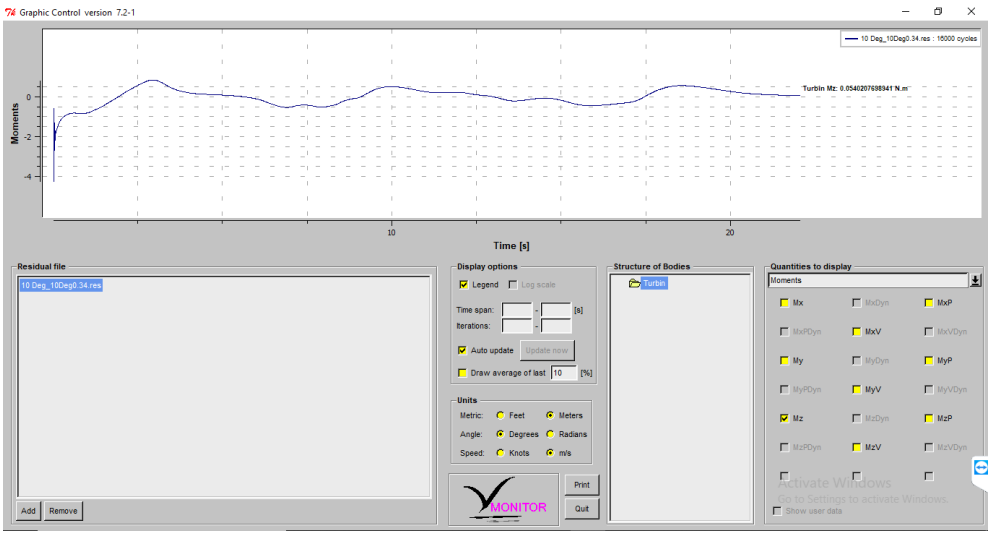


Gambar 4.69 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s

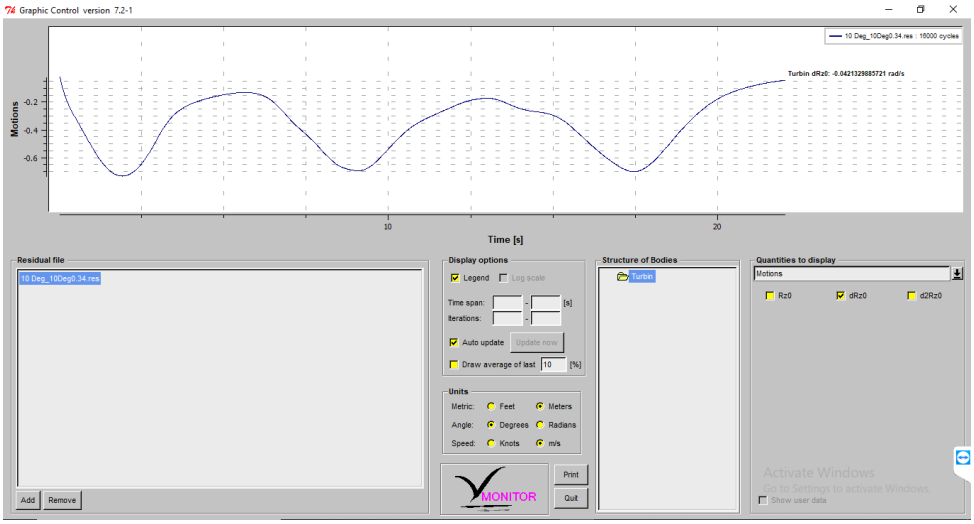
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,587 Nm dan nilai putaran sebesar -0,184 Rad/s (-1,758 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

4.8.8 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.70 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s

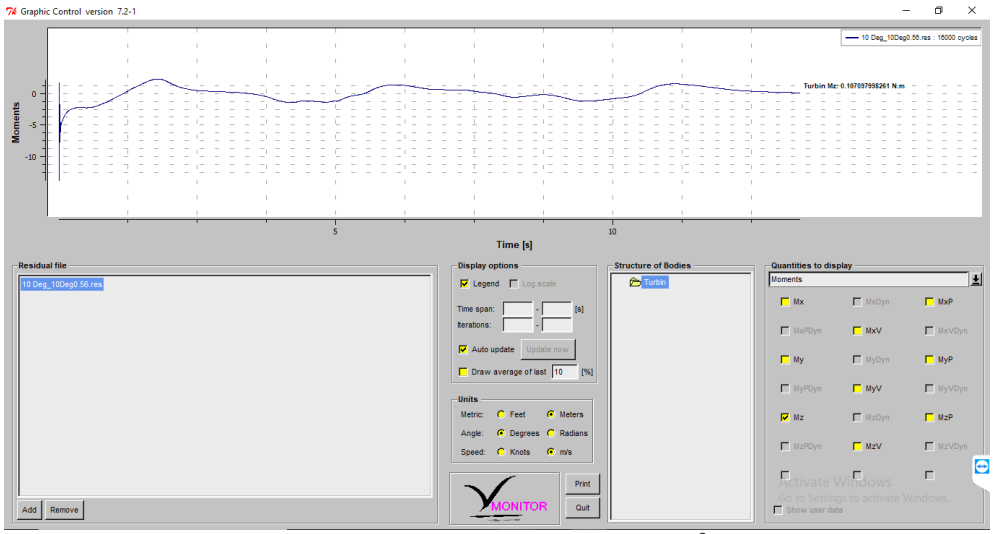


Gambar 4.71 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s

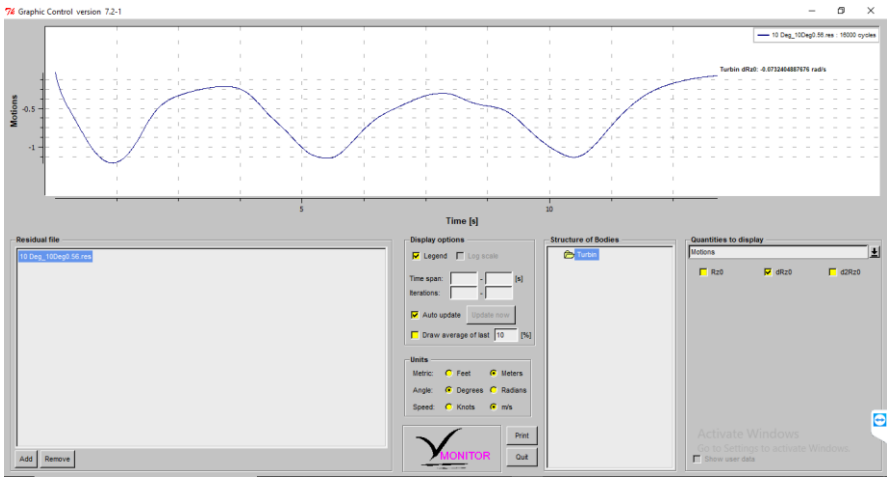
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,054 Nm dan nilai putaran sebesar 0,107 Rad/s (1,022 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

4.8.9 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.72 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s

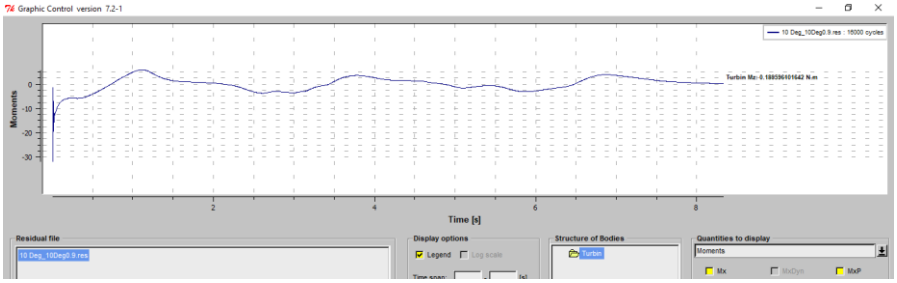


Gambar 4.73 Grafik Torsi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s

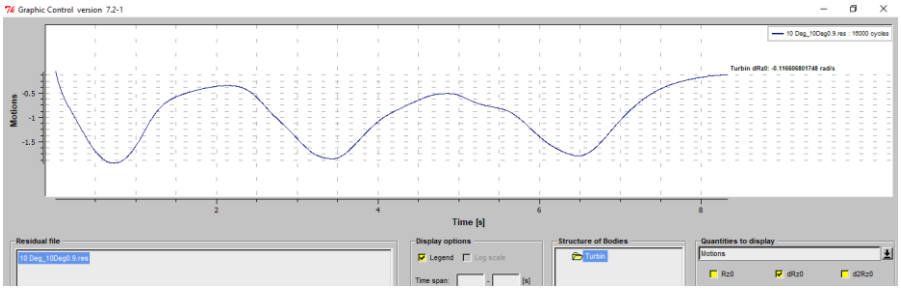
Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,107 Nm dan nilai putaran sebesar -0,073 Rad/s (-0,699 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

4.8.10 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s

Berikut ini adalah Torsi (Mz) dan Putaran yang dihasilkan pada model turbin ini berdasarkan *running* atau simulasi yang dilakukan.



Gambar 4.74 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s



Gambar 4.75 Grafik Putaran Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,189 Nm dan nilai putaran sebesar -0,117 Rad/s (-1,114 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

Berikut adalah tabulasi keseluruhan hasil running dengan *time step* 2000 pada parameter *Force* (gaya), *Moment* (Torsi), dan *Motion* (Putaran).

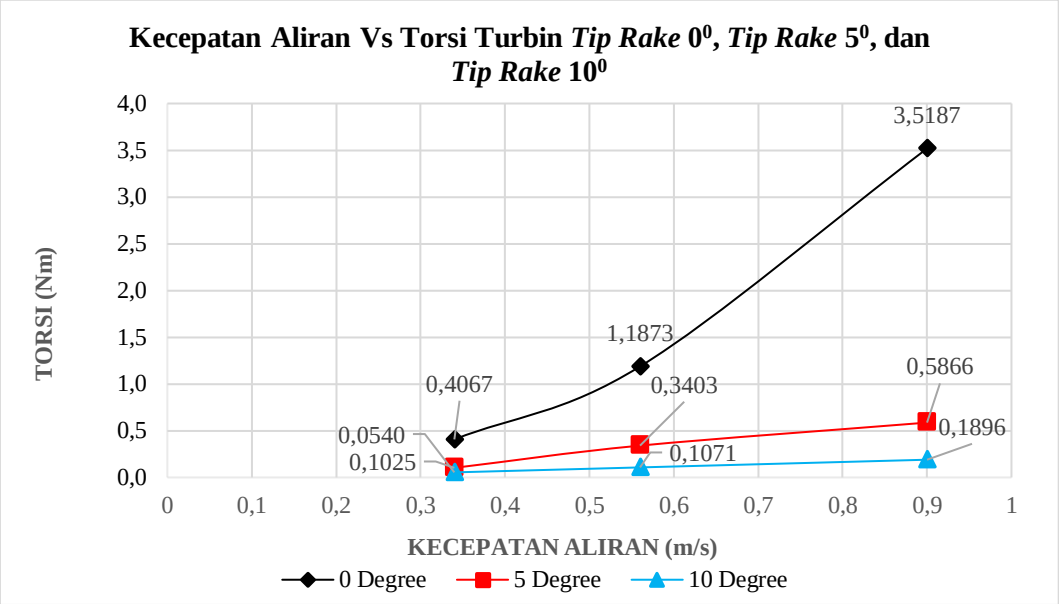
Tabel 4.2 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Omar Yaakob (180^0)

Helical 180 *Degree*		
180 Degree V = 0.56		**Unit**
Mz	-0,322	Nm
dRz0	1,113	Rad/s

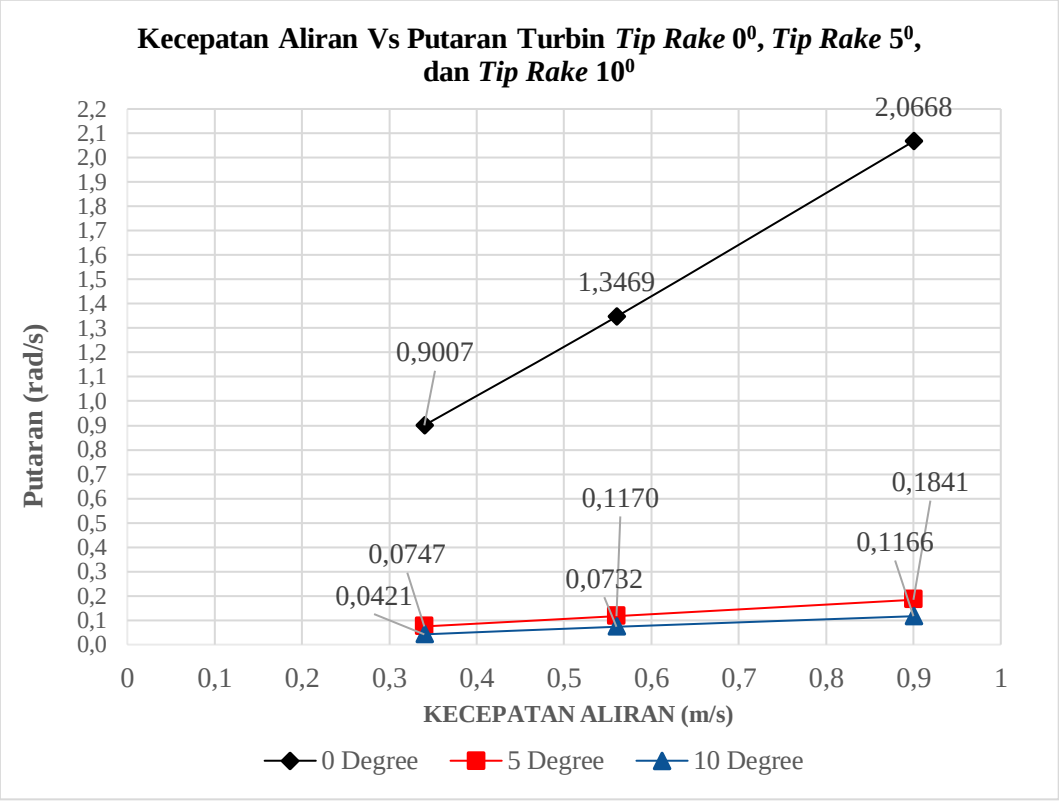
Tabel 4.3 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0, 5^0, dan 10^0

0 Degree								
0 Deg V = 0.34		**Unit**	**0 Deg V = 0.56**		**Unit**	**0 Deg V = 0.9**		**Unit**
T(Mz)	0,407	Nm	T(Mz)	1,187	Nm	T(Mz)	3,519	Nm
dRz0	-0,901	Rad/s	dRz0	-1,347	Rad/s	dRz0	-2,067	Rad/s
5 Degree								
5 Deg V = 0.34		**Unit**	**5 Deg V = 0.56**		**Unit**	**5 Deg V = 0.9**		**Unit**
T(Mz)	0,103	Nm	T(Mz)	0,340	Nm	T(Mz)	0,587	Nm
dRz0	-0,075	Rad/s	dRz0	-0,117	Rad/s	dRz0	-0,184	Rad/s
10 Degree								
10 Deg V = 0.34		**Unit**	**10 Deg V = 0.56**		**Unit**	**10 Deg V = 0.9**		**Unit**
T(Mz)	0,054	Nm	T(Mz)	0,107	Nm	T(Mz)	0,190	Nm
dRz0	-0,042	Rad/s	dRz0	-0,073	Rad/s	dRz0	-0,117	Rad/s

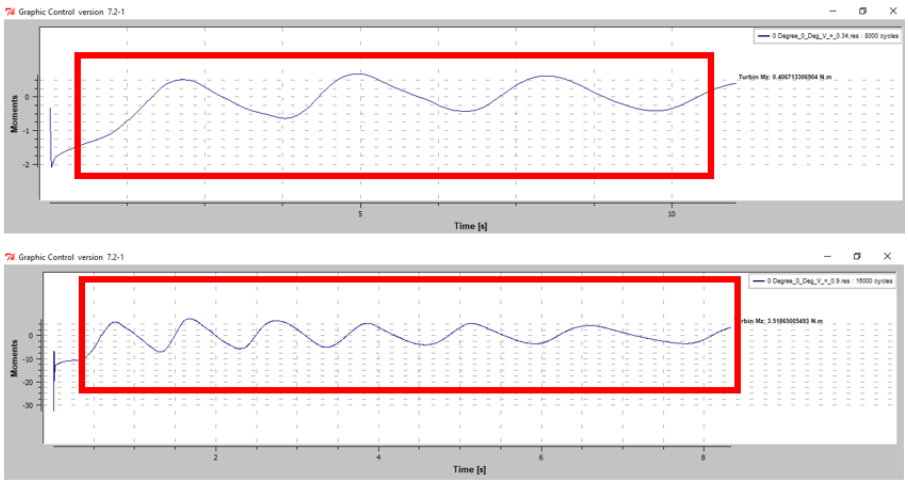
Pada hasil simulasi pertama ini, terdapat permasalahan pada grafik hasil running, terutama model dengan *tip rake* 0, 5, dan 10 derajat. Untuk grafik dari nilai tabulasi torsi dan RPM dapat dilihat di bawah. Grafik dan Torsi dan RPM berbentuk fluktuatif, dimana nilai torsi dan putarannya belum stasioner atau belum stabil, yang dapat dilihat pada gambar di bawah.



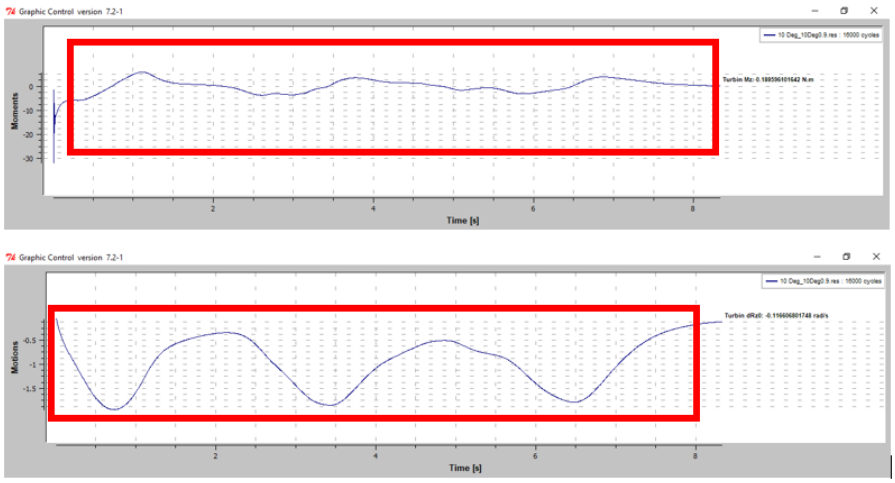
Gambar 4.76 Grafik Kecepatan Aliran Vs Torsi Turbin *Tip Rake* 0^0, *Tip Rake* 5^0, dan *Tip Rake* 10^0



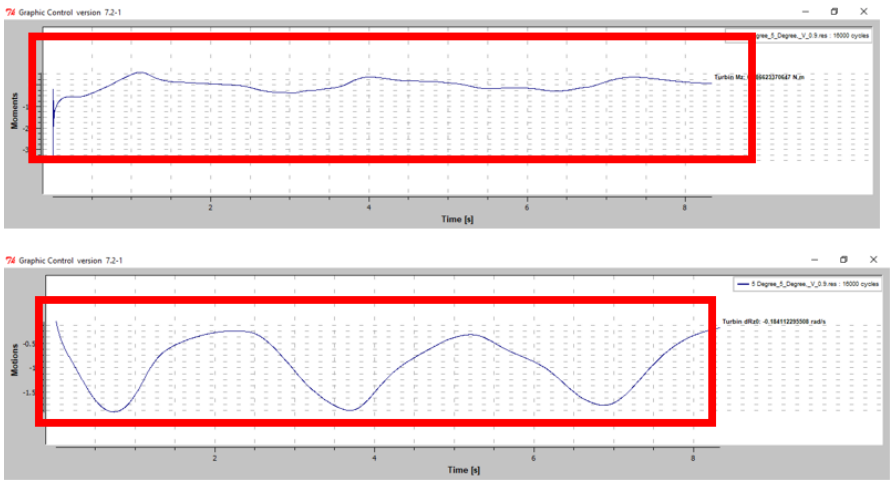
Gambar 4.77 Grafik Kecepatan Aliran Vs Torsi Turbin *Tip Rake* 0^0, *Tip Rake* 5^0, dan *Tip Rake* 10^0



Gambar 4.78 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0



Gambar 4.79 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0

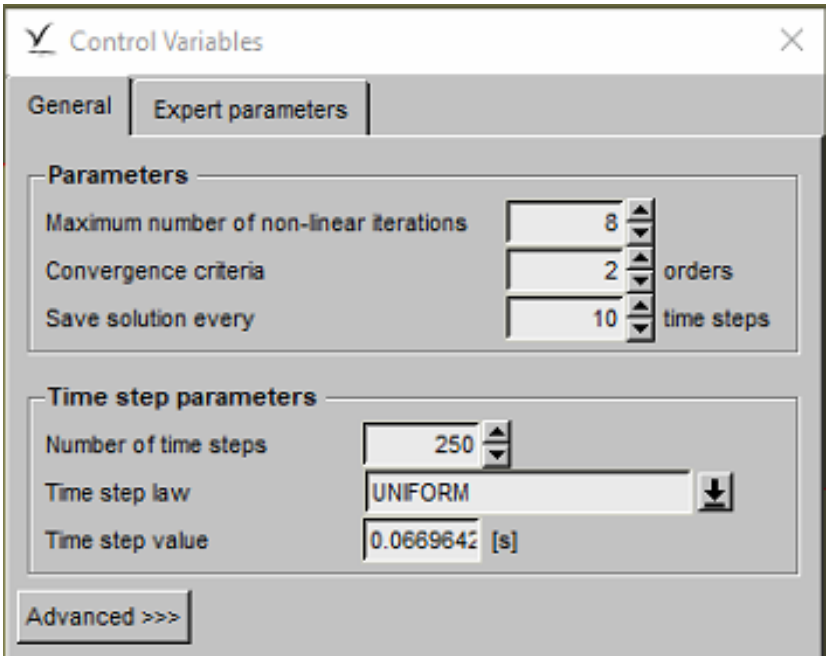


Gambar 4.80 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0

Oleh karena itu, rekomendasi yang diberikan dosen pembimbing adalah mencoba running simulasi kembali, dengan jumlah *time step* yang diperbanyak, supaya data menjadi stasioner. Oleh karena itu, *running* pada seluruh variasi model kembali dilakukan.

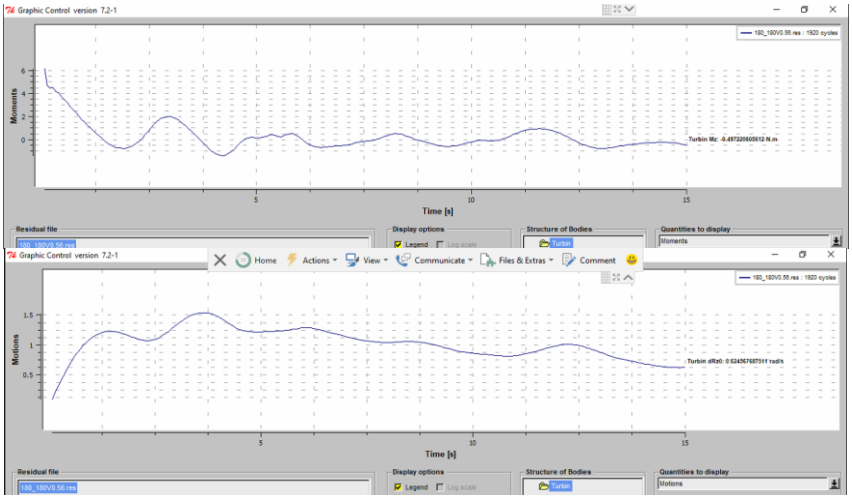
4.9 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran pada Setiap Model dan Variasi Menggunakan 250 *Time Step* dan *Time Value* Dipercepat 10 kali

Setelah sebelumnya *running* dilakukan menggunakan 200 *Time Step*, maka *running* kali ini menggunakan pengaturan *time step* 250 dan *time value* diperepat 10 kali. Cara yang dilakukan adalah dengan mengubah number of time step menjadi 250, dan nilai *time step* awal 0.00669 diganti menjadi 0.069. Hal ini bertujuan untuk mempersingkat waktu *running*, dan memaksimalkan *time step* yang dihasilkan. Dengan pengaturan seperti ini, maka didapatkan hasil *running* yang sama dengan *running time step* 2500 dan tanpa mempercepat *time value*. Untuk ubahan pengaturan dapat dilihat pada gambar dibawah ini. Pengaturan ini digunakan pada seluruh model variasi turbin yang disimulasikan pada penelitian tugas akhir ini.



Gambar 4.81 Grafik Hasil Simulasi Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0

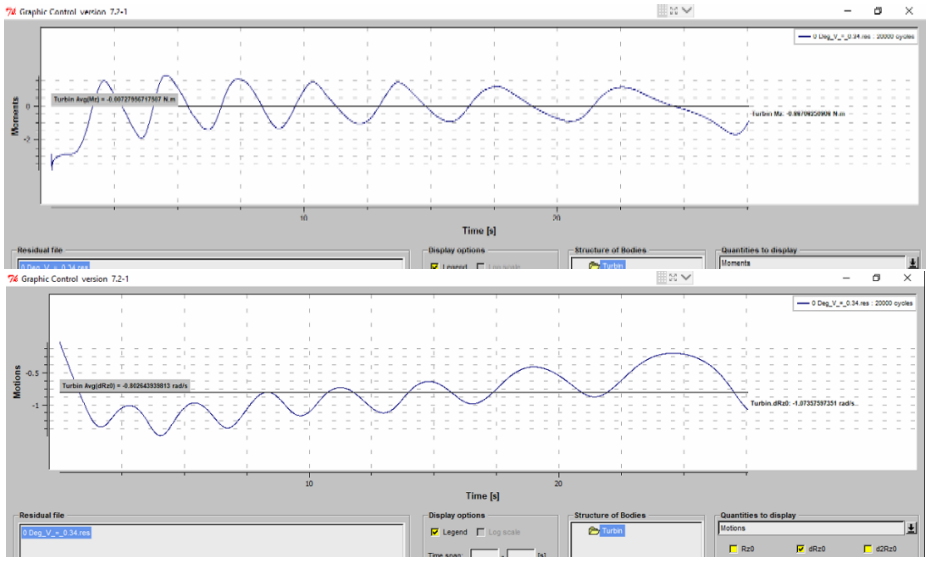
4.9.1 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Omar Y. (*Helical* 180^0)



Gambar 4.82 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Helical* 180^0 dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0.49722 Nm dan nilai putaran sebesar 0,62457 Rad/s (5,9642 RPM) untuk turbin model Omar Yaakob ini.

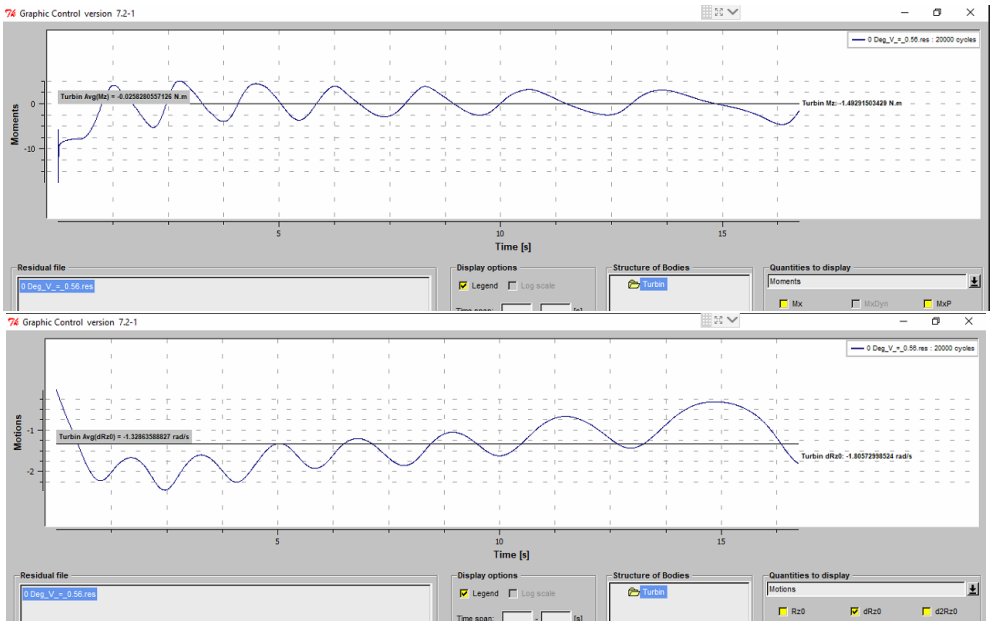
4.9.2 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s



Gambar 4.83 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250

Setelah dilakukan penambahan *time step*, khusus untuk model 0^0 grafik hasilnya masih fluktuatif. Oleh karena itu, perhitungan nilai rataan digunakan untuk mendapatkan hasil yang tepat. Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -1,389 Nm dan nilai putaran sebesar –0,909 Rad/s (8,686RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

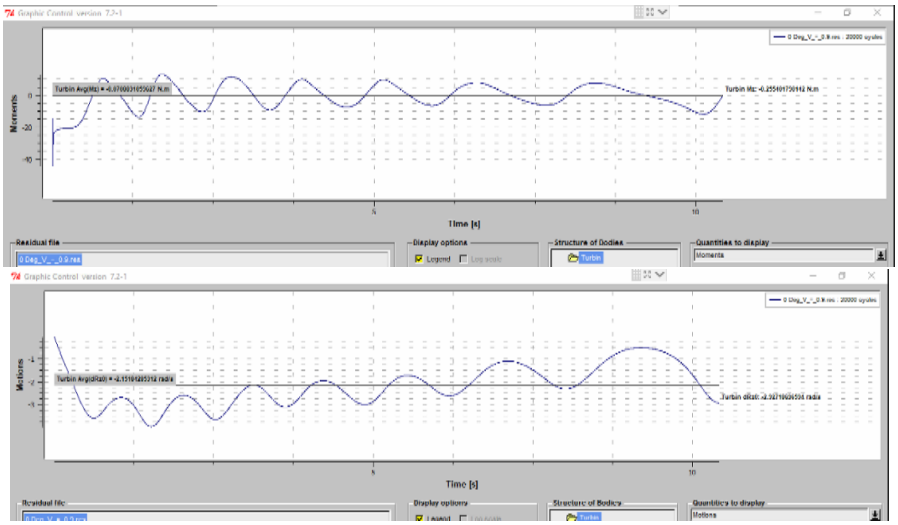
4.9.3 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s



Gambar 4.84 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250

Setelah dilakukan penambahan *time step*, khusus untuk model 0^0 grafik hasilnya masih fluktuatif. Oleh karena itu, metode nilai rataan digunakanuntuk mendapatkan hasil yang tepat. Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -3,788 Nm dan nilai putaran sebesar –1,541 Rad/s (-14,712 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

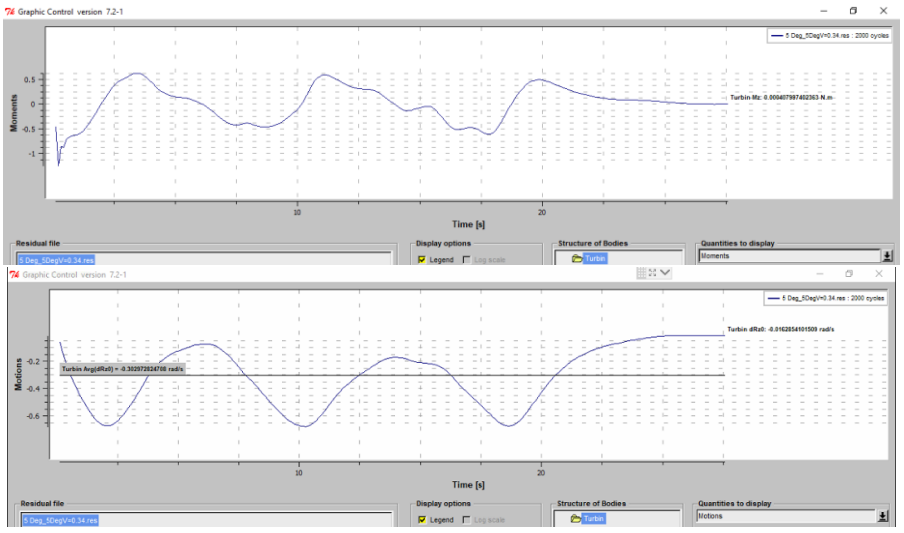
4.9.4 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s



Gambar 4.85 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 0^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -8,9471 Nm dan nilai putaran sebesar –2,555 Rad/s (-24,399 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

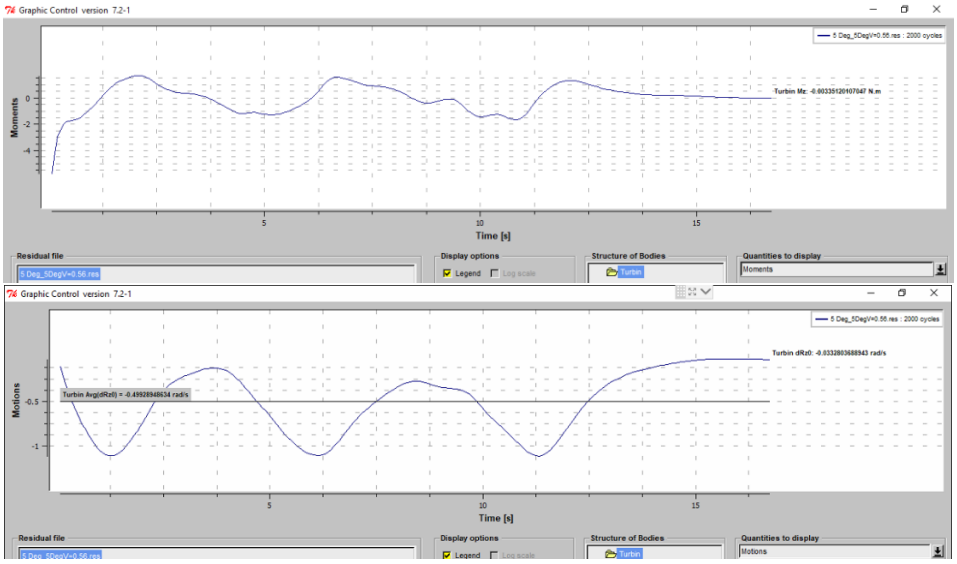
4.9.5 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s



Gambar 4.86 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,569 Nm dan nilai putaran sebesar – 0,620 Rad/s (-5,924 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

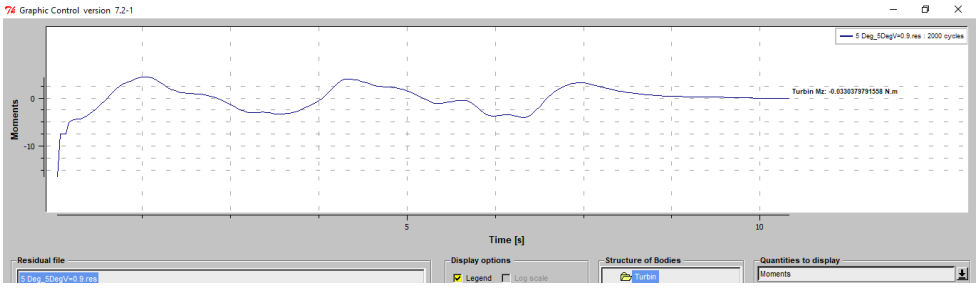
4.9.6 Hasil Simulasi Torsi dan Putaran Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s

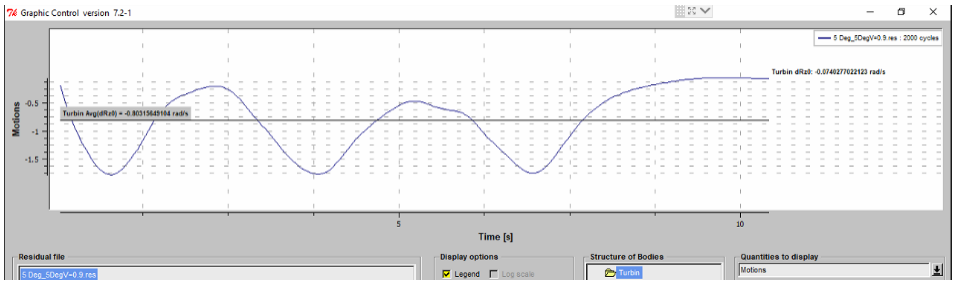


Gambar 4.87 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -1,6610 Nm dan nilai putaran sebesar – 1,087 Rad/s (-10,385 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

4.9.7 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s

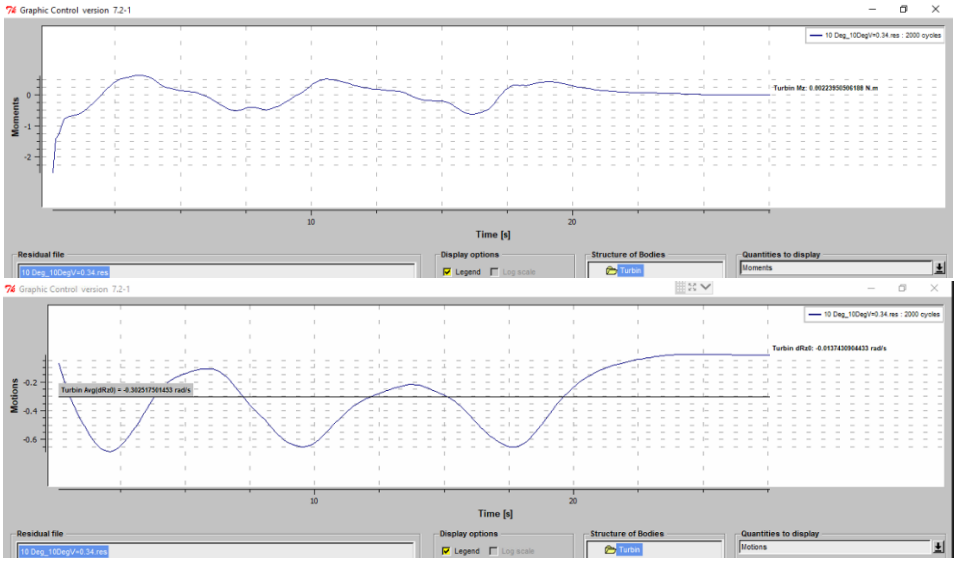




Gambar 4.88 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 5^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -3,867 Nm dan nilai putaran sebesar – 1,765 Rad/s (-16,855 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 5^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

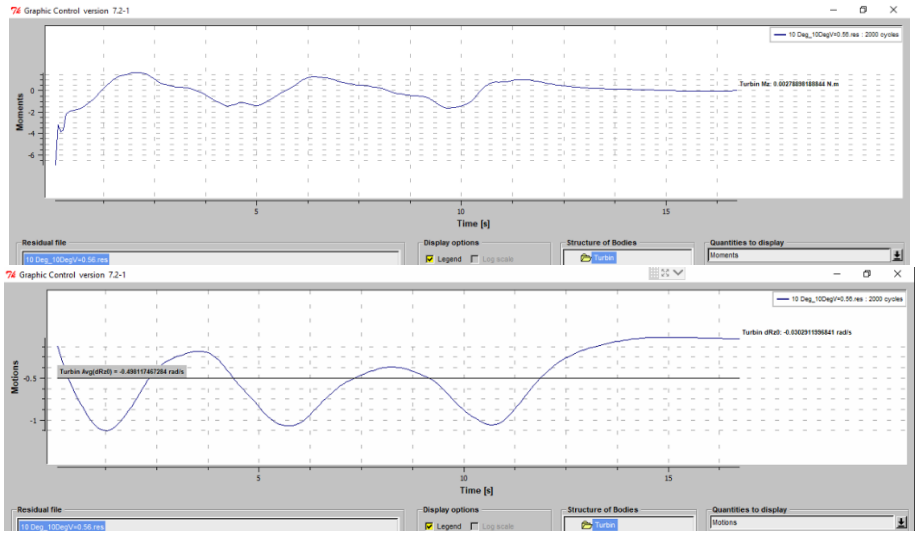
4.9.8 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s



Gambar 4.89 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.34 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -0,6012 Nm dan nilai putaran sebesar – 0,634 Rad/s (-6,057 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.34 m/s ini.

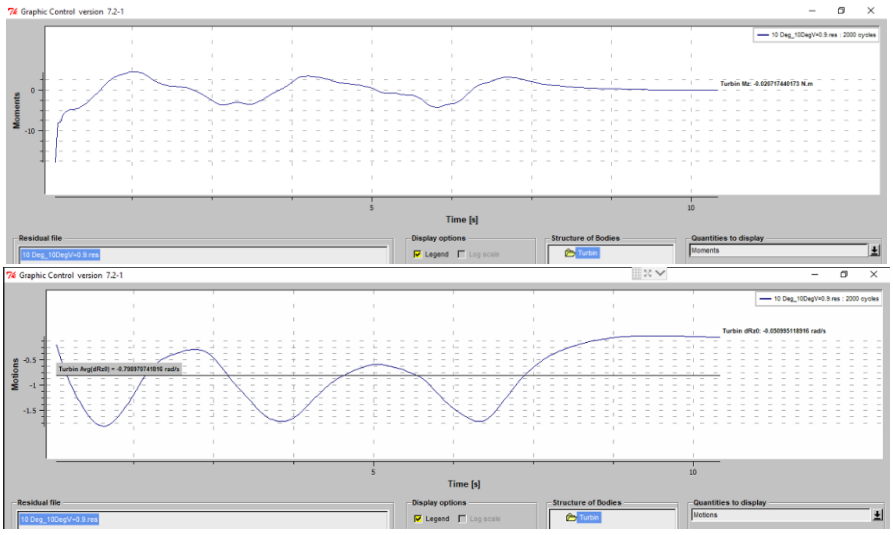
4.9.9 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s



Gambar 4.90 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.56 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -1,649 Nm dan nilai putaran sebesar – 1,087 Rad/s (- 10,380 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.56 m/s ini.

4.9.10 Hasil Simulasi Torsi dan RPM Model Sudut *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s



Gambar 4.91 Grafik Torsi (atas) dan Putaran (bawah) Model Turbin *Tip Rake* 10^0 Kecepatan Aliran 0.9 m/s dengan *Time Step* 250

Berdasarkan grafik hasil simulasi di atas, didapatkan Torsi sebesar -4,253 Nm dan nilai putaran sebesar – 1,756 Rad/s (-16,765 RPM) untuk model turbin dengan sudut *Tip Rake* 10^0 dengan V = 0.9 m/s ini.

Berikut adalah tabulasi keseluruhan hasil running dengan *time step* 250 dan t*ime law* dipercepat sepuluh kali lipat pada parameter *Force* (gaya), *Moment* (Torsi), dan *Motion* (Putaran).

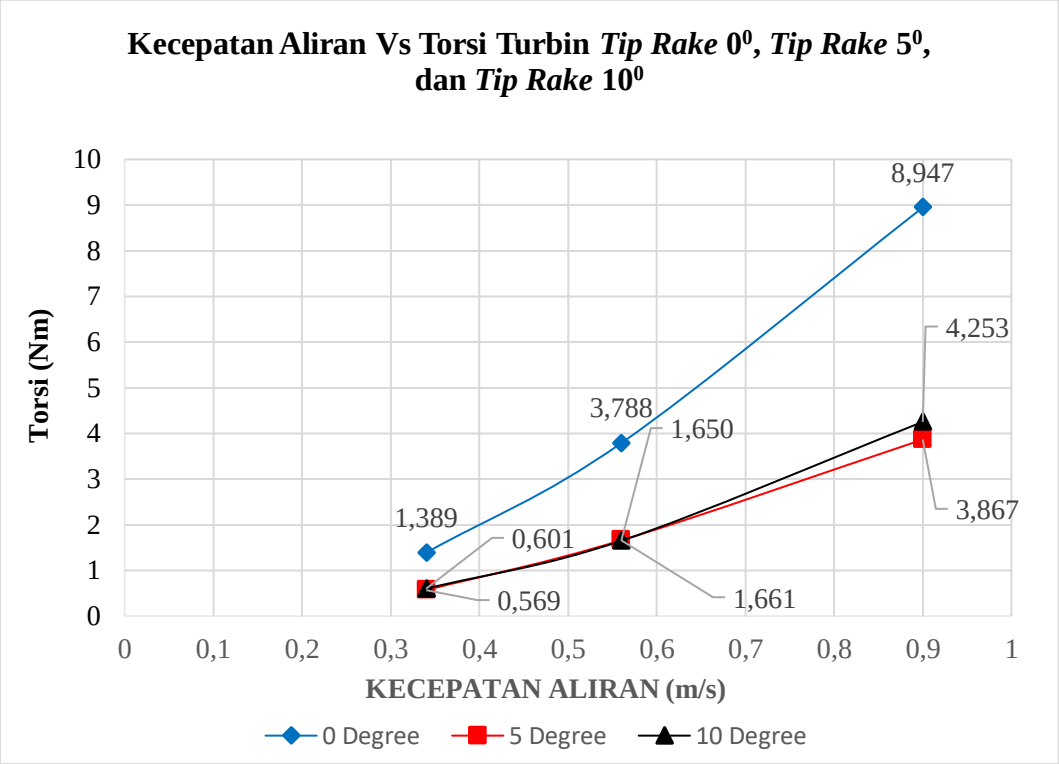
Tabel 4.4 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Omar Yaakob (180^0)

Helical 180 Degree		
180 *Degree* V = 0.56		**Unit**
Mz	-0,497	Nm
dRz0	0,849	Rad/s

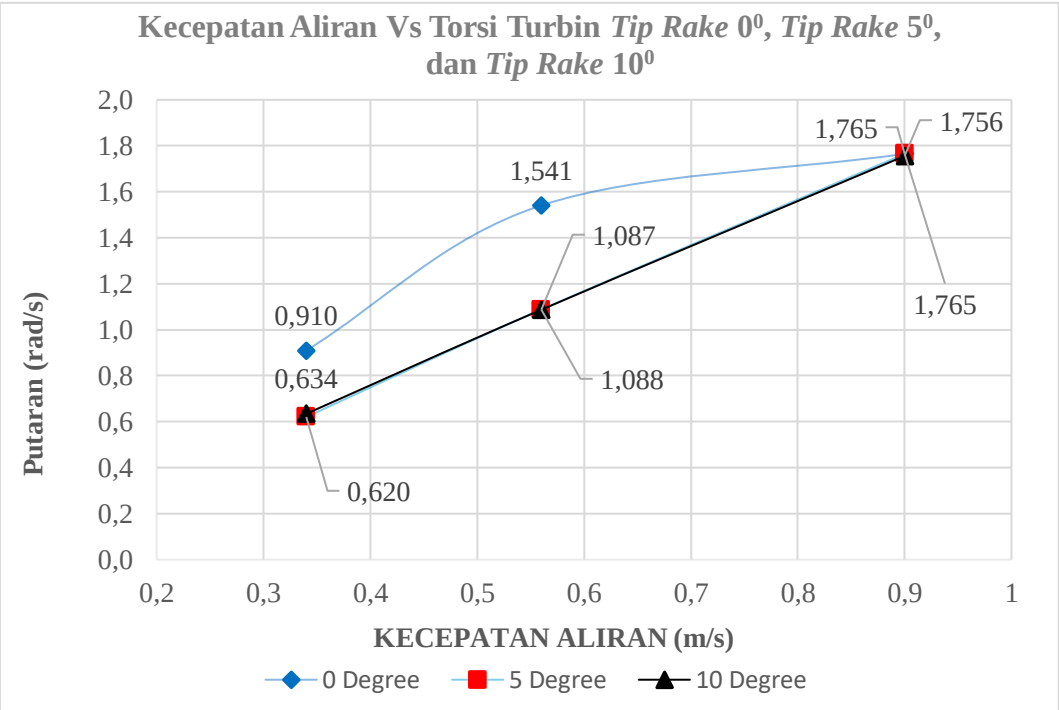
Tabel 4.5 Tabulasi Hasil Simulasi (Torsi dan Kecepatan Putaran) Model Turbin Dengan Sudut *Tip Rake* 0^0, 5^0, dan 10^0

0 *Degree*								
0 Deg V = 0.34		**Unit**	**0 Deg V = 0.56**		**Unit**	**0 Deg V = 0.9**		**Unit**
T (Mz)	1,389	Nm	T (Mz)	3,788	Nm	T (Mz)	8,947	Nm
dRz0	0,909	Rad/s	dRz0	1,540	Rad/s	dRz0	2,555	Rad/s
5 Degree								
5 Deg V = 0.34		**Unit**	**5 Deg V = 0.56**		**Unit**	**5 Deg V = 0.9**		**Unit**
T (Mz)	0,569	Nm	T (Mz)	1,661	Nm	T (Mz)	3,867	Nm
dRz0	0,620	Rad/s	dRz0	1,087	Rad/s	dRz0	1,765	Rad/s
10 Degree								
10 Deg V = 0.34		**Unit**	**10 Deg V = 0.56**		**Unit**	**10 Deg V = 0.9**		**Unit**
T (Mz)	0,601	Nm	T (Mz)	1,649	Nm	T (Mz)	4,253	Nm
dRz0	0,634	Rad/s	dRz0	1,087	Rad/s	dRz0	1,756	Rad/s

Dalam pengerjaan penelitian ini, penulis perlu mempertimbangkan keterbatasan waktu dan keterbatasan fasilitas komputer lab. Oleh karena iu, setelah disepakati dengan dosen pembimbing, maka hasil simulasi terakhir inilah yang digunakan dan dianalisa dan dijadikan dasar dalam membuat kesimpulan.



Gambar 4.92 Grafik Kecepatan Aliran Vs Torsi Turbin *Tip Rake* 0^0, *Tip Rake* 5^0, dan *Tip Rake* 10^0



Gambar 4.93 Grafik Kecepatan Aliran Vs Putaran Turbin *Tip Rake* 0^0, *Tip Rake* 5^0, dan *Tip Rake* 10^0

4.10 Analisa Hasil Simulasi

Setelah seluruh simulasi selesai dilakukan, maka tahapan selanjutnya adalah menganalisa hasil simulasi tersebut. Hasil simulasi model turbin yang menggunakan variasi kecepatan dianalisa menggunakan parameter performa, yaitu *Coefficient of Perfomance*, *Coefficient of Torque*, dan *Tip Speed Ratio*.

4.10.1 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 0^0

4.10.1.1 Analisa Coefficient of performance

Untuk menganalisa nilai *coefficient of performance*, digunakan rumusan yang valid sebagai berikut :

$$Cp = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3} \qquad (4.1)$$

A = Tinggi (H) x Diameter (D) turbin

Dimana :

Cp = *Coefficient of power*

ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3)

A = *Swept Area* dari turbin Savonius (m)

V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

ω = Kecepatan anguler turbin Savonius (rad/sec)

T = Torsi turbin (Nm)

Berikut ini adalah contoh perhitungan model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.34 m/s.

Diketahui : Ditanya :

T (Mz) = 1,3890 Nm Berapakah nilai Cp ?

ω = 0,9096 Rad.s

ρ = 1025kg/m^3

A = 1,125 m^2

V = 0,34 m/s

Jawab :

$$Cp = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A V^3} = \frac{-1{,}3890 \text{ x } 0{,}9096}{0.5\ x\ 1025\ x\ 0{,}34^3} = 0{,}055$$

Berikut ini adalah table nilai Cp pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.6 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 0^0

V		w		T (Mz)		CP
0,34	m/s	0,909	rad/s	1,389	Nm	0,055
0,56	m/s	1,541	rad/s	3,788	Nm	0,057
0,9	m/s	2,55	rad/s	8,947	Nm	0,054

4.10.1.2 Analisa Coefficient of Torque

Untuk menganalisa nilai *coefficient of performance*, digunakan rumusan yang valid sebagai berikut :

$$Ct = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho ArV^2} \qquad (4.2)$$

Dimana :

Ct = *Coefficient of Torque*

T = Torsi aktual yang dihasilkan pada rotor turbin (Nm)

ρ = Massa jenis air laut (kg/m^3)

A = *Swept Area* dari turbin Savonius (m)

V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

d = Diameter turbin Savonius (m)

r = Radius turbin Savonius (m)

Berikut ini adalah contoh perhitungan pada model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.34 m/s.

Diketahui : Ditanya :

T (Mz) = 1,38896 Nm Berapakah nilai Ct ?

ρ = 1025kg/m^3

A = 1,125 m^2

V = 0,34 m/s

r = 0,375 m

Jawab :

$$Ct = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho ArV^2} = \frac{1{,}38896}{0.5\ x\ 1025\ x\ 0{,}375\ 0{,}34^2} = 0{,}021$$

Berikut ini adalah tabel nilai Ct pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.7 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 0^0

V		w		T (Mz)		Ct
0,34	m/s	0,909	rad/s	1,389	Nm	2,083 x 10^{-2}
0,56	m/s	1,541	rad/s	3,788	Nm	2,095 x 10^{-2}
0,9	m/s	2,55	rad/s	8,947	Nm	1,915 x 10^{-2}

4.10.1.3 Analisa Tip Speed Ratio

Untuk menganalisa nilai *Tip Speed Ratio,* digunakan rumusan yang valid sebagai berikut :

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{\omega.\text{r}}{V} \qquad (4.3)$$

Dimana :

TSR = *Tip Speed Ratio*

λ = *Tip Speed Ratio*

Vrotor = Kecepatan di ujung *blade* turbin (m/s)

V = Kecepatan Fluida (air laut) (m/s)

ω = Kecepatan anguler turbin Savonius (rad/sec)

d = Diameter satu blade turbin Savonius (m)

r = Radius turbin Savonius (m)

Berikut ini adalah contoh perhitungan pada model turbin dengan sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.34 m/s.

Diketahui :

ω = 0,9096 rad/s

V = 0,34 m/s

r = 0,375 m

Ditanya :

Berapakah nilai TSR ?

Jawab :

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{\omega.\text{r}}{V} = \frac{0{,}9096 \text{ x } 0{,}375}{0.34} = 1{,}0032$$

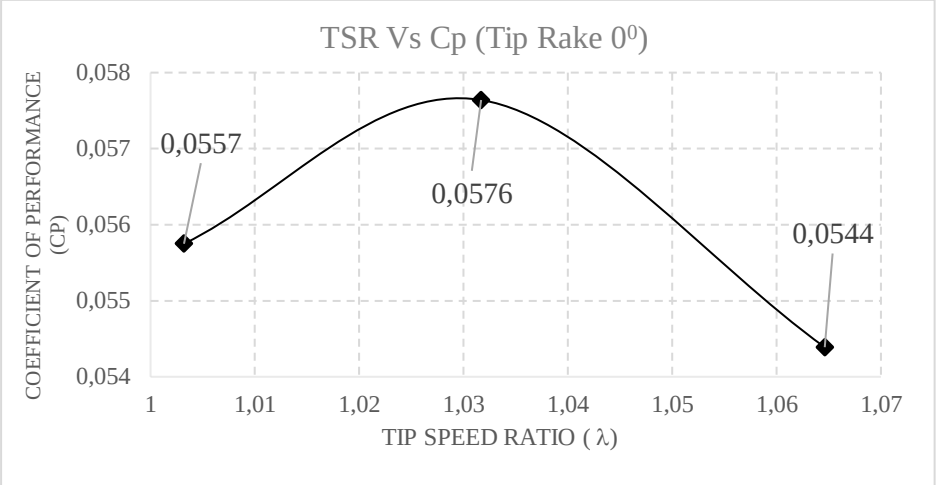
Berikut ini adalah tabel nilai TSR pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.8 Tabel *Tip Speed Ratio* Model Turbin *Tip Rake* 0^0

V		w		TSR
0,34	m/s	0,909	rad/s	1,0032
0,56	m/s	1,541	rad/s	1,0317
0,9	m/s	2,55	rad/s	1,0646

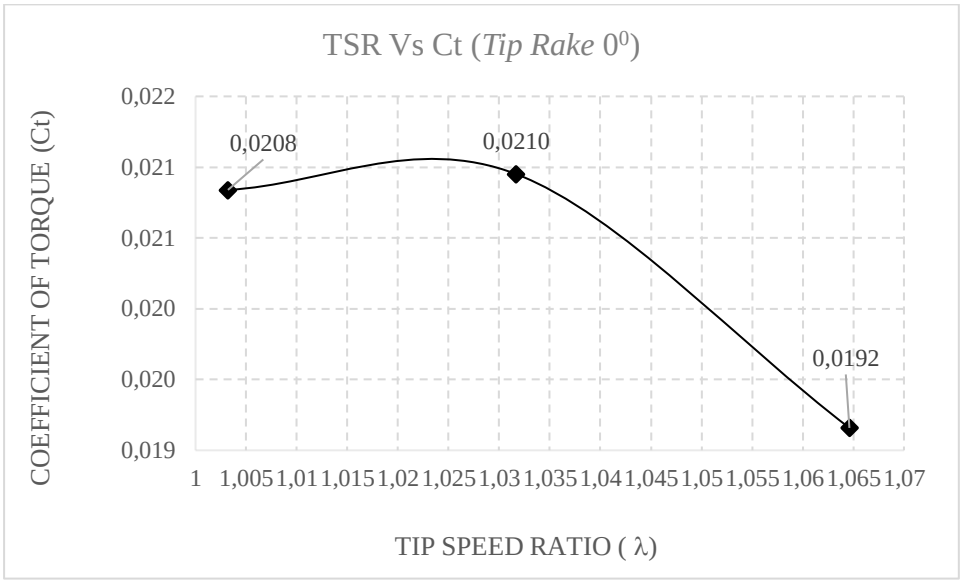
4.10.1.4 Grafik Performa

Grafik peforma yang digunakan merupakan plot nilai *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* terhadap nilai *Tip Speed Ratio*. Dengan begitu, pengaruh variasi variabel kecepatan terhadap *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* akan terlihat pada model turbin ini.



Gambar 4.94 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0, 34 m/s, 0, 56 m/s menunjukkan kenaikan nilai Cp, dan nilai Cp turun pada kecepatan 0,9 m/s.



Gambar 4.95 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0, 34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0,9 m/s nilai Ct cenderung menurun dan menunjukkan karakter *Tip Speed Ratio* yang berbanding lurus dengan C*oefficient of Torque.*

4.10.2 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 5^0

4.10.2.1 Analisa Coefficient of Performance

Untuk menganalisa nilai *coefficient of performance*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai Cp pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.9 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 5^0

V		w		T (Mz)		Cp
0,34	m/s	0,620	rad/s	0,569	Nm	0,015
0,56	m/s	1,087	rad/s	1,661	Nm	0,017
0,9	m/s	1,765	rad/s	3,867	Nm	0,016

4.10.2.2 Analisa Coefficient of Torque

Untuk menganalisa nilai *coefficient of torque*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai Ct pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.10 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 5^0

V		w		T (Mx)		Ct
0,34	m/s	0,620	rad/s	0,569	Nm	$8{,}535 \times 10^{-3}$
0,56	m/s	1,087	rad/s	1,661	Nm	$9{,}186 \times 10^{-3}$
0,9	m/s	1,765	rad/s	3,867	Nm	$8{,}279 \times 10^{-3}$

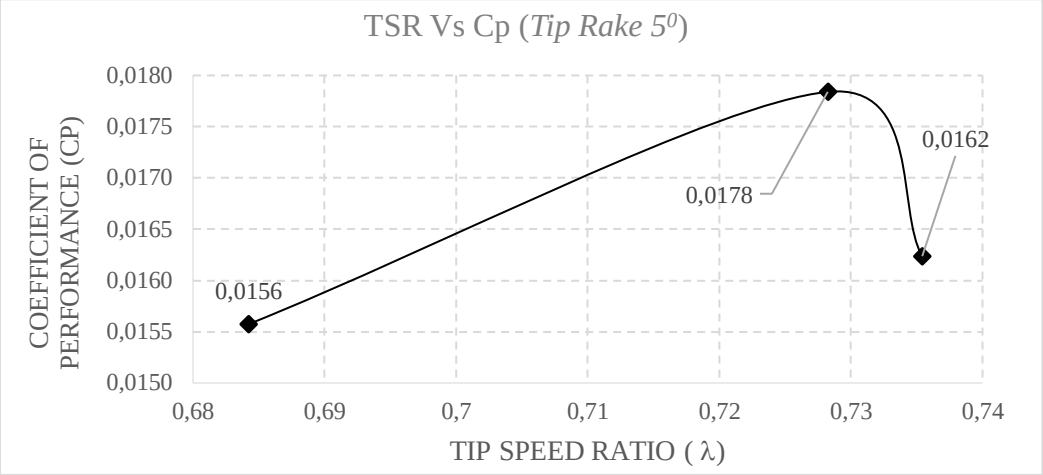
4.10.2.3 Analisa Tip Speed Ratio

Untuk menganalisa nilai *tip speed ratio*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai TSR pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.11 Tabel *Tip Speed Ratio* Model Turbin *Tip Rake* 5^0

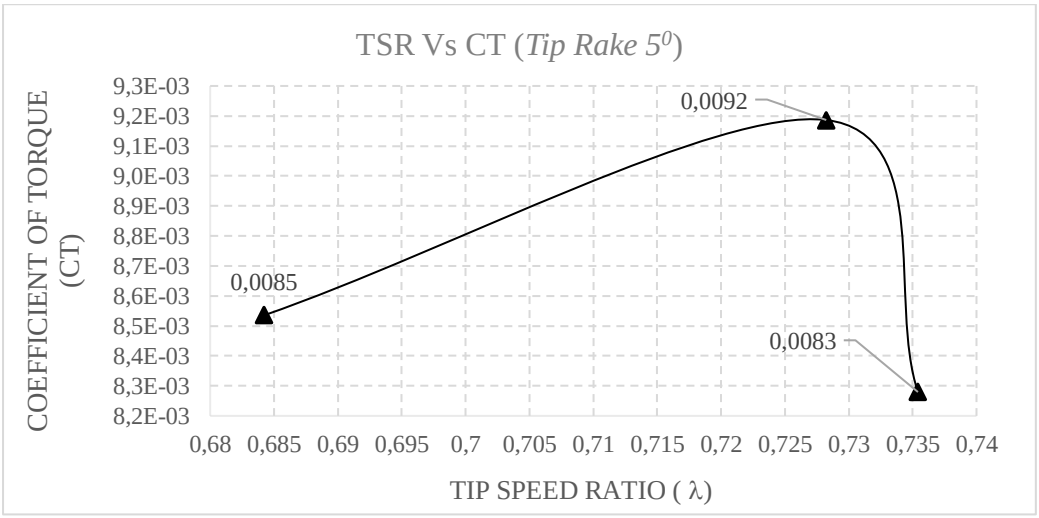
V		w		TSR
0,34	m/s	0,620	rad/s	0,684
0,56	m/s	1,087	rad/s	0,728
0,9	m/s	1,765	rad/s	0,735

4.10.2.4 Grafik Performa



Gambar 4.96 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0, 34 m/s dan 0, 56 m/s menunjukkan kenaikan nilai Cp dan nilai Cp mengalami penurunan pada kecepatan 0,9 m/s. Maka hubungan *Tip Speed Ratio* adalah berbanding lurus hinggatitik optimum dan berbandin terbalik setelahnya terhadap C*oefficient of Performance.*



Gambar 4.97 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0, 34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0,9 m/s menunjukkan karakter *Tip Speed Ratio* yang berbanding lurus dengan C*oefficient of Torque.*

4.10.3 Analisa Hasil Simulasi Turbin Savonius dengan Sudut *Tip Rake* 10^0

4.10.3.1 Analisa Coefficient of Performance

Untuk menganalisa nilai *coefficient of torque*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 10^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai Cp pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.12 Tabel *Coefficient of Performance* Model Turbin *Tip Rake* 10^0

V		w		T (Mz)		Cp
0,34	m/s	0,634	rad/s	0,601	Nm	$1,683 \times 10^{-2}$
0,56	m/s	1,087	rad/s	1,649	Nm	$1,771 \times 10^{-2}$
0,9	m/s	1,756	rad/s	4,253	Nm	$1,776 \times 10^{-2}$

4.10.3.2 Analisa Coefficient of Torque

Untuk menganalisa nilai *coefficient of torque*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 10^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai Ct pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.13 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 10^0

V		w		T (Mx)		Ct)
0,34	m/s	0,634	rad/s	0,601	Nm	$9,019 \times 10^{-3}$
0,56	m/s	1,087	rad/s	1,649	Nm	$9,124 \times 10^{-3}$
0,9	m/s	1,756	rad/s	4,253	Nm	$9,107 \times 10^{-3}$

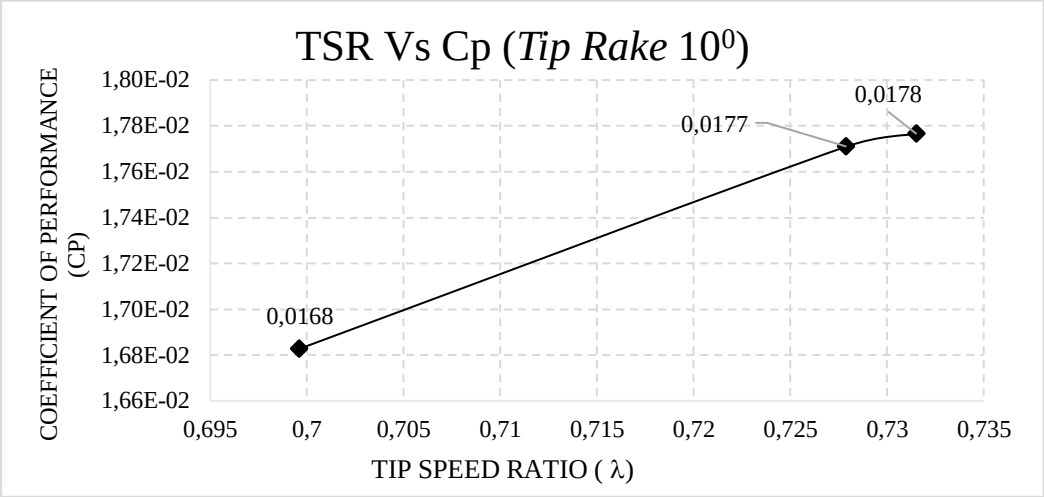
4.10.3.3 Analisa Tip Speed Ratio

Untuk menganalisa nilai *tip speed ratio*, digunakan rumusan yang sama dengan model turbin dengan sudut *tip rake* 10^0, begitu pula dengan cara perhitugannya. Oleh karena itu, berikut ini adalah adalah tabel nilai TSR pada seluruh variasi kecepatan aliran, yaitu kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s, dan 0,9 m/s.

Tabel 4.14 Tabel *Coefficient of Torque* Model Turbin *Tip Rake* 10^0

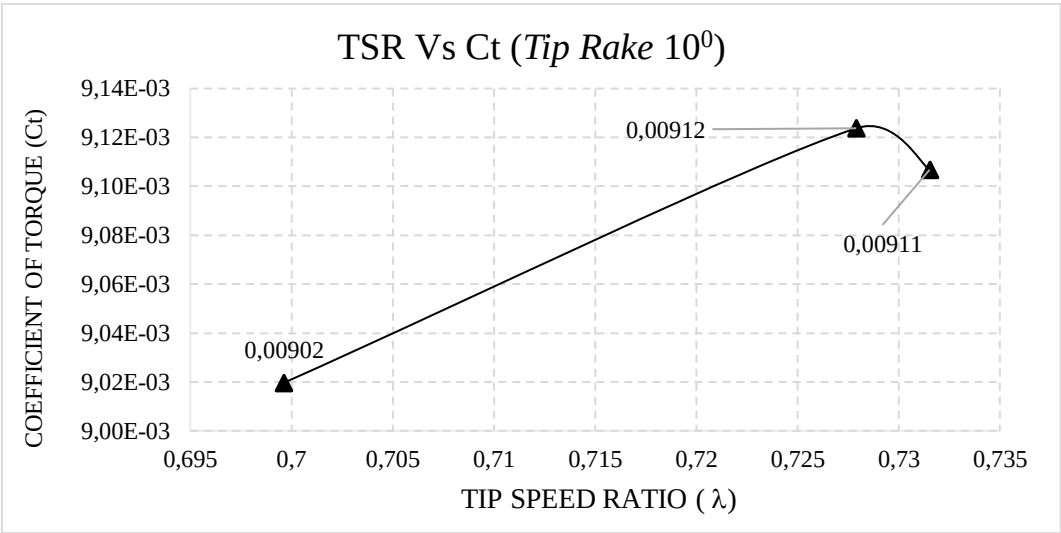
V		w		TSR
0,34	m/s	0,634	rad/s	0,699
0,56	m/s	1,087	rad/s	0,728
0,9	m/s	1,756	rad/s	0,732

4.10.3.4 Grafik Performa



Gambar 4.98 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 10^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 10^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0,34 m/s, 0,56 m/s dan 0.9 m/s menunjukkan karakter *Tip Speed Ratio* yang berbanding lurus dengan C*oefficient of Performance.*

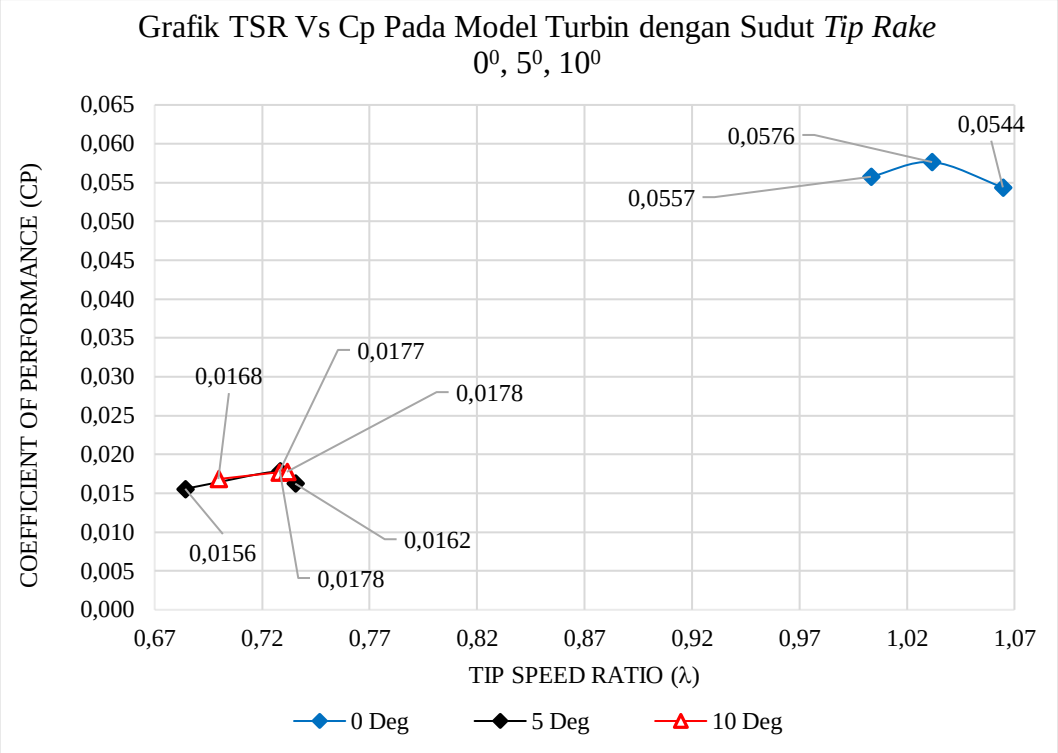


Gambar 4.99 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 10^0

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat pada model turbin dengan sudut *tip rake* 10^0 yang disimulasikan pada kecepatan 0,34 m/s dan 0,56 m/s menunjukkan karakter *Tip Speed Ratio* yang berbanding lurus hingga titik optimum, lalu berbanding terbalik setelahnya terhadap C*oefficient of Torque*.

4.10.4 Grafik Perbandingan Performa Keseluruhan Model Variasi Turbin

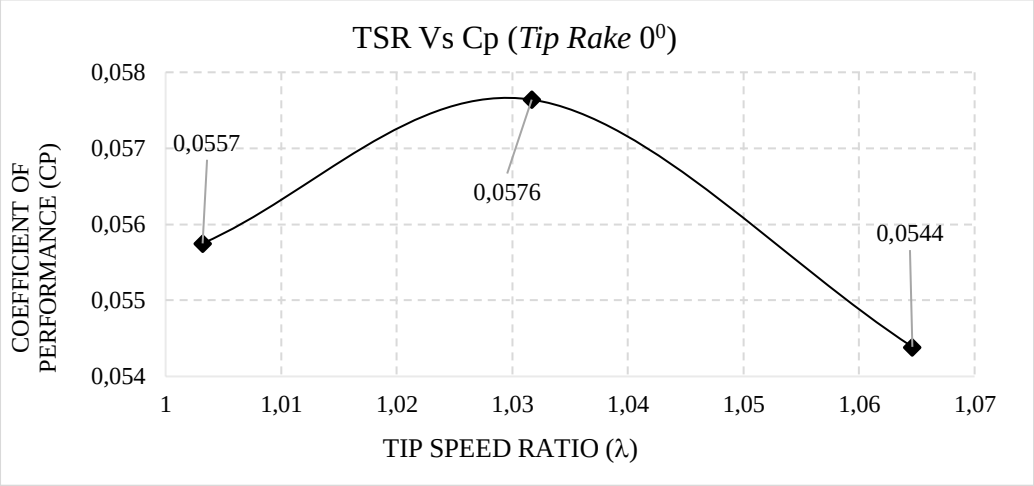
Grafik performa turbin yang ditampilkan merupakan cara untuk memperlihatkan performa masing-masing model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, 5^0, dan 10^0, serta mengetahui efek yang ditimbulkan oleh penambahan sudut *tip rake* terhadap performa turbin savonius *twisted blade* dengan sudut *twist* 45^0.



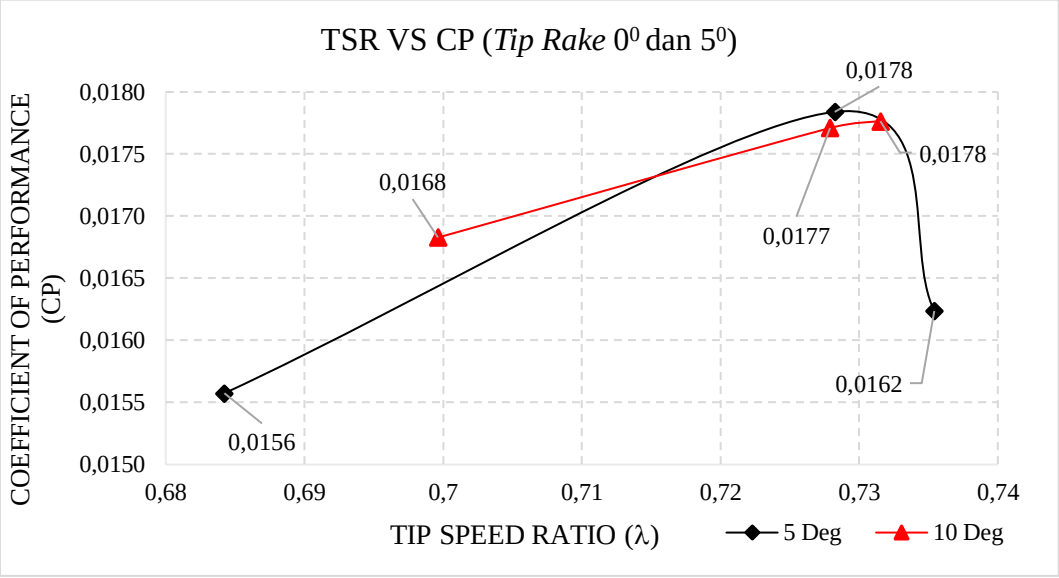
Gambar 4.100 Grafik Cp vs TSR Pada Seluruh Model Turbin

Berdasarkan grafik rekap hasil simulasi di atas, dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Performance* (Cp) yang paling tinggi berada pada model variasi turbin dengan sudut *tip rake* 0^0. Sedangkan pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, nilai Cp mengalami penurunan, dan nilai terkecil Cp berada pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0.

Ketika sudut *tip rake* dibuat menjadi 10^0, nilai Cp mengalami kenaikan dibandingkan *tip rake* 5^0 , namun masih jauh dibawah nilai Cp pada turbin *tip rake* 0^0. Oleh karena itu, berdasarkan data grafik hasil simulasi pada penelitian ini, pengaruh sudut *tip rake* dengan nilai *Coefficient of Performance* pada turbin tanpa tip rake adalah menyebabkan penurunan nilai Cp, dan semakin semakin besar sudut *tip rake* yang diterapkan, maka akan semakin besar Cp dari turbin dengan sudut *tip rake* yang lebih kecil. Supaya bisa terlihat lebih jelas, dibawah ini adalah grafik versi terpisah.

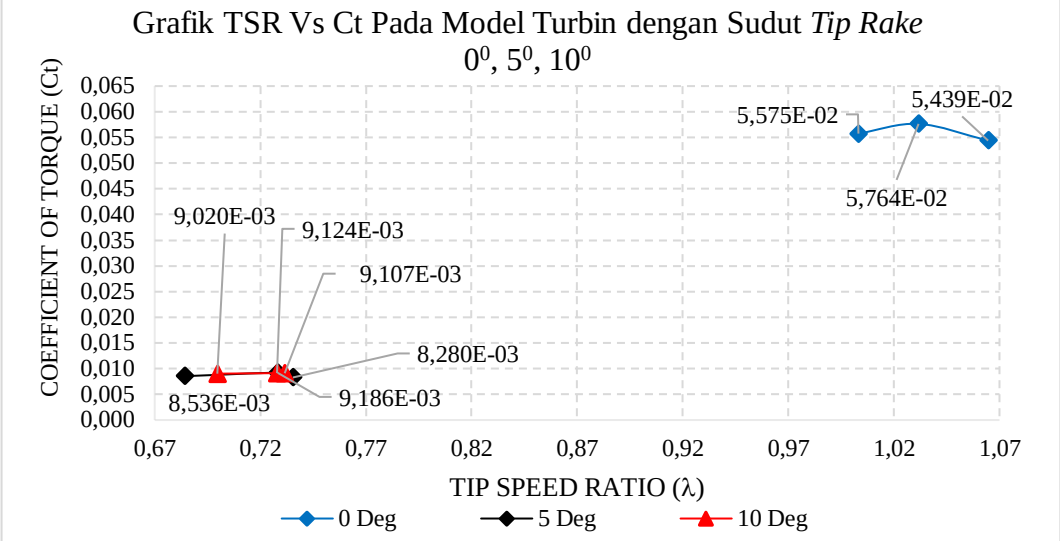


Gambar 4.101 Grafik Cp vs TSR Pada Model Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 0^0



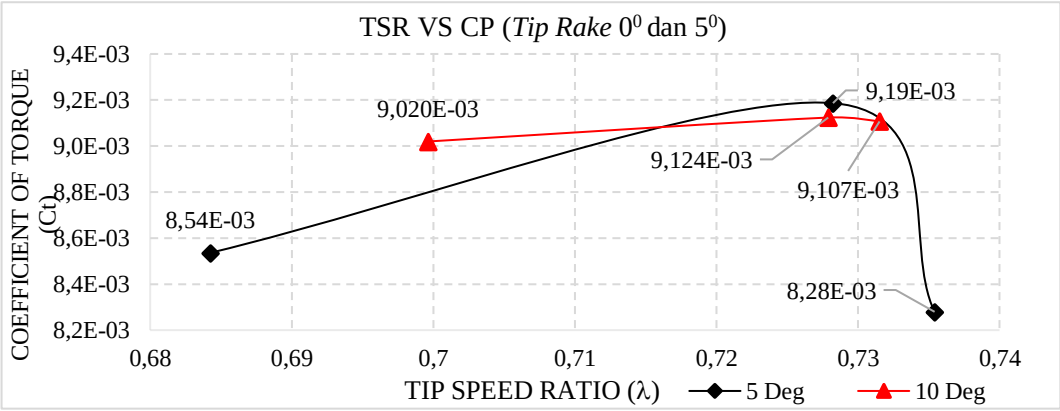
Gambar 4.102 Grafik Cp vs TSR Pada Turbin dengan Sudut *Tip Rake* 5^0 dan 10^0

Selanjutnya, adalah grafik analisa *Coefficient of Torque* dibawah ini :

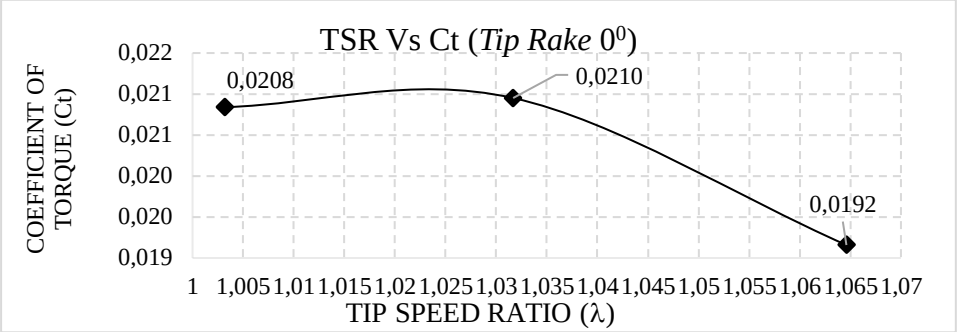


Gambar 4.103 Grafik Ct vs TSR Pada Seluruh Model Turbin

Berdasarkan grafik rekap hasil simulasi di atas, dapat dilihat bahwa nilai *Coefficient of Torque* (Ct) yang paling tinggi berada pada model variasi turbin dengan sudut *tip rake* 0^0. Sedangkan pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, nilai Ct mengalami penurunan, dan nilai terkecil Ct berada pada model turbin dengan sudut *tip rake* 5^0. Oleh karena itu, berdasarkan data grafik hasil simulasi pada penelitian ini, pengaruh penerapan sudut *tip rake* dengan nilai *Coefficient of Torque* terhadap turbin tanpa tip rake adalah menyebabkan penurunan performa. Sedangkan, semakin besar sudut *tip rake* yang diterapkan, maka akan semakin tinggi nilai Ct dibandingkan dengan turbin dengan tip rake yang lebih kecil. Supaya bisa terlihat lebih jelas, dibawah ini adalah grafik versi terpisah.



Gambar 4.104 Grafik Ct vs TSR Pada Model Turbin dengan *Tip Rake* 5^0 dan 10^0



Gambar 4.105 Grafik Ct vs TSR Pada Seluruh Model Turbin dengan *Tip Rake* 0^0

4.10.5 Investigasi Terhadap Proses Verifikasi Hasil Simulasi Model Turbin Omar Yaakob

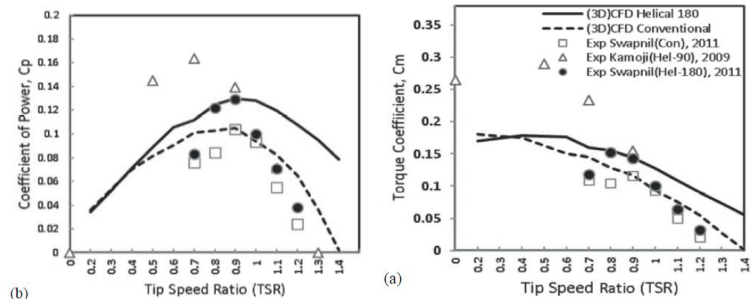
Seperti yang dijelaskan pada bagian 3.2.4 laporan ini, metode yang digunakan untuk mengetahui relevansi hasil simulasi menggunakan FINE MARINE, adalah perbandingan antara hasil simulasi Turbin Savonius pada jurnal penelitian Omar Yaakob dan hasil simulasi model turbin yang sama, yang di *running* menggunakan Numeca FINE MARINE. Setelah melakukan simulasi menggunakan Numeca, hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Tabel 4.13 Tabel Hasil Simulasi Model Turbin Omar Yaakob (Helical 180^0)

180 Degree V = 0.56		Units
T (Mz)	-0,497	Nm
dRz0	0,624	Rad/s

4.10.5.1 Komparasi Hasil Penelitian Omar Yaakob dengan Simulasi Menggunakan NUMECA FINE MARINE

Untuk mengukur komparasi, digunakan plot grafik hasil simulasi yang dilakukan oleh Omar Yaakob, yaitu grafik *Tip Speed Ratio* terhadap *Coefficient of Performance* dan grafitk *Tip Speed Ratio* terhadap *Coefficient of Torque,* seperti pada gambar di bawah ini [37].



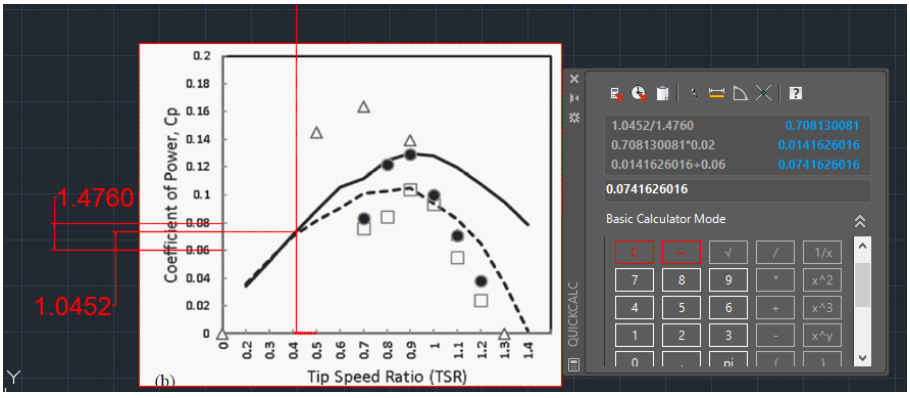
Gambar 4.106 Grafik Cp vs TSR dan Ct vs TSR Pada Jurnal Omar Yaakob
Sumber : Omar Yaakob, 2013

Tahap selanjutnya adalah menghitung nilai TSR dari hasil simulasi. Berikut ini adalah perhitungan pada model turbin Omar Yaakob (Helical 180^0) pada kecepatan aliran 0.56 m/s.

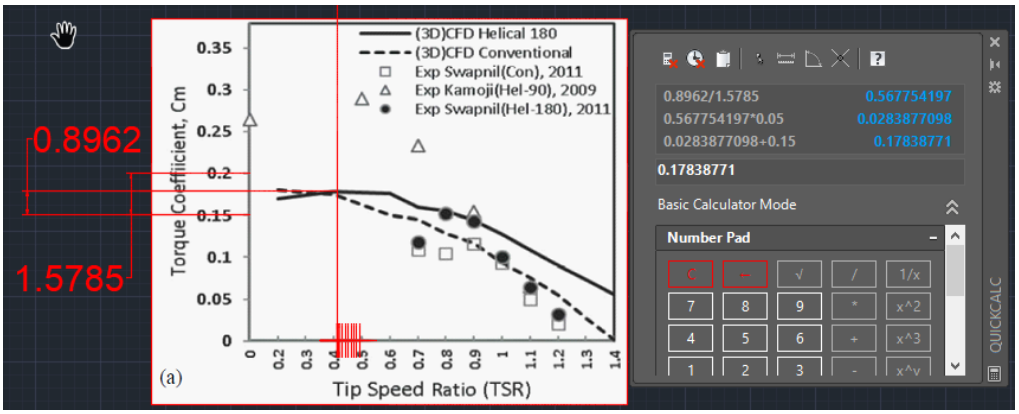
Diketahui : Ditanya :
ω = 0,62457 rad/s Berapakah nilai TSR ?
V = 0,56 m/s
r = 0,375 m
Jawab :

$$\text{TSR} = \lambda = \frac{\omega.r}{v} = \frac{0{,}624 \text{ x } 0{,}375}{0.56} = 0{,}418$$

Berdasarkan rumus perhitungan pada bagian analisa hasil simulasi, nilai *Coefficient of Performance* 0,003067042 dan *Coefficient of Torque* 0,007460104. Tahap selanjutnya adalah melakukan pengukuran nilai *Coefficient of Performance* (Cp) dan *Coefficient of Torque* (Ct) turbin pada grafik hasil penelitian Omar Yaakob pada titik nilai TSR sebesar 0,41824. Pengukuran grafik ini dilakukan menggunakan *software* AutoCAD.



Gambar 4.107 Pengukuran Nilai Cp pada Grafik Cp vs TSR Dalam Jurnal Penelitian Omar Yaakob



Gambar 4.108 Pengukuran Nilai Ct pada Grafik Ct vs TSR Dalam Jurnal Penelitian Omar Yaakob

Berdasarkan pengukuran pada nilai TSR sebesar 0,41824, didapatkan nilai Cp sebesar 0,07416 dan nilai Ct sebesar 0,17838771. Maka, *error* dari nilai Cp dan Ct hasil simulasi menggunakan NUMECA FINE MARINE dengan hasil penelitan pada jurnal Omar Yaakob adalah sebagai berikut :

1. Error *Coefficient of Performance* :

$$\text{Error} = \left|\frac{0{,}003067042 - 0{,}074162602}{0{,}003067042}\right| = 2318{,}049\%$$

2. Error *Coefficient of Torque*:

$$\text{Error} = \left|\frac{0{,}007460104 - 0{,}17838771}{0{,}007460104}\right| = 2291{,}223\%$$

Dapat diketahui bahwa perbandingan nilai Cp dan Ct antara hasil simulasi menggunakan NUMECA FINE MARINE dengan hasil penelitan pada jurnal Omar Yaakob sangat jauh berbeda.

4.10.5.2 Investigasi Pada Hasil Penelitian Omar Yaakob dan Sumber Referensinya

Mengacu kepada hasil grafik hasil penelitian Omar Yaakob, terdapat dua referensi yang dijadikan perbandingan peer to peer dengan hasil simulasi turbin savonius helical 180^0, yaitu referensi dari eksperimen yang dilaksanakan oleh Swapnil pada tahun 2011 dengan judul *Optimisation of Vertical Axis Wind Turbine: CFD Simulations and Experimental Measurements* dan eksperimen yang dilakukan Kamoji dengan judul *Performance Test on Helical Savonius Rotors*.

Setelah dilakukan studi mendalam, dari penelitian yang dilkakuan oleh Swapnil, ia melakukan eksperiment pada turbin savonius dengan menggunakan metode *stirred tank*, dengan konfigurasi seperti pada gambar di bawah.

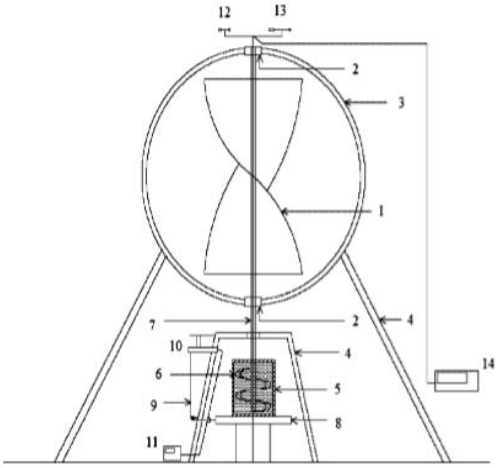


Figure 2. Schematic of windmill set-up. (1) VAWT, (2) bearings, (3) semicircular pipes, (4) steel framework, (5) insulated stirred tank, (6) helical ribbon impeller, (7) shaft, (8) torque table, (9) string, (10) load cell, (11) weighing balance, (12) cup anemometer, (13) wind vane, (14) data logger.

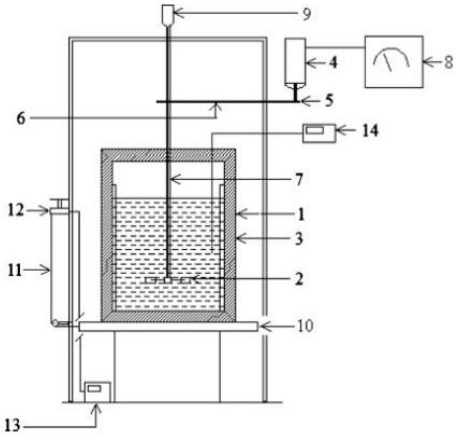


Figure 1. Experimental set-up of stirred tank and associated instrumentation. (1) Stirred tank, (2) Disc turbine impeller, (3) Insulation, (4) AC motor, (5) Fixed pulleys, (6) Belt, (7) Shaft, (8) Variable frequency drive (VFD), (9) Digital tachometer, (10) Torque table, (11) String, (12) Load cell, (13) Weighing balance, (14) Residence temperature detector (RTD).

Gambar 4.109 Setup Eksperimen *Stirred Tank*, Konfigurasi Turbin (Kiri) dan Konfigurasi *Stirred Tank* (Kanan)
Sumber : Swapnil, 2011

Selanjutnya, mengacu grafik hasil penelitian pada penelitian Swapnil ini, dapat dilihat bahwa fluida yang digunakan adalah udara, dan *range* kecepatan fluida yang digunakan juga tinggi, yaitu mulai dari 1 m/s hingga 8 m/s. Maka, nilai Cp dan Ct pada grafik pun memiliki nilai yang tinggi, puncaknya pada Cp 0,2.

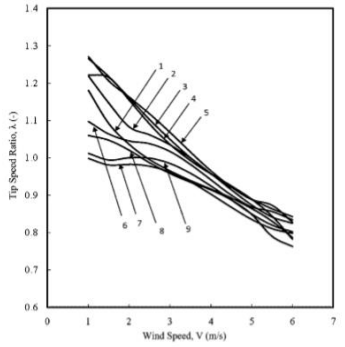


Figure 19. Tip speed ratio for different wind turbines plotted with respect to wind speed. (1) Two straight blades, (2) two blades 30°, (3) two blades 45°, (4) two blades 60°, (5) two blades 180°, (6) three blades straight, (7) three blades 30°, (8) three blades 45°, (9) three blades 60°.

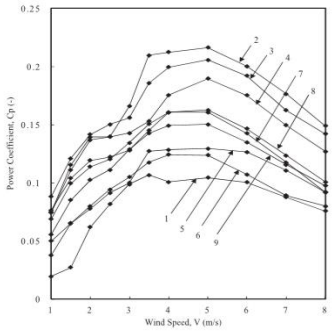


Figure 23. Comparison of the predicted power coefficients for different wind turbines. (1) Two blades straight, (2) two blades 30°, (3) two blades 45°, (4) two blades 60°, (5) two blades 180°, (6) three blades straight, (7) three blades 30°, (8) three blades 45°, (9) three blades 60°.

Gambar 4.110 Grafik TSR vs *Wind Speed* dan Grafik Cp Vs *Wind Speed* pada Penelitian Swapnil
Sumber : Swapnil, 2011

Selain data grafik, berikut adalah tabel yang menunjukkan putaran turbin, nilai Cp pada variasi turbin, serta kecepatan aing yang digunaan dalam analisa perhitunga Cp.

Table 1. Comparison of power consumption predicted by the integral ε method and experimentally measured using torque table

Sr. No.	Rotational speed (rpm)	Power measured by integral ε method (W)	Power measured by torque table (W)
1	270	3.28	4.56
2	300	5.14	6.25
3	330	7.15	8.32
4	360	8.63	10.8
5	390	12.87	13.73
6	420	16.53	17.15
7	450	18.6	21.09
8	480	19.81	25.6
9	510	23.53	30.71
10	540	28.61	36.45
11	570	38.15	42.87

Table 3. The maximum power coefficient for different wind turbines

Blade type	$C_{P,max}$
Two straight blades	0.107
Two-bladed 30° twist	0.216
Two-bladed 45° twist	0.206
Two-bladed 60° twist	0.190
Two-bladed 180° twist	0.134
Three straight blades	0.124
Three-bladed 30° twist	0.161
Three-bladed 45° twist	0.163
Three-bladed 60° twist	0.150

Table 4. The estimated thermal energy at different wind speeds for two-bladed 30° twisted wind turbine

Wind speed (m/s)	C_P	Rate of temperature rise (°C/h)
1	0.074	0.01
2	0.137	0.08
3	0.166	0.32
4	0.212	0.97
5	0.216	1.93
6	0.200	3.09
7	0.176	4.31
8	0.149	5.44
9	0.124	6.45
10	0.098	7.02

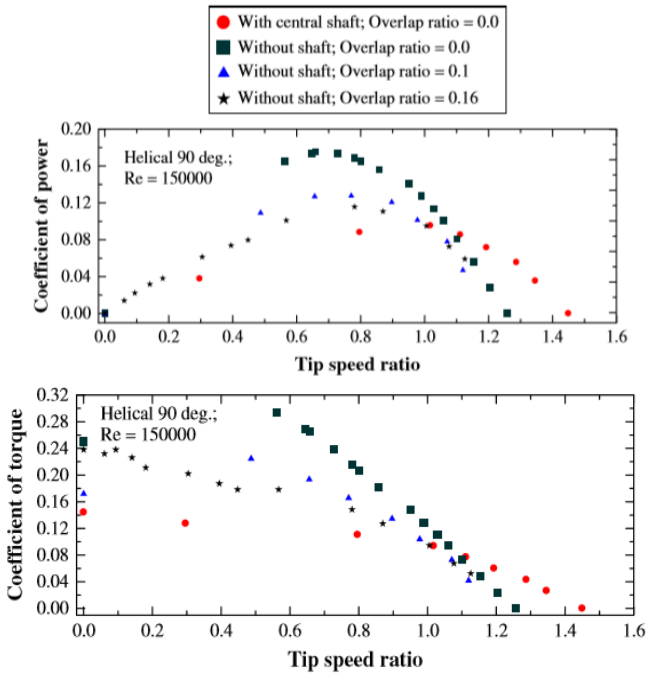
Gambar 4.111 Tabel yang Menunjukkan RPM, Cp pada Variasi Turbin, dan Kecepatan Angin yang Digunakan Dalam Penelitian Swapnil
Sumber : Swapnil, 2011

Setelah dilakukan analisa mendalam pada penelitian yang dilakukan oleh Swapnil, didapatkan bahwa hasil berupa *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* yang tinggi merupakan kontribusi dari :

1. Pada Penelitian Swapnil, fluida yang digunakan adalah udara, yang mana secara *properties* berbeda dengan air laut, dimana penelitian yang dilakukan Omar Yaakob menggunakan air laut yang berbeda *properties* fluidanya.

2. Pada penelitian Swapnil, *range* kecepatan fluida udara yang digunakan cukup tinggi, yaitu mulai dari kecepatan 1 m/s hingga 8 m/s, sangat berbeda dengan kecepatan yang digunakan penelitian tugas akhir ini, yaitu 0,34 hingga 0,9 m/s.
3. Pada Penelitian ini, terdapat putaran rpm turbin yang dijadikan dasar analisa sangat tinggi, yaitu antara 270 rpm hingga 540 rpm .
4. Pada penelitian Swapnil, dimensi yang digunakan pun berbeda. Pada penelitian ini diameter dan tinggi turbin yang digunakan adalah 1,25 m dan 2,5 m, sedangkan pada penelitian Omar Yaakob dan penelitian tugas akhir, dimensi turbin yang digunakan adalah dengan diameter 0,75 m dan tinggi 1,5 meter.

Selanjutnya, berdasarkan referensi penelitian dari Kamoji, ia menggunaan metode terowongan angin untuk menguji performa turbin savonius dengan sudut *helical* 90 derajat. Grafik perfoma berupa nilai *Coefficient of Power dan Coefficient of Torque* terhadap *Tip Speed Ratio* dapat dilihat pada gambar di bawah [38].



Gambar 4.112 Grafik Cp vs TSR dan Grafik Ct Vs TSR pada Penelitian Kamoji
Sumber : Kamoji, 2009

Dapat dilihat dar grafik di atas bahwa nilai Cp dan Ct cukup tinggi, yaitu Cp berada pada angka 0,16, dan Ct berada pada angka 0,28. Selain grafik, juga terdapat tabel yang menyatakan kecepatan angin yang tinggi pada penelitian Kamoji, yaitu antara 4 m/s hingga 14 m/s.

Table 5
Variation of coefficient of power with tip speed ratio for a helical Savonius rotor with an overlap ratio of 0.0

Reynolds number	Corresponding wind velocities (m/s)	Cp_{max}	TSR at which maximum Cp occurs
57,700	4	0.11	0.70
86,600	6	0.15	0.72
115,500	8	0.16	0.65
144,000	10	0.17	0.66
173,000	12	0.19	0.72
202,000	14	0.20	0.71

Gambar 4.113 Tabel Reynold Number dan Kecepatan Angin Serta Pengaruhnya Terhadap Nilai Cp Maksimum Penelitian Kamoji
Sumber : Kamoji, 2009

Setelah dilakukan analisa mendalam pada penelitian yang dilakukan oleh Kamoji, didapatkan bahwa hasil berupa *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* yang tinggi merupakan kontribusi dari :

1. Pada Penelitian ini, fluida yang digunakan adalah udara, yang mana secara properties berbeda dengan air laut, dimana penelitian yang dilakukan Omar Yaakob menggunakan air laut.
2. Pada penelitian ini, range kecepatan fluida udara yang digunakan cukup tinggi, yaitu mulai dari kecepatan 4 m/s hingga 14 m/s, sangat berbeda dengan kecepatan yang digunakan penelitian tugas akhir ini, yaitu 0,34 hingga 0,9 m/s.
3. Pada penelitian ini, dimensi yang digunakan pun berbeda. Pada penelitian ini diameter dan tinggi turbin yang digunakan adalah 250 mm dan 250 mm, dimana aspect rationya bernilai satu. Hal ini berbeda jauh dengan ukuran turbin yang digunakan pada penelitian Omar Yaakob dan penelitian tugas akhir yang berdiameter 0,75 m dan tinggi 1,5 mm, serta nilai aspect ratio 2.
4. Eksperimen yang diakukan Kamoji berada pada kondisi laboratorium, berbeda dengan kondisi di laut yang disimulasikan pada penelitian tugas akhir ini.

Maka, dari kedua penelitian tersebut, didapatkan rekomendasi sebagai berikut :

1. Pada penelitian Omar Yaakob, hasil simulasinya perlu divalidasi melalui eksperimen di penelitian mendatang, untuk mengetahui performa sesungguhnya dari turbin savonius *helical* 180^0 ketika dioperasikan pada kondisi *real* selat – selat yang ada di Malaysia sesuai yang disebutkan dalam paper, yaitu 0,56 m/s.

2. Performa turbin savonius *helical* 180^0 juga perlu divalidasi dengan pengujian pada kecepatan tinggi dengan fluida air laut, untuk mengetahu apakah ada perbedaan nilai Cp dan Ct apabila dikomparasi denan referensi penelitian Swapnil dan Kamoji yang menggunakan fluida angin.

4.10.6 Analisa Penurunan Performa Turbin Savonius Dengan Penerapan *Tip Rake*

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, dapat terlihat adanya penurunan nilai *Coefficient of Performance* (Cp) dan *Coefficient of Torque* (Ct) dari model turbin savonius dengan sudut tip rake 0^0 terhadap turbin savonius dengan sudut *tip rake* 5^0 dan 10^0. Nilai Cp dan Ct pada setiap turbin dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 4.15 Tabel Hasil Simulasi Seluruh Model

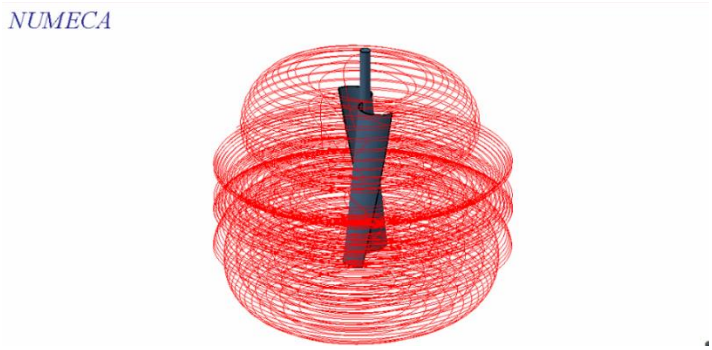
Nilai *Coefficient of Performance*								
Nilai Cp Turbin 0 Deg			**Nilai Cp Turbin 5 Deg**			**Nilai Cp 10 Deg**		
V	**Unit**	**CP**	**V**	**Unit**	**CP**	**V**	**Unit**	**CP**
0,34	m/s	0,0557	0,34	m/s	0,0155	0,34	m/s	$1,682 \times 10^{-2}$
0,56	m/s	0,0576	0,56	m/s	0,0178	0,56	m/s	$1,771 \times 10^{-2}$
0,9	m/s	0,0543	0,9	m/s	0,0162	0,9	m/s	$1,776 \times 10^{-2}$
Nilai *Coefficient of Torque*								
Nilai Ct Turbin 0 Deg			**Nilai Ct Turbin 5 Deg**			**Nilai Ct Turbin 10 Deg**		
V	**Unit**	**CT**	**V**	**Unit**	**CT**	**V**	**Unit**	**CT**
0,34	m/s	$5,575 \times 10^{-2}$	0,34	m/s	$8,535 \times 10^{-3}$	0,34	m/s	$9,019 \times 10^{-3}$
0,56	m/s	$5,764 \times 10^{-2}$	0,56	m/s	$9,186 \times 10^{-3}$	0,56	m/s	$9,124 \times 10^{-3}$
0,9	m/s	$5,438 \times 10^{-2}$	0,9	m/s	$8,279 \times 10^{-3}$	0,9	m/s	$9,107 \times 10^{-3}$

Oleh karena itu, pada penelitian ini, dilakukan analisa penyebab penurunan performa pada turbin yang menerapkan *tip rake* pada *blade* turbin savonius. Analisa dilakukan menggunakan hasil dari simulasi dengan menggunakan tiga parameter, yaitu vektor aliran, *pressure*, dan *relative velocity*, yang dapat dilihat menggunakan *software* CFView.

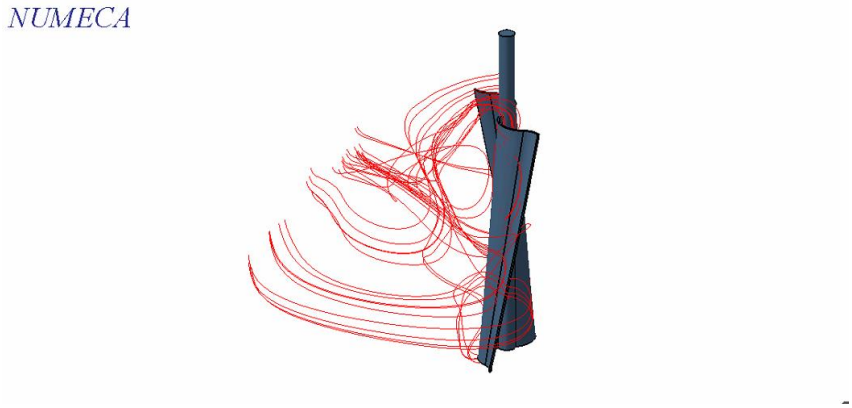
4.10.6.1 Analisa Vektor Aliran

Analisa aliran dilakukan pada seluruh model turbin dengan menggunakan hasil simulasi yang sama pada ketiganya, yaitu hasil simulasi di kecepatan aliran 0.9 m/s. Mengacu kepada tampilan tampak *isometric* dari model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, 5^0, dan 10^0, terlihat bahwa aliran yang dihasilkan dan melewati turbin dengan sudut *tip rake* 0^0 memiliki aliran yang relatif laminar.

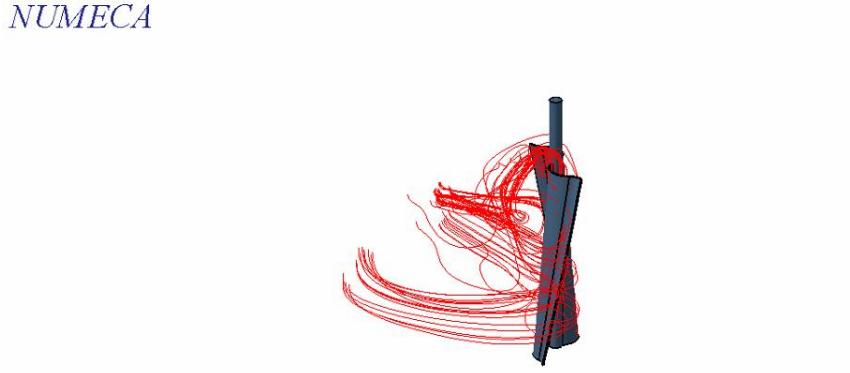
Sedangkan pada turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, aliran yang dihasilkan turbin relatif turbulen, yang mana vektor alirannya menimbulkan hambatan pada arah putar *blade.*



Gambar 4.114 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

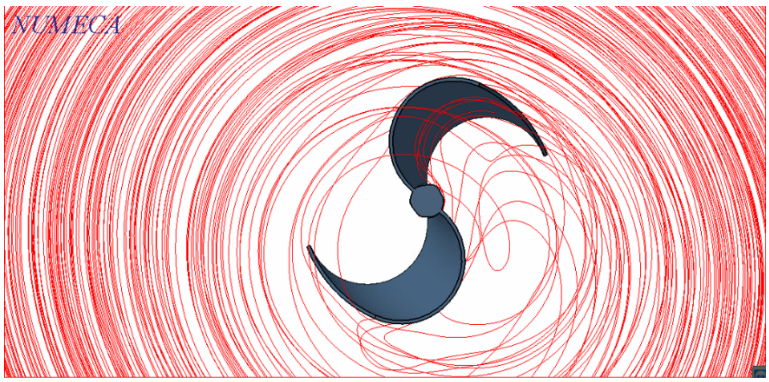


Gambar 4.115 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

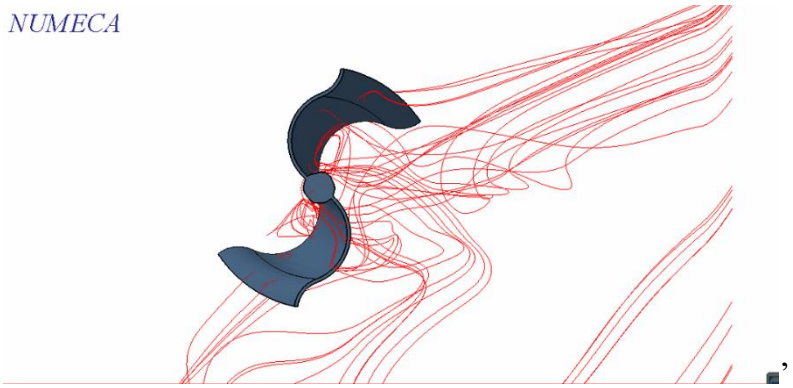


Gambar 4.116 Tampak *Isometric* Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

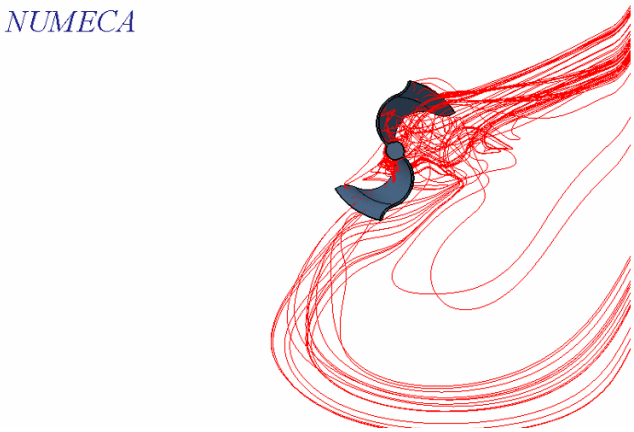
Begitu pula pada turbin dengan sudut *tip rake* 10^0 yang menunjukkan aliran dengan turbulensi yang lebih besar dari turbin dengan *sudut tip rake* 5^0, yang bisa dilihat pada gambar tampak atas pada seluruh model turbin.



Gambar 4.117 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.118 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

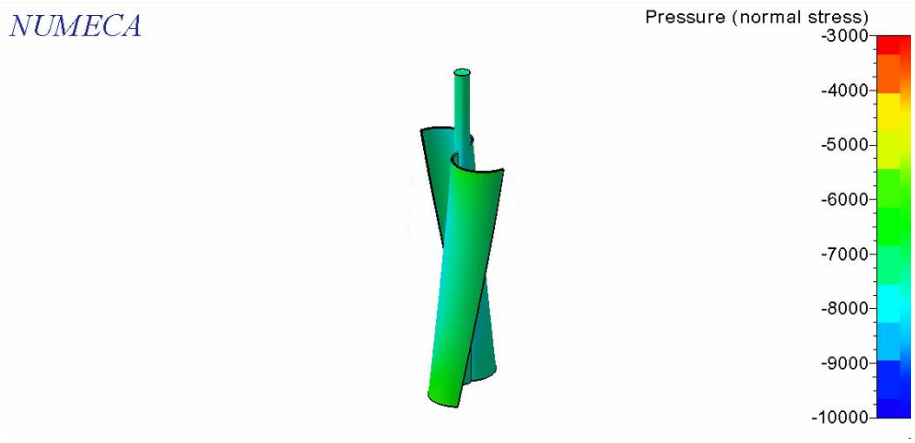


Gambar 4.119 Tampak Atas Vektor Aliran dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

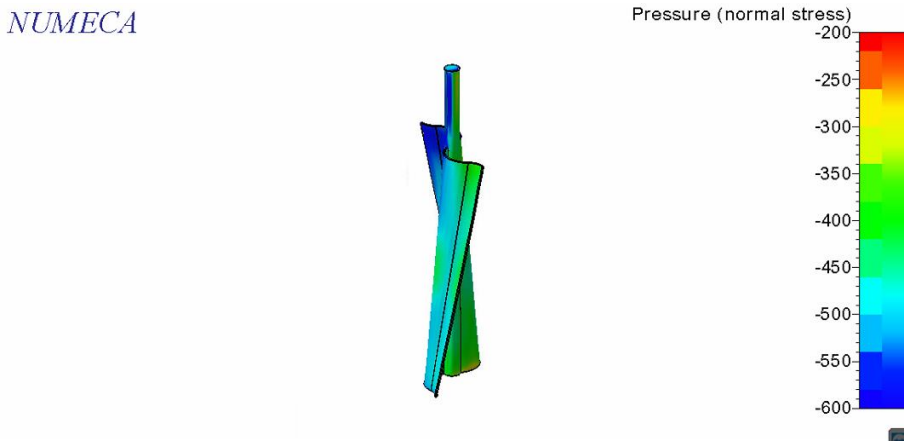
Selain itu, pada model turbin yang menggunakan *tip rake*, aliran tidak terdistribusi dengan baik pada bagian *blade*, namun terdistribusi keluar dari *blade* (terlihat pada gambar pandangan *isometric*). Sehingga, momentum dari aliran fluida yang seharusnya dikonversi menjadi *energi kinetic* yang mengerakkan turbin, berubah menjadi *losses*. Hal ini juga berhubungan dengan *relative velocity* dan *pressure* di bagian turbin yang akan dijelaskan pada bagian berikutnya. Berdasarkan analisa aliran, dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* pada konfigurasi turbin dan variasi kecepatan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini menyebabkan penurunan performa pada turbin savonius.

4.10.6.2 Analisa Pressure

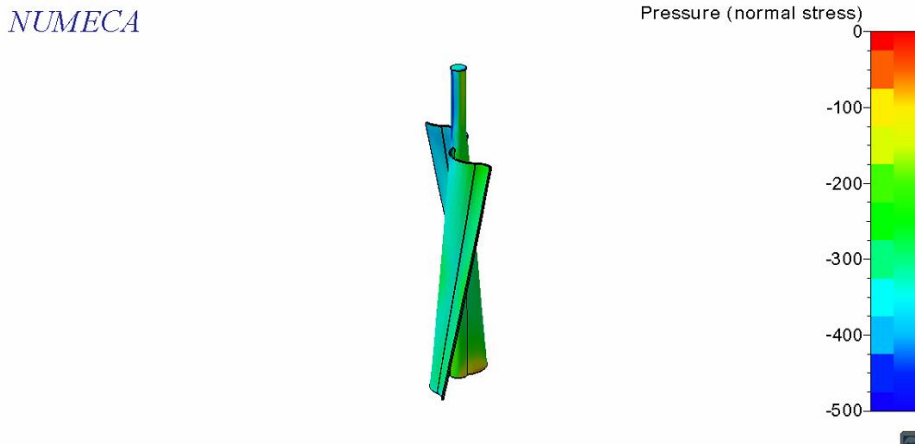
Analisa *pressure* dilakukan pada seluruh model turbin dengan menggunakan hasil simulasi yang sama pada ketiganya, yaitu hasil simulasi di kecepatan aliran 0.9 m/s. Mengacu kepada tampilan tampak isometric dan mengacu kepada kode warna pada model turbin dengan sudut tip rake 0 derajat, 5 derajat, dan 10 derajat, terlihat bahwa *pressure* yang dihasilkan pada turbin memiliki nilai yang bervariasi. Pada turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, *pressure* yang bekerja pada turbin memiliki *range pressure band* yang besar, yaitu antara -9000 hingga -5500, yaitu pada kode warna biru tua hingga hijau (terlihat pada gambar *isometric view*).



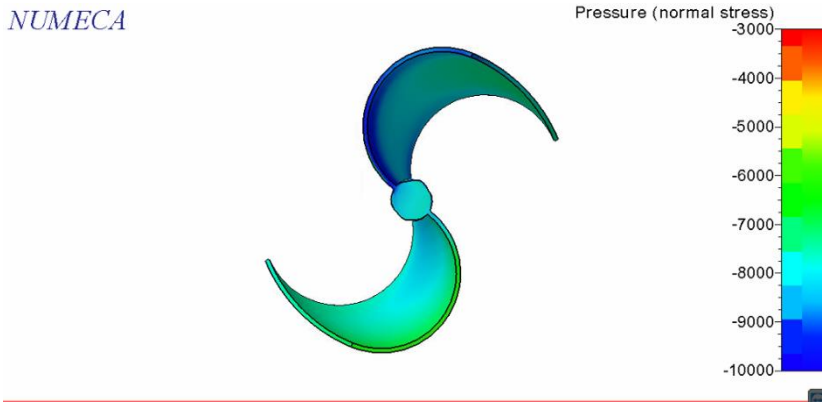
Gambar 4.120 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



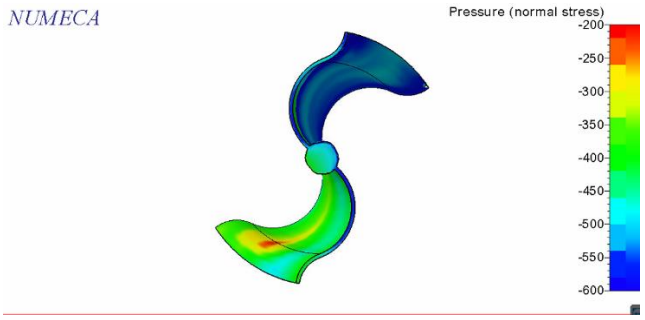
Gambar 4.121 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



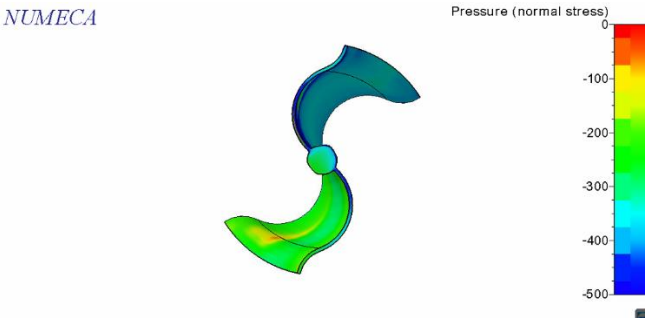
Gambar 4.122 Tampak *Isometric Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.123 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.124 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

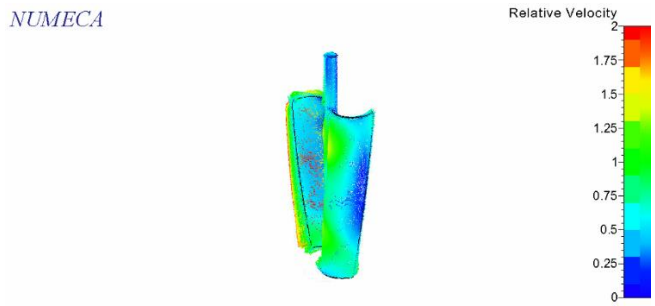


Gambar 4.125 Tampak Atas *Pressure* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

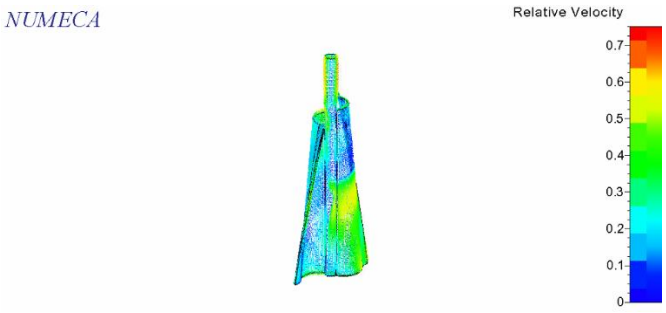
Dan pada turbin model ini, terlihat bahwa pressure dengan nilai terbesar berada pada ujung menyeluruh kedua *blade* turbin. Sedangkan pada turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, *pressure* yang bekerja pada turbin memiliki *range pressure band* sebesar -600 hingga -300, yang tentunya jauh lebih kecil dibandingkan turbin dengan *tip rake* 0^0. Pada turbin dengan *tip rake* 5^0 ini, terlihat bahwa *pressure* dengan nilai terbesar berada pada ujung menyeluruh kedua *blade* turbin, namn menghasilkan *pressure band* yang lebih kecil dibandingkan dengan turbin dengan *tip rake* 0^0 . Untuk turbin dengan *tip rake* 10^0 memiliki *power band* yng lebih kecil lagi, yaitu antara -500 sampai -250 (kode warna biru muda dan hijau muda). Pada turbin dengan sudut *tip rake* 10^0 ini, *pressure* dengan nilai terbesar justru berada pada ujung yang mendeat kearah pusat *shaft* turbin, bukan pada kedua ujung *blade*. Berdasarkan analisa *pressure*, dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* pada konfigurasi turbin dan variasi kecepatan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini menyebabkan penurunan performa pada turbin savonius.

4.10.6.3 Analisa Relative Velocity

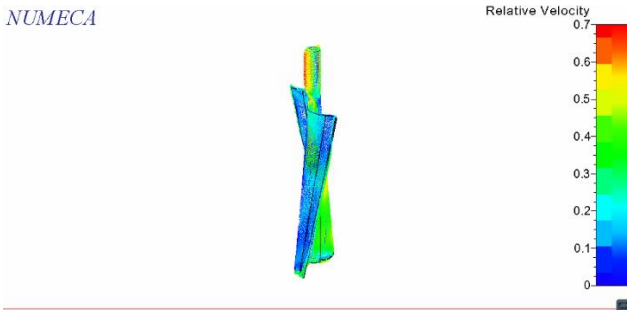
Selain melakukan analisa pada aliran dan *pressure*, analisa terhadap *relative velocity* juga dilakukan. Analisa *relative velocity* dilakukan pada seluruh model turbin dengan menggunakan hasil simulasi yang sama pada ketiganya, yaitu hasil simulasi di kecepatan aliran 0.9 m/s. Mengacu kepada tampilan tampak *isometric* dan mengacu kepada kode warna pada model turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, 5^0, dan 10^0, terlihat bahwa *relative velocity* yang dihasilkan pada turbin memiliki nilai yang bervariasi. Pada turbin dengan sudut *tip rake* 0^0, *relative velocity* yang bekerja pada turbin memiliki *range relative velocity* yg besar, yaitu dari skala warna 0 hingga 2, turbin tipe ini memiliki *relative velocity* yang bekerja antara 0,25 hingga 1 m/s. Dan pada turbin model ini, terlihat bahwa kecepatan dengan nilai terbesar berada pada bagian tengah kedua *blade* turbin. Sedangkan pada turbin dengan sudut tip rake 5^0, *relative velocity* yang bekerja pada turbin memiliki *range relative velocity* dari 0 hinga 0.6 dari skala warna 0^0 sampai 0.7, yang mana lebih kecil dibandingkan turbin dengan *tip rake* 0^0.



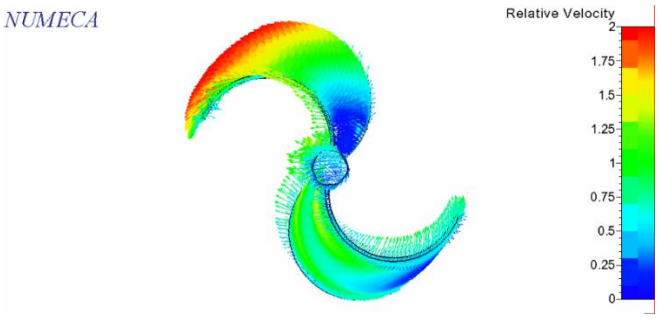
Gambar 4.126 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



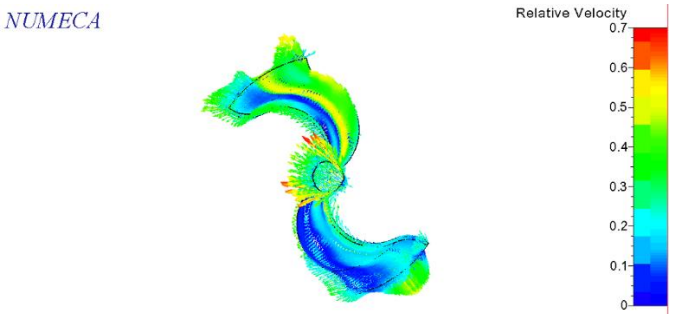
Gambar 4.127 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



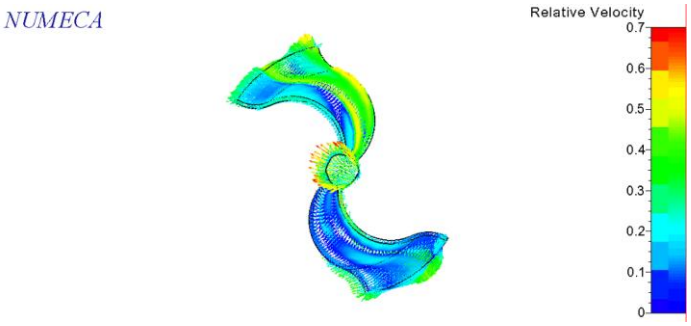
Gambar 4.128 Tampak *Isometric Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.129 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 0^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.130 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 5^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s



Gambar 4.131 Tampak Atas *Relative Velocity* dari Turbin Savonius Sudut *Tip Rake* 10^0 pada kecepatan aliran 0.9 m/s

Untuk turbin dengan *tip rake* 10^0 memiliki *range relative velocity* dari 0 hinga 0.5 dari skala warna 0 sampai 0.7. Pada turbin dengan sudut *tip rake* 10^0 ini, kontur *relative velocity* memliki pola yang sama dengan turbin sudut *tip rake* 5^0. Berdasarkan analisa *Relative Velocity*, dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* pada konfigurasi turbin dan variasi kecepatan yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini menyebabkan penurunan performa pada turbin savonius.

Oleh karena itu, dari analisa yang dilakukan, didapatkan rekomendasi sebagai berikut :

1. Pada penelitian tugas akhir ini, didapatkan hasil *Coefficient of Performance* dan *Coefficient of Torque* yang rendah. Dapat dilihat seperti pada investigasi pada *running* model helical 180^0, variasi kecepatan yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini terlalu rendah, dibandingkan dengan paper – paper yang ada. Oleh karena itu, diperlukan simulasi pada konfigurasi turbin seperti tugas akhir ini pada kecepatan aliran yang lebih tinggi, untuk mengetahui performa turbin ini di kecepatan tinggi.
2. Simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini perlu divalidasi melalui eksperimen di penelitian mendatang, untuk mengetahui performa sesungguhnya dari turbin savonius ketika dioperasikan pada kondisi *real* menggunakan air laut, baik di kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi, sehingga bisa dikomparasi dengan hasil simulasi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi yan dilakukan dalam tugas akhir ini, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius dengan sudut *twist* 45^0 memberikan pengaruh terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Performance (Cp)*, dimana pada turbin dengan sudut *tip rake* 0^0 (tanpa menerapkan *tip rake*) nilai *Cp* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0.9 m/s adalah 0,055, 0,057 dan 0,054. Untuk turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, nilai *Cp* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0.9 m/s adalah 0,0156, 0,0178, dan 0,0162. Sedangkan untuk turbin dengan sudut *tip rake* 10^0, nilai *Cp* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0.9 m/s adalah $1{,}682 \times 10^{-2}$, $1{,}771 \times 10^{-2}$, dan $1{,}776 \times 10^{-2}$. Maka, nilai Cp tertinggi model turbin dengan *tip rake* 0^0 dengan kecepatan aliran 0.56 m/s, dan nilai Cp terendah berada pada model turbin dengan *tip rake* 5^0 dengan kecepatan aliran 0,34 m/s. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius dengan sudut *twist* 45^0 memberikan pengaruh berupa penurunan nilai *Cp*, yang berarti performa turbin mengalami penurunan.
2. Penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius dengan sudut *twist* 45^0 memberikan pengaruh terhadap performa turbin berupa nilai *Coefficient of Torque (Ct)*, dimana pada turbin dengan sudut *tip rake* 0^0 (tanpa menerapkan *tip rake*) nilai *Ct* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0,9 m/s adalah $2{,}083 \times 10^{-2}$, $2{,}095 \times 10^{-2}$, dan $1{,}915 \times 10^{-2}$. Untuk turbin dengan sudut *tip rake* 5^0, nilai *Ct* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0,9 m/s adalah $8{,}53 \times 10^{-3}$, $9{,}18 \times 10^{-3}$, dan $8{,}27 \times 10^{-3}$. Sedangkan untuk turbin dengan sudut *tip rake* 10^0, nilai *Ct* pada kecepatan 0,34 m/s, 0, 56 m/s, dan 0,9 m/s adalah $9{,}019 \times 10^{-3}$, $9{,}123 \times 10^{-3}$, dan $9{,}10 \times 10^{-3}$. Maka, nilai Ct tertinggi berada pada model turbin dengan *tip rake* 0^0 dengan kecepatan aliran

0.56 m/s, dan nilai Ct terendah berada pada model turbin dengan *tip rake* 5^0 dengan kecepatan aliran 0,9 m/s. Sehingga dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* dengan variasi sudut 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted* savonius dengan sudut *twist* 45^0 memberikan pengaruh berupa penurunan nilai *Ct*, yang berarti performa turbin mengalami penurunan.

3. Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini, serta dua kesimpulan di atas, dapat disimpulkan bahwa penerapan *tip rake* sudut 5^0 dan 10^0 pada turbin *twisted blade* savonus dengan sudut *twist* 45^0, dengan dimensi tinggi 1500 mm dan diameter 750 mm dengan *Aspect Ratio* sama dengan 2, menimbulkan penurunan performa turbin dalam parameter nilai *Coefficient of Performance*, maupun *Coefficient of Torque.* Untuk mendukung hasil penelitian tugas akhir ini, diperlukan validasi menggunakan eksperimen pada penelitian mendatang, sekaligus untuk mengetahui performa turbin savonius dengan penambahan *tip rake* pada kondisi *real*.

5.2 Saran

Dalam melaksanakan tugas akhir ini, berikut adalah saran yang dapat penulis berikan.

1. Untuk peneliti yang ingin melanjutkan penelitian tentang performa turbin savonius ini, diperlukan penelitian lebih detail lagi terdahap penerapan *tip rake* pada variasi turbin savonius yang ada, baik dari segi pengaruhnya terhadap dimensi, *aspect ratio*, jumlah *blade*, dan material. Hal ini bertujuan agar penelitian ini bisa menjadi *database* dalam analisa dan penelitian performa turbin savonius yang lebih komprehensif .

2. Diperlukan persiapan yang cukup mendalam untuk melakukan lanjutan penelitian turbin savonius ini, karena minimnya referensi yang menggunakan fluida air laut. Selain itu, untuk mendapatkan jumlah *cell* yang banyak demi keakuratan hasil dan reduksi margin error, serta simulasi dapat berjalan dengan baik tanpa adanya *crashed* saat *running*, diperlukan spesifikasi komputer yang mumpuni sesuai dengan *minimum requirement* dari *software* .

3. Penelitian tugas akhir ini dilakukan pada masa pandemi Covid19, maka dalam setiap penelitian yang berhubungan dengan simulasi, harap mempersiapkan *contingency plan*, atau rencana cadangan terhadap simulasi atau kendala lain yang mungkin timbul akibat pandemi seperti Covid19 ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

[1] PT Perusahan Listrik Negara, "Ruptl Pt Pln (Persero) 2018-2027," pp. 2018–2027, 2018.

[2] Badan Pusat Statistik Kabupaten Natuna, "Kecamatan Pulau Tiga Dalam Angka," 2019.

[3] IESR, "Sustainable electricity access for rural communities: Status, Challenges, and Opportunities," *Pojok Energi - Seri Disk.*, p. 11, 2019, [Online]. Available: http://iesr.or.id/wp-content/uploads/2019/05/Proceeding-PE-11.pdf.

[4] A. Sutopo, D. Sugianto, and M. Yosi, "Potensi Arus Laut Sebagai Sumber Energi Listrik Di Desa Sabangmawang, Kabupaten Natuna," *J. Oseanografi*, vol. 4, no. 2, p. 119885, 2015.

[5] I. S. A. Fivid Rivantoro, "Studi Pemilihan Desain Pembangkit Listrik Tenaga Arus Laut (Pltal) Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (Ahp)," *J. Tek. Its*, vol. 4, no. 2, pp. 114–118, 2015.

[6] J. H. Lee, Y. T. Lee, and H. C. Lim, "Effect of twist angle on the performance of Savonius wind turbine," *Renew. Energy*, vol. 89, pp. 231–244, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.12.012.

[7] U. K. Saha and M. J. Rajkumar, "On the performance analysis of Savonius rotor with twisted blades," *Renew. Energy*, vol. 31, no. 11, pp. 1776–1788, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.08.030.

[8] H. J. Cheng, Y. C. Chien, C. Y. Hsin, K. K. Chang, and P. F. Chen, "A numerical comparison of end-plate effect propellers and conventional propellers," *J. Hydrodyn.*, vol. 22, no. 5 SUPPL. 1, pp. 495–500, 2010, doi: 10.1016/S1001-6058(09)60242-0.

[9] J. P. Abraham, B. D. Plourde, G. S. Mowry, W. J. Minkowycz, and E. M. Sparrow, "Summary of Savonius wind turbine development and future applications for small-scale power generation," *J. Renew. Sustain. Energy*, vol. 4, no. 4, 2012, doi: 10.1063/1.4747822.

[10] M. J. Jamanun, M. S. Misaran, M. Rahman, and W. K. Muzammil, "Performance Investigation of A Mix Wind Turbine Using A Clutch

Mechanism at Low Wind Speed Condition," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 217, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/217/1/012020.

[11] M. Hadi Ali, "Experimental Comparison Study for Savonius Wind Turbine of Two & Three Blades At Low Wind Speed," *Int. J. Mod. Eng. Res. www.ijmer.com*, vol. 3, no. 5, pp. 2978–2986, 2013.

[12] Z. M. A. Kamoji1, S. B. Kedare1 and S. V. Prabhu2,*, y and 1Energy, "Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional Savonius rotor M.," *Arch. Thermodyn.*, vol. 32, no. 4, pp. 877–895, 2007, doi: 10.1002/er.

[13] U. K. Saha, S. Thotla, and D. Maity, "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, no. 8–9, pp. 1359–1375, 2008, doi: 10.1016/j.jweia.2008.03.005.

[14] S. F. Pamungkas, D. S. Wijayanto, H. Saputro, and I. Widiastuti, "Performance 'S' Type Savonius Wind Turbine with Variation of Fin Addition on Blade," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 288, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/288/1/012132.

[15] M. Zahariev, T. Asim, R. Mishra, and B. Nsom, "Effects of blade tapering on the performance of vertical axis wind turbines analysed through advanced visualization techniques," *Int. J. COMADEM*, vol. 22, no. 02, 2019.

[16] Y. Inukai, "Development of Contra-Rotating Propeller with Tip-Raked Fins," *Second Int. Symp. Mar. Propulsors, SMP'11, Hamburg, Ger.*, no. June, 2011.

[17] O. Yaakob, Y. Ahmed, and M. Ismail, "Validation study for savonius vertical axis marine current turbine using CFD simulation," *6th Asia-Pacific Work. Mar. Hydrodyn.*, no. September, pp. 0–5, 2012, [Online]. Available: http://www.academia.edu/download/29677406/Validation_Study_for_Savonius_Vertical_Axis_Marine_Current_Turbine_Using_CFD_Simulation.pdf

[18] A. Reza Hassanzadeh, O. Yaakob, Y. M. Ahmed, and M. A. Ismail, "Comparison of conventional and helical savonius marine current turbine using computational fluid dynamics," *World Appl. Sci. J.*, vol. 28, no. 8, pp. 1113–1119, 2013, doi: 10.5829/idosi.wasj.2013.28.08.1385.

[19] Wrytki, “On the Structure of Ocean Currents (I),” *Pap. Meteorol. Geophys.*, vol. 5, no. 3–4, pp. 248–252, 1955, doi: 10.2467/mripapers1950.5.3-4_248.

[20] OKKY AGASSY FIRMANSYAH, “STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PERBESARAN DIMENSI DAN KONFIGURASI COUNTER-ROTATING LAUT VERTICAL AXIS STRAIGHT BLADE CASCADE,” 2017.

[21] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaicoe, “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1823–1835, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017.

[22] A. F. Zobaa and R. C. Bansal, “Handbook of renewable energy technology,” *Handb. Renew. Energy Technol.*, no. August 2015, pp. 1–851, 2011, doi: 10.1142/9789814289078.

[23] Y. K. Yadav, “A Savonius Wind Turbine with Electric Generator : Model and Test,” *Grad. Sch. Clemson Univ.*, pp. 1–89, 2016, [Online]. Available: https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/2428.

[24] P. D. L. Darmofal, “Lift And Drag Primer,” *MIT*, pp. 0–6, 2004.

[25] R. Hantoro, I. K. A. P. Utama, Erwandi, and A. Sulisetyono, “An experimental investigation of passive variable-pitch vertical-axis ocean current turbine,” *ITB J. Eng. Sci.*, vol. 43 B, no. 1, pp. 27–40, 2011, doi: 10.5614/itbj.eng.sci.2011.43.1.3.

[26] M.-S.-G. Cottbus and A. D. Schulze, “Windenergie,” 2008.

[27] F. Wenehenubun, A. Saputra, and H. Sutanto, “An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades,” *Energy Procedia*, vol. 68, pp. 297–304, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.03.259.

[28] J. Kumar Sahu, P. office SMIT, and C. Asst Manabhanjan Sahu, “‘Micro Wind Turbine Technology’ To Enhance Self Generative System in Passanger Trains,” *Int. Res. J. Eng. Technol.*, no. July, 2016, [Online]. Available: www.irjet.net.

[29] M. Jahangir Alam and M. T. Iqbal, “Design and development of hybrid vertical axis turbine,” *Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, no. 978, pp. 1178–

1183, 2009, doi: 10.1109/CCECE.2009.5090311.

[30] T. Hayashi, Y. Li, and Y. Hara, “Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor,” *JSME Int. Journal, Ser. B Fluids Therm. Eng.*, vol. 48, no. 1, pp. 9–16, 2005, doi: 10.1299/jsmeb.48.9.

[31] O. O. Mojola, “On the aerodynamic design of the savonius windmill rotor,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 21, no. 2, pp. 223–231, 1985, doi: 10.1016/0167-6105(85)90005-4.

[32] Studio di lngegneria Navale e Meccanica, “Unconventional Tip Shape Propellers Technology Review,” 2014, [Online]. Available: http://www.sinm.it/sites/default/files/Report350-14.pdf.

[33] B. Grunwald, “Vibration Analysis of Shaft in SolidWorks and ANSYS,” p. 53, 2018.

[34] P. PLOÉ, “Surrogate-based optimization of hydrofoil shapes using RANS simulations,” 2018.

[35] Numeca, “User Guide HEXPRESS™ 7.1,” *Computer (Long. Beach. Calif).*, no. September, pp. 1–20, 2020, [Online]. Available: www.impact-test.co.uk.

[36] Numeca, “User Guide FINE™/Marine 8.1,” *Computer (Long. Beach. Calif).*, no. September, pp. 1–20, 2020, [Online]. Available: www.impact-test.co.uk.

[37] S. V. Ghatage and J. B. Joshi, “Optimisation of vertical axis wind turbine: CFD simulations and experimental measurements,” *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 90, no. 5, pp. 1186–1201, 2012, doi: 10.1002/cjce.20617.

[38] M. A. Kamoji, S. B. Kedare, and S. V. Prabhu, “Performance tests on helical Savonius rotors,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 521–529, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.06.002.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN – LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Tabulasi Hasil Simulasi

Tabel 1 Tabulasi Hasil Simulasi Model Turbin Omar Yaakob (*Helical* 180^0)

180 Degree V = 0.56		Units
Forces		
Fx	51,2863884	N
Fy	155,6663055	N
Fz	-186,7369995	N
Moment		
Mx	-6,266271114	Nm
My	10,43002987	Nm
Mz	-0,497220606	Nm
Motion		
Rz0	924,3023982	Deg
dRz0	0,849993706	Rad/s
d2Rz0	4,333098888	Rad/s2

Tabel 2 Tabulasi Hasil Simulasi Model Turbin Sudut *Tip Rake* 0^0

0 Deg V = 0.34		Units		**0 Deg V = 0.56**		Units		**0 Degree V = 0.9**		Units
Forces				Forces				Forces		
Fx	85,514	N		Fx	121,4719	N		Fx	-94,0450	N
Fy	-136,770	N		Fy	-362,1548	N		Fy	-762,4013	N
Fz	-0,9779	N		Fz	-2,6288	N		Fz	-6,3331	N
Moment				Moment				Moment		
Mx	-25,1991	Nm		Mx	-66,9973	Nm		Mx	-149,2822	Nm
My	-12,8215	Nm		My	-20,7419	Nm		My	-0,8318	Nm
Mz	-0,0073	Nm		Mz	-0,0258	Nm		Mz	-0,0709	Nm
Motion				Motion				Motion		
Rz0	-1290,266	Deg		Rz0	-1296,4018	Deg		Rz0	-1305,6407	Deg
dRz0	-0,8026	Rad/s		dRz0	-1,3286	Rad/s		dRz0	-2,1518	Rad/s
d2Rz0	-0,2904	Rad/s2		d2Rz0	-0,5069	Rad/s2		d2Rz0	-0,1272	Rad/s2

Tabel 3 Tabulasi Hasil Simulasi Model Turbin Sudut *Tip Rake* 5^0

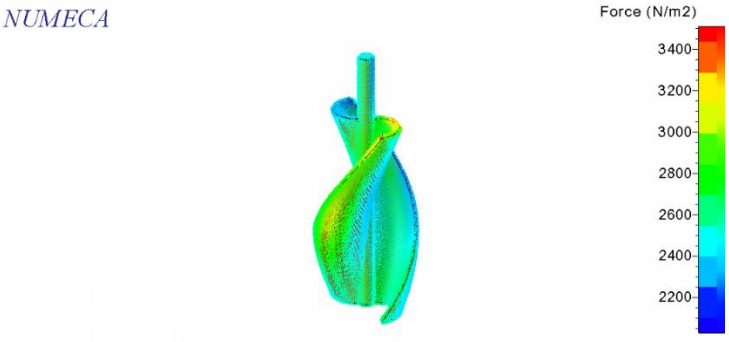
5 Deg V = 0.34		Units		**5 Deg V = 0.56**		Units		**5 Deg V = 0.9**		Units
Forces				Forces				Forces		
Fx	1,5553	N		Fx	5,3105	N		Fx	16,6364	N
Fy	14,8594	N		Fy	43,8965	N		Fy	121,0257	N
Fz	0,2016	N		Fz	0,4742	N		Fz	1,1027	N
Moment				Moment				Moment		
Mx	0,7718	Nm		Mx	2,3577	Nm		Mx	5,2025	Nm
My	-1,1932	Nm		My	-3,4581	Nm		My	-9,8773	Nm
Mz	0,0004	Nm		Mz	-0,0034	Nm		Mz	-0,0330	Nm
Motion				Motion				Motion		
Rz0	-478,7917	Deg		Rz0	-479,0688	Deg		Rz0	-479,4974	Deg
dRz0	-0,3030	Rad/s		dRz0	-0,4993	Rad/s		dRz0	-0,8032	Rad/s
d2Rz0	-0,0020	Rad/s2		d2Rz0	-0,0071	Rad/s2		d2Rz0	-0,0355	Rad/s2

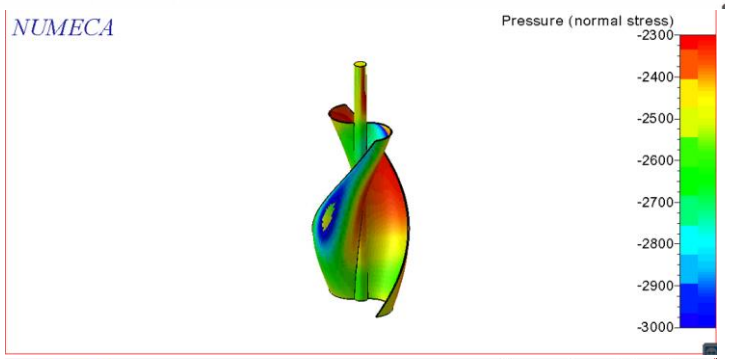
Tabel 4 Tabulasi Hasil Simulasi Model Turbin Sudut *Tip Rake* 10^0

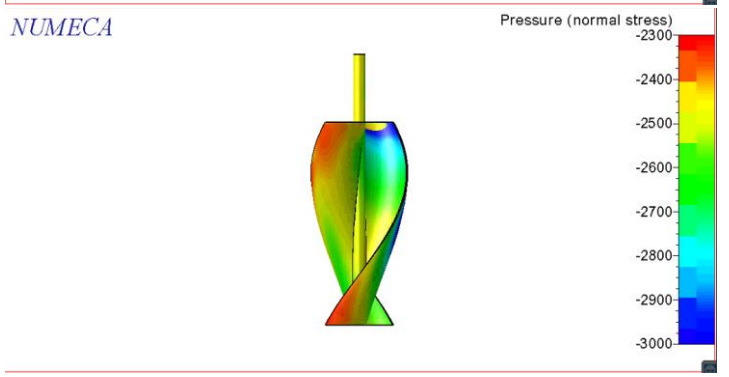
10 Deg V = 0.34		Units		**10 Deg V = 0.56**		Units		**10 Deg V = 0.9**		Units
Forces				Forces				Forces		
Fx	2,2562	N		Fx	5,9069	N		Fx	10,4997	N
Fy	17,0935	N		Fy	46,1984	N		Fy	111,1462	N
Fz	0,0524	N		Fz	0,0909	N		Fz	0,5122	N
Moment				Moment				Moment		
Mx	2,6479	Nm		Mx	6,9091	Nm		Mx	10,7208	Nm
My	-1,5960	Nm		My	-4,3910	Nm		My	-11,4693	Nm
Mz	0,0022	Nm		Mz	0,0028	Nm		Mz	-0,0207	Nm
Motion				Motion				Motion		
Rz0	-478,118	Deg		Rz0	-477,9646	Deg		Rz0	-477,031	Deg
dRz0	-0,3025	Rad/s		dRz0	-0,4981	Rad/s		dRz0	-0,79897	Rad/s
d2Rz0	0,0005	Rad/s2		d2Rz0	-0,0003	Rad/s2		d2Rz0	-0,0207	Rad/s2

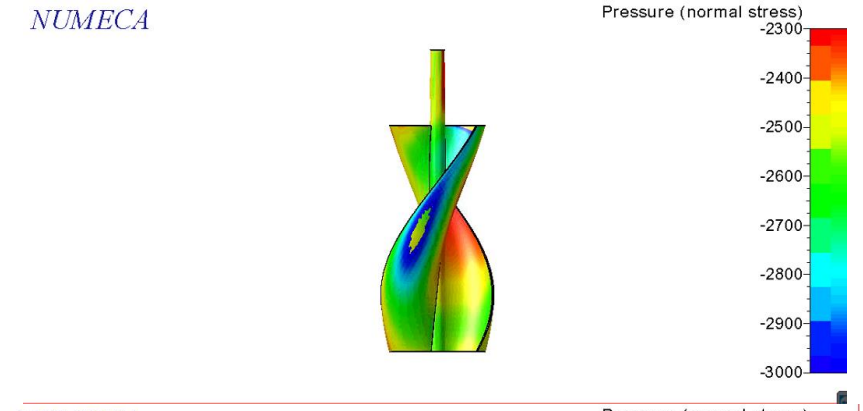
LAMPIRAN B. Tampilan CF View Seluruh Model Turbin

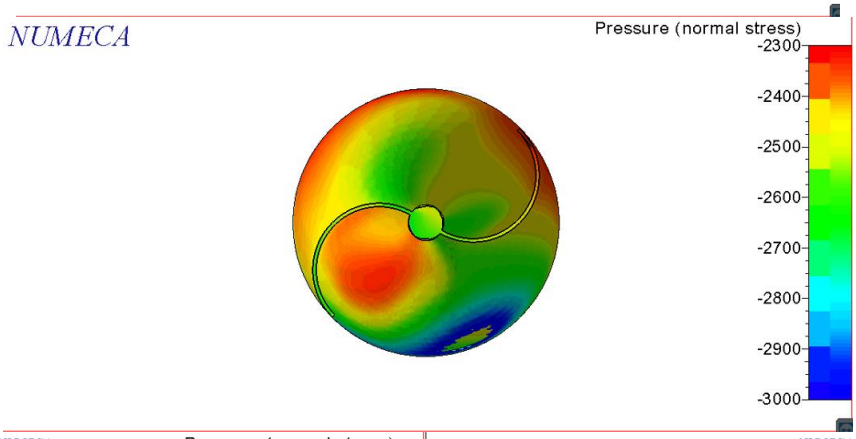
B.1 Tampilan CF View Model Turbin Omar Yaakob *(Helical 180^0)*

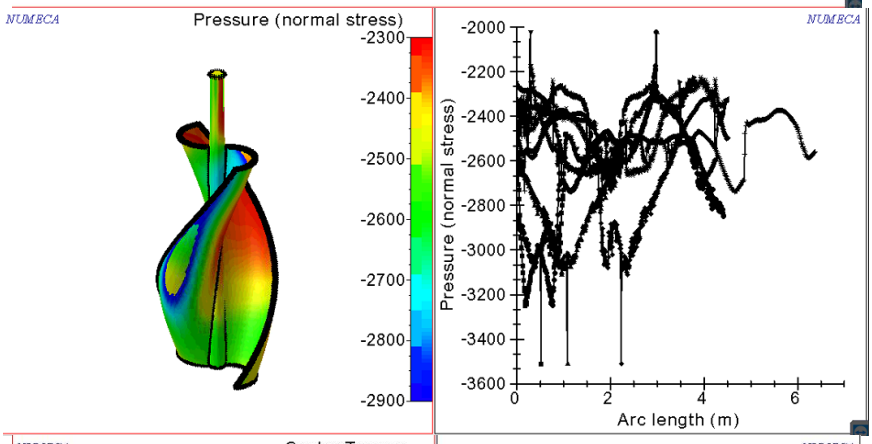


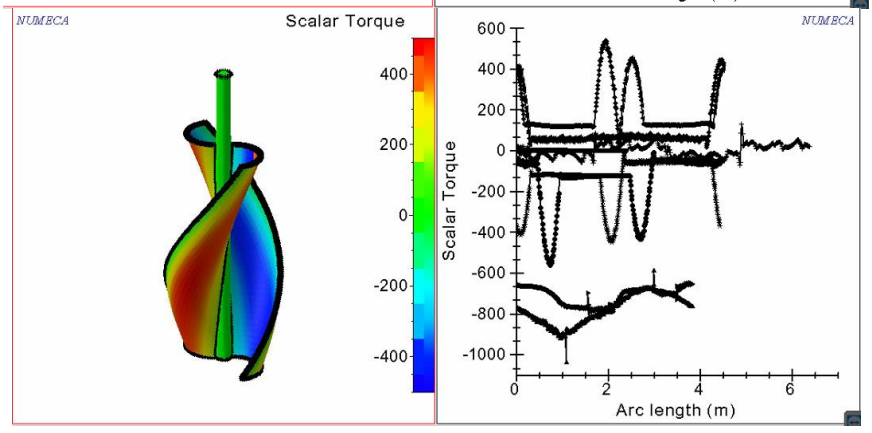


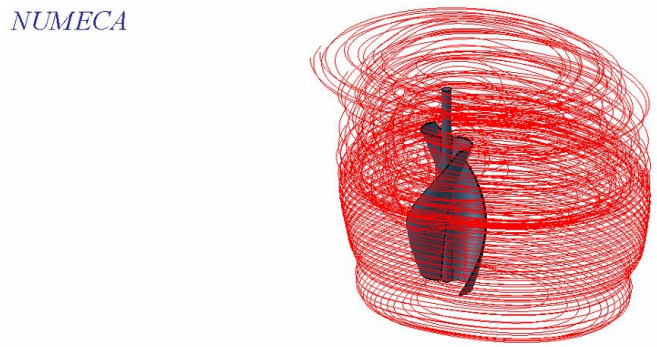


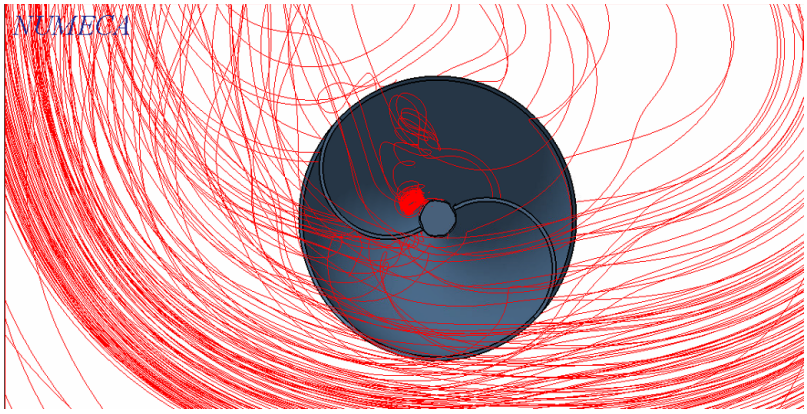

NUMECA
Pressure (normal stress)
-2300
-2400
-2500
-2600
-2700
-2800
-2900
-3000

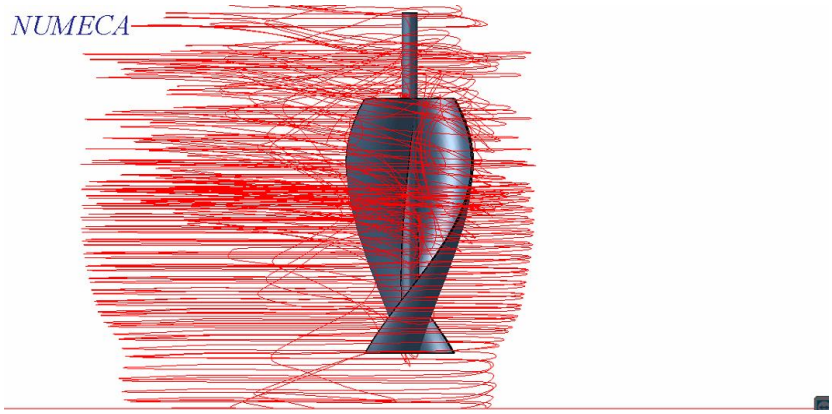

NUMECA
Pressure (normal stress)
-2300
-2400
-2500
-2600
-2700
-2800
-2900
-3000

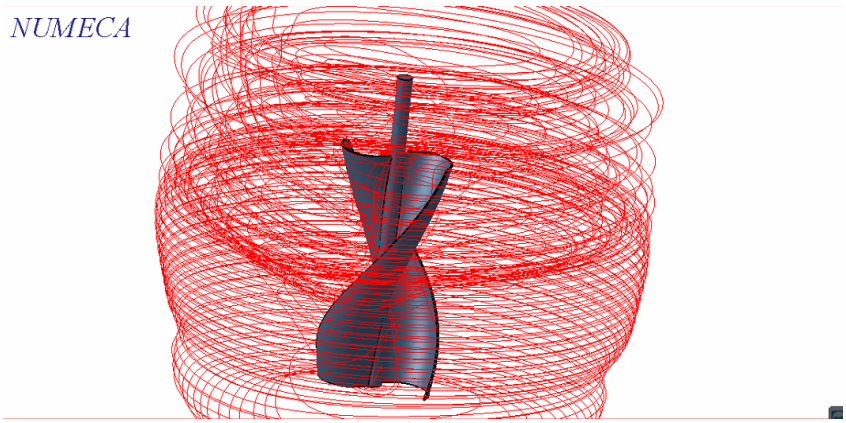

NUMECA
Pressure (normal stress)
-2300
-2400
-2500
-2600
-2700
-2800
-2900
NUMECA
Pressure (normal stress)
-2000
-2200
-2400
-2600
-2800
-3000
-3200
-3400
-3600
0
2
4
6
Arc length (m)

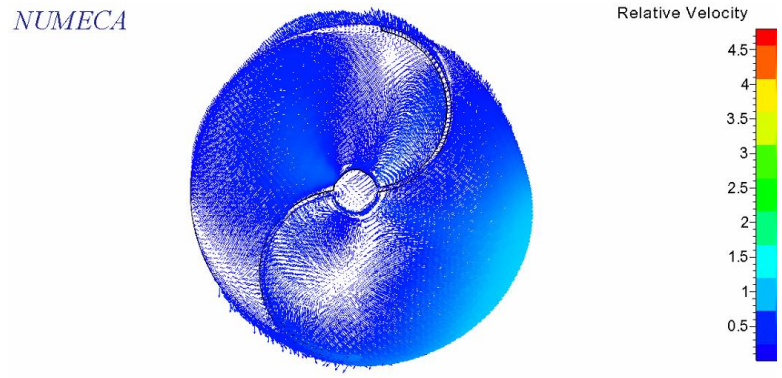

NUMECA
Scalar Torque
400
200
0
-200
-400
NUMECA
Scalar Torque
600
400
200
0
-200
-400
-600
-800
-1000
0
2
4
6
Arc length (m)

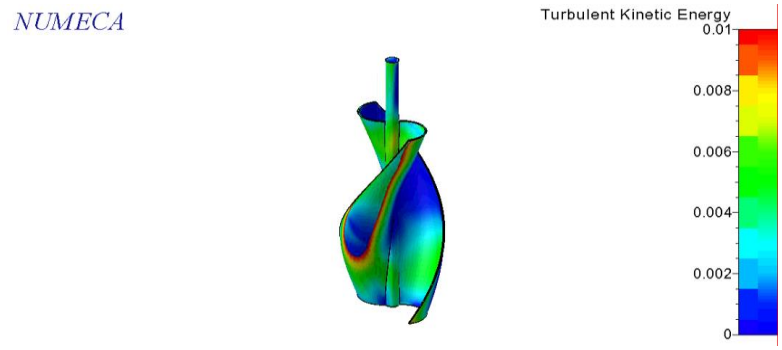

NUMECA

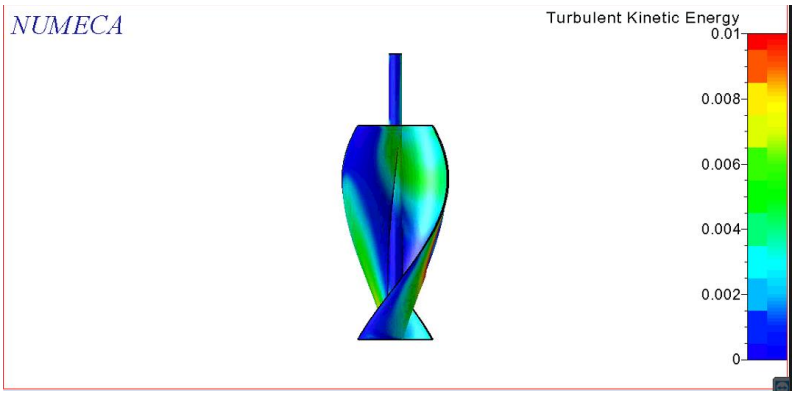

NUMECA

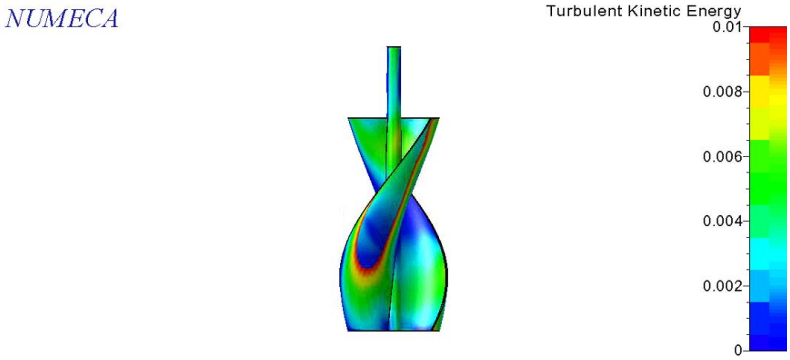

NUMECA

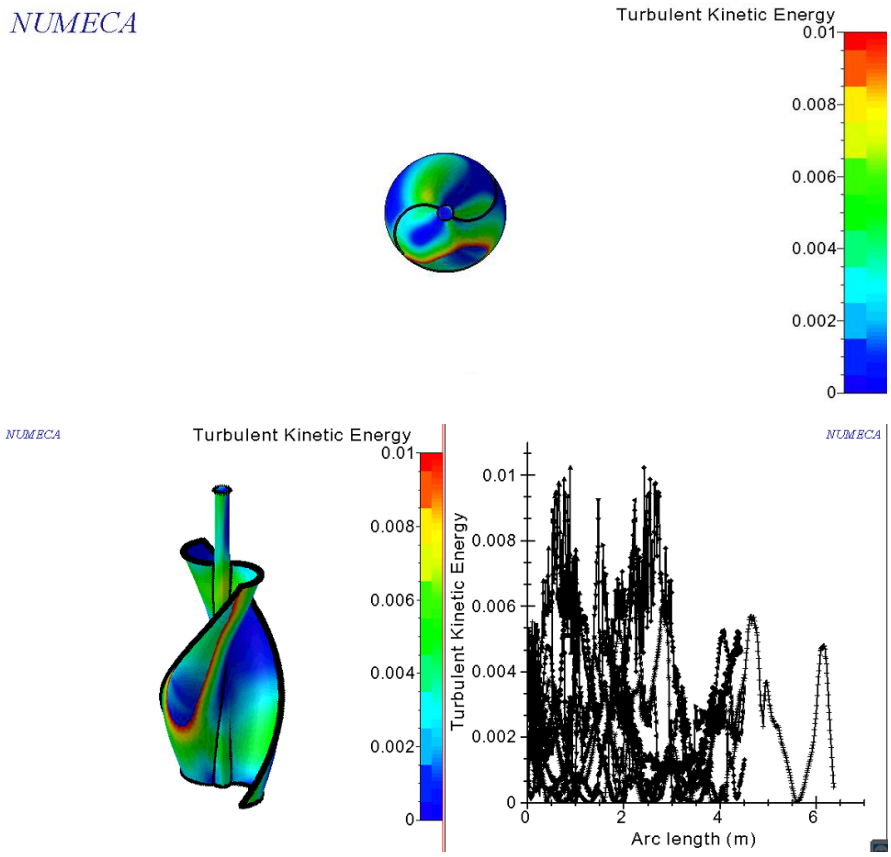

NUMECA


NUMECA
Relative Velocity
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5

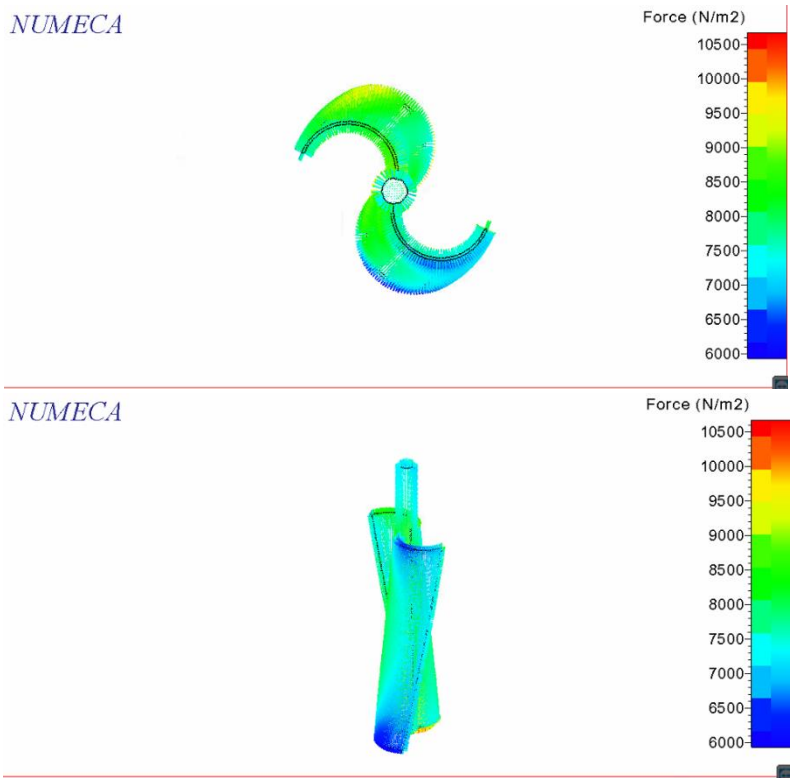

NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0

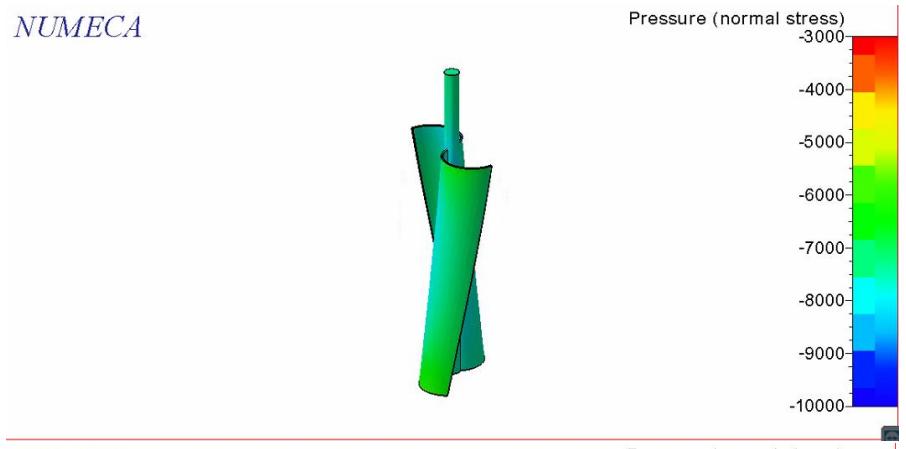

NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0

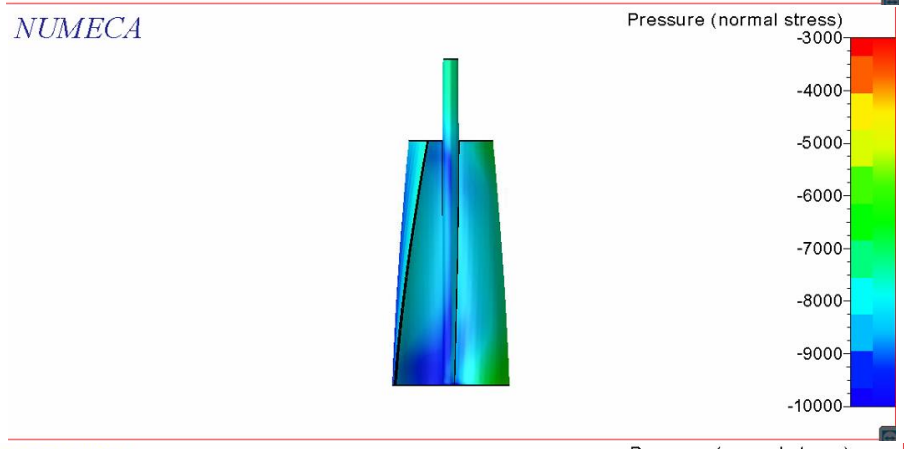

NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.01
0.008
0.006
0.004
0.002
0

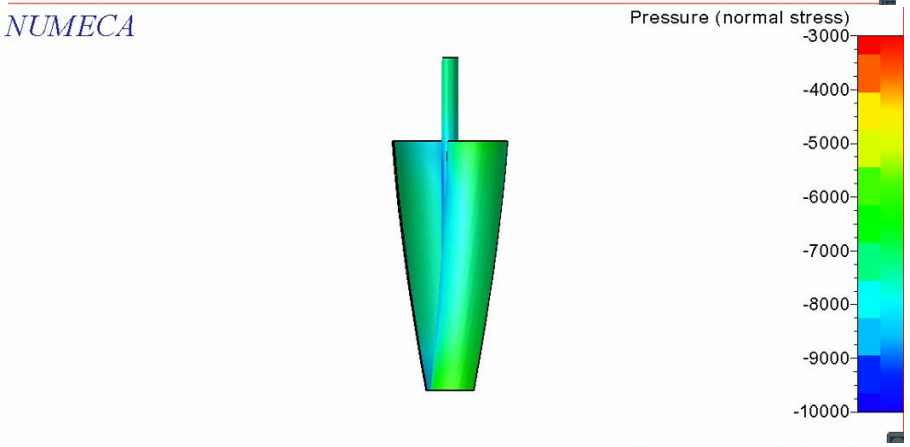


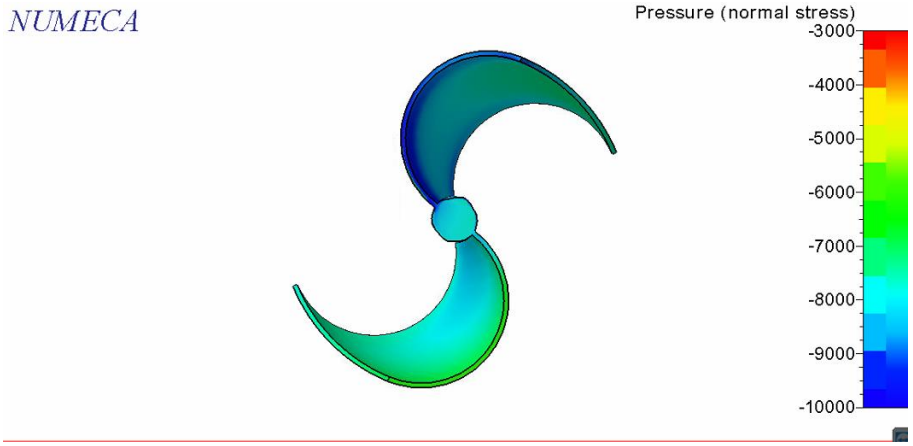
B.2 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 0^0

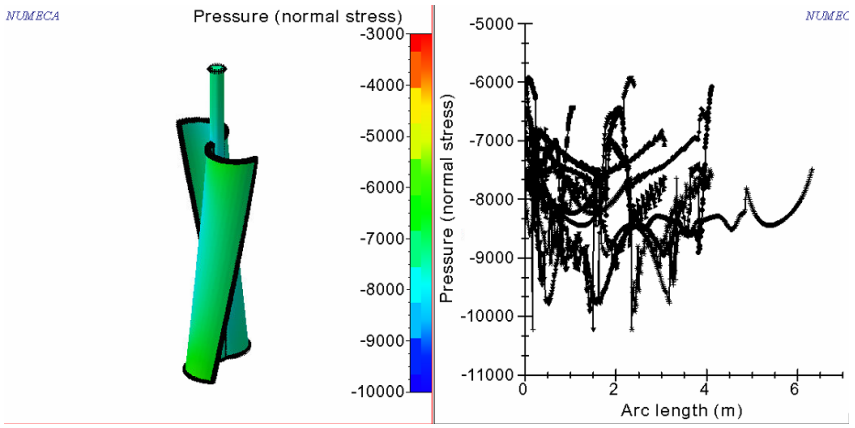


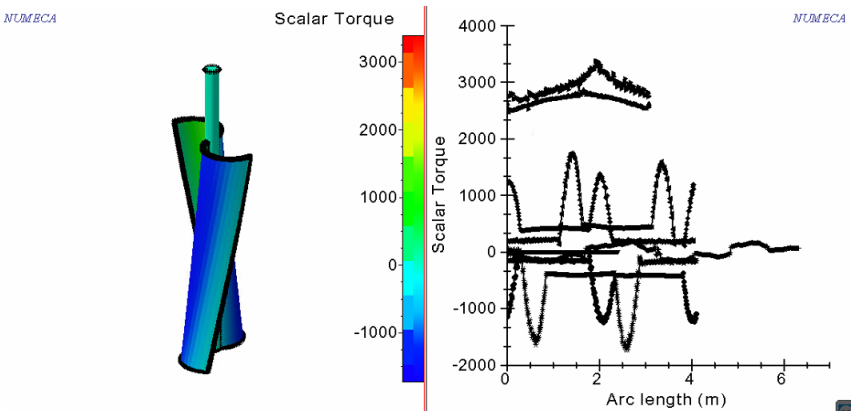

NUMECA
Pressure (normal stress)
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000

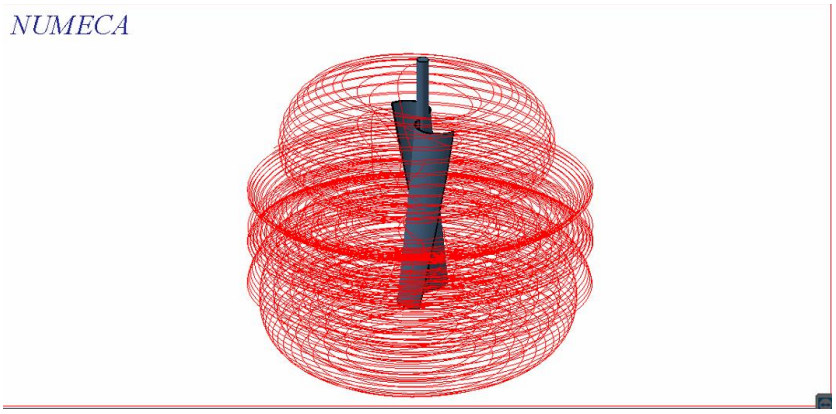

NUMECA
Pressure (normal stress)
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000

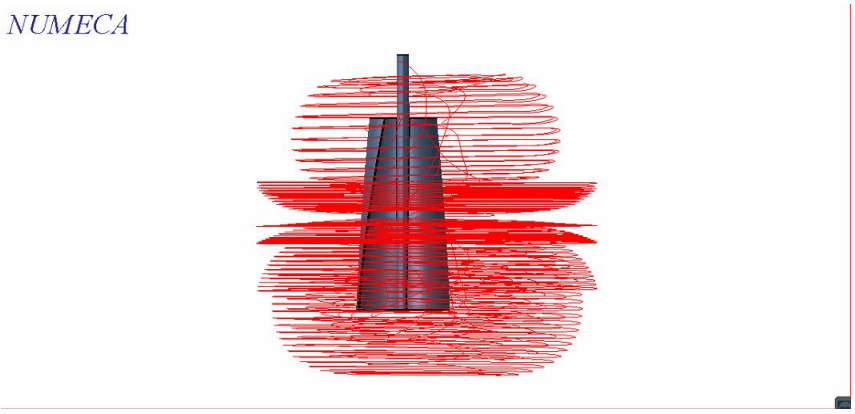

NUMECA
Pressure (normal stress)
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000

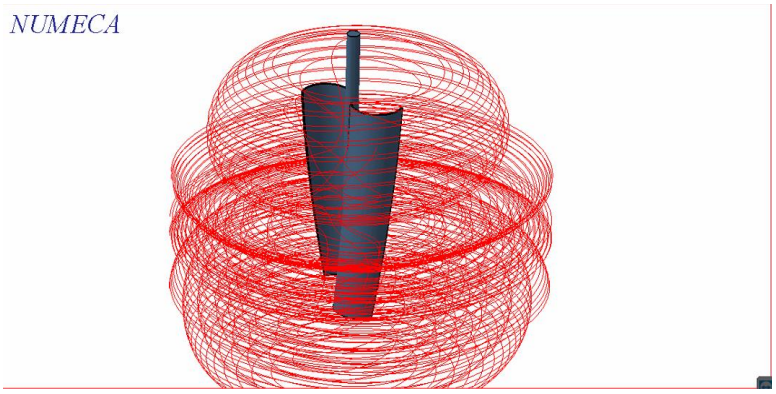

NUMECA
Pressure (normal stress)
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000

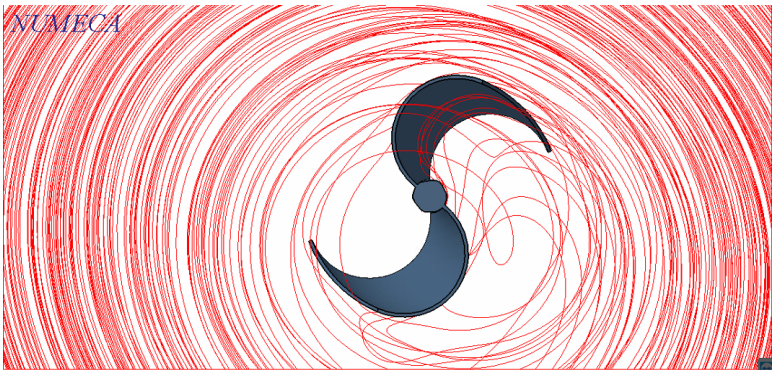

NUMECA
Pressure (normal stress)
-3000
-4000
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000
Pressure (normal stress)
-5000
-6000
-7000
-8000
-9000
-10000
-11000
0
2
4
6
Arc length (m)

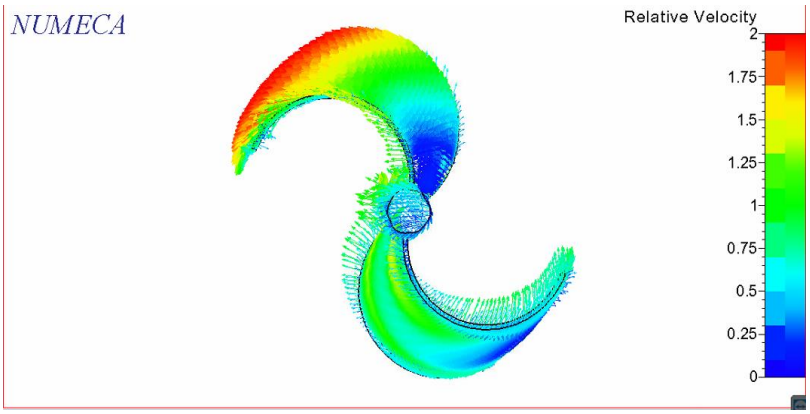

NUMECA
Scalar Torque
3000
2000
1000
0
-1000
Scalar Torque
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
0
2
4
6
Arc length (m)

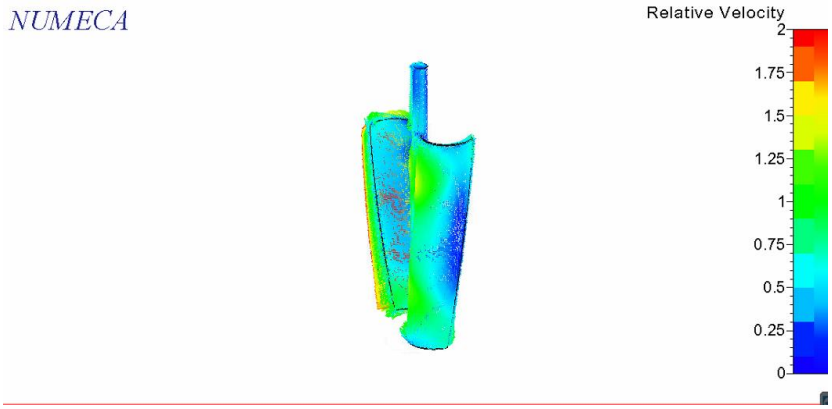

NUMECA


NUMECA

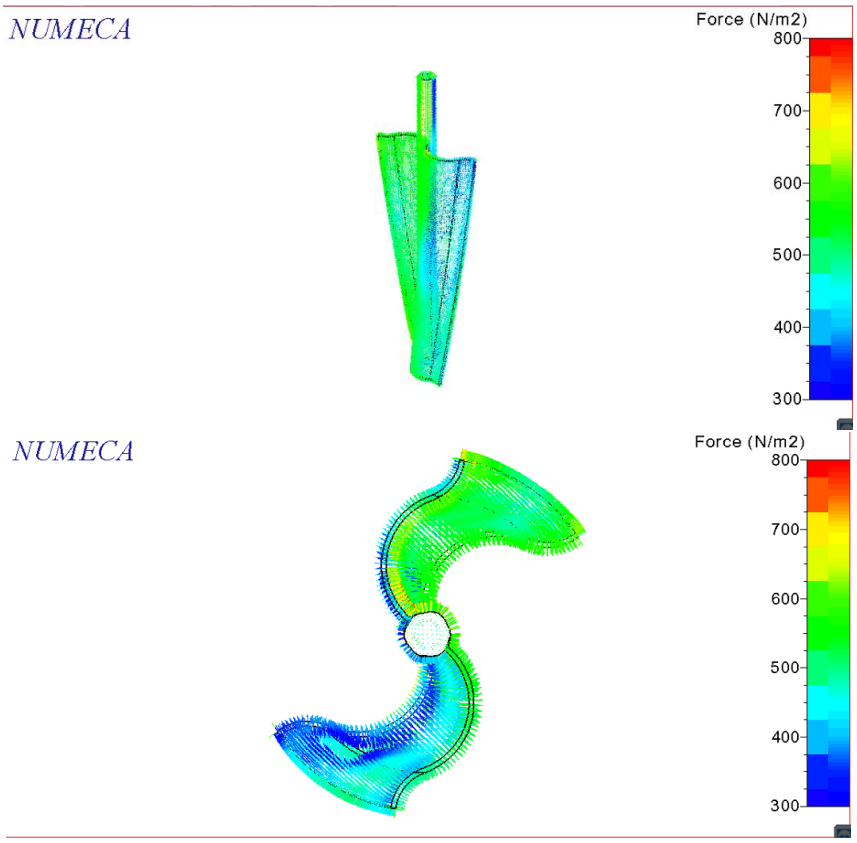

NUMECA

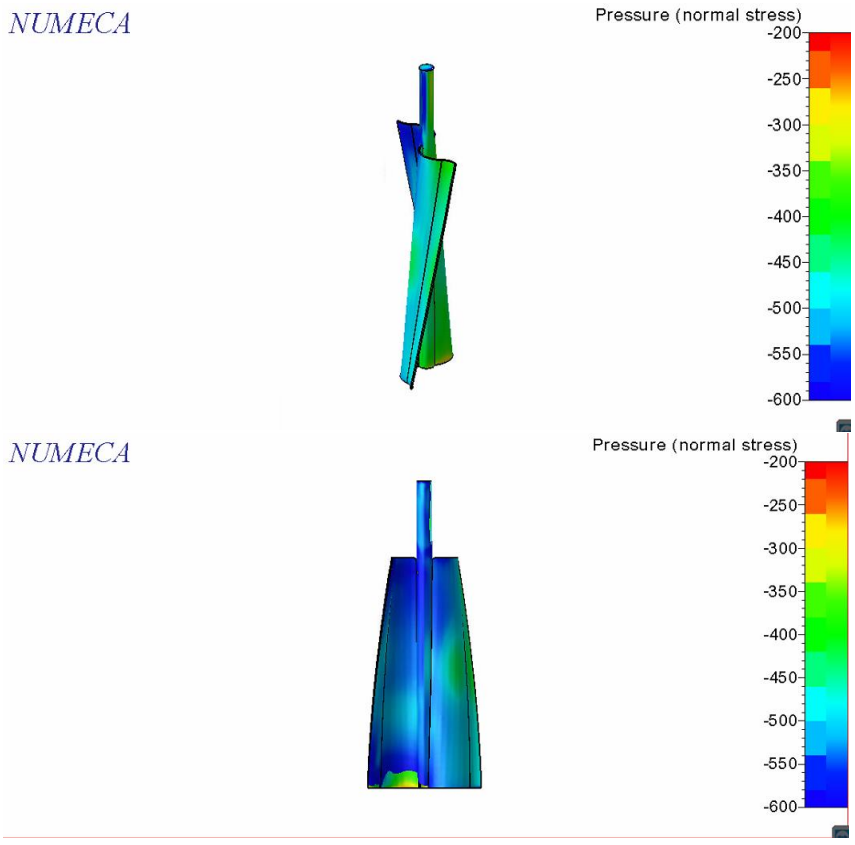

NUMECA

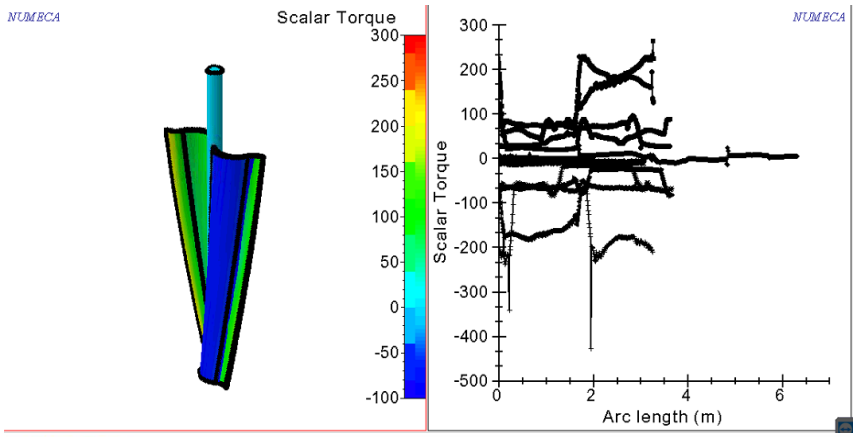

NUMECA
Relative Velocity
2
1.75
1.5
1.25
1
0.75
0.5
0.25
0

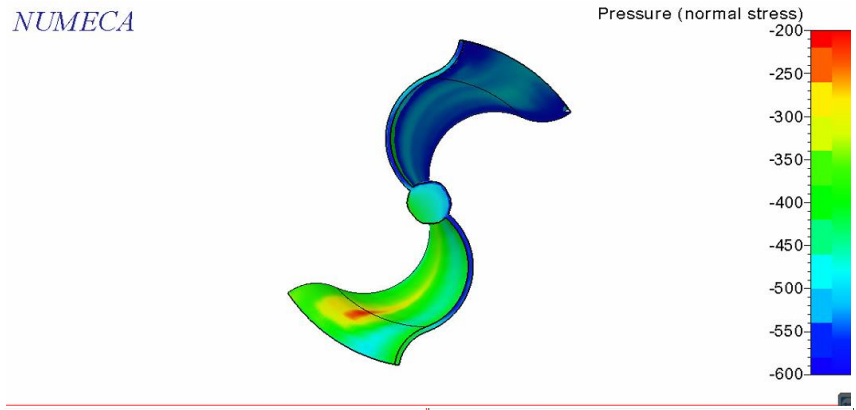

NUMECA
Relative Velocity
2
1.75
1.5
1.25
1
0.75
0.5
0.25
0

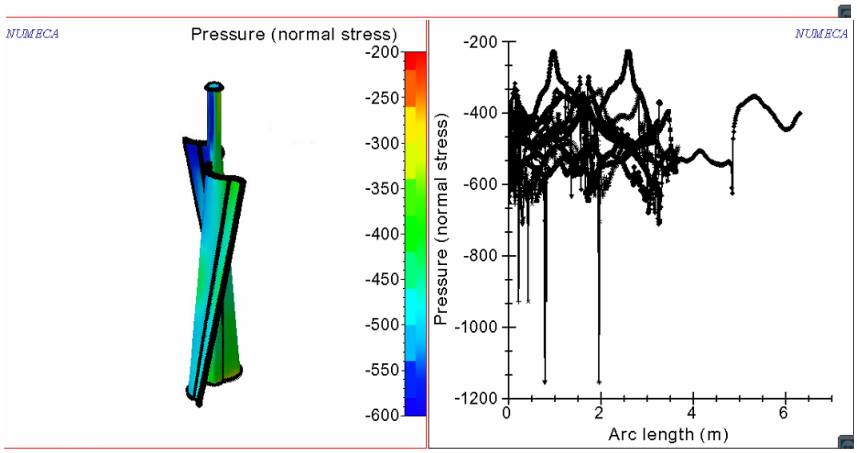
B.3 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 5^0

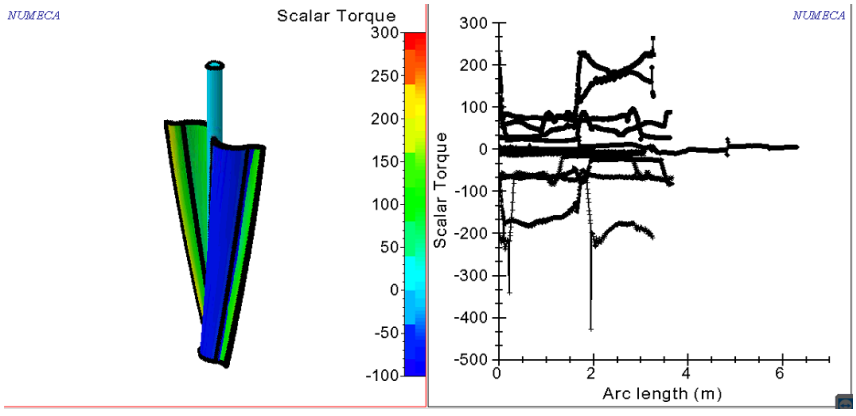




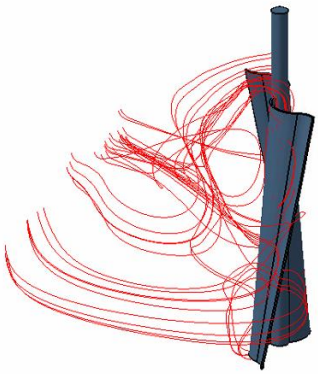

NUMECA
Scalar Torque
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
NUMECA
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
Scalar Torque
0
2
4
6
Arc length (m)


NUMECA
Pressure (normal stress)
-200
-250
-300
-350
-400
-450
-500
-550
-600

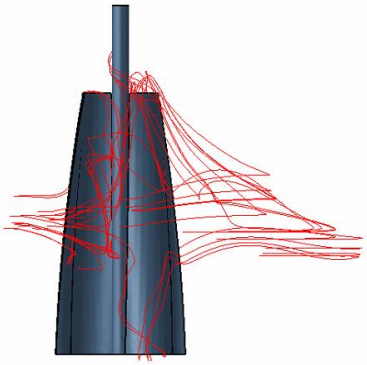

NUMECA
Pressure (normal stress)
-200
-250
-300
-350
-400
-450
-500
-550
-600
NUMECA
-200
-400
-600
-800
-1000
-1200
Pressure (normal stress)
0
2
4
6
Arc length (m)


NUMECA
Scalar Torque
300
250
200
150
100
50
0
-50
-100
NUMECA
300
200
100
0
-100
-200
-300
-400
-500
Scalar Torque
0
2
4
6
Arc length (m)

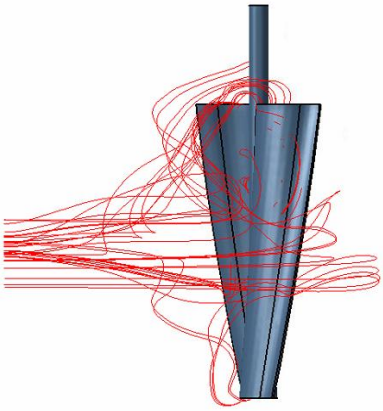
NUMECA



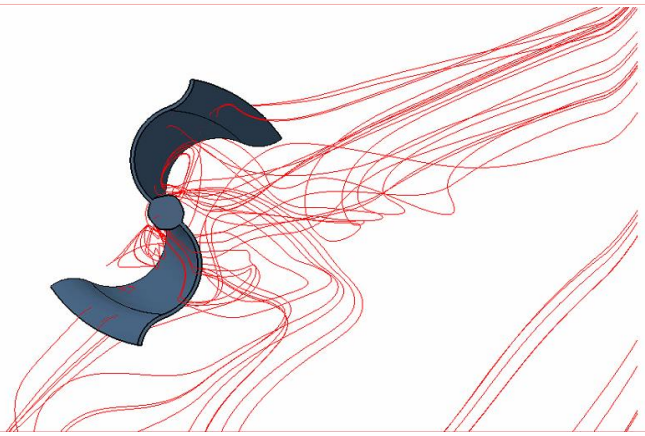
NUMECA

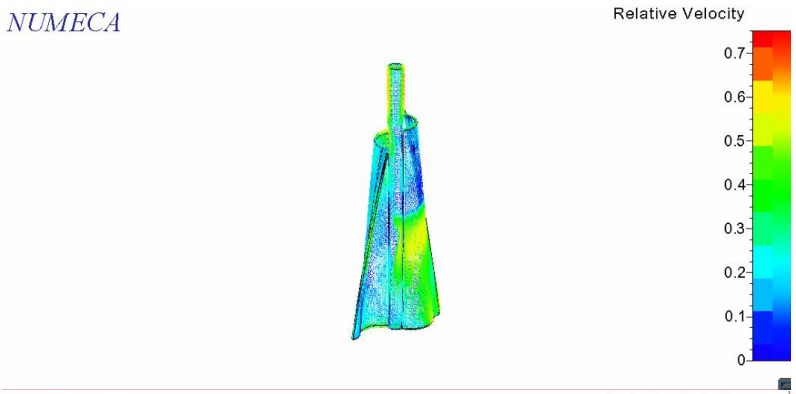


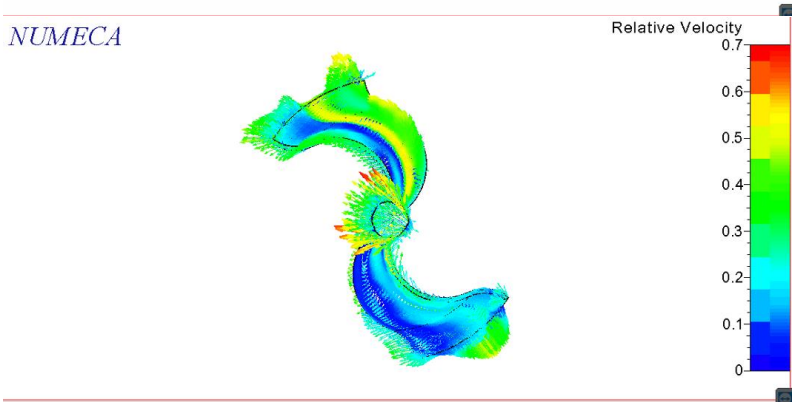
NUMECA

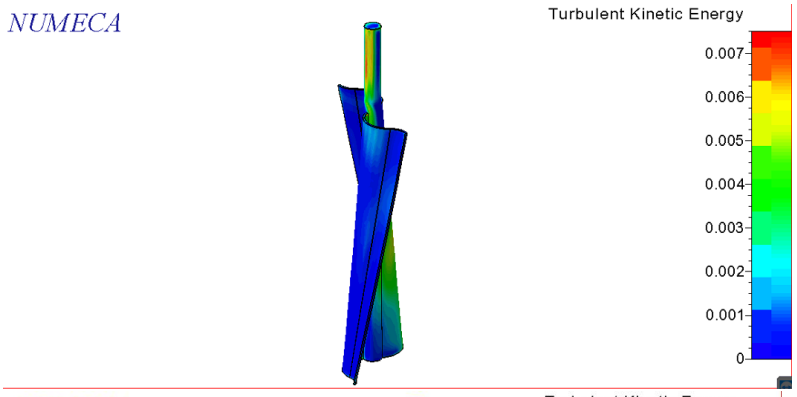


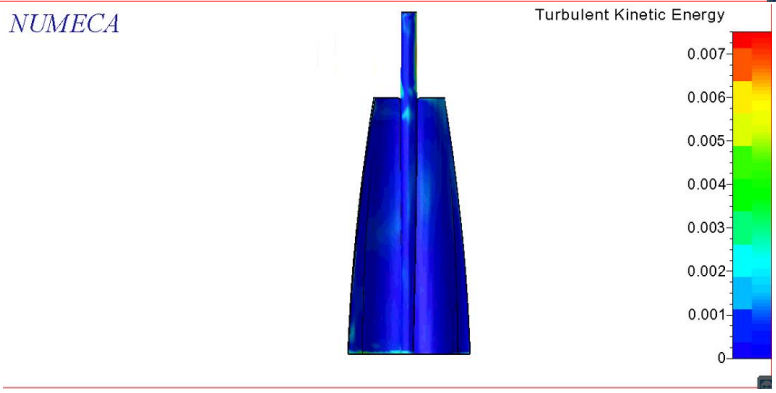
NUMECA

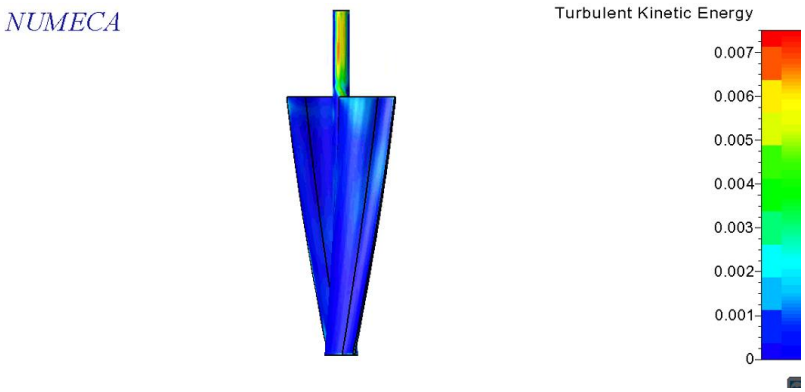


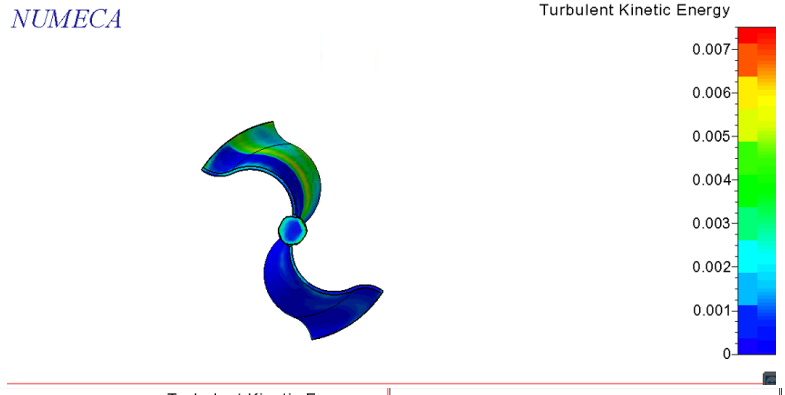

NUMECA
Relative Velocity
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

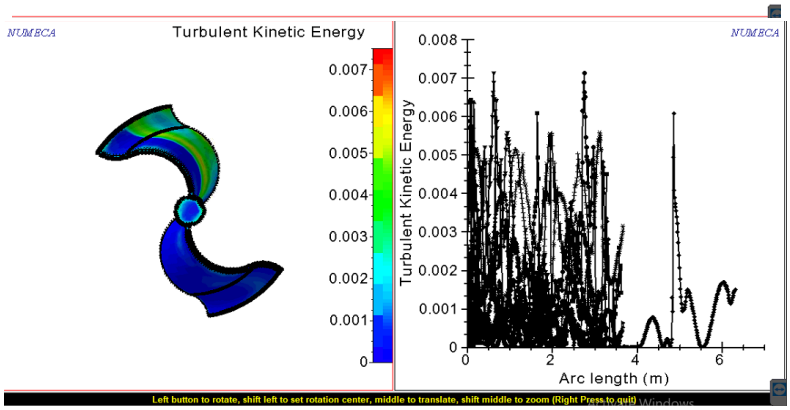

NUMECA
Relative Velocity
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0

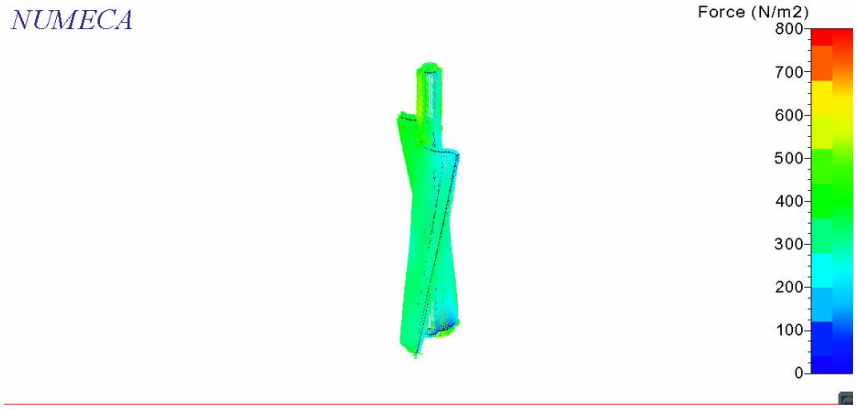

NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0

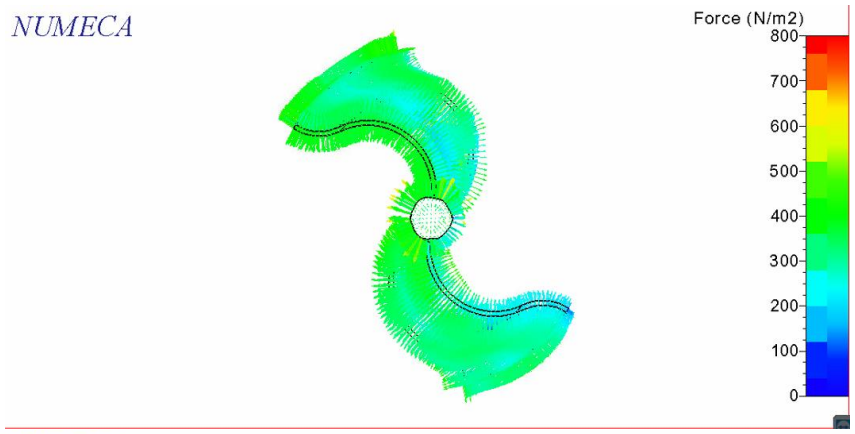


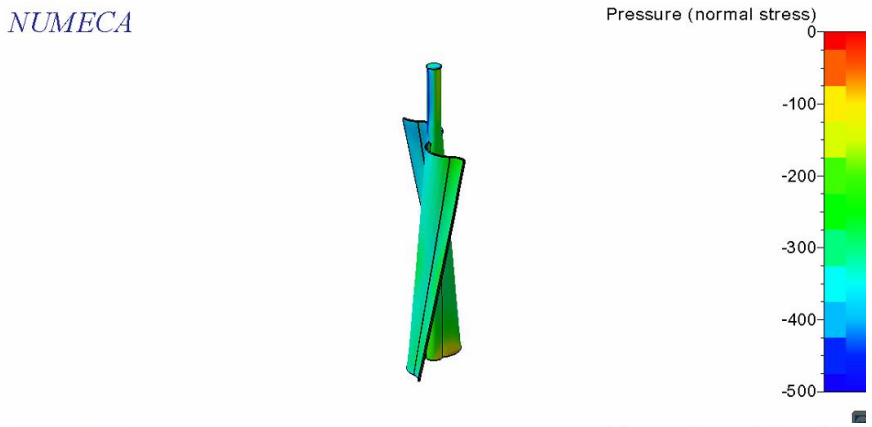


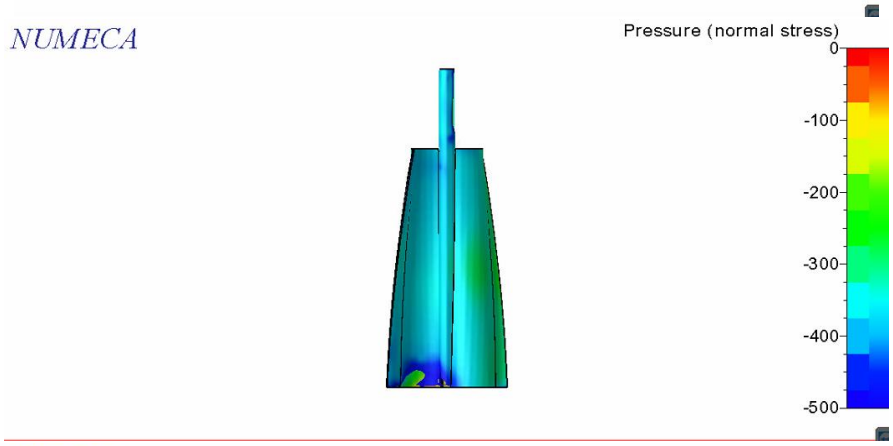


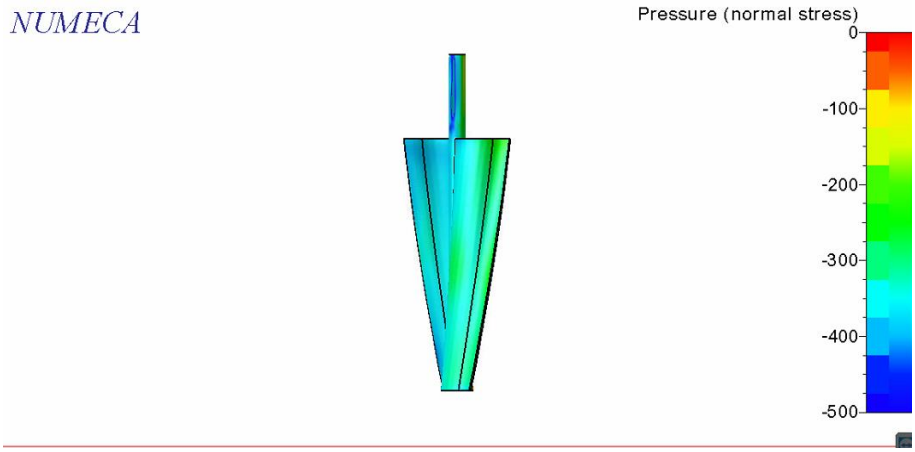
B.4 Tampilan CF View Model Turbin dengan *Tip Rake* 10^0

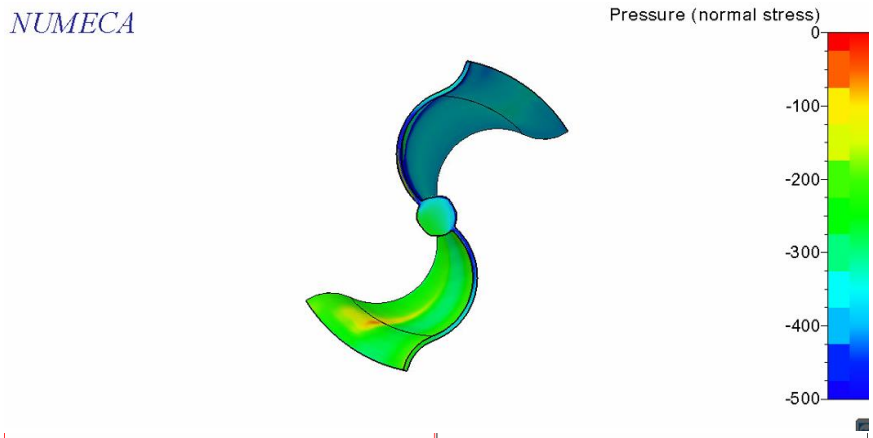


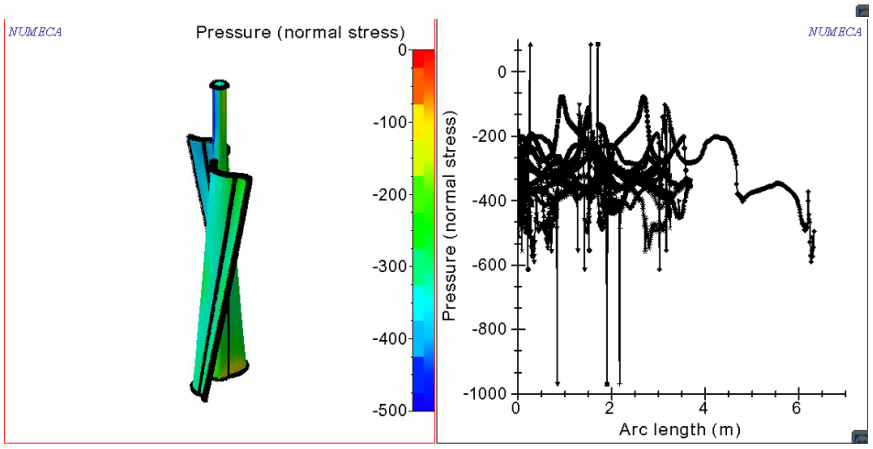

NUMECA
Force (N/m2)
800
700
600
500
400
300
200
100
0

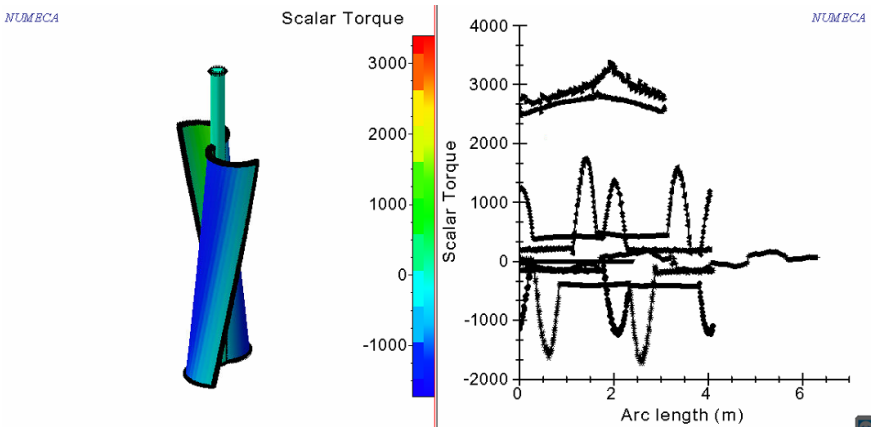

NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-100
-200
-300
-400
-500


NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-100
-200
-300
-400
-500


NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-100
-200
-300
-400
-500

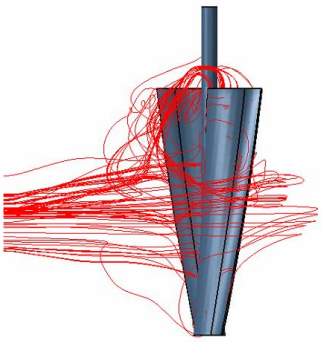

NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-100
-200
-300
-400
-500


NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-100
-200
-300
-400
-500
NUMECA
Pressure (normal stress)
0
-200
-400
-600
-800
-1000
0
2
4
6
Arc length (m)

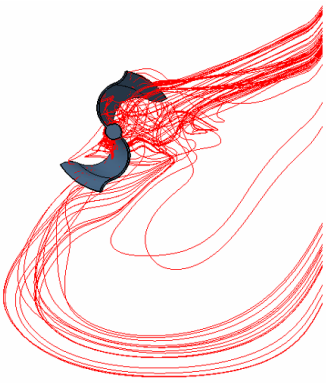

NUMECA
Scalar Torque
3000
2000
1000
0
-1000
NUMECA
Scalar Torque
4000
3000
2000
1000
0
-1000
-2000
0
2
4
6
Arc length (m)

NUMECA

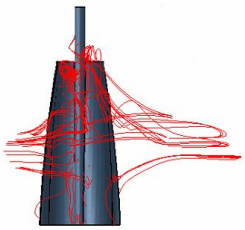
NUMECA

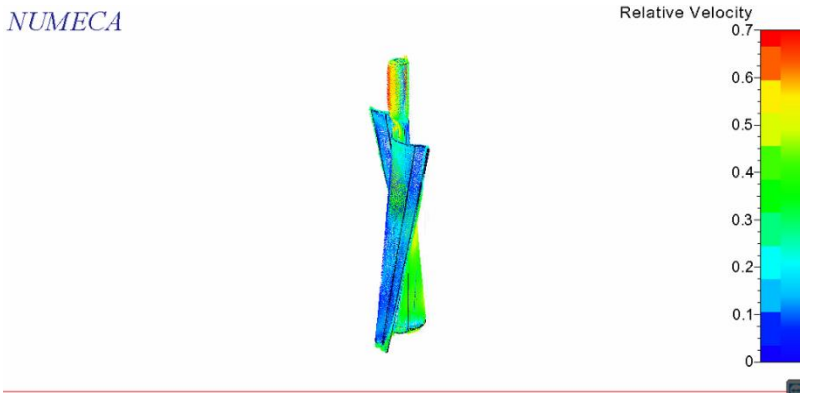


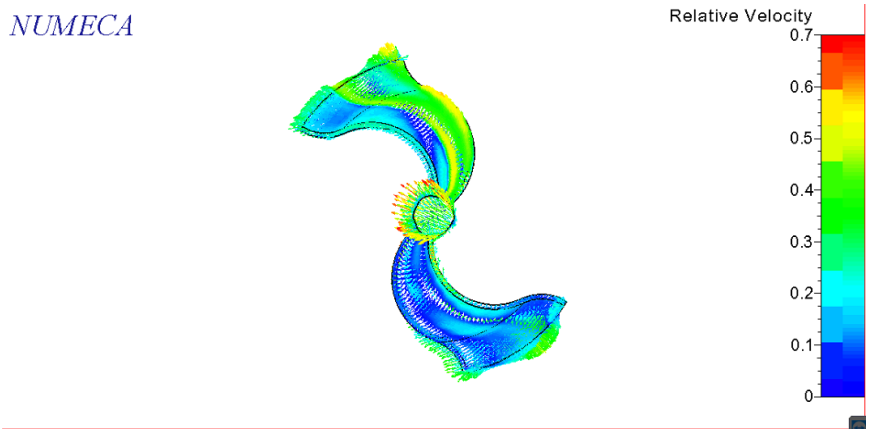
NUMECA

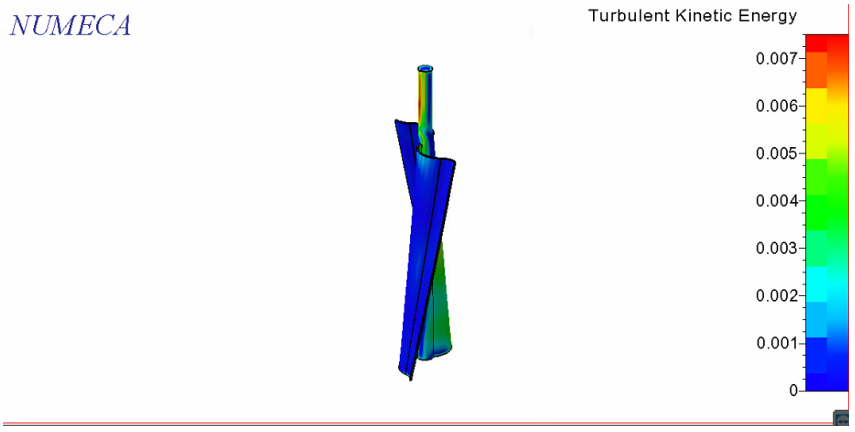


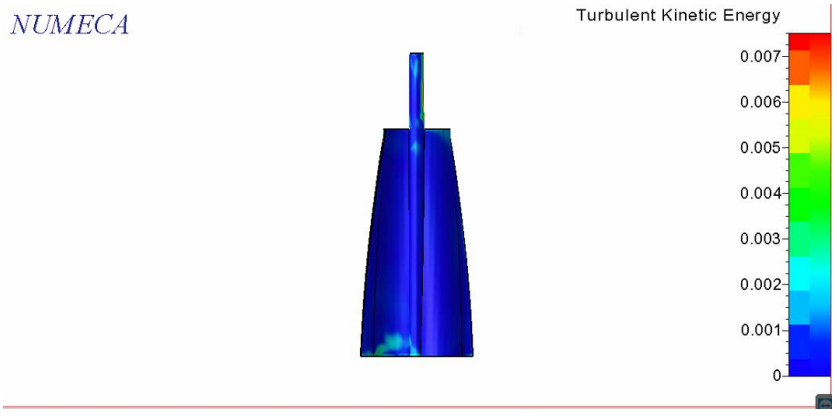
NUMECA

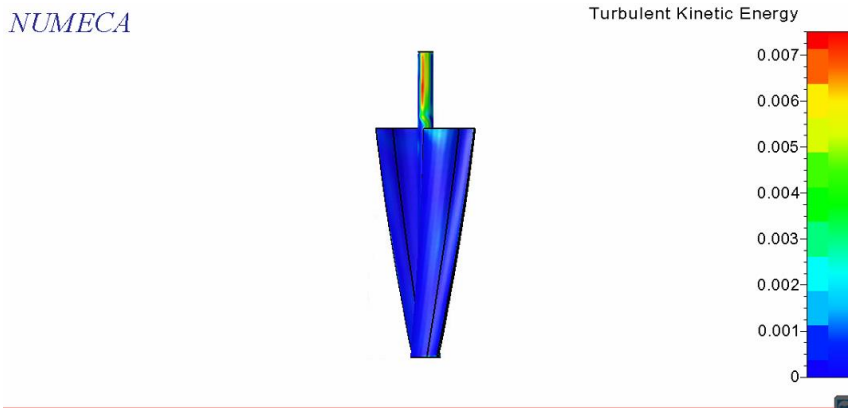


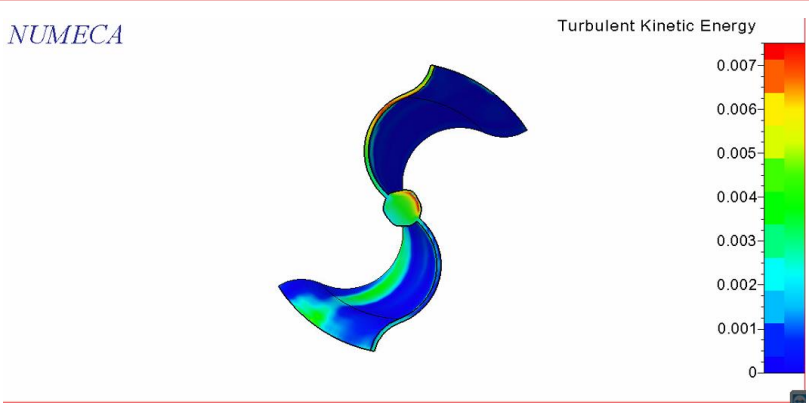

NUMECA
Relative Velocity
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

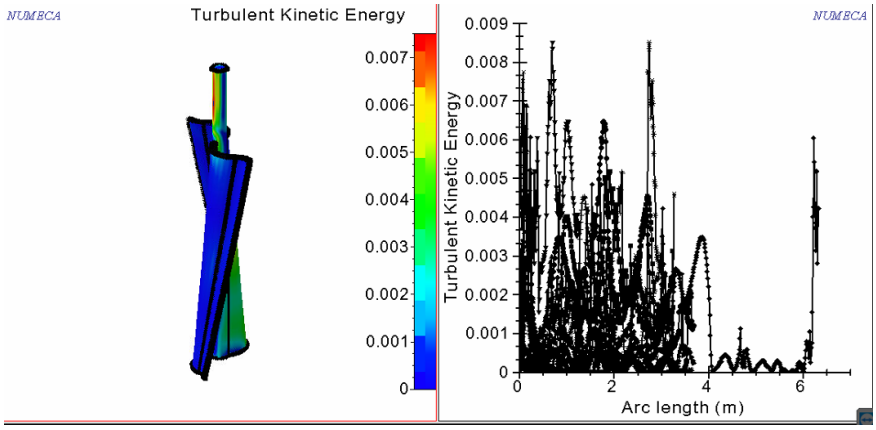

NUMECA
Relative Velocity
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0


NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
NUMECA
Turbulent Kinetic Energy
0.009
0.008
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
0
2
4
6
Arc length (m)

BIODATA PENULIS

Penulis bernama Muhammad Taufiq Fathurrahman, yang merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Bertempat lahir di Jakarta pada tanggal 16 Mei 1998. Penulis menempuh pendidikan taman kanak-kanak di TK Islam Tunas Mekar, Jakarta Timur dan melanjutkan pendidikan sekolah dasar dan menamatkannya di SD Negeri 02 Pagi Jakarta Timur. Kemudian, penulis melanjutkan di SMP Negeri 27 JAKARTA SSN dan lulus pada tahun 2013, dan kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 12 JAKARTA dan 2016. Pada tahun 2016 penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dan mengambil bidang laboratorium *Marine Manufacturing and Design*. Selama berkuliah, penulis telah dua kali melakukan kerja praktek, yaitu yang pertama di PT Daya Radar Utama Shipyard, dan yang kedua di PT. Pertamina Drilling Service Indonesia. Selain itu, penulis juga aktif dalam bidang akademik, organisasi dan kegiatan mahasiswa. Penulis tergabung dalam komunitas keilmiahan Himasiskal FTK-ITS sebagai staff dan lanjut menjadi Kepala Departemen Inovasi Karya. Penulis juga diberi amanah untuk menjadi staff. Lomba Karya Tulis Ilmiah Nasional yang diselenggarakan oleh Marine Icon 2019. Kegiatan lain yang penulis lakukan agar tidak jenuh kuliah adalah aktif dalam berbagai macam perlombaan karya tulis ilmiah baik tingkat nasional maupun Internasional, tercatat penulis pernah menjuarai sebanyak 11 kali Lomba Karya Tulis Ilmiah Nasional dan mendapatkan 2 International Gold Award dibidang energi terbarukan pada event 2nd World Invetion Technology Expo, Jakarta dan 12th Edition of Euroinvent, Romania. Selain itu penulis merupakan Top 5 Mawaper ITS tahun 2019. Prestasi yang penulis torehkan dipersembahkan untuk kedua orang tua penulis dan dedikasi terhadap Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Bangsa, dan Negara. Penulis menyukai energi terbarukan, 3D *modeling, marine engineering,* dan otomoif. Apabila ingin menghubungi penulis, bisa ke nomor 087878474481.