

TUGAS AKHIR - TM184835

STUDI NUMERIK PENGARUH *DEPTH TO DIAMETER RATIO* TERHADAP *WAKE RECOVERY* PADA *CROSS-FLOW HYDROKINETIK TURBINE* DENGAN PEMANDU ARAH ALIRAN

ADITYA ARIEF RAHMAN PUTRA

NRP 0211184000051

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

NIP 196412281990031002

Program Studi Sarjana Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

**STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO KEDALAMAN
TERHADAP DIAMETER TERHADAP *WAKE RECOVERY*
DAN PERFORMA PADA *CROSS-FLOW HYDROKINETIC*
TURBINE DENGAN DEFLEKTOR**

“Studi Kasus Jarak Poros Turbin ke Dasar Aliran $H/D = 0,6$ ”

ADITYA ARIEF RAHMAN PUTRA

NRP 02111840000051

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

NIP 196412281990031002

Program Studi S1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF DEPTH TO
DIAMETER RATIO ON WAKE RECOVERY AND
PERFORMANCE ON CROSS-FLOW HYDROKINETIC
TURBINE WITH DEFLECTOR**

“Study Case The Distance of The Turbine Axis to Bed Surface $H/D = 0,6$ ”

ADITYA ARIEF RAHMAN PUTRA

NRP 02111840000051

Supervisor

Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

NIP 196412281990031002

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO KEDALAMAN TERHADAP DIAMETER TERHADAP *WAKE RECOVERY* DAN PERFORMA PADA *CROSS-FLOW HYDROKINETIC TURBINE* DENGAN DEFLEKTOR

“Studi Kasus Jarak Poros Turbin ke Dasar Aliran $H/D = 0,6$ ”

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : ADITYA ARIEF RAHMAN PUTRA

NRP. 0211184000051

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

Pembimbing

2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.

Penguji

3. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D.

Penguji

4. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.

Penguji



SURABAYA

2022

APPROVAL SHEET

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF DEPTH TO DIAMETER RATIO ON WAKE RECOVERY AND PERFORMANCE ON CROSS-FLOW HYDROKINETIC TURBINE WITH DEFLECTOR

“Study Case The Distance of The Turbine Axis to Bed Surface $H/D = 0,6$ ”

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the conditions
obtained a Bachelor's degree in Engineering on
Bachelor of Mechanical Engineering
Study Program Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : **ADITYA ARIEF RAHMAN PUTRA**

NRP. 02111840000051

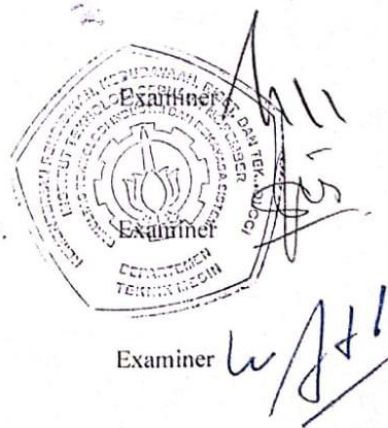
Approved by the Final Project Examiner Team:

1. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA.
3. Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D.
4. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT.

Supervisor



Examiner



SURABAYA

2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa/NRP : Aditya Arief Rahman Putra/0211184000051

Departemen : Teknik Mesin

Dosen Pembimbing/NIP : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D./196412281990031002

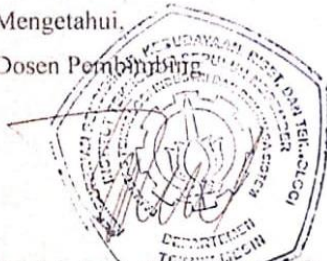
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Numerik Pengaruh Rasio Kedalaman Terhadap Diameter Terhadap *Wake Recovery* dan Performa Pada *Cross-Flow Hydrokinetik Turbine* Dengan Deflektor Studi Kasus Jarak Poros Turbin ke Dasar Aliran $H/D = 0,6$ ” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 25 Juli 2022

Mengetahui,

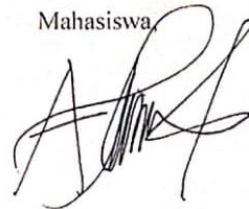
Dosen Pembimbing



Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.

NIP. 196412281990031002

Mahasiswa



Aditya Arief Rahman P.

NRP. 0211184000051

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

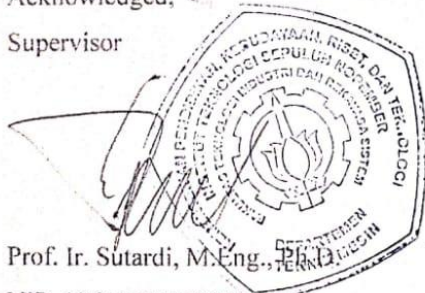
The undersigned below:

Name of Student /NRP : Aditya Arief Rahman Putra/02111840000051
Department : Mechanical Engineer
Supervisor/NIP : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D./196412281990031002

hereby declare that the Final Project with the title of “Numerical Study of The Effect of Depth to Diameter Ratio on Wake Recovery and Performance on Cross-Flow Hydrokinetik Turbine with Deflector Study Case The Distance of The Turbine Axis to Bed Surface $H/D = 0,6$ ” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Acknowledged,
Supervisor



Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
NIP. 196412281990031002

Surabaya, July 25 2022

Student,

Aditya Arief Rahman P.
NRP. 02111840000051

STUDI NUMERIK PENGARUH RASIO KEDALAMAN TERHADAP DIAMETER TERHADAP WAKE RECOVERY DAN PERFORMA PADA CROSS-FLOW HYDROKINETIC TURBINE DENGAN DEFLEKTOR

“Studi Kasus Jarak Poros Turbin ke Dasar Aliran $H/D = 0,6$ ”

Nama Mahasiswa / NRP : Aditya Arief Rahman Putra / 0211184000051
Departemen : Departemen Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

In-stream hydrokinetic turbine menjadi salah satu alternatif dari pembangkit listrik yang ramah lingkungan daripada pembangkit listrik berbahan bakar fosil. *In-stream hydrokinetic turbine* memiliki potensi menghasilkan energi bersih dari aliran sungai dan pasang surut air laut. Salah satu jenis *in-stream hydrokinetic turbine* yang mudah dibuat, mudah diterapkan, dan membutuhkan biaya yang tidak mahal dalam pembuatannya adalah *cross-flow hydrokinetik turbine*. Berbeda dengan turbin angin, turbin air memiliki batasan dalam hal kedalaman aliran yang mempengaruhi turbin air dalam mengekstrak energi. Oleh karena itu, membuat turbin dalam gugusan (*array*) menjadi sebuah solusi untuk mengoptimalkan kinerja turbin dalam mengekstrak energi dari sebuah aliran baik arus laut maupun sebuah saluran. Namun, untuk membuat gugusan turbin, diperlukan penelitian lebih lanjut tentang perbandingan diameter turbin yang sesuai dengan kedalaman aliran (*depth to diameter ratio*) untuk mengoptimalkan performansi turbin. Selain itu, *depth to diameter ratio* juga dapat mempengaruhi karakteristik aliran di daerah *downstream* terutama dalam hal pemulihan *wake* dimana *wake recovery* menjadi hal penting bagi *downstream* turbin dalam hal ketersediaan energi pada aliran.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode numerik. Model *cross-flow hydrokinetik turbine* yang digunakan berdiameter 100 mm dengan *deflector* yang memiliki sudut kemiringan 60° . Model fluida yang digunakan multifasa yang terdiri dari fluida air dan udara. Nilai *depth to diameter ratio* yang digunakan untuk dilakukan pengamatan adalah 1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5, serta kecepatan *inlet* air yang digunakan 0,8 m/s dan 1,2 m/s.

Nilai yang akan dievaluasi adalah kecepatan aliran pada daerah *upstream* dan *downstream* pada beberapa daerah yang ditentukan, serta nilai koefisien momen dan daya dari turbin. Selain itu, kontur kecepatan dan *volume fraction* juga akan diamati untuk mengetahui fenomena aliran yang terjadi di daerah *downstream* turbin.

Hasil yang didapatkan pada penelitian ini yaitu ketika nilai *depth to diameter ratio* semakin meningkat maka pemulihan *wake* cenderung terjadi pada jarak yang semakin jauh. Timbulnya fenomena penurunan level permukaan air dan membuat kecepatan aliran meningkat saat aliran mulai memasuki daerah *downstream* yang terjadi pada nilai *depth to diameter ratio* rendah membuat *wake* dapat dipulihkan lebih cepat. ketika nilai *depth to diameter ratio* semakin meningkat juga meningkatkan nilai koefisien daya turbin sampai mencapai titik maksimumnya, yang kemudian nilai koefisien daya turbin akan menurun seiring meningkatnya nilai *depth to diameter ratio*. Pada nilai *depth to diameter ratio* tetap, aliran dengan kecepatan *inlet* 1,2 m/s memiliki koefisien daya yang lebih besar dan pemulihan *wake* terjadi lebih jauh dibandingkan aliran dengan kecepatan *inlet* 0,8 m/s.

Kata kunci : *in-stream hydrokinetic turbine, depth to diameter ratio, cross-flow hydrokinetik turbine*

NUMERICAL STUDY OF THE EFFECT OF DEPTH TO DIAMETER RATIO ON WAKE RECOVERY AND PERFORMANCE IN CROSS-FLOW HYDROKINETIC TURBINE WITH DEFLECTOR

“Study Case The Distance Turbine Axis to Bed Surface $H/D = 0,6$ ”

Student Name / NRP : Aditya Arief Rahman Putra
Department : Mechanical Engineering Department
Advisor : Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

In-stream hydrokinetic turbine is an alternative to environmentally friendly power plants rather than fossil fuel power plants. In-stream hydrokinetic turbine has the potential to produce clean energy from river flow and tides. One type of in-stream hydrokinetic turbine that is easy to manufacture, easy to implement, and requires a low cost to manufacture is the *cross-flow hydrokinetik turbine*. In contrast to wind turbines, water turbines have limitations in terms of depth of flow that affect the water turbine in extracting energy. Therefore, making turbines in arrays is a solution to optimize turbine performance in extracting energy from a flow, both ocean currents and a channel. However, to make a turbine cluster, further research is needed on the ratio of the turbine diameter according to the depth to diameter ratio to optimize turbine performance. In addition, the depth to diameter ratio can also affect the flow characteristics in the downstream area, especially in terms of wake recovery where wake recovery is important for downstream turbines in terms of energy availability in the flow.

The method used in this study is a numerical method. The *cross-flow hydrokinetik turbine* model used is 100 mm in diameter with a deflector that has a tilt angle of 60° . The fluid model used is multiphase which consists of water and air fluids. The depth to diameter ratio values used for observations were 1.2, 1.5, 2.25, 3, and 5 and the water inlet velocity used was 0.8 m/s and 1.2 m/s.

The values to be evaluated are the flow velocity in the upstream and downstream in some specified areas, as well as the value of the coefficient of moment and coefficient of power of the turbine. In addition, velocity contours and volume fraction will also be observed to determine the flow phenomena that occur in the downstream turbine area.

The results obtained in this study are that when the depth to diameter ratio increases, the wake recovery tends to occur at longer distances. The emergence of the phenomenon of decreasing the air surface level and making the flow velocity increase when the flow begins to enter the downstream area which occurs at a low depth to diameter ratio value makes wake recover faster. When the value of the depth to diameter ratio increases, it also increases the value of the turbine power coefficient until it reaches its maximum point, then the value of the turbine power coefficient will decrease along with the value of the depth to diameter ratio. At a fixed depth to diameter ratio, the flow with an inlet velocity of 1.2 m/s has a higher power coefficient and the wake recovery occurs further than the flow with an inlet velocity of 0.8 m/s.

Keywords: in-stream hydrokinetic turbine, depth to diameter ratio, cross-flow hydrokinetik turbine

KATA PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis mendapat banyak bantuan, dorongan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ibu Dyah Mila Sari dan Bapak Ya'Kub Ahmadi yang selalu memberikan doa dan dukungannya kepada penulis.
2. Kakak penulis, Dini Ayu Puspita Sari dan Dimas Ragil Yudha Satria yang selalu mendukung penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D. sebagai dosen pembimbing penulis yang telah memberikan waktu, ilmu, dan banyak masukan kepada penulis.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Tri Yogi Yuwono, DEA., Ibu Vivien Suphandani Djanali, S.T., M.Eng., Ph.D., dan Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., MT., sebagai dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan banyak kritik dan saran bagi penulis.
5. Bapak M. Khoirul Effendi, S.T., M.Sc. Eng., Ph.D. sebagai dosen wali penulis selama perkuliahan.
6. Teman Penulis, Dimas Anantama Fatjrin, Diah Ayu Sekarrini, Andhika Mandala, dan Farich yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman lab Mekanika Fluida dan Mesin-Mesin Fluida, ITS Team Sapuangin, dan VI-Rose yang sudah banyak memberi dukungan dan pengalaman yang berharga.
8. Teman-teman Kopakopi dan Tiara Novita Aisyah Putri yang sudah banyak menyempatkan waktunya untuk *healing*.
9. Seluruh civitas akademika Teknik Mesin FTIRS-ITS.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini memiliki banyak kekurangan dan penulis siap menerima kritik dan saran dari pembaca. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan berkontribusi dalam perkembangan IPTEK di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS.

Penulis

Surabaya, 27 Juli 2022

Daftar Isi

LEMBAR PENGESAHAN	ii
APPROVAL SHEET.....	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
Daftar Isi.....	x
Daftar Gambar	xiii
Daftar Tabel.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
BAB II STUDI PUSTAKA.....	5
2.1 Energi Hidrokinetik	5
2.2 Turbin Hidrokinetik	7
2.3 Turbin Savonius	8
2.4 <i>Deflector</i>	10
2.5 Aerodinamika Wake	11
2.6 Turbulensi	12
2.7 Bendung Berpuncak Lebar	13
2.8 Aliran di Saluran Terbuka.....	14
2.9 <i>Hydraulic Jump</i>	15
2.10 <i>Diameter to Depth Ratio</i>	15
2.11 Array Turbin.....	16
2.12 Penelitian Terdahulu	17

2.12.1	Perbandingan Performansi Turbin Arus Laut Sumbu Horizontal dengan Mempertimbangkan <i>Deflector</i> dan Kedalaman Operasi Turbin (Nauman <i>et al.</i> , 2020).	17
2.12.2	Efek dari Varisai Kedalaman Aliran pada Pemulihan Wake Dibelakang Turbin Hidrokinetik dengan Sumbu Horizontal (Payam & Corey, 2018)	19
2.12.3	Studi Eksperimen Efek Hidrodinamika dari Rasio Perbandingan Diameter Rotor Terhadap Kedalaman Air (Yaling <i>et al.</i> , 2019)	21
2.12.4	Kesimpulan	22
BAB III METODE PENELITIAN		24
3.1	Tahap Pre-Processing	24
3.1.1	Variabel Penelitian	24
3.1.2	Pemodelan Geometri dan Domain Simulasi	25
3.1.3	Proses Meshing	27
3.1.4	Boundary Conditions	28
3.2	<i>Solver / Tahap Processing</i>	29
3.2.1	Menentukan Kondisi Fisis dan Properti Fluida di Setiap Domain	29
3.2.2	Menentukan Model dan Input Nilai Kondisi Batas	30
3.2.3	Solver	33
3.3	Tahap <i>Post-Processing</i>	34
3.3.1	Grid Independency Test	34
3.3.2	Data yang Akan Diperoleh	35
3.4	Diagram Alir Penelitian	36
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		38
4.1	Komparasi Hasil Simulasi dengan Hasil Simulasi Dandun <i>et al</i> (2020)	38
4.2	Analisa <i>Coefficient of Moment</i> dan <i>Coefficient of Power</i> pada Berbagai Kondisi yang Diamati	39
4.2.1	<i>Coefficient of Moment (CM)</i> dan <i>Coefficient of Power (CP)</i>	39
4.2.2	Analisa <i>Trend</i> Nilai <i>Coefficient of Power</i> Berdasarkan Kontur Kecepatan di Sekitar Turbin	41

4.3	Analisa Pemulihan <i>Wake</i> pada Berbagai Kondisi yang Diamati	42
4.3.1	Analisa Profil Kecepatan di Daerah <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i>	42
4.3.2	Pemulihan <i>Wake</i>	45
4.3.3	Analisa Fenomena Aliran Berdasarkan Kontur Fraksi Volume Air dan Kontur Kecepatan	48
4.4	Diskusi	52
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	56
5.1	Kesimpulan	56
5.2	Saran	56
	Daftar Pustaka	57
	LAMPIRAN	59
	Lampiran 1. Kontur Fraksi Volume Air dan Kontur Kecepatan	59
	Lampiran 2. Profil Kecepatan Daerah <i>Upstream</i> dan <i>Downstream</i>	66
	BIODATA PENULIS	76

Daftar Gambar

Gambar 2.1 Konfigurasi hidrokinetik.....	6
Gambar 2.2 Kurva daya yang dihasilkan pada beberapa jenis turbin berdasarkan <i>tip-speed ratio</i> (TSR)	8
Gambar 2.3 Ilustrasi prinsip kerja Turbin Savonius.....	8
Gambar 2.4 Parameter geometri turbin Savonius.....	9
Gambar 2.5 Bentuk modifikasi parameter turbin Savonius (a) jumlah <i>stage</i> (b) bentuk <i>blade</i> (c) jumlah <i>blade</i> (d) penambahan pemandu aliran.....	10
Gambar 2.6 Skema turbin Savonius menggunakan <i>deflector</i>	11
Gambar 2.7 Proses percampuran turbulensi pada pembentukan <i>wake</i> di daerah <i>downstream</i>	12
Gambar 2.8 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi di aliran kanal terbuka	13
Gambar 2.9 Ilustrasi terjadinya Hydraulic jump	15
Gambar 2.10 Model turbin yang digunakan.....	18
Gambar 2.11 Konfigurasi tiga kasus yang dipelajari; (a) turbin tanpa <i>deflector</i> yang diletakkan pada bagian tengah; (b) turbin dengan <i>deflector</i> yang diletakkan pada bagian tengah; dan (c) turbin dengan <i>deflector</i> yang diletakkan pada bagian dasar (<i>bed</i>)	18
Gambar 2.12 Hasil yang didapatkan dari hasil studi (a) grafik TSR vs <i>coefficient of torque</i> dan (b) grafik TSR vs <i>coefficient of power</i> dari tiga kasus yang berbeda	19
Gambar 2.13 Profil kecepatan rata-rata dari <i>wake</i> pada beberapa lokasi di daerah <i>downstream</i> turbin.....	20
Gambar 2.14 Profil <i>velocity deficit</i> di sembilan lokasi <i>downstream</i> turbin	21
Gambar 2.15 Struktur <i>velocity deficit</i> pada penampang melintang (a) $D/H = 47.62\%$ dan (b) $D/H = 71.43\%$ sepanjang daerah <i>downstream</i> rentang 1-10D	22
Gambar 3.1 Model turbin <i>cross-flow hydrokinetic</i> dengan beberapa parameter.....	25
Gambar 3.2 <i>Stationary domain</i> udara dan air dan <i>Rotary domain</i> atau sub-domain	26
Gambar 3.3 Domain variasi nilai <i>depth to diameter ratio</i> (dD): (a) 1.2, (b) 1.5, (c) 2.25, (d) 3, (e) 5.....	27
Gambar 3.4 <i>Meshing</i> pada (a) keseluruhan domain, (b) di daerah sekitar silinder	28
Gambar 3.5 <i>Boundary condition</i> yang ditetapkan	29
Gambar 3.6 Grafik variasi mesh vs kecepatan fluida di $X = 2500$ mm dan $Y = 150$ mm	35

Gambar 3.7 Daerah dalam saluran yang digunakan untuk mengambil data kuantitatif ($X = -10D, X = 1D, X = 3D, X = 5D, X = 7.5D, X = 10D, X = 12.5D, X = 15D, X = 17.5D, X = 20D, X = 22.5D, X = 25D$.).....	35
Gambar 3.8 Diagram alir (flowchart) penelitian	37
Gambar 4.1 Perbandingan nilai <i>coefficient of power</i> vs <i>TSR</i> dari hasil penelitian yang dilakukan dengan hasil simulasi Dandun <i>et al.</i>	38
Gambar 4.2 Grafik (a) <i>coefficient of moment (CM)</i> dan (b) <i>coefficient of power (CP)</i> pada kecepatan <i>inlet</i> 0,8 m/s dan 1,2 m/s.....	40
Gambar 4.3 Kontur kecepatan di sekitar turbin pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan nilai d/D (a) 1,2., (b) 1,5., (c) 2,25., (d) 3, dan (e) 5	42
Gambar 4.4 Profil kecepatan di daerah <i>upstream</i> dan daerah <i>downtream</i> pada kondisi.....	43
Gambar 4.5 Kontur fraksi volume air pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan $d/D = 1,2$	44
Gambar 4.6 Kontur kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan $d/D = 1,2$	44
Gambar 4.7 (a) Profil kecepatan air di daerah <i>upstream</i> dibandingkan dengan daerah <i>downstream</i> dan (b) profil <i>velocity deficit</i>	46
Gambar 4.8 Kontur fraksi volume air pada kondisi $d/D = 1,2$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s	48
Gambar 4.9 Kontur kecepatan pada kondisi $d/D = 1,2$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s.....	49
Gambar 4.10 Kontur fraksi volume air pada kondisi $d/D = 5$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s	50
Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada kondisi $d/D = 5$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s.....	51
Gambar 4.12 Kontur kecepatan di sekitar turbin dari hasil penelitian Priyo <i>et al</i> (2019).....	53
Gambar 4.13 Grafik <i>coefficient of power</i> vs <i>TSR</i> hasil penelitian Priyo <i>et al</i> (2019)	54
Gambar 4.14 Panjang <i>wake</i> berdasarkan kecepatan <i>inlet</i> hasil penelitian Malki <i>et al.</i> (2011)	55

Daftar Tabel

Tabel 3.1 Variasi variabel bebas dan nilainya	24
Tabel 3.2 Kondisi fisis dan poperti fluida	30
Tabel 3.3 Kondisi batas domain udara	31
Tabel 3.4 Kondisi batas domain air	32
Tabel 3.5 Kodisi batas antar domain (<i>Interface</i>)	33
Tabel 3.6 Variasi model mesh, jumlah mesh, hasil kecepatan fluida, dan nilai errornya	34
Tabel 4.1 Data C_p vs TSR	38
Tabel 4.2 Nilai <i>coefficient of moment (CM)</i> dan <i>coefficient of power (CP)</i>	40

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada beberapa tahun belakangan ini, isu mengenai transisi menuju energi terbarukan menjadi topik yang semakin banyak dibicarakan seiring dengan kesadaran setiap orang bahwa energi fosil tidak bisa terus menerus digunakan. Selain jumlah cadangannya yang terus menipis, dampak yang ditimbulkan oleh penggunaan energi fosil seperti pemanasan global, perubahan iklim, pencemaran udara, dan rusaknya lingkungan juga semakin dirasakan. Hal-hal tersebut terus memotivasi bahwa penggunaan energi fosil harus terus dikurangi dan transisi menuju energi terbarukan adalah suatu keharusan demi menyelamatkan dan menjaga kelestarian bumi. Indonesia sendiri memiliki potensi yang besar untuk memanfaatkan energi terbarukan yang bisa berasal dari pemanfaatan energi air, angin, panas bumi, surya, dan biomassa. Berdasarkan data dari kementerian ESDM, potensi energi listrik yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia dapat mencapai 7 hingga 8 kali total kapasitas energi listrik yang dapat dihasilkan oleh pembangkit listrik yang ada saat ini, yaitu sekitar 432 GW (IESR, 2019). Dari jumlah tersebut, potensi *hydropower* menyumbang 12,894 GW pada 89 lokasi yang telah dilakukan pengkajian peningkatan kualitas data dari 1.249 lokasi. Akan tetapi, dalam pembangunan bendungan untuk *hydropower* juga perlu pertimbangan lagi karena akan berdampak pada lingkungan dan membutuhkan biaya yang besar. *In-stream hydrokinetic turbine* dapat menjadi alternatif dari pembangkit listrik tenaga air karena lebih ramah lingkungan daripada pembangkit listrik tenaga air tradisional. *In-stream hydrokinetic turbine* memiliki potensi dalam menghasilkan energi bersih dari aliran sungai dan pasang surut air laut (Payam & Corey, 2018).

Salah satu jenis *in-stream hydrokinetic turbine* yang mudah dibuat, mudah diterapkan, dan membutuhkan biaya yang tidak mahal dalam pembuatannya adalah *cross-flow hydrokinetik turbine* yang bentuknya mirip dengan turbin *Savonius*. *Cross-flow hydrokinetik turbine* memiliki poros dengan arah yang tegak lurus terhadap arah aliran fluida. *Cross-flow hydrokinetik turbine* mengekstrak energi dari perbedaan gaya drag yang terjadi antara *advancing blade* dan *returning blade*. Total torsi bersih yang menggerakkan turbin diciptakan dari perbedaan gaya drag tersebut.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pada *cross-flow hydrokinetik turbine* adalah dengan penambahan pemandu aliran (*deflector*). Pemandu aliran digunakan untuk menghalangi aliran agar tidak mengalami kontak dengan *returning blade* secara langsung dan aliran diarahkan menuju *advancing blade*. Hal tersebut dapat menurunkan nilai torsi negatif yang dihasilkan oleh *returning blade* dan meningkatkan torsi positif yang dihasilkan oleh *advancing blade* sehingga nilai torsi total yang digunakan untuk memutar turbin dapat meningkat dan *power output* yang dihasilkan juga meningkat. Pada penelitian yang dilakukan oleh Kailash *et al.*, membuktikan bahwa dengan penambahan pemandu aliran pada Turbin *Savonius* dapat meningkatkan nilai *coefficient of power* sebesar 50% (Kailash *et al.* 2010).

Tidak sama halnya dengan turbin angin, *cross-flow hydrokinetik turbine* beroperasi pada keadaan aliran yang dibatasi oleh bagian permukaan air (*free surface*) dan bagian dasar (*bed*) dari sebuah saluran. Pada banyak kasus, kedalaman dari sebuah saluran untuk penerapan turbin *hydrokinetik* berkisar 1,5D hingga 3D dimana D adalah diameter dari turbin. Hal tersebut

ditujukan agar nilai *blockage ratio* (rasio perbandingan luasan area turbin terhadap luasan saluran) lebih besar dari 0,1. Ketika nilainya dibawah nilai tersebut, turbin akan mengalami efek dari *solid blockage* yang mempengaruhi medan aliran di sekitar turbin sehingga mempengaruhi performa turbin juga (Nitin & Arindam, 2015).

Bagaimanapun juga, energi yang dapat diekstrak dari sebuah saluran dapat dibatasi oleh dinamika pasang surut dan kedalaman yang dimiliki oleh saluran baik sungai maupun pasang surut air laut (*tidal*). Pada sebuah saluran dapat memiliki potensi energi rentang mulai dari beberapa mega watt untuk saluran kecil hingga beberapa giga watt untuk saluran besar (Ross Vennell *et al.* 2014). Untuk dapat memanfaatkan potensi energi tersebut, membangun *cross-flow hydrokinetik turbine* dalam gugusan (*array*) lebih memungkinkan dibandingkan hanya dengan satu turbin. Dalam membangun sebuah gugusan turbin, memahami dinamika fluida dari *wake* yang ditimbulkan satu turbin menjadi diperlukan karena ia menjadi *incoming flow* untuk *downstream turbine*. Secara idealnya, *downstream turbine* pada gugusan turbin diletakkan di area *downstream* dimana *wake* yang ditimbulkan oleh *upstream turbine* telah sepenuhnya dipulihkan menjadi *incoming flow*. Pemulihan *wake* yang merupakan sebuah proses penurunan atau menghilangkan profil kecepatan *wake* menjadi hal penting karena dengan munculnya *wake* dapat menurunkan kecepatan aliran. Kecepatan aliran mempengaruhi *power output* yang dihasilkan oleh *cross-flow hydrokinetik turbine* karena *power output* yang dihasilkan sebanding dengan kecepatan aliran pangkat tiga.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Payam & Corey yang melakukan penelitian efek variasi kedalaman aliran terhadap pemulihan *wake* dibelakang turbin *in-stream* dengan sumbu horizontal dimana dalam penelitiannya digunakan *three bladed turbine* menunjukkan hasil bahwa *wake* yang terjadi di aliran yang lebih dalam, yang memiliki energi kinetik rata-rata *incoming flow* yang lebih besar, dapat pulih lebih cepat dalam hal kecepatan rata-rata dan lebih lambat dalam hal *turbulence intensity*. Pada aliran yang lebih dalam, terdapat energi dan *turbulence intensity* yang lebih besar untuk turbin selanjutnya di gugusan turbin yang disebabkan oleh turbin pertama. Hal tersebut merupakan keuntungan bagi turbin selanjutnya dalam hal potensi energi yang tersedia (Payam & Corey, 2018).

Sementara pada penelitian yang dilakukan oleh Yaling *et al.*, yang meneliti efek *hydrodynamic* dari rasio perbandingan diameter rotor dan kedalaman air, menyatakan bahwa *diameter to depth ratio* memiliki pengaruh pada *near wake* dan *far wake*. Ketika nilai *diameter to depth ratio* meningkat, daerah pemulihan *wake* semakin memanjang kebelakang dan *far wake* diperluas ke samping dan keatas. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi yang dapat dibangkitkan pada sebuah area saluran harus mempertimbangkan ukuran rotor turbin karena jarak optimal kesamping dan membujur antar turbin akan meningkat untuk rotor turbin yang besar dan jumlah yang dapat disusun untuk sebuah gugusan menjadi semakin sedikit. (Yaling *et al.* 2019)

Pada penelitian ini akan dipelajari bagaimana pengaruh *diameter to depth ratio* pada *cross-flow hydrokinetik turbine* dengan pemandu arah aliran terhadap *wake recovery* dimana penelitian dilakukan menggunakan metode numerik dengan bantuan *software Computational Fluid Dynamic (CFD)*. Variasi *depth to diameter ratio* akan digunakan untuk pengambilan data yang nantinya akan menjadi data yang diolah untuk diamati bagaimana pengaruhnya terhadap *wake recovery* yang terjadi setelah aliran melewati *upstream turbine*.

1.2 Rumusan Masalah

Berbagai teknologi *renewable energy* sudah semakin berkembang dan banyak diimplementasikan, mulai dari *wind turbine*, *water turbine*, *geothermal energy*, dan *solar panel* guna mewujudkan sumber energi yang dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan hidup manusia. Dari beberapa jenis *renewable energy* tersebut, *water turbine* menjadi salah satu yang menarik untuk dikembangkan karena *water turbine* memiliki *energy density* yang lebih besar dibandingkan *wind turbine* dan tidak terbatas oleh malam atau mendung seperti *solar panel*.

Dari beberapa keunggulan *water turbine* terhadap beberapa jenis *renewable energy* yang lain, *water turbine* juga memiliki kekurangan dimana salah satunya adalah saluran *water turbine* dibatasi oleh batas atas aliran (*free surface*) dan bagian dasar aliran (*bed*), sehingga menyebabkan keterbatasan ukuran diameter dari *water turbine* yang harus menyesuaikan dengan besarnya luasan saluran aliran. Keterbatasan diameter tersebut membuat *energy harvesting* bagi *water turbine* juga terbatas. Keterbatasan *energy harvesting* akibat keterbatasan ukuran diameter *water turbine* dapat diatasi dengan membuat gugusan turbin air (*water turbine array*) sepanjang saluran aliran. Gugusan turbin dapat meningkatkan jumlah energi yang dapat diekstrak dari potensi energi yang ada pada sebuah aliran bergantung pada jumlah turbin yang dipasang. Tetapi dalam membuat gugusan turbin air pada sebuah aliran juga harus mempertimbangkan *wake* yang dapat ditimbulkan oleh *upstream turbine* yang berefek pada *downstream turbine* karena *wake* dapat menurunkan *drag force* yang mana sangat dibutuhkan oleh turbin untuk memutar *rotor blade* untuk menghasilkan energi.

Berdasarkan uraian diatas, pada penelitian ini akan mempelajari bagaimana pengaruh perbandingan antara kedalaman saluran aliran dengan diameter dari turbin air (*depth to diameter ratio*) terhadap *wake recovery* yang dihasilkan oleh *upstream turbine*. Adapun beberapa perumusan masalah yang dibahas pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perbedaan nilai *depth to diameter ratio* pada aliran dapat mempengaruhi *wake recovery* dimana diperkirakan semakin besar nilai rasionya maka pemulihan *wake* dapat terjadi lebih awal akibat transfer energi kinetik yang lebih besar.
2. Perbedaan nilai *depth to diameter ratio* pada aliran dapat mempengaruhi performansi turbin yang diperkirakan semakin besar nilai rasionya maka performansi turbin akan menurun akibat timbulnya efek *solid blockage*.
3. Pada nilai *depth to diameter ratio* yang tetap, variasi kecepatan aliran dapat mempengaruhi *wake recovery* dan performansi turbin dengan semakin besar nilai kecepatan aliran, maka *wake recovery* dapat terjadi lebih awal dan dapat meningkatkan performansi turbin sampai titik maksimumnya akibat nilai energi kinetik rata-rata pada aliran yang juga meningkat.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh perbedaan nilai *depth to diameter ratio* terhadap *wake recovery*.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan nilai *depth to diameter ratio* terhadap performansi *cross-flow hydrokinetik turbine*
3. Mengetahui pengaruh perbedaan nilai kecepatan aliran pada nilai *depth to diameter ratio* tetap terhadap *wake recovery* dan performansi *cross-flow hydrokinetik turbine*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang terdapat pada penelitian ini antara lain:

1. Penelitian dilakukan dengan metode *computational fluid dynamic* (CFD) dengan menggunakan *software Ansys*.
2. Model fluida yang digunakan adalah multifasa yang terdiri dari air dan udara (pada suhu 25°C).
3. Aliran tiap fluida *inlet* bersifat *uniform*.
4. Interaksi antara fluida dengan turbin dan *deflector* dianggap tidak ada gesekan.

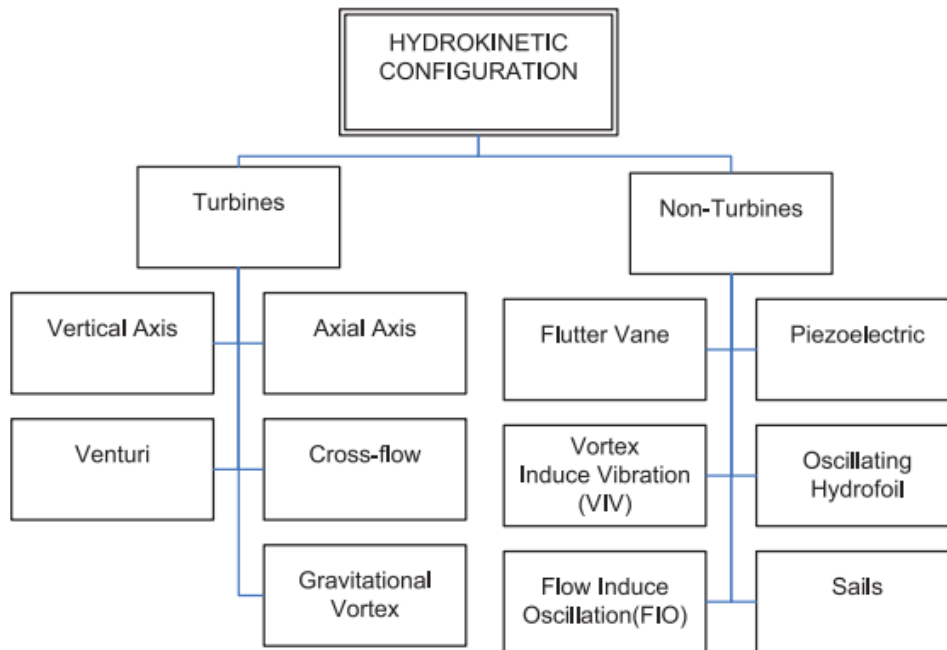
BAB II STUDI PUSTAKA

2.1 Energi Hidrokinetik

Sumber energi terbarukan seperti *wind energy*, *hydropower*, *solar PV*, *bioenergy*, dan *geothermal* telah banyak dilakukan penelitian dan pengembangan baik oleh peneliti akademik maupun industri. Namun jumlah energi terbarukan memiliki beberapa keterbatasan terutama masalah ketidakkontinyuan sumber energi dalam menghasilkan energi listrik, seperti *wind energy* dan *solar PV* sehingga menjadikannya tidak sesuai untuk sumber energi listrik yang andal dalam memenuhi kebutuhan beban energi dasar. *Hydropower* dan *geothermal energy* membutuhkan kondisi geologi yang spesifik, membutuhkan biaya yang sangat besar, dan dapat mempengaruhi kondisi lingkungan. *Bioenergy* membutuhkan proses yang sangat kompleks dan teknologi yang canggih dalam skema konversi energi, dan terdapat keraguan dalam hal karbon netral dalam siklus konversinya. Memanfaatkan energi yang berasal dari aliran air yang mengalir secara bebas (*free-flowing water stream*), atau sistem hidrokinetik, merupakan sebuah solusi dalam menyediakan energi yang bersih, aman, dan andal, terutama pada *remote area* yang tidak memiliki akses jaringan listrik (Ibrahim *et al.* 2021).

Sistem hidrokinetik merupakan sebuah peralatan *electromechanical* yang dapat mengkonversi energi kinetik dari aliran air menjadi energi listrik melalui generator dan *power electronics converter*. Meskipun tenaga yang dihasilkan kecil, tetapi kapasitas *power output* dapat ditingkatkan dengan membuat gugusan sistem hidrokinetik. Sistem hidrokinetik yang berbasis pada aliran yang mengalir secara bebas dapat dengan mudah diangkut atau dipindahtempatkan karena ukurannya yang relatif kecil.

Pada gambar 2.1 ditunjukkan bahwa terdapat dua jenis metode yang dapat digunakan untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik yaitu menggunakan turbin dan bukan turbin. Metode dengan menggunakan turbin memiliki beberapa model turbin yang dapat digunakan yaitu turbin sumbu vertikal, sumbu horizontal/aksial, venturi, *cross-flow*, dan *gravitational vortex*. Sedangkan metode yang tidak menggunakan turbin yaitu dapat menggunakan *flutter vane*, *piezoelectric*, *vortex induce vibration*, *oscillating hydrfoil*, *flow induce oscillation*, dan *sail* (Ibrahim *et al.* 2021).



Gambar 2.1 Konfigurasi hidrokinetik (Ibrahim *et al.*, 2021).

Memproduksi listrik dengan memanfaatkan turbin hidrokinetik tidak menimbulkan gas emisi, tetapi teknologi turbin hidrokinetik masih memasuki fase awal sehingga dibutuhkan banyak penelitian lebih jauh lagi untuk mempelajari efek yang mungkin ditimbulkan terhadap lingkungan sekitar akibat mengekstrak energi dari aliran air. Dalam jurnal Gurney & Kuygusuz, 2010, pemasangan turbin (*rotating device*) dapat menyebabkan beberapa perubahan dan dampak bagi lingkungan seperti berikut :

- a. Dapat mengganggu habitat dari makhluk hidup baik binatang maupun tumbuhan disekitar tempat pemasangan alat.
- b. Alat konversi energi hidrokinetik dapat mengganggu dan menghalangi pergerakan binatang air.
- c. Gugusan alat konversi energi hidrokinetik dalam jumlah yang besar dapat menciptakan *noise* yang dapat mengganggu kehidupan bawah air disekitarnya.
- d. Pembangunan sistem dan kanal dapat mempengaruhi hidrologi dan sedimen.

Sedangkan dalam publikasi Brian, 2020, turbin hidrokinetik memiliki potensi permasalahan yang dihadapi dimana potensi-potensi tersebut adalah sebagai berikut ;

- a. Biaya modal awal yang dibutuhkan tinggi dan kapasitas yang rendah
- b. *Power density* yang rendah karena kecepatan aliran yang rendah.
- c. Kedalam air rendah (dangkal).
- d. Bagian dasar aliran yang berbatu yang dapat mengurangi ruang yang tersedia.
- e. Kebutuhan untuk menyediakan jalur perahu atau kapal.
- f. Puing-puing yang mengambang yang terbawa arus dapat mengganggu atau merusak turbin.
- g. Beban tinggi yang tidak terduga dari pusaran dan banjir bandang.

Terdapat beberapa cara yang dapat dilakukan untuk meminimalisir dampak buruk dan potensi permasalahan diatas yaitu dengan pemilihan lokasi yang tepat, desain alat hidrokinetik

yang sesuai, tindakan pencegahan yang tepat, pengalaman dengan proyek percontohan, dan banyak penelitian lebih lanjut untuk meningkatkan performa alat konversi energi hidrokinetik.

2.2 Turbin Hidrokinetik

Terdapat beberapa cara yang bisa dilakukan untuk mengkonversi energi hidrokinetik baik dari arus laut maupun aliran sungai menjadi energi listrik. Salah satu cara yang efektif yaitu menggunakan turbin. Berdasarkan orientasi sumbu rotor terhadap arah aliran air, turbin hidrokinetik dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *axial-flow turbine* dan *cross-flow turbine*. *Axial-flow turbine* memiliki sumbu rotor yang sejajar dengan arah aliran air, sedangkan *cross-flow turbine* memiliki sumbu rotor yang tegak lurus terhadap arah aliran. *Cross-flow turbine* dapat dibedakan menjadi dua jenis yang berdasarkan orientasi sumbu rotor terhadap permukaan air, yaitu *vertical axis* dan *in-plane axis*. *Vertical axis* memiliki sumbu rotor yang tegak lurus terhadap bidang permukaan air, sedangkan *in-plane axis* atau bisa disebut *horizontal axis* memiliki sumbu rotor yang sejajar dengan bidang permukaan air (Anuj & Saini, 2016). Beberapa penelitian yang pernah dilakukan untuk membandingkan efisiensi dari turbin poros horizontal dan vertikal menunjukkan bahwa turbin dengan poros horizontal memiliki efisiensi yang lebih besar daripada turbin dengan poros vertikal. Tetapi, turbin poros horizontal memiliki kekurangan yaitu energi yang diekstrak hanya bisa dari satu arah. Sehingga, turbin poros horizontal sangat cocok diterapkan untuk mengekstrak energi kinetik karena hanya satu arah aliran yaitu searah dengan arah aliran air.

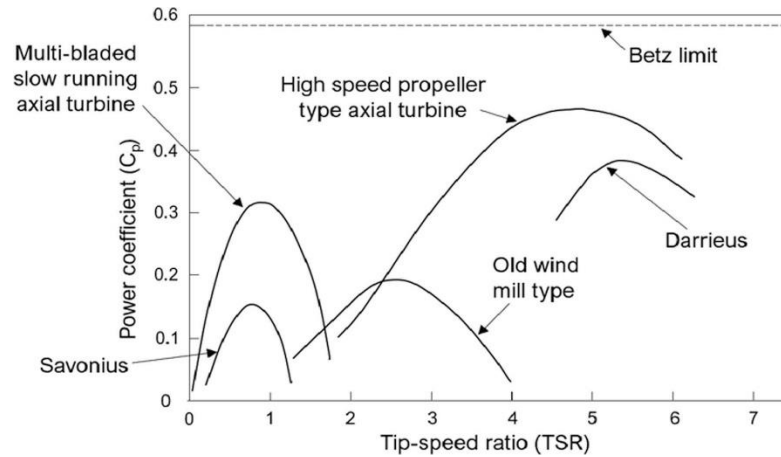
Turbin hidrokinetik memiliki kesamaan dengan turbin angin dalam mengkonversi energi kinetik menjadi energi listrik, dimana untuk menghasilkan energi listrik dari energi kinetik sangat bergantung pada kecepatan aliran, luas penampang, dan massa jenis fluida yang mengalir. Hal tersebut sesuai dengan persamaan:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.1)$$

dengan P adalah energi yang dapat diekstrak turbin per satuan waktu, ρ adalah massa jenis fluida, A adalah luasan penampang yang diterjang oleh aliran (*frontal area*), v adalah kecepatan aliran fluida, dan C_p adalah koefisien daya yang mampu diekstrak oleh turbin karena tidak semua energi kinetik dapat dirubah menjadi energi listrik karena terjadi disipasi energi. Nilai koefisien daya yang dimiliki turbin hidrokinetik bergantung pada nilai *Tip-Speed Ratio* (TSR) yang merupakan perbandingan antara kecepatan *tip-blade* terhadap kecepatan aliran air, atau dapat didefinisikan dengan persamaan 2.2.

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (2.2)$$

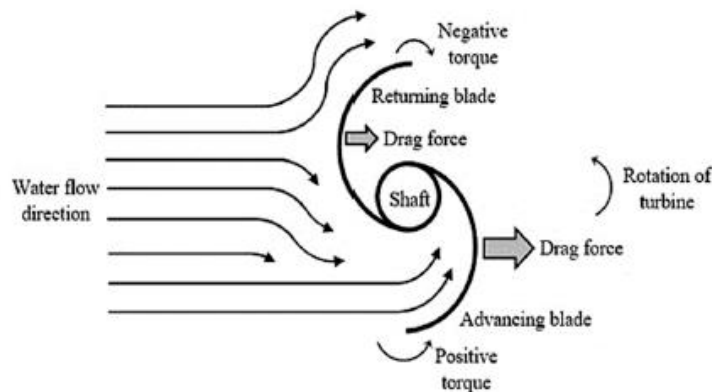
Nilai TSR dapat menunjukkan jangkauan operasi pada beberapa jenis turbin, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Untuk beberapa jenis turbin yang ditunjukkan, nilai C_p naik hingga nilai TSR tertentu sampai nilai C_p mencapai titik maksimum dan kemudian nilai C_p akan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya nilai TSR.



Gambar 2.2 Kurva daya yang dihasilkan pada beberapa jenis turbin berdasarkan *tip-speed ratio* (TSR) (Nauman., et al, 2020)

2.3 Turbin Savonius

Turbin Savonius pertama kali didesain dan dikembangkan oleh seorang insinyur Finlandia yang bernama Sigurd Johannes Savonius dengan tujuan dapat mengekstrak energi angin. Turbin Savonius merupakan turbin jenis *cross-flow turbine* yang artinya memiliki poros dengan arah yang tegak lurus terhadap arah aliran fluida. Rotor Savonius memiliki bentuk ‘S’ yang dibuat dari sebuah silinder yang dibelah menjadi dua bagian kemudian disusun secara *overlap*. Seperti yang diilustrasikan oleh gambar 2.3, pada bagian rotor yang berbentuk cekung terhadap arah datangnya aliran disebut *advancing blade* dan bagian yang berbentuk cembung disebut *returning blade*. Turbin Savonius mengekstrak energi dari perbedaan gaya drag yang terjadi antara *advancing blade* dan *returning blade* dimana di bagian *advancing blade* tercipta gaya drag yang lebih besar daripada bagian *returning blade*. Total torsi bersih yang menggerakkan turbin diciptakan dari perbedaan gaya drag tersebut. Gaya drag yang terjadi pada *returning blade* menghasilkan torsi negatif yang menciptakan gaya yang melawan arah putaran rotor. Torsi negatif yang ditimbulkan tersebut dapat menurunkan efisiensi Turbin Savonius. Semakin besar torsi negatif maka semakin kecil efisiensinya karena gaya yang melawan arah putaran rotor semakin besar (Badrul *et al.*, 2020).

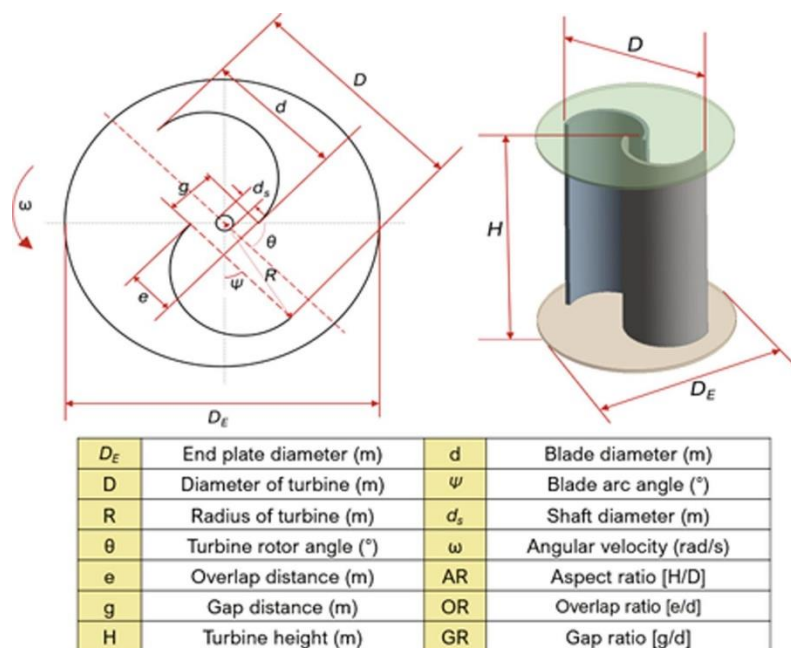


Gambar 2.3 Ilustrasi prinsip kerja Turbin Savonius (Badrul *et al.*, 2020)

Turbin Savonius memiliki beberapa parameter geometri seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4, dimana tiap-tiap parameter dapat mempengaruhi kinerja turbin Savonius.

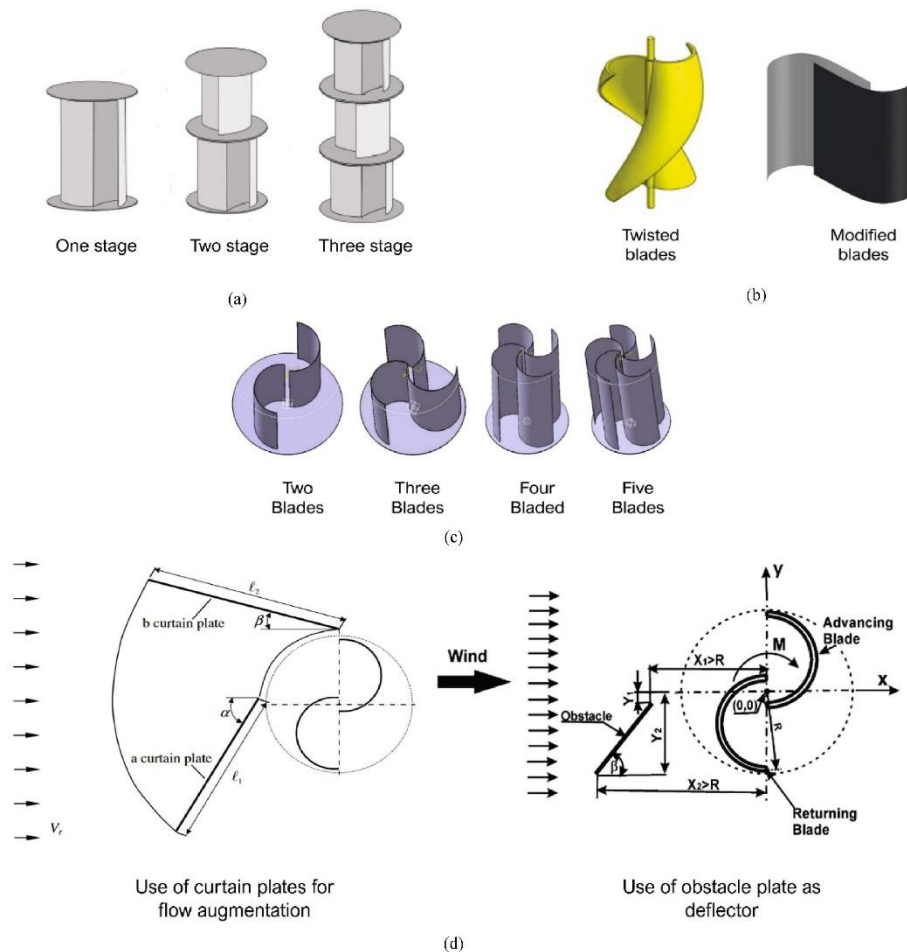
Parameter-parameter tersebut adalah *aspect ratio*, *end plates*, *gap ratio*, *overlap ratio*, jumlah sudu, jumlah *rotor stage*, dan bentuk profil sudu. *Aspect ratio* merupakan perbandingan antara ketinggian (H) dengan diameter turbin (D). *Gap Ratio* merupakan perbandingan antara jarak *gap* sudu turbin (g) dengan radius turbin (d). *overlap ratio* merupakan perbandingan antara jarak *overlap* (e) dengan jari-jari turbin (d). Selain parameter geometri, terdapat parameter pemasangan yang juga dapat mempengaruhi kinerja turbin Savonius yang meliputi *clearance ratio* yang merupakan perbandingan ketinggian turbin dengan jarak turbin ke bagian *bed* (dasar tanah) dan arah rotasi (CW/CCW).

Turbin hidrokinetik Savonius memiliki banyak kesamaan dengan turbin angin Savonius dalam hal prinsip kerja untuk mengekstrak energi. Tetapi, karena air memiliki densitas yang jauh lebih besar daripada udara, turbin hidrokinetik Savonius dapat mengekstrak energi pada aliran dengan kecepatan rendah. Turbin hidrokinetik Savonius dapat diterapkan pada sebuah aliran dengan kecepatan mulai dari 0.5 m/s dan lebih dari itu (Anuj & Saini, 2016).



Gambar 2.4 Parameter geometri turbin Savonius (Nauman., et al, 2020)

Turbin Savonius memiliki beberapa kelebihan yang meliputi desain yang sederhana, biaya manufaktur rendah, *noise* rendah, dan memiliki karakter *starting* yang lebih baik dibandingkan turbin jenis lainnya. Tetapi, turbin Savonius juga memiliki kekekurangan seperti efisiensi yang rendah dalam mengekstrak energi, variasi torsi siklik yang besar, dan pengaruh torsi negatif pada kinerjanya secara keseluruhan menjadi alasan desain ini kurang dipertimbangkan pada penerapan secara komersial. Oleh karena itu, penelitian untuk memodifikasi parameter-parameter turbin Savonius untuk mencapai kinerja yang lebih baik menjadi fokus utama selama bertahun-tahun. Beberapa contoh penelitian yang telah dilakukan untuk memodifikasi parameter-parameter turbin Savonius meliputi tentang jumlah *rotor stage* yang menggunakan satu *stage*, dua *stage*, dan tiga *stage* (Gambar 2.5a), bentuk sudu yang menggunakan *twisted blade* dan *modified blade* (Gambar 2.5b), jumlah *blade* yang menggunakan dua hingga lima *blade* (Gambar 2.5c), dan penambahan *curtain plate* dan *obstacle plate* atau *deflector* dengan beberapa variasi sudut dan jarak (Gambar 2.5d).



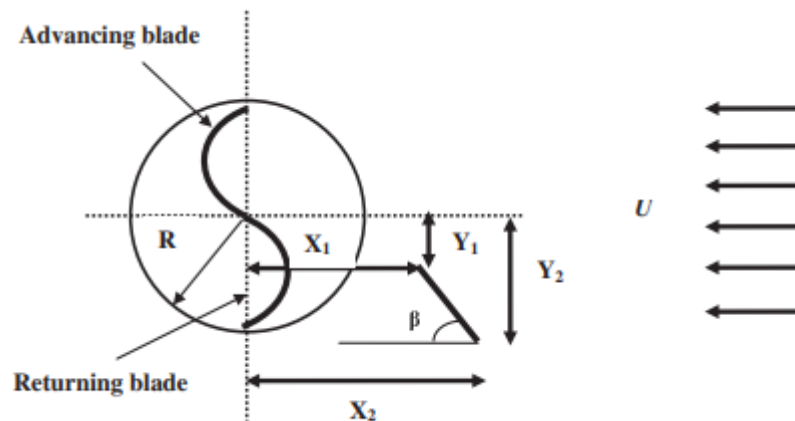
Gambar 2.5 Bentuk modifikasi parameter turbin Savonius (a) jumlah *stage* (b) bentuk *blade* (c) jumlah *blade* (d) penambahan pemandu aliran (Nauman., et al, 2020)

2.4 Deflector

Turbin Savonius merupakan jenis turbin yang memanfaatkan gaya *drag* untuk dapat memutar rotor turbin dimana gaya *drag* yang digunakan dihasilkan dari selisih antara gaya *drag* pada *advancing blade* dengan *returning blade*. Gaya *drag* pada *returning blade* bersifat merugikan karena gaya *drag* pada *returning blade* menciptakan torsi negatif atau dorongan ke arah yang berlawanan dengan arah putar rotor turbin sehingga akan menghambat putaran rotor dan menyebabkan efisiensi turbin menurun dalam mengekstrak energi kinetik yang dimiliki aliran.

Salah satu cara yang dilakukan untuk meningkatkan efisiensi turbin Savonius adalah dengan penambahan *deflector* (pemandu aliran) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. *Deflector* merupakan sebuah *obstacle* yang membelokkan arah aliran yang menuju *returning blade* dan mengarahkannya menuju *advancing blade*. Dengan cara seperti itu, nilai gaya *drag* yang diciptakan oleh *returning blade* akan menurun. *Deflector* juga menyebabkan aliran yang menuju *advancing blade* terdesak oleh aliran yang dibelokkan menuju *advancing blade*, sehingga kecepatan aliran yang menuju *advancing blade* meningkat. Semakin meningkatnya kecepatan aliran yang menuju *advancing blade* menyebabkan gaya *drag* yang diciptakan *advancing blade* juga meningkat. Dengan demikian, *deflector* dapat membuat selisih gaya *drag*

yang diciptakan oleh *advancing blade* dengan *returning blade* semakin besar sehingga efisiensi turbin dalam mengekstrak energi kinetik dapat meningkat.



Gambar 2.6 Skema turbin Savonius menggunakan *deflector* (Kailash *et al*, 2010)

Beberapa penelitian yang dilakukan baik secara numerik maupun eksperimen telah membuktikan bahwa dengan menambahkan *deflector* pada turbin Savonius dapat meningkatkan nilai efisiensi turbin. Seperti studi numerik yang dilakukan oleh Kailash *et al*, 2010, menunjukkan bahwa penambahan *deflector* meningkatkan *coefficient of power* turbin savoius hingga 50% dengan nilai $\beta = 101^\circ$ dibandingkan tanpa menggunakan *deflector*. Sedangkan pada studi eksperimen yang dilakukan oleh Adi Prasetyo *et al*, 2018 yang dilakukan dengan menempatkan turbin Savonius dengan *deflector* pada sebuah aliran didalam pipa menunjukkan peningkatan *power output* sebesar 84,6% dengan nilai $\beta = 30^\circ$ dibandingkan tanpa menggunakan *deflector*.

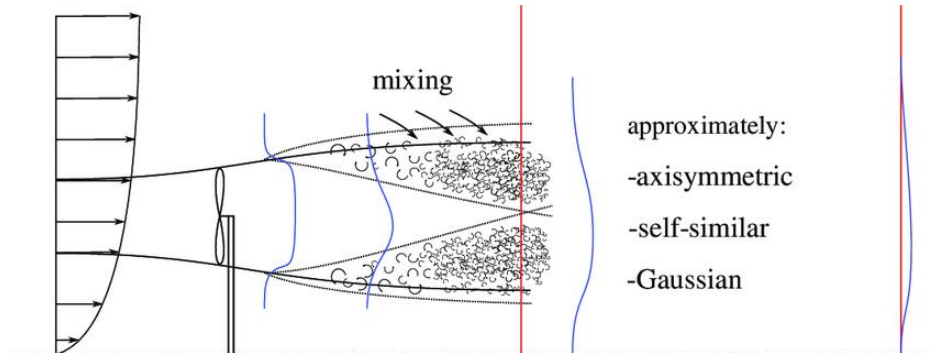
2.5 Aerodinamika Wake

Wake merupakan daerah aliran yang bergejolak di sisi hilir dari sebuah benda padat yang dilalui oleh aliran fluida yang memiliki nilai viskositas. *Wake* dapat terjadi karena suatu aliran mengalami separasi akibat tidak memiliki energi yang cukup untuk melawan gaya gesek yang ditimbulkan oleh permukaan benda yang dilaluinya dan perbedaan tekanan yang terjadi. Salah satu tanda yang dapat diamati dari munculnya *wake* yang disebabkan oleh turbin adalah menurunnya kecepatan aliran yang cukup besar dan diikuti dengan meningkatnya level turbulensi. Dalam gugusan turbin, penurunan kecepatan yang besar yang diakibatkan oleh *upstream* turbin akan berakibat pada penurunan energi yang dapat diekstrak oleh *downstream* turbin. Sedangkan meningkatnya level turbulensi menyebabkan meningkatnya beban yang dialami oleh *downstream* turbin akibat kelelahan (*fatigue*).

Dari berbagai macam fenomena yang terjadi dalam aerodinamika, salah satu yang penting untuk dianalisa adalah aliran rotasional yang terjadi pada *wake*. Beberapa fenomena dalam aerodinamika dapat digunakan untuk menganalisa karakteristik *wake* seperti struktur turbulensi dari *wake*. Terbentuknya *tip vortex* merupakan salah satu dari fenomena tersebut. *Tip vortex* menyebabkan timbulnya separasi aliran yang memisahkan antara aliran di sekelilingnya dengan *wake* yang berturbulensi tinggi. Ciri-ciri dari *tip vortex* ialah memiliki tekanan rendah dan kecepatan yang tinggi.

Wake yang ditimbulkan oleh turbin tersusun dari sistem *vortex* yang kompleks. Sistem *vortex* tersebut dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya adalah struktur aliran fluida

yang melewati turbin, perputaran aliran yang disebabkan oleh putaran rotor turbin, *tip vortex*, dan *root vortex*. Turbulensi yang diakibatkan oleh *vortex* akan melebar dan bercampur dengan turbulensi yang lain sehingga bisa membentuk turbulensi yang lebih besar. Proses pencampuran turbulensi pada pembentukan *wake* di daerah *downstream* diilustrasikan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Proses pencampuran turbulensi pada pembentukan *wake* di daerah *downstream* (Sanderse, 2009)

Ketika terjadi pencampuran antara *wake* dengan aliran disekelilingnya yang memiliki kecepatan aliran yang lebih tinggi, terjadi transfer sebagian momentum yang dimiliki oleh aliran yang berkecepatan tinggi kepada *wake* yang menyebabkan terjadinya ekspansi *wake* dan meningkatkan kecepatan aliran *wake*. Pada suatu titik tertentu, aliran yang berada di sekeliling turbin bisa mencapai titik tengah *wake*. Pada daerah tersebut menandai daerah berakhirnya *near wake* dan aliran akan mengalami transisi menuju daerah *far wake* dimana semua aliran *wake* berkembang.

2.6 Turbulensi

Secara alamiah atau dalam dunia *engineering*, fenomena turbulensi menjadi suatu fenomena yang tidak dapat dihindari. Fenomena turbulensi sering kali muncul dalam kehidupan sehari-hari, seperti contohnya aliran air di dasar laut, turbulensi yang terjadi di atmosfer bumi, dan *boundary layer* yang timbul pada bagian sayap pesawat. Dalam beberapa kasus, pembakaran akan lebih efektif jika terjadi dalam aliran yang turbulen, seperti pembakaran yang terjadi didalam boiler.

Turbulensi memiliki sifat yang tidak teratur dan acak. Oleh karena sifatnya tersebut membuat turbulensi sangat sulit untuk dianalisa secara deterministik, sebagai solusinya, dilakukan pendekatan statistik yang digunakan untuk menganalisa turbulensi lebih lanjut. salah satu karakteristik yang penting dalam aliran turbulensi adalah difusifitas, dimana karakteristik tersebut dapat menyebabkan pencampuran yang cepat dan meningkatkan kecepatan transfer momentum, massa, dan panas. Difusifitas turbulensi juga dapat mencegah separasi *boundary layer* pada *airfoil* untuk nilai *angle of attack* yang besar. Aliran turbulensi muncul pada keadaan nilai bilangan Reynold (Re) yang besar, juga sering kali berasal dari ketidakstabilan aliran laminar ketika nilai bilangan Reynold (Re) terlalu besar.

Turbulensi juga memiliki sifat berputar (*rotational*) secara tiga dimensi. Munculnya turbulensi biasanya ditandai dengan meningkatnya level fluktuasi vortisitas. Jika fluktuasi kecepatan aliran terjadi secara dua dimensi (2D), fluktuasi vortisitas tidak dapat bertahan karena tidak adanya mekanisme yang mempertahankan vortisitas, atau biasa juga disebut sebagai mekanisme *vortex stretching* pada aliran dua dimensi. Turbulensi membutuhkan pasokan energi yang berkelanjutan untuk bisa mengkompensasi energi yang hilang akibat gesekan (*viscous*

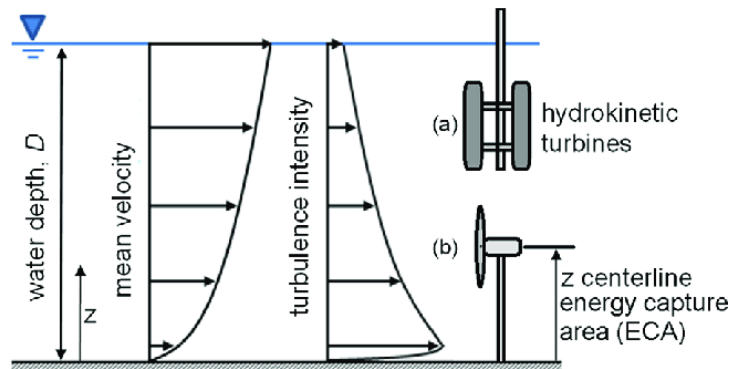
loss) yang disebabkan oleh *viscous shear stress*. Ketika pasokan energi tidak mencukupi, maka turbulensi akan mulai menghilang. *Viscous shear stress* menunjukkan perubahan energi yang meningkatkan energi dalam fluida dengan mengorbankan energi kinetik dari turbulensi.

Dalam hal pemulihan *wake*, intensitas turbulensi merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi seberapa cepat *wake* dari turbin *in-stream* dapat dipulihkan. Gambar 2.8 mengilustrasikan model profil kecepatan dan intensitas turbulensi pada sebuah aliran saluran yang terbuka, dan mendemonstrasikan bagaimana karakteristik aliran datang melewati *energy capture area* (ECA) dari mesin konversi energi aliran. Intensitas turbulensi (I_u) didefinisikan sebagai persamaan berikut:

$$I_u = \frac{\sigma_u}{U_{hub}} \quad (2.3)$$

$$\sigma_u = \sqrt{u - U} \quad (2.4)$$

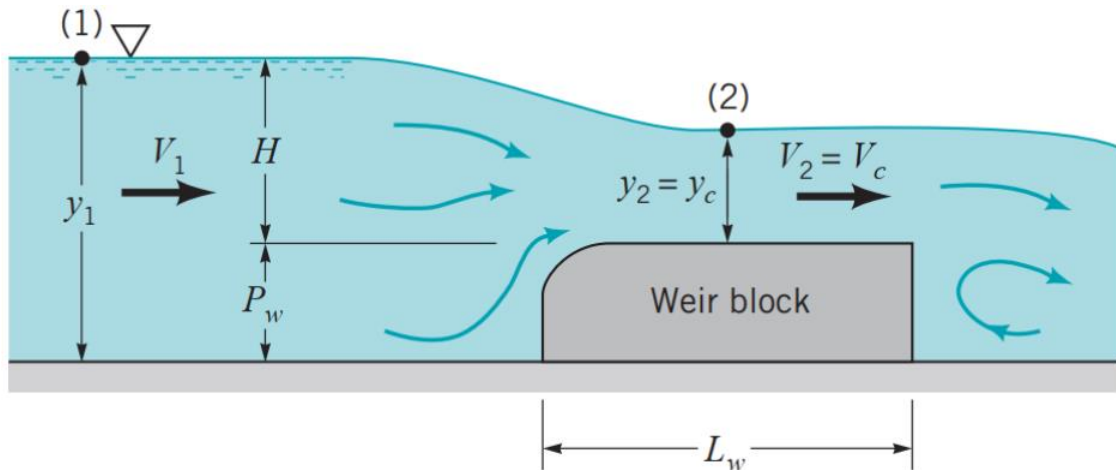
dimana U_{hub} merupakan kecepatan rata-rata *stream-wise* yang datang menuju *hub*, σ_u merupakan akar kuadrat dari kecepatan gangguan *stream-wise* (u') yang berfluktuasi disekitar kecepatan rata-rata ($u' = u - U$). Semakin besar nilai intensitas turbulensi dapat membuat tingkat pemulihan spasial semakin besar, baik pada kecepatan maupun intensitas turbulensi pada *wake*. Meskipun semakin tinggi nilai intensitas turbulensi dapat membantu pemulihan *wake* lebih cepat, intensitas turbulensi juga dapat menyebabkan meningkatnya resiko kegagalan akibat beban kelelahan pada struktur turbin dan komponen *drive-train* yang meliputi *blades* dan *bearings* (Payam & Corey, 2018).



Gambar 2.8 Profil kecepatan dan intensitas turbulensi di aliran kanal terbuka (Neary *et al.*, 2013)

2.7 Bendung Berpuncak Lebar

Sebuah bendung berpuncak lebar adalah suatu struktur di dalam kanal terbuka yang mempunyai puncak horizontal yang mana diatas struktur tersebut tekanan fluidanya dapat dianggap hidrostatis. Konfigurasi dari bendung ini biasanya dapat dinyatakan pada skema di Gambar 2.9. Secara umum, untuk memastikan pengoperasian yang benar, terdapat nilai rasio yang harus diperhatikan yaitu $0,08 < H/Lw < 0,5$. Jika rasionya kurang dari 0,08 maka kerugian head pada bendung tidak bisa diabaikan. Di sisi lain untuk balok bendung yang pendek, dengan rasio lebih dari 0,5 maka garis-garis arus dari aliran di atas balok tidak horizontal.



Gambar 2.9 Geometri dari bendungan berpuncak lebar (Muhson, 2019)

Cara kerja dari bendung berpuncak lebar didasarkan pada prinsip bahwa aliran kritis yang hampir seragam dicapai pada belokan yang dekat diatas balok bendung. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sewaktu aliran melewati balok bendung, aliran tersebut mengalami percepatan dan mencapai kondisi kritis $y_2 = y_c$ dan $Fr_2 = 1$. Persamaan Bernoulli dapat diterapkan antara titik (1) di hulu dari bendung dan titik (2) di atas bendung di mana aliran kritis terjadi, persamaan dapat dilihat pada Persamaan 2.5.

$$H + P_w + \frac{V_1^2}{2g} = y_c + P_w + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.5)$$

jika head kecepatan hulu dapat diabaikan, maka:

$$H - y_c = \frac{V_c^2 - V_1^2}{2g} = \frac{V_c^2}{2g} \quad (2.6)$$

namun karena $V_2 = V_c = (gy_c)^{1/2}$, didapatkan bahwa $V_c^2 = gy_c$, sehingga didapatkan

$$H - y_c = \frac{y_c}{2} \quad (2.7)$$

$$y_c = \frac{2H}{3} \quad (2.8)$$

2.8 Aliran di Saluran Terbuka

Aliran di saluran terbuka melibatkan aliran-aliran dari fluida di dalam saluran yang tidak terisi penuh. Pada aliran di saluran terbuka, terdapat permukaan bebas yang memisahkan antara fluida yang mengalir (biasanya air) dengan fluida yang berada di atasnya (biasanya udara atmosfer). Berbeda dengan saluran di dalam pipa, aliran di saluran terbuka tidak memiliki gaya yang diakibatkan oleh tekanan untuk menggerakkan fluida agar mengalir. Aliran di saluran terbuka dapat mengalir akibat dipengaruhi oleh gaya gravitasi.

Aliran di saluran terbuka memiliki suatu permukaan bebas yang dapat terdeformasi dari konfigurasi tak terganggunya yang relatif rata sehingga membentuk sebuah gelombang. Gelombang tersebut bergerak melintasi permukaan bebas dengan kecepatan yang bergantung pada ukuran gelombang (tinggi dan panjang) dan kondisi fisik dari saluran (kedalaman, kecepatan, dan lain-lain). Karakter sebuah aliran di saluran terbuka dapat bergantung pada seberapa cepat fluida mengalir relatif terhadap berapa cepat suatu gelombang di permukaan

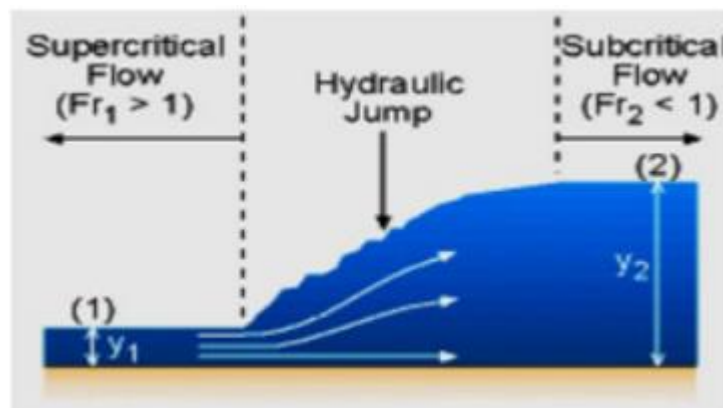
tertentu bergerak. Untuk menggambarkan fenomena tersebut, terdapat parameter tak berdimensi yang disebut dengan bilangan Froude (Fr) yang didefinisikan dengan persamaan 2.9

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh_0}} \quad (2.9)$$

dimana V adalah kecepatan rata-rata fluida pada saluran terbuka, g adalah percepatan gravitasi, dan h_0 adalah kedalaman dari saluran. Beberapa contoh kondisi yang digambarkan oleh bilangan Froude yaitu ketika nilai $Fr = 1$, maka aliran dapat disebut sebagai aliran kritis. Ketika bilangan Froude bernilai kurang dari 1, maka alirannya bisa disebut aliran subkritis atau tenang. Sedangkan ketika nilai bilangan Froude lebih dari 1, maka aliran tersebut dapat disebut sebagai aliran superkritis atau cepat.

2.9 Hydraulic Jump

Hydraulic jump adalah fenomena lompatan gelombang yang terbentuk ketika kedalaman dari saluran air di aliran terbuka berubah dari daerah *supercritical* menuju daerah *subcritical*. Ketika kemiringan saluran terbuka menurun dari yang curam menuju ke landai, kedalaman dari saluran air meningkat menjadi kedalaman kritis (*critical depth*) dan ketidakstabilan aliran terjadi pada beberapa titik. Aliran menjadi turbulen sampai kedalaman normal baru tercapai di daerah *downstream*. Pada *hydraulic jump* terdapat *discontinuity* di permukaan air yang ditandai dengan kemiringan profil yang curam ke atas disertai dengan banyak turbulensi dan pusaran air. Fenomena *hidraulic jump* diilustrasikan pada gambar 2.10 dibawah ini.



Gambar 2.10 Ilustrasi terjadinya Hydraulic jump (Emat & Atheer, 2018).

Daerah aliran *supercritical* biasanya terjadi pada bagian dangkal di aliran dengan kecepatan aliran yang lebih tinggi, di kedalaman kritis dan hal itu biasa terjadi ketika kemiringan saluran terlalu curam, dan pada daerah tersebut memiliki bilangan Froude lebih dari 1. Daerah *subcritical* dari aliran fluida terjadi pada daerah yang memiliki kedalaman lebih besar dan terjadi pengurangan kecepatan aliran. Daerah *subcritical* biasanya terjadi setelah kedalaman kritis dimana di daerah ini memiliki bilangan Froude kurang dari 1. Sedangkan daerah kritis merupakan daerah yang memisahkan daerah *supercritical* dan daerah *subcritical*.

2.10 Diameter to Depth Ratio

Diameter to depth ratio pada sebuah turbin hidrokinetik merupakan perbandingan antara diameter turbin dengan kedalaman turbin beroperasi. *Diameter to depth ratio* merupakan

sebuah parameter penting yang mempengaruhi proses pemulihan *wake*, karena *wake* dibatasi diantara bagian dasar saluran dan bagian permukaan air yang membatasi ekspansi *wake* ke arah yang tegak lurus dengan permukaan, dan kecepatan aliran terdistribusi secara tidak merata pada arah vertikal. Beberapa efek yang dapat dipengaruhi oleh *diameter to depth ratio* pada turbin hidrokinetik meliputi *turbulence intensity*, struktur *wake*, *thrust coefficient*, dan *reynold shear stress*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yaling *et al.*, yang meneliti efek *hydrodynamic* dari rasio perbandingan diameter rotor dan kedalaman air, menyatakan bahwa *diameter to depth ratio* memiliki pengaruh pada *near wake* dan *far wake*. Ketika nilai *diameter to depth ratio* meningkat, daerah pemulihan *wake* semakin memanjang kebelakang dan *far wake* diperluas ke samping dan keatas. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi yang dapat dibangkitkan pada sebuah area saluran harus mempertimbangkan ukuran rotor turbin karena jarak optimal kesamping dan membujur antar turbin akan meningkat untuk rotor turbin yang besar dan jumlah yang dapat disusun untuk sebuah gugusan menjadi semakin sedikit (Yaling *et al.* 2019).

Selain itu, menurunnya nilai *diameter to depth ratio*, yang menunjukkan bahwa posisi turbin semakin dekat dengan *free surface*, dapat menyebabkan *free surface* terdeformasi. Terdeformasinya *free surface* dapat membuat level air pada bagian belakang bidang rotasi turbin menurun yang kemudian akan berinteraksi dengan *wake* sehingga akan memicu menurunnya performansi turbin. Selain jarak dengan *free surface*, jarak antara turbin dengan bagian dasar saluran juga menjadi pertimbangan dalam pemasangan turbin hidrokinetik. Hal tersebut diakibatkan oleh *boundary proximity* yang terjadi dengan bagian dasar saluran yang akan mempengaruhi perilaku *wake*. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Nitin & Arindam, menunjukkan bahwa semakin jauh jarak antara turbin dengan bagian dasar saluran maka *coefficient of power* turbin juga semakin meningkat (Nitin & Arindam, 2015).

Kedalaman sebuah saluran menjadi salah satu parameter utama yang dijadikan bahan pertimbangan menentukan ukuran turbin air. Dalam kasus turbin air, kedalaman sebuah saluran untuk bisa dijadikan area pemasangan turbin setidaknya memiliki variasi kedalaman mulai dari 1,5D hingga 3D dengan D adalah diameter turbin. Dengan nilai sekian, diharapkan nilai *blockage ratio*, yang merupakan rasio perbandingan antara luasan sapuan rotor terhadap luasan penampang sebuah saluran, memiliki nilai lebih dari 0,1. Dibawah keadaan tersebut, turbin akan mengalami efek *solid blockage* yang mempengaruhi medan aliran di sekitar turbin, sehingga akan mempengaruhi performa turbin (Stallard *et al.*, 2013).

2.11 Array Turbin

Energi yang dapat diekstrak dari sebuah saluran dapat dibatasi oleh dinamika pasang surut dan kedalaman yang dimiliki oleh saluran baik sungai maupun pasang surut air laut (*tidal*). Pada sebuah saluran dapat memiliki potensi energi rentang mulai dari beberapa mega watt untuk saluran kecil hingga beberapa giga watt untuk saluran besar (Ross Vennell *et al.* 2014). Untuk dapat memanfaatkan potensi energi tersebut, membangun Turbin Savonius dalam gugusan (*array*) lebih memungkinkan dibandingkan hanya dengan satu turbin.

Gugusan (*array*) turbin dibangun berbaris dengan jarak antar turbin ditentukan berdasarkan ukuran turbin, sehingga efisiensi daya yang dihasilkan dari gugusan turbin sangat dipengaruhi oleh interaksi hidrodinamika. Besarnya nilai efisiensi *array* turbin ditentukan dari perbandingan antara total daya yang dihasilkan dari *array* turbin dengan daya yang dihasilkan turbin tunggal. Besarnya nilai efisiensi tersebut sesuai dengan persamaan berikut:

$$eff = \frac{P_{farm}}{P_{ref.farm}} \quad (2.10)$$

$$P_{ref.farm} = P_s \cdot N \quad (2.11)$$

$$P_{ref} = \sum_i^N P_i \quad (2.12)$$

dimana P_{farm} adalah *power output* yang mampu dihasilkan *array* turbin. $P_{ref.farm}$ adalah daya referensi yang didapat dari daya yang dihasilkan oleh *stand alone* turbin (P_s) dikalikan dengan jumlah turbin yang dipasang pada *array* turbin. Dan P_i adalah daya yang dihasilkan masing-masing turbin dalam *array*.

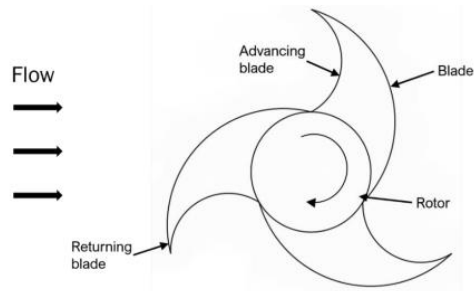
Terdapat dua aspek ekonomi yang mempengaruhi pengembangan *array* turbin pada sebuah saluran, yang pertama yaitu total energi yang dapat dihasilkan oleh *array* turbin dan yang kedua adalah energi yang dihasilkan oleh setiap turbin. Total energi yang dapat dihasilkan oleh *array* turbin menentukan *income* yang dihasilkan dari *array* turbin. Energi yang dihasilkan oleh setiap turbin menentukan banyaknya jumlah turbin yang dibutuhkan untuk mencapai total energi yang dibutuhkan dimana hal tersebut memoengaruhi biaya konstruksi (Ross Vennell *et al.* 2014).

2.12 Penelitian Terdahulu

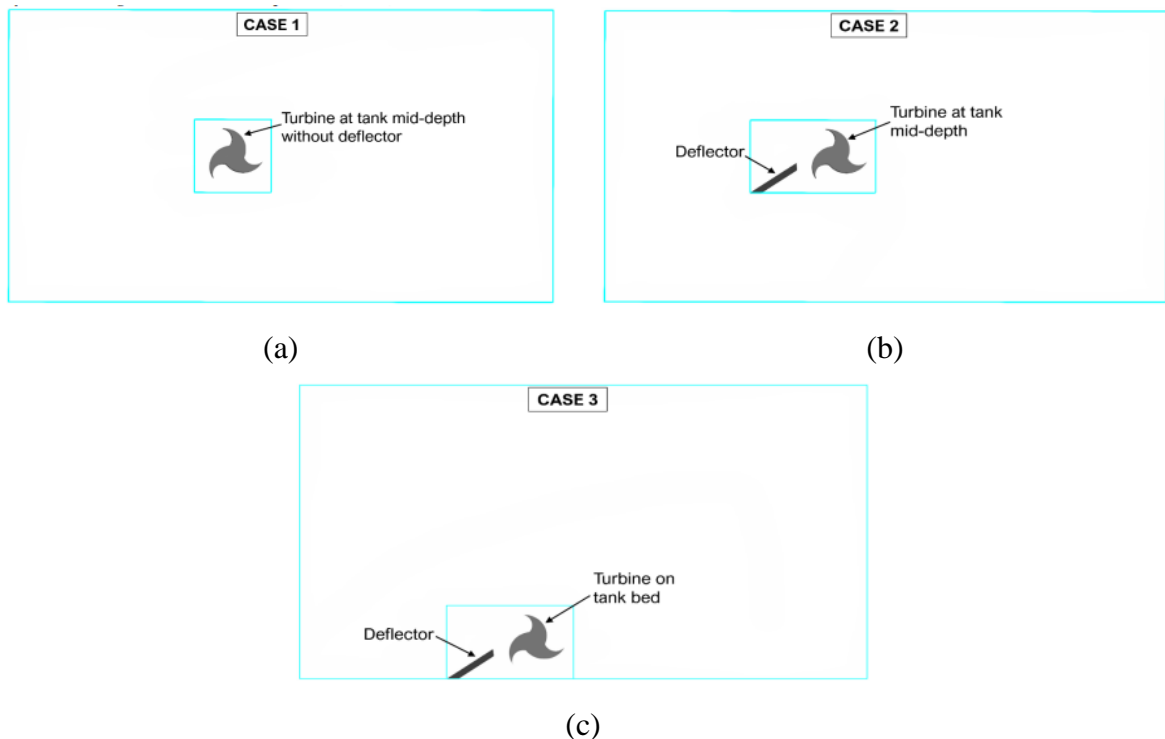
Beberapa penelitian telah dilakukan untuk memahami lebih lanjut tentang efek hidrodinamika yang terjadi pada turbin air dengan beberapa kondisi kedalaman aliran yang berbeda, baik yang mempelajari tentang *coefficient of power* maupun pemulihan *wake*. Berikut ini telah dirangkum beberapa penelitian terdahulu yang mempelajari tentang bagaimana pengaruh kedalaman aliran terhadap karakteristik turbin air.

2.12.1 Perbandingan Performansi Turbin Arus Laut Sumbu Horizontal dengan Mempertimbangkan *Deflector* dan Kedalaman Operasi Turbin (Nauman *et al.*, 2020).

Studi yang dilakukan oleh Nauman *et al* pada tahun 2020 ini mempelajari pengaruh *deflector* dan variasi kedalaman operasi turbin terhadap performansi turbin arus laut dengan poros horizontal. Jenis turbin yang digunakan pada studi ini adalah turbin *cross-flow* poros horizontal dan beroperasi dengan cara memanfaatkan gaya *drag* dari aliran. Bentuk turbin yang digunakan tersebut ditunjukkan pada gambar 2.11. Pada studi ini, terdapat tiga kasus yang dipelajari menggunakan metode simulasi menggunakan komputasi dinamika fluida (CFD) secara tiga dimensi dengan *software* Flow-3D, yang meliputi turbin tanpa *deflector*, turbin dengan *deflector*, dan turbin dengan *deflector* yang dioperasikan pada bagian *bed*. Adapun konfigurasi dari tiga kasus tersebut diilustrasikan pada gambar 2.12.



Gambar 2.11 Model turbin yang digunakan (Nauman *et al.*, 2020)

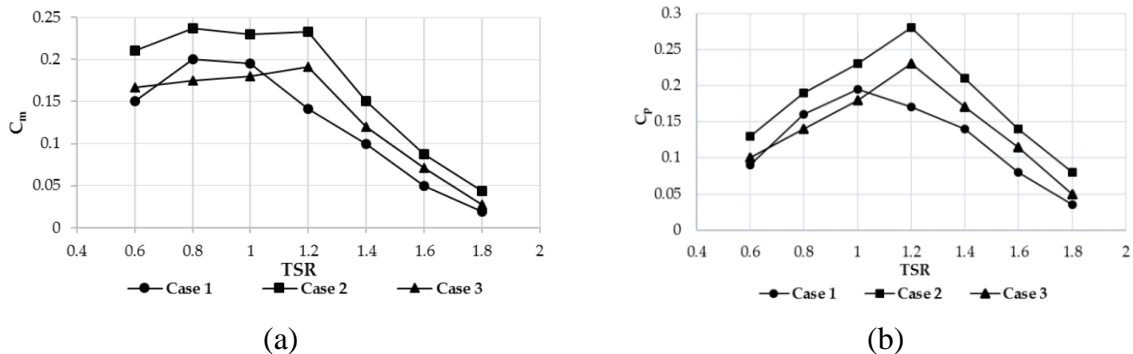


Gambar 2.12 Konfigurasi tiga kasus yang dipelajari; (a) turbin tanpa *deflector* yang diletakkan pada bagian tengah; (b) turbin dengan *deflector* yang diletakkan pada bagian tengah; dan (c) turbin dengan *deflector* yang diletakkan pada bagian dasar (*bed*) (Nauman *et al.*, 2020)

Beberapa parameter pada studi ini meliputi dimensi turbin, dimensi dan model *deflector*, dimensi *domain* komputasi, dan nilai kecepatan aliran. Dimensi turbin yang digunakan memiliki diameter turbin 0,95 m, radius lengkungan bagian dalam dan luar *blade* 0,17 dan 0,34 m, diameter poros 0,35 m, lebar 0,7 m, dan memiliki *end plate* dengan diameter 1,2 m dengan ketebalan 0,1 m. Pada kasus dua dan tiga yang menggunakan *deflector* dengan dua model *deflector* yaitu *flat deflector* dan *curved deflector*. Ketebalan *deflector* 0,15 m dengan sudut kemiringan 25° relatif terhadap sumbu horizontal. Sedangkan nilai kecepatan aliran adalah 0,7 m/s.

Hasil yang didapatkan pada studi yang dilakukan oleh Nauman *et al* ini mengemukakan bahwa dari tiga kasus yang dipelajari, pada kasus 2, yang menempatkan turbin pada bagian tengah aliran dengan jarak 2D dari permukaan dan dasar aliran dengan ditambahkan *deflector*, menunjukkan hasil yang paling optimal diantara kasus yang lainnya. Hasil tersebut dibuktikan oleh grafik *tip speed ratio vs coefficient of torque* dan grafik *tip speed ratio vs coefficient of power* yang ditunjukkan pada gambar 2.13(a) dan 2.13(b) Dari grafik yang

membandingkan kinerja turbin dalam tiga kasus tersebut, dapat dilihat bahwa dalam keadaan nilai TSR yang sama, turbin dalam kasus dua selalu memiliki nilai yang lebih besar, baik dalam *coefficient of torque* maupun *coefficient of power*.

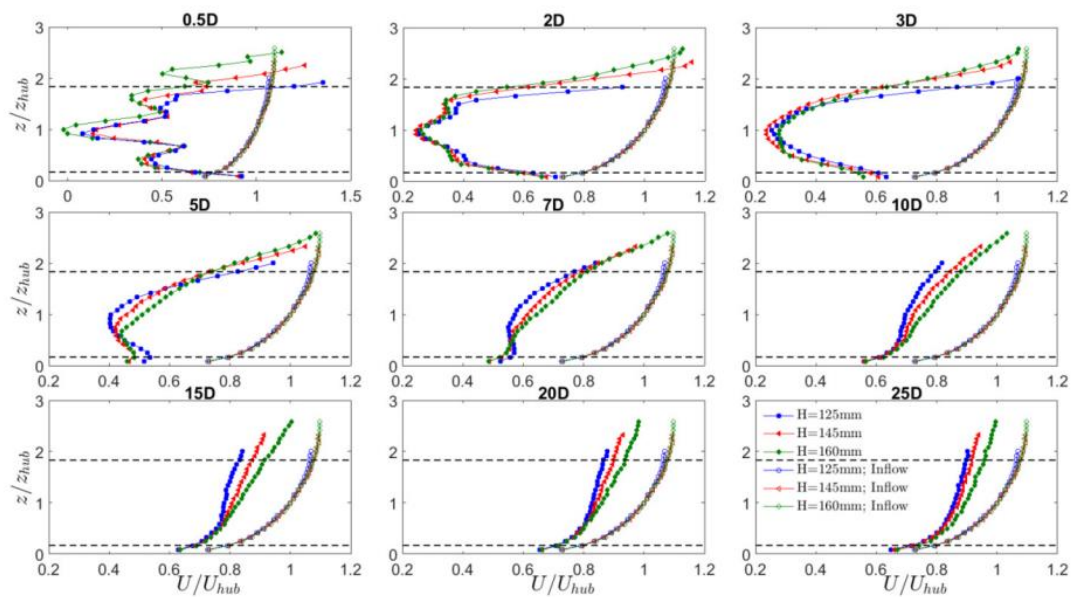


Gambar 2.13 Hasil yang didapatkan dari hasil studi (a) grafik TSR vs *coefficient of torque* dan (b) grafik TSR vs *coefficient of power* dari tiga kasus yang berbeda (Nauman *et al.*, 2020)

Penambahan *deflector* pada bagian depan turbin dengan sudut kemiringan yang optimal dapat meningkatkan performansi turbin. Hal tersebut dibuktikan dengan membandingkan kasus satu dan dua yang menempatkan turbin pada posisi yang sama dengan menambahkan *deflector* pada kasus dua dan didapatkan bahwa turbin pada kasus dua memiliki nilai *coefficient of torque* dan *coefficient of power* yang lebih besar. Kemudian, tingkat kedelaman dan jarak operasi turbin terhadap bagian dasar sebuah saluran juga mempengaruhi performansi turbin. Semakin dekat posisi turbin dengan bagian dasar saluran semakin sedikit energi yang mampu diekstrak oleh turbin karena *velocity* dari sebuah aliran akan terpengaruh oleh gesekan yang terjadi antara aliran dengan permukaan dasar saluran. Hal tersebut dibuktikan dengan hasil studi pada kasus dua yang menunjukkan performansi turbin lebih baik dibandingkan dengan kasus tiga.

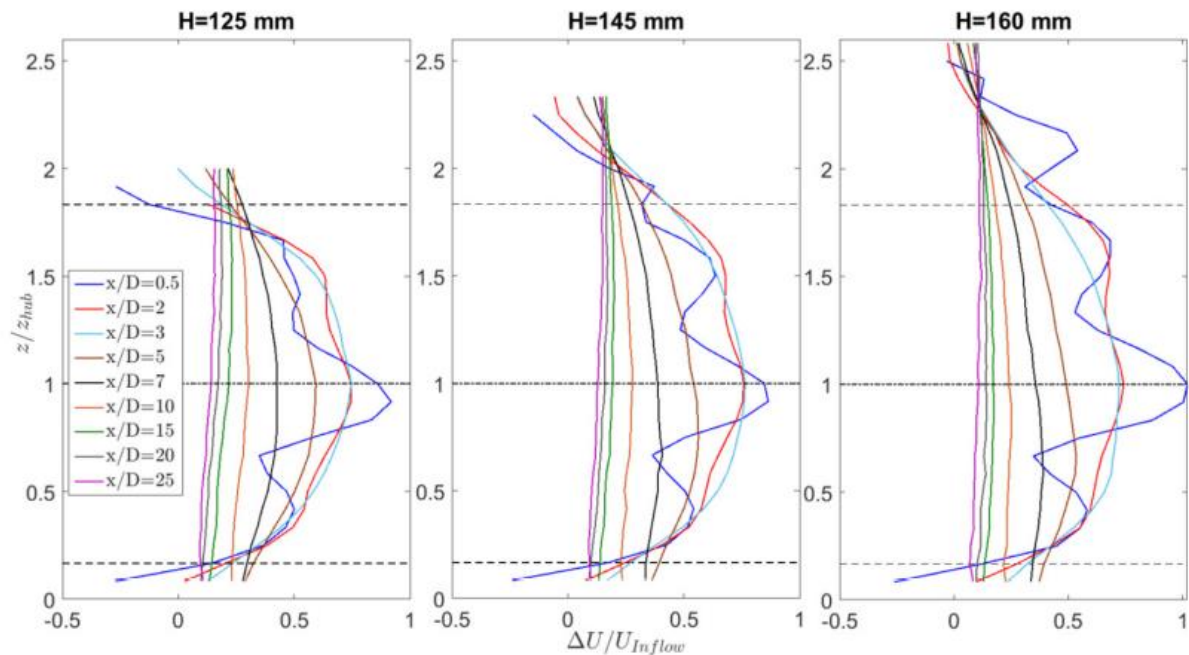
2.12.2 Efek dari Variasi Kedalaman Aliran pada Pemulihan Wake Dibelakang Turbin Hidrokinetik dengan Sumbu Horizontal (Payam & Corey, 2018)

Pada tahun 2018, Payam dan Corey melakukan investigasi untuk mempelajari efek yang ditimbulkan dari variasi kedalaman aliran terhadap pola perilaku *wake* dibelakang sebuah *in-stream turbine* dengan poros horizontal. Penelitian dilakukan dengan eksperimen pada sebuah turbin dengan tiga *blade* berdiameter 100 mm yang diuji pada saluran dengan ukuran panjang 30 m, lebar 90 cm, dan kedalaman 30 cm. Turbin diletakkan 6 cm yang diukur dari *hub* ke dasar saluran sehingga memiliki nilai perbandingan $Z_{hub}/D = 0.6$ secara konsisten, dimana nilai tersebut disesuaikan dengan proyek yang dilakukan pada East River, New York City. Variabel bebas yang digunakan adalah nilai kedalaman 125 mm, 145 mm, dan 160 mm dengan perbandingan *depth to diameter ratio* (H/D) 1,25., 1,45., dan 1,60 dimana dua dari tiga nilai perbandingan tersebut dibawah nilai minimal 1,5 yang diaplikasikan pada skala penuh turbin tidal. Kecepatan aliran datang diatur homogen dengan nilai 0,45 m/s dan memiliki nilai *Reynold Number* 45000. Variabel terikat diamati di daerah yang ditentukan yaitu di daerah *downstream* dengan jarak 0,5D., 2D, 3D, 5D, 7D, 10D, 15D, 20D, dan 25D dan juga di daerah *upstream* dengan jarak -0,5D sebagai nilai acuan.



Gambar 2.14 Profil kecepatan rata-rata dari *wake* pada beberapa lokasi di daerah *downstream* turbin (Payam & Corey, 2018)

Pada penelitian ini menampilkan grafik profil kecepatan rata-rata dari *wake* pada beberapa lokasi di daerah *downstream* turbin seperti yang ditampilkan pada gambar 2.14. Pada gambar tersebut dapat diamati besarnya *velocity deficit* yang terjadi pada variasi kedalaman 125 mm, 145mm, dan 160 mm yang diamati pada jarak yang sudah ditentukan. Besarnya *velocity deficit* dapat dihitung dengan selisih antara profil kecepatan *inflow* dengan profil kecepatan *wake* pada nilai Z/Z_{hub} yang sama. *Velocity deficit* terbesar terjadi pada posisi tepat dibelakang *hub*, yaitu dimana nilai $Z/Z_{hub} = 1$ yang dimiliki oleh keadaan dengan kedalaman 160 mm pada jarak 0.5D. Pada jarak 3D, cacat kecepatan lokal yang terjadi mulai disebarkan, dimana *wake* pada eksperimen dengan saluran yang lebih dalam mulai terpulihkan lebih cepat dibandingkan dengan saluran yang lebih dangkal. Pada jarak 10D, semua *wake* terseparasikan dengan pemulihan *wake* lebih cepat terjadi pada aliran yang lebih dalam. Pada jarak 25D, profil kecepatan telah kembali ke bentuk yang mirip dengan profil kecepatan *inflow* tetapi tetap terdapat *velocity deficit*. Sementara profil *velocity deficit* yang terjadi di setiap jarak dan kedalaman yang diamati ditampilkan pada gambar 2.15.

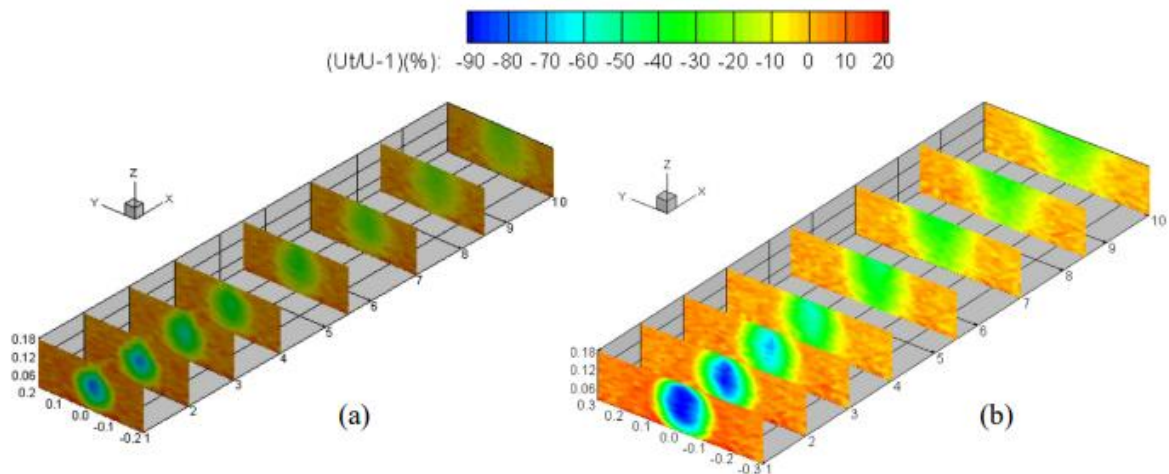


Gambar 2.15 Profil *velocity deficit* di sembilan lokasi *downstream* turbin (Payam & Corey, 2018)

Pada penelitian ini menyimpulkan bahwa *wake* yang terjadi pada aliran yang lebih dalam, yang berarti memiliki energi kinetik rata-rata dari aliran datang yang lebih besar, dapat terpulihkan lebih cepat dalam hal kecepatannya tetapi lebih lambat dalam hal intensitas turbulensi. Hal tersebut dapat dihubungkan dengan rasio kedalaman terhadap diameter turbin. Untuk aliran yang lebih dalam, untuk jarak berapapun pada *downstream* dari turbin pertama, terdapat lebih banyak energi dan intensitas turbulensi untuk turbin selanjutnya dalam gugusan turbin. Hal tersebut menjadi keuntungan bagi *downstream* turbin dalam hal ketersediaan energi, tetapi merugikan dalam hal beban *fatigue*.

2.12.3 Studi Eksperimen Efek Hidrodinamika dari Rasio Perbandingan Diameter Rotor Terhadap Kedalaman Air (Yaling *et al.*, 2019)

Penelitian yang dilakukan oleh Yaling *et al* pada tahun 2019 ini mempelajari tentang efek hidrodinamika yang ditimbulkan dari rasio perbandingan diameter rotor terhadap kedalaman air yang dilakukan secara eksperimen. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan turbin tidal dengan poros horizontal yang dimodelkan oleh dua cakram berpori dengan diameter yang berbeda yaitu 0,1 m dan 0,15 m dengan ketebalan yang sama 6 mm. Pengujian dilakukan pada sebuah saluran dengan panjang 20 m, lebar 2,1 m, dan kedalaman 0,5 m dimana turbin dipasang pada bagian tengah saluran. Nilai perbandingan diameter terhadap kedalaman D/H yang digunakan adalah 47,62% dan 71,43%. Kecepatan rata-rata aliran datang diatur agar bernilai 0,24 m/s sehingga nilai dari *Reynold number* dari aliran adalah 50000. Dalam arah melintang, distribusi *longitudinal velocity* dan intensitas turbulensi hampir mendekati seragam, dan pengaruh dinding bagian samping kecil. Pengambilan data untuk dianalisa dilakukan pada daerah *downstream* pada jarak 1D, 2D, 3D, 4D, 5.5D, 7D, 8.5D, dan 10D. Pengujian kemudian dilakukan validasi dengan menggunakan *software* CFD dan didapatkan hasil seperti pada gambar 2.16.



Gambar 2.16 Struktur *velocity deficit* pada penampang melintang (a) $D/H = 47.62\%$ dan (b) $D/H = 71.43\%$ sepanjang daerah *downstream* rentang 1-10D (Yaling *et al.*, 2019)

Dari gambar 2.16 dapat dilihat bahwa puncak *velocity deficit* terjadi pada pusat *wake* yang terjadi tepat dibelakang turbin. Nilai *velocity deficit* semakin meningkat ketika nilai rasio perbandingan diameter terhadap kedalaman diperbesar. *Velocity deficit* mulai berkurang seiring dengan bertambahnya jarak *wake* dari turbin. *Velocity deficit* menjadi hampir seragam pada area *wake* setelah melewati jarak 3D untuk cakram satu dan 4D untuk cakram dua. Dalam arah vertikal, *velocity deficit* berkembang tidak sampai selesai baik pada cakram satu dan cakram dua diakibatkan terbatasnya kedalaman. Untuk cakram dua, daerah *wake* diperluas secara linier keatas sepanjang kedalaman air setelah melewati jarak 4D di daerah *downstream*.

Pada penelitian ini menyimpulkan bahwa *wake velocity deficit* pada daerah *downstream* meningkat seiring dengan nilai *diameter to depth ratio* yang semakin besar, meskipun nilai *thrust coefficient* dari dua cakram sangat mirip. *Diameter to depth ratio* juga mempengaruhi struktur *wake*, baik *near wake* maupun *far wake*. Ketika *diameter to depth ratio* meningkat, daerah utama percampuran *wake* berpindah semakin ke belakang, panjang pemulihan *wake* diperpanjang, dan *far wake* diperluas ke samping dan ke atas sepanjang kedalaman aliran. Hal tersebut menunjukkan bahwa daya maksimal yang mampu dihasilkan dari sebuah area yang diberikan harus mempertimbangkan ukuran rotor turbin, karena jarak membujur dan menyamping yang optimal antara turbin-turbin semakin meningkat seiring semakin besarnya ukuran rotor turbin dan jumlah yang dapat dibangun semakin berkurang. Turbin diharapkan dipasang diatas tengah-tengah kedalaman untuk menangkap lebih banyak energi kinetik, sehingga pemulihan *wake* pada arah vertikal dibatasi oleh permukaan aliran dan menyebar menuju arah melintang.

2.12.4 Kesimpulan

Dari beberapa referensi penelitian yang dilakukan seperti yang sudah disebutkan diatas dapat disimpulkan bahwa penambahan *deflector* pada bagian *returning blade* dengan sudut kemiringan yang optimal dapat meningkatkan performansi turbin. Kemudian faktor lain yang juga mempengaruhi performansi dari turbin adalah jarak pemasangan turbin terhadap dasar saluran, dimana semakin dekat jarak turbin dengan dasar saluran maka performansi turbin akan menurun karena energi yang dapat diekstrak oleh turbin berkurang akibat pengaruh gaya gesek dari permukaan dasar saluran yang mengurangi nilai kecepatan aliran di sekitar permukaan dasar saluran.

Selain *dari* sisi performansi turbin, perlu juga mempelajari karakteristik *wake* yang dihasilkan oleh suatu turbin dimana hal tersebut penting untuk *array* turbin. Nilai perbandingan diameter turbin air dengan kedalaman saluran dapat mempengaruhi karakteristik *wake* yang terbentuk di daerah *downstream* turbin. Semakin kecil nilai perbandingan kedalaman dengan diameter turbin (*depth to diameter ratio*) maka semakin panjang pula *wake* dapat terpulihkan sehingga akan berdampak pada berkurangnya jumlah energi yang dapat diekstrak oleh *downstream* turbin pada *array* turbin.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tahap Pre-Processing

Studi numerik yang mempelajari tentang pengaruh *depth to diameter ratio* terhadap *wake recovery* pada *cross-flow hydrokinetik turbine* dengan pemandu arah aliran dilakukan dengan beberapa tahapan. Tahap awal yang dilakukan dari studi ini adalah tahap persiapan atau *pre-processing*. Setelah dilakukan perumusan masalah, studi literatur, dan pengumpulan data serta sumber pendukung lainnya, di tahap ini dilakukan penentuan variabel, memodelkan geometri objek penelitian dan domain simulasi, proses *meshing*, menentukan kondisi batas, dan parameter simulasi. Berikut ini adalah penjelasan lebih detail dari tiap tahapan *pre-processing*.

3.1.1 Variabel Penelitian

Pada tahap ini ditetapkan variabel yang digunakan, yaitu terdapat variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol. Variabel bebas yang ditetapkan adalah *depth to diameter ratio* (d/D) dimana d adalah kedalaman saluran yang diukur dari permukaan air hingga ke dasar saluran dan D adalah diameter rotor turbin, dan kecepatan aliran air rata-rata (U_∞) yang memasuki domain (*water velocity inlet*). Nilai dari variasi pada setiap variabel bebas tersebut ditunjukkan pada tabel 3.1. Selain itu, terdapat variabel terikat yang ditetapkan adalah *velocity deficit* dan *turbulence kinetic energy*. Beberapa variabel kontrol yang digunakan pada studi ini diantaranya adalah domain simulasi, fluida dua fasa yaitu air dan udara, model turbulensi, properti air dan udara, model aliran, dan metode *solver* dalam tahap *processing* menggunakan *software* Ansys CFX.

Tabel 3.1 Variasi variabel bebas dan nilainya

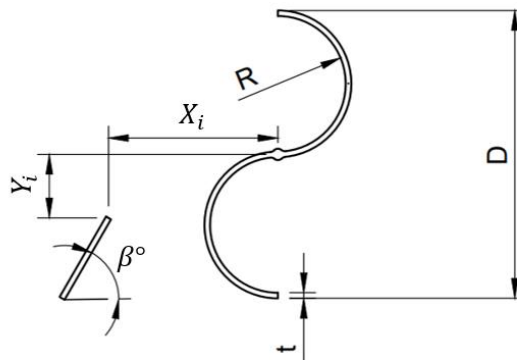
Variasi Variabel Bebas	Nilai
<i>Depth to diameter ratio</i> (d/D)	1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5
<i>water velocity inlet</i> (U)	0,8 m/s dan 1,2 m/s

Nilai *depth to diameter ratio* yang digunakan dipilih berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Stallard et al. 2013 dimana penulis menyatakan bahwa gugusan turbin diharapkan dipasang pada saluran yang memiliki kedalaman dalam rentang 1,5 hingga 3 kali diameter turbin (D). Nilai 1,2 digunakan untuk dilakukan studi ketika permukaan aliran berada dekat *blade-tip* turbin. Sedangkan nilai 5 digunakan untuk dilakukan studi ketika permukaan aliran semakin jauh dari turbin. Variasi *water velocity inlet* dipilih berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Purba et al., 2015 bahwa kecepatan arus laut di Indonesia memiliki rentang antara 0-1 m/s, hanya beberapa daerah yang memiliki kecepatan arus hingga 3 m/s. Pada studi yang dilakukan kali ini juga ditentukan nilai TSR dari turbin yaitu sebesar 0.9.

3.1.2 Pemodelan Geometri dan Domain Simulasi

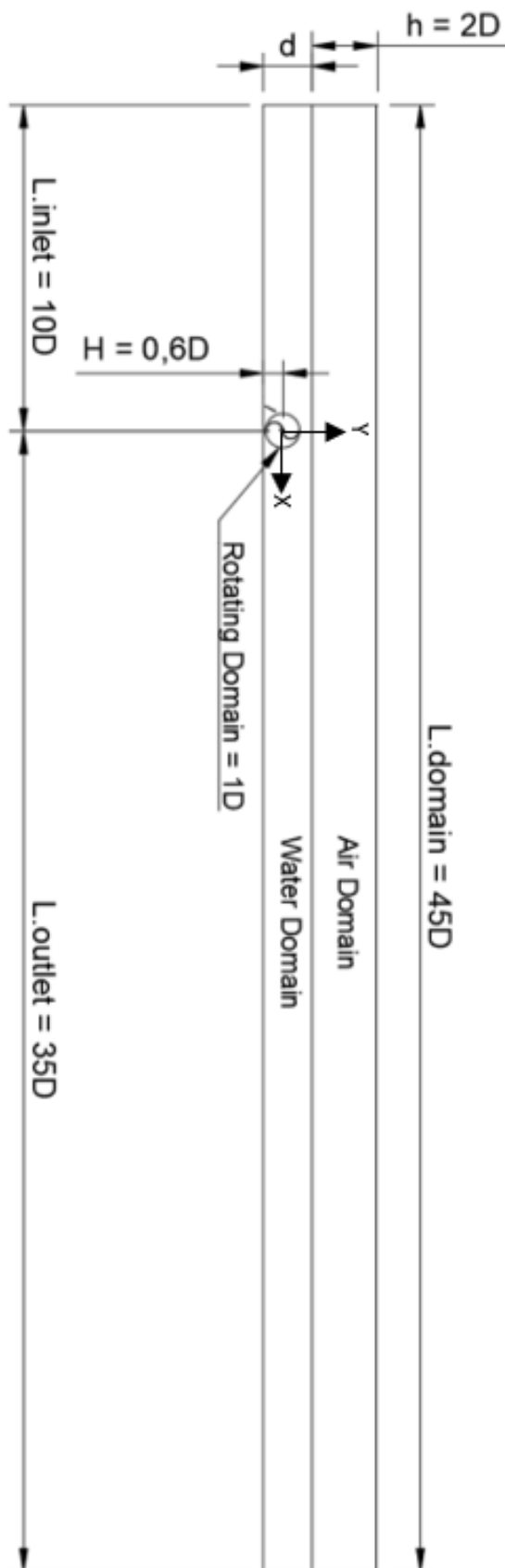
Pemodelan geometri rotor *cross-flow hydrokinetik turbine* dan pemandu arah aliran (*deflector*) dilakukan dengan menggunakan *software* Autodesk Fusion 360 dengan *student license*. Model geometri rotor turbin menggunakan dua *blade* yang memiliki diameter (D) 100 mm, radius kelengkungan tiap *blade* (R) 12.5 mm, ketebalan (t) 2 mm, dan memiliki radius hub (r) 2 mm. Parameter geometri yang digunakan diadaptasi dari Dandun et al (2020), sehingga, nilai TSR juga dapat diadaptasi pada nilai kecepatan aliran yang sama.

Pemodelan pada geometri *deflector* memiliki parameter-parameter yang diadaptasi dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Kailash et al (2010) dengan sudut kemiringan $\beta = 60^\circ$, jarak horizontal bagian atas *deflector* terhadap titik pusat poros turbin dibanding radius *blade* (X_i/D) = 1.24, jarak vertikal bagian atas *deflector* terhadap titik pusat poros turbin dibanding radius *blade* (Y_i/D) = 0,45, dengan ketebalan *deflector* 2 mm. Beberapa parameter tersebut diilustrasikan pada gambar 3.1.

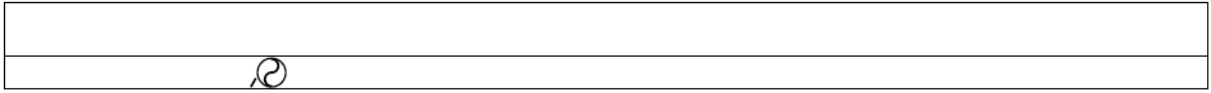


Gambar 3.1 Model turbin *cross-flow hydrokinetik* dengan beberapa parameter

Berbeda dengan geometri rotor dan *deflector*, geometri domain aliran dibuat pada Ansys Desain Modeler. Terdapat dua domain statis (*stationary domain*) yang digunakan yaitu domain untuk fluida air dan domain untuk fluida udara dengan terdapat tambahan sub-domain pada bagian domain air yang berputar (*rotary domain*). Domain statis merupakan daerah aliran berbentuk persegi panjang yang tidak bergerak. Domain ini hanya terdiri atas satu zona fluida. Adapun rotating domain adalah domain berbentuk lingkaran di sekitar rotor yang sepusat dengan sumbu putar rotor dan berdiameter sama dengan rotor. Domain statis memiliki parameter yang tetap dan berubah dimana setiap parameter diukur terhadap titik *origin* yang diletakkan pada bagian titik pusat rotor turbin. Parameter yang tetap adalah jarak inlet (L_{inlet}) 10 D , jarak outlet (L_{outlet}) 35 D , jarak dasar permukaan saluran (H) 0,6 D , dan ketinggian domain udara (h) 2 D . sedangkan domain yang berubah adalah ketinggian air yang diukur terhadap dasar saluran (d) yang disesuaikan berdasarkan 6 variasi nilai *depth to diameter ratio* yaitu 1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5.



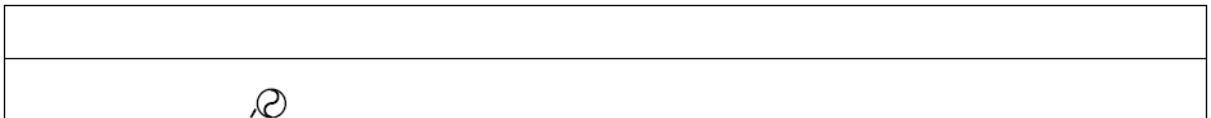
Gambar 3.2 *Stationary domain* udara dan air dan *Rotary domain* atau sub-domain



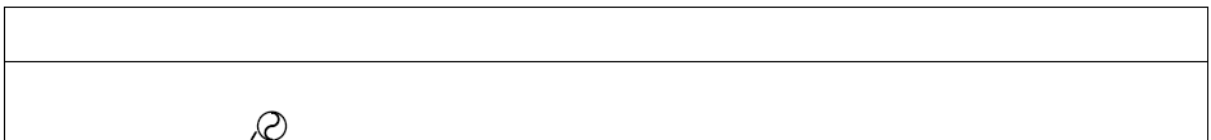
(a)



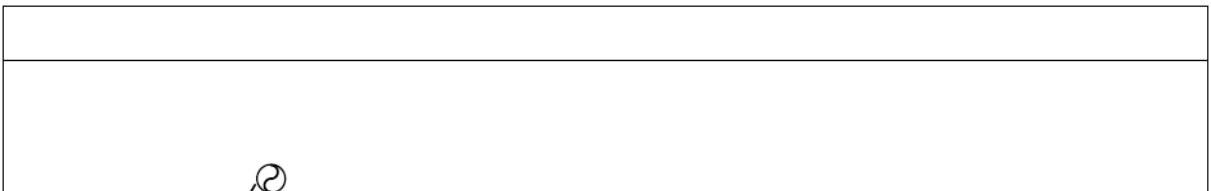
(b)



(c)



(d)



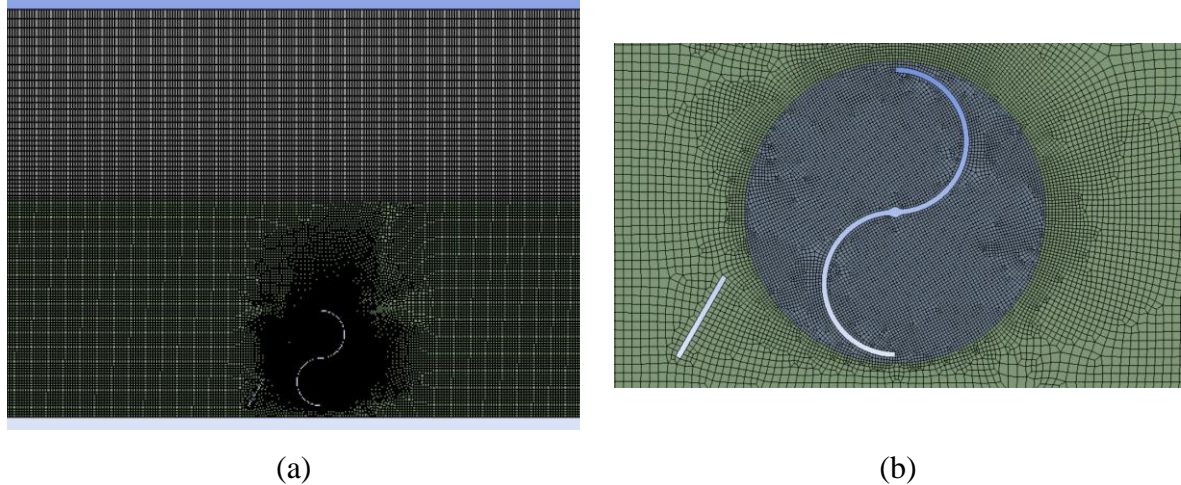
(e)

Gambar 3.3 Domain variasi nilai *depth to diameter ratio* (d/D): (a) 1.2, (b) 1.5, (c) 2.25, (d) 3, (e) 5

3.1.3 Proses Meshing

Setelah dilakukan pemodelan geometri rotor turbin dan domain, tahapan selanjutnya adalah proses *meshing*. Proses *meshing* ini merupakan proses diskretisasi domain yang bertujuan membagi tiap zona aliran menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana setiap persamaan aliran diselesaikan oleh software CFD di tiap elemen domain. Pembuatan *meshing* dibuat menggunakan *Ansys Meshing*. Model *mesh* yang digunakan mempertimbangkan kualitas *mesh* dan akurasi simulasi serta *computational effort*. Oleh karena itu dilakukan perbedaan *sizing* elemen *mesh* pada beberapa kondisi. Pada daerah *interface* yang menghubungkan antar domain air dan udara, ukuran elemen *mesh* dibuat rapat untuk menangkap fenomena fluida di

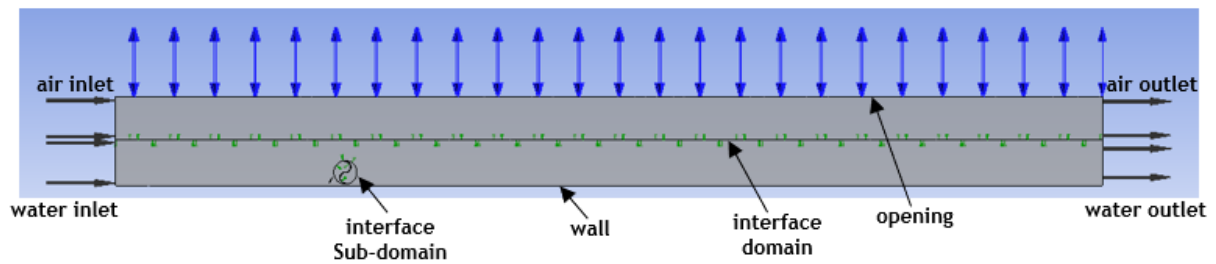
daerah transisi. Demikian juga daerah yang dekat dengan turbin dan *deflector* untuk menangkap fenomena fluida di sekitar turbin. Sedangkan pada daerah yang jauh dari *interface*, turbin, dan *deflector* dibuat renggang untuk mempersingkat waktu simulasi. Baik domain air, domain udara, dan sub-domain air (*rotary domain*) digunakan metode *meshing* Hexahedron dengan menggunakan algoritma *multizone*. Untuk membuat *mesh* yang lebih rapat pada daerah yang telah disebutkan, digunakan *face sizing* untuk mengatur *element size* agar ukurannya menjadi lebih kecil. Hasil model *meshing* yang digunakan ditampilkan pada gambar 3.4 dibawah ini.



Gambar 3.4 *Meshing* pada (a) keseluruhan domain, (b) didaerah sekitar silinder

3.1.4 Boundary Conditions

Boundary conditions atau kondisi batas merupakan salah satu kontrol awal dalam proses perhitungan di CFD di mana pengguna harus memasukkan kontrol awal di tiap batas domain simulasi. Penentuan dan pengaturan kondisi batas diterapkan pada bagian sisi-sisi domain simulasi yang meliputi *inlet*, *outlet*, *opening*, *symetry*, *wall*, dan *interface* pada model domain. Pada bagian sisi domain yang dianggap sebagai tempat masuknya fluida, baik udara maupun air, didefinisikan sebagai *inlet* yaitu *inlet* air dan *inlet* udara. Pada bagian sisi bawah domain yang dianggap sebagai dasar saluran (*bed surface*) didefinisikan sebagai *wall*. Pada bagian sisi atas domain dianggap sebagai batas daerah domain udara yang dipelajari dengan didefinisikan sebagai *opening* dengan tujuan bahwa diatas batas domain tersebut masih terisi oleh fluida yang sama dan memungkinkan fluida yang keluar melewati sisi *opening* untuk bisa memasuki area domain kembali. Pada bagian sisi domain yang dianggap sebagai tempat keluarnya fluida, baik udara maupun air, didefinisikan sebagai *outlet* yaitu *outlet* air dan *outlet* udara. Pada bagian sisi dimana domain yang berbeda saling berinteraksi, baik antara domain dengan domain ataupun domain dengan sub-domain, didefinisikan sebagai *interface*.



Gambar 3.5 *Boundary condition* yang ditetapkan

3.2 Solver / Tahap Processing

Setelah model dibuat dan proses *meshing* selesai, tahapan berikutnya adalah tahap pengaturan *solver* untuk simulasi atau disebut juga tahap *processing*. Pada tahap ini, digunakan program ANSYS CFX untuk menyimulasikan aliran dalam domain yang telah melewati proses *meshing*. Beberapa hal yang diatur dalam tahap *processing* antara lain adalah menentukan kondisi fisis dan properti fluida di setiap domain, menentukan model dan input nilai kondisi batas, dan terakhir adalah pengaturan di bagian *solver*.

3.2.1 Menentukan Kondisi Fisis dan Properti Fluida di Setiap Domain

Setelah model dibuat dan proses *meshing* selesai, tahapan berikutnya adalah tahap pengaturan *solver* untuk simulasi atau disebut juga tahap *processing*. Pada tahap ini, digunakan program ANSYS CFX untuk menentukan kondisi fisis, properti fluida, dan menyimulasikan aliran dalam domain yang telah melewati proses *meshing*. Karena aliran berupa aliran pada saluran terbuka maka digunakan kondisi fisis multiphase dengan fraksi fluida berupa dua fluida kerja, pertama adalah udara dan kedua adalah air. Model turbulen yang digunakan adalah $k-\epsilon$ turbulen model. Model ini dipilih karena $k-\epsilon$ turbulen model menjadi salah satu model turbulen yang paling menonjol dan yang paling banyak digunakan di sebagian besar CFD dengan tujuan umum dan dianggap sebagai model standar industri.

Kondisi fisis dan properti fluida kerja yang digunakan pada simulasi ini adalah sebagai berikut dalam Tabel 3.2 di bawah ini :

Tabel 3.2 Kondisi fisis dan poperti fluida

Kondisi Fisis dan Properti	Domain Udara	Domain Air	Sub-Domain Air
<i>Material</i>	Udara (25°C)	Air	Air
<i>Reference Pressure</i>	1 atm		
<i>Buoyancy Model</i>	Buoyant		
<i>Gravity</i>	9.82 m/s		
<i>Buoy. Ref. Density</i>	1.182 kg/m^3		
<i>Domain Motion</i>	Stationary	Stationary	Rotating ($14,4 \frac{rad}{s}$ dan $21,6 \frac{rad}{s}$)
<i>Fluid Model</i>	<i>Multiphase, homogenous model, free surface model</i>		
<i>Heat Transfer</i>	None		
<i>Turbulence</i>	<i>k-ε turbulent</i>		
<i>Interphase Transfer</i>	<i>Mixture model</i>		
Fraksi Volume	Udara : 1 Air : 0	Udara : 0 Air : 1	Udara : 0 Air : 1

3.2.2 Menentukan Model dan Input Nilai Kondisi Batas

Setelah setiap domain sudah diatur dan kondisi batas telah didefinisikan pada tahap *pre-processing*, maka di dalam tahap *solver/processing* ini nilai dari kondisi batas dimasing-masing domain dimasukkan, seperti pada Tabel 3.3 hingga 3.5 berikut ini :

Tabel 3.3 Kondisi batas domain udara

Kondisi Batas	Keterangan
<i>Inlet</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Inlet</i>
<i>Flow regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>Normal speed</i>
<i>Normal Speed</i>	0 m/s
<i>Turbulence</i>	<i>Medium</i>
<i>Fraksi volume</i>	Udara : 1 Air : 0
<i>Outlet</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Outlet</i>
<i>Flow regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>Average statis pressure</i>
<i>Relative pressure</i>	0 Pa
<i>Opening</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Opening</i>
<i>Flow regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>Opening pres. and Dirn</i>
<i>Fraksi volume</i>	Udara : 1 Air : 0

Tabel 3.4 Kondisi batas domain air

Kondisi Batas	Keterangan
<i>Inlet</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Inlet</i>
<i>Flow regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>Normal speed</i>
<i>Normal Speed</i>	0,8 m/s dan 1.2 m/s
<i>Turbulence</i>	<i>k and epsilon</i>
<i>Turb. Kinetic Energy</i>	0,00142 m ² /s ² dan 0,00289 m ² /s ²
<i>Turb. Eddy Dissipation</i>	0,000689 m ² /s ³ dan 0,002 m ² /s ³
Fraksi volume	Udara : 0 Air : 1
<i>Outlet</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Outlet</i>
<i>Flow regime</i>	<i>Subsonic</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>Average statis pressure</i>
<i>Relative pressure</i>	0 Pa
<i>Wall</i>	
<i>Boundary type</i>	<i>Wall</i>
<i>Mass and Momentum</i>	<i>No slip wall</i>
<i>Wall roughness</i>	<i>Smooth wall</i>

Tabel 3.5 Kodisi batas antar domain (*Interface*)

Kondisi Batas	Keterangan
Domain udara – domain air	
<i>Interface type</i>	<i>Fluid-fluid</i>
<i>Interface model</i>	<i>General connection</i>
<i>Frame change/mixing model</i>	<i>None</i>
Domain air – sub domain air	
<i>Interface type</i>	<i>Fluid-fluid</i>
<i>Interface model</i>	<i>General connection</i>
<i>Frame change/mixing model</i>	<i>Transient rotor stator</i>

3.2.3 Solver

Setelah identifikasi dan mendefinisikan kondisi batas, kemudian dilakukan mengatur solver agar hasil yang didapatkan sesuai. Model simulasi dilakukan secara *unsteady* atau *transient* dengan diatur *analysis type* sebagai *transient blade row* yang mampu menghitung waktu satu periode putaran turbin secara otomatis berdasarkan nilai kecepatan angular yang diatur. Kemudian pada bagian *time step* diatur *number of timestep per period* untuk mengatur berapa banyak perhitungan yang dilakukan dalam satu kali periode putaran. Pada simulasi ini diatur 72 pada *number of timestep per period* yang menunjukkan perhitungan dilakukan tiap 5° (360°/72). Setelah itu diatur 13 *number of periods per run* pada *time duration* yang menunjukkan bahwa simulasi dilakukan sebanyak 13 putaran dimana diambil 13 putaran berdasarkan nilai torsi dari turbin yang sudah mulai stabil pada putaran tersebut.

Pada bagian *solver*, terdapat beberapa parameter yang diatur diantaranya adalah pilihan untuk *advection scheme* dipilih *high resolution*. Dengan pengaturan ini, nilai *blend factor* bervariasi di seluruh domain berdasarkan bidang solusi lokal untuk menerapkan kriteria batasan. Di daerah aliran dengan gradien variabel rendah, *blend factor* akan mendekati 1.0 untuk akurasi. Di daerah di mana gradien berubah tajam, *blend factor* akan menjadi mendekati 0,0 untuk mencegah *overshoot* dan *undershoot* dan mempertahankan ketahanan. Pada pilihan pengaturan *transient scheme* dipilih opsi *second order backward euler* dimana skema ini pada umumnya direkomendasikan untuk kebanyakan simulasi *transient*.

Pilihan selanjtnya yaitu residual target dimana residual adalah salah satu kriteria yang menentukan keberhasilan simulasi numerik. Perubahan yang dilihat dari residual adalah kemampuannya untuk mencapai konvergen setelah menjalani diskritisasi. Nilai residual ditargetkan untuk mencapai konvergensi pada angka 10^{-5} pada simulasi numerik ini sebagai tanda keberhasilan simulasi atau ketika nilai kecepatan rata-rata pada daerah tepat sebelum mencapai rumah turbin menunjukkan nilai dengan rata-rata yang sama pada setiap iterasi.

3.3 Tahap *Post-Processing*

Tahap post-processing dalam penelitian ini merupakan tahap di mana data-data hasil simulasi diambil dan diolah. Data hasil simulasi dari software ANSYS CFX. Adapun data-data akan diambil pada kondisi turbin di putaran yang stabil (turbin telah berada pada kondisi operasional yang steady).

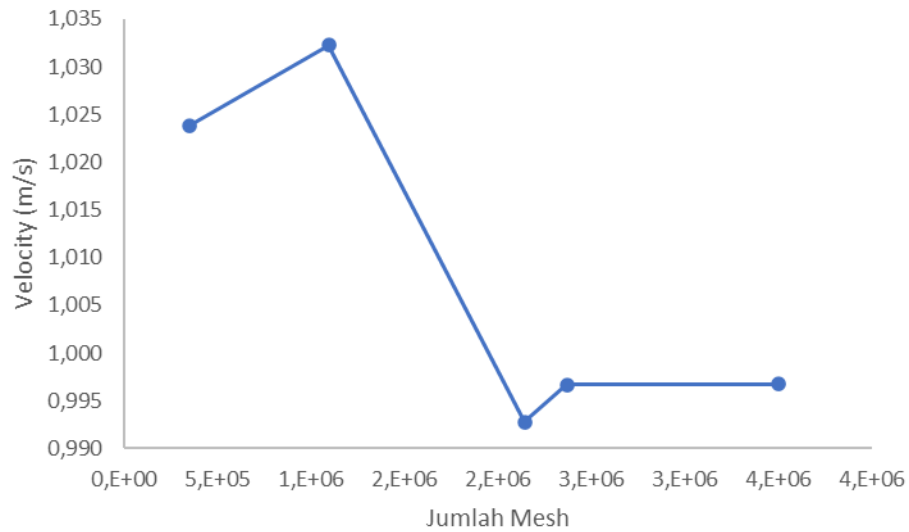
3.3.1 Grid Independency Test

Grid Independency Test dilakukan agar hasil dari simulasi ini tidak bergantung kepada kualitas dan kerapatan dari mesh yang ada. Oleh karena itu dilakukan grid independency test di lokasi $X = 2500$ mm dan $Y = 150$ mm. Lokasi ini dipilih karena daerah ini merupakan salah satu daerah tinjauan yang akan dibandingkan pada setiap variasi.

Data kuantitatif kecepatan fluida air digunakan sebagai parameter dalam grid independency test pada simulasi ini. Grid Independency test ini dilakukan dengan 2 jenis model mesh yaitu hexahedral dan tetrahedral dengan variasi jumlah element mesh dimana jumlah element mesh pada setiap variasi ditunjukkan pada tabel 3.6. Pada tabel tersebut juga menunjukkan nilai *approximate error* dari nilai kecepatan fluida di titik yang sama dengan acuan jumlah element mesh sebelumnya. Dari nilai jumlah mesh dan *approximate error*, kemudian didapatkan bahwa dengan penggunaan model mesh hexahedral mampu menghasilkan jumlah elemen mesh yang relatif lebih kecil dibandingkan dengan model tetrahedral dengan nilai *approximate error* sekitar 0,821% dibandingkan dengan model mesh tetrahedral dengan jumlah mesh 1.095.352. Oleh karena itu, untuk mempercepat proses komputasi, maka digunakan model mesh hexahedral.

Tabel 3.6 Variasi model mesh, jumlah mesh, hasil kecepatan fluida, dan nilai errornya

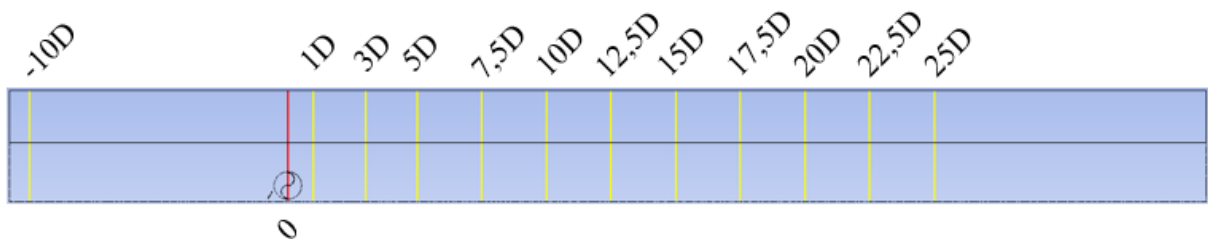
Model Mesh	Jumlah Elemen	Kecepatan Fluida (m/s)	Error	%Error
Hexahedral	351.630	1,023	-	-
Tetrahedral	1.095.352	1,032	0,0084	0,82
	2.143.335	0,992	0,0395	3,82
	2.371.523	0,996	0,0039	0,39
	3.499.989	0,996	0.0000	0,00



Gambar 3.6 Grafik variasi mesh vs kecepatan fluida di $X = 2500$ mm dan $Y = 150$ mm

3.3.2 Data yang Akan Diperoleh

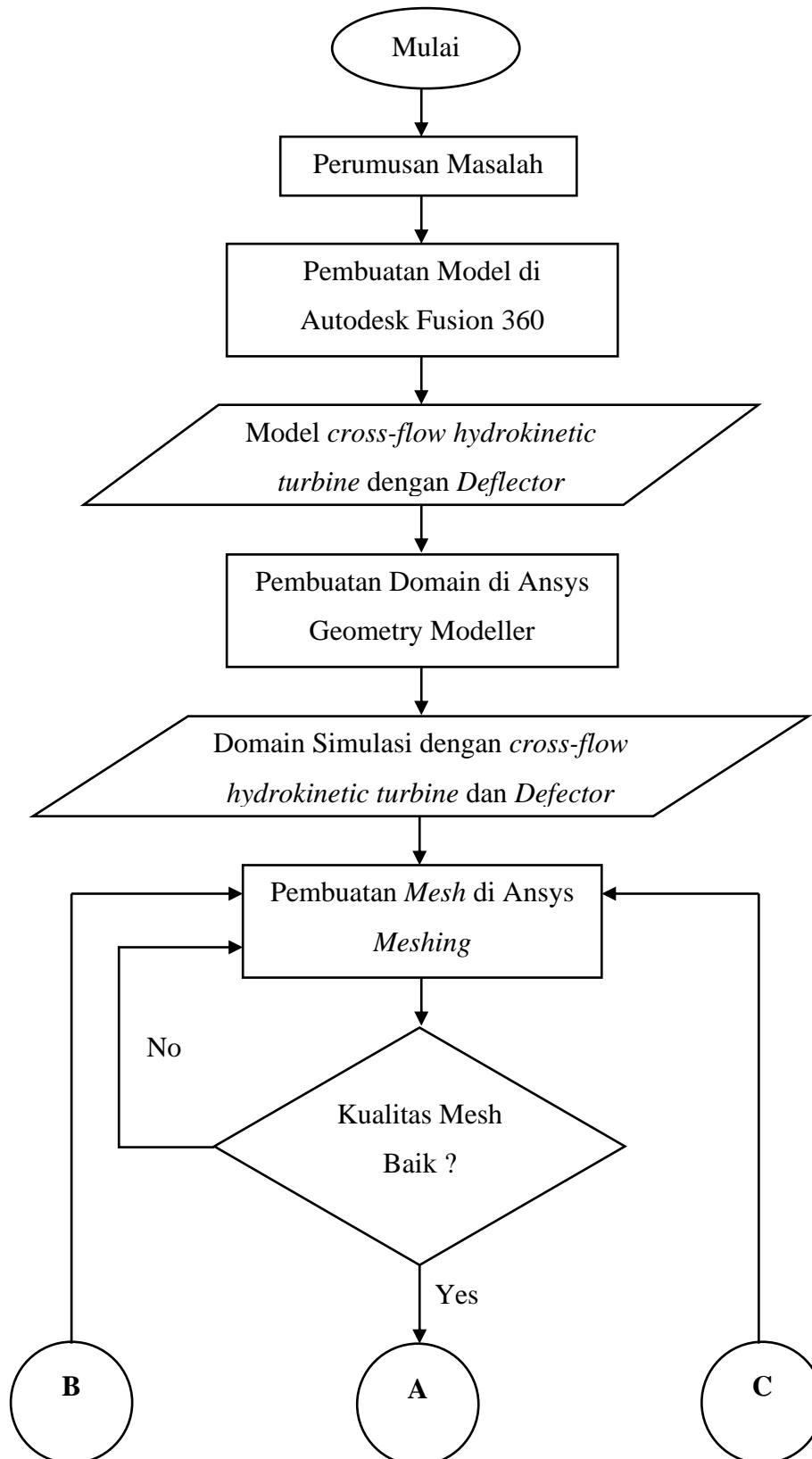
Setelah hasil simulasi numerik didapatkan maka data akan diolah melalui *CFD-Post* untuk divisualisasikan. Hasil visualisasi ini nanti akan berupa data penelitian yang diperoleh. Data yang diperoleh ini berupa data kualitatif dan kuantitatif yang terdiri dari, data kualitatif yang terdiri dari kontur kecepatan dan kontur *water volume fraction* dan data kuantitatif yang terdiri dari nilai kecepatan, *Coefficient of Moment*, dan *Coefficient of Power* pada beberapa daerah dalam saluran yaitu pada nilai $X = -10D$, $X = 1D$, $X = 3D$, $X = 5D$, $X = 7.5D$, $X = 10D$, $X = 12.5D$, $X = 15D$, $X = 17.5D$, $X = 20D$, $X = 22.5D$, $X = 25D$.

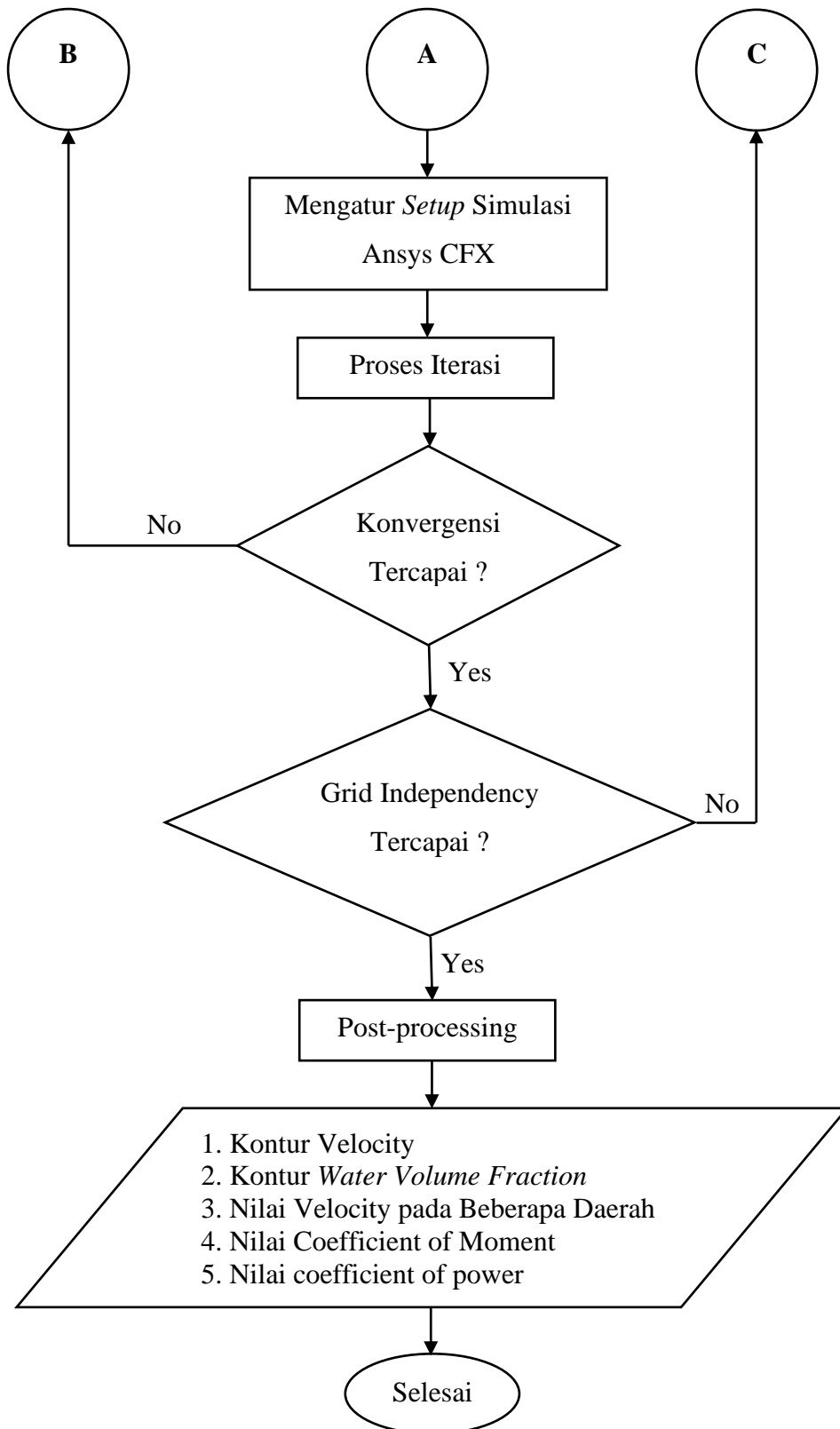


Gambar 3.7 Daerah dalam saluran yang digunakan untuk mengambil data kuantitatif ($X = -10D$, $X = 1D$, $X = 3D$, $X = 5D$, $X = 7.5D$, $X = 10D$, $X = 12.5D$, $X = 15D$, $X = 17.5D$, $X = 20D$, $X = 22.5D$, $X = 25D$.)

3.4 Diagram Alir Penelitian

Berikut ini adalah *flowchart* metodologi yang dilakukan dalam penelitian ini:





Gambar 3.8 Diagram alir (flowchart) penelitian

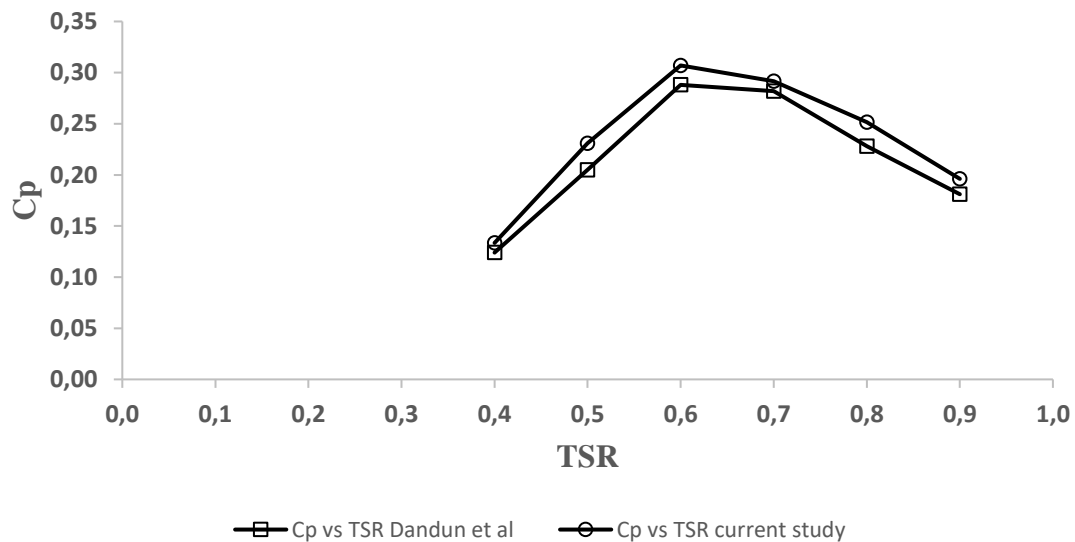
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Komparasi Hasil Simulasi dengan Hasil Simulasi *Dandun et al* (2020)

Komparasi hasil simulasi dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh *Dandun et al.* (2020) merupakan proses yang dilakukan dalam rangka membandingkan kesesuaian data yang dihasilkan oleh model simulasi dengan data yang diperoleh dari pengujian secara eksperimen. Dalam jurnal yang ditulis oleh *Dandun et al.* (2020) menyatakan bahwa hasil penelitian yang didapat dari hasil simulasi menggunakan *software* Ansys CFX memiliki perbedaan sekitar 3% dengan hasil eksperimen. Dalam penelitian ini, digunakan model *cross-flow hidrokinetic turbine* yang prinsip kerjanya sama dengan turbin Savonius. Dengan set-up Ansys CFX yang mirip dengan set-up yang dilakukan oleh *Dandun et al.* (2020), didapatkan data *coefficient of power* sebagai fungsi TSR yang ditampilkan pada tabel 4.1 kemudian nilai pada tersebut diilustrasikan *tren*-nya sebagai grafik yang ditampilkan pada gambar 4.1.

Tabel 4.1 Data Cp vs TSR

TSR	Cp <i>Dandun et al.</i> (2020)	Cp <i>current study</i>	% Perbedaan
0,4	0,124	0,133	7,63
0,5	0,205	0,231	12,57
0,6	0,288	0,307	6,59
0,7	0,288	0,291	3,35
0,8	0,288	0,252	10,36
0,9	0,288	0,196	8,42
% Perbedaan rata-rata			8,15



Gambar 4.1 Perbandingan nilai *coefficient of power* vs *TSR* dari hasil penelitian yang dilakukan dengan hasil simulasi *Dandun et al.*

Pada tabel 4.1 menunjukkan besarnya nilai C_p yang didapat pada setiap TSR dari masing-masing penelitian baik dari penelitian *Dandun et al. (2020)* maupun pada penelitian ini. Dari setiap nilai C_p tersebut memiliki perbedaan nilai yang bervariasi dari yang paling kecil bernilai 3,35% yang terjadi pada TSR 0,7 dan yang paling besar bernilai 12,57% yang terjadi pada TSR 0,5. Kemudian jika setiap besarnya nilai persentase perbedaan dirata-rata, maka didapatkan rata-rata perbedaannya sebesar 8,15%. Adanya nilai perbedaan tersebut dapat diakibatkan oleh beberapa faktor yang diantaranya yaitu perbedaan penggunaan model *mesh* dimana pada penelitian *Dandun et al. (2020)* menggunakan model *mesh tetrahedral* sedangkan pada penelitian ini menggunakan model *mesh hexahedral*. Selain itu kemungkinan terjadi perbedaan dalam nilai k -epsilon yang dimasukkan pada model turbulensi dikarenakan tidak tertera dengan detail pada penelitian *Dandun et al. (2020)*.

Jika dilihat berdasarkan grafik yang dihasilkan dari tabel nilai C_p vs TSR, dapat dilihat bahwa nilai C_p yang didapatkan pada penelitian *Dandun et al. (2020)* dan pada penelitian ini memiliki tren grafik yang mirip seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1. Selain itu, dapat terlihat juga bahwa nilai *coefficient of power* maksimum dan minimum pada penelitian ini dan pada hasil simulasi *Dandun et al. (2020)* terjadi di TSR yang sama. Meskipun demikian, terdapat penyimpangan hasil yang didapatkan dengan hasil simulasi yang dilakukan oleh *Dandun et al. (2020)* dimana *coefficient of power* yang didapatkan pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan *coefficient of power* hasil simulasi yang dilakukan oleh *Dandun et al. (2020)*.

4.2 Analisa *Coefficient of Moment* dan *Coefficient of Power* pada Berbagai Kondisi yang Diamati

Pada bagian sub-bab ini akan dibahas mengenai tentang analisa *Coefficient of moment* dan *coefficient of power* yang didapatkan dari setiap kondisi dimulai dari kondisi dengan nilai rasio perbandingan antara kedalaman dengan diameter turbin (d/D) 1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5. Kemudian nilai *coefficient of moment* dan *coefficient of power* dibandingkan juga dengan kondisi nilai kecepatan inlet yang berbeda, yaitu 0,8 m/s dan 1,2 m/s. Pada sub-bab ini juga akan dibahas mengenai kontur kecepatan yang berada di daerah sekitar turbin untuk melihat lebih jelas fenomena aliran yang menerjang bagian *advancing blade* dimana hal tersebut merupakan faktor yang dapat mempengaruhi performansi turbin.

4.2.1 *Coefficient of Moment* (C_M) dan *Coefficient of Power* (C_P)

Coefficient of moment adalah nilai perbandingan antara torsi yang dihasilkan oleh turbin terhadap momen yang diakibatkan oleh gaya dari aliran. Sedangkan *coefficient of power* merupakan nilai perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya aliran yang menerpa turbin. Adapun nilai *coefficient of moment* (C_M) dan *coefficient of power* (C_P) tersebut serta hubungannya dimodelkan secara matematis pada persamaan berikut;

$$C_M = \frac{T_d}{\frac{1}{2} \rho A U^2 R} \quad (4.1)$$

$$C_P = \frac{T_d \omega}{\frac{1}{2} \rho A U^3} \quad (4.2)$$

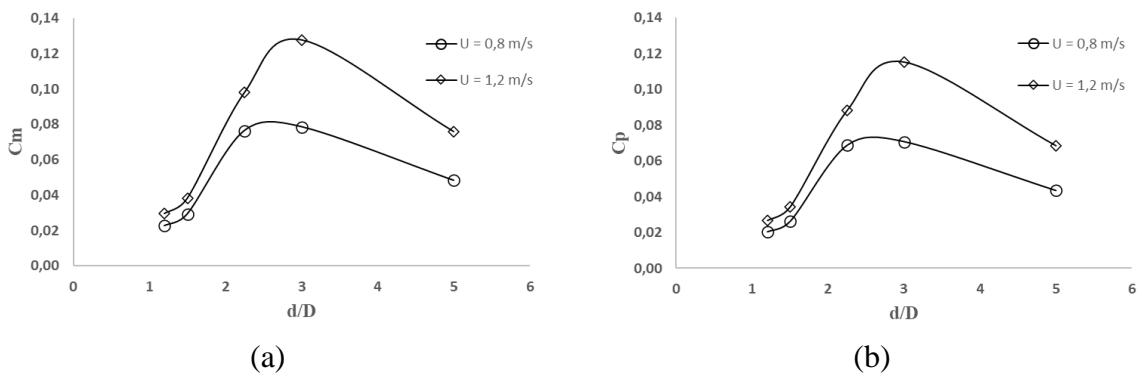
dengan persamaan 2.2 mengenai TSR, maka

$$C_P = C_M TSR$$

dimana T_d adalah nilai torsi dinamis turbin yang didapatkan dari hasil simulasi Ansys CFX, ω adalah kecepatan angular turbin, ρ adalah densitas, A adalah luasan area turbin yang diterpa oleh aliran fluida, dan U adalah kecepatan *inlet*. Dari hasil simulasi, didapatkan nilai Torsi dinamis yang kemudian dilakukan perhitungan besarnya nilai C_M dan C_P . Nilai C_M dan C_P dari setiap kondisi yang dilakukan penelitian ditampilkan pada tabel 4.1 yang kemudian disajikan dalam bentuk grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.3 untuk melihat lebih jelas *trend* dari nilai C_M dan C_P .

Tabel 4.2 Nilai *coefficient of moment* (C_M) dan *coefficient of power* (C_P)

U	d/D	C_M	C_P
0,80 m/s	1,20	0,0226	0,0203
	1,50	0,0292	0,0263
	2,25	0,0764	0,0687
	3,00	0,0786	0,0707
	5,00	0,0482	0,0434
1,20 m/s	1,20	0,0297	0,0267
	1,50	0,0382	0,0344
	2,25	0,0979	0,0881
	3,00	0,1278	0,1150
	5,00	0,0760	0,0684



Gambar 4.2 Grafik (a) *coefficient of moment* (C_M) dan (b) *coefficient of power* (C_P) pada kecepatan *inlet* 0,8 m/s dan 1,2 m/s

Gambar 4.2 menampilkan nilai dari C_M dan C_P dari masing-masing kondisi yang dilakukan penelitian. Dari nilai C_M yang didapatkan dari hasil simulasi pada Ansys CFX tersebut kemudian didapatkan nilai C_P dengan mengalikan setiap C_M dengan nilai TSR yang ditetapkan yaitu sebesar 0,9. Kemudian untuk memudahkan dalam menganalisa, nilai-nilai C_M dan C_P tersebut dimodelkan dalam grafik seperti yang ditampilkan tersebut.

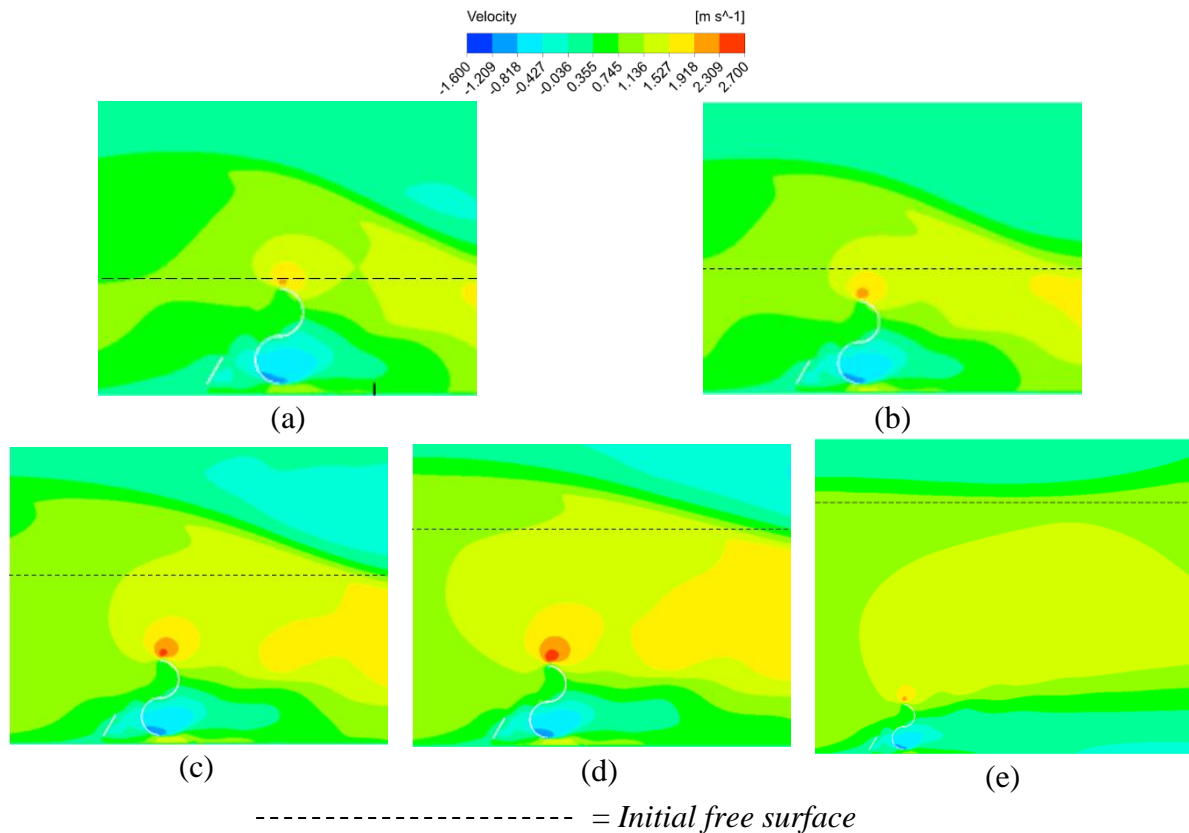
Pada gambar 4.2(b) yang menunjukkan grafik fungsi C_p dari turbin dengan kondisi kecepatan inlet 0,8 m/s dan 1,2 m/s dengan sumbu x adalah nilai rasio perbandingan antara kedalaman dengan diameter turbin (d/D) 1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5. Secara umum dapat dilihat bahwa pada aliran yang memiliki nilai kecepatan inlet yang lebih tinggi, yang ditunjukkan dengan garis berwarna oranye, memiliki rata-rata nilai C_p yang lebih tinggi dibandingkan dengan aliran yang memiliki kecepatan inlet yang lebih rendah. Pada kondisi dengan aliran yang memiliki kecepatan inlet 0,8 m/s terjadi kecenderungan peningkatan nilai C_p dimana terjadi kenaikan yang signifikan pada kondisi $d/D = 1,5$ hingga $d/D = 2,25$. Setelah itu, pada kondisi $d/D = 3$ tetap terjadi kenaikan nilai C_p namun kenaikannya tidak terlalu signifikan dan pada nilai $d/D = 3$ memiliki nilai C_p maksimum yaitu sebesar 0,0707. Ketika nilai d/D melebihi dari 3, terjadi perubahan kecenderungan nilai C_p yang mulai menurun hingga nilai $d/D = 5$ yang memiliki nilai C_p sebesar 0,0434. Hal yang sama juga terjadi pada kondisi dengan nilai kecepatan inlet 1,2 m/s dimana nilai C_p memiliki kecenderungan meningkat seiring dengan meningkatnya nilai rasio perbandingan antara kedalaman dengan diameter turbin. Kenaikan nilai C_p yang signifikan juga terjadi dalam rentang nilai $d/D = 1,5$ hingga $d/D = 2,25$, kemudian kecenderungan peningkatan nilai C_p dilanjutkan hingga mencapai nilai maksimum pada nilai $d/D = 3$ dengan nilai C_p sebesar 0,1150. Setelah itu, kecenderungan nilai C_p berubah menjadi cenderung menurun hingga nilai $d/D = 5$ dengan nilai C_p sebesar 0,0684. Sementara itu, nilai C_p minimum terjadi pada nilai $d/D = 1,2$ pada semua kondisi kecepatan yang berbeda. Nilai C_p minimum pada kecepatan 0,8 m/s bernilai 0,0203 dan pada kecepatan 1,2 m/s bernilai 0,0267.

4.2.2 Analisa Trend Nilai Coefficient of Power Berdasarkan Kontur Kecepatan di Sekitar Turbin

Jika ditinjau berdasarkan gambar 4.3 yang menunjukkan kontur velocity di daerah sekitar turbin, maka dapat dijelaskan bahwa kecenderungan peningkatan nilai C_p dari kondisi dengan nilai rasio $d/D = 1,25$ hingga $d/D = 3$ diakibatkan karena dalam rentang tersebut terjadi peningkatan kecepatan di bagian *advancing blade*. Pada gambar 4.3(a) yang menunjukkan kontur kecepatan pada nilai rasio d/D yang paling kecil, yaitu 1,2., daerah yang menerjang bagian *advancing blade* memiliki spektrum warna dominan hijau dan terdapat peningkatan kecepatan pada bagian atas *advancing blade* yang ditandai dengan terdapatnya warna kuning dan sedikit spektrum warna oranye. Seiring bertambahnya nilai d/D hingga nilai $d/D = 3$, daerah aliran yang menerjang *advancing blade* memiliki spektrum warna kuning yang mulai dominan dan semakin jelas, serta peningkatan kecepatan pada bagian atas *advancing blade* semakin besar yang ditandai dengan membesarnya daerah berwarna oranye dan muncul daerah yang berwarna merah. Dengan meningkatnya kecepatan di bagian *advancing blade* tersebut dapat meningkatkan nilai torsi positif sehingga selisih antara torsi positif dengan negatif semakin membesar dan menyebabkan performansi semakin naik.

Sementara itu, pada gambar 4.3(e) yang menggambarkan kontur kecepatan di sekitar turbin pada nilai $d/D = 5$ menunjukkan bahwa tetap terjadi kenaikan kecepatan di sekitar turbin, akan tetapi daerah yang mengalami peningkatan kecepatan tersebut berada diatas *advancing blade* turbin sehingga aliran yang memiliki kecepatan lebih tinggi tersebut tidak menerjang bagian *advancing blade*. Hal tersebut yang dapat menjadi alasan mengapa nilai C_p pada $d/D = 5$ lebih rendah dibandingkan dengan nilai $d/D = 3$. Terjadinya perubahan kecenderungan nilai C_p yang awalnya naik menjadi turun seiring meningkatnya d/D setelah mencapai titik maksimumnya juga dapat diakibatkan oleh menurunnya nilai *blockage ratio* yang merupakan rasio perbandingan antara luasan sapuan rotor terhadap luasan penampang sebuah aliran. Selain itu, meningkatnya nilai d/D juga menandakan bahwa turbin beroperasi di daerah yang lebih dalam, yang sesuai dengan teori hidrostatis, semakin dalam letak turbin beroperasi

pada fluida air, maka tekanan disekeliling turbin juga semakin tinggi. Semakin tingginya tekanan tersebut mempengaruhi karakteristik fluida disekitar turbin yang seolah-olah berubah menjadi solid (Stallard *et al.*, 2013). Hal itu menjadikan turbin semakin sulit untuk berputar.



Gambar 4.3 Kontur kecepatan di sekitar turbin pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan nilai d/D (a) 1,2., (b) 1,5., (c) 2,25., (d) 3, dan (e) 5

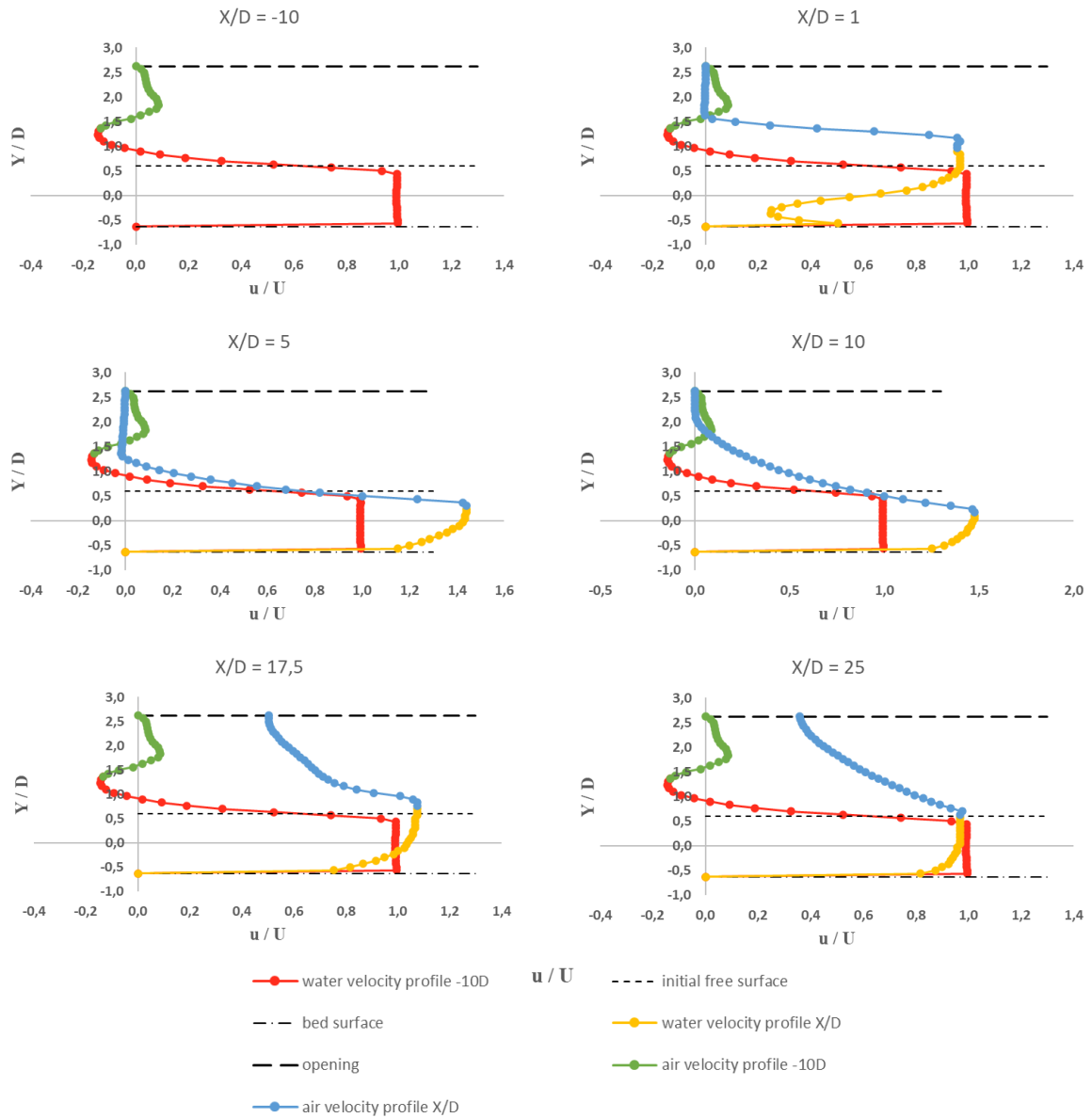
4.3 Analisa Pemulihan *Wake* pada Berbagai Kondisi yang Diamati

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pemulihan *wake* yang terjadi pada kondisi dengan nilai rasio perbandingan antara kedalaman dengan diameter (d/D) yang berbeda-beda yaitu 1,2., 1,5., 2,25., 3, dan 5. Selain itu, juga dilakukan perbandingan pemulihan *wake* dengan nilai kecepatan *inlet* yang berbeda dimana kecepatan inlet yang digunakan adalah 0,8 m/s dan 1,2 m/s. Namun sebelum membahas tentang pemulihan *wake* akan dibahas terlebih dahulu mengenai analisa profil kecepatan di daerah *upstream* dan *downstream*. Kemudian untuk melihat lebih jelas fenomena yang terjadi pada aliran dengan kondisi yang berbeda, akan dianalisa juga mengenai kontur fraksi volume air dan kontur kecepatan.

4.3.1 Analisa Profil Kecepatan di Daerah *Upstream* dan *Downstream*

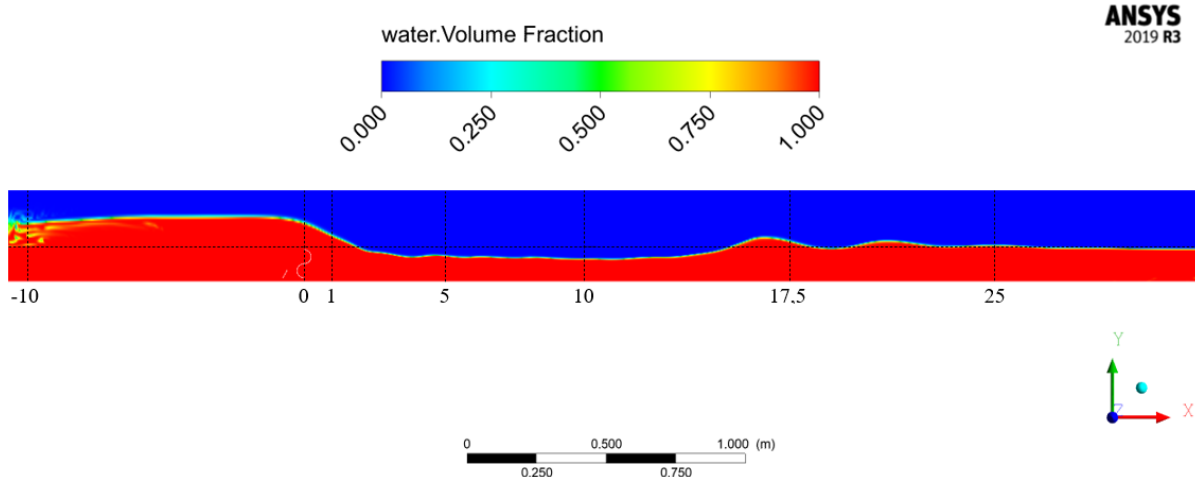
Untuk dapat menganalisa besarnya pemulihan *wake* yang terjadi pada aliran sebagai fungsi jarak, maka diambil data pada daerah *downstream* dan *upstream*. Terdapat beberapa daerah *downstream* yang dijadikan lokasi tempat pengambilan data berupa kecepatan aliran dimana lokasi tersebut merupakan jarak horizontal (sejajar dengan arah aliran) yang diukur dari titik poros turbin dibandingkan dengan diameter turbin (X/D). Adapun nilai jarak *downstream* yang digunakan adalah 1, 3, 5, 7,5., 10, 12,5., 15, 17,5., 20, 22,5., dan 25. Sedangkan daerah *upstream* yang dijadikan sebagai pembanding diambil pada lokasi $X/D = -2$. Pada tiap-tiap nilai X/D tersebut diambil data kecepatan pada banyak titik di posisi Y/D yang sama, sehingga jika

titik-titik yang bernilai kecepatan tersebut dihubungkan dengan ditarik garis maka akan didapatkan profil kecepatan pada nilai X/D yang diamati. Profile kecepatan tersebut mengindikasikan besarnya kecepatan sebagai fungsi posisi.

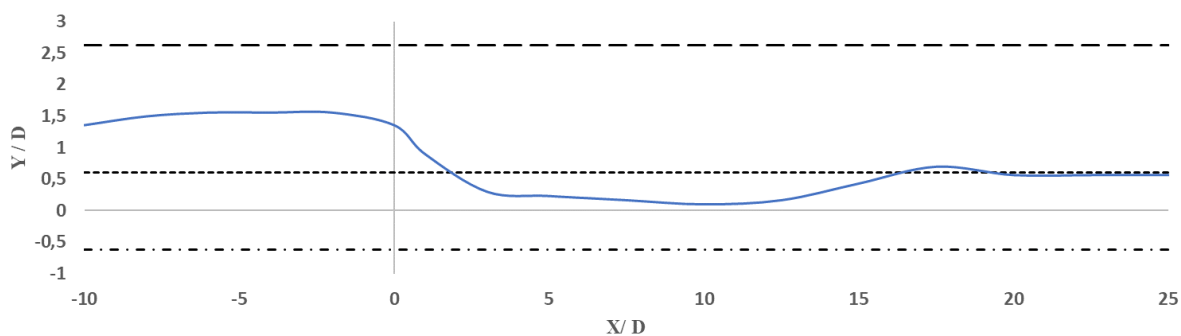


Gambar 4.4 Profil kecepatan di daerah *upstream* dan daerah *downstream* pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan $d/D = 1,2$

Pada gambar 4.4 diatas, menampilkan salah satu profil kecepatan pada kondisi kecepatan *inlet* bernilai 1,2 m/s dan $d/D = 1,2$ dimana pada sumbu horizontal yang bernilai kecepatan merupakan kecepatan pada daerah X/D dibandingkan dengan kecepatan inlet yang bernilai seragam. Sedangkan pada arah vertikal merupakan fungsi jarak terhadap sumbu poros turbin dibandingkan dengan diameter turbin. Pada gambar 4.4 diatas, ditampilkan profil kecepatan pada daerah *upstream* yaitu pada $X/D = -10$ dan beberapa profil kecepatan pada daerah *downstream*. Pada profil kecepatan di daerah *downstream* juga ditampilkan profil kecepatan di daerah *upstream* sebagai pembandingan untuk melihat perbedaan profile kecepatan di bagian *upstream* dengan bagian *downstream*.

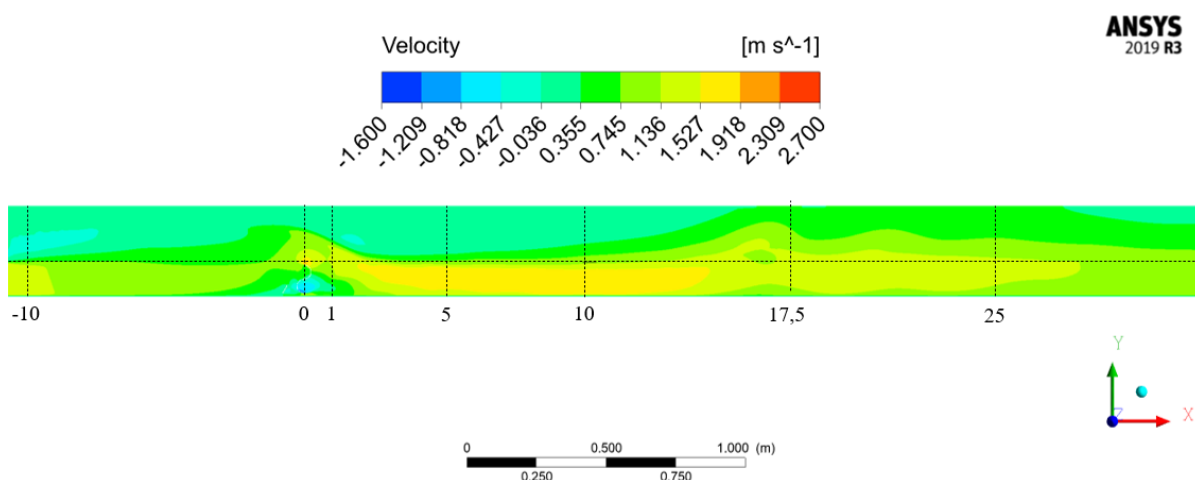


(a)



(b)

Gambar 4.5 (a) Kontur fraksi volume air dan (b) grafik *surface* pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan $d/D = 1,2$



Gambar 4.6 Kontur kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ m/s dan $d/D = 1,2$

Pada saat nilai $X/D = 1$, dapat dilihat bahwa terjadi *velocity deficit* pada bagian bawah garis *initial free stream*. Terjadinya *velocity deficit* ditandai dengan profil kecepatan daerah *downstream* pada beberapa titik Y/D yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan nilai kecepatan pada daerah *upstream*. Namun pada beberapa titik Y/D yang lainnya, kecepatan

pada daerah *downstream* melebihi kecepatan di daerah *upstream*. Hal tersebut dikarenakan terjadinya percepatan pada sebagian daerah dari aliran akibat transfer momentum sehingga terdapat daerah yang memiliki penambahan momentum dan sebagian yang lainnya mengalami pengurangan momentum.

Pada saat nilai $X/D = 5$, terjadi peningkatan kecepatan aliran yang sangat signifikan pada daerah *downstream* di bagian bawah garis *initial free stream*, tetapi profile kecepatan seolah-olah semakin memipih. Jika dilihat berdasarkan gambar 4.5 yang menampilkan fraksi volume air, terjadinya peningkatan kecepatan di daerah *downstream* diakibatkan oleh menurunnya level permukaan aliran air yang dapat diamati dengan membandingkan level permukaan air terhadap garis *initial free stream*. Hal tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa dimana ketika luasan aliran semakin mengecil, maka akan terjadi percepatan pada aliran fluida. Dan sebaliknya, ketika luasan aliran semakin membesar, maka akan terjadi perlambatan pada aliran fluida. Terjadinya percepatan pada daerah *downstream* pada kondisi penurunan level permukaan air dibuktikan pada gambar 4.6 yang menunjukkan kontur kecepatan pada aliran dengan kondisi yang sama. Dapat dilihat pada gambar tersebut, aliran pada daerah penurunan level permukaan air, spektrum warna pada kontur kecepatan memiliki warna kuning terang yang dominan, yang jika dilihat berdasarkan *legend* warna yang mewakili nilai kecepatan, warna tersebut kuning terang tersebut memiliki nilai kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan warna disekelilingnya.

Bentuk profile kecepatan pada nilai $X/D = 5$ yang mengalami percepatan di sebagian daerah tetap berlanjut sampai nilai $X/D = 10$ dimana tidak terjadi banyak perubahan bentuk profil kecepatan. Namun pada nilai $X/D = 17,5$ profil kecepatan di daerah *downstream* telah banyak mengalami perlambatan jika dilihat berdasarkan nilai u/U yang semakin kecil. Perlambatan yang dialami pada jarak $X/D = 17,5$ tersebut diakibatkan oleh kenaikan level permukaan air.

Pada jarak ini juga terlihat *velocity deficit* muncul kembali yang dapat diamati dengan profil kecepatan daerah *downstream* memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan profil kecepatan di daerah *upstream* pada beberapa titik Y/D . Setelah itu, profil kecepatan aliran tidak banyak perubahan hingga jarak $X/D = 25$. Pada daerah ini juga sudah tidak banyak perubahan pada level permukaan air sehingga nilai kecepatan juga tidak berubah secara signifikan, hanya terjadi sedikit perlambatan yang diakibatkan oleh pengaruh *bed surface*.

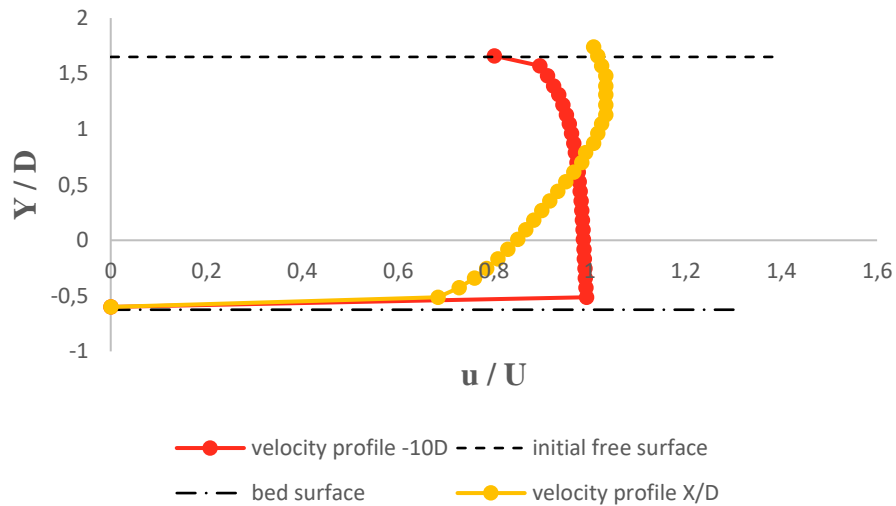
4.3.2 Pemulihan *Wake*

Pada bagian ini akan dibahas mengenai besarnya pemulihan *wake* yang terjadi pada tiap-tiap daerah *downstream* yang dilakukan pengamatan dengan cara membandingkan profil kecepataannya dengan daerah *upstream*. Daerah *downstream* merupakan daerah dimana aliran telah dipengaruhi oleh keberadaan turbin atau aliran yang telah melewati turbin. Sedangkan daerah *upstream* merupakan daerah dimana aliran belum terpengaruh oleh turbin atau aliran yang belum melewati turbin.

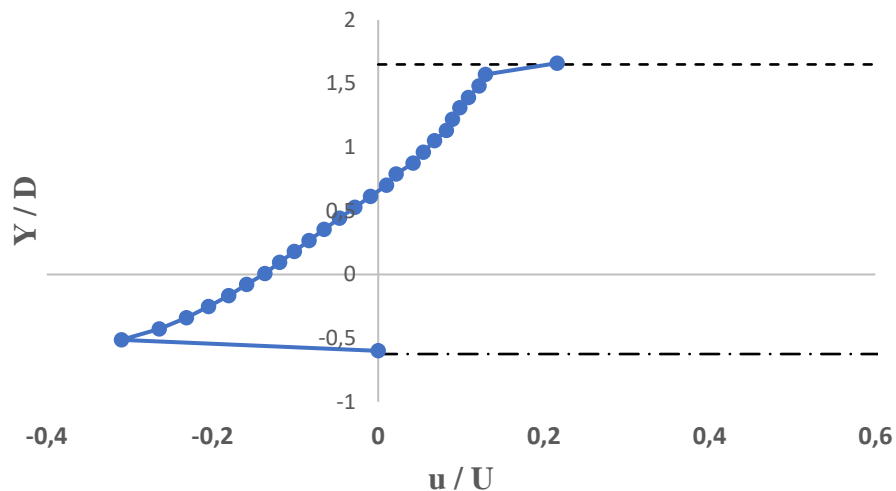
Pada gambar 4.7(a) dibawah ini ditampilkan salah satu dari profil kecepatan yang didapatkan pada daerah *downstream* dan dibandingkan profil kecepatan di bagian *upstream*. Sedangkan pada gambar 4.7(b) adalah grafik besarnya *velocity deficit* dimana *velocity deficit* merupakan selisih kecepatan di daerah *downstream* dengan di daerah *upstream*. Jadi setiap titik yang dihasilkan pada gambar 4.7(b) merupakan hasil pengurangan antara nilai kecepatan pada daerah *upstream* dengan *downstream* pada posisi Y/D yang sama. Adapun secara matematis untuk mendapatkan nilai pada setiap titik untuk gambar 4.7(b) adalah sebagai berikut

$$\text{Velocity Deficit} = \frac{u_{(\text{upstream})} - u_{(\text{downstream})}}{U} \quad (4.3)$$

dimana $u_{(\text{upstream})}$ adalah kecepatan pada daerah *upstream* yang digunakan dengan nilai $X/D = -10$, $u_{(\text{downstream})}$ adalah nilai kecepatan pada daerah *downstream* yang diamati, dan U adalah kecepatan *inlet*.



(a)



(b)

Gambar 4.7 (a) Profil kecepatan air di daerah *upstream* dibandingkan dengan daerah *downstream* dan (b) profil *velocity deficit*

Berdasarkan gambar 4.7(b), terdapat sebagian titik-titik kecepatan yang bernilai positif dan sebagian lagi bernilai negatif. Pada bagian yang bernilai negatif merupakan nilai besarnya *velocity deficit* sedangkan yang bernilai positif merupakan nilai yang menandakan bahwa pada titik tersebut tidak terjadi *velocity deficit* atau kecepatan di bagian *downstream* lebih besar dibandingkan kecepatan di bagian *upstream* pada titik Y/D yang sama.

Pada tabel 4.3 di bawah merupakan tabel yang menunjukkan besarnya persentase *wake* yang dipulihkan di daerah *downstream* yang dibandingkan dengan daerah *upstream*. Besarnya

pemulihan *wake* dinyatakan sebagai fungsi perbedaan paling maksimum antara kecepatan di *downstream* dengan *upstream* baik itu yang merupakan *velocity deficit* ataupun bukan.

Tabel 4.3 Nilai persentase *wake recovery*

U (m/s)	d/D	X/D										
		1	3	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
0,8	1,20	71,08	15,58	41,51	78,39	96,03	92,09	84,53	61,53	52,15	67,40	70,03
	1,50	65,16	10,81	44,33	70,24	67,49	59,24	61,24	62,99	63,74	69,49	74,12
	2,25	7,64	21,51	20,63	37,01	38,63	46,01	48,76	56,51	63,13	67,13	65,88
	3,00	7,36	30,23	36,23	35,23	30,23	33,60	41,60	50,85	52,98	52,73	51,23
	5,00	0,46	11,42	-0,06	19,47	43,84	52,72	45,47	39,22	45,72	58,47	66,59
1,2	1,20	25,50	62,45	54,98	52,48	51,60	54,12	77,52	76,06	87,71	86,04	82,31
	1,50	21,96	62,32	52,80	45,40	41,02	50,95	63,99	63,99	78,96	83,72	87,09
	2,25	17,11	58,85	44,68	40,32	51,21	56,99	64,33	52,70	65,77	68,99	71,17
	3,00	13,33	49,12	48,82	53,11	50,28	39,34	53,12	58,95	46,45	41,20	48,36
	5,00	-0,91	6,23	-8,08	-6,18	4,78	17,89	27,87	35,17	42,03	46,86	48,25

Pada penelitian Pablo *et al* (2019) yang mempelajari tentang pemulihan *wake* pada turbin dengan sumbu vertikal, menyatakan bahwa aliran dianggap telah pulih dari *wake* ketika kecepatan telah terpulihkan sekitar 95% dari kecepatan *upstream*. Dengan acuan nilai pemulihan *wake* tersebut, maka tabel 4.3 diatas dapat dianalisa seberapa cepat *wake* dapat terpulihkan pada kondisi kedalaman dan kecepatan *inlet* yang berbeda dengan cara mempertimbangkan jarak dimana *wake* dianggap mulai terpulihkan.

Pada kecepatan *inlet* bernilai 0,8 m/s dengan nilai rasio perbandingan kedalaman dengan diameter (d/D) yang berbeda, secara umum dapat dijelaskan bahwa pada nilai d/D yang kecil, pemulihan *wake* dapat terjadi lebih cepat, yaitu dapat dilihat ketika d/D = 1,2., pemulihan *wake* sudah terjadi pada daerah X/D = 10 dimana nilai pemulihan 96,03%. Nilai pemulihan tersebut kemudian menurun seiring bertambahnya nilai X/D.

Ketika kondisi aliran memiliki kedalaman yang semakin besar yang ditandai dengan meningkatnya nilai d/D, terjadinya pemulihan *wake* cenderung lebih melambat. Hal tersebut dapat dilihat dengan membandingkan besarnya nilai pemulihan *wake* yang terjadi pada nilai d/D yang berbeda dan kecepatan *inlet* yang sama. Seperti contoh yang terjadi pada kondisi X/D = 7,5 pada aliran dengan kecepatan inlet 0,8 m/s, nilai pemulihan *wake* terbesar terjadi pada kondisi d/D yang paling minimum (d/D = 1,2) yaitu sebesar 78,39%, kemudian nilai pemulihan *wake* menurun menjadi 70,24% pada nilai d/D = 1,5 dan terus konsisten menurun sampai nilai d/D yang paling maksimu (d/D = 5) yaitu sebesar 19,47%.

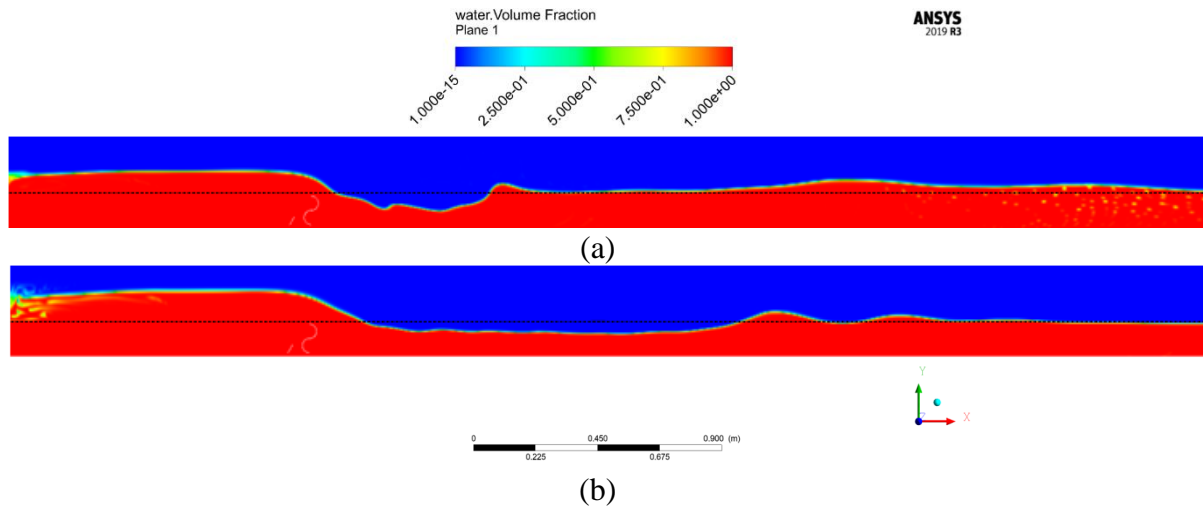
Pada kondisi dengan nilai kecepatan *inlet* yang lebih tinggi, yaitu pada kecepatan inlet 1,2 m/s karakteristik pemulihan *wake* berdasarkan nilai rasio perbandingan kedalaman dengan diameter (d/D) yang berbeda menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu pemulihan *wake* terjadi lebih cepat pada nilai d/D yang kecil dan akan melambat pada nilai d/D yang semakin membesar.

Jika membandingkan kondisi aliran dengan nilai d/D yang sama pada kecepatan *inlet* yang berbeda, maka dapat dinyatakan bahwa ketika aliran memiliki kecepatan yang lebih tinggi, pemulihan *wake* cenderung terjadi pada jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah. Hal tersebut dapat dilihat pada tabel 4.2 dimana pada kondisi kecepatan *inlet* yang berbeda dan membandingkan pada nilai d/D yang sama, aliran dengan

kecepatan *inlet* 0,8 m/s secara rata-rata selalu memiliki jarak pemulihan *wake* yang lebih pendek dibandingkan dengan aliran yang memiliki kecepatan *inlet* 1,2 m/s. Seperti contoh pada nilai $d/D = 1,2$ dimana pada kecepatan *inlet* 0,8 m/s pemulihan *wake* sudah terjadi pada jarak $X/D = 10$. Sedangkan pada kecepatan *inlet* 1,2 m/s, pemulihan *wake* belum terjadi.

4.3.3 Analisa Fenomena Aliran Berdasarkan Kontur Fraksi Volume Air dan Kontur Kecepatan

Pada bagian sub-bab ini akan dibahas mengenai fenomena-fenomena yang terjadi pada aliran yang diamati secara dua fasa yaitu air dan udara berdasarkan kontur fraksi volume air dan kontur kecepatan dimana kontur fraksi volume air dapat menggambarkan komposisi fluida pada setiap lokasi. Sehingga dengan kontur tersebut dapat digambarkan dimana daerah fluida air dan fluida udara, atau daerah yang memiliki fasa campuran dua fluida tersebut. Kemudian kontur kecepatan dapat menggambarkan perkiraan besarnya kecepatan fluida, tetapi tidak bisa membedakan nilai kecepatan berdasarkan fasa.



Gambar 4.8 Kontur fraksi volume air pada kondisi $d/D = 1,2$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s

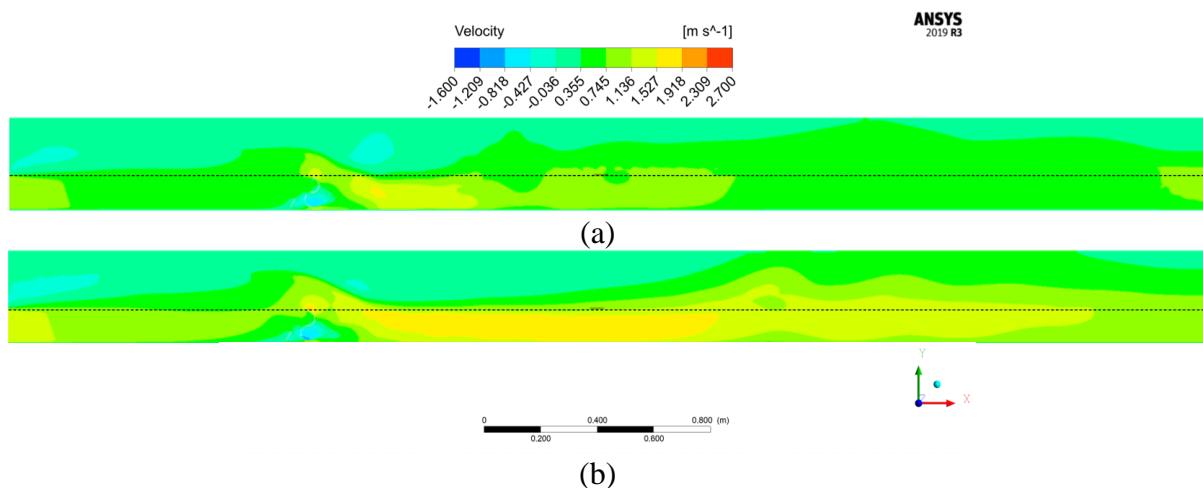
Pada gambar 4.8 ditampilkan kontur fraksi volume air pada daerah *upstream* dan *downstream* dengan kondisi nilai d/D yang paling minimum yaitu sebesar 1,2 dengan kecepatan *inlet* yang berbeda dimana pada gambar 4.8(a) merupakan aliran dengan kecepatan inlet 0,8 m/s dan gambar 4.8(b) merupakan aliran dengan kecepatan inlet 1,2 m/s. Dari kedua gambar tersebut dapat diamati bahwa pada saat aliran mulai meninggalkan turbin atau saat aliran mulai memasuki daerah *downstream* terjadi penurunan level permukaan air yang kemudian pada daerah *downstream* yang semakin jauh terjadi lonjakan level permukaan air. Pada kondisi aliran dengan kecepatan *inlet* 1,2 m/s lonjakan level permukaan air terjadi lebih jauh dibandingkan dengan kondisi aliran dengan kecepatan *inlet* 0,8 m/s. Setelah aliran mengalami lonjakan level permukaan air, selanjutnya aliran akan mulai stabil dan tidak banyak perubahan level permukaan air yang terjadi.

Fenomena terjadinya lonjakan level permukaan air yang terjadi dapat dijelaskan oleh teori *hydraulic jump* yang merupakan fenomena lompatan gelombang yang terjadi pada aliran terbuka akibat aliran berubah dari daerah *supercritical* menjadi daerah *subcritical*. Daerah *supercritical* dan *subcritical* ditentukan berdasarkan nilai *Froude Number* yang merupakan fungsi kecepatan dibagi dengan akar dari kedalaman dan konstanta gravitasi seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.5. Daerah *supercritical* merupakan daerah yang memiliki

Froude Number lebih dari 1, sedangkan daerah *subcritical* merupakan daerah yang memiliki *Froude Number* kurang dari 1.

Daerah *supercritical* akan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah *subcritical*. Daerah *supercritical* juga terjadi pada daerah dengan kedalaman aliran yang rendah dibandingkan dengan daerah *subcritical*. Pada gambar 4.9 dibawah menunjukkan kontur kecepatan pada kondisi nilai $d/D = 1,2$ dimana pada gambar 4.9(a) memiliki kecepatan *inlet* 0,8 m/s dan 4.9(b) 1,2 m/s.

Pada kontur kecepatan yang ditampilkan pada gambar 4.9, dapat dilihat bahwa secara umum pada saat aliran mulai berinteraksi dengan turbin terjadi kecenderungan perubahan spektrum warna dari hijau ke kuning yang menunjukkan terjadinya kenaikan kecepatan aliran. Hal tersebut sesuai dengan hukum kekekalan massa dimana keberadaan turbin mengakibatkan luasan aliran berkurang sehingga menyebabkan kecepatan aliran meningkat. Ketika aliran mulai menjauhi turbin, terjadi peningkatan intensitas perubahan spektrum warna menjadi warna kuning yang lebih dominan yang terjadi saat level air mulai mengalami penurunan. Penurunan level air menandakan terjadinya luasan aliran yang mengecil atau menyebabkan aliran menjadi terhimpit, sehingga pada daerah tersebut terjadi peningkatan kecepatan aliran.

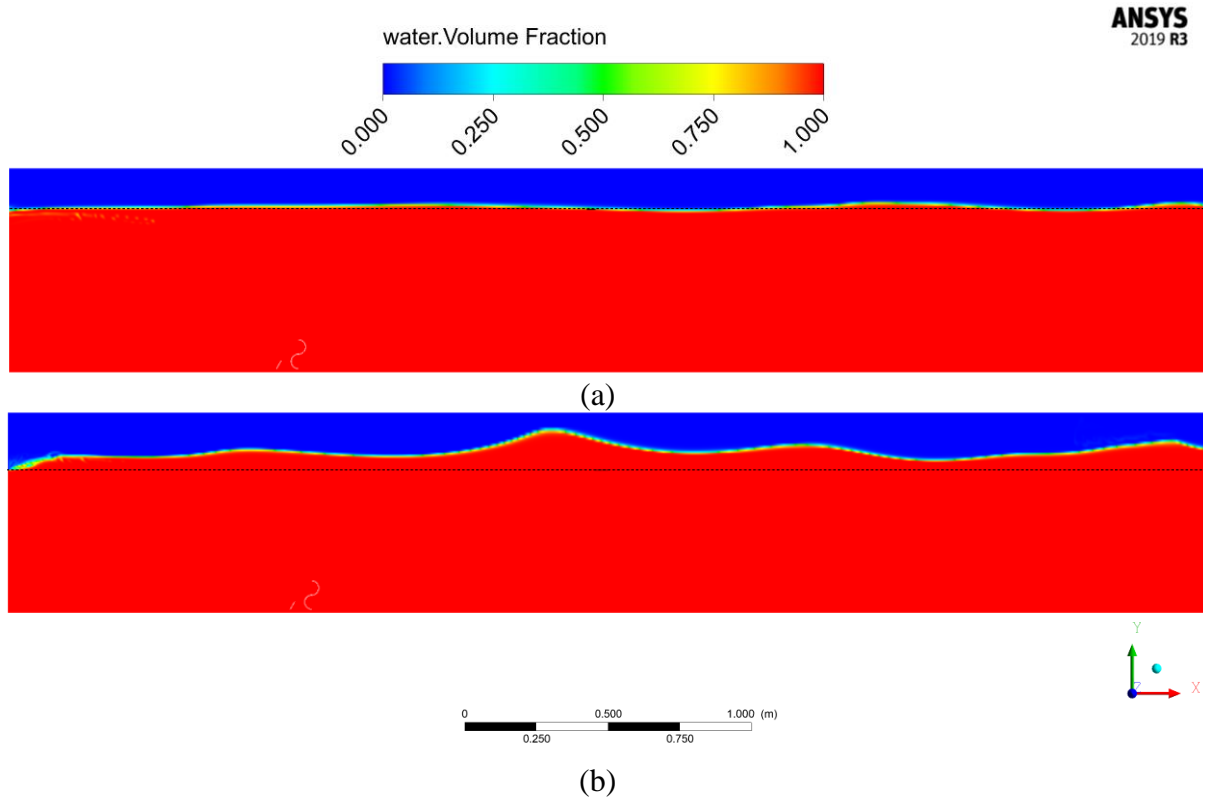


Gambar 4.9 Kontur kecepatan pada kondisi $d/D = 1,2$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s

Pada gambar 4.9 tersebut juga menunjukkan adanya perbedaan panjang dari daerah warna kuning pada kecepatan inlet yang berbeda. Pada kecepatan inlet yang lebih tinggi, daerah yang berwarna kuning lebih panjang dibandingkan dengan kecepatan inlet yang lebih rendah. Panjang daerah berwarna kuning tersebut sesuai dengan panjang dari daerah dengan terjadinya penurunan level air. Pada daerah *downstream* yang semakin jauh, mulai terjadi perubahan warna dimana warna kuning mulai memudar atau bahkan berubah menjadi hijau. Perubahan tersebut menandakan terjadinya penurunan kecepatan aliran yang jika dilihat dari gambar fraksi volume air, perubahan itu terjadi ketika terjadinya lonjakan level permukaan air. Pada daerah dimana level aliran mulai stabil, tidak terjadi perubahan spektrum warna yang dominan yang menandakan tidak terjadi perubahan kecepatan yang signifikan.

Pada gambar 4.10 dibawah ini menunjukkan kontur fraksi volume air pada daerah *upstream* dan *downstream* dengan kondisi nilai d/D yang paling maksimum yaitu sebesar 5 dengan kecepatan *inlet* yang berbeda dimana pada gambar 4.10(a) merupakan aliran dengan kecepatan inlet 0,8 m/s dan gambar 4.10(b) merupakan aliran dengan kecepatan inlet 1,2 m/s . Pada gambar tersebut dapat diamati bahwa pada nilai d/D yang paling besar tidak terjadi

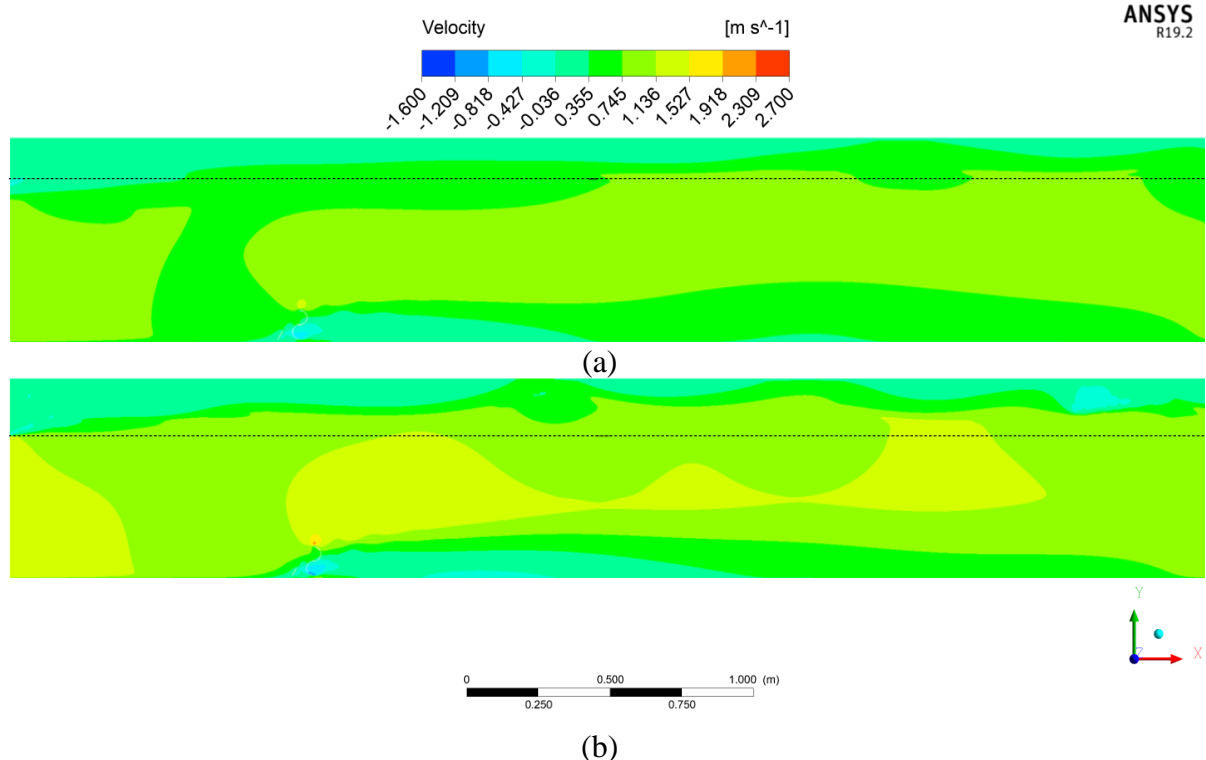
fenomena penurunan level air pada saat aliran mulai memasuki daerah *downstream* dan tidak terjadi pula lonjakan level permukaan air yang signifikan. Hanya saja pada aliran dengan kecepatan inlet 1,2 m/s level permukaan air sedikit mengalami fluktuasi atau bergelombang.



Gambar 4.10 Kontur fraksi volume air pada kondisi $d/D = 5$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s

Pada gambar 4.11 menampilkan kontur kecepatan pada kondisi yang sama dengan yang ditampilkan pada gambar 4.10 diatas dengan gambar 4.11(a) menampilkan kontur kecepatan dengan kondisi kecepatan inlet 0,8 m/s dan 4.10(b) 1,2 m/s . Dari kedua gambar dibawah ini dapat dilihat bahwa terjadi kenaikan kecepatan di bagian *tip advancing blade* dan terjadi penurunan kecepatan di bagian belakang turbin. Peningkatan kecepatan tersebut ditandai dengan terjadinya transisi perubahan warna yang cenderung menjadi menuju ke warna kuning. Sedangkan penurunan kecepatan yang terjadi pada bagian belakang turbin ditandai dengan terjadinya transisi perubahan warna yang cenderung menuju ke warna biru.

Dari hasil analisa fenomena aliran berdasarkan kontur fraksi volume air dan kontur kecepatan diatas pada kondisi nilai d/D yang paling minimum ($d/D = 1,2$) dan maksimum ($d/D = 5$) serta membandingkannya pada nilai kecepatan *inlet* yang berbeda, maka kemudian dapat dijelaskan alasan mengenai pemulihan *wake* yang terjadi berdasarkan data yang telah disebutkan pada tabel 4.3 yang menampilkan besarnya persentase pemulihan *wake* yang paling maksimum pada setiap nilai X/D yang diamati.



Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada kondisi $d/D = 5$ dengan kecepatan inlet (a) 0,8 m/s dan (b) 1,2 m/s

Pada nilai d/D yang sama dengan kondisi kecepatan *inlet* yang berbeda, dari tabel 4.3 didapatkan bahwa pemulihan *wake* cenderung terjadi lebih cepat pada aliran yang memiliki kecepatan *inlet* yang lebih rendah dibandingkan pada aliran yang memiliki kecepatan *inlet* yang lebih tinggi. Jika dilihat berdasarkan kontur fraksi volume air pada kondisi d/D yang paling minimum, hal tersebut dapat terjadi dikarenakan pada kecepatan *inlet* yang lebih rendah, fenomena *hydraulic jump* terjadi lebih cepat dibandingkan aliran dengan kecepatan inlet yang lebih tinggi. Terjadinya *hydraulic jump* yang lebih cepat tersebut membuat aliran semakin cepat bertransisi menuju ke daerah *subcritical* dan segera memiliki kedalaman baru yang stabil. Dengan kedalaman baru yang stabil tersebut juga membuat kecepatan di daerah tersebut juga membuat profil kecepatan yang lebih seragam.

Sementara pada nilai d/D yang paling maksimum, dimana aliran sudah tidak mengalami fenomena terjadinya *hydraulic jump*, aliran dengan kecepatan *inlet* yang lebih tinggi memiliki daerah *wake* yang lebih panjang dibandingkan dengan aliran yang memiliki kecepatan *inlet* yang lebih kecil. Hal tersebut dapat ditunjukkan pada gambar 4.11 yang menampilkan kontur kecepatan pada nilai d/D yang paling maksimum dimana daerah *wake* tersebut ditandai dengan spektrum warna yang cenderung berwarna biru di bagian belakang turbin yang menandakan terjadinya penurunan kecepatan.

Kemudian pada nilai kecepatan *inlet* yang sama dengan kondisi d/D yang berbeda, dari tabel 4.3 didapatkan bahwa pemulihan *wake* cenderung terjadi lebih cepat pada aliran dengan kondisi d/D yang lebih kecil dibandingkan pada aliran dengan kondisi d/D yang lebih besar. Hal tersebut dapat terjadi dikarenakan pada aliran dengan kondisi d/D yang lebih kecil terjadi penurunan level permukaan air ketika aliran mulai memasuki daerah *downstream* sehingga pada daerah tersebut juga terjadi peningkatan kecepatan akibat luasan aliran menyempit. Peningkatan kecepatan ketika aliran memasuki daerah *downstream* tersebut membuat *wake*

yang diakibatkan oleh turbin dihimpit oleh aliran yang memiliki kecepatan yang lebih tinggi dan terjadi transfer momentum pada aliran yang memiliki kecepatan rendah sehingga *wake* dapat terpulihkan lebih cepat.

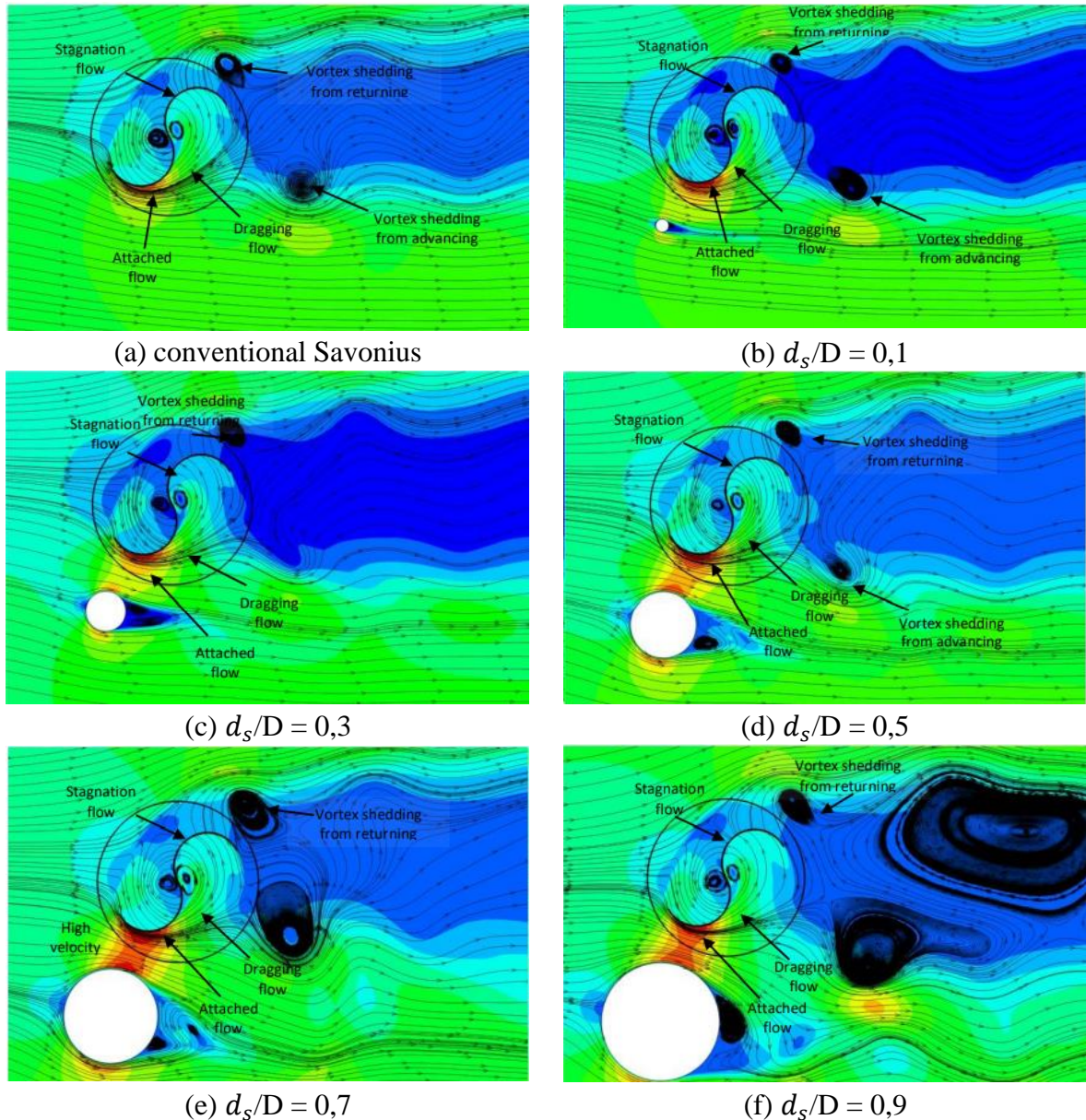
4.4 Diskusi

Berdasarkan hasil-hasil yang telah didapatkan pada penelitian ini yang kemudian juga telah dilakukan analisa, maka kemudian dapat dilakukan diskusi untuk memahami lebih jelas mengenai apa yang telah didapatkan dimana pada bagian ini peneliti akan membandingkan hasil yang didapat pada penelitian ini dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh peneliti lain dengan kondisi atau fenomena yang sama atau mirip.

Bagian pertama yang akan didiskusikan adalah mengenai trend dari nilai *coefficient of power* (C_p) dimana terdapat kecenderungan kenaikan nilai *coefficient of power* pada rentang nilai $d/D = 1,2$ hingga $d/D = 3$ dan setelah melewati rentang nilai tersebut kecenderungan kenaikan nilai *coefficient of power* berbalik menjadi cenderung mengalami penurunan. Alasan terjadinya fenomena tersebut telah dijelaskan di bagian analisa trend nilai *coefficient of power* berdasarkan kontur kecepatan di sekitar turbin. Dari kontur kecepatan di sekitar turbin dijelaskan bahwa terjadi kenaikan kecepatan disekitar *advancing blade* dimana kenaikan kecepatan tersebut semakin besar nilainya pada nilai d/D yang juga semakin besar dalam rentang nilai $d/D = 1,2$ hingga nilai $d/D = 3$. Dijelaskan juga bahwa besarnya peningkatan tersebut yang mempengaruhi trend kenaikan nilai *coefficient of power*.

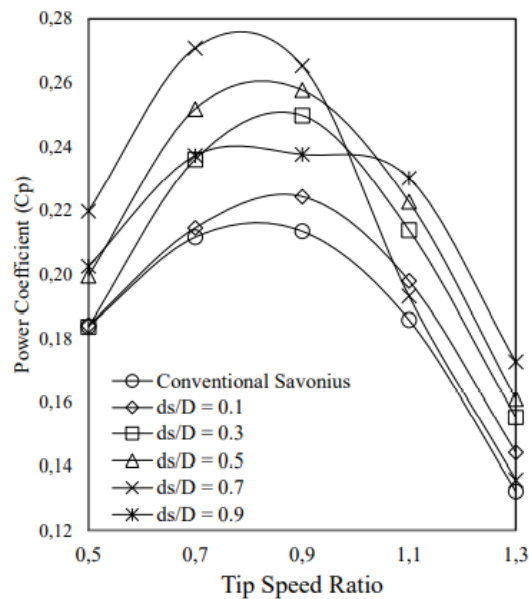
Terjadinya trend kenaikan nilai *coefficient of power* ketika terjadi peningkatan kecepatan di bagian *advancing blade* juga terjadi pada penelitian yang dilakukan oleh Priyo *et al* (2019) yang mempelajari tentang analisa aliran dari silinder sirkular pada turbin hidrokinetic Savonius yang diletakkan di samping *advancing blade*. Tujuan penambahan silinder sirkular di samping *advancing blade* tersebut adalah untuk meningkatkan kecepatan aliran di bagian *tip* dekat *advancing blade*. Peningkatan aliran tersebut diakibatkan oleh efek *nozzle* yang diciptakan silinder sirkular yang mempersempit daerah aliran sehingga aliran aliran mengalami percepatan.

Dari kontur kecepatan di sekitar turbin yang didapatkan oleh Priyo *et al* (2019) pada hasil penelitiannya yang ditunjukkan pada gambar 4.12 menunjukkan terjadinya peningkatan kecepatan pada bagian *advancing bade*. Ketika diameter silinder diperbesar yang berarti semakin mempersempit daerah aliran di bagian *tip advancing blade* maka peningkatan kecepatan aliran di bagian tersebut juga semakin meningkat. Meningkatnya kecepatan aliran juga meningkatkan momentum aliran di antara silinder dengan turbin. Selain itu, kecepatan di area *attached flow* dapat menyebabkan penurunan tekanan pada bagian *advancing blade* yang kemudian hal tersebut dapat meningkatkan torsi positif dan secara otomatis daya yang dihasilkan oleh turbin juga meningkat.



Gambar 4.12 Kontur kecepatan di sekitar turbin dari hasil penelitian Priyo *et al* (2019)

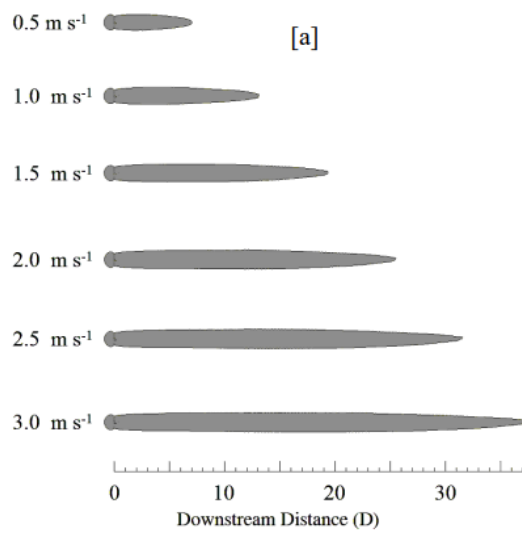
Meningkatnya performa turbin ketika aliran di bagian *advancing blade* dibuktikan oleh grafik *coefficient of power* yang ditampilkan pada gambar 4.13 dibawah. Pada grafik yang menampilkan *Coefficient of Power* sebagai fungsi *TSR* tersebut dapat dilihat bahwa secara rata-rata terjadi peningkatan nilai *coefficient of power* ketika nilai diameter silinder sirkular yang dipasang di samping *advancing blade* semakin besar di setiap nilai *TSR* yang sama. Jika dilihat berdasarkan gambar 4.12, meningkatnya diameter silinder sirkular tersebut dapat membuat kecepatan aliran diantara turbin dengan silinder semakin meningkat. Misalnya saja pada nilai *TSR* = 0,9., *conventional* Savonius memiliki nilai *coefficient of power* yang paling kecil. Kemudian saat turbin ditambahkan silinder sirkular, terjadi kenaikan nilai *coefficient of power* seiring dengan meningkatnya diameter turbin. Namun ketika nilai diameter silinder dibanding diameter turbin yang sama dengan 0,9., nilai *coefficient of power* mengalami penurunan sehingga nilai *coefficient of power* maksimum pada nilai *TSR* 0,9 tersebut terjadi saat silinder sirkular yang digunakan memiliki nilai perbandingan $d_s/D = 0,7$.



Gambar 4.13 Grafik *coefficient of power vs TSR* hasil penelitian Priyo *et al* (2019)

Hal yang akan didiskusikan selanjutnya adalah mengenai pemulihan *wake* yang terjadi pada berbagai kondisi. Dari data pemulihan *wake* yang telah didapatkan pada tabel 4.2 yang menampilkan besarnya persentase pemulihan *wake* pada berbagai kondisi yang diamati dinyatakan bahwa dalam nilai d/D yang sama, aliran dengan kecepatan *inlet* yang lebih besar rata-rata memiliki jarak pemulihan *wake* yang lebih panjang. Pada saat nilai $d/D = 5$, dimana sudah tidak ada indikasi terjadinya penurunan level permukaan air saat aliran memasuki daerah *downstream* baik pada kecepatan *inlet* 0,8 m/s maupun 1,2 m/s, dapat dilihat pada kontur kecepatan menunjukkan bahwa *wake* yang dihasilkan aliran dengan kecepatan *inlet* 1,2 m/s memiliki jarak yang lebih panjang dibandingkan dengan aliran dengan kecepatan *inlet* 0,8 m/s.

Mengenai terjadinya *wake* yang lebih panjang pada aliran dengan kecepatan *inlet* yang lebih tinggi tersebut pernah dipelajari oleh Malki *et al.* (2011) dimana dalam jurnal hasil penelitiannya yang mempelajari tentang struktur *wake* dari *tidal stream turbine* dengan variasi kecepatan aliran menyimpulkan bahwa panjang *wake* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan *inlet*. Pada gambar 4.14 dibawah merupakan hasil yang didapatkan pada penelitian yang dilakukan oleh Malki *et al.* (2011) yang menampilkan panjang *wake* yang dihasilkan pada aliran dengan kondisi kecepatan *inlet* yang berbeda. Adapun nilai kecepatan *inlet* yang digunakan adalah 0,5 m/s, 1,0 m/s, 1,5 m/s, 2,0 m/s, 2,5 m/s, dan 3,0 m/s. Dari gambar 4.14 dapat dilihat bahwa terjadi penambahan panjang yang konsisten seiring bertambahnya nilai kecepatan *inlet*.



Gambar 4.14 Panjang *wake* berdasarkan kecepatan *inlet* hasil penelitian Malki *et al.* (2011)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil studi numerik yang telah dilakukan untuk mempelajari pengaruh kedalaman aliran terhadap pemulihan *wake* dan juga performansi pada *cross-flow hidrokynetik turbine* didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Perbedaan nilai *depth to diameter ratio* pada aliran dapat mempengaruhi pemulihan *wake* dimana ketika nilai *depth to diameter ratio* semakin meningkat maka pemulihan *wake* terjadi pada jarak yang lebih jauh. Pada kondisi aliran dengan kecepatan *inlet* bernilai 0,8 m/s dan 1,2 m/s , pemulihan *wake* dengan jarak terpendek terjadi pada nilai *depth to diameter ratio* yang paling minimum.
2. Perbedaan nilai *depth to diameter ratio* dari sebuah aliran dapat mempengaruhi performansi turbin dimana nilai performansi turbin mengalami peningkatan sampai mencapai titik maksimumnya yang terjadi ketika *depth to diameter ratio* bernilai 3.
3. Setelah performansi turbin telah mencapai titik maksimum, performansi turbin akan mengalami penurunan seiring meningkatnya nilai *depth to diameter ratio*.
4. Pada nilai *depth to diameter ratio* tetap, nilai kecepatan *inlet* dapat mempengaruhi pemulihan *wake* dan performansi turbin. Ketika nilai kecepatan *inlet* semakin meningkat, maka pemulihan *wake* terjadi lebih jauh dan performansi turbin mengalami peningkatan. Pada kondisi *depth to diameter ratio* bernilai 1,2., pada aliran dengan kecepatan *inlet* 0,8 m/s , pemulihan *wake* terjadi pada daerah X/D 10 dan turbin memiliki nilai *coefficient of power* sebesar 0,0203. Sedangkan pada aliran kecepatan *inlet* 1,2 m/s , pemulihan *wake* belum dan turbin memiliki nilai *coefficient of power* sebesar 0,0267.

5.2 Saran

Penelitian yan dilakukan secara simulasi numerik tentang pengaruh kedalaman aliran terhadap pemulihan *wake* dan juga performansi pada *cross-flow hidrokynetik turbine* merupakan studi tahap awal yang masih perlu dikembangkan lebih jauh lagi. Oleh karena itu penulis memberikan saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Dibutuhkan penelitian lebih lanjut tentang pengaruh *depth to diameter ratio* terhadap pemulihan *wake* dan performansi pada turbin yang dilakukan dengan simulasi numerik secara 3 Dimensi.
2. Diperlukan penelitian secara eksperimental untuk memperkuat hasil simulasi yang dilakukan dan mengetahui fenomena yang sebenarnya terjadi dalam kondisi riil-nya.

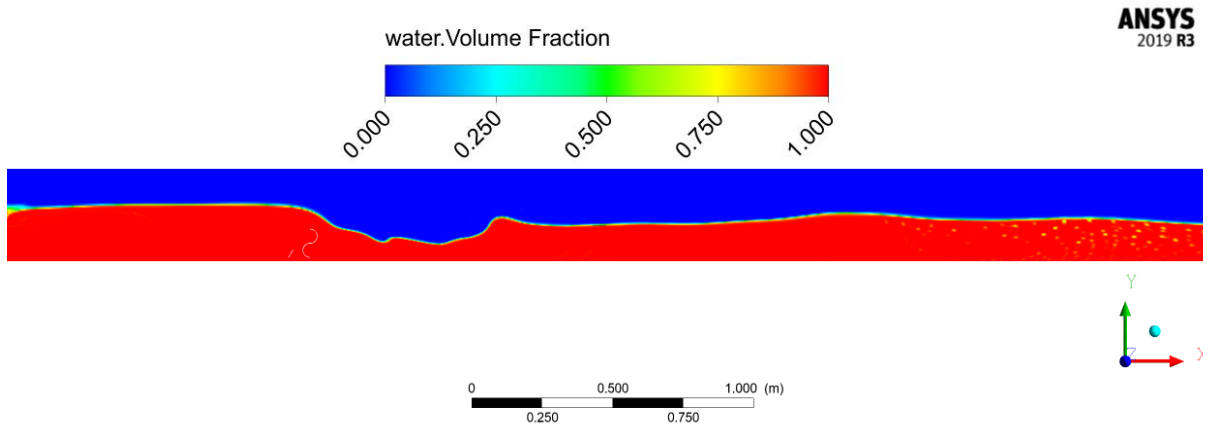
Daftar Pustaka

- Anuj Kumar, R.P. Sain. 2016. Performance parameters of Savonius type hydrokinetic turbine – A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64 (2016) 289–310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.005>
- Brian Kirke. 2020. Hydrokinetic turbines for moderate sized rivers. *Energy for Sustainable Development* 58 (2020) 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.08.003>
- Dandun Mahesa Prabowoputra, Syamsul Hadi, Aditya Rio Prabowo, dan Aditya Rio Prabowo. 2020. Performance Investigation of the Savonius Horizontal Water Turbine Accounting for Stage Rotor Design. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research* Vol. 9, No. 2. doi: 10.18178/ijmerr.9.2.184-189
- Eman Shaker Hussein and Eman Shaker Hussein. 2018. Numerical Simulation of Two-Phase Flow With Hydraulic Jump. Volume 9, pp. 470–486. <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=12>
- Gurney, M. & Kaygusuz, K., 2010. Hydrokinetic Energy Conversion System: A Technology Status Review. *Renewable and Sustainable Energy Review*, Volume 14, pp. 2996-3004.
- IESR. 2019. Laporan Status Energi Bersih Indonesia: Potensi, Kapasitas Terpasang, dan Rencana Pembangunan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan 2019.
- Kailash Golecha, T.I. Eldho, S.V. Prabhu. 2010. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine. *Applied Energy* 88 (2011) 3207–3217. doi:10.1016/j.apenergy.2011.03.025
- Mohd Badrul Salleh, Noorfazreena M. Kamaruddin, Zulfaa Mohamed-Kassim. 2020. The effects of deflector longitudinal position and height on the power performance of a conventional Savonius turbine. *Energy Conversion and Management* 226 (2020) 113584. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113584>
- Nauman Riyaz Maldar, Cheng Yee Ng, Elif Oguz. 2020. A review of the optimization studies for Savonius turbine considering hydrokinetic applications. *Energy Conversion and Management* 226 (2020) 113495. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113495>
- Nauman Riyaz Maldar, Cheng Yee Ng, Lee Woen Ean, Elif Oguz, Ahmad Fitriadhy, and Hooi Siang Kang. 2020. A Comparative Study on the Performance of a Horizontal Axis Ocean Current Turbine Considering Deflector and Operating Depths. *Sustainability* 2020, 12, 3333; doi:10.3390/su12083333
- Nitin Kolekar, Arindam Banerjee. 2015. Performance characterization and placement of a marine hydrokinetic turbine in a tidal channel under boundary proximity and blockage effects. *Applied Energy* 148 (2015) 121–133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.052>

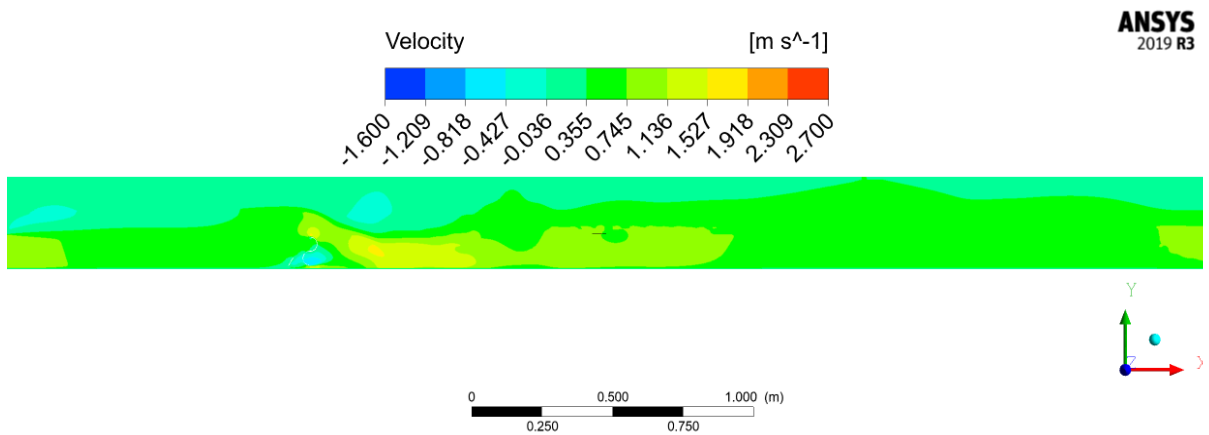
- Pablo Ouro, Stefan Runge, Qianyu Luo, Thorsten Stoesser. 2019. Three-dimensionality of the wake recovery behind a vertical axis turbine. *Renewable Energy* 133 (2019) 1066e1077. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.111>
- Payam Aghsaee, Corey D. Markfort. 2018. Effects of flow depth variations on the wake recovery behind a horizontal-axis hydrokinetic in-stream turbine. *Renewable Energy* 125 (2018) 620-629. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.137>
- Priyo Agus Setiawan, Triyogi Yuwono, Wawan Aries Widodo. 2019. Flow Analysis of a Circular Cylinder on the Savonius Hydrokinetic Turbine Performance Placed the Side of Advancing Blade. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS* Vol:19 No:06
- R. Conzemius. 2010. Wind turbine and sodar observations of wakes in a large wind farm, in 19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. p. 7.
- Ross Vennell, Simon W. Funke, Scott Draper, Craig Stevens, Tim Divett. 2015. Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 454–472. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.022>
- Sanderse, B., 2009. Aerodynamics of Wind Turbine Wakes. Energy Research Center of the Netherlands.
- Stallard T, Collings R, Feng T, Whelan J. 2013. Interactions between tidal turbine wakes: experimental study of a group of three-bladed rotors. *Phil Trans R Soc A* 371: 20120159. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2012.0159>
- V.S. Neary, B. Gunawan, D.C. Sale. 2013. Turbulent inflow characteristics for hydrokinetic energy conversion in rivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26 (2013) 437-445. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.033>
- W.I. Ibrahim, M.R. Mohamed, R.M.T.R. Ismail, P.K. Leung, W.W. Xing, A.A. Shah. 2021. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports* 7 (2021) 2021–2042. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.003>
- Yaling Chen, Binliang Lin, Jian Sun, Jinxi Guo, Wenlong Wu. 2019. Hydrodynamic effects of the ratio of rotor diameter to water depth: An experimental study. *Renewable Energy* 136 (2019) 331-341. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.022>

LAMPIRAN

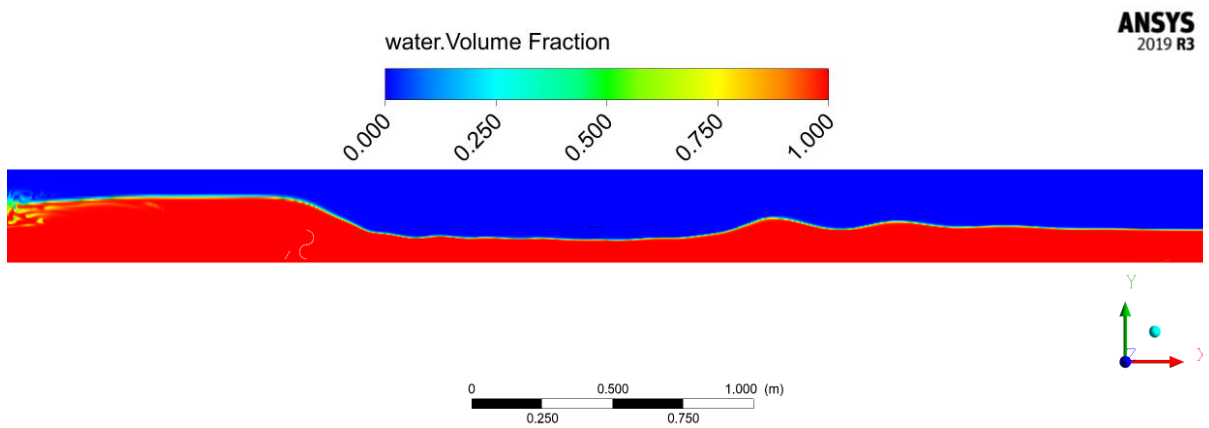
Lampiran 1. Kontur Fraksi Volume Air dan Kontur Kecepatan



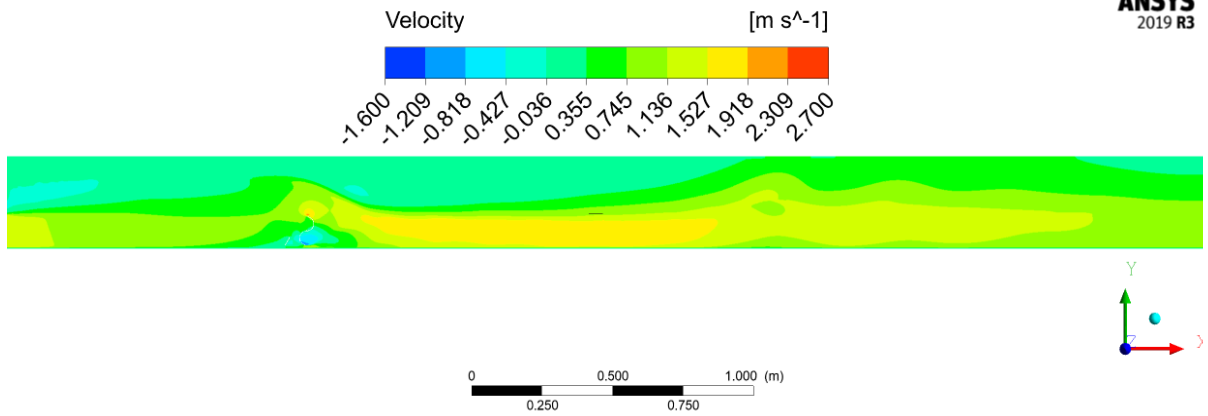
Kontur fraksi volume air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 1,2$



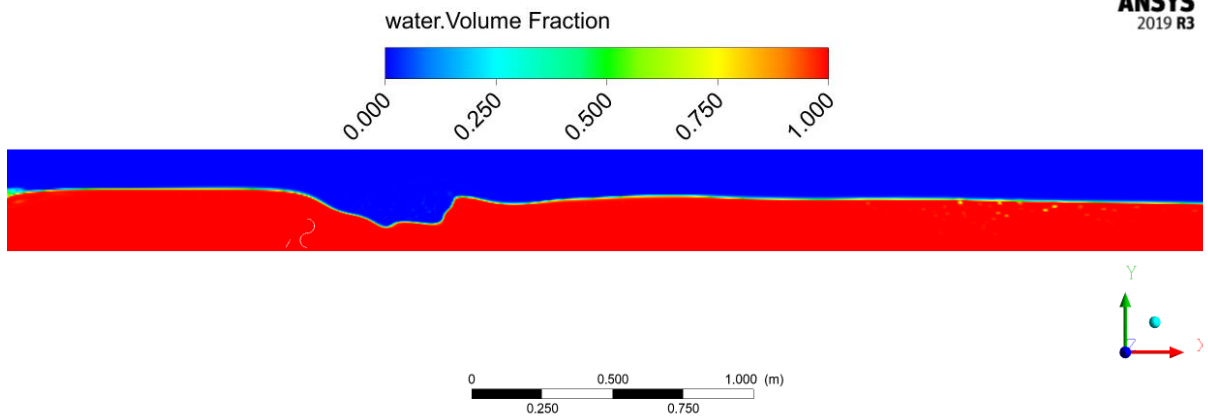
Kontur kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 1,2$



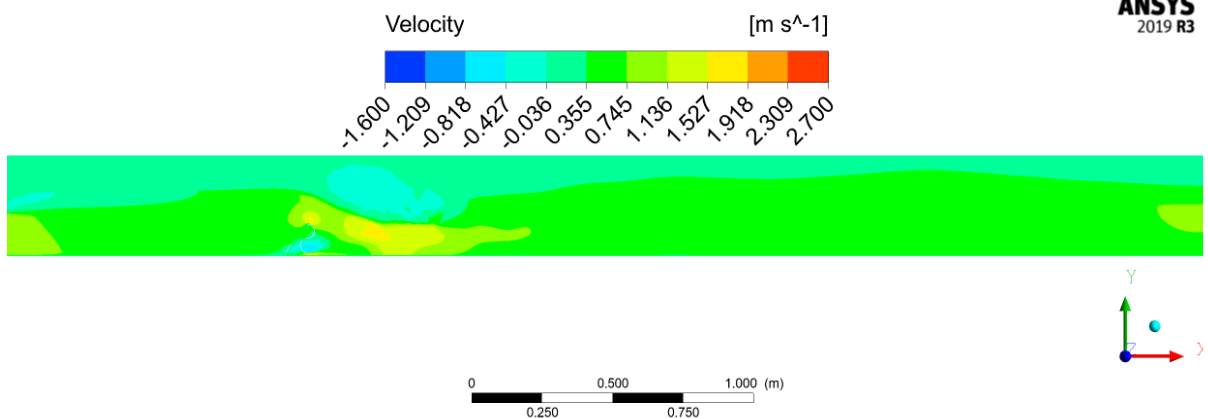
Kontur fraksi volume air pada $U = 1,2$ dan $d/D = 1,2$



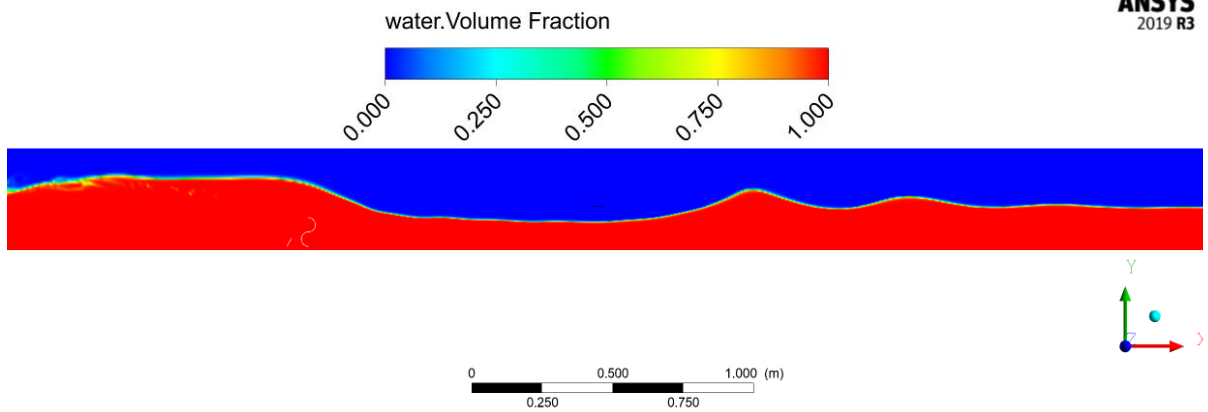
Kontur kecepatan pada $U = 1,2$ dan $d/D = 1,2$



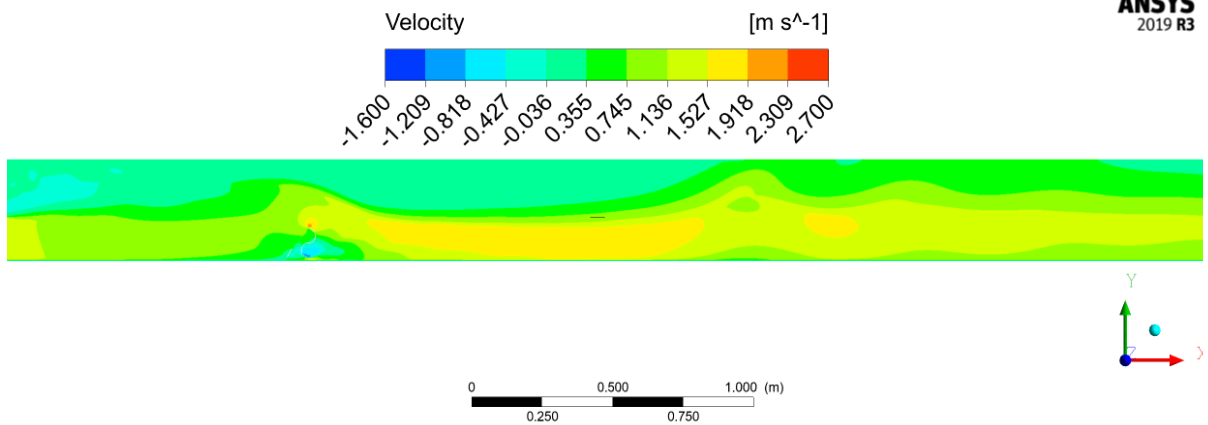
Kontur fraksi volume air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 1,5$



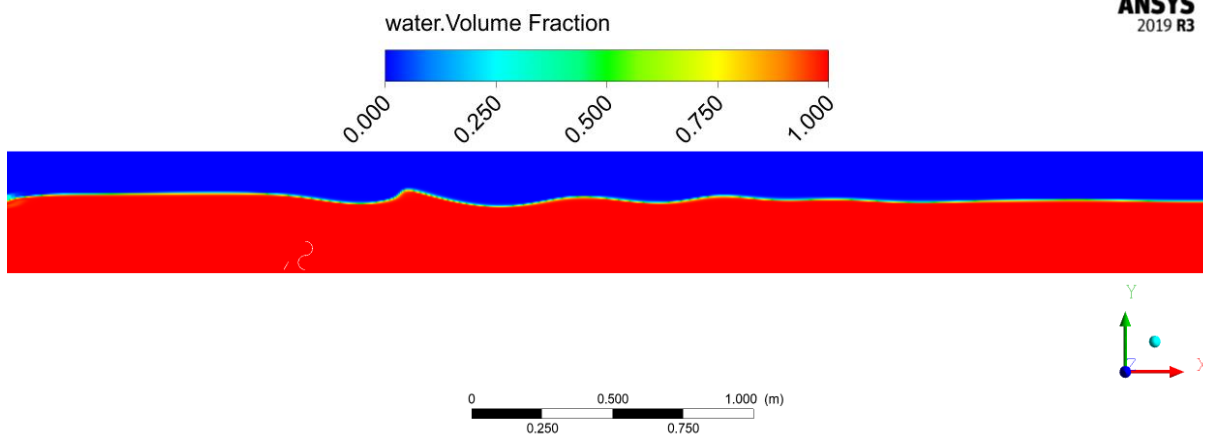
Kontur kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 1,5$



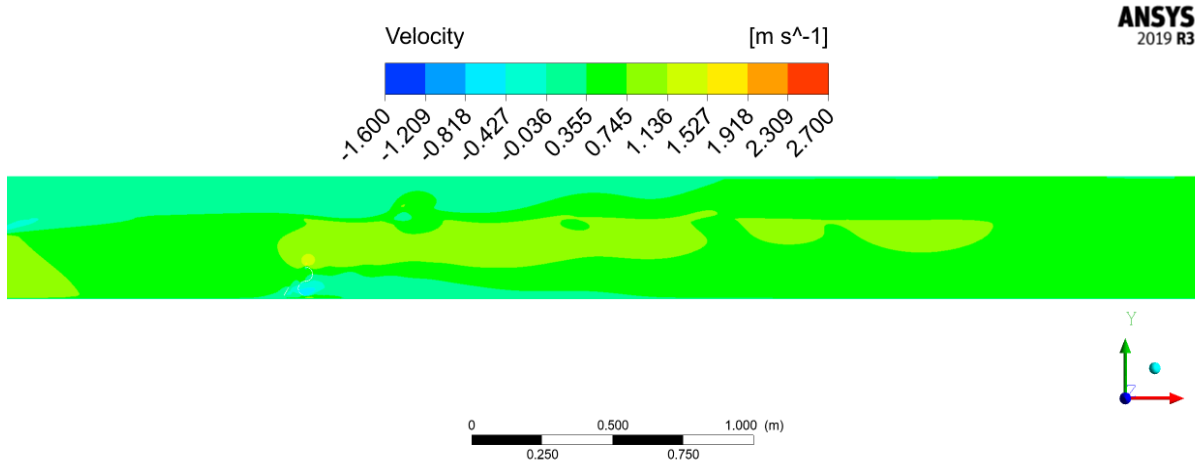
Kontur fraksi volume air pada $U = 1,2$ dan $d/D = 1,5$



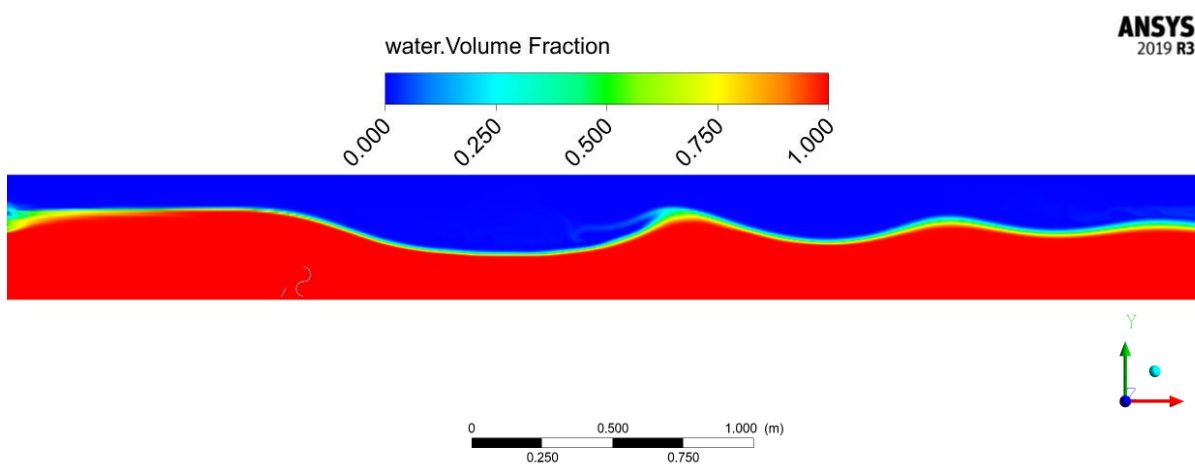
Kontur Kecepatan pada $U = 1,2$ dan $d/D = 1,5$



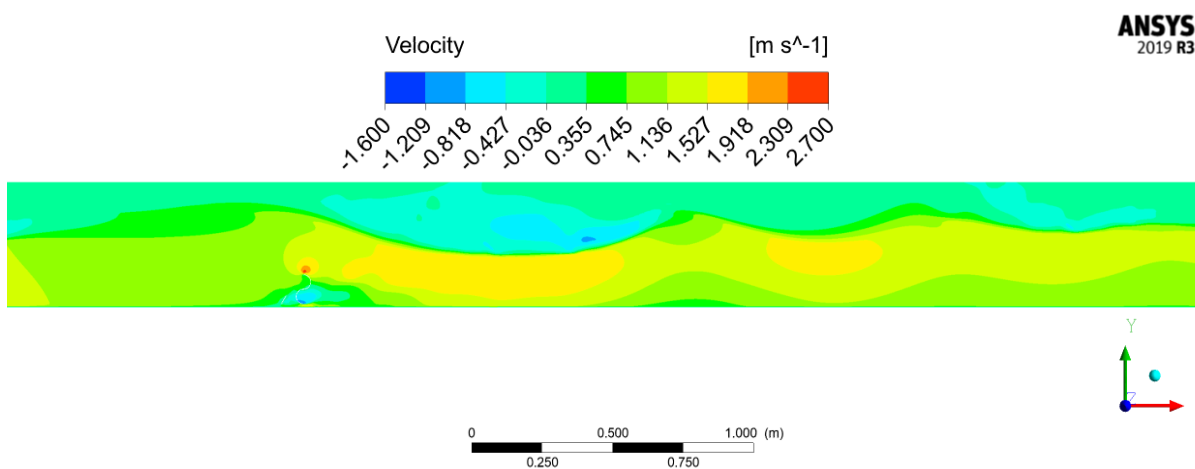
Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 2,25$



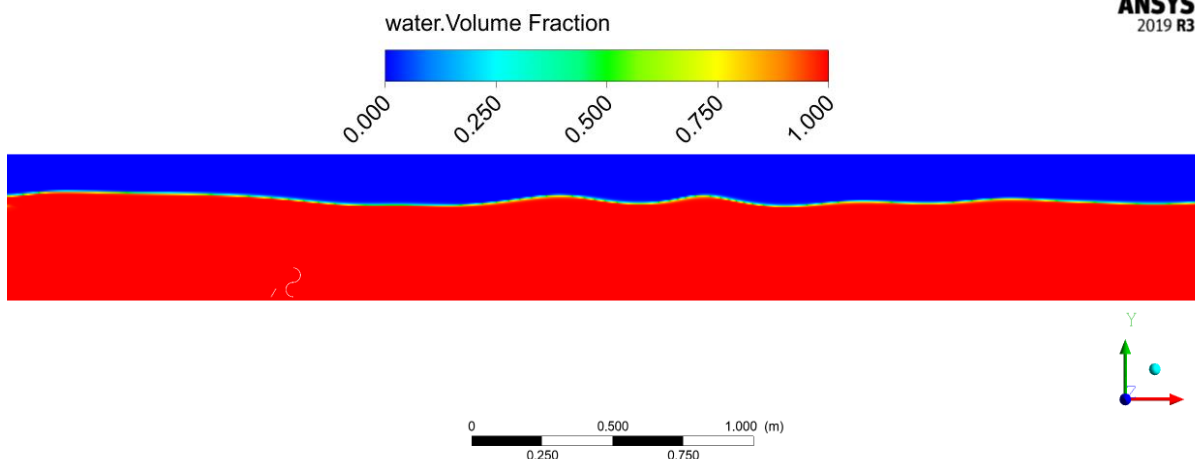
Kontur Kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 2,25$



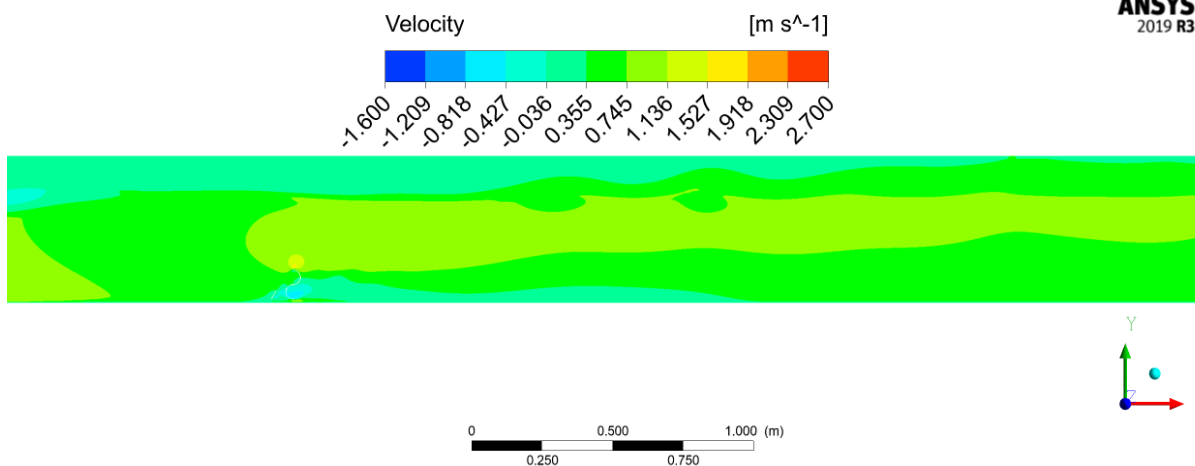
Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 1,2$ dan $d/D = 2,25$



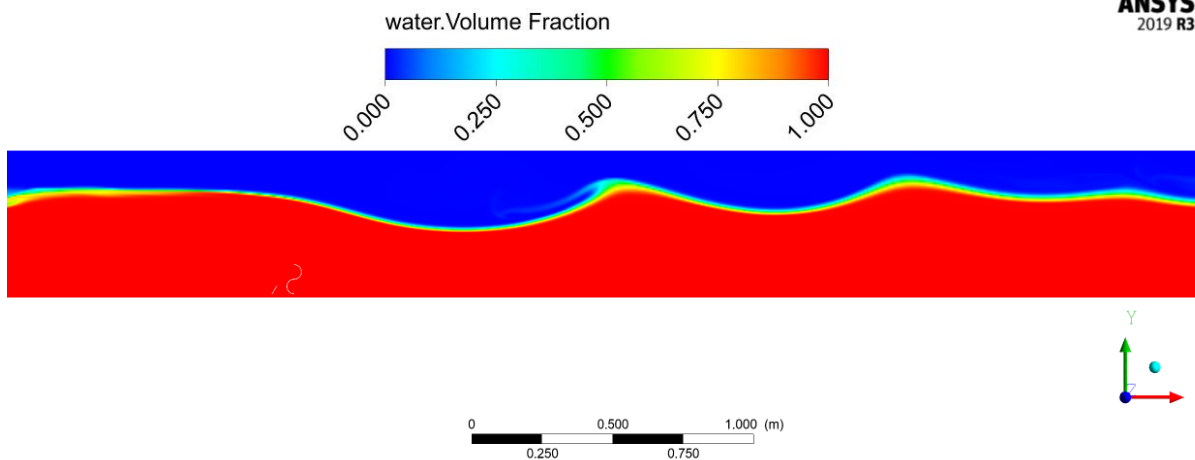
Kontur Kecepatan pada $U = 1,2$ dan $d/D = 2,25$



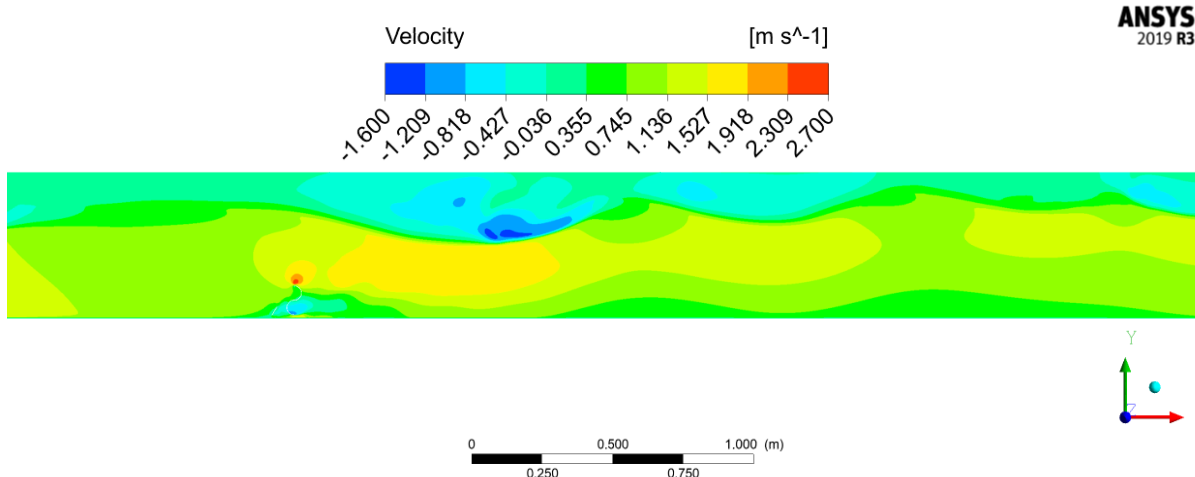
Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 3$



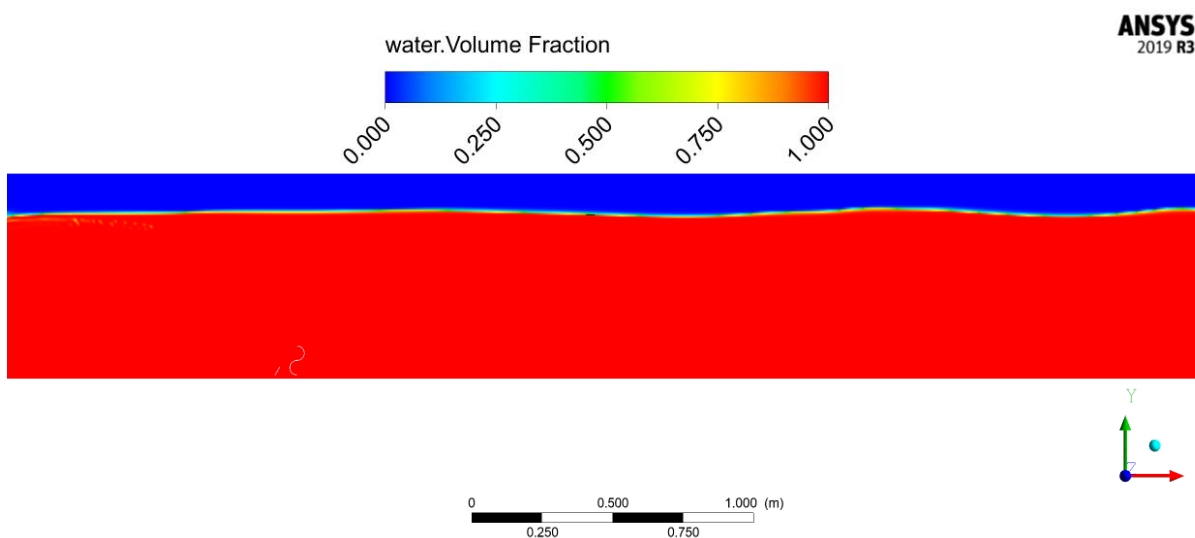
Kontur Kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 3$



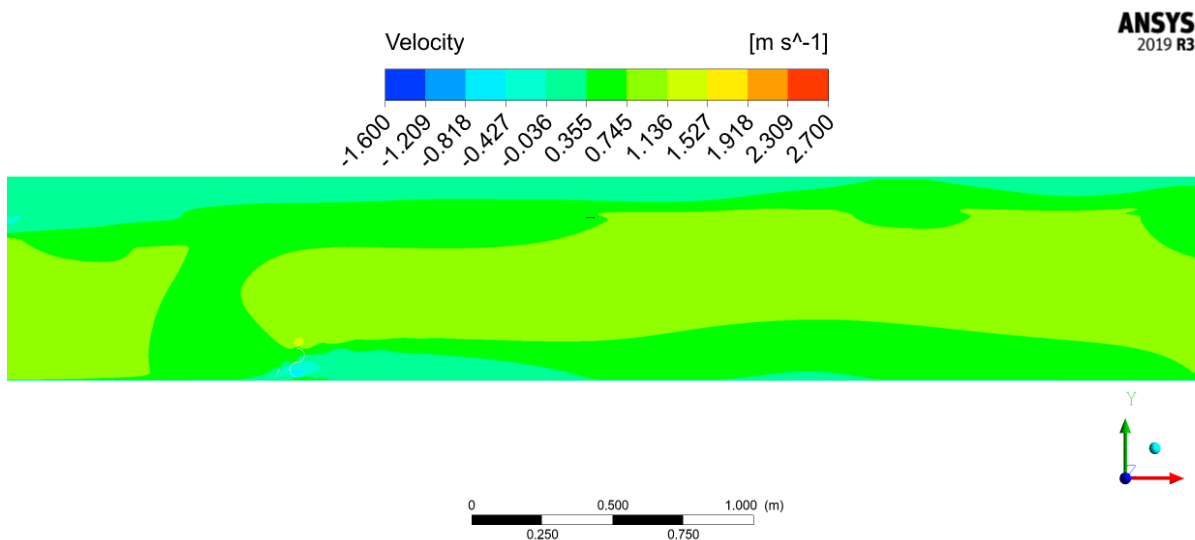
Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 1,2$ dan $d/D = 3$



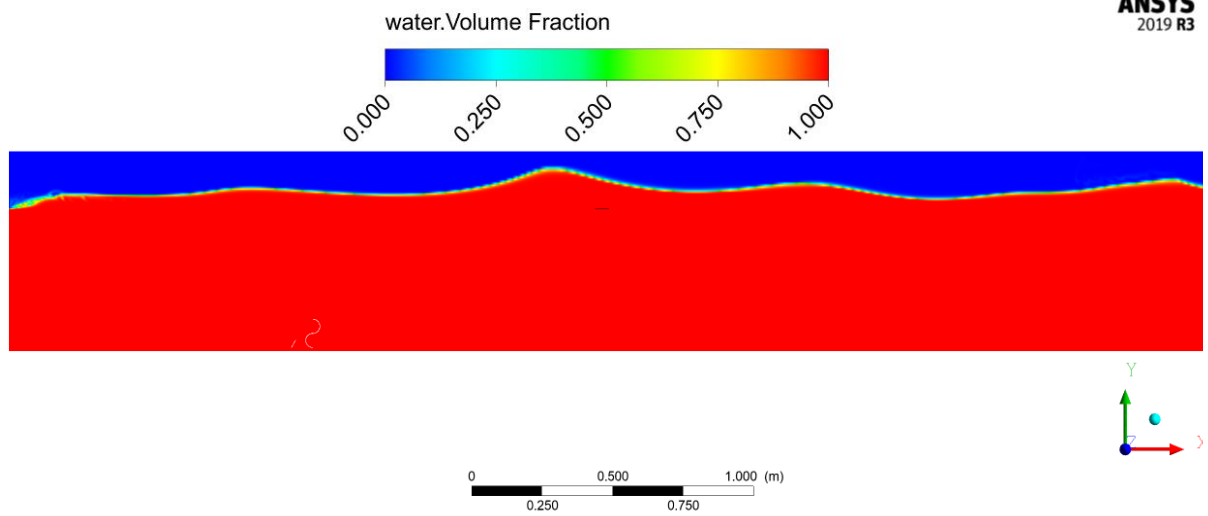
Kontur Kecepatan pada $U = 1,2$ dan $d/D = 3$



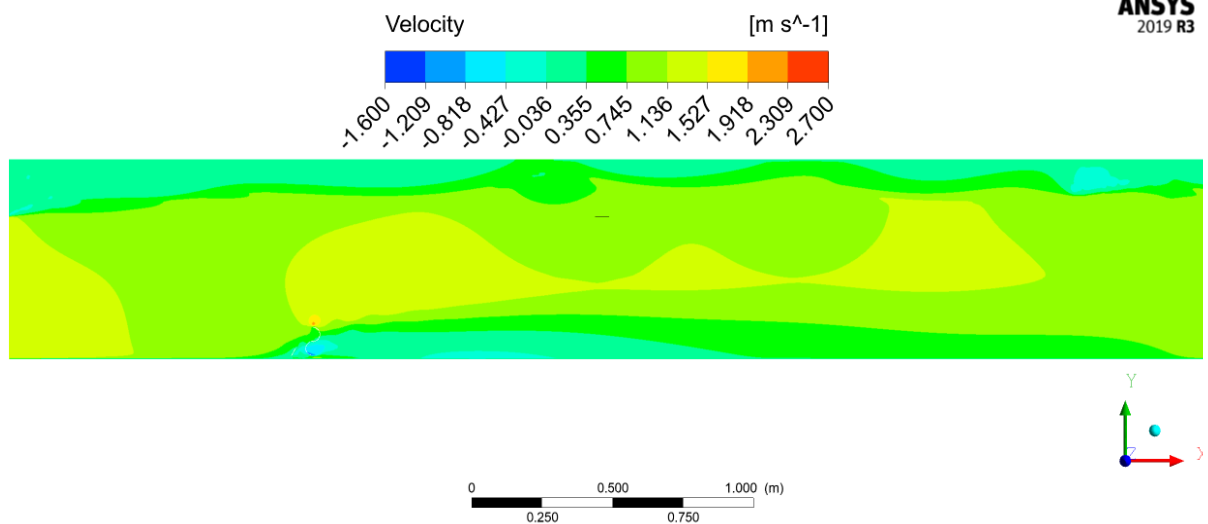
Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 5$



Kontur Kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 5$

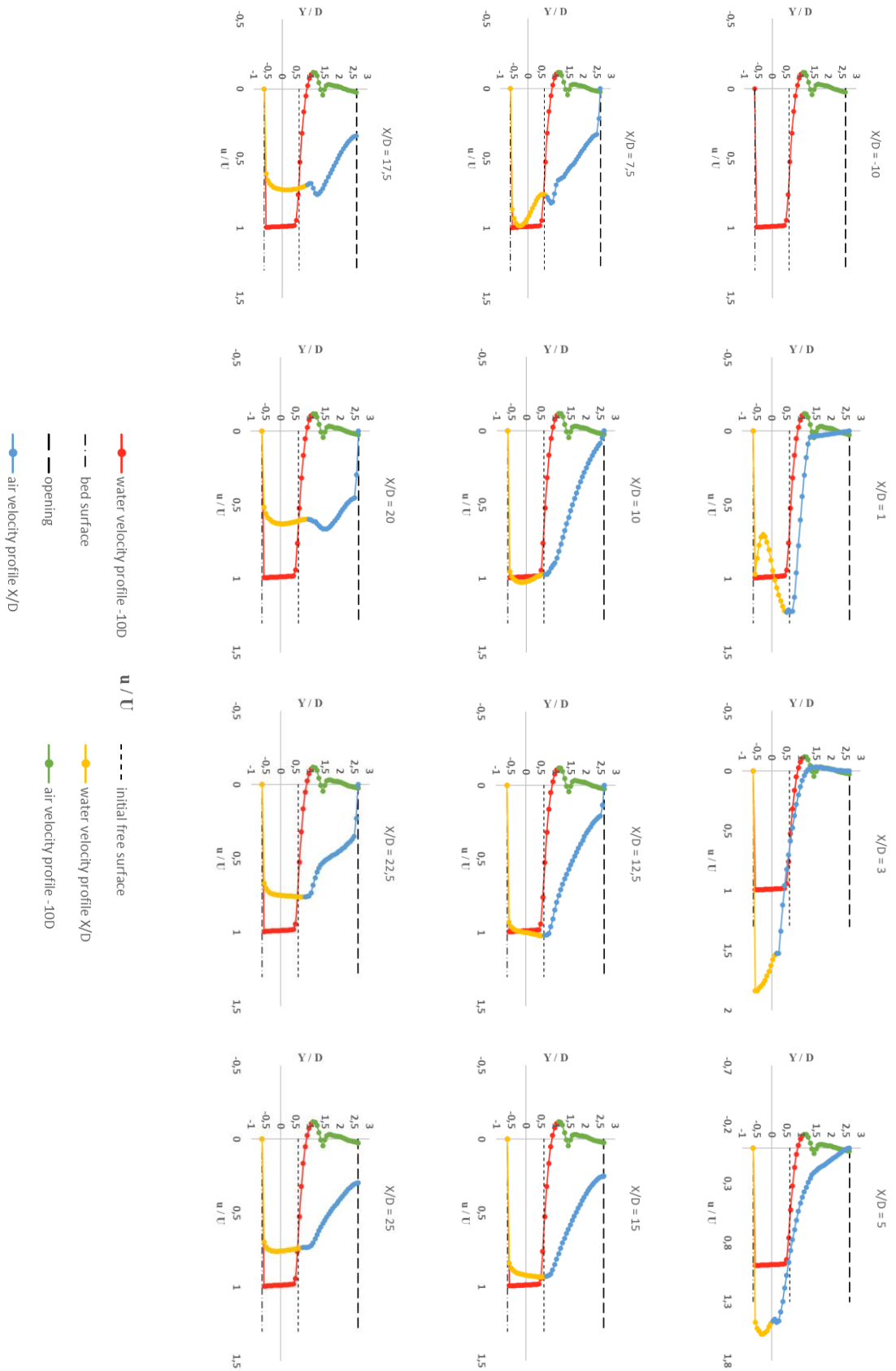


Kontur Fraksi Volume Air pada $U = 0,8$ dan $d/D = 5$

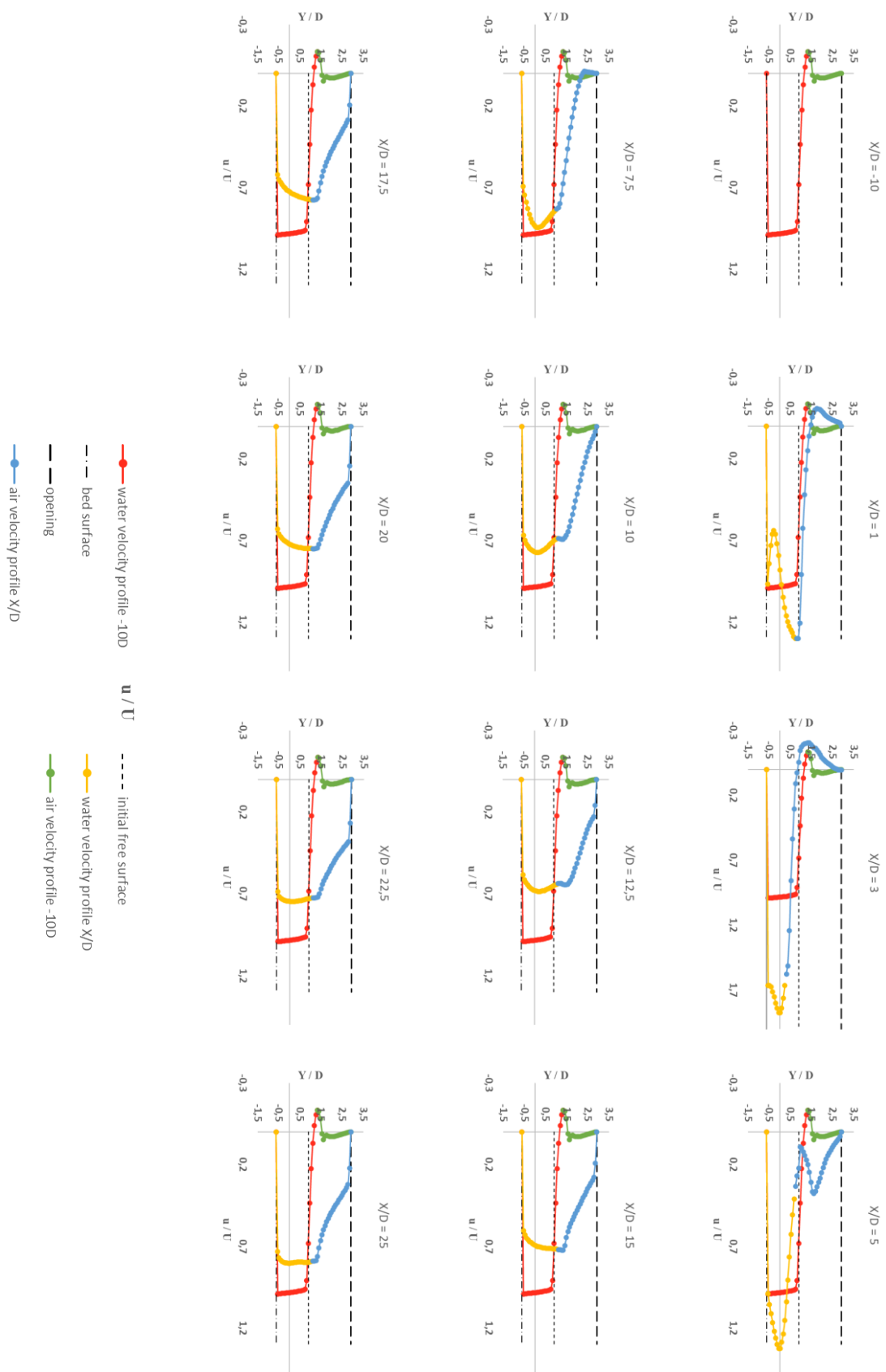


Kontur Kecepatan pada $U = 0,8$ dan $d/D = 5$

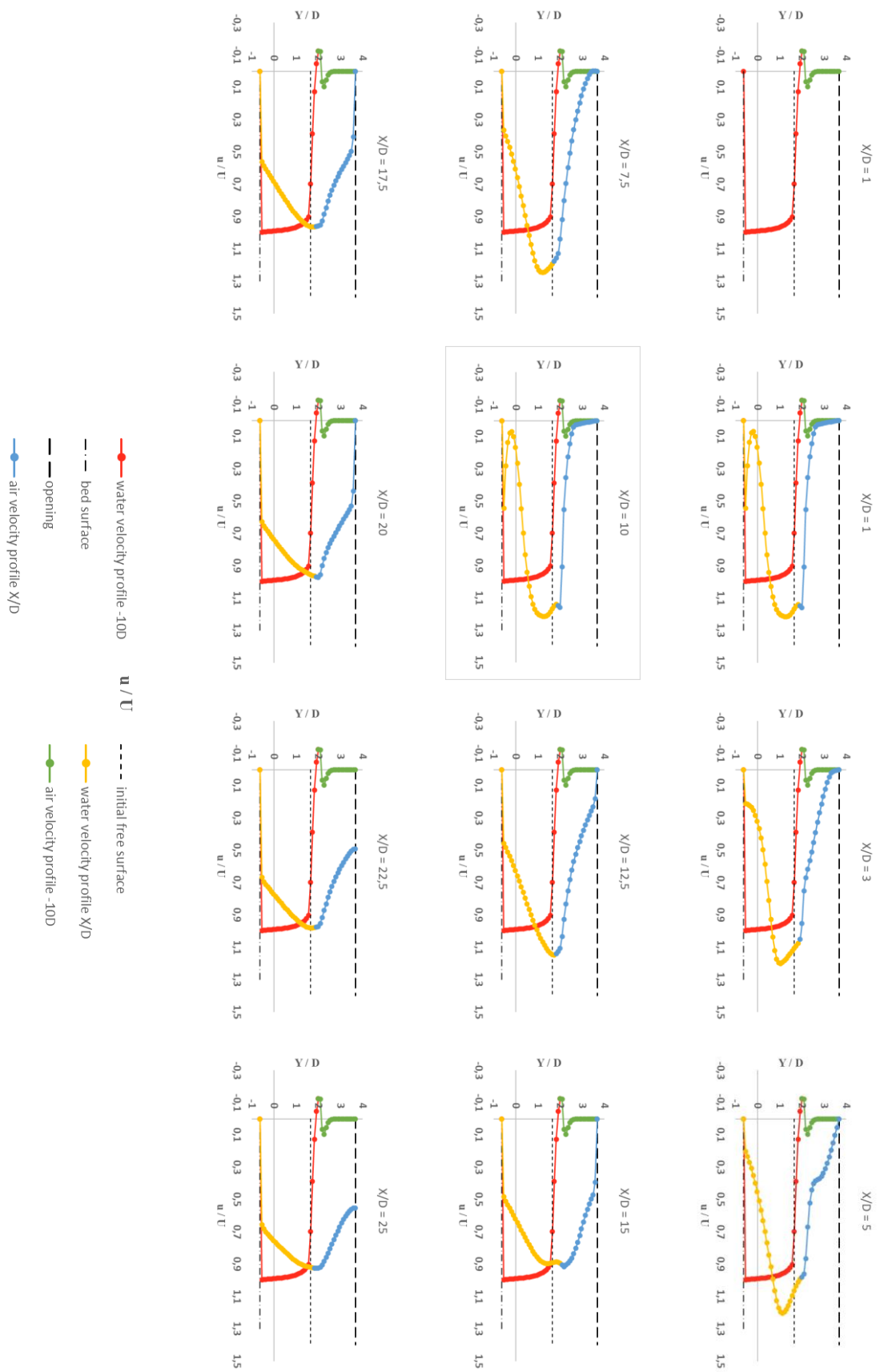
Lampiran 2. Profil Kecepatan Daerah *Upstream* dan *Downstream*



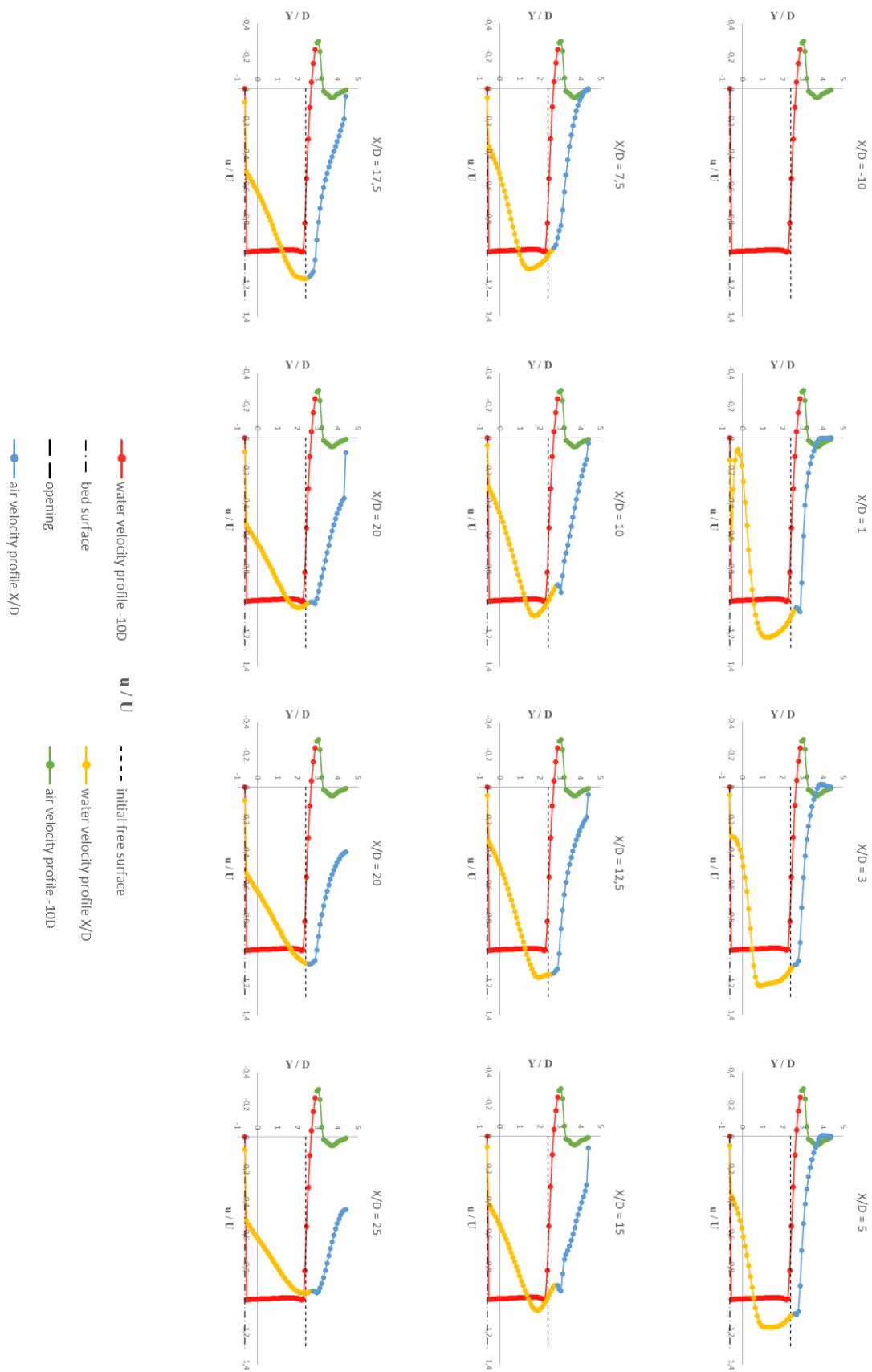
Profil kecepatan pada kondisi $U = 0,8$ dan $d/D = 1,2$



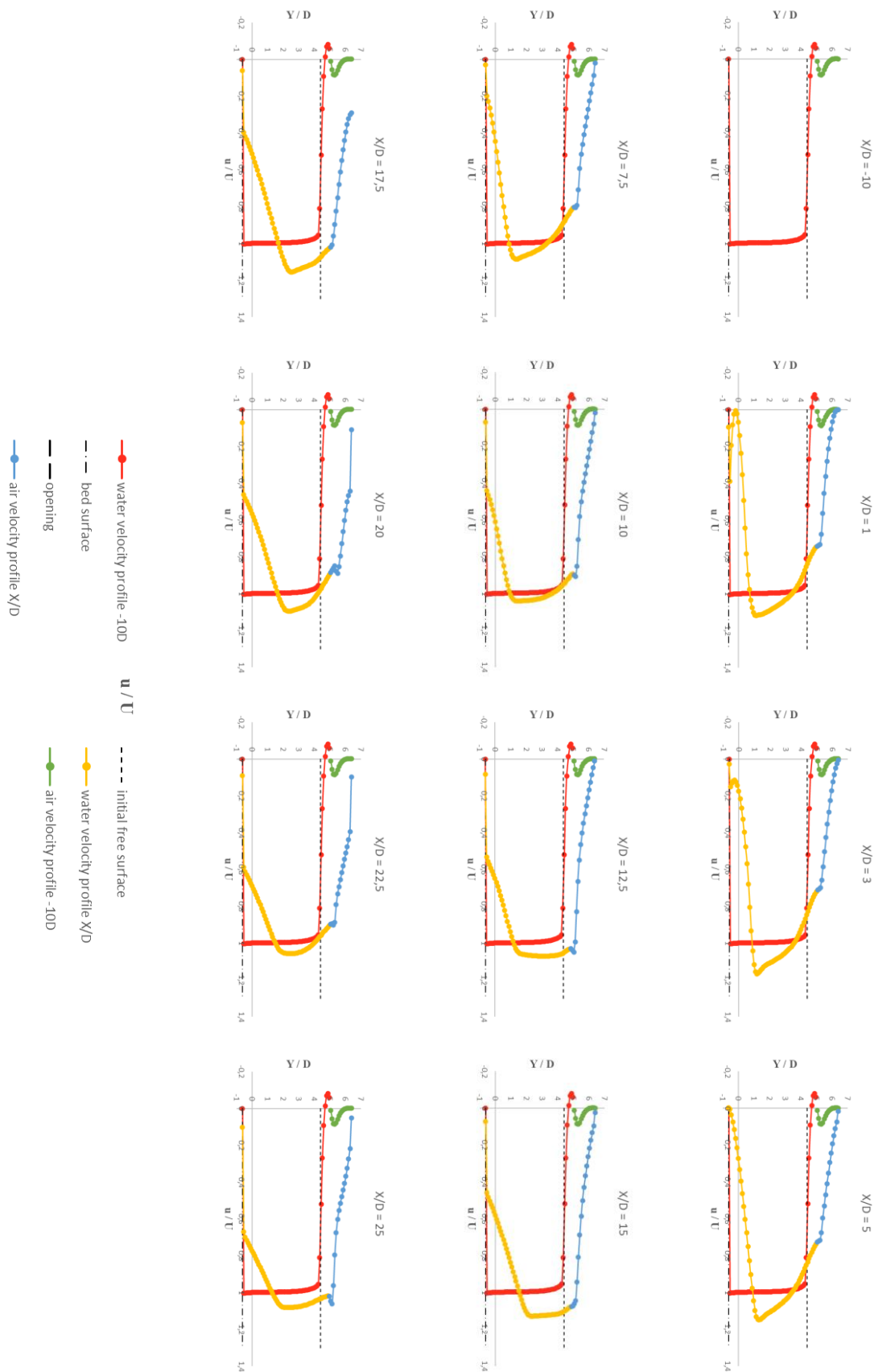
Profile kecepatan pada kondisi $U = 0,8$ dan $d/D = 1,5$



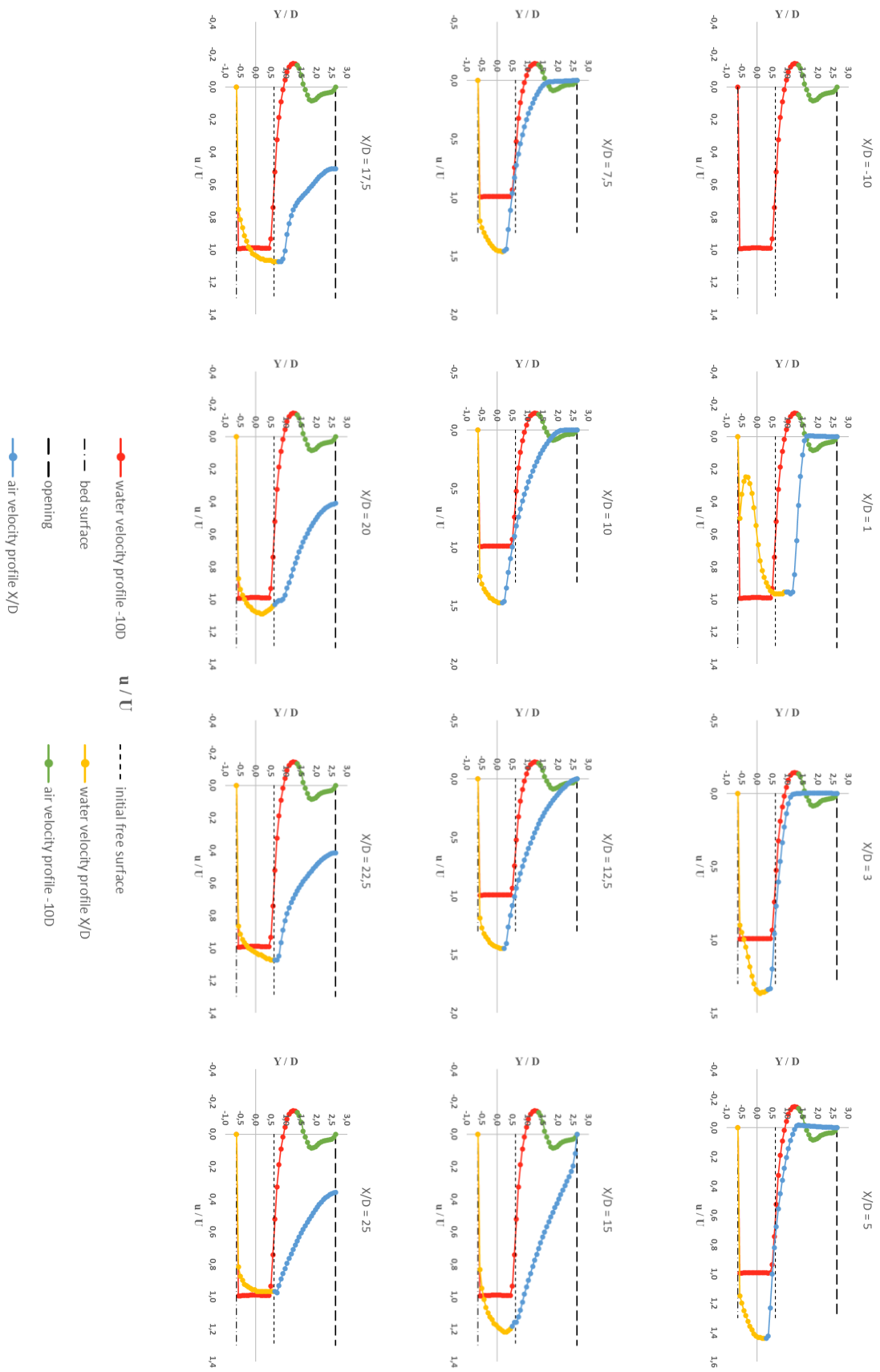
Profile kecepatan pada kondisi $U = 0,8$ dan $d/D = 2,25$



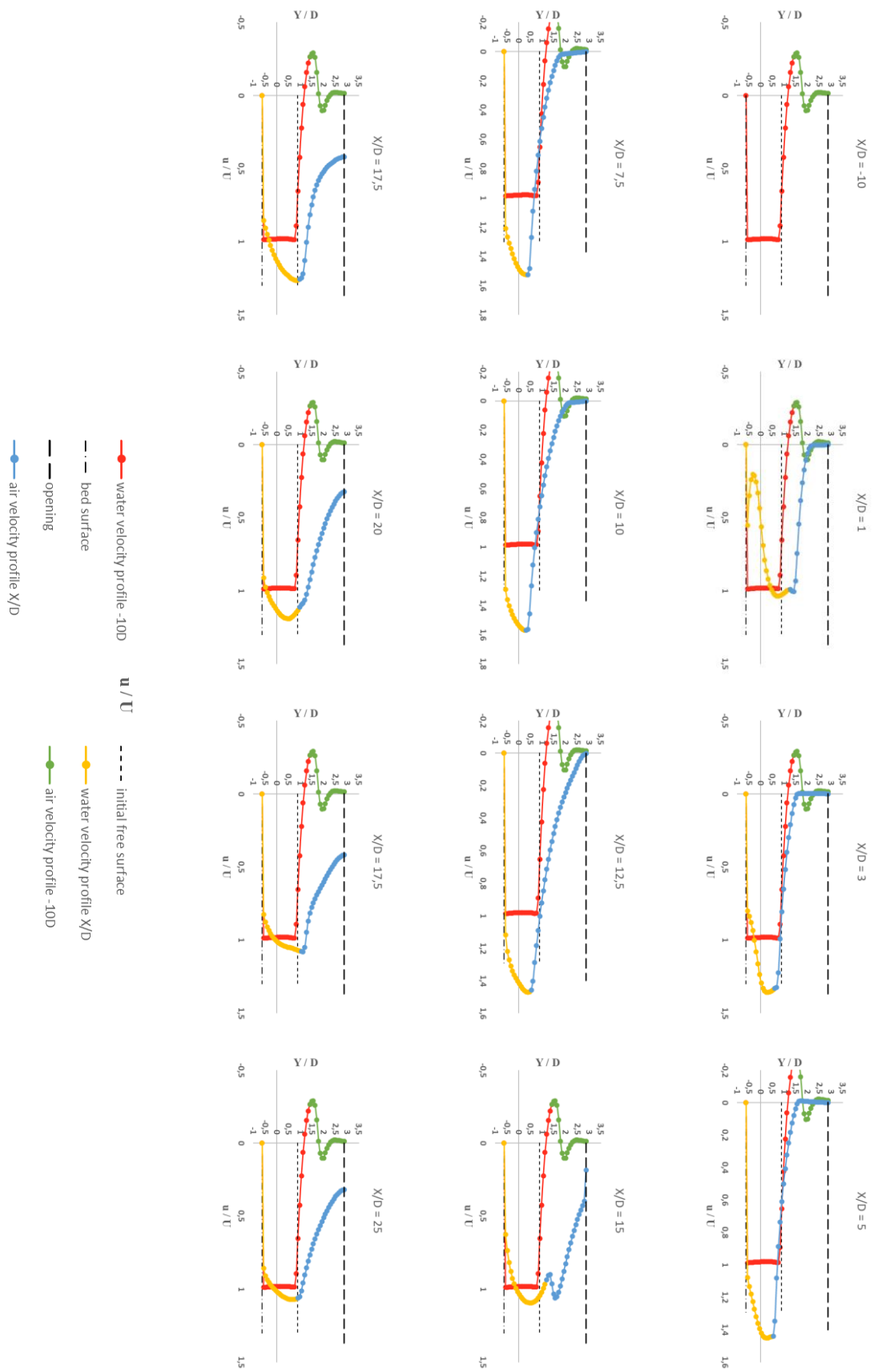
Profile kecepatan pada kondisi $U = 0,8$ dan $d/D = 3$



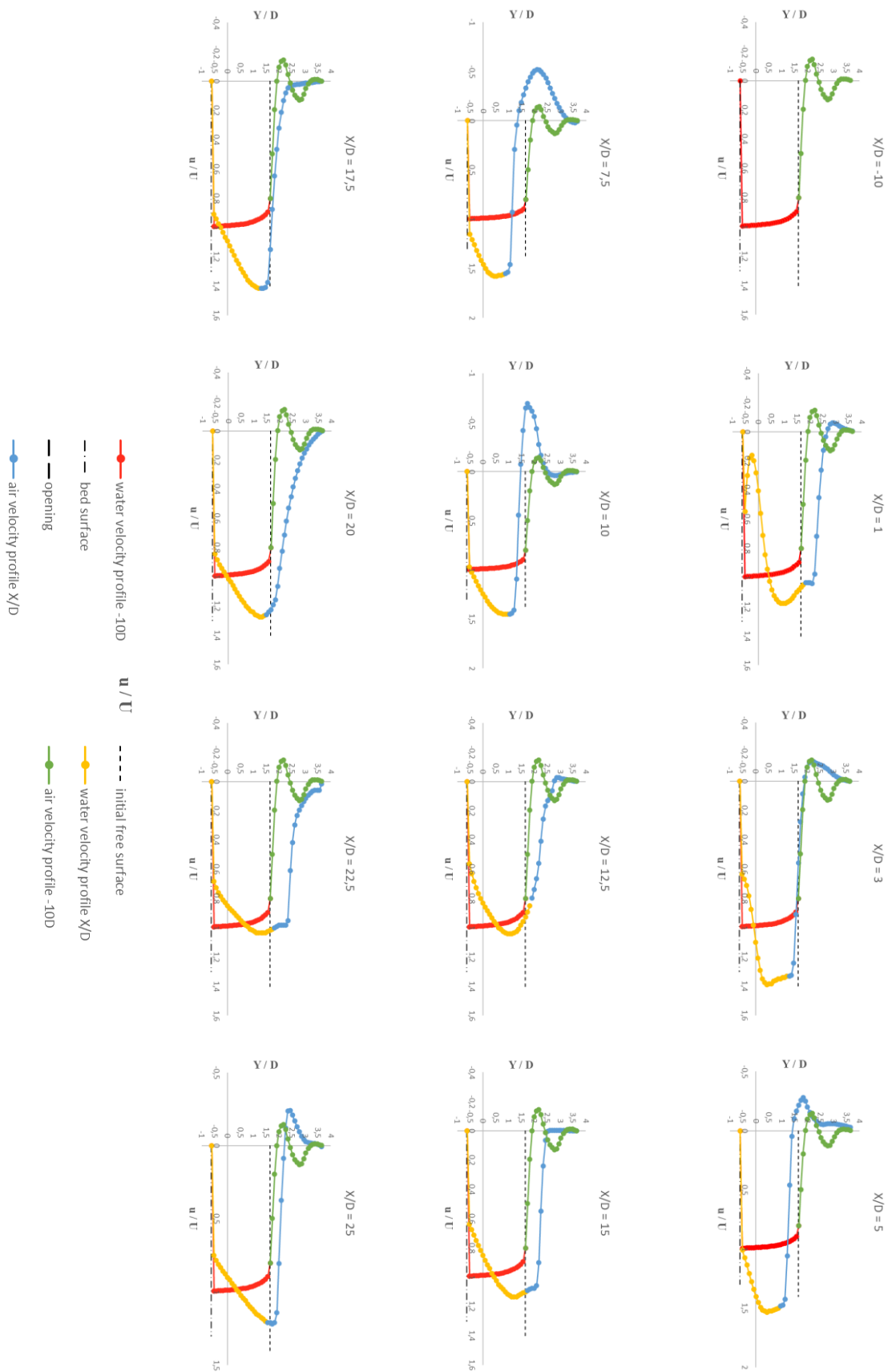
Profile kecepatan pada kondisi $U = 0,8$ dan $d/D = 5$



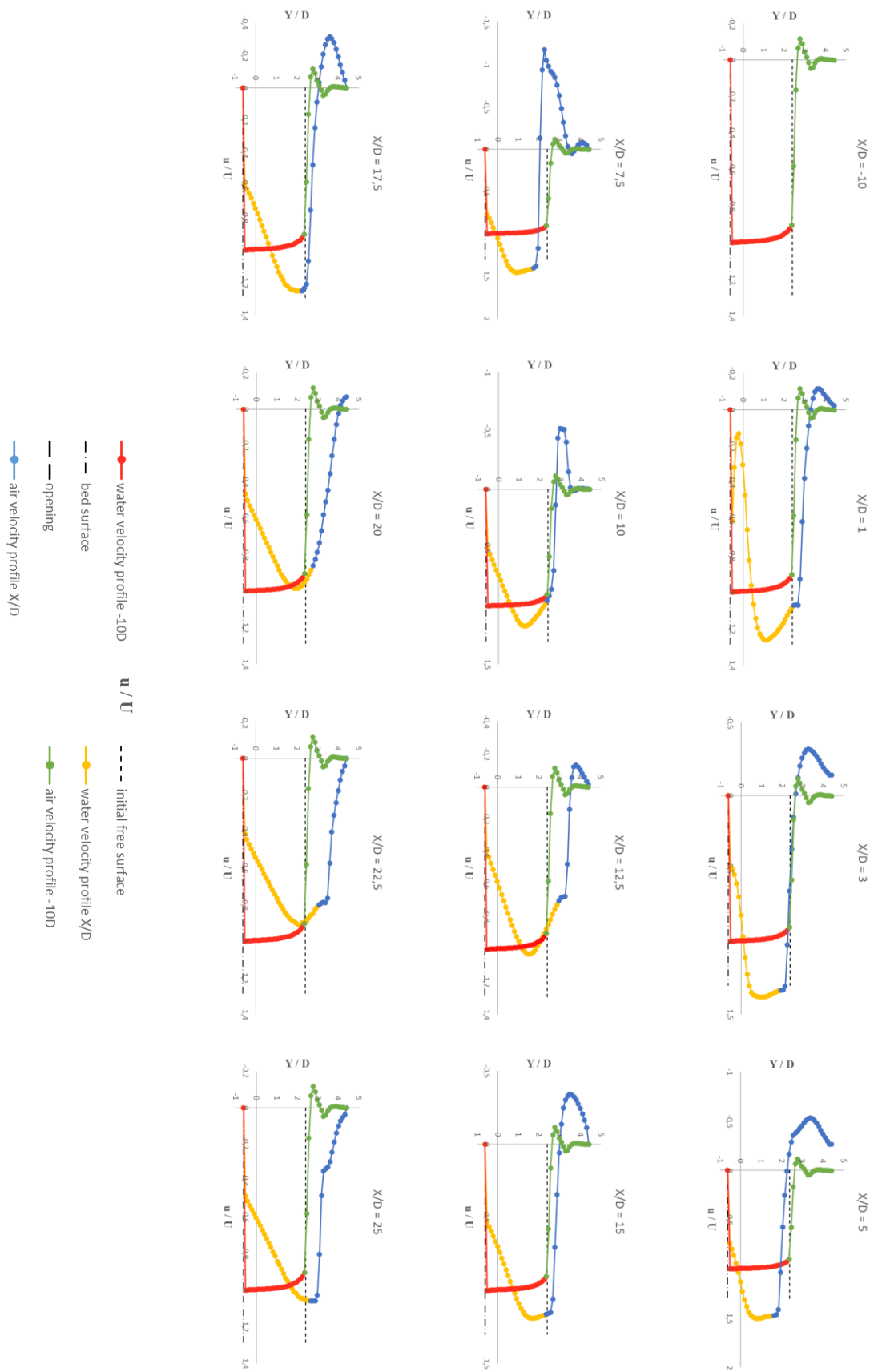
Profil kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ dan $d/D = 1,2$



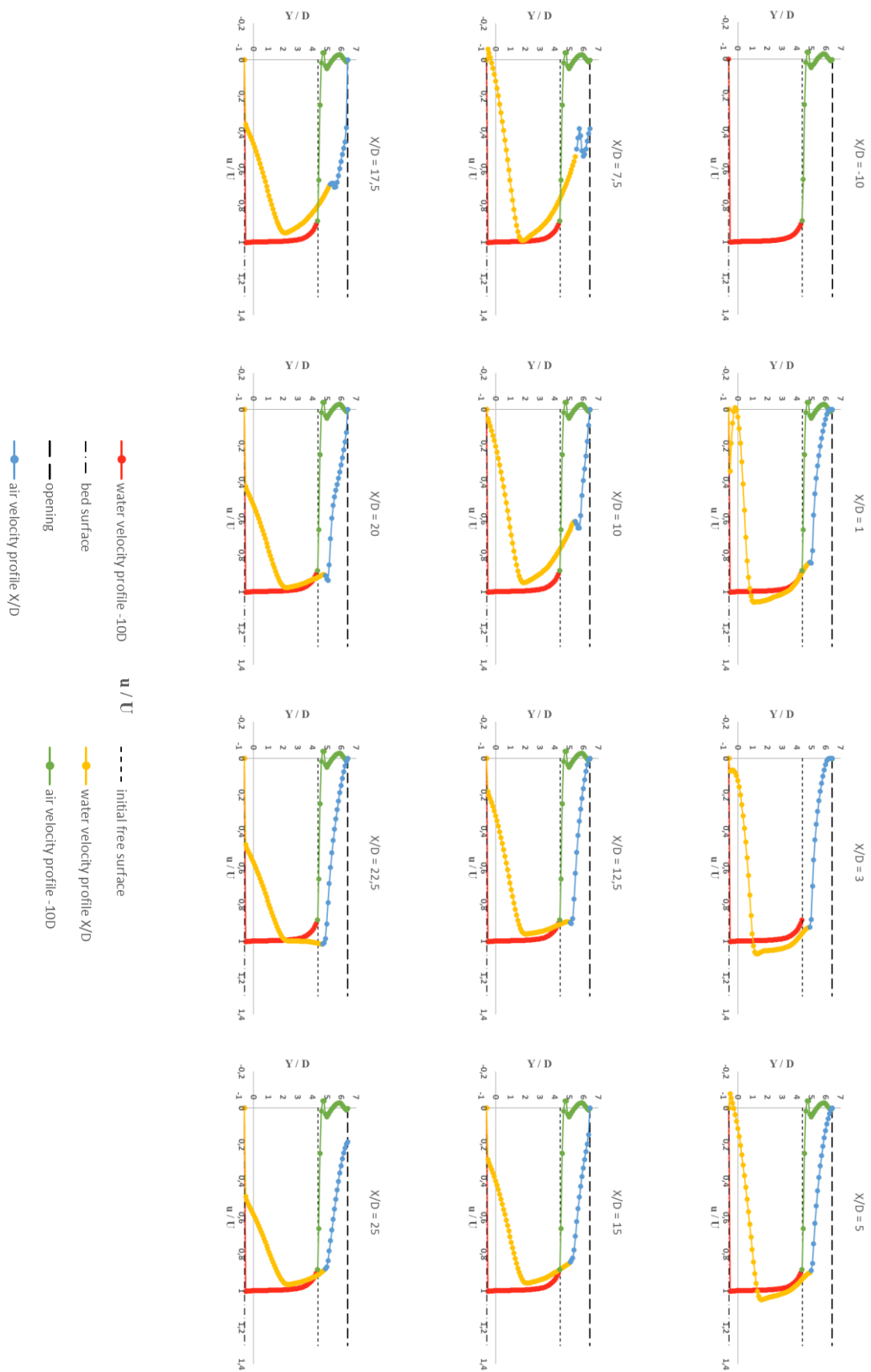
Profile kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ dan $d/D = 1,5$



Profile kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ dan $d/D = 2,25$



Profile kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ dan $d/D = 3$



Profile kecepatan pada kondisi $U = 1,2$ dan $d/D = 5$

BIODATA PENULIS



Aditya Arief Rahman Putra dilahirkan di Sidoarjo pada tanggal 7 Juli 2001. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN 1 Candipari, kemudian melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Porong dan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Krembung. Setelah menamatkan sekolah pada tahun 2018, penulis diterima dan melanjutkan pendidikan tinggi di Program Studi Sarjana Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama mengenyam pendidikan di Departemen Teknik Mesin ITS Surabaya, penulis mengambil fokus studi di bidang Konversi Energi dan tergabung dalam Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida. Di tahun pertama masa perkuliahan, penulis tergabung dalam tim riset robot *humanoid* Vi-Rose selama 2 tahun sebagai anggota divisi mekanik. Pada tahun ke-tiga, penulis bergabung pada tim riset mobil hemat energi dan mobil formula ITS Team Sapuangin sebagai anggota divisi Frame and Body. Penulis juga pernah berpartisipasi dan memperoleh pendanaan riset dalam ajang Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) bidang Penerapan Iptek di tahun 2021. Kemudian pada awal tahun ke-empat, penulis berkesempatan untuk mengikuti program magang mahasiswa bersertifikat (PMMB) di PT Indonesia Power, UJP Jeranjang sebagai teknisi mesin boiler selama enam bulan.

Penulis memiliki ketertarikan yang besar dengan topik konversi energi terutama energi baru terbarukan. Oleh karena itu penulis menyusun Tugas Akhir dengan judul Studi Numerik Pengaruh Rasio Kedalaman Terhadap Diameter Terhadap Wake Recovery dan Performa pada *Cross-flow Hidrokinetik Turbine* dengan Deflektor dengan harapan tulisan ini dapat memberikan sedikit manfaat bagi pengembangan teknologi EBT. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surel adityaarief295@gmail.com.