



Tesis - TF142520

**STUDI EKSPERIMENTAL *COUNTER-ROTATING*
TURBINE DALAM KONFIGURASI *ARRAY* TURBIN
HIDROKINETIK TIPE *DARRIEUS* *STRAIGHT-*
*BLADE***

ERNA SEPTYANINGRUM
NRP. 2415 202 201

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN REKAYASA ENERGI TERBARUKAN
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Magister
Teknik (M.T.)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Erna Septyaningrum

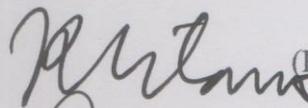
NRP. 2415202201

Tanggal Ujian: 15 Januari 2018

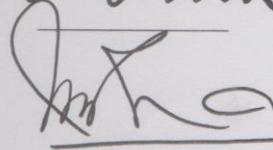
Periode Wisuda: Maret 2018

Disetujui oleh:

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

 (Pembimbing)

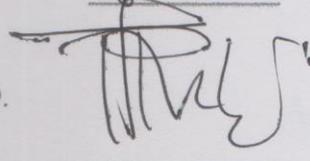
2. Ir. Harsono Hadi, M.T., Ph.D.
NIP. 19600119 198601 1 001

 (Penguji)

3. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19771127 200212 1 002

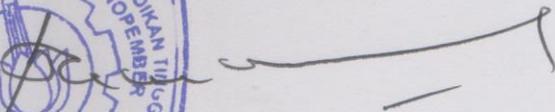
 (Penguji)

4. Totok Ruki Biyanto, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19710702 199802 1 001

 (Penguji)



Dekan Fakultas Teknologi Industri,


Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T.

NIP. 19690507 1995121001

STUDI EKSPERIMENTAL *COUNTER-ROTATING TURBINE* DALAM KONFIGURASI *ARRAY* TURBIN HIDROKINETIK TIPE *DARRIEUS STRAIGHT-BLADE*

Nama Mahasiswa : Erna Septyaningrum
NRP : 2415 202 201
Pembimbing : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.

ABSTRAK

Pembangkit listrik modern menggunakan konfigurasi *array* turbin untuk memenuhi target produksi dan memaksimalkan proses ekstraksi energi di lokasi yang potensial. Performansi dari masing-masing turbin dalam konfigurasi *array* sangat dipengaruhi oleh kecepatan *freestream*, posisi turbin dan jarak antar turbin. Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji masalah ini. Sementara itu, studi yang dilakukan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh arah rotasi terhadap performansi turbin dan menentukan konfigurasi *array* turbin yang memberikan peningkatan efektifitas *farm*. Studi eksperimental dilakukan dengan menggunakan prototipe turbin vertikal aksis tipe Darrieus *Straight-blade Cascaded* yang diuji pada *towing tank*. Lima konfigurasi turbin diuji pada studi ini, yaitu konfigurasi dua turbin, yang terdiri dari: konfigurasi *co-rotating*, konfigurasi *counter-rotating* keluar, dan konfigurasi *counter-rotating* masuk, serta konfigurasi tiga turbine yang terdiri dari: konfigurasi tiga turbin A (3T-A) dan konfigurasi tiga turbin B (3T-B). Kinerja dari masing-masing konfigurasi dipengaruhi oleh interaksi aliran yang terjadi antar turbin. Interaksi aliran tersebut menyebabkan superposisi kecepatan (antara kecepatan induksi dan kecepatan *freestream*) dan menyebabkan munculnya efek kanal (*jet-type flowfield*) sehingga terjadi percepatan aliran. Hal ini juga menyebabkan perbedaan nilai intensitas turbulensi pada masing-masing konfigurasi. Untuk konfigurasi dua turbin, konfigurasi *co-rotating* lebih direkomendasikan karena menghasilkan nilai efektifitas *farm* yang cukup tinggi dan tidak dipengaruhi oleh arah aliran *freestream*. Nilai efektifitas *farm* untuk konfigurasi *co-rotating* mencapai 1,33 pada kecepatan 1,3 m/s dan *cross-stream distance* 1,5D. Ekstraksi energi oleh kedua turbin mengakibatkan munculnya daerah *wake*. Berdasarkan hasil simulasi numerik diketahui bahwa panjang daerah *wake* untuk masing-masing konfigurasi tidak jauh berbeda. Penurunan kecepatan pada daerah *wake* kira-kira 10% pada jarak $X/D=5$. Sehingga pengaruh *wake* sudah berkurang dan turbin *downstream* dapat dipasang pada jarak tersebut. Namun pada daerah $Y/D=0$ (daerah interaksi aliran), penurunan kecepatan sudah dibawah 10% pada jarak $X/D=2$. Sementara itu, konfigurasi 3T-A memiliki performansi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi 3T-B. Hal ini terjadi karena turbin C pada konfigurasi 3T-B bekerja pada daerah *wake* turbin *upstream* sehingga kinerjanya kurang baik walaupun pengaruh buruk *wake* sudah tereduksi. Sementara itu, turbin *downstream* (turbin A dan B) pada konfigurasi 3T-A bekerja

berdampingan sehingga interaksi aliran antara keduanya dapat mengurangi pengaruh buruk *wake* dari turbin *upstream* (turbin A).

Kata kunci: Darrieus *straight-blade cascaded*, *counter-rotating*, *co-rotating*, konfigurasi *array*, efektifitas *farm*.

EXPERIMENTAL STUDY OF COUNTER-ROTATING TURBINE IN DARRIEUS STRAIGHT-BLADE TURBINE ARRAY CONFIGURATION

Name : Erna Septyaningrum
Student's Number : 2415 202 201
Advisor : Dr. Ridho Hantoro, ST., MT.

ABSTRACT

Modern power plants employ turbine array configuration to meet energy production target and optimize energy extraction processes in potential locations. The performance of each turbine in array configuration is highly affected by freestream velocity, turbine position and distance among turbines. Various studies have been conducted to observe this issue. As the rapid development of hydrokinetic turbine technology, this study was conducted to investigate the effect of the rotational direction on the turbine performance and determine the array turbine configuration which improves in farm effectiveness. The experimental study provided testing on Vertical Axis Darrieus Turbine Straight-blade Cascaded in the Towing Tank Facility. Five array turbine configurations were tested, i.e. configuration of two turbines (consisting of co-rotating, counter-rotating out, counter rotating in) and configuration of tree turbines (consisting of 3T-A configuration and 3T-B configuration). The hydrodynamic interaction among turbine affects array performance. The flow interaction leads to velocity superposition between induced flow and incoming flow, emergencing the jet-type flow field in which the flow between turbines is accelerated. Since the difference characteristic of flow interaction, every configuration has difference turbulence intensity. For the configuration of two turbines, the co-rotating configuration is recommended due to its high farm effectiveness and its independence on incoming flow direction. Its farm effectiveness reached 1.33 at freestream velocity of 1.3 m/s and cross-stream distance of 1.5D. The wake region is formed as the effect of energy extraction process. Numerical simulation confirmed that the wake length of every configuration was not quite difference. The velocity deficit in the wake region is approximately 10% at the downstream distance of $X/D=5$. The wake effect is reduced hence the downstream turbine could be installed in that distance. However, the velocity deficit in the interaction zone ($Y/D=0$) is below 10% at $X/D=2$. The testing of 3T-A and 3T-B configurations informed that 3T-A has better performance than 3T-B. The phenomenon occurs because the turbine C in the 3T-B works in wake region of upstream turbine. Hence the turbine C has poor performance, even though the effect of wake has been reduced. Meanwhile, downstream turbines in 3T-A (turbine B and turbine C) work in side-by-side configuration, leading flow interaction and reducing the effect of upstream turbine wake.

Keywords: Darrieus straight-blade cascaded, counter-rotating, co-rotating, array configuration, farm effectiveness.

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, yang senantiasa melimpahkan rahmat serta karunia-Nya kepada penulis sehingga dalam menyelesaikan penelitian dan laporan tesis dengan judul “Studi Eksperimental Pengaruh *Counter-Rotating Turbine* dalam Konfigurasi *Array* Turbin Hidrokinetik Tipe *Darrieus Straight-Blade*”.

Penelitian ini merupakan salah satu penelitian yang mengangkat tema mengenai pengembangan konfigurasi *array* hidrokinetik turbin. Fokus utamanya adalah pada pengaruh arah rotasi turbin terhadap kinerja konfigurasi *array* secara keseluruhan, dengan demikian penulis dapat mendesain konfigurasi *array* yang mampu memberikan peningkatan efektifitas *farm*. Dengan peningkatan efektifitas *farm* maka produksi energi dapat ditingkatkan.

Penelitian dan laporan tesis ini tidak dapat diselesaikan oleh penulis tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang memberikan bantuan secara moral maupun materi, terutama kepada:

1. Bapak Dr. Ridho Hantoro selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, motivasi dan saran dalam menyelesaikan penelitian ini,
2. Bapak Suwandi Ibu Rukmini dan Diah Ayu Sekarrini selaku keluarga terdekat yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis,
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T, M.T, Ph.D; Bapak Ir. Harsono Hadi, M.T, Ph.D dan Bapak Totok Ruki Biyanto, S.T, M.T, Ph.D selaku dosen penguji yang telah memberikan saran-saran yang sangat bermanfaat,
4. Bapak Condro dan Bapak Rudie Aminudin, A.Md yang telah membimbing dalam melakukan pengambilan data di Laboratorium Hidrodinamika ITS,
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat,
6. Okky Agassy Firmansyah, S.T yang telah membantu seluruh penelitian ini dan memberikan motivasi kepada penulis,

7. Teman-teman Teknik Fisika yang ikut dalam pengambilan data penelitian; Hafizh, Fahmi, Aryo, Mas Wildan, Kurnia, Deden, Jongga, Ibnu, Mas Dendy dan lain-lain,
8. Lembaga Pengelola Dana Penelitian (LPDP) selaku penyokong biaya akademik penulis serta biaya penelitian dilakukan oleh penulis,
9. Ibu Martha Hardiyah, S.Pd selaku admin Pasca Sarjana Teknik Fisika yang telah membantu semua urusan administrasi dalam penyelesaian tesis ini,
10. Teman-teman asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan,
11. Teman-teman serta sahabat-sahabat penulis yang senantiasa ada untuk memberikan motivasi, sebagai teman berdiskusi dan bermain; Mbak Tiwi, Mbak Nita, Mas Wildan, Mbak Wiji, Mas Feri, Mas Khamim, Mas Iwan, Mas Nyoman, Mas Brian, Mbak Nela dan lain-lain,
12. Semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan laporan tesis ini.

Apabila terdapat kekurangan dalam penelitian dan laporan tesis ini, penulis memohon kritik dan saran demi penelitian yang lebih baik. Semoga laporan tesis ini dapat memberikan manfaat dan ilmu bagi banyak orang

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. LATAR BELAKANG	1
1.2. RUMUSAN MASALAH	3
1.3. TUJUAN	3
1.4. BATASAN MASALAH	3
1.5. MANFAAT	4
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 <i>VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE (VAHT)</i>	5
2.2 <i>HIDRODINAMIKA BLADE</i>	6
2.3 <i>TURBULENSI</i>	12
2.4 <i>MEKANISME PASSIVE PITCH</i>	13
2.5 <i>ALIRAN DI SEKITAR TURBIN</i>	15
2.6 <i>ARRAY TURBIN</i>	18
BAB III METODOLOGI	21
3.1 <i>DESAIN TURBIN</i>	22

3.2 FABRIKASI TURBIN	24
3.3 DESAIN KONFIGURASI <i>ARRAY</i>	26
3.4 METODE PENGUJIAN DI <i>TOWING TANK</i>	28
3.5 SIMULASI NUMERIK DENGAN CFD	30
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 EFEK <i>BLOCKAGE</i> TERHADAP DAYA TURBIN	37
4.2 <i>STAND-ALONE TURBINE</i>	38
4.3 KONFIGURASI <i>CO-ROTATING</i>	40
4.4 KONFIGURASI <i>COUNTER-ROTATING</i> KELUAR	51
4.5 KONFIGURASI <i>COUNTER-ROTATING</i> MASUK	60
4.6 KONFIGURASI TIGA TURBIN A (3T-A)	69
4.7 KONFIGURASI TIGA TURBIN B (3T-B)	77
4.8 DISKUSI	83
BAB V KESIMPULAN	95
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	101
BIODATA PENULIS	115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Turbin Straigh-Blade Darrieus [19]	5
Gambar 2.2 Turbin <i>V-Blade Darrieus</i> [20]	5
Gambar 2.3 Prinsip dari <i>Double Multiple Stream Tube</i> Model yang terdiri dari 6 <i>streamtube</i> [13]	7
Gambar 2.4 <i>Induce velocity</i> untuk <i>stream tube</i> bagian <i>upstream</i> dan <i>downstream</i> [13]	8
Gambar 2.5 Skematik Vertikal Aksis Turbin (VAT) (tampak atas) [22]	9
Gambar 2.6 Diagram gaya dan kecepatan aliran pada <i>airfoil</i> turbin VAT [13]	10
Gambar 2.7 Efek perubahan sudut serang terhadap (a) koefisien <i>lift</i> NACA 0012 dan (b) koefisien <i>drag</i> NACA 0012 [23]	11
Gambar 2.8 Perubahan sudut <i>pitch</i> selama turbin berputar untuk (a) <i>fix-blade</i> dan (b) <i>passive pitch blade</i> [16]	14
Gambar 2.9 Kontur kecepatan di sekitar turbin HAWT (<i>Straight line</i> menunjukkan kecepatan yang bernilai positif, sementara garis putus-putus menunjukkan kecepatan bernilai negatif) [7]	15
Gambar 2.10 Perbandingan turbin dengan arah rotasi berbeda ($L_{1-2}=0.7 D$) [8]	16
Gambar 2.11 Profil kecepatan pada daerah <i>downstream turbine</i> (a). Kecepatan sumbu y (V_y); (b). Kecepatan sumbu x (V_x) [12]	17
Gambar 3.1 Flowchart penelitian	22
Gambar 3.2 Darrieus <i>Straight Blade Cascaded</i>	23
Gambar 3.3 Pemasangan <i>blade</i> pada <i>arm</i> : (a) <i>Stopper</i> pada <i>passive pitch blade</i> ; (b) pamanbatan <i>blade</i> pada <i>arm</i>	25
Gambar 3.4 <i>Arm Darrieus Straight Blade Cascaded</i>	25
Gambar 3.5 Struktur kerangka (a) <i>betonizer</i> ; (b) kerangka dan <i>shaft</i>	26
Gambar 3.6 Konfigurasi <i>array</i> dua turbin (a) <i>Co-rotating</i> ; (b) <i>counter-rotating</i> keluar; (c) <i>counter-rotating</i> masuk	27
Gambar 3.7 Konfigurasi <i>array</i> tiga turbin (a) 3T-A; (b) 3T-B	27
Gambar 3.8 Fasilitas <i>Towing Tank</i> di Laboratorium Hidrodinamika FTI ITS	28
Gambar 3.9 Kereta penarik pada <i>Towing Tank</i>	29
Gambar 3.10 Pemasangan turbin pada kereta dengan menggunakan <i>clamp F</i>	29

Gambar 3.11 Dimensi dan kondisi domain komputasi	31
Gambar 3.12 <i>Meshing</i> dengan teknik inflasi	32
Gambar 4.1 Pengaruh kecepatan freestream terhadap kecepatan sudut dan daya turbin	39
Gambar 4.2 Grafik hubungan TSR terhadap C_p stand-alone turbin	39
Gambar 4.3 Pembagian Gambar pada turbin	40
Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan freestream terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi Co-rotating	41
Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan freestream terhadap daya turbin pada konfigurasi Co-rotating untuk $Y=1,5D$	42
Gambar 4.6 Grafik hubungan C_p dan TSR pada konfigurasi <i>Co-Rotating</i> untuk $Y=1,5D$	43
Gambar 4.7 Interaksi aliran pada konfigurasi <i>Co-Rotating</i>	43
Gambar 4.8 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Co-rotating</i> untuk $Y=1,5D$	44
Gambar 4.9 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Co-Rotating</i>	45
Gambar 4.10 Pembagian kuadran	46
Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada konfigurasi <i>co-rotating</i>	47
Gambar 4.12 Fluktuasi kecepatan pada konfigurasi <i>co-rotating</i>	48
Gambar 4.13 Kontur intensitas turbulensi pada konfigurasi <i>co-rotating</i>	49
Gambar 4.14 Plot intensitas turbulensi pada konfigurasi <i>co-rotating</i>	50
Gambar 4.15 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi <i>Counter-rotating</i> keluar untuk $Y=1.5 D$	51
Gambar 4.16 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap daya turbin pada konfigurasi <i>Counter-rotating</i> keluar untuk $Y=1,5D$	52
Gambar 4.17 Grafik hubungan C_p dan TSR untuk konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Keluar	53
Gambar 4.18 Interaksi aliran pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Keluar	54
Gambar 4.19 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> keluar untuk $Y=1,5D$	55

Gambar 4.20 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Keluar	55
Gambar 4.21 Kontur kecepatan pada konfigurasi <i>counter-rotating</i> keluar	56
Gambar 4.22 Fluktuasi kecepatan pada konfigurasi <i>counter-rotating</i> keluar	57
Gambar 4.23 Kontur intensitas turbulensi pada konfigurasi <i>counter-rotating</i> keluar	59
Gambar 4.24 Plot intensitas turbulensi pada konfigurasi <i>counter-rotating</i> keluar	60
Gambar 4.25 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi <i>Counter-rotating</i> masuk untuk $Y=1.5 D$	61
Gambar 4.26 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap daya turbin pada konfigurasi <i>Counter-rotating</i> masuk untuk $Y=1,5D$	62
Gambar 4.27 Grafik hubungan C_p dan TSR untuk konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Masuk	62
Gambar 4.28 Interaksi aliran pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Masuk	63
Gambar 4.29 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> masuk untuk $Y=1,5D$	64
Gambar 4.30 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas <i>farm</i> pada konfigurasi <i>Counter-Rotating</i> Masuk	65
Gambar 4.31 Kontur kecepatan untuk konfigurasi <i>counter-rotating</i> masuk	66
Gambar 4.32 Fluktuasi kecepatan untuk konfigurasi <i>counter-rotating</i> masuk	67
Gambar 4.33 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi <i>counter-rotating</i> masuk	68
Gambar 4.34 Plot intensitas turbulensi untuk konfigurasi <i>counter-rotating</i> masuk	69
Gambar 4.35 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi 3T-A	70
Gambar 4.36 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap torsi pada konfigurasi 3T-A	71
Gambar 4.37 Grafik kinerja masing-masing turbin dalam konfigurasi 3T-A	72
Gambar 4.38 Nilai <i>efektifitas farm</i> dari konfigurasi 3T-A	73
Gambar 4.39 Kontur kecepatan pada konfigurasi 3T-A	75
Gambar 4.40 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi 3T-A	76

Gambar 4.41 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi 3T-B	77
Gambar 4.42 Pengaruh kecepatan <i>freestream</i> terhadap torsi pada konfigurasi 3T-B	79
Gambar 4.43 Performansi masing-masing turbin pada konfigurasi 3T-B	79
Gambar 4.44 Efektifitas <i>farm</i> konfigurasi 3T-B	80
Gambar 4.45 Kontur kecepatan untuk konfigurasi 3T-B	81
Gambar 4.46 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi 3T-B	82
Gambar 4.47 Efektifitas <i>farm</i> untuk masing-masing konfigurasi	83
Gambar 4.48 Perbandingan kecepatan aliran pada daerah interaksi	84
Gambar 4.49 Plot kecepatan sepanjang sumbu X (<i>Streamwise</i>)	86
Gambar 4.50 Profil penurunan kecepatan sepanjang sumbu Y (<i>Crosstream</i>)	87
Gambar 4.51 Perbandingan <i>contour</i> intersitas turbulensi pada daerah interaksi aliran	88
Gambar 4.52 Perbandingan plot intensitas turbulensi pada $x=0$ m pada konfigurasi (a). <i>co-rotating</i> ; (b). <i>counter-rotating</i> keluar; (c). <i>counter-rotating</i> masuk	91
Gambar 4.53 Perbandingan kinerja konfigurasi tiga turbin	92
Gambar 4.54 Pengaruh Re dan TSR terhadap kinerja <i>array</i>	94

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Dimensi turbin Darrieus <i>Straight-Blade Cascaded</i>	24
Tabel 3.2. Pengkondisian dalam proses <i>meshing</i>	33
Tabel 3.3. Model Turbulensi dan Kondisi Batas	34
Tabel 4.1 Perhitungan <i>blockage ratio</i>	38

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SIMBOL

A_{turbin}	Luas sapuan turbin (m ²)	V_{∞}	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)
A_{towing}	Luas penampang towing tank (m ²)	v'	Fluktuasi vektor kecepatan y (m/s)
B	<i>Blockage ratio</i>	w'	Fluktuasi vektor kecepatan z (m/s)
c	Panjang <i>cord</i> (m)	X	Jarak <i>stream-wise</i> (m)
C_D	Koefisien <i>drag</i>	Y	Jarak <i>cross-stream</i> (m)
C_l	Koefisien <i>lift</i>	α	Sudut serang
C_n	Koefisien gaya normal	β	Sudut <i>pitch</i>
C_P	Koefisien daya	ε_{farm}	Efektifitas <i>farm</i>
D	Diameter turbin (m)	θ	Sudut azimuth
\bar{F}	Gaya (N)	λ	<i>Tip speed ratio</i>
k	Energi kinetik turbulen	ρ	Massa jenis (kg/m ³)
N	Jumlah turbin	$\bar{\tau}$	Torsi (N.m)
P	Daya (Watt)	ω	Kecepatan sudut (rad/s)
P_{farm}	Daya <i>farm</i> (Watt)		
$P_{ref. farm}$	Daya referensi <i>farm</i> (Watt)		
P_i	Daya tiap turbin (Watt)		
P_s	Daya <i>stand-alone</i> turbin (Watt)		
R	Jari-jari turbin (m)		
\bar{r}	Lengan gaya (m)		
u'	Fluktuasi vector kecepatan x (m/s)		
v_a	Kecepatan aksial (m/s)		
V_{au}	Kecapatan aksial <i>upstream</i> (m/s)		
V_{ad}	Kecapatan aksial <i>downstream</i>		
V_e	Kecepatan equilibrium (m/s)		
v_R	Resultan kecepatan (m/s)		
v_x	Kecepatan <i>stream-wise</i> (m/s)		
v_y	Kecepatan <i>cross-stream</i> (m/s)		

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Pembangkit listrik tenaga arus laut modern menggunakan *array* turbin dengan konfigurasi tertentu untuk memenuhi target produksi dan memaksimalkan proses ekstraksi energi di lokasi yang potensial. Efisiensi yang dihasilkan oleh *array* disebut sebagai efektifitas *farm*. Nilai efektifitas *farm* sangat bergantung pada performansi dari masing-masing turbin dalam *array* [1]. Penentuan konfigurasi yang sesuai merupakan hal yang sulit, dikarenakan interaksi aliran yang kompleks antar turbin. Interaksi aliran dapat memberikan efek baik dan efek buruk terhadap performansi turbin. Performansi turbin dan energi yang dihasilkan oleh turbin sangat bergantung pada kecepatan aliran dan posisi turbin [2][3]. Selain itu, efektifitas *farm* juga bergantung pada karakteristik kanal atau lokasi pemasangan turbin [2].

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa posisi turbin dalam suatu konfigurasi sangat berpengaruh terhadap performansi turbin tersebut. Pada turbin angin maupun turbin arus laut yang terletak pada daerah *near-wake* dan *far-wake* tidak dapat mengekstrak energi dengan maksimal. Hal ini dikarenakan turbin *downstream* mendapatkan kecepatan aliran air yang lebih rendah [4]. Ekstraksi energi oleh turbin *upstream* (turbin bagian depan) menyebabkan penurunan kecepatan aliran pada bagian *downstream* dan menyebabkan munculnya *vortex* [5]. Daerah dimana terjadi penurunan kecepatan akibat proses ekstraksi energi disebut sebagai daerah *wake*. Pemasangan turbin pada daerah *wake* menyebabkan penurunan efisiensi turbin *downstream* sehingga terjadi penurunan efektifitas *farm*.

Dalam instalasi suatu *array* turbin angin maupun turbin arus laut, karakteristik aliran dari daerah *near-wake* menjadi pertimbangan utama dalam menentukan performansi dari turbin [6]. Suatu *array* turbin arus didesain dengan konfigurasi yang tepat agar dapat mengekstrak energi dengan maksimal. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Conzemius pada turbin angin horizontal aksis, diketahui bahwa aliran fluida pada daerah *wake* memiliki arah rotasi berlawanan dengan arah rotasi turbin *upstream* [7]. Hal ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Wei Yuan, yang menyatakan bahwa turbin *downstream* yang berotasi

berlawanan arah dengan turbin *upstream* (*counter-rotating turbine*) menghasilkan daya lebih besar dari pada turbin *downstream* yang berputar searah dengan turbin *upstream* (*co-rotating turbine*)[8]. Terjadi peningkatan produksi energi dengan penambahan *counter-rotating turbine* pada daerah *downstream* HAT (*Horizontal Axis Turbine*) [9].

Penelitian yang mengkaji mengenai efek arah rotasi turbin terhadap performansi turbin dalam *array* banyak dilakukan untuk turbin jenis HAT, namun belum dilakukan untuk jenis turbin VAT (*Vertical Axis Turbine*). Tidak semua konsep mengenai turbin HAT dapat diterapkan secara langsung pada VAT, sehingga menyebabkan ketidaksesuaian fenomena serta model untuk analisa dan desain [10][11]. Turbin jenis VAT merupakan jenis turbin yang lebih sederhana secara mekanik jika dibandingkan dengan HAT, tidak membutuhkan mekanisme *yaw* dan *pitch*, mudah untuk dalam perawatan dan membutuhkan biaya konstruksi yang relative rendah. Turbin ini mampu bekerja pada kecepatan arus yang kecil, seperti karakteristik arus di Indonesia. [12][13][3]. Jenis VAT yang memiliki efisiensi terbaik adalah turbin Darrieus [14].

Penelitian yang dilakukan oleh G. Tescioni pada VAT menunjukkan bahwa kecepatan aliran searah sumbu y (v_y) memiliki arah yang positif pada bagian *windward* dan negatif pada bagian *leeward* [12]. Hal ini menunjukkan bahwa *vortex* yang terbentuk di bagian *leeward* dan bagian *windward* memiliki arah rotasi yang berbeda. Ketika VAT berputar, maka muncul dua pasang *vortex* yang berputar berlawanan dengan arah putaran turbin (*counter rotating vortices*) [15]. Diperlukan penyesuaian arah rotasi turbin *downstream* sehingga rugi-rugi akibat fenomena ini dapat dihindari.

Sebelum dilakukan penelitian ini, telah dilakukan berbagai penelitian untuk mengembangkan turbin arus laut. Aspek yang dikembangkan meliputi aspek hidrodinamika turbin, kemampuan *pitching* dan *self-start*, *power* dan *control*, penggunaan diffuser, kekuatan struktur dan getaran turbin serta susunan/*array* turbin. Penelitian yang akan dilakukan ini termasuk ke dalam aspek susunan/*array* turbin. *Road map* pengembangan turbin arus laut dapat dilihat pada lampiran 1.

Turbin yang telah dikembangkan sebelumnya adalah turbin jenis *Darrieus Straight Blade Cascaded*. Turbin ini merupakan pengembangan dari turbin jenis

Darriues konvensional yang memiliki kelemahan dalam hal efisiensi dan kemampuan *self-starting*. Penelitian yang dilakukan oleh Hantoro (2011) menunjukkan bahwa penggunaan mekanisme *passive-pitch* dapat meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin [16]. Namun penelitian yang dilakukan oleh Fengmei untuk turbin vertikal aksis 6 *blade*, menunjukkan bahwa penggunaan mekanisme *passive pitch* tidak memberikan peningkatan C_p yang signifikan, dimana peningkatan C_p maksimal adalah sebesar 0,25 [17]. Upaya peningkatan C_p dapat dilakukan dengan meningkatkan jumlah *blade*, namun sebagai konsekuensinya akan terjadi penurunan TSR turbin dan peningkatan torsi [18]. *Darriues straight blade cascaded* turbin menggunakan mekanisme *cascaded* turbin untuk meningkatkan C_p dari turbin, dimana masing-masing *arm* terdiri dari 3 buah *blade*.

1.2. RUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang diatas, maka rumusan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. bagaimana pengaruh arah rotasi terhadap performansi turbin dalam konfigurasi *array* turbin *Darriues Straight Blade Cascaded*?
- b. bagaimana konfigurasi *array* turbin tipe *Darriues Straight Blade Cascaded* yang memberikan peningkatan efektifitas *farm*?

1.3. TUJUAN

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. mengetahui pengaruh arah rotasi terhadap performansi turbin dalam konfigurasi *array* turbin tipe *Darriues Straight Blade Cascaded*,
- b. menentukan konfigurasi *array* turbin tipe *Darriues Straight Blade Cascaded* yang memberikan peningkatan efektifitas *farm*.

1.4. BATASAN MASALAH

Penelitian dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Turbin yang digunakan pada penelitian ini adalah *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine* (VAHT) jenis *Darrieus Straight Blade Cascaded*. Turbin ini terdiri dari 3 *arm* dengan 3 *blade* per *arm*, yang terdiri dari 1 *passive pitch blade* (*blade* terluar) dan 2 *fix blade*. Jenis hidrofoil yang digunakan adalah NACA 0018.
- b. Variasi kecepatan *freestream* dan jarak antar turbin (*cross stream distance*) pada studi eksperimental dan simulasi numerik disesuaikan dengan kemampuan fasilitas *towing tank* Laboratorium Hidrodinamika, FTK, ITS.
- c. Pada proses simulasi numerik, efek *bearing*, *arm* dan mekanisme *passive pitch* diabaikan.

1.5. MANFAAT

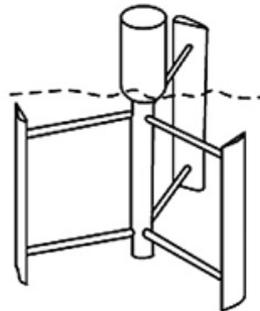
Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi lebih lanjut dalam pemahaman mengenai interaksi aliran yang terjadi disekitar *array* turbin. Dengan pemahaman tersebut diharapkan dapat dijadikan acuan dalam perancangan *array* hidrokinetik turbin, terutama untuk jenis *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine* (VAHT), sehingga kinerja konfigurasi *array* akan lebih optimal.

BAB II

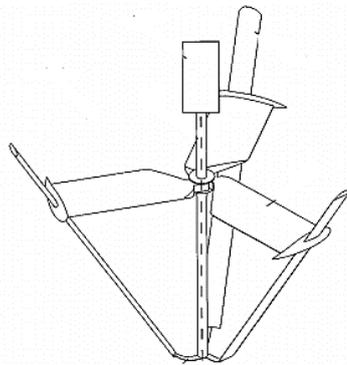
DASAR TEORI

2.1 VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE (VAHT)

Turbin merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengekstrak energi arus laut. Terdapat dua jenis turbin yang dapat digunakan, yaitu *horizontal axis turbine* (HAT) dan *vertical axis turbine* (VAT). HAT memiliki poros (*shaft*) sejajar dengan arah datangnya air, biasanya jenis HAT dikenal dengan sebutan *propeller*. Semenetera itu VAT memiliki *shaft* tegak lurus dengan arah datangnya air. Turbin jenis VAT cocok digunakan untuk lokasi yang memiliki kecepatan arus kecil. VAT mampu mengekstrak energi dari segala arah sehingga tidak memerlukan mekanisme *yaw*. Selain itu, turbin jenis VAT lebih mudah untuk dilakukan *maintenance* karena posisi generator, *gear box* dan sistem kontrol tidak ikut terendam di dalam air.



Gambar 2.1 Turbin *Straigh-Blade Darrieus* [19]



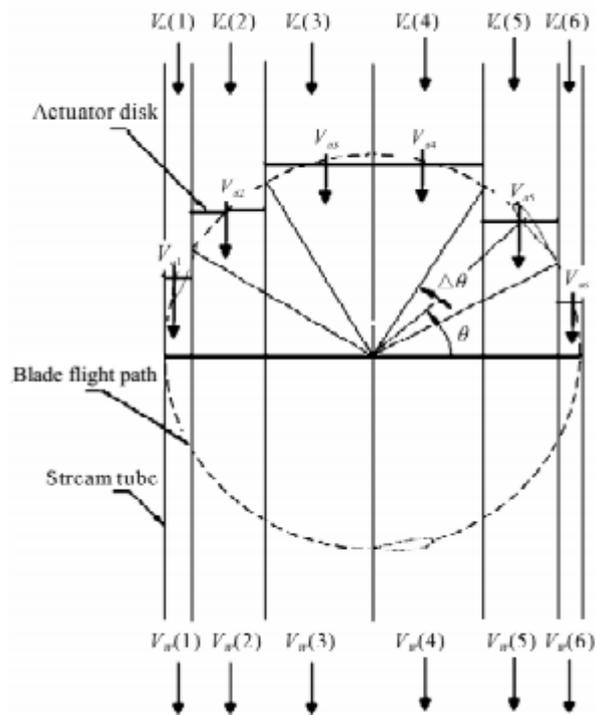
Gambar 2.2 Turbin *V-Blade Darrieus* [20]

Salah satu jenis turbin VAT adalah *Darrieus Vertical Axis Turbine*. Walaupun jenis turbin Darrieus sudah dipatenkan pada tahun 1931, namun penelitian mengenai turbin ini tidak banyak dikembangkan sampai akhirnya terjadi OPEC *oil shock* pada tahun 1970-an. Pada tahun tersebut, banyak riset dilakukan untuk terus mengembangkan turbin *Darrieus* sebagai salah satu cara untuk mendapatkan energi listrik. Beberapa diantara dilakukan oleh para peneliti di US, Kanada, dan Inggris. Turbin VAT untuk keperluan konversi energi angin merupakan yang banyak dilakukan, salah satunya dilakukan oleh *National Renewable Energy Laboratory* dan *Sandia National Laboratory* [21]. Semetara itu, VAT untuk konversi energi arus laut masih jarang dikembangkan. Terdapat berbagai macam jenis turbin *Darrieus*, yaitu *Egg – beater*, *Giromill (Straight Bladed)*, *Variable geometry oval trajectory (VGOT)*, *Darrieus-Masgowe (two-tier) rotor*, *Twisted three bladed*, dan *Crossflex* [14]. Selain itu, dikembangkan juga *Darrieus tipe straight-blade turbine* dan *V – blade turbine* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan 2.2

2.2 HIDRODINAMIKA BLADE

Turbin jenis Vertikal Aksis *Straight-blade* merupakan jenis turbin yang cukup sederhana dan mudah dibuat. Namun jenis turbin ini membutuhkan analisa aerodinamika yang cukup kompleks dikarenakan kecepatan aliran pada bagian *upstream* dan *downstream* yang tidak konstan [13]. *Downstream blade* memperoleh aliran yang telah terganggu akibat pergerakan dari *upstream blade*.

Berbagai metode dikembangkan untuk kebutuhan analisa *Vertical Axis Turbine* (VAT), salah satunya adalah *Double Multiple Stream Tube* (DMST) Model. *Double Multiple Stream Tube* (DMST) merupakan model perhitungan untuk vertikal aksis turbin yang dikembangkan oleh Paraschivoiu [13]. Model ini membedakan aliran *upstream* dan *downstream* yang mengenai *blade* dengan membagi masing-masing *streamtube* menjadi bagian *upstream* dan *downstream* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Model ini mengasumsikan bahwa *wake* yang terbentuk oleh *blade* bagian *upstream* sudah mencapai nilai kecepatan terbesarnya sebelum mengenai *downstream blade*. *Downstream blade* mendapatkan fluida dengan kecepatan lebih rendah daripada kecepatan *freestream*.

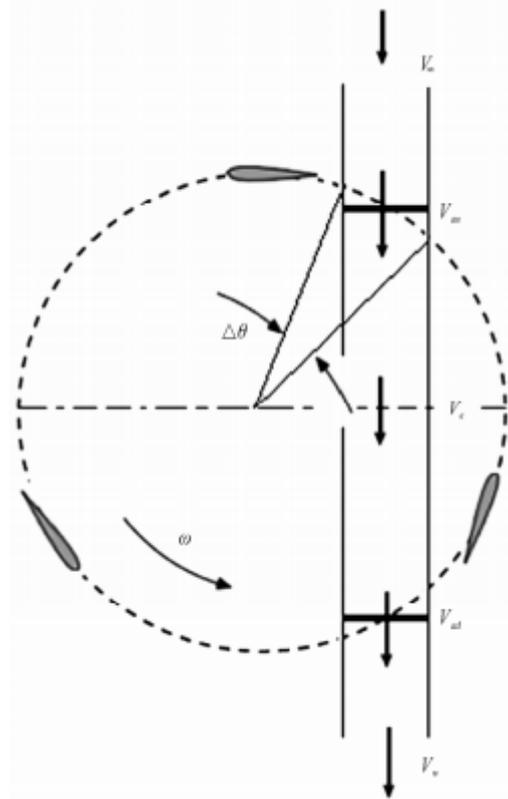


Gambar 2.3 Prinsip dari *Double Multiple Stream Tube Model* yang terdiri dari 6 *streamtube* [13]

Masing-masing *blade* akan melewati *stream tube* sebanyak dua kali, yaitu ketika berada di bagian *upstream* dan *downstream*. Oleh karena itu dalam melakukan perhitungan, persamaan konservasi momentum dan koefisien aerodinamika harus diselesaikan sebanyak dua kali, yaitu untuk bagian *upstream* dan *downstream*. Persamaan (2.1) dan (2.2) menunjukkan *induce velocity* untuk bagian *upstream* (V_{au}) dan untuk bagian *downstream* (V_{ad}). Gambar 2.4 menunjukkan kecepatan pada bagian *upstream* (V_{au}) dan *downstream* (V_{ad}).

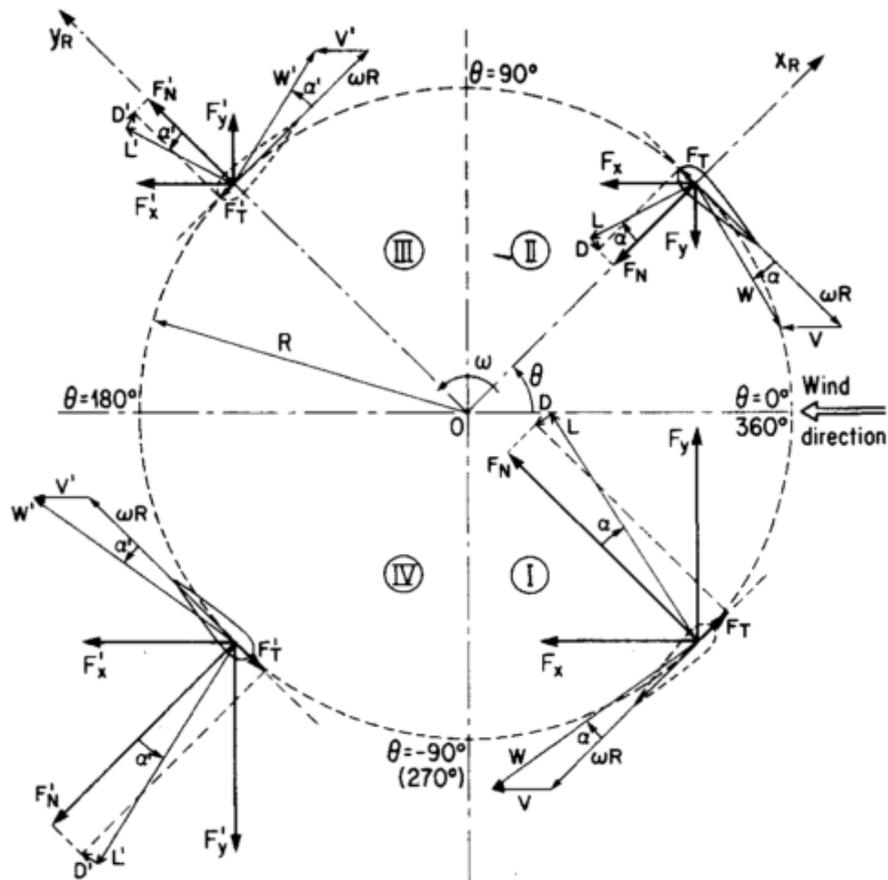
$$V_{au} = \frac{1}{2}(V_{\infty} + V_e) \quad (2.1)$$

$$V_{ad} = \frac{1}{2}(V_e + V_w) \quad (2.2)$$



Gambar 2.4 *Induce velocity* untuk *stream tube* bagian *upstream* dan *downstream* [13]

Skematik untuk VAT (tampak atas) dapat dilihat pada Gambar 2.5. Interaksi antara masing-masing *blade* dan aliran fluida yang berbeda menghasilkan gaya aerodinamika yang berbeda. *Blade* pada kuadran II dan III bergerak melawan aliran datang, sehingga *blade* yang terletak pada kuadran tersebut menghasilkan gaya aerodinamika yang lebih kecil daripada *blade* yang terletak pada kuadran II dan III.

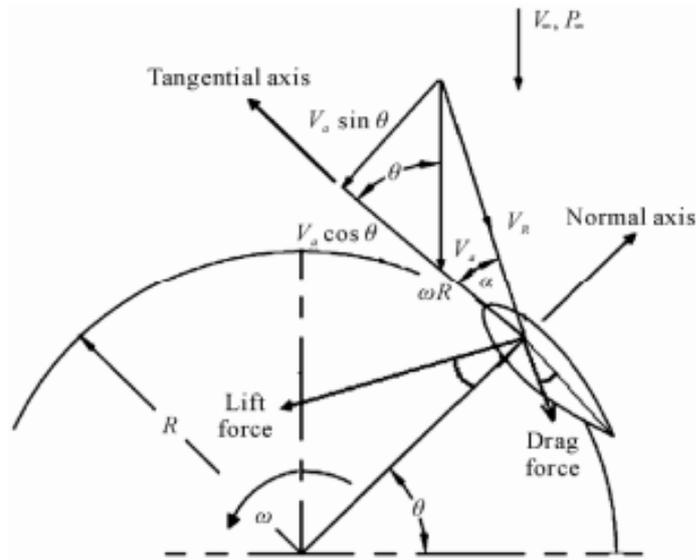


Gambar 2.5 Skematik Vertikal Aksis Turbin (VAT) (tampak atas) [22]

Besarnya gaya aerodinamika yang dihasilkan oleh *blade* bergantung pada resultan kecepatan aliran pada *blade*. Gambar 2.6 memberikan ilustrasi mengenai pembentukan resultan kecepatan aliran pada *blade*. Dari Gambar 2.6 dapat diketahui bahwa resultan kecepatan (v_R) dapat diperoleh dari komponen kecepatan yang sejajar dengan *cord* dan komponen kecepatan yang tegak lurus *cord* (komponen normal). Sehingga v_R dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$v_R = \sqrt{(v_a \sin \theta)^2 + (v_a \cos \theta + \omega R)^2} \quad (2.1)$$

Dimana v_a merupakan kecepatan aksial, ω kecepatan sudut, R adalah jari-jari turbin dan θ merupakan sudut azimuth.



Gambar 2.6 Diagram gaya dan kecepatan aliran pada *airfoil* turbin VAT [13]

Besarnya torsi dan gaya yang dihasilkan oleh suatu *blade* dipengaruhi oleh sudut serang. Dari Gambar 2.6, sudut serang didefinisikan sebagai sudut yang dibentuk antara garis *cord* dan kecepatan resultan. Ketika sudut serang diperbesar hingga mencapai sudut kritis, maka akan muncul turbulensi pada bagian *trailing edge* yang dapat menyebabkan *stall*. Pada saat terjadi fenomena *stall*, *blade* kehilangan gaya *lift*, sementara itu gaya *drag* semakin besar. Hal ini menyebabkan turbin tidak dapat berputar dengan baik. Perubahan besar koefisien *lift* terhadap sudut serang dapat dilihat pada Gambar 2.7. *Blade* pada turbin VAT mengalami perubahan sudut serang secara periodik selama berputar. Persamaan (2.3) menunjukkan besarnya sudut serang pada VAT.

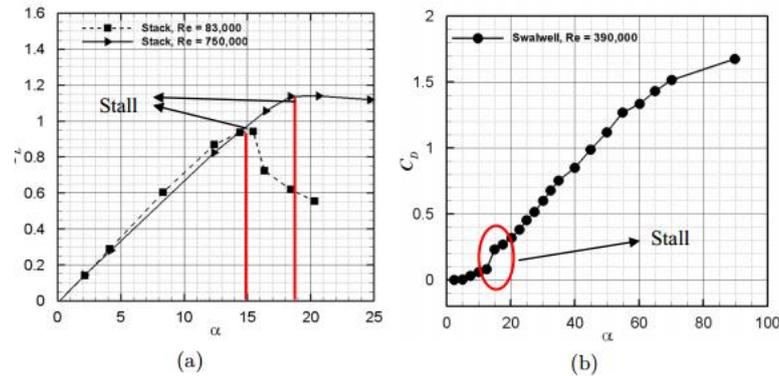
$$\tan \alpha = \frac{v_a \sin \theta}{v_a \cos \theta + \omega R} \quad (2.3)$$

Persamaan (2.4) dan (2.5) menunjukkan besarnya koefisien gaya tangensial dan gaya normal untuk VAT. Dari persamaan tersebut dapat diketahui bahwa koefisien gaya tangensial dan gaya normal dipengaruhi oleh sudut serang.

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_D \sin \alpha \quad (2.4)$$

$$C_T = C_L \sin \alpha - C_D \cos \alpha \quad (2.5)$$

Dimana C_L dan C_D merupakan koefisien *lift* dan koefisien *drag*.



Gambar 2.7 Efek perubahan sudut serang terhadap (a) koefisien *lift* NACA 0012 dan (b) koefisien *drag* NACA 0012 [23]

Persamaan (2.6) – (2.8) masing-masing digunakan untuk menghitung torsi, daya dan koefisien daya yang dihasilkan oleh turbin.

$$\tau = \vec{r} \times \vec{F} \quad (2.6)$$

$$P = \vec{\tau} \cdot \vec{\omega} \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_{turbin} \cdot v_\infty^3} \quad (2.8)$$

Performansi dari suatu turbin direpresentasikan sebagai nilai C_p , yang menunjukkan banyaknya daya fluida (air maupun angin) yang mampu diekstrak oleh turbin. Menurut Betz, teoritikal C_p untuk turbin adalah 0.59, yang disebut sebagai Betz limit. Betz limit diperoleh dengan menganggap turbin sebagai mesin konversi energi yang ideal, dengan asumsi:

- Turbin tidak memiliki hub, sehingga tidak ada rugi-rugi daya yang diakibatkan karena hub.
- Turbin diasumsikan memiliki jumlah blade yang tidak terhingga.
- Keseragaman terjadi pada seluruh area sapuan rotor

Dalam pengaplikasiannya, asumsi-asumsi tersebut sulit untuk dilaksanakan. Banyak kehilangan daya (*losses*) yang disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya gaya *drag* akibat gesekan yang terjadi pada *blade*, perputaran aliran fluida akibat pergerakan rotor dan rugi-rugi daya akibat transmisi dan sistem elektrik [24]. Berdasarkan hasil studi teoritik dan studi eksperimental yang dilakukan oleh beberapa ilmuwan yang berbeda, nilai C_p untuk jenis VAT adalah berkisar pada nilai 0,4[25].

2.3 TURBULENSI

Turbulensi merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari, baik dalam kejadian alamiah atau dalam dunia *engineering*. Beberapa contoh fenomena turbulensi yang sering muncul dalam kehidupan sehari-hari adalah turbulensi yang terjadi di atmosfer bumi, aliran air di dasar laut dan *boundary layer* yang muncul pada sayap pesawat. Sebagian besar pembakaran lebih efektif bila terjadi dalam aliran yang turbulen, bahkan beberapa kasus sangat bergantung pada turbulensi.

Sifat dari turbulensi yang tidak teratur atau acak, membuat analisa deterministik sangat sulit untuk dilakukan, sebagai gantinya, digunakan pendekatan statistik untuk menganalisa turbulensi lebih lanjut. Difusifitas turbulensi merupakan salah satu karakteristik penting dari aliran turbulen. Karakteristik ini menyebabkan pencampuran yang cepat, meningkatkan kecepatan transfer momentum, panas dan massa. Selain itu, difusifitas turbulensi mencegah terjadinya separasi *boundary layer* pada *airfoil* untuk sudut serang yang besar. Aliran turbulen selalu muncul pada kondisi bilangan Reynold (Re) yang tinggi. Turbulensi sering berasal dari ketidakstabilan aliran laminar jika bilangan Reynold (Re) terlalu tinggi.

Turbulensi memiliki sifat *rotational* (berputar) dan tiga dimensi. Turbulensi biasanya ditandai dengan level fluktuasi vortisitas yang besar. Fluktuasi vortisitas tidak dapat bertahan jika fluktuasi kecepatan alirannya dua dimensi (2D) karena tidak adanya mekanisme untuk mempertahankan vortisitas, atau disebut sebagai mekanisme *vortex stretching* pada aliran dua dimensi. Aliran turbulen memiliki sifat disipatif. *Viscous shear stress* menunjukkan perubahan bentuk kerja yang meningkatkan energi dalam dari fluida dengan mengorbankan energi kinetik dari turbulensi. Oleh karena itu, turbulensi membutuhkan suplay energi secara berkelanjutan untuk mengkompensasi adanya rugi-rugi akibat gesekan tersebut (*viscous loss*). Apabila suplai energi tidak ada, maka turbulensi akan hilang dengan cepat [26].

Dengan kemampuan komputasi yang semakin berkembang pesat sejak 1960, berbagai penelitian dilakukan untuk mengembangkan model turbulensi. Model turbulensi berdasarkan persamaan *turbulence kinetic energy* (energi kinetik turbulensi) merupakan landasan dari model turbulensi modern [27]. Menurut

Prandtl (1945), *turbulence kinetic energy* (k) merupakan energi kinetik (per unit massa) dari fluktuasi turbulensi. Secara matematika dituliskan sebagai.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) \quad (2.9)$$

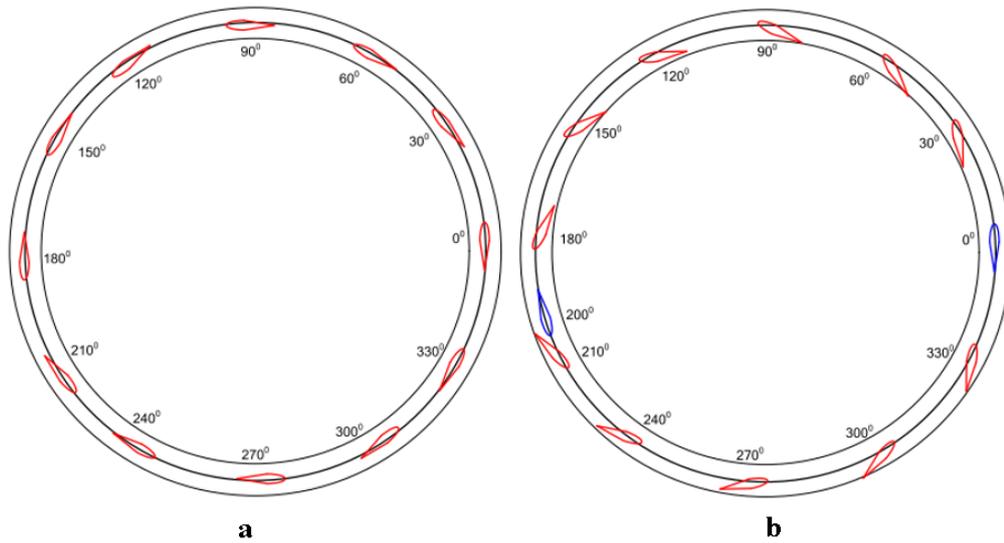
Berdasarkan teori klasik, energi kinetik memasuki daerah turbulensi dengan pergerakan skala besar dan kemudian energi ditransfer kedalam bentuk yang lebih kecil hingga akhirnya terdisipasi akibat adanya gesekan [28].

Perilaku dari suatu turbin dapat dipresentasikan berdasarkan energi kinetik turbulensi disekitar turbin. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Antonio Posa, dkk (2016), turbin yang bekerja pada TSR rendah (berhubungan dengan sudut serang yang tinggi) menghasilkan energi kinetik turbulensi yang cukup besar akibat *stall* yang lebih besar pada blade. Terdapat perbedaan besarnya energi kinetik turbulensi pada daerah sisi turbin, bagian kuadran II dan III memiliki energi kinetik turbulensi yang lebih besar jika dibandingkan dengan kuadran I dan IV (penamaan kuadran mengacu pada Gambar 2.5). Pernyataan ini didukung oleh eksperimental yang dilakukan oleh Fraunie dkk (1986) dan Bachant dan Wosnik (2015), namun berlawanan dengan hasil eksperimental yang dilakukan oleh Rolin dan Porté-Angel (2015). Perbedaan ini muncul karena efek soliditas yang berbeda [29].

2.4 MEKANISME *PASSIVE PITCH*

Vertical axis hydrokinetic turbine (VAHT) mengalami perubahan *angle of attack* (sudut serang) dan kecepatan relatif selama turbin tersebut berputar. Sudut serang merupakan sudut yang terbentuk antara garis *cord* dengan kecepatan lokal (*local velocity*). Besarnya sudut serang dan kecepatan relatif VAHT berubah seiring dengan perubahan sudut azimuth. *Blade* pada VAHT sering mengalami *stall* akibat nilai sudut serang yang terlalu besar, terutama jika turbin beroperasi pada *tip speed ratio* (TSR) yang rendah ($\lambda < 4$) [30]. TSR didefinisikan sebagai ratio antara kecepatan tangensial turbin (Ω_r) dan kecepatan *freestream* (u_∞). Kecepatan relative yang didapatkan oleh turbin merupakan penjumlahan vektor dari kecepatan *freestream* dan kecepatan tangensial. Pada VAHT, *blade* yang berada pada bagian *upstream* mendapatkan karakteristik aliran yang berbeda dengan *blade* pada bagian

downstream. Besarnya sudut serang dan kecepatan relatif *blade upstream* berbeda dengan *blade downstream*. Akibat adanya *shedding wake* dari *blade upstream*, *blade downstream* mendapatkan aliran yang lebih kompleks sehingga analisa untuk *blade downstream* lebih sulit untuk dilakukan [31].



Gambar 2.8 Perubahan sudut *pitch* selama turbin berputar untuk (a) *fix-blade* dan (b) *passive pitch blade* [16]

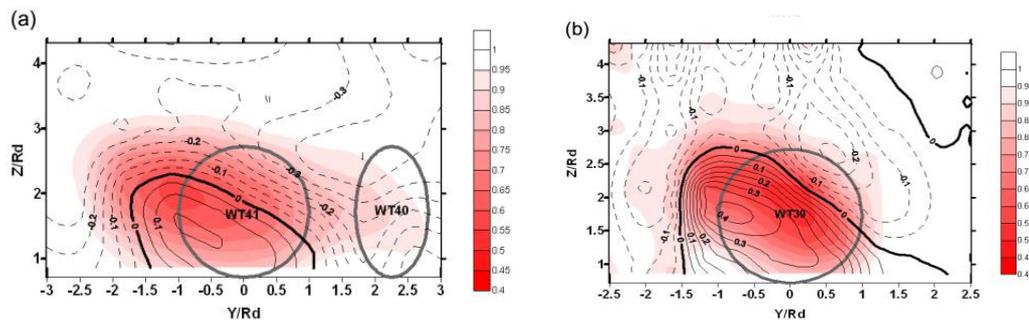
Sudut serang merupakan parameter penting berpengaruh terhadap kinerja turbin. Sudut serang terlalu tinggi dapat mengakibatkan *stall* pada *blade*. Oleh karena itu, berbagai penelitian dilakukan untuk mengurai kemungkinan *stall* pada VAHT. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penggunaan mekanisme *passive pitch* dapat mengurangi kemungkinan *stall* sehingga memperbaiki kemampuan *self-starting*. Dengan menggunakan mekanisme tersebut, *blade* dapat menyesuaikan sudut serangnya sesuai dengan posisi azimuth, sehingga sudut serang tidak terlalu besar.

Penelitian yang dilakukan Hantoro (2011) menunjukkan bahwa terjadi perubahan sudut *pitch* selama turbin berputar, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Pada azimuth $0^\circ < \theta < 200^\circ$, *trailing edge* menyentuh *stopper* bagian dalam dan pada sudut $200^\circ < \theta < 0^\circ$ *trailing edge* menyentuh *stopper* bagian luar. Sementara itu pada sudut 0° dan 200° , *trailing edge* berada di antara *stopper* luar dan *stopper* dalam [16]. Pergerakan *passive pitch blade* cenderung menyesuaikan dengan aliran fluida,

sehingga akan mengurangi sudut serang, menunda terjadinya *stall* dan mempermudah *self-starting* turbin.

2.5 ALIRAN DI SEKITAR TURBIN

Perputaran turbin menyebabkan munculnya *vortex* di area sekitar turbin, baik di daerah kiri, kanan maupun belakang turbin. Ketika beberapa turbin disusun dalam suatu *array*, maka akan muncul interaksi *vortex*. Interaksi tersebut terutama terjadi pada turbin yang saling berdekatan [7]. Interaksi antar *vortex* turbin dapat menimbulkan efek baik namun juga dapat menimbulkan efek buruk. Efek buruk ini dapat dikurangi dengan peningkatan TSR (*Tip speed Ratio*) dan ketika sudut datang arus kecil [3]. Efek buruk tersebut ditandai dengan penurunan performansi turbin, sehingga dibutuhkan konfigurasi turbin yang tepat agar turbin tetap dapat beroperasi dengan optimal. Selain TSR dan sudut datang arus, beberapa faktor lain yang mempengaruhi performansi turbin dalam *array* adalah ukuran *array*, posisi turbin dalam *array* dan arah rotasi turbin dalam *array* [1] [8]. Pada turbin angin, rugi-rugi daya sebesar 10% - 30% terjadi akibat *wind turbine wake*. Nilai ini tergantung pada jarak antar turbin dan konfigurasi turbin. Informasi mengenai karakteristik aliran dan interaksi aliran di sekitar turbin sangat dibutuhkan untuk menyusun konfigurasi *array* turbin yang memiliki efisiensi tinggi.

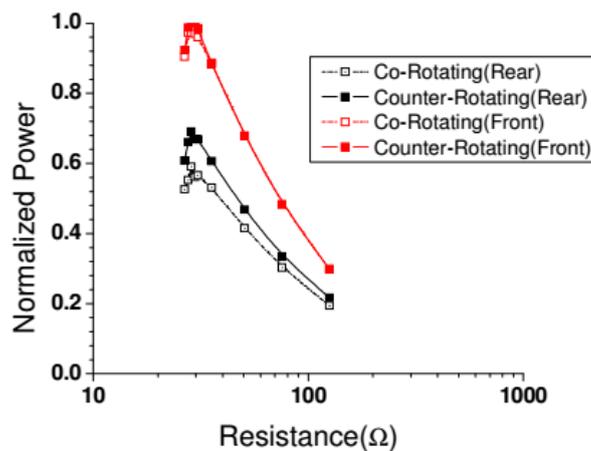


Gambar 2.9 Kontur kecepatan di sekitar turbin HAWT (*Straight line* - menunjukkan kecepatan yang bernilai positif, sementara garis putus-putus menunjukkan kecepatan bernilai negatif) [7]

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Conzemius pada turbin angin tipe HAWT, dapat diketahui bahwa *downstream wake* berputar berlawanan arah dengan arah rotasi *upstream turbine* [7]. Gambar 2.9 menunjukkan profil kecepatan di

daerah sekitar turbin HAWT. Dari Gambar tersebut diketahui bahwa kecepatan vertikal di daerah *downstream* bernilai negatif, sehingga dapat disimpulkan bahwa kecepatan vertikal pada daerah *downstream* memiliki arah berlawanan dengan rotasi *upstream turbine*.

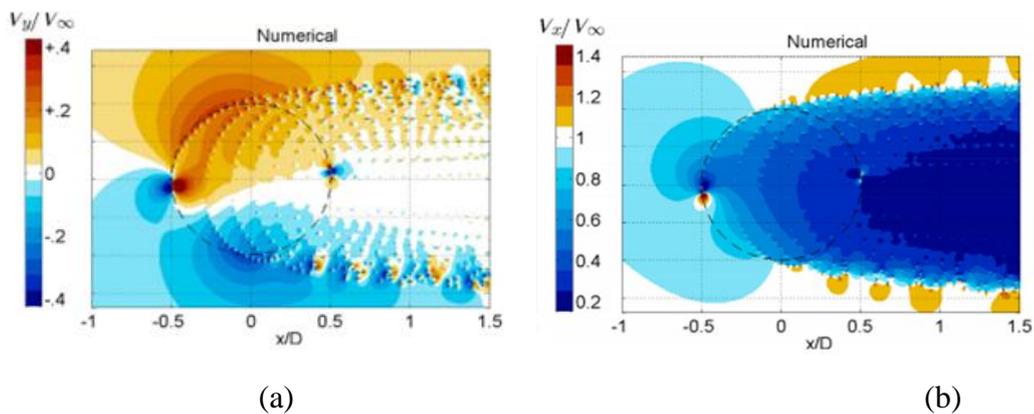
Penelitian mengenai efek arah rotasi turbin terhadap performansi turbin HAWT juga dilakukan oleh Wei Yuan pada tahun 2013. Hasil yang diperoleh dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa arah rotasi tidak berpengaruh pada turbin *upstream*, namun sangat berpengaruh pada turbin *downstream* [8]. Turbin *downstream* yang berotasi berlawanan arah dengan rotasi turbin *upstream* (*counter-rotating turbine*) menghasilkan daya lebih besar jika dibandingkan dengan turbin *downstream* yang berotasi searah dengan rotasi turbin *upstream* (*Co-rotating turbine*), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Perbandingan turbin dengan arah rotasi berbeda ($L_{1-2}=0.7 D$) [8]

Ketika turbin *downstream* berputar searah dengan turbin *upstream* (*co-rotating*), kecepatan yang berlawanan arah (*negative pre-rotating velocity*) menghasilkan gaya *drag* yang lebih besar pada turbin *downstream*. Sementara itu, ketika turbin *downstream* berotasi berlawanan arah (*Counter-rotating*), *positive pre-rotating velocity* menghasilkan gaya *lift* yang lebih besar pada *downstream turbine*. Hal ini menyebabkan performansi turbin *counter-rotating* lebih baik daripada turbin *co-rotating*.

Fenomena kecepatan di daerah *downstream* yang berlawanan dengan arah putaran *upstream* turbin ini tidak hanya terjadi pada turbin sumbu horizontal (HAT). Fenomena yang hampir sama dapat ditemukan pada vertikal aksis turbin (VAT). Penelitian yang dilakukan oleh G. Tescione pada VAWT (vertical axis wind turbine) menunjukkan bahwa komponen kecepatan searah sumbu y (V_y) bernilai positif pada sisi *windward* ($y/D \geq 0$) dan bernilai negatif pada bagian *leeward* ($y/D \leq 0$) [12], seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a). Hal ini mengindikasikan bahwa arah rotasi *vortex* pada bagian *windward* dan *leeward* berbeda. Sehingga untuk memanfaatkan fenomena ini, turbin yang bekerja secara berdampingan (*side by side configuration*) harus dipasang dengan arah rotasi menyesuaikan dengan posisinya.



Gambar 2.11 Profil kecepatan pada daerah *downstream turbine* (a). Kecepatan sumbu y (V_y); (b). Kecepatan sumbu x (V_x) [12]

Terjadi penurunan kecepatan searah sumbu x (V_x) pada daerah *downstream*, terutama terjadi pada *centreline* ($y/D = 0$), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 (b). Penurunan kecepatan ini terjadi karena proses ekstraksi energi oleh turbin. Penurunan kecepatan pada daerah *downstream* turbin ini disebut sebagai *wake*. *Wake* akan berinteraksi dengan aliran di sekelilingnya. Terjadi transfer energi dan momentum selama proses interaksi tersebut, sehingga *wake* terkonservasi pada jarak tertentu [4].

2.6 ARRAY TURBIN

Untuk mendapatkan kapasitas produksi listrik yang diinginkan, suatu pembangkit listrik tenaga arus laut didesain dalam bentuk *array* turbin. Energi yang dapat diekstrak dari kanal dibatasi oleh dinamika dari ombak dan arus laut [32]. Total energi ini dipengaruhi oleh kapasitas produksi dari masing-masing turbin. Turbin yang terdapat pada *array* yang luas memiliki karakteristik yang berbeda dengan *stand-alone turbine (isolated-turbine)*[33]. Terdapat hubungan yang rumit antar turbin dalam suatu *array*. Besarnya energi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin dipengaruhi oleh ukuran *array*, posisi turbin dalam *array* dan kanal tempat turbin tersebut dipasang. Energi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin menentukan jumlah turbin yang harus dipasang untuk memenuhi kapasitas produksi total, serta berpengaruh terhadap biaya pembangunan *array* [33][34].

2.3.1 Desain Makro *Array* Turbin

Ketika mendesain suatu *array* turbin, terdapat dua hal penting yang harus ditentukan agar *array* dapat mencapai kapasitas produksi yang diinginkan, yaitu desain makro dan desain mikro [1]. Desain makro terkait dengan jumlah total turbin yang harus dipasang, jumlah turbin yang harus dipasang pada setiap baris dan jumlah baris turbin yang harus dipasang. Sementara itu, desain mikro terkait dengan posisi masing-masing turbin dalam *array* untuk meningkatkan kapasitas produksi dan performansi dari masing-masing turbin. Desain makro memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap kapasitas produksi *array* jika dibandingkan dengan desain mikro.

Terdapat kehilangan daya (rugi-rugi daya) yang terjadi dalam suatu *array* turbin. Penyebab terjadinya rugi-rugi daya antara lain akibat adanya percampuran aliran dalam *array* dan akibat konstruksi dari turbin. Pada *tidal turbine array*, besarnya rugi-rugi daya akibat percampuran aliran bervariasi dari 1/3 sampai mendekati 0 untuk nilai *blockage ratio* yang besar [35]. Sementara itu, rugi-rugi daya yang terjadi akibat gaya drag pada konstruksi turbin adalah besar 5 – 20% dan rugi-rugi akibat proses elektro-mekanik sebesar 11% [36]. Besarnya rugi-rugi daya ini dipengaruhi oleh jumlah turbin, *tunning* dan

penyusunan turbin dalam *array* [1]. Untuk menentukan performansi dari masing-masing turbin dalam *array* dapat dilakukan dengan membandingkan daya *output* masing-masing turbin dalam *array* dengan daya *output isolated-turbine* [33].

Peningkatan kapasitas produksi *array* dapat dilakukan dengan menambah jumlah turbin dalam satu baris atau menambah jumlah baris dalam *array*. Penambahan jumlah turbin dalam suatu baris dapat memberikan efek baik maupun efek buruk yang dipengaruhi oleh ukuran kanal, jenis kanal dan posisi turbin dalam *array*. Pada kanal besar, penambahan jumlah turbin dalam baris dapat meningkatkan daya *output* dari masing-masing turbin. Sementara itu untuk kanal kecil, penambahan jumlah turbin dalam baris menyebabkan penurunan daya *output* dari semua turbin.

Usaha lain yang dapat dilakukan untuk meningkatnya kapasitas produksi *array* turbin adalah dengan menambahkan jumlah baris dalam *array*. Namun penambahan jumlah baris menyebabkan penurunan daya *output* dari masing-masing turbin. Hal ini terjadi karena terjadi penurunan kecepatan *free-stream*, terutama pada baris turbin bagian belakang.

Kinerja atau performansi dari *array* direpresntasikan dalam nilai efektifitas *farm* (\mathcal{E}_{farm}). Dalam berbagai literatur, istilah efektifitas *farm* sering disebut sebagai *farm efficiency*. Efektifitas *farm* menunjukkan kemampuan *array* dalam mengekstrak potensi yang ada dalam kanal. Efektifitas *farm* dapat dinyatakan sebagai proporsi potensi kanal yang mampu diekstrak oleh *array*. Hal ini menunjukkan efektifitas *array* dalam memanfaatkan potensi dari kanal [37]. Menurut Ye Li, efektifitas *farm* merupakan perbandingan antara daya yang dihasilkan oleh *array* dengan daya dari N kali *isolated-turbine*. Dimana N merupakan jumlah turbin dalam *array* [38]. *Isolated-turbine* juga sering disebut sebagai *stand-alone turbine* (turbin tunggal). Secara matematis, perhitungan efektifitas ditunjukkan oleh persamaan (2.10 – 12).

$$\mathcal{E}_{farm} = \frac{P_{farm}}{P_{ref.farm}} \quad (2.10)$$

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

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

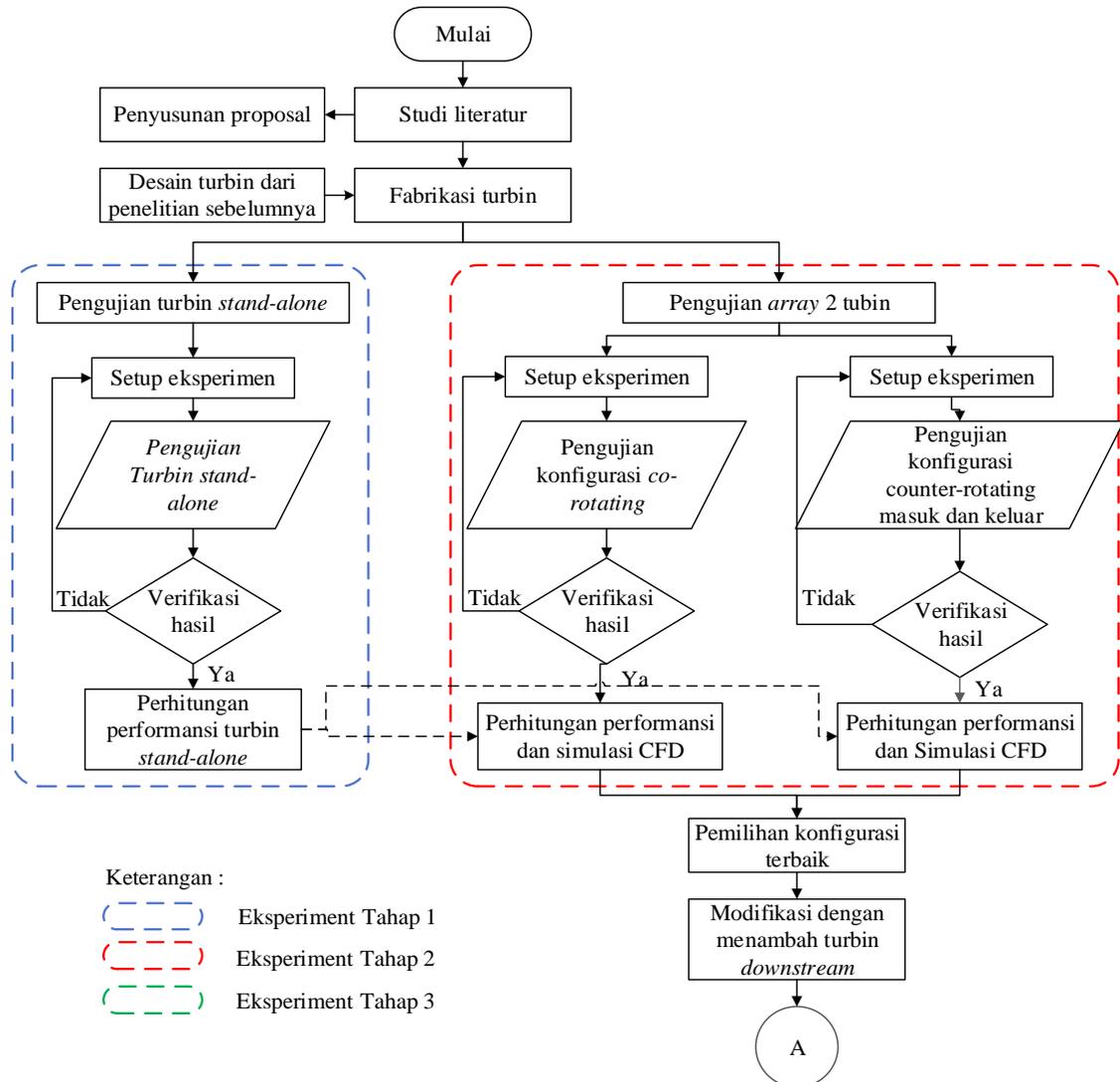
2.3.2 Desain Mikro *Array* Turbin

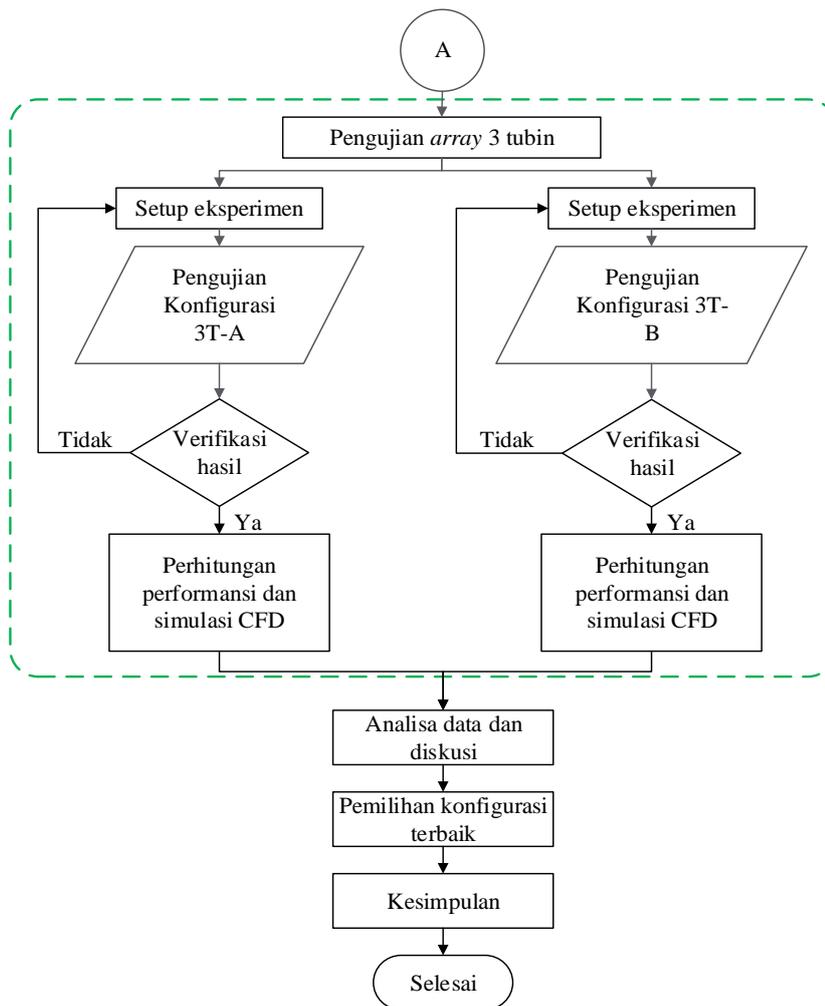
Seperti telah disebutkan sebelumnya bahwa desain mikro *array* turbin berkaitan dengan posisi dan jarak antar turbin dalam *array*. Pengaturan posisi dan jarak antar turbin dalam *array* dapat dilakukan untuk meningkatkan daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Turbin *downstream* (turbin baris belakang) harus diletakkan pada posisi yang tepat untuk menghindari *wake* yang dihasilkan oleh turbin *upstream* (turbin baris depan). Penurunan kecepatan pada daerah *wake* turbin *upstream* menyebabkan penurunan kecepatan *free-stream* yang mengenai turbin *downstream*. Menurut [39] dan [40] panjang *wake* turbin *upstream* dapat dijadikan sebagai acuan jarak minimal antar baris dalam *array*. Panjang *wake* diukur dari *shaft* turbin sampai jarak *downstream* tertentu dimana besar kecepatan aliran sudah kembali ke besar kecepatan semula (kecepatan *free-stream*). Panjang *wake* yang dihasilkan oleh turbin tergantung pada posisi dan pengaturan turbin dalam *array* [41].

Penelitian yang dilakukan oleh Bahaj dan Myers menunjukkan bahwa turbulensi yang dihasilkan oleh turbin memberikan pengaruh besar terhadap karakteristik aliran dibelakang turbin tersebut [42]. Semakin besar turbulensi yang terjadi pada daerah *wake*, maka kecepatan pada daerah tersebut akan lebih cepat pulih [43].

BAB III METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini meliputi dua aspek, yaitu aspek pengujian dan aspek simulasi numerik. Penggunaan aspek pengujian bertujuan untuk mengetahui torsi dan kecepatan sudut turbin sehingga performansi turbin dapat dianalisa. Pengujian ini dilakukan di *Towink Tank*. Secara umum, pengujian dilakukan dalam 3 tahap. Dari ketiga tahap tersebut, terdapat lima konfigurasi turbin yang diujikan, yaitu konfigurasi *co-rotating*, *counter-rotating* masuk, *counter-rotating* keluar, 3T-A dan 3T-B.





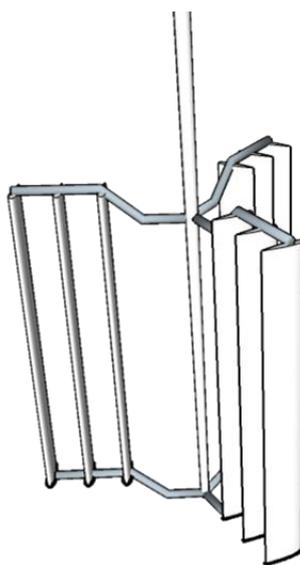
Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

Sementara itu, aspek simulasi numerik digunakan untuk mendapatkan informasi tambahan yang tidak dapat diperoleh melalui pengujian, seperti: kecepatan aliran di sekitar turbin, intensitas turbulensi, fluktuasi torsi dan lain-lain. Selain itu, juga dilakukan pengujian turbin *stand-alone*, dimana performansi dari turbin *stand-alone* digunakan sebagai faktor pembandingan dalam mengevaluasi performansi dari masing-masing konfigurasi yang telah didesain. *Flow chart* penelitian secara lebih detail dapat dilihat pada Gambar 3.1

3.1 DESAIN TURBIN

Jenis turbin yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis turbin Darrieus *Straight Blade Cascaded* yang terdiri dari 9 *blade*. *Hydrofoil* turbin mengadopsi

bentuk NACA 0018 yang merupakan *hydrofoil* simetris dengan bentuk sisi atas dan bawah sama. Turbin Darrieus *Straight Blade Cascaded* termasuk ke dalam kelompok *Vertical Axis Turbine* (VAT) yang memiliki permasalahan efisiensi yang rendah dan *self-starting* yang buruk. Pada umumnya, VAT memang memiliki efisiensi yang cenderung lebih rendah jika dibandingkan dengan *Horizontal Axis Turbine* (HAT). VAT cocok untuk diaplikasikan pada daerah yang memiliki potensi kecepatan arus kecil. Oleh karena itu, pengembangan turbin ini masih banyak dilakukan. *Cascaded blade* digunakan untuk meningkatkan efisiensi turbin. Dengan penggunaan lebih dari satu *blade* pada masing-masing *arm*, maka proses ekstraksi energi berjalan lebih efisien dan lebih banyak energi yang diproduksi. Darrieus *Straight-Blade Cascaded* terdiri dari tiga buah *arm* dan masing-masing *arm* terdiri dari tiga buah *blade*, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Darrieus *Straight Blade Cascaded*

Darrieus *Straight Blade Cascaded* merupakan turbin dengan kombinasi dua mekanisme *pitching*, yaitu mekanisme *passive variable pitch* untuk *blade* terluar dan mekanisme *fix pitch* untuk *blade* yang lain. Mekanisme *passive variable pitch* digunakan untuk meningkatkan kemampuan *self-starting* turbin [16], sehingga turbin sudah mampu mulai berputar pada kecepatan *freestream* yang rendah. Hal ini terjadi karena *blade* mampu menyesuaikan *angle of attack* (AoA)/sudut serang sesuai dengan posisi azimuthal, sehingga *stall* dinamik dapat dihindari. Mekanisme

ini memungkinkan *blade* terluar untuk bergerak dalam rentang sudut *pitch* $-20^{\circ} \leq \beta \leq 20^{\circ}$.

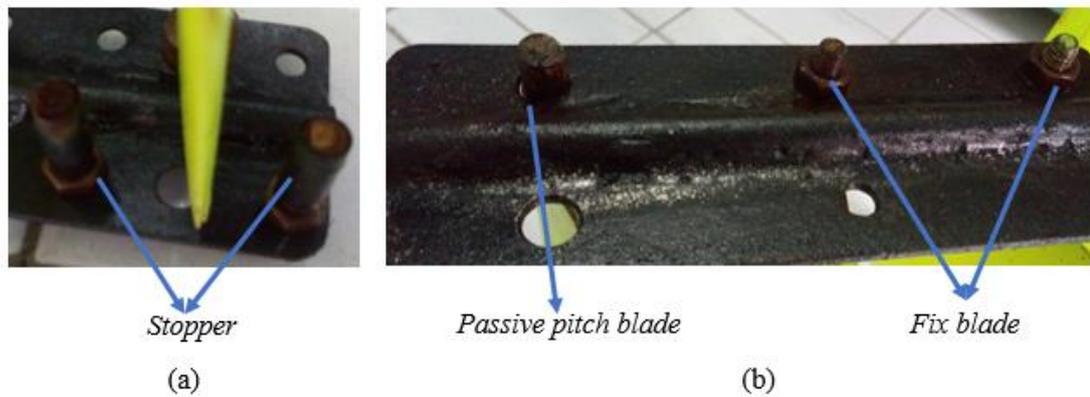
Dimensi turbin secara lengkap disajikan pada Table 3.1

Tabel 3.1. Dimensi turbin *Darrieus Straight-Blade Cascaded*

Parameter	<i>Darrieus Straight Blade Cascaded</i>
Jumlah <i>blade</i> (N)	9
Panjang <i>cord</i> (c)	0.05 m
<i>Span</i> (H)	0.4 m
Diameter (D)	0.4 m
H/D	1
<i>Aspect Ratio</i>	8
<i>Hydrofoil</i>	NACA 0018

3.2 FABRIKASI TURBIN

Dalam proses fabrikasi, turbin dibagi menjadi beberapa komponen, yaitu *blade*, *arm*, *shaft* dan kerangka. Proses fabrikasi dimulai dengan membuat *blade* turbin yang terbentuk dari *hydrofoil* NACA 0018. *Blade* turbin terbuat dari lapisan komposit *fiber* dengan resin. Pada bagian tengahnya terdapat plat besi yang berfungsi untuk memperkuat struktur *blade*. Masing-masing *blade* memiliki massa 0,5 kg. Material dempul ditambahkan dengan tujuan untuk memperhalus permukaan *blade*. Kemudian *blade* haluskan dengan amplas dan dicat. Untuk *passive pitch blade*, terdapat dua buah *stopper* (*inner stopper* dan *outer stopper*) yang berfungsi untuk membatasi pergerakan *blade*. Sementara itu, tidak terdapat *stopper* pada *fix blade*. Gambar 3.3 (a) menunjukkan *stopper* yang digunakan pada *passive pitch blade*. Sementara itu, mekanisme penambatan *blade* pada *arm* ditunjukkan pada Gambar 3.3 (b). Mur digunakan untuk menjaga *fix blade* agar tetap dalam posisinya. Sementara itu, tidak digunakan mur dalam penambatan *passive pitch blade*, sehingga *blade* bebas bergerak dan pergerakannya hanya dibatasi oleh *stopper*.



Gambar 3.3 Pemasangan *blade* pada *arm*: (a) *Stopper* pada *passive pitch blade*; (b) pamanbatan *blade* pada *arm*

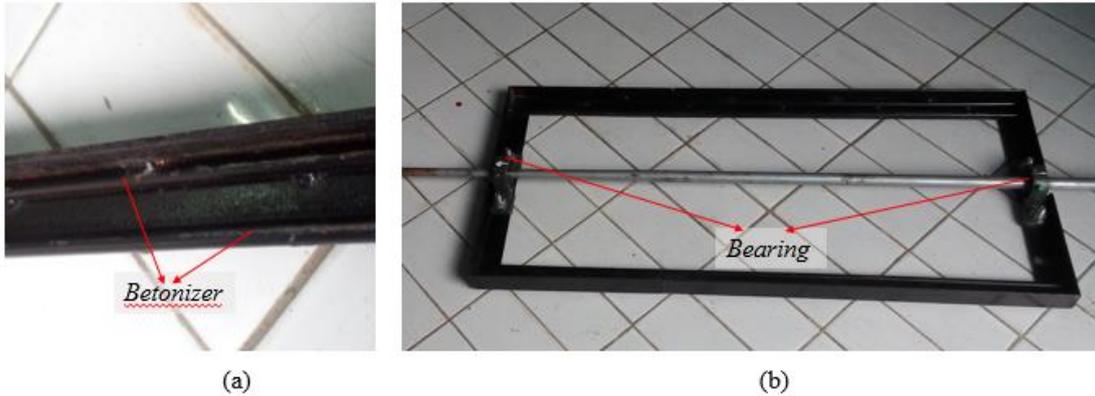
Arm dibuat dari material besi pejal dengan tujuan untuk memperkuat struktur, sehingga dapat menahan moment inersia yang besar ketika turbin berputar. Untuk mengurangi *drag* yang disebabkan oleh geometri *arm* tersebut, maka bagian ujung *arm* dan bagian *housing* dibuat melengkung. Bagian *housing* merupakan bagian yang menghubungkan *arm* dan *shaft*. Selain itu, *arm* berbentuk lengkung menyerupai huruf Z yang bertujuan untuk memperkecil kemungkinan terjadinya *bending*. Gambar 3.4 merupakan desain *arm* yang digunakan pada turbin Darrieus *Straight Blade Cascaded*.



Gambar 3.4 *Arm Darrieus Straight Blade Cascaded*

Karena turbin dalam posisi menggantung ketika dilakukan eksperimental, maka diperlukan struktur *shaft* dan kerangka yang kuat untuk momen inertia turbin ketika berputar. *Shaft* turbin terbuat dari besi pejal dengan diameter yang mengecil pada ujung bawahnya. Tujuannya adalah agar *drag* pada ujung bawah *shaft* dapat dikurangi sehingga dapat memperkecil kemungkinan *bending* pada *shaft*. Diameter

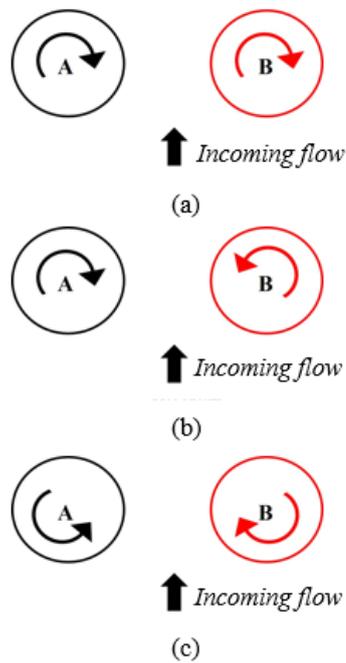
atas *shaft* sebesar 2 cm dan diameter bawah sebesar 1 cm. Sementara itu kerangka turbin terbuat dari besi L, dengan lebar 3 cm. Untuk memperkuat struktur kerangka ini, *betonizer* ditambahkan pada sisi dalam kerangka bagian kanan dan kiri, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5 (a). Pada bagian atas dan bawah kerangka terdapat dua buah *bearing* yang menghubungkan *shaft* dengan kerangka, seperti ditunjukkan Gambar 3.5 (b).



Gambar 3.5 Struktur kerangka (a) *betonizer*; (b) kerangka dan *shaft*

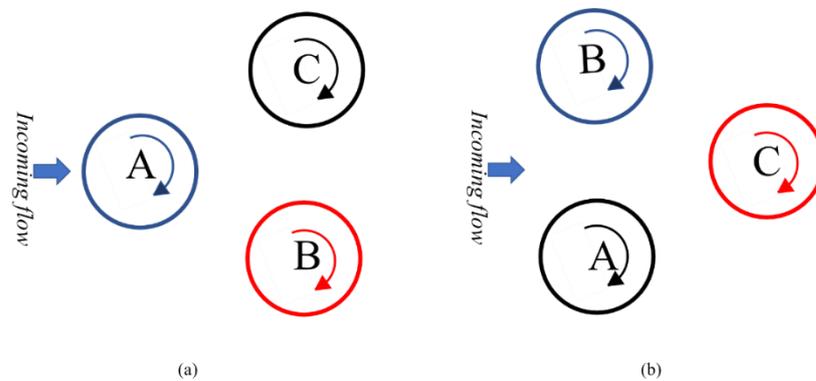
3.3 DESAIN KONFIGURASI ARRAY

Perilaku masing-masing turbin yang tersusun dalam suatu konfigurasi *array* memiliki perilaku yang berbeda dengan *stand-alone* turbin, sehingga biasanya masing-masing turbin memiliki kinerja yang berbeda. Perbedaan perilaku ini disebabkan oleh interaksi aliran yang terjadi antar turbin. Interaksi tersebut memberikan efek yang berbeda pada masing-masing turbin. Beberapa variasi konfigurasi *array* dirancang untuk menganalisa hal tersebut. Penelitian ini merancang dua jenis konfigurasi *array* turbin, yaitu konfigurasi *array* dua turbin dan konfigurasi *array* tiga turbin. Konfigurasi *array* dua turbin dirancang dengan tujuan untuk mengetahui efek arah rotasi turbin terhadap interaksi aliran dan kinerja turbin. Tiga jenis konfigurasi dua turbin dirancangan, yaitu konfigurasi *co-rotating*, *counter-rotating* keluar dan *counter-rotating* masuk, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Konfigurasi *array* dua turbin (a) *Co-rotating*; (b) *counter-rotating* keluar; (c) *counter-rotating* masuk

Konfigurasi *co-rotating* terdiri dari dua turbin yang berputar *clockwise* (CW). Sementara itu konfigurasi *counter-rotating* merupakan konfigurasi dimana dua turbin berputar dengan arah yang berlawanan. Pada konfigurasi *counter-rotating* keluar, turbin A berputar *clockwise* dan turbin B berputar *counter-clockwise* (CCW). Sementara itu, pada konfigurasi *counter-rotating* masuk, turbin A berputar *counter-clockwise* (CCW) dan turbin B berputar *clockwise* (CW).



Gambar 3.7 Konfigurasi *array* tiga turbin (a) 3T-A; (b) 3T-B

Dengan mempertimbangkan hasil pengujian *array* dua turbin, konfigurasi *co-rotating* dipilih untuk dikembangkan menjadi konfigurasi *array* tiga turbin. Konfigurasi *co-rotating* dipilih karena memiliki kinerja yang baik jika dibandingkan dengan konfigurasi dua turbin yang lainnya. Pada konfigurasi tiga turbin, *co-rotating* dimodifikasi dengan menambahkan turbin *clockwise* pada bagian depan (konfigurasi *array* 3T-A) dan menambahkan turbin *clockwise* pada bagian belakang (konfigurasi *array* 3T-B), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. *Cross-stream distance* (jarak antara turbin *upstream* dan *downstream*) ditetapkan sebesar 3D. Nilai ini diambil dari penelitian sebelumnya, yang menyatakan bahwa pengaruh *wake* sudah berkurang pada jarak *downstream* 3D [44].

3.4 METODE PENGUJIAN DI *TOWING TANK*

Pengujian konfigurasi turbin dilakukan di *Towing Tank* Laboratorium Hidrodinamika, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.8. Fasilitas tersebut memiliki panjang 50 meter, lebar 3 meter dan kedalaman 2 meter. Turbin digantung pada kereta yang terletak di atas *Towing Tank* untuk selanjutnya ditarik dengan variasi kecepatan tertentu. Gambar 3.9 menunjukkan kereta penarik pada *Towing Tank*. Pengendalian kereta *Towing Tank* dilakukan pada *control room*. Pengaturan kecepatan kereta dilakukan dengan mengatur tegangan listrik (*voltage*) kereta.



Gambar 3.8 Fasilitas *Towing Tank* di Laboratorium Hidrodinamika FTI ITS

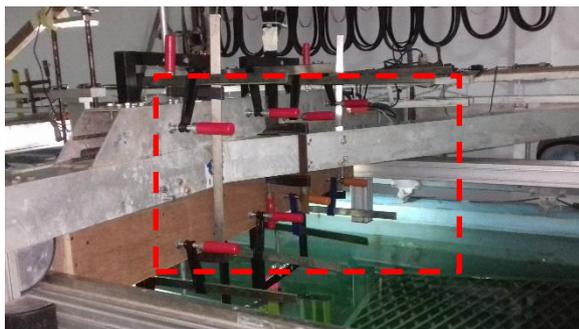
Untuk mengetahui efek perubahan kecepatan *freestream* terhadap interaksi aliran antar turbin, maka digunakan variasi kecepatan *freestream* 0.7; 1 dan 1.3 m/s. Variasi *cross-stream distance* ditambahkan pada pengujian konfigurasi *array* dua turbin, dengan variasi 1,5D; 2D dan 2,5D, dimana D merupakan diameter turbin.

Tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh jarak antar turbin terhadap interaksi aliran dan kinerja turbin.



Gambar 3.9 Kereta penarik pada *Towing Tank*

Langkah pertama yang harus dipersiapkan untuk melakukan pengujian turbin adalah *set up* eksperimental. Pada tahap ini, turbin dipasang (ditempelkan) pada kereta dengan menggunakan *clamp* F. Untuk memasang masing-masing turbin dibutuhkan 4 buah *clamp* F. Karena turbin dalam posisi *overhanging*, maka pemasangant *clamp* harus dipastikan kuat, sehingga turbin tidak oleng dan membahayakan struktur turbin ketika diuji. Posisi *overhanging* merupakan posisi turbin dimana bagian ujung atas turbin dipegang oleh *bearing* pada kerangka sedangkan bagian ujung bawah bebas. Untuk memperkuat kemampuan *clamp* dalam menahan berat turbin, maka *clamp* diletakkan pada bagian tepi kerangka turbin, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pemasangan turbin pada kereta dengan menggunakan *clamp* F

Data kecepatan sudut diperoleh dari hasil rekaman kamera. Kamera diletakkan di bagian atas konfigurasi turbin sehingga pergerakan kedua turbin dapat terekam dengan baik. Pengukuran kecepatan sudut dengan menggunakan *tachometer* dilakukan untuk memvalidasi hasil perhitungan kecepatan sudut

dari rekaman kamera. Pengukuran dengan menggunakan *tachometer* hanya dilakukan pada turbin A. Berdasarkan hasil ekeperimental yang telah dilakukan, pengukuran kecepatan sudut melalui rekaman tersebut dapat dianggap valid karena memiliki nilai yang sama dengan hasil pengukuran *tachometer*.

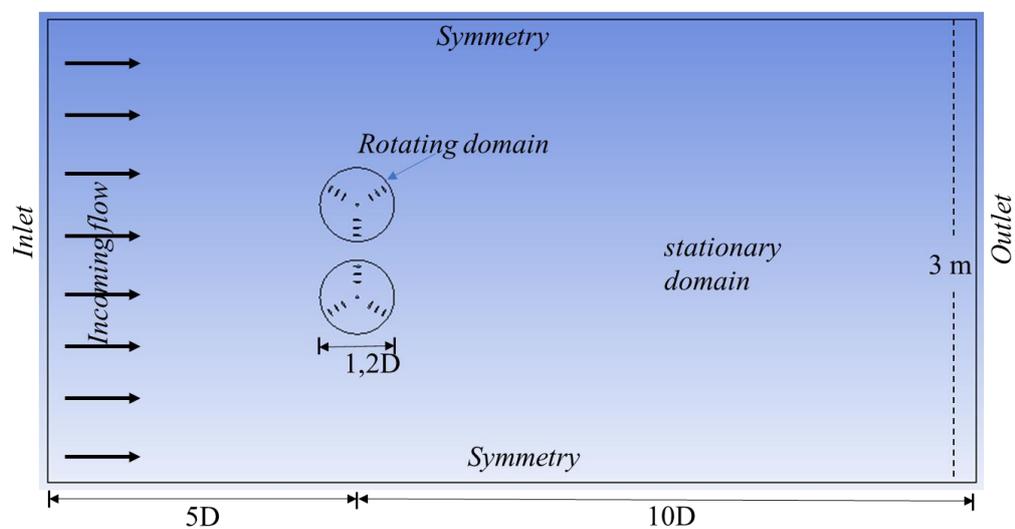
3.5 SIMULASI NUMERIK DENGAN CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan analisa yang mencakup aliran fluida, transfer panas dan beberapa fenomena yang saling berhubungan. CFD merupakan teknik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan non-industri. Dalam berbagai penelitian, simulasi CFD dilakukan untuk mendapatkan informasi mendalam yang tidak dapat diperoleh dari eksperimental. Penggunaan CFD dalam desain turbin juga merupakan salah satu upaya untuk menekan biaya eksperimental dan fabrikasi. CFD tersusun dari algoritma numerik yang berhubungan dengan penyelesaian permasalahan fluida dan transfer panas, seperti kekekalan massa, kekekalan momentum dan kekekalan energi. CFD terdiri dari beberapa element penting, yaitu (i) *pre-processing*, (ii) *solver* dan (iii) *post-processing* [45].

Pre-processing merupakan proses input kedalam program CFD dengan menggunakan *interface* yang menarik (*user friendly*). *Pre-processing* terdiri dari beberapa tahap yaitu, (i) pendefinisian geometri, (ii) pembentukan *grid* (*meshing process*) dan (iii) *setting*. Dalam studi ini, geometri yang digunakan merupakan geomteri 2D yang terdiri dari 2 domain, yaitu *rotating domain* dan *stationary domain*. *Rotating domain* merupakan domain yang berputar dengan kecepatan sudut sesuai dengan kecepatan rotasi turbin. Nilai kecepatan rotasi turbin yang digunakan merupakan hasil dari pengujian turbin di *towing tank*. Sementara itu, *stationary domain* menggambarkan kanal tempat turbin beroperasi (dalam kasus ini adalah *towing tank*).

Rotasi dari turbin merupaka bagian yang sangat penting dalam simulasi CFD ini. Dalam penelitian ini *blade*, ditempatkan dalam *rotating domain* yang berbentuk lingkaran. Untuk membuat *rotating domain*, lingkaran dipotong (*subtract*) dengan turbin, sehingga lingkaran berlubang bagian dalamnya sesuai dengan bentuk turbin. Domain tersebut dikondisikan sebagai *sliding mesh* yang

berputar sesuai dengan kecepatan sudut turbin. *Sliding mesh* cocok digunakan untuk simulasi dengan *moving reference frame* lebih dari satu, misalnya ketika terdapat interaksi antara domain stasioner dan domain rotasi, seperti dalam kasus simulasi turbin. Teknik *sliding mesh* merupakan model *time-dependent*, sehingga teknik ini digunakan untuk simulasi *transient*. Teknik *sliding mesh* memutar *rotating domain* setiap *time-step*, yang akan menggambarkan rotasi turbin sesungguhnya. Pada setiap *time-step*, *mesh* akan dirotasi dan dilakukan perhitungan sampai memperoleh hasil yang konvergen [46].

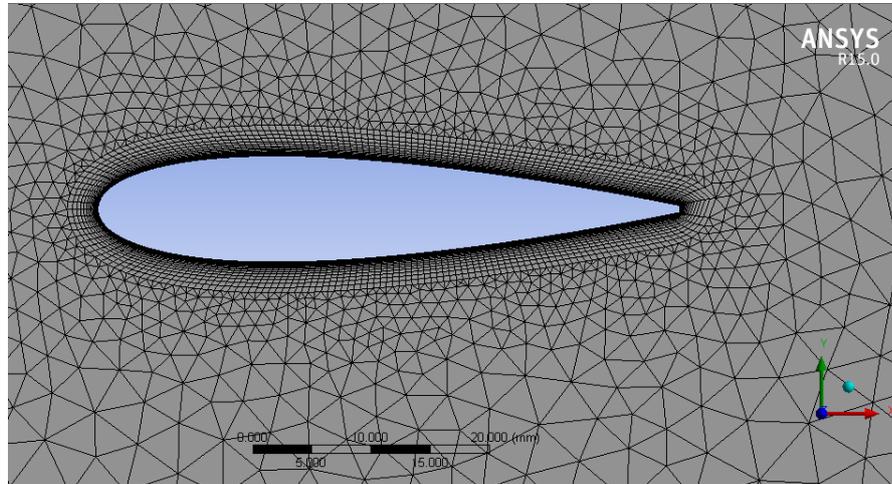


Gambar 3.11 Dimensi dan kondisi domain komputasi

Ukuran domain komputasi harus disesuaikan dengan kondisi lokasi instalasi turbin. Gambar 3.11 menunjukkan dimensi dan kondisi domain komputasi. Domain komputasi berukuran $15D \times 3m$ dengan jarak *upstream* $5D$ dan jarak *downstream* $10D$, dimana D merupakan diameter turbin [29],[47]. Karena lebar *towing tank* untuk pengujian turbin adalah $3m$, maka ukuran lebar domain komputasi juga disesuaikan sebesar $3 m$. Sementara itu diameter *rotating domain* berukuran $1,2 D$.

Tahap selanjutnya setelah pembuatan domain komputasi adalah pembentukan *grid* atau disebut sebagai proses *meshing*. Proses *meshing* merupakan proses membagi domain komputasi menjadi bagian-bagian kecil (*sel/element*) yang merupakan *control volume*. Pada masing-masing *control volume* ini persamaan konservasi massa, konservasi momentum dan konservasi

energi diaplikasikan. Masing-masing *control volume* tidak saling bertumpukan (*overlapping*).



Gambar 3.12 *Meshing* dengan teknik inflasi

Ukuran *mesh* sangat berpengaruh terhadap kecepatan dan kebutuhan komputasi. Semakin kecil ukuran *mesh*, maka akan semakin banyak sel yang terbentuk sehingga dibutuhkan komputasi yang sangat berat. Oleh karena itu, *multi-size meshing* digunakan untuk menyelesaikan masalah tersebut. Masing-masing bagian di-*meshing* dengan ukuran yang berbeda yang disesuaikan dengan kebutuhan. Dalam kasus turbin, *blade* merupakan bagian yang utama dan paling krusial sehingga *blade* di-*meshing* dengan ukuran paling kecil. Untuk memperbaiki kualitas *mesh* pada bagian *blade*, maka digunakan teknik inflasi. Dengan teknik ini, *mesh* disekitar *blade* menjadi lebih rapat dan lebih rapi, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.12. Ukuran *mesh* untuk masing-masing domain serta pengkondisian *mesh* ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Kualitas dari *mesh* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap akurasi dan stabilitas komputasi numerik. Kualitas *mesh* dapat diukur dengan menggunakan tiga parameter utama, yaitu *orthogonal quality*, *aspect ratio* dan *skewness*. Konsep *orthogonal quality* berhubungan dengan seberapa dekat sudut antara sel/elemen yang berdekatan dengan sudut optimal (misalnya 90° untuk elemen segi empat dan 60° untuk elemen segitiga). Nilai *orthogonal quality* berkisar antara 0 sampai 1. Semakin mendekati 1 berarti kualitas *mesh* semakin baik. Untuk nilai *orthogonal quality* antara 0,7-0,95 dikategorikan

dalam kualitas *mesh* yang sangat baik [48]. Sementara itu, *aspect ratio* didefinisikan sebagai perbandingan antara sisi terpanjang dan sisi terpendek. Semakin kecil *aspect ratio* menunjukkan bahwa kualitas *mesh* semakin baik. Namun untuk meningkatkan kualitas *mesh* jenis *triangles*, parameter *skewness* merupakan parameter yang lebih penting untuk dipertimbangkan. *Skewness* didefinisikan sebagai perbedaan antara bentuk suatu sel dan bentuk sel ekuilateral (sel yang ideal). Nilai *skewness* berkisar antara 0 sampai 1, dimana semakin kecil nilai *skewness* maka semakin baik kualitas *mesh*. Nilai *skewness* antara 0-0,25 mengindikasikan bahwa kualitas *mesh* sangat baik [49]. Tabel 3.2 menunjukkan bahwa teknik *meshing* yang digunakan dalam studi ini telah memenuhi syarat untuk dikategorikan sebagai *mesh* dengan kualitas yang baik.

Tabel 3.2. Pengkondisian dalam proses *meshing*

Parameter	Kondisi
<i>Meshing size</i>	<i>Blade</i> : 0,5 mm
	<i>Interface</i> : 5 mm
	<i>Rotating domain</i> : 3 mm
<i>Inflation</i>	<i>First layer thickness</i> : $1,4 \cdot 10^{-2}$ mm
	<i>Maximum Layers</i> : 20
	<i>Growt rate</i> : 1,2
<i>Method</i>	<i>Triangles</i>
<i>Advance size function</i>	<i>Proximity and curvature</i>
<i>Relevance center</i>	<i>Fine</i>
Jumlah <i>element</i>	143.712
<i>Orthogonal quality</i>	0,94
<i>Aspect ratio</i>	6,3
<i>Skewness</i>	0,14

Kondisi batas dan metode perhitungan numerik perlu dikondisikan dan disesuaikan dengan kondisi instalasi turbin. Pengkondisian yang tidak tepat akan menghasilkan solusi yang tidak akurat. Model turbulensi dan kondisi batas yang digunakan dalam studi ini dapat dilihat dalam Tabel 3.3. Dalam studi ini

menggunakan model turbulensi k-omega SST. K-omega SST merupakan salah satu model yang unggul dalam memecahkan kasus aliran dengan *adverse pressure* gradien dan separasi aliran yang tinggi. Model turbulensi ini banyak dipakai untuk simulasi turbin air maupun turbin angin [16], [50]–[54]. Bagian *inlet* dikondisikan sebagai *velocity inlet* karena input yang digunakan dalam simulasi numerik ini adalah kecepatan *freestream*. Sementara itu, bagian *outlet* dikondisikan sebagai *pressure outlet*. Pemilihan kondisi batas ini juga didasarkan pada literatur [47], [55]

Tabel 3.3. Model Turbulensi dan Kondisi Batas

Parameter	Kondisi
Model Turbulensi	k-omega SST
<i>Rotating domain</i>	<i>Mesh motion</i> dengan kecepatan rotasi disesuaikan dengan hasil eksperimental
Kondisi Batas	
<i>Inlet</i>	<i>Velocity inlet</i> <i>Normal to Boundary</i>
<i>Outlet</i>	<i>Pressure outlet</i>
<i>Blade/turbine</i>	<i>Wall</i> <i>Moving wall (Rotational)</i>
<i>Symmetry</i>	<i>Symmetry</i>
Metode Inisialisasi	<i>Hybrid initialization</i>

Setelah tahap *pre-processing* selesai dilakukan, selanjutnya adalah tahap *solver*. Tahap ini merupakan tahap yang membutuhkan komputasi paling berat jika dibandingkan dengan tahap yang lain. Studi ini menggunakan *software* ANSYS Fluent yang bekerja berdasarkan teknik *finite difference*, yaitu metode diskritisasi yang berdasarkan pada persamaan diferensial. Solusi dari simulasi diperoleh dari perhitungan secara iteratif, hingga didapatkan hasil yang konvergen. Perhitungan secara iteratif akan berhenti ketika semua parameter sudah berada dibawah parameter konvergen. Parameter konvergensi dalam studi ini ditentukan sebesar 10^{-3} .

Setelah tahap *solver* dilakukan, maka data dari *solver* dapat diambil untuk dianalisa lebih lanjut. CFD menyediakan berbagai jenis data, diantaranya menampilkan geometri dan *grid*, plot vektor, plot kontur, *partical tracking*, grafik dan lain-lain. Dalam penelitian ini, data utama yang diambil merupakan data kontur dan x-y plot kecepatan serta kontur dan x-y plot intensitas turbulensi. Kedua data tersebut merupakan parameter penting untuk melakukan menganalisa pengaruh karakteristik aliran di sekitar turbin terhadap kinerja turbin.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab IV Analisa Data dan Pembahasan menjelaskan lebih lanjut mengenai hasil eksperimental dan simulasi turbin hidrokinetik tipe *Darrieus Cascade*. Pada bagian awal, dipaparkan analisa performansi dari *stand-alone turbine* yang merupakan turbin referensi. Turbin referensi adalah turbin yang dijadikan acuan dalam mengidentifikasi performansi masing-masing turbin yang disusun dalam konfigurasi *array*. Selanjutnya, analisa performansi dari *array corotating* (Konfigurasi Co), *array counter-rotating masuk* (Konfigurasi *Counter-in*), *array-counter keluar* (Konfigurasi *Counter-out*), *array 3 turbine A* (3T-A) dan *array 3 turbine B* (3T-B). Dilakukan perhitungan efektifitas *farm* untuk mengetahui kemampuan masing-masing konfigurasi dalam mengekstraksi potensi energi.

Hasil simulasi numerik dengan menggunakan *Computational Fluid Dynamic* (CFD) ditampilkan untuk mendukung hasil eksperimental. Data yang diperoleh antara lain adalah profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi. Parameter-parameter yang tidak dapat diperoleh dalam simulasi dapat diperoleh melalui hasil simulasi numerik, sehingga interaksi aliran yang terjadi antar turbin dapat diamati dengan jelas.

4.1 EFEK *BLOCKAGE* TERHADAP DAYA TURBIN

Kecepatan aliran air dalam pengujian turbin di *Towing tank* dapat dikondisikan sehingga sesuai dengan kebutuhan. Namun, beberapa eror masih terjadi, salah satunya disebabkan oleh efek *blockage*. Efek *blockage* mempengaruhi daya keluaran turbin. Secara matematis efek *blockage* dari turbin sumbu vertical (VAT) dirumuskan sebagai [56]:

$$B = \frac{1}{4} \left(\frac{A_{\text{turbine}}}{A_{\text{towing}}} \right) \quad (4.1)$$

Dimana A_{turbine} adalah luas penampang turbin dan A_{towing} adalah luas penampang *Towing Tank*. Berdasarkan literatur, tidak terdapat koreksi hasil keluaran turbin untuk nilai *blockage ratio* kurang dari 5% [57].

Tabel 4.1 Perhitungan *blockage ratio*

No	Konfigurasi	<i>Blockage ratio</i>
1	<i>Stand-alone turbine</i>	0.67%
2	<i>Co-rotating</i>	1.33%
3	<i>Counter rotating</i>	1.33%
4	<i>Array 3 Turbine A</i>	1.33%
5	<i>Array 3 Turbine B</i>	1.33%

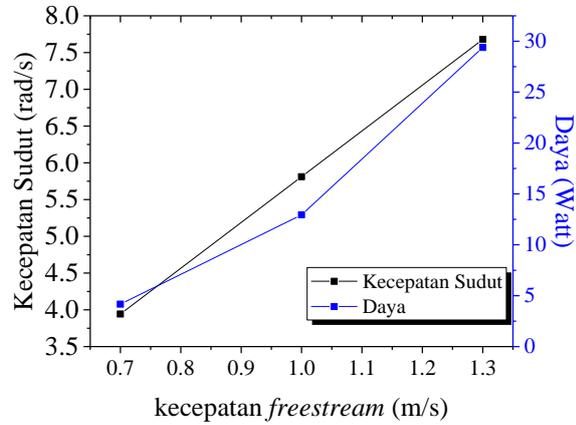
Untuk mengetahui pengaruh *blockage* terhadap daya yang keluaran turbin, maka dilakukan perhitungan *blockage ratio* untuk masing-masing konfigurasi *array* turbin. Hasil perhitungan ini ditabulasi pada tabel 4.1. Dari semua konfigurasi, tidak terdapat konfigurasi yang memiliki nilai *blockage ratio* lebih dari 5%. Nilai *blockage ratio* untuk *stand-alone turbine* adalah 0,67%, dan 1,33% untuk semua konfigurasi *array* turbin yang diuji. Oleh karena itu, dalam penelitian tidak dilakukan koreksi keluaran turbin akibat efek *blockage*.

4.2 STAND-ALONE TURBINE

Pada penelitian ini, *stand-alone turbine* didefinisikan sebagai turbin tunggal, atau dengan kata lain turbin tersebut tidak disusun dalam konfigurasi *array*. *Stand-alone turbine* tersebut diuji untuk variasi tiga buah variasi kecepatan yaitu, 0,7 m/s; 1 m/s dan 1,3 m/s. Hasil analisa pengujian turbin tunggal digunakan untuk menghitung efektifitas *farm* dan C_p relatif dari masing-masing konfigurasi yang akan diteliti. Melalui nilai efektifitas *farm* dan C_p relatif tersebut, dapat diketahui kinerja dari masing-masing turbin dalam *array*.

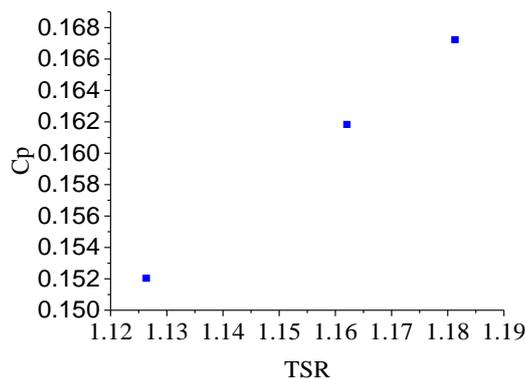
Dari hasil pengujian, diketahui bahwa kecepatan *freestream* yang diberikan kepada turbin berpengaruh besar terhadap peningkatan kecepatan sudut turbin dan daya yang dihasilkan oleh turbin, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1. Energi air yang diterima oleh turbin sebanding dengan pangkat tiga kecepatan *freestream*. Peningkatan kecepatan *freestream* akan memberikan peningkatan signifikan terhadap energi air yang tersedia, sehingga semakin besar energi yang dapat

diekstraksi oleh turbin. Hal ini akan menyebabkan peningkatan kecepatan sudut dan daya yang dihasilkan oleh turbin.



Gambar 4.1 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kecepatan sudut dan daya turbin

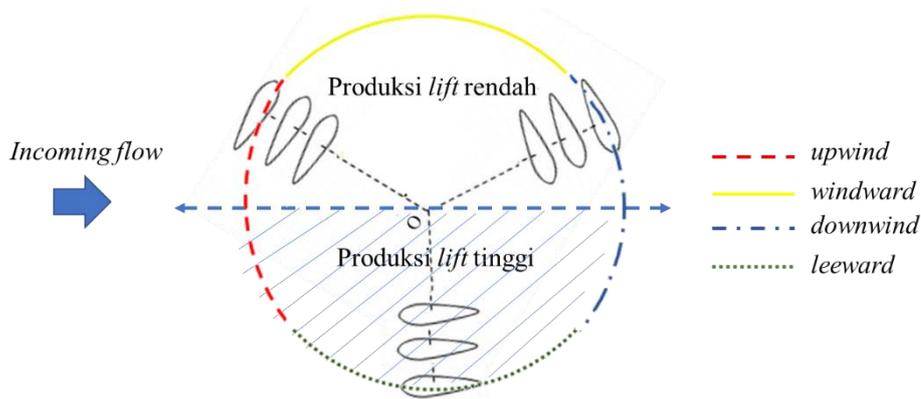
Pada kecepatan 0,7 m/s, *stand-alone* turbin Darrieus *cascade* dapat menghasilkan daya sebesar 4.17 Watt dengan nilai kecepatan sudut sebesar 3.94 rad/s. Pada kecepatan 1 m/s, diperoleh daya sebesar 12,94 Watt dengan kecepatan sudut sebesar 5.81 rad/s. Daya yang dihasilkan tersebut terus meningkat sebanding dengan kecepatan *freestream*. Sehingga, pada kecepatan *freestream* 1,3 m/s, daya yang dihasilkan mencapai 29,39 Watt dengan kecepatan sudut sebesar 7,68 rad/s. Nilai-nilai ini disajikan dalam lampiran 2.



Gambar 4.2 Grafik hubungan TSR terhadap Cp stand-alone turbin

Kinerja turbin dalam mengekstrak energi dapat diketahui dari nilai koefisien daya (C_p). C_p dihitung berdasarkan persamaan 2.7, dimana nilai C_p merupakan

perbandingan dari daya yang mampu dihasilkan oleh turbin dibanding dengan daya yang diterima oleh turbin dari aliran air. Selain itu, kinerja turbin juga dapat dilihat dari nilai TSR (*tip speed ratio*). TSR merupakan perbandingan dari kecepatan tangensial turbin ($v = \omega.R$) dan kecepatan *freestream*.



Gambar 4.3 Pembagian Gambar pada turbin

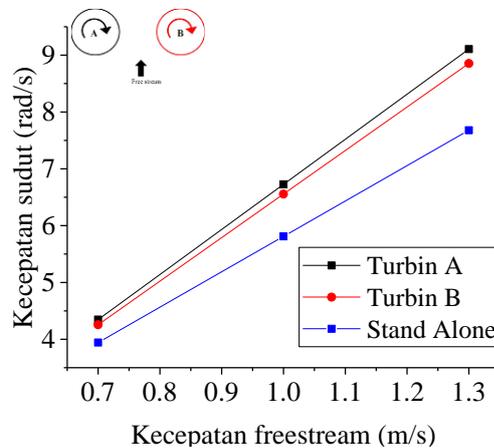
Nilai koefisien daya (C_p) meningkat dengan peningkatan nilai TSR, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Semakin besar nilai TSR maka semakin besar C_p dari turbin tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai TSR maka semakin baik kemampuan turbin dalam mengekstrak energi air. C_p terbesar yaitu 0,17 yang muncul pada TSR 1,18. Sementara itu, nilai C_p terkecil yang diperoleh dalam studi eksperimental ini adalah 0,15 pada TSR 1,12. TSR yang dihasilkan oleh turbin cenderung rendah. Dalam kondisi TSR rendah, *blade* dapat menghasilkan torsi sehingga turbin tetap dapat berputar, namun kecepatan putarannya rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa beberapa blade mengalami *stall*. Pada kondisi *stall*, *blade* menghasilkan gaya *lift* yang rendah dan gaya *drag* yang tinggi sehingga ekstraksi energi tidak optimal.

4.3 KONFIGURASI CO-ROTATING

Seperti telah dijelaskan pada Bab III, konfigurasi *co-rotating* merupakan konfigurasi dimana dua turbin yang terletak dalam satu baris memiliki arah putaran yang sama, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6 (a). Kedua turbin tersebut berputar searah jarum jam (CW). Pada penelitian ini, tiga variasi kecepatan dan tiga variasi

jarak antar turbin (*cross-stream distance*) diujikan, seperti dijelaskan pada sub bab 3.4

Untuk mempermudah dalam lakukan analisa maka turbin akan dibagi menjadi beberapa bagian, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.3, yaitu bagian depan (*upwind*), bagian belakang (*downwind*), bagian kanan (*windward*) dan bagian kiri (*leeward*). Selain itu turbin juga dibagi menjadi dua daerah, yaitu daerah produksi *lift* tinggi dan daerah produksi *lift* rendah. Pada daerah produksi *lift* tinggi, *blade* turbin menghasilkan gaya *lift* besar. Sedangkan pada daerah produksi *lift* rendah, *blade* menghasilkan gaya *lift* kecil.

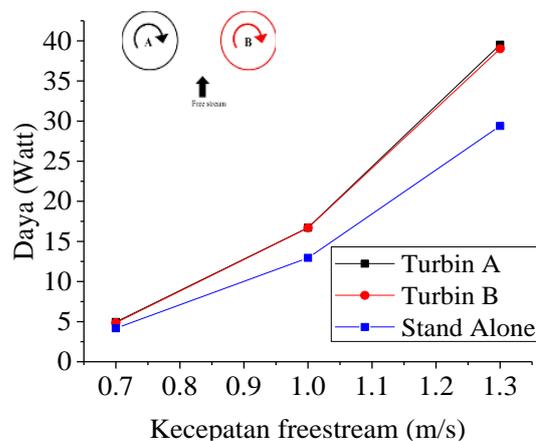


Gambar 4.4 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi *Co-rotating*

4.3.1 Efek Kecepatan *Freestream* Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Co-Rotating*

Seperti pada turbin *stand alone*, peningkatan kecepatan *freestream* memberikan pengaruh positif terhadap kecepatan sudut dan daya turbin, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 dan 4.5. Untuk kecepatan *freestream* yang besar, maka potensi energi yang dapat di ekstraksi oleh turbin akan semakin besar. Sehingga, semakin besar kecepatan *freestream* yang diberikan, maka semakin besar torsi dan daya yang mampu dihasilkan oleh turbin.

Gambar 4.6 menunjukkan grafik hubungan TSR dan Cp yang dihasilkan oleh masing-masing turbin yang disusun dengan konfigurasi *Co-rotating*. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa Cp meningkat bersamaan dengan peningkatan TSR. Dari hasil eksperimental dapat diketahui bahwa untuk turbin A dengan nilai TSR sebesar 1,4 memiliki nilai Cp sebesar 0.225. Sementara itu, untuk turbin B dengan nilai TSR sebesar 1,36 memiliki nilai Cp sebesar 0,222. Data nilai Cp dan TSR untuk turbin *co-rotating* secara lengkap dapat dilihat pada lampiran 3.

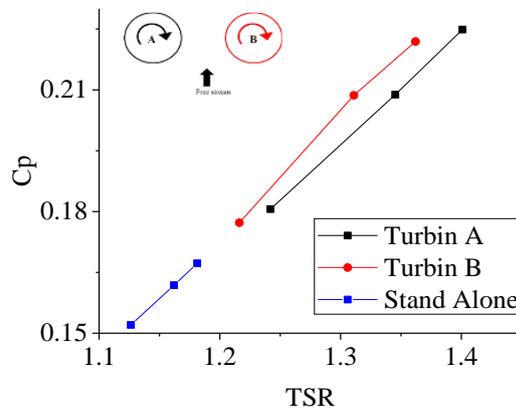


Gambar 4.5 Pengaruh kecepatan *freesteram* terhadap daya turbin pada konfigurasi *Co-rotating* untuk $Y=1,5D$

Gambar 4.4 – 4.6 menunjukkan bahwa masing-masing turbin dalam konfigurasi *co-rotating* memiliki kinerja lebih baik dari *stand-alone* turbin. Turbin A dan turbin B mampu menghasilkan kecepatan sudut, daya, Cp dan TSR yang lebih besar. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi aliran yang terjadi antara turbin A dan B memberikan pengaruh positif terhadap kinerja masing-masing turbin.

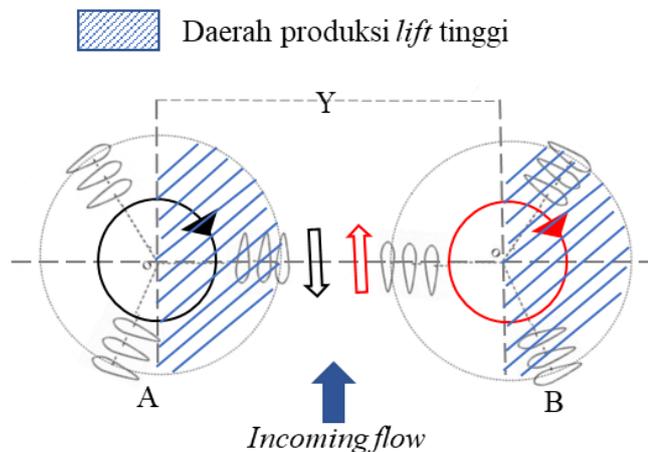
Interaksi aliran pada konfigurasi *Co-Rotating* diilustrasikan pada Gambar 4.7. Pada gambar tersebut terlihat bahwa aliran induksi (*induced flow*) akibat pergerakan *blade* turbin A berlawanan dengan *freestream*. Berbeda dengan turbin A, aliran induksi akibat pergerakan *blade* turbin B searah dengan *freestream*. Muncul interaksi pada daerah pertemuan ketiga komponen aliran tersebut. Superposisi kecepatan tersebut menyebabkan

percepatan pada daerah interaksi aliran. Selain itu, interaksi aliran antar kedua turbin ini menyebabkan peningkatan turbulensi di sekitar turbin.



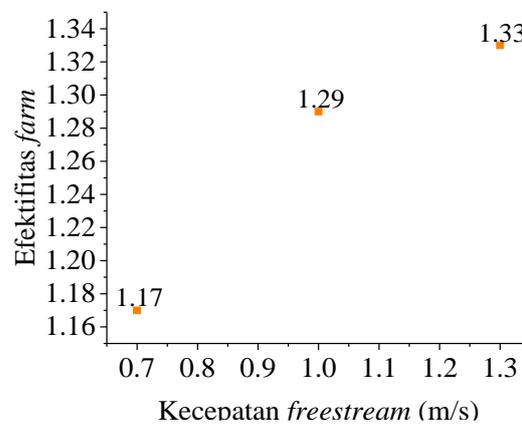
Gambar 4.6 Grafik hubungan Cp dan TSR pada konfigurasi *Co-Rotating* untuk $Y=1,5D$

Walaupun turbin A dan B dalam konfigurasi *co-rotating* berada dalam satu baris (*side by side configuration*) dan mendapatkan kecepatan *freestream* yang sama, namun terdapat sedikit perbedaan kinerja pada kedua turbin tersebut, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4 – 4.6. Kecepatan sudut, daya, Cp dan TSR turbin A sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbin B. Besarnya gaya *lift* yang dihasilkan oleh masing-masing *blade* berbeda [22]. Pada turbin A, daerah produksi *lift* tinggi berada dekat dengan daerah interaksi aliran, sehingga peningkatan kecepatan memberikan efek yang lebih signifikan ke turbin A daripada turbin B.



Gambar 4.7 Interaksi aliran pada konfigurasi *Co-Rotating*

Kinerja dari konfigurasi *array* dapat ditentukan dari efektifitas *farm*, yang merupakan menunjukkan daya total yang dihasilkan oleh konfigurasi *array* dibanding daya yang dihasilkan oleh N kali *stand-alone* turbin untuk kecepatan *freestream* yang sama. Dimana N merupakan jumlah turbin dalam *array*. Secara matematis, efektifitas *farm* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10)-(2.12). Nilai efektifitas *farm* lebih dari 1 berarti total daya yang dihasilkan oleh konfigurasi *array* lebih besar dari N kali daya yang dihasilkan oleh *stand-alone*. Dengan kata lain, konfigurasi *array* tersebut mampu meningkatkan kinerja dari masing-masing turbin.

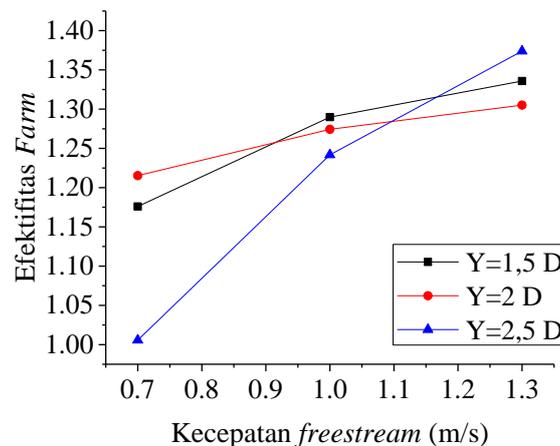


Gambar 4.8 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi *Co-rotating* untuk $Y=1,5D$

Gambar 4.8 menunjukkan hubungan kecepatan *freestream* terhadap efektifitas *farm*. Kecepatan *freestream* yang tinggi menyebabkan peningkatan efektifitas *farm*. Hal ini terjadi karena peningkatan kecepatan *freestream* menyebabkan intensitas interaksi aliran antara turbin A dan B semakin besar, sehingga efeknya lebih terasa. Untuk variasi kecepatan terbesar yaitu 1,3 m/s, diperoleh nilai 1,33. Sementara itu untuk kecepatan *freestream* sebesar 0,7 m/s diperoleh efektifitas *farm* sebesar 1,17. Nilai ini diperoleh untuk jarak antar turbin sebesar 1,5D. Pada jarak 1,5D, interaksi aliran sudah terjadi untuk semua variasi kecepatan.

4.3.2 Efek Jarak Antar Turbin (*Cross-Stream Distance*) Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Co-Rotating*

Pengaruh jarak antar turbin (*cross-stream distance*) terhadap kinerja *array* ditunjukkan oleh Gambar 4.9. Terdapat tiga variasi *cross stream distance* yang diuji untuk konfigurasi *Co-Rotating*, yaitu $Y=2,5 D$; $Y=2 D$ dan $Y=1,5 D$.

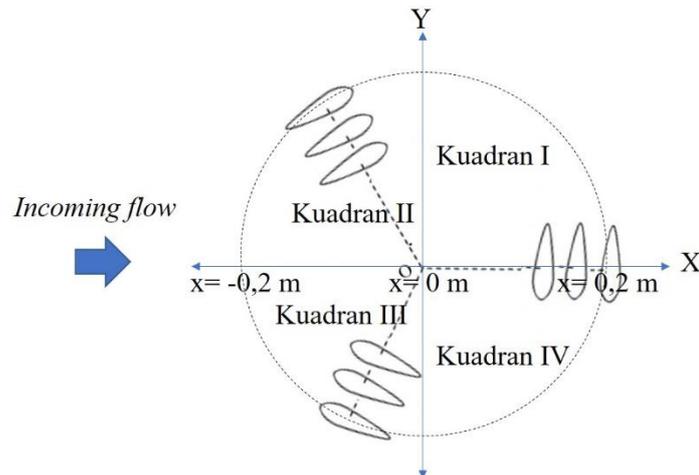


Gambar 4.9 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi *Co-Rotating*

Pada jarak $2.5D$ dan kecepatan aliran $0,7 \text{ m/s}$ belum terjadi interaksi aliran. Sehingga pada kondisi tersebut nilai efektifitas *farm* cenderung kecil. Pada jarak $1.5 D$, interaksi aliran memiliki pengaruh yang cukup besar, terutama pada saat kecepatan 1 m/s dan $1,3 \text{ m/s}$. Pada kondisi kecepatan tersebut, TSR turbin lebih besar jika dibandingkan dengan pada kecepatan $0,7 \text{ m/s}$. Semakin besar nilai TSR berarti semakin sering frekuensi *blade* melewati suatu lokasi, sehingga semakin banyak struktur vorteks yang terbentuk di lokasi tersebut [29]. Hal ini menyebabkan semakin banyak vorteks turbin A dan B yang saling berinteraksi sehingga pengaruh interaksi aliran tersebut semakin besar pada jarak *crossstream* yang dekat dan pada kecepatan *freestream* yang tinggi.

Jarak antar turbin yang semakin dekat menyebabkan percepatan aliran di daerah antar turbin. Sehingga pada daerah tersebut kecepatan antar turbin

cenderung lebih cepat daripada pada kecepatan *freestream*. Selain itu, kecepatan pada daerah tersebut cenderung searah dengan kecepatan *freestream*. Sedangkan pada *stand-alone* turbin, aliran cenderung mengalami penyimpang, sehingga arahnya cenderung tidak beraturan [54].



Gambar 4.10 Pembagian kuadran

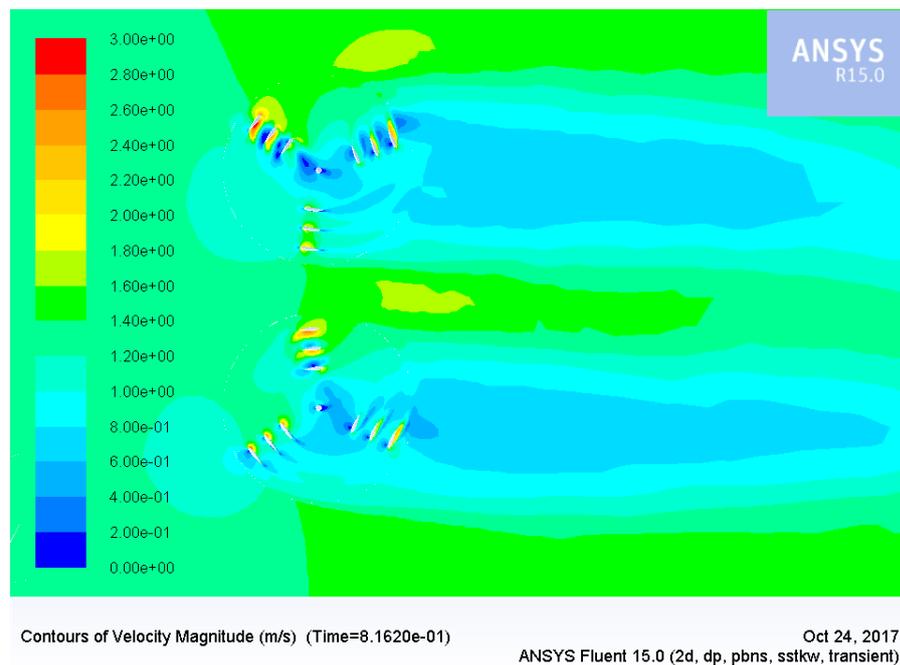
4.3.3 Simulasi Numerik untuk Konfigurasi *Co-rotating*

Simulasi numerik dilakukan untuk memperoleh data tambahan yang tidak dapat diperoleh ketika melakukan eksperimental. Tujuan utama dari simulasi numerik ini adalah untuk mengetahui kontur kecepatan aliran dan kontur intensitas turbulensi di sekitar turbin. Pada penelitian ini, simulasi numerik dilakukan pada konfigurasi *co-rotating* untuk kecepatan aliran sebesar 1,3 m/s dan *cross-stream distance* sebesar 1,5 D, dimana D merupakan diameter turbin.

Untuk mempermudah dalam melakukan analisa, maka pengambilan data dilakukan pada tiga garis, yaitu $x = -0,2$ m (bagian depan turbin dilihat dari arah datangnya), $x = 0$ m (bagian tengah turbin) dan $x = 0,2$ m (bagian belakang turbin). Selain itu, masing-masing turbin akan dibagi menjadi 4 kuadran, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10.

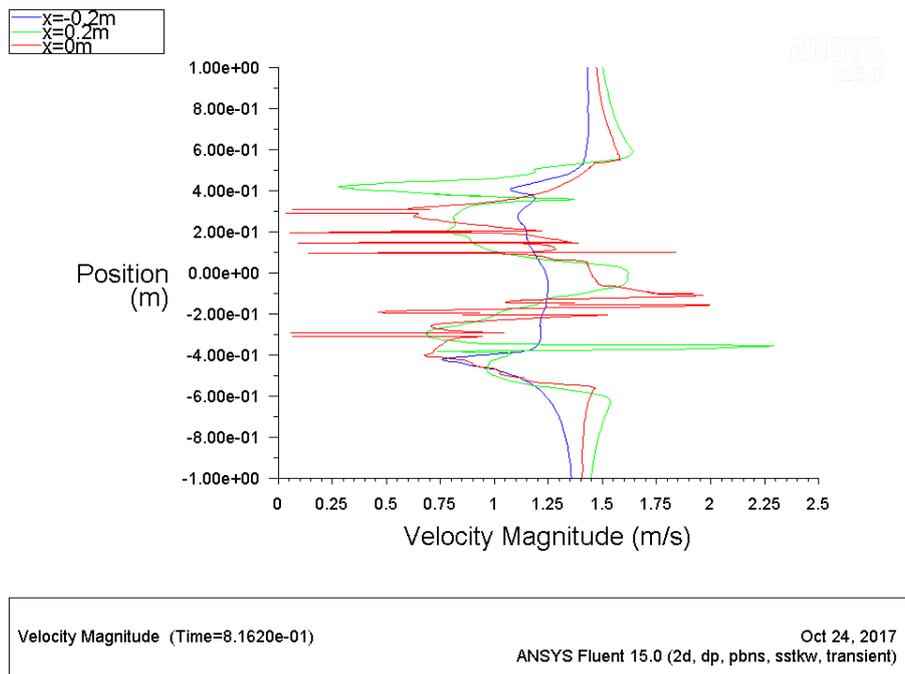
Hasil eksperimental menunjukkan bahwa pemasangan turbin dalam konfigurasi *co-rotating* dapat meningkatkan kinerja dari masing-masing turbin. Salah satu penyebabnya adalah adanya percepatan aliran pada daerah

interaksi aliran, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11. Dari Gambar tersebut, dapat diketahui bahwa kecepatan pada daerah interaksi aliran mencapai 1,6 m/s. Terjadinya percepatan aliran pada daerah interaksi ini bisa disebut sebagai efek kanal. Pada daerah interaksi, aliran seolah-olah melewati celah yang menyempit sehingga kecepatan aliran akan semakin besar. Hal ini sesuai dengan prinsip Bernouli. Pada beberapa referensi, efek kanal juga dikenal sebagai *jet-type flowfield* [56].



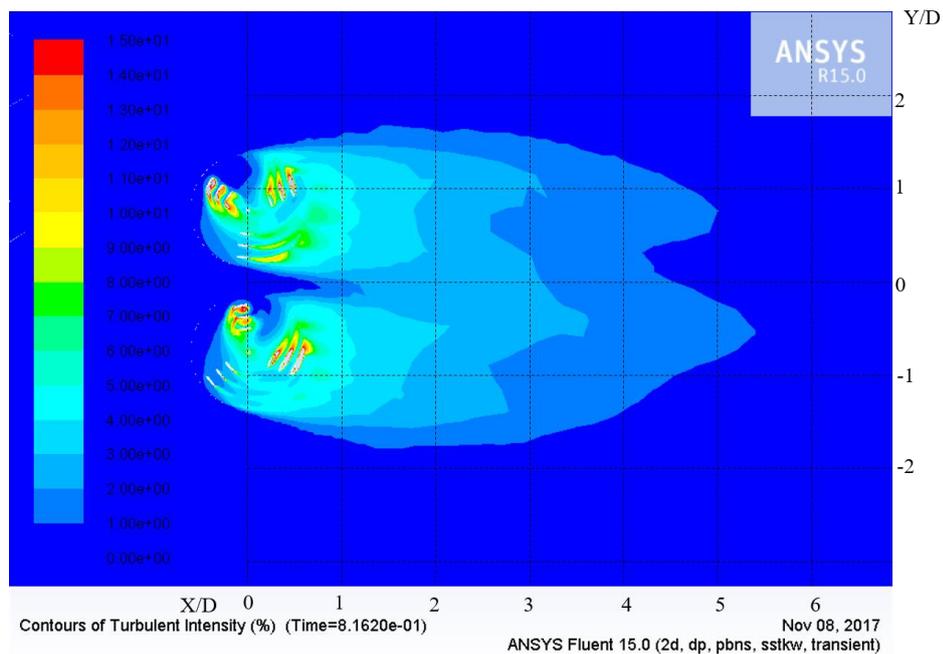
Gambar 4.11 Kontur kecepatan pada konfigurasi *co-rotating*

Hasil simulasi numerik membuktikan bahwa superposisi aliran induksi dan aliran *free-stream* (seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7) mengakibatkan percepatan aliran pada daerah interaksi. Untuk kecepatan 1.3 m/s, peningkatan kecepatan aliran ini mencapai kecepatan 1,4 m/s sampai 1,6 m/s. Percepatan aliran fluida pada daerah interaksi aliran dapat meningkatkan performansi dari turbin. Fenomena ini yang menyebabkan peningkatan performansi pada konfigurasi *co-rotating* jika dibandingkan dengan *stand-alone turbine*, seperti dijelaskan pada subbab 4.3.1.



Gambar 4.12 Fluktuasi kecepatan pada konfigurasi *co-rotating*

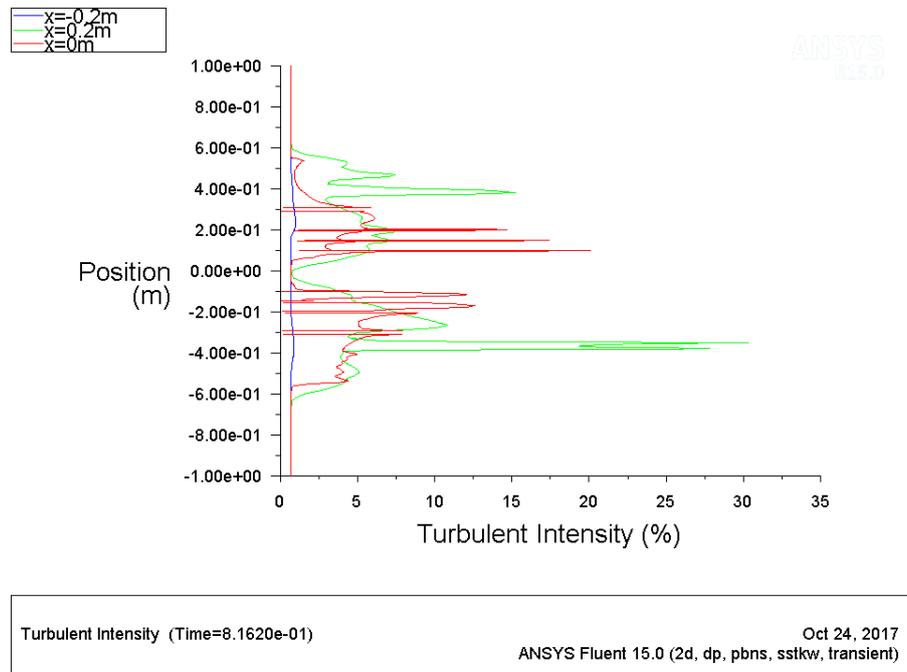
Pengambilan data fluktuasi kecepatan ini dilakukan untuk posisi *blade* turbin seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10. Fluktuasi kecepatan untuk masing-masing titik tersebut digambarkan pada Gambar 4.12. Berdasarkan Gambar tersebut, dapat disimpulkan bahwa terdapat perbedaan fluktuasi kecepatan pada masing-masing garis pengambilan data. Fluktuasi kecepatan terbesar terjadi pada $x=0$ m, yaitu bagian tengah turbin. Untuk $x=0$ m, kecepatan aliran terbesar adalah sebesar 2,05 m/s dan kecepatan terkecil mencapai 0,05 m/s. Gambar 4.12 memberikan informasi bahwa kecepatan aliran berubah secara spasial, terutama pada daerah turbin. Fluktuasi kecepatan ini muncul akibat proses ekstraksi energi pada turbin yang menyebabkan munculnya banyak struktur vorteks pada daerah antara $x=-0,2$ m dan $x=0,2$ m. Sedangkan pada daerah *downstream* turbin, fluktuasi kecepatan tidak terlalu besar, dimana fluktuasi kecepatan pada daerah *downstream* turbin terjadi sebagai akibat dari *wake*. Daerah *near wake* mulai terkonservasi setelah jarak 3D.



Gambar 4.13 Kontur intensitas turbulensi pada konfigurasi *co-rotating*

Parameter lain yang dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik aliran disekitar turbin adalah intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi merupakan perbandingan antara vektor fluktuasi kecepatan dengan rata-rata kecepatan (*mean velocity*). Intensitas turbulensi menggambarkan perubahan kecepatan secara temporal atau perubahan kecepatan terhadap waktu pada suatu titik tertentu. Gambar 4.13 menunjukkan kontur intensitas turbulensi disekitar turbin. Intensitas turbulensi terbesar terjadi pada bagian *trailing edge blade* dan terutama terjadi pada kuadran I dan II. Pada kuadran I dan II *angle of attack* terlalu besar sehingga menyebabkan munculnya separasi aliran dan terbentuknya banyak struktur *vortex* di belakang *blade* (pada daerah *trailing edge*). Hal ini menyebabkan peningkatan intensitas turbulensi pada daerah tersebut. Pada kuadran I dan II ini, intensitas turbulensi di beberapa *blade* bahkan melebihi 15%. Terdapat perbedaan nilai intensitas turbulensi pada daerah *leeward* dan *windward*. Daerah *windward* (daerah produksi *lift* tinggi) cenderung memiliki intensitas turbulensi yang cukup besar. Ekstraksi energi oleh turbin juga menyebabkan peningkatan level turbulensi pada daerah *wake*, namun memiliki nilai yang lebih kecil jika dibandingkan dengan intensitas turbulensi di dalam turbin. Turbulensi pada daerah *wake* turbine ini akan

terdispersi setelah jarak 5,5 D. Berdasarkan hasil simulasi ini dapat disimpulkan bahwa, daerah *wake* turbin cenderung memiliki karakteristik aliran yang buruk, yaitu kecepatan yang rendah dan intensitas turbulensi yang tinggi.



Gambar 4.14 Plot intensitas turbulensi pada konfigurasi *co-rotating*

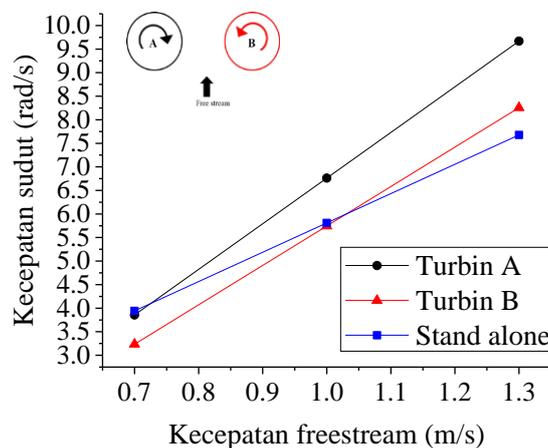
Gambar 4.14 menunjukkan plot intensitas turbulensi pada konfigurasi *co-rotating*. Grafik tersebut memberikan gambaran bahwa intensitas turbulensi di dalam turbin berfluktuasi secara spasial. Dari Gambar tersebut terlihat bahwa intensitas turbulensi pada $x=-0,2$ m jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan intensitas turbulensi pada $x=0\text{m}$ dan $x=0,2$ m. Sementara itu fluktuasi intensitas turbulensi terbesar cenderung terjadi pada $x=0.2$ m. Untuk $x=0.2$ m, nilai intensitas turbulensi bahkan mencapai 30%, yaitu pada $y =0,4$ m. Nilai tersebut merupakan nilai intensitas turbulensi pada bagian sekitar *trailing edge downstream blade*. Aliran pada daerah *downstream blade* sudah terganggu dan banyak terbentuk vortex akibat ekstraksi energi dari *upstream blade*, sehingga aliran disekitar *downstream blade* cenderung memiliki intensitas turbulensi yang lebih besar.

4.4 KONFIGURASI *COUNTER-ROTATING* KELUAR

Pada konfigurasi *Counter-Rotating* keluar, dua turbin diletakkan dalam satu baris sehingga mendapatkan kecepatan *freestream* yang sama. Namun kedua turbin tersebut memiliki arah putaran yang berbeda, turbin A memiliki arah putaran *Clockwise* (CW) sementara itu turbin B memiliki arah putaran *Counter-Clockwise* (CCW). Konfigurasi *counter-rotating* keluar diuji dengan tiga variasi kecepatan, yaitu 0,7; 1; 1,3 m/s dan dengan tiga variasi jarak antar turbin, yaitu 1,5D; 2D;2,5D

4.4.1 Efek Kecepatan *Freestream* Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Counter-Rotating* Keluar

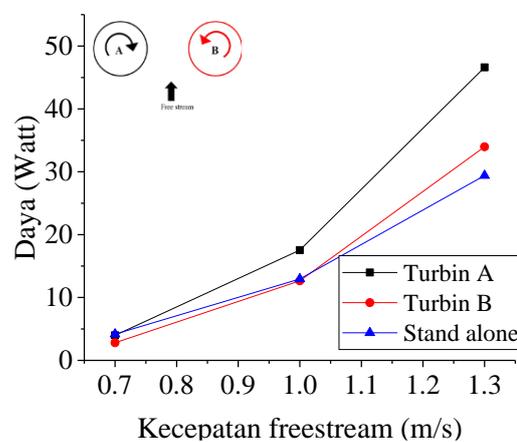
Dari Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 terlihat bahwa peningkatan kecepatan *freestream* berakibat pada peningkatan kecepatan sudut dan daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Semakin besar kecepatan *freestream* maka semakin besar potensi energi air yang dapat diekstrak oleh turbin, sehingga rpm dan daya turbin menjadi lebih besar.



Gambar 4.15 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi *Counter-rotating* keluar untuk $Y=1.5 D$

Dari kedua gambar tersebut juga terlihat bahwa masing-masing turbin yang berada dalam konfigurasi *counter-rotating* keluar memiliki kinerja yang berbeda. Turbin A memiliki performansi yang cenderung lebih baik daripada

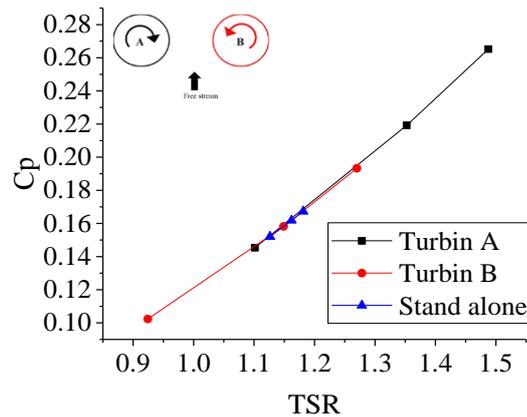
turbin B dan turbin *stand-alone*. Sementara itu, performansi turbin B cenderung lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin A dan *stand-alone* untuk kecepatan *freestream* 0,7 m/s sampai 1 m/s. Pada kecepatan 0,7 m/s dan $Y=1,5D$ kinerja kedua turbin lebih rendah jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin. Pada eksperimen ini, pengaruh interaksi terbesar terjadi pada saat kecepatan 1,3 m/s dan jarak antar turbin 1,5 D. Pada kondisi ini, *counter rotating* keluar mampu menghasilkan daya sebesar 78.52 Watt. Data daya *output* turbin untuk konfigurasi *counter-rotating* keluar secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4.



Gambar 4.16 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap daya turbin pada konfigurasi *Counter-rotating* keluar untuk $Y=1,5D$

Kinerja turbin dapat dilihat dari grafik hubungan C_p dan TSR, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17. Dari grafik tersebut terlihat bahwa C_p untuk turbin B lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin A dan *stand-alone*, terutama untuk nilai TSR yang rendah. Dari hasil eksperimental, kinerja tertinggi tercapai pada kondisi kecepatan 1,3 m/s dan $Y=1,5 D$. Pada kondisi ini turbin A memiliki TSR sebesar 1,49 dan C_p sebesar 0,26 dan turbin B memiliki TSR sebesar 1,27 dan C_p sebesar 0,19. Sementara itu, pada kecepatan *freestream* 1,3 m/s, *stand-alone* turbin dapat menghasilkan C_p sebesar 0,17 untuk TSR sebesar 1,18. Data kinerja turbin pada konfigurasi *counter-rotating* keluar dapat dilihat pada lampiran Lampiran 4.

Interaksi aliran yang terjadi pada daerah diantara dua turbin ini memberikan sedikit peningkatan pada kinerja turbin A, namun justru memberikan pengaruh buruk terhadap kinerja turbin B, terutama untuk nilai TSR rendah.

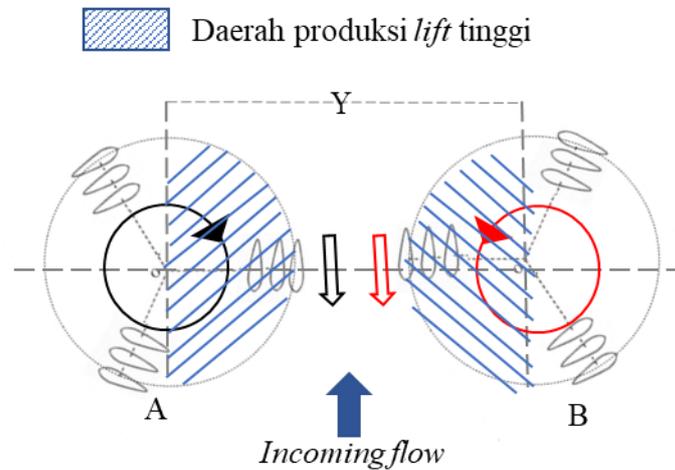


Gambar 4.17 Grafik hubungan Cp dan TSR untuk konfigurasi *Counter-Rotating Keluar*

Gambar 4.18 memberikan gambaran mengenai interaksi aliran yang terjadi pada konfigurasi *counte-rotating* keluar. Aliran induksi yang diakibatkan oleh turbin A dan B berlawanan arah dengan aliran *freestream*. Superposisi yang terjadi antara aliran induksi dan aliran *freestream* menyebabkan interksi aliran pada daerah tersebut. Namun karena arah aliran induksi berlawanan dengan *freestream* maka superposisi ketiga komponen aliran tersebut menghasilkan kecepatan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan superposisi aliran pada konfigurasi *co-rotating*. Daerah produksi *lift* tinggi untuk kedua turbin terletak dekat dengan daerah interaksi aliran. Namun karena kecepatan aliran pada daerah interaksi aliran bernilai rendah, sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap performansi turbin.

Nilai *efektifitas farm* digunakan sebagai indikator kinerja konfigurasi *array* turbin. Sama dengan konfigurasi *co-rotating*, *efektifitas farm* pada konfigurasi *counter-rotating* keluar meningkat dengan meningkatnya kecepatan *freestream* yang diterima. Penyebab dari fenomena ini adalah adanya interaksi aliran antara turbin A dan B yang memperbaiki kinerja

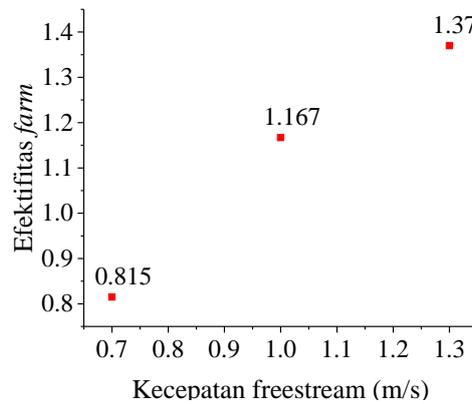
turbin. Namun interaksi ini hanya memberikan sedikit peningkatan efektifitas *farm*.



Gambar 4.18 Interaksi aliran pada konfigurasi *Counter-Rotating* Keluar

Pada kecepatan 0,7 m/s, nilai efektifitas *farm* hanya sebesar 0,815. Pada kecepatan *freestream* kecil dan TSR turbin kecil, efek konstruktif interaksi aliran belum terjadi, sehingga pada kondisi tersebut nilai efektifitas *farm* rendah (<1). Dapat diartikan bahwa pada kondisi ini, daya total yang dihasilkan oleh turbin A dan B lebih kecil dari daya yang dihasilkan oleh dua *stand-alone* turbin. Seperti ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan 4.16, kecepatan sudut dan daya turbin A dan B kurang dari *stand-alone* turbin. Sementara itu, pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa pada TSR terendah, C_p masing-masing turbin A dan B juga lebih rendah dari *stand-alone* turbin.

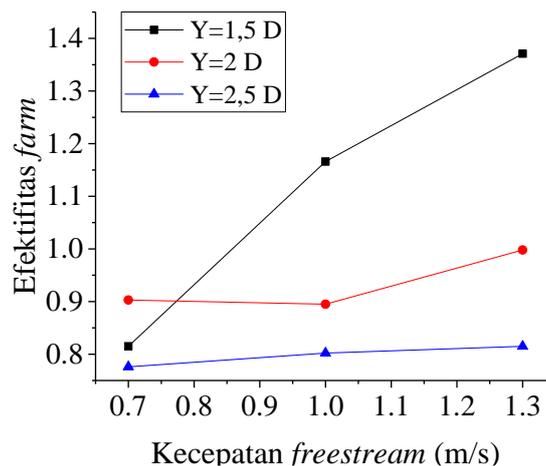
Namun dengan peningkatan kecepatan *freestream* dan peningkatan nilai TSR, efek buruk turbulensi ini dapat dikurangi. Interaksi aliran menunjukkan pengaruh cukup signifikan ketika konfigurasi *counter-rotating* keluar memperoleh kecepatan 1 m/s dan 1,3 m/, dimana terjadi peningkatan efektifitas *farm* hingga lebih dari 1. Pada kecepatan 1 m/s nilai efektifitas *farm* sebesar 1,167 dan mencapai 1,37 pada kecepatan 1,3 m/s. Nilai ini diperoleh pada jarak *crosstream* 1,5D. Dimana D merupakan diameter turbin.



Gambar 4.19 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi *Counter-Rotating* keluar untuk $Y=1,5D$

4.4.2 Efek Jarak Antar Turbin (*Cross Stream Distance*) Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Counter Rotating* Keluar

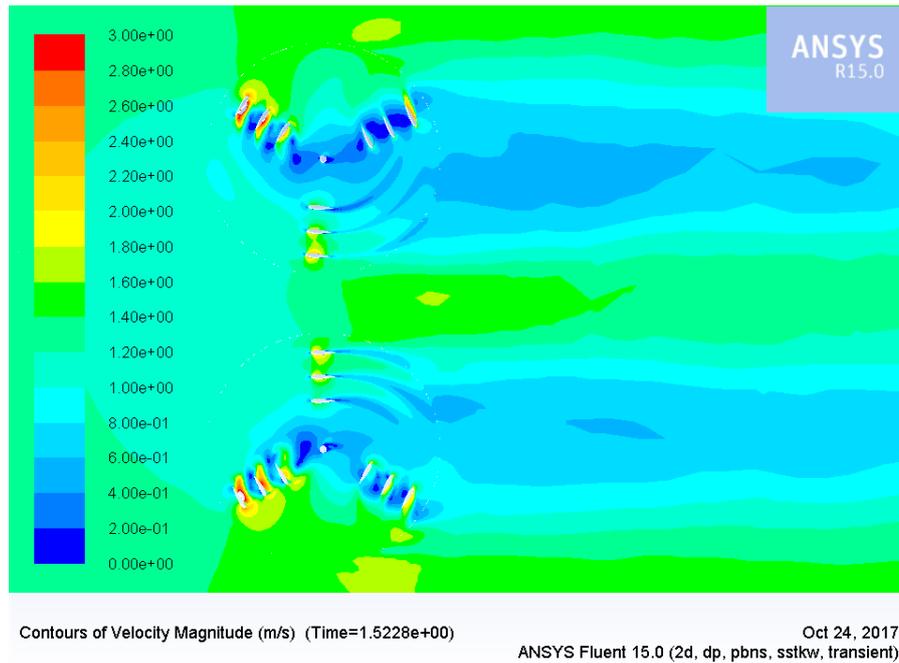
Gambar 4.20 menunjukkan pengaruh jarak antar turbin (*cross stream distance*) pada konfigurasi *counter-rotating* keluar. Seperti pada konfigurasi sebelumnya, tiga variasi *cross stream distance* diujikan pada konfigurasi *counter-rotating* keluar, yaitu $Y=2,5 D$; $Y=2 D$ dan $Y=1,5 D$.



Gambar 4.20 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi *Counter-Rotating* Keluar

Untuk semua variasi *cross stream distance*, pada kecepatan *free stream* 0,7 m/s, adanya interaksi aliran menyebabkan penurunan kinerja konfigurasi

array counter-rotating keluar, sehingga pada kecepatan tersebut nilai efektifitas *farm* kurang dari 1. Nilai TSR turbin yang rendah, menyebabkan turbulensi disekitar *blade* rendah dan memberikan efek buruk pada kinerja turbin. Kecepatan *freestream* yang rendah ini juga mengurangi probabilitas terjadinya interaksi aliran, ditambah lagi jarak antar turbin yang semakin jauh sehingga probabilitasnya semakin menurun.



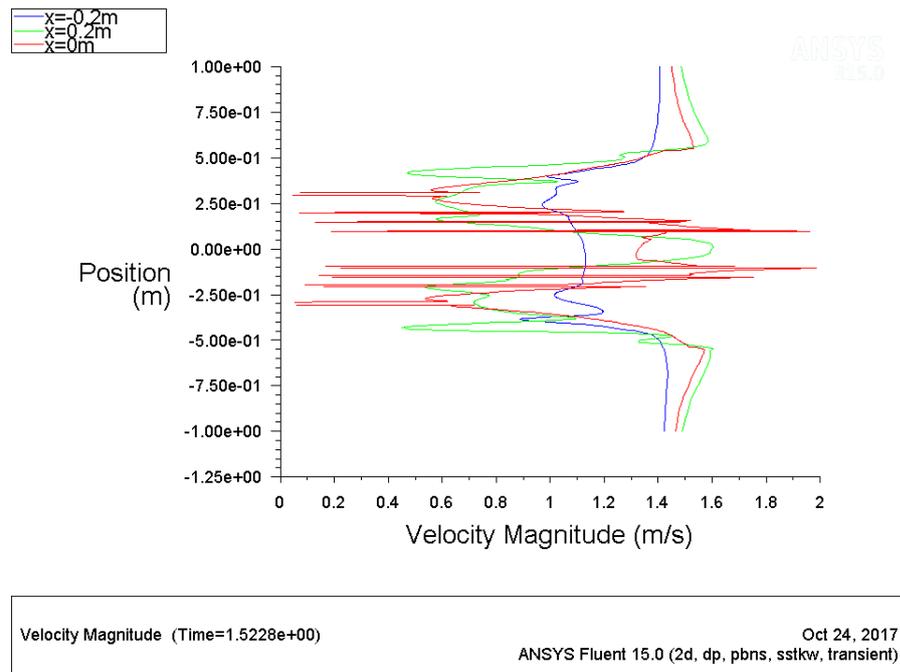
Gambar 4.21 Kontur kecepatan pada konfigurasi *counter-rotating* keluar

Dengan jarak D yang lebih dekat dan kecepatan *freestream* yang lebih besar, efek konstruktif dari interaksi aliran mulai muncul. Untuk *cross stream distance* $2D$ dan $2,5D$, interaksi aliran antar turbin cenderung memberikan efek destruktif, dimana pada jarak tersebut nilai efektifitas *farm* kurang dari 1. Sementara itu, efek konstruktif interaksi aliran terlihat untuk *cross stream distance* $1,5D$ dan kecepatan *freestream* 1 m/s dan $1,3 \text{ m/s}$. Pada kondisi ini TSR masing-masing turbin lebih besar, sehingga probabilitas terjadinya interaksi aliran meningkat. Berdasarkan eksperimental yang telah dilakukan, kinerja konfigurasi *array counter-rotating* keluar yang terbaik dicapai ketika *cross stream distance* dekat dan kecepatan *freestream* besar, dalam kasus ini adalah untuk jarak $Y=1,5D$ dan kecepatan *freestream* sebesar $1,3 \text{ m/s}$. Pada kondisi tersebut nilai efektifitas *farm* mencapai $1,37$. Untuk data efektifitas

farm secara lengkap dapat dilihat pada Lampiran 4. Seperti pada kasus konfigurasi *co-rotating*, semakin dekat *cross stream distance* menyebabkan aliran pada daerah interaksi dipercepat, sehingga dapat meningkatkan kecepatan turbin.

4.4.3 Simulasi Numerik untuk Konfigurasi *Counter-rotating* Keluar

Simulasi numerik dilakukan untuk pada *counter-rotating* keluar untuk mendapatkan informasi lebih lanjut mengenai karakteristik aliran di sekitar turbin dan dibelakang turbin. Gambar 4.21 menunjukkan kontur kecepatan aliran disekitar turbin. Simulasi ini dilakukan untuk konfigurasi *counter-rotating* keluar pada kecepatan *freestream* 1,3 m/s dan *cross-stream distance* 1,5 D, dimana D merupakan jari-jari turbin. Posisi masing-masing *blade* ditunjukkan dengan lingkaran merah, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20.



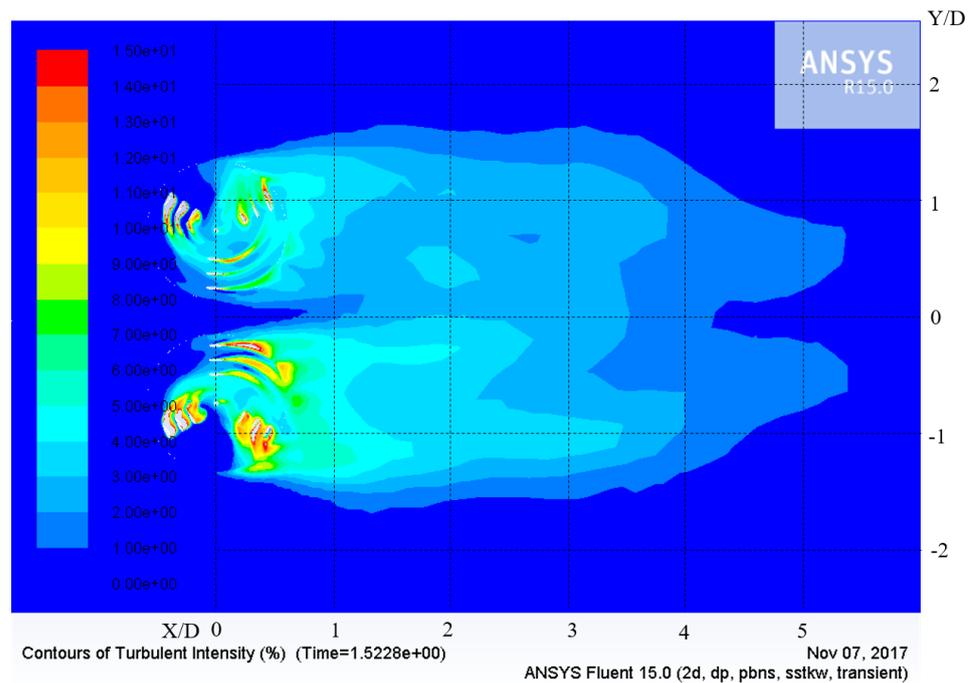
Gambar 4.22 Fluktuasi kecepatan pada konfigurasi *counter-rotating* keluar

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa muncul efek kanal yang menyebabkan percepatan aliran pada daerah interaksi aliran, seperti yang terjadi pada konfigurasi *co-rotating*. Pada daerah interaksi ini kecepatan aliran antara 1,2-1,4 m/s. Percepatan aliran pada daerah interaksi aliran tidak signifikan. Peningkatan kecepatan aliran pada daerah interaksi aliran ini menyebabkan

peningkatan performansi dari masing-masing turbin. Sementara itu, aliran di dalam turbin lebih cenderung rendah pada daerah produksi *lift* tinggi jika dibandingkan dengan daerah produksi *lift* rendah. Penurunan kecepatan yang signifikan ini menunjukkan bahwa ekstraksi energi pada bagian ini maksimal.

Fluktuasi kecepatan secara spasial yang terjadi pada konfigurasi *counter-rotating* keluar, ditunjukkan oleh Gambar 4.22. Dari Gambar tersebut dapat diketahui bahwa fluktuasi kecepatan aliran terbesar terjadi pada $x=0$ m. Besarnya kecepatan maksimal adalah mendekati 2 m/s dan kecepatan terendah mencapai 0,1 m/s. Sementara itu, fluktuasi kecepatan pada $x=-0,2$ m jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan $x=0,2$ m. Kecepatan pada $x=-0,2$ m hanya berkisar antara 0,9 m/s sampai 1 m/s.

Gambar 4.23 menunjukkan kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi *counter-rotating* keluar pada kecepatan *freestream* 1,3 m/s dan *cross-stream distance* 1,5D. Dari gambar tersebut dapat terlihat bahwa turbin A (sisi atas) memiliki nilai intensitas turbulensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin B (sisi bawah). Pada turbin B, intensitas turbulensi lebih dari 15% dan terjadi terutama pada kuadran III dan IV. Hal ini terjadi karena pada kuadran tersebut, *blade* memiliki *angle of attack* yang besar. Hal ini berimbas pada terjadinya separasi aliran dan munculnya banyak struktur vorteks di sekitar *trailing edge*. Vorteks tersebut bertanggung jawab atas besarnya nilai turbulensi aliran di sekitar *trailing edge*. Besarnya nilai intensitas turbulensi yang pada turbin B menyebabkan performansi turbin B lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin A. Hasil eksperimental terhadap konfigurasi *counter-rotating* keluar ternyata menunjukkan hal yang serupa, dimana nilai C_p dan TSR turbin B lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin A, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17.

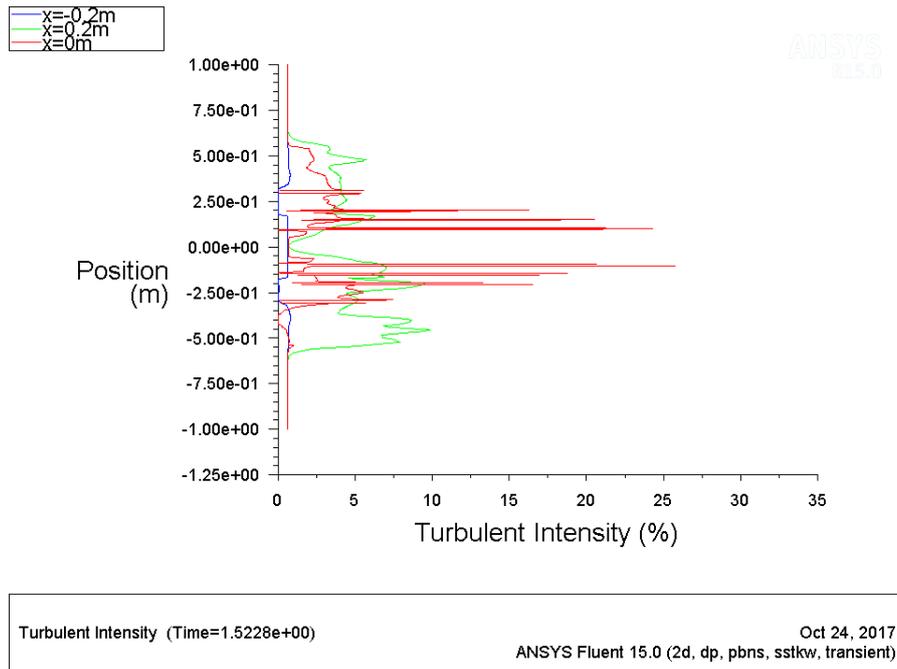


Gambar 4.23 Kontur intensitas turbulensi pada konfigurasi *counter-rotating* keluar

Sama dengan karakteristik turbulensi pada konfigurasi *co-rotating*, turbulen yang muncul pada konfigurasi ini juga merupakan jenis turbulen lemah yang mudah terdisipasi. Sehingga, peningkatan intensitas turbulensi pada daerah interaksi aliran tidak terlalu besar. Sedangkan turbulensi pada daerah dalam turbin dan daerah *wake* tidak mudah terdisipasi. Proses ekstraksi energi yang terjadi secara terus menerus menyebabkan stuktur turbulensi terus terbentuk dan tidak mudah untuk terdisipasi. Daerah *wake* turbin memiliki nilai intensitas turbulensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan area yang berada di dalam turbin. Besarnya intensitas turbulensi pada daerah *wake* berkisar antara 3% sampai 5%. Turbulensi pada daerah *wake* akan terdisipasi setelah jarak 5,5D.

Gambar 4.24 menggambarkan fluktuasi intensitas turbulensi secara spasial. Fluktuasi terbesar terutama terjadi pada $x=0$ m. Pada titik pengambilan data tersebut, nilai intensitas turbulensi bervariasi dari >5% hingga mencapai 25%. Nilai intensitas turbulensi yang tinggi muncul untuk daerah yang dekat dengan turbin dan daerah di dalam turbin ($y= 0,3$ sampai $y= 0,7$ m dan $y = -0,3$ m sampai $y= -0,7$ m). Nilai intensitas turbulensi pada

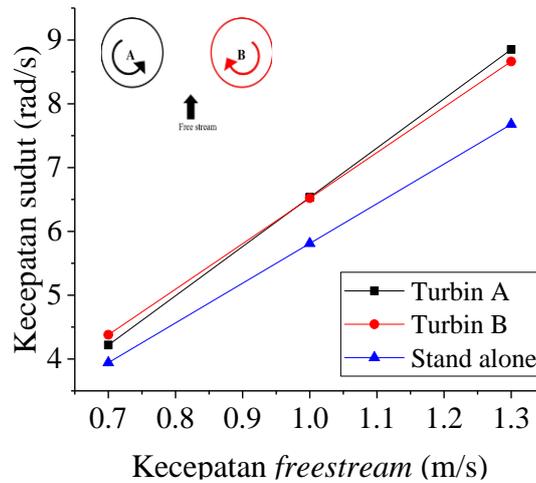
titik $x=-0,2$ m jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan $x=0,2$ m. Intensitas turbulensi pada titik $x= -0,2$ m hanya mencapai $<2\%$, sementara itu nilai intensitas turbulensi pada $x=0,2$ m mencapai 10% . Hal ini bersesuaian dengan hasil plot fluktuasi kecepatan aliran pada Gambar 4.22. Hal ini membuktikan bahwa aliran pada *downstream blade* lebih tidak stabil atau lebih fluktuatif jika dibandingkan dengan aliran pada bagian *upstream blade*.



Gambar 4.24 Plot intensitas turbulensi pada konfigurasi *counter-rotating* keluar

4.5 KONFIGURASI *COUNTER-ROTATING* MASUK

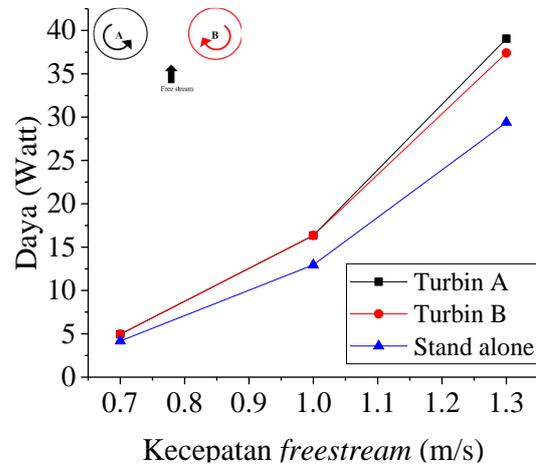
Pada konfigurasi *counter-rotating* masuk, dua turbin diletakkan dalam satu baris sehingga mendapatkan kecepatan *freestream* sama. Kedua turbin memiliki arah putaran yang berbeda. Turbin A berputar *counter-clockwise* (CCW) sementara turbin B berputar *Clockwise* (CW). Konfigurasi ini juga diuji dengan tiga variasi kecepatan dan tiga variasi *cross stream distance*.



Gambar 4.25 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi *Counter-rotating* masuk untuk $Y=1.5 D$

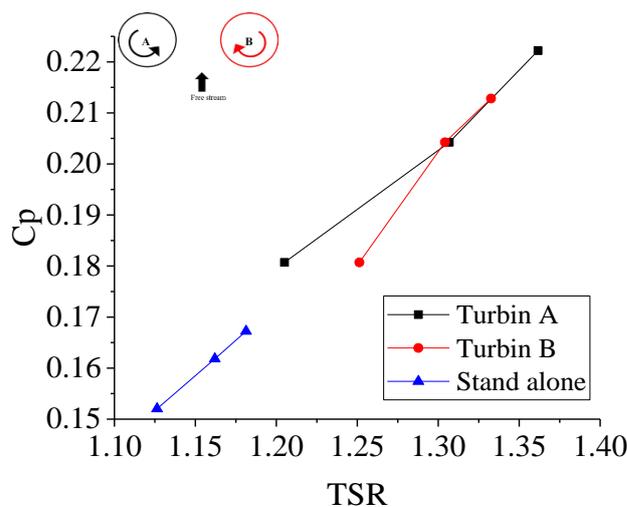
4.5.1 Efek Kecepatan *Freestream* Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Counter-Rotating* Masuk

Seperti pada konfigurasi *co-rotating* dan *counter-rotating* keluar, besarnya kecepatan sudut dan daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin dalam konfigurasi *counter-rotating* masuk juga mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan kecepatan *freestream*. Gambar 4.25 dan 4.26 menunjukkan fenomena tersebut. Dari gambar tersebut terlihat bahwa turbin A dan B pada konfigurasi *counter-rotating* masuk menghasilkan kecepatan sudut dan daya yang hampir sama. Pada kecepatan 1,3 m/s dan *cross stream distance* 1,5D, turbin A menghasilkan daya sebesar 38,22 Watt dengan kecepatan sudut sebesar 8,85 rad/s. Sementara itu turbin B dapat menghasilkan daya sebesar 37,4 Watt dengan kecepatan sudut sebesar 8,66 rad/s. Data lebih lanjut mengenai daya yang dihasilkan oleh masing-masing turbin pada konfigurasi *counter-rotating* masuk dapat dilihat pada Lampiran 5.



Gambar 4.26 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap daya turbin pada konfigurasi *Counter-rotating* masuk untuk $Y=1,5D$

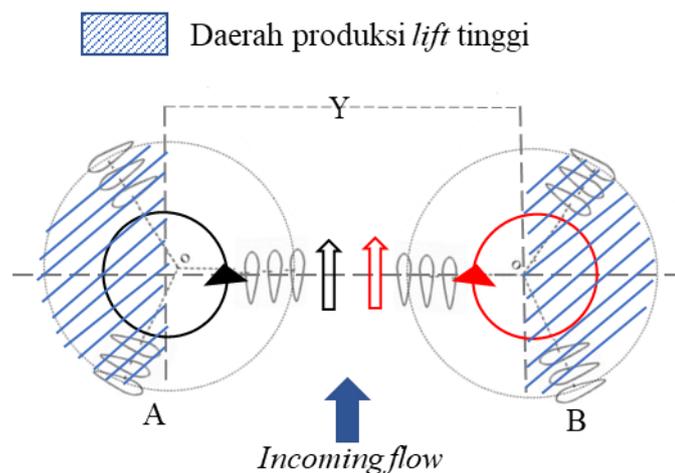
Kinerja kedua turbin pada konfigurasi *counter-rotating* masuk lebih tinggi jika dibandingkan dengan *stand alone turbine*. Hal ini diindikasikan dengan nilai kecepatan sudut dan torsi yang lebih tinggi. Interaksi aliran yang muncul memberikan pengaruh positif kepada kedua turbin, terutama ketika kecepatan *freestream* semakin besar. Ketika kecepatan *freestream* besar, lebih banyak struktur vorteks yang muncul akibat persinggungan *blade* turbin dan aliran yang akan mempengaruhi intensitas turbulensi di sekitar turbin serta mempengaruhi kinerja turbin.



Gambar 4.27 Grafik hubungan C_p dan TSR untuk konfigurasi *Counter-Rotating* Masuk

Peningkatan performansi masing-masing turbin pada konfigurasi *counter-rotating* masuk juga didukung oleh grafik C_p dan TSR seperti ditunjukkan pada Gambar 4.27. Gambar tersebut menunjukkan bahwa *stand-alone* turbin memiliki TSR dan C_p yang lebih rendah daripada turbin A dan turbin B. Turbin A bekerja pada rentang TSR yang lebih lebar daripada turbin B dengan kecenderungan turbin A memiliki nilai TSR yang sedikit lebih besar jika dibandingkan dengan turbin B.

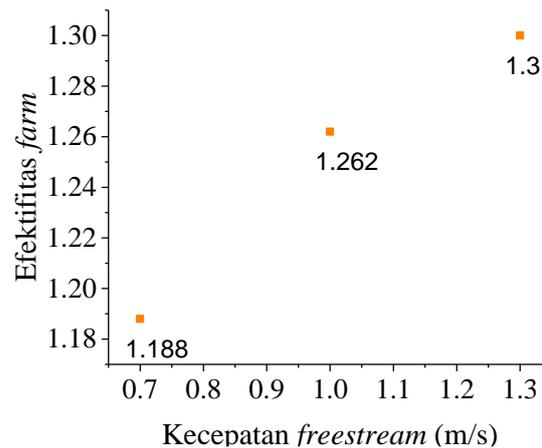
Gambar 4.28 mengilustrasikan interaksi aliran yang terjadi pada konfigurasi *counter-rotating* masuk. Dari ilustrasi tersebut terlihat bahwa aliran induksi yang dihasilkan oleh turbin A maupun turbin B searah dengan aliran *freestream*. Superposisi antara ketiga aliran ini menghasilkan kecepatan yang lebih besar jika dibandingkan dengan superposisi yang terjadi pada dua konfigurasi sebelumnya (*co-rotating* dan *counter-rotating* keluar). Hal ini berakibat pada peningkatan potensi energi yang dapat diekstrak oleh *blade* yang berada pada daerah interaksi aliran. Walaupun bagian yang dekat dengan daerah interaksi aliran merupakan daerah produksi *lift* rendah, namun percepatan aliran yang signifikan pada daerah tersebut mampu meningkatkan produksi *lift*. Hal ini menyebabkan peningkatan performansi kedua turbin (A dan B), seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.27.



Gambar 4.28 Interaksi aliran pada konfigurasi *Counter-Rotating* Masuk

Performansi konfigurasi *array* direpresentasikan dengan nilai efektifitas *farm*. Konfigurasi *counter-rotating* masuk menunjukkan peningkatan

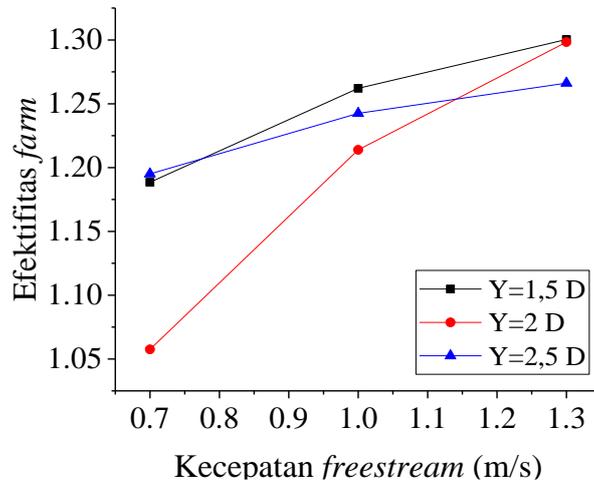
efektifitas *farm* dengan peningkatan kecepatan *freestream* dan TSR turbine, seperti diGambarkan dalam Gambar 4.29. Nilai efektifitas *farm* konfigurasi *counter-rotating* masuk untuk variasi kecepatan 0,7; 1 dan 1,3 m/s secara berturut-turut adalah 1,188; 1,262 dan 1,3. Karena pada kecepatan 0,7 m/s nilai efektifitas *farm* dari konfigurasi ini telah mencapai 1,188 (melebihi 1), maka dapat disimpulkan efek konstruktif interaksi aliran sudah dirasakan oleh kedua turbin pada kecepatan tersebut. Efek konstruktif ini semakin terasa untuk kecepatan *freestream* yang lebih besar. Pada kecepatan *freestream* yang lebih besar, aliran hasil superposisi memiliki energi yang lebih besar. Peningkatan kecepatan *freestream* yang diikuti dengan peningkatan efektifitas *farm* juga menunjukkan bahwa konfigurasi ini akan lebih efektif jika diaplikasikan pada lokasi dengan kecepatan aliran yang cukup besar.



Gambar 4.29 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi *Counter-Rotating* masuk untuk $Y=1,5D$

4.5.2 Efek Jarak Antar Turbin (*Cross Stream Distance*) Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi *Counter Rotating* Masuk

Gambar 4.30 menunjukkan pengaruh *cross stream distance* terhadap efektifitas *farm* pada konfigurasi counter-rotating masuk. Tiga variasi jarak diujikan pada konfigurasi ini, yaitu $Y=1,5D$; $Y=2D$ dan $Y=2.5D$.



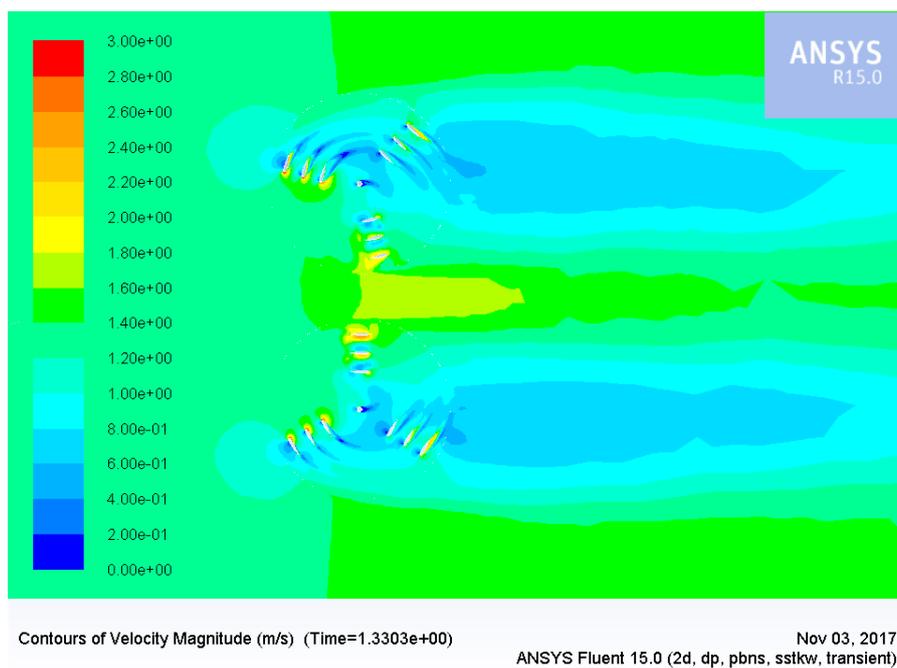
Gambar 4.30 Pengaruh jarak antar turbin terhadap efektifitas farm pada konfigurasi *Counter-Rotating* Masuk

Berdasarkan Gambar 4.30 terlihat bahwa nilai efektifitas farm lebih dari 1 untuk semua variasi kecepatan *freestream* dan *cross stream distance*. Hal ini mengindikasikan bahwa interaksi aliran sudah mulai muncul pada variasi kecepatan *freestream* terendah (0,7 m/s) dan dengan jarak *crossstream distance* terjauh (2,5 D). Sehingga, dapat dikatakan bahwa interaksi aliran yang cukup kuat terjadi pada konfigurasi *counter-rotating* masuk.

Pengaruh interaksi aliran terbesar terjadi pada *cross stream distance* terkecil yaitu 1,5D dan kecepatan 1,3 m/s. Pada kondisi ini, konfigurasi *counter-rotating* masuk mampu menghasilkan nilai efektifitas farm turbin sebesar 1,3. Jarak antar turbin yang dekat mempercepat aliran yang melalui daerah interaksi. Sehingga dapat memperbaiki kinerja masing-masing turbin. Hal ini juga didukung dengan kecepatan *freestream* yang besar, sehingga probabilitas terjadinya interaksi aliran semakin besar. Sementara itu, nilai efektifitas farm terkecil terjadi pada *cross stream distance* 2D dan kecepatan *freestream* 0,7 m/s. Kondisi ini mengindikasikan bahwa efek konstruktif interaksi aliran pengaruhnya tidak terlalu besar. Data lebih lengkap mengenai pengaruh *cross stream distance* ini dapat dilihat pada Lampiran 5.

4.4.3 Simulasi Numerik untuk Konfigurasi *Counter-rotating* Masuk

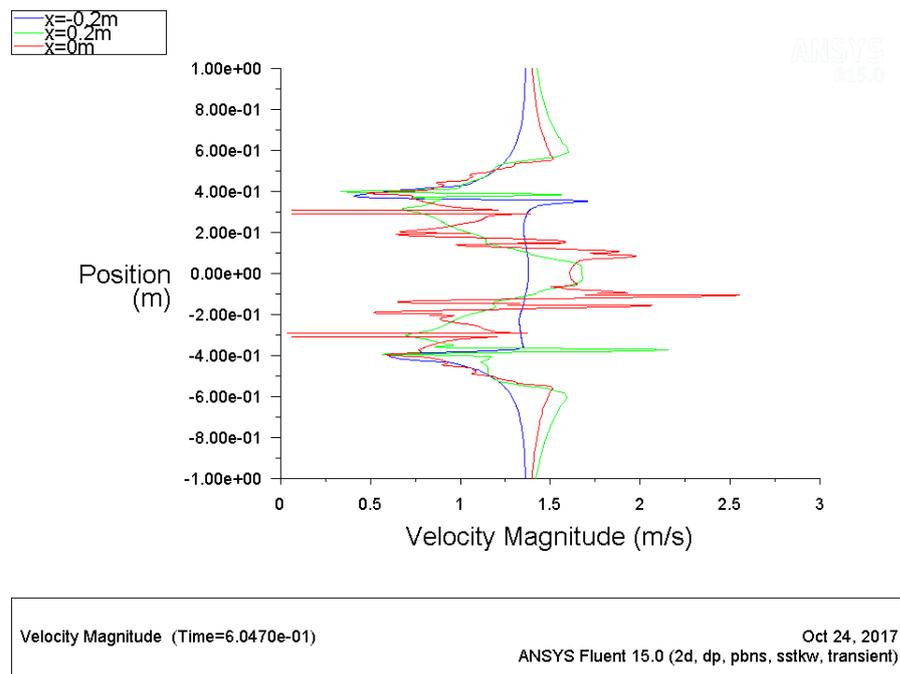
Simulasi numerik dilakukan pada konfigurasi *counter-rotating* masuk untuk mengetahui informasi lebih lanjut, terutama informasi mengenai aliran di sekitar dan di belakang turbin. Simulasi numerik untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk dilakukan pada kecepatan *freestream* 1,3 m/s dan *cross-stream distance* sebesar 1,5D, dimana D merupakan diameter turbin. Pengambilan simulasi numerik dilakukan pada posisi *blade* (*azimuthal position*) seperti dtunjukkan pada Gambar 4.31. Terdapat dua parameter penting yang diambil dari hasil simulasi numerik. Kedua parameter ini adalah kontur kecepatan dan intensitas turbulensi. Telah dijelaskan sebelumnya bahwa intensitas turbulensi merepresentasikan fluktuasi kecepatan secara temporal. Intensitas turbulensi didefinisikan sebagai rasio antara komponen fluktuasi kecepatan dan rata-rata kecepatan.



Gambar 4.31 Kontur kecepatan untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk

Kontur kecepatan aliran di sekitar dan di belakang turbin untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk. Fenomena efek kanal juga muncul pada konfigurasi ini dan mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran di daerah interaksi aliran hingga mencapai kecepatan 1,6 – 1,8 m/s atau mencapai 123%

sampai 138% jika dibandingkan dengan kecepatan *freestream*. Aliran induksi yang searah dengan kecepatan *freestream* (ditunjukkan oleh Gambar 4.27) menyebabkan kecepatan aliran pada daerah interaksi ini cukup tinggi, sehingga dapat meningkatkan performansi masing-masing turbin pada konfigurasi *counter-rotating* masuk. Hasil simulasi tersebut sesuai dengan hasil eksperimental yang menunjukkan bahwa C_p dan TSR untuk masing-masing turbin lebih tinggi jika dibandingkan dengan *stand alone turbine*.

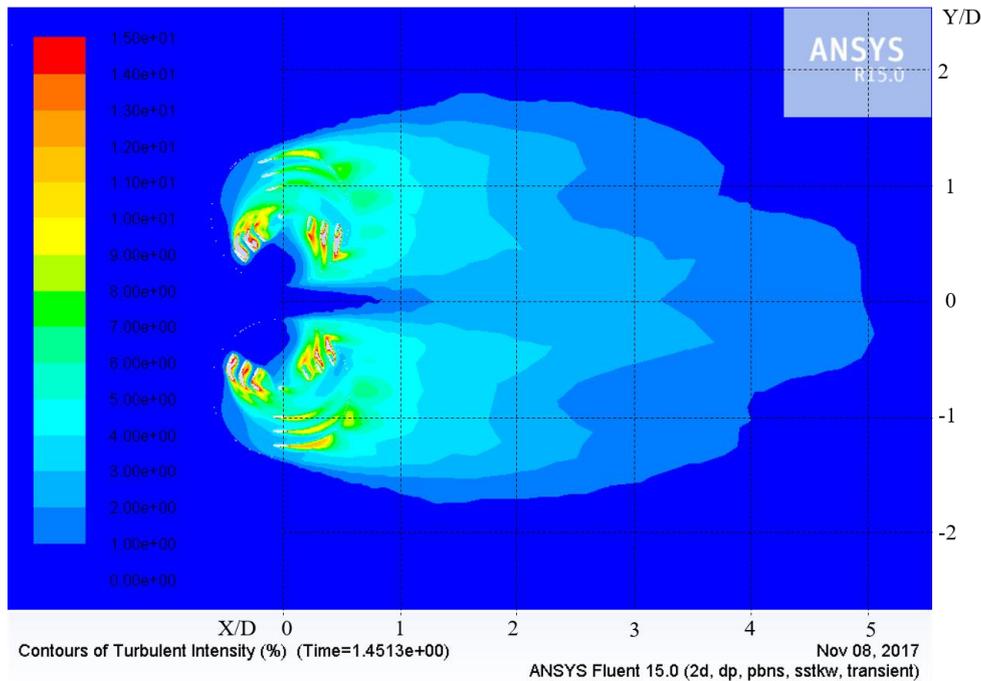


Gambar 4.32 Fluktuasi kecepatan untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk

Terdapat perbedaan kontur kecepatan pada daerah produksi *lift* tinggi dan daerah produksi *lift* rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.30. Daerah produksi *lift* tinggi menunjukkan penurunan kecepatan yang lebih signifikan jika dibandingkan dengan daerah produksi *lift* rendah. Akibat ekstraksi energi yang cukup besar pada daerah produksi *lift* tinggi, maka terjadi penurunan kecepatan yang signifikan pada daerah tersebut.

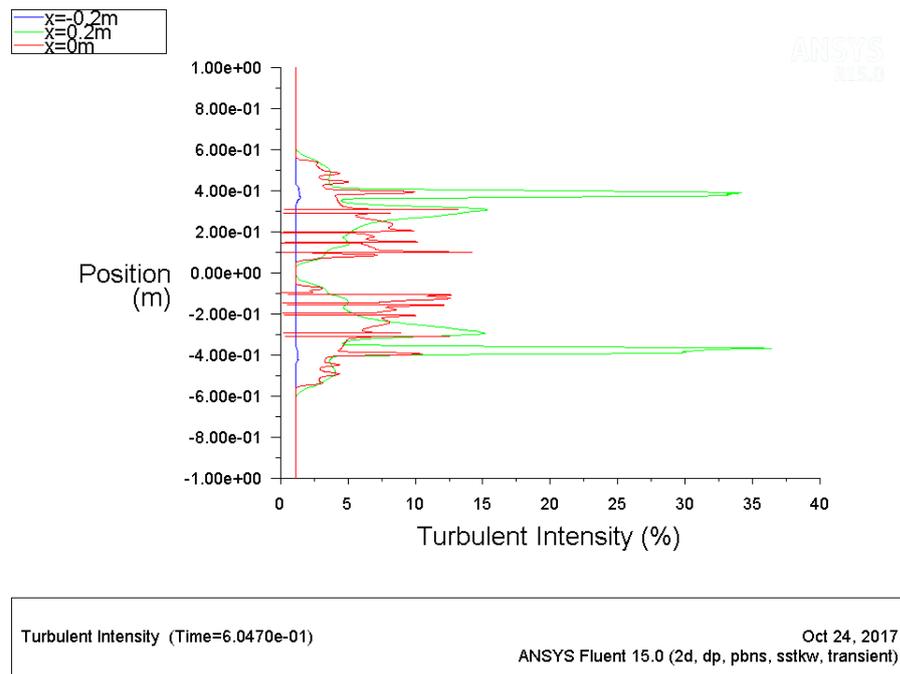
Gambar 4.32 menunjukkan fluktuasi kecepatan secara umum untuk $x = -0,2$ m; $x = 0$ m dan $x = 0,2$ m. Berdasarkan gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai fluktuasi kecepatan terbesar terjadi pada garis $x = 0$ m. Pada garis tersebut, kecepatan aliran mencapai 1.8 m/s, yaitu untuk nilai $y = -0,1$ m. Titik ini berada pada daerah interaksi aliran, dimana daerah interaksi aliran berada

pada posisi $-0,3 < y < 0,3$ m. Nilai fluktuasi kecepatan pada $x=-0,2$ m lebih kecil jika dibandingkan dengan $x=0,2$ m. Pada garis $x=-0,2$ m, kecepatan berkisar antara $0,2 - 1,75$ m/s. Sementara itu pada $x=0,2$ m nilai kecepatan berkisar antara $0,2 - 2,25$ m/s.



Gambar 4.33 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk

Aliran induksi yang searah dengan aliran *freestream* (ditunjukkan pada Gambar 4.27) menyebabkan rendahnya nilai intensitas turbulensi pada daerah interaksi aliran, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.33. Nilai intensitas turbulensi untuk turbin A dan B hampir sama, dengan nilai intensitas turbulensi maksimal mencapai lebih dari 15% untuk daerah dibelakang *trailing edge*. Untuk turbin A, intensitas turbulensi yang cukup besar terutama terjadi pada kuadran III dan IV (daerah produksi *lift* tinggi), sementara itu untuk turbin B, intensitas turbulensi terbesar terutama terjadi pada kuadran I dan II (daerah produksi *lift* rendah). Hal ini terjadi karena *angle of attack* yang terlalu besar, sehingga menimbulkan separasi aliran dan muncul banyak struktur vorteks. Sementara itu, turbulensi akan terdisipasi setelah jarak $5D$.



Gambar 4.34 Plot intensitas turbulensi untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk

Gambar 4.34 menunjukkan plot fluktuasi intensitas turbulensi sepanjang garis $x = -0,2$ m; $x=0$ m dan $x=0,2$ m. Dari gambar tersebut diketahui bahwa intensitas turbulensi terbesar terjadi pada garis $x=0,2$ m, yang mencapai lebih dari 35%. Sementara itu intensitas turbulensi pada $x=0$ m (bagian dalam turbin) tidak terlalu besar, yaitu hanya mencapai 15%. Garis $x=-0,2$ m memiliki tingkat turbulensi yang paling kecil yaitu kurang dari 2,5%.

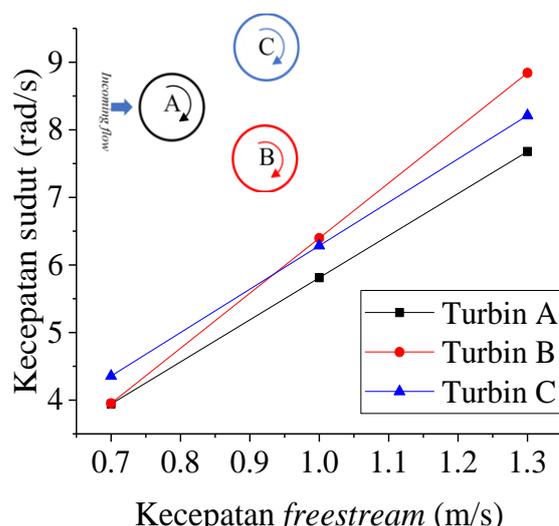
4.6 KONFIGURASI TIGA TURBIN A (3T-A)

Tujuan pemasangan turbin yang disusun dalam konfigurasi *array* adalah untuk mencapai kapasitas produksi yang ditargetkan, sehingga mungkin untuk memasang turbin dalam jumlah yang banyak (lebih dari dua). Akibatnya, interaksi hidrodinamika yang terjadi akan lebih kompleks. Pada sub bab 4.6 dan 4.7 akan dianalisa lebih lanjut mengenai pengaruh pemasangan turbin pada baris yang berbeda. Dengan mempertimbangkan hal ini, diharapkan kinerja dari *array* turbin akan lebih optimal.

Perancangan desain *array* tiga turbin terdiri dari dua macam konfigurasi yaitu konfigurasi tiga turbin A (3T-A) dan konfigurasi tiga turbin B (3T-B). Perancangan

ini didasarkan pada hasil eksperimen konfigurasi dua turbin yang telah dilakukan sebelumnya. Eksperimental tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi *co-rotating* dan *counter-rotating* masuk memiliki performansi yang hampir sama. Namun, performansi konfigurasi *counter-rotating* masuk akan menurun ketika *incoming flow* datang dari arah sebaliknya. Sehingga, konfigurasi *co-rotating* dipilih untuk dikembangkan dalam konfigurasi 3 turbin. Pada konfigurasi 3 Turbin A, sebuah turbin CW (*clockwise*) diletakkan di depan konfigurasi *co-rotating* pada jarak 3D, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7 (a).

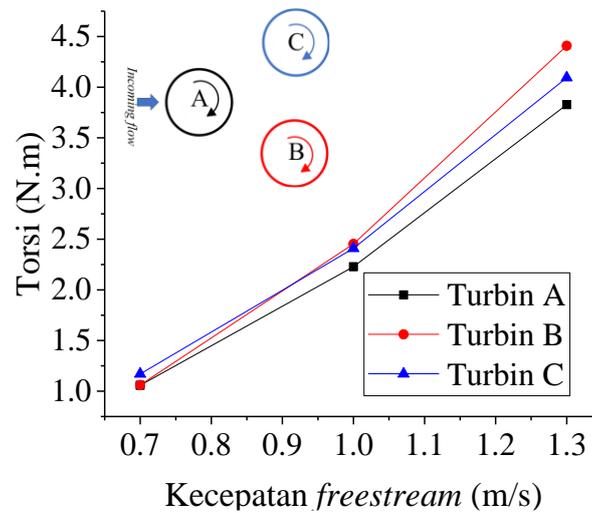
4.6.1 Efek Kecepatan *Freestream* Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi Tiga Turbin A (3T-A)



Gambar 4.35 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kecepatan sudut turbin pada konfigurasi 3T-A

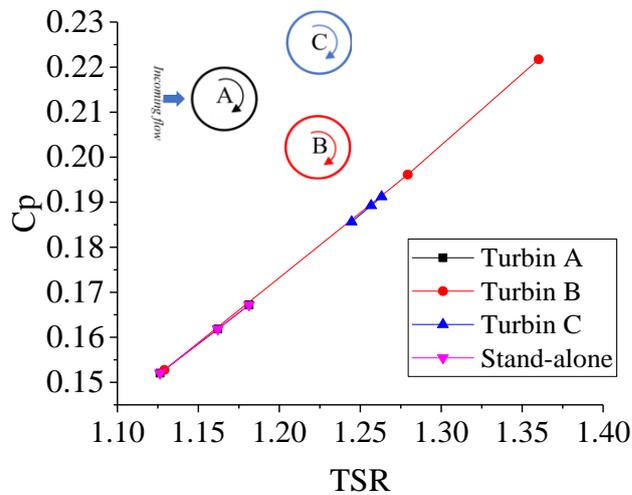
Tidak dilakukan pengujian untuk variasi jarak pada pengujian konfigurasi 3 turbin A. Jarak antara turbin B dan C ditetapkan sebesar 1,5D yang didasarkan pada pengujian sebelumnya, sementara itu jarak antara turbin *upstream* dan turbin *downstream* ditetapkan sebesar 3D, dimana D merupakan diameter turbin. Masing-masing konfigurasi ditarik menggunakan kereta *towing tank* dengan variasi kecepatan 0,7; 1; 1,3 m/s, sehingga pengaruh kecepatan *freestream* terhadap interaksi aliran dan performansi turbin dapat dianalisa.

Kecepatan *freestream* merupakan parameter penting yang berpengaruh terhadap produktifitas masing-masing turbin. Seperti ditunjukkan oleh hasil eksperimental pada konfigurasi dua turbin (*co-rotating*, *couter-rotating* keluar dan *counter-rotating* masuk), bahwa kecepatan sudut dan torsi turbin meningkat dengan peningkatan kecepatan *freestream*. Hal serupa juga terjadi pada konfigurasi 3T-A, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.35 dan 4.36.



Gambar 4.36 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap torsi pada konfigurasi 3T-A

Dari gambar tersebut, juga dapat diketahui kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin yang tersusun dalam konfigurasi 3T-A. Terdapat perbedaan nilai kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Turbin B cenderung memiliki kecepatan sudut dan torsi yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin A dan turbin C. Turbin B mampu menghasilkan torsi sebesar 4,407 N.m pada kecepatan sudut 8,84 rad/s. Sementara itu turbin A menghasilkan kecepatan sudut dan torsi terkecil jika dibandingkan dengan turbin lain. Hal ini terjadi untuk semua variasi kecepatan *freestream*. Nilai torsi terbesar yang dihasilkan oleh turbin A adalah 3.83 N.m pada kecepatan sudut sebesar 7,68 rad/s. Selisih antara torsi maksimal yang dihasilkan oleh turbin A dan turbin B mencapai 15%.

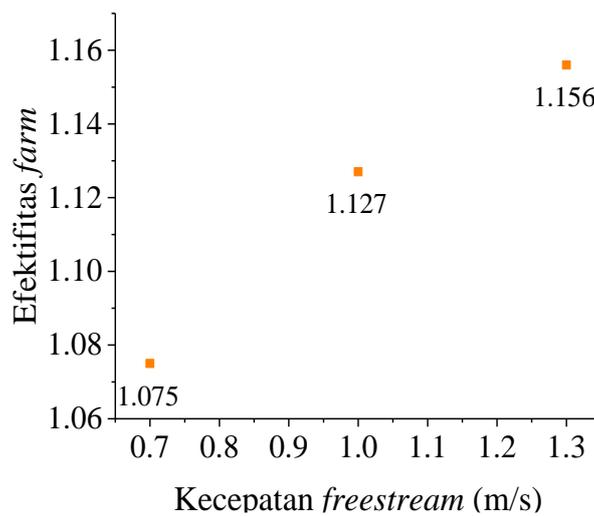


Gambar 4.37 Grafik kinerja masing-masing turbin dalam konfigurasi 3T-A

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa terdapat perbedaan nilai kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Hal ini sangat berpengaruh terhadap performansi turbin. Dalam kasus ini performansi turbin diinterpretasikan dalam bentuk C_p dan TSR. Gambar 4.37 menggambarkan performansi turbin untuk konfigurasi 3T-A. Berdasarkan Gambar tersebut dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan performansi masing-masing turbin yang tersusun dalam konfigurasi 3T-A, yang juga didukung dengan hasil yang dinyatakan pada Gambar 4.35 dan 4.36. Turbin B memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan kedua turbin lainnya dan dengan *stand-alone* turbin, ditandai dengan nilai C_p dan TSR yang tinggi. C_p maksimal yang dapat dicapai oleh turbin B ketika dilakukan pengujian adalah 0,22 pada TSR sebesar 1,36 dan C_p terendah sebesar 0,15 pada TSR 1,129. Turbin ini memiliki rentang TSR yang paling lebar yaitu dari 1,129 sampai 1,36. Sementara itu turbin C memiliki rentang TSR terkecil yaitu antara 1,244 sampai 1,263 dengan nilai C_p antara 0,185 sampai 0,19. Pada kecepatan rendah (0,7 m/s), turbin C menunjukkan kinerja yang lebih baik jika dibandingkan dengan turbin A. Turbin A memiliki kinerja terburuk jika dibandingkan dengan kedua turbin yang lain, dimana turbin ini bekerja pada rentang TSR sebesar 1,126 sampai 1,18 dengan nilai C_p berkisar antara 0,152 sampai 0,167. Performansi dari turbin A mendekati performansi dari *stand-alone* turbin. Turbin A tidak dipengaruhi oleh interaksi aliran

akibat adanya turbin B dan C, sehingga turbin A berperilaku menyerupai *stand-alone* turbin.

Akibat penambahan turbin A pada konfigurasi 3T-A, *incoming flow* untuk turbin B dan C terganggu. Turbin B dan C bekerja pada daerah *wake* turbin A. Semakin dekat jarak turbin B dan C dengan turbin A, maka pengaruh buruk *wake* akan semakin besar. Turbin yang bekerja pada daerah *wake* cenderung akan mengalami penurunan performansi. Namun hasil eksperimental menunjukkan bahwa terdapat perbedaan pengaruh *wake* yang dialami oleh turbin B dan C. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh munculnya interaksi aliran di daerah sekitar turbin. Efek interaksi aliran ini akan dijelaskan lebih lanjut pada bagian 4.6.2.



Gambar 4.38 Nilai *efektifitas farm* dari konfigurasi 3T-A

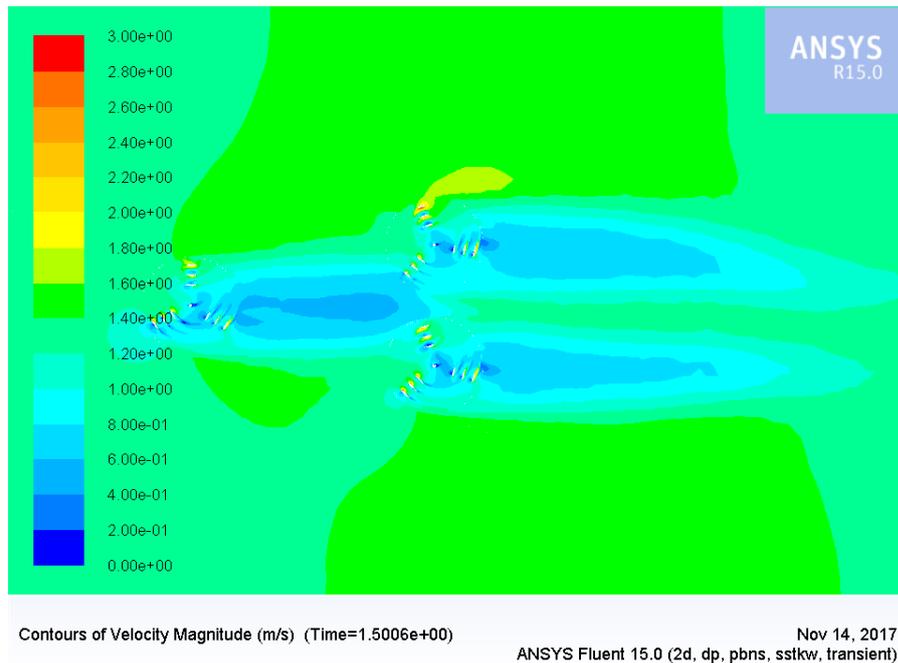
Performansi masing-masing turbin dalam *array* sangat berpengaruh terhadap total energi yang diproduksi oleh *array* dan kinerja dari *array* tersebut (*efektifitas farm*). Hasil eksperimental menunjukkan bahwa *efektifitas farm* dari konfigurasi *array* untuk kecepatan freestream 0,7; 1 dan 1,3 m/s berturut-turut adalah 1,075; 1,127 dan 1,156. Seperti pada konfigurasi sebelumnya, peningkatan kecepatan *freestream* mampu meningkatkan *efektifitas farm* konfigurasi 3T-A, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.38.

Semakin besar kecepatan *freestream*, maka intensitas terjadinya interaksi aliran semakin meningkat sehingga efek konstruktifnya akan semakin besar.

4.6.2 Simulasi Numerik untuk Konfigurasi 3T-A

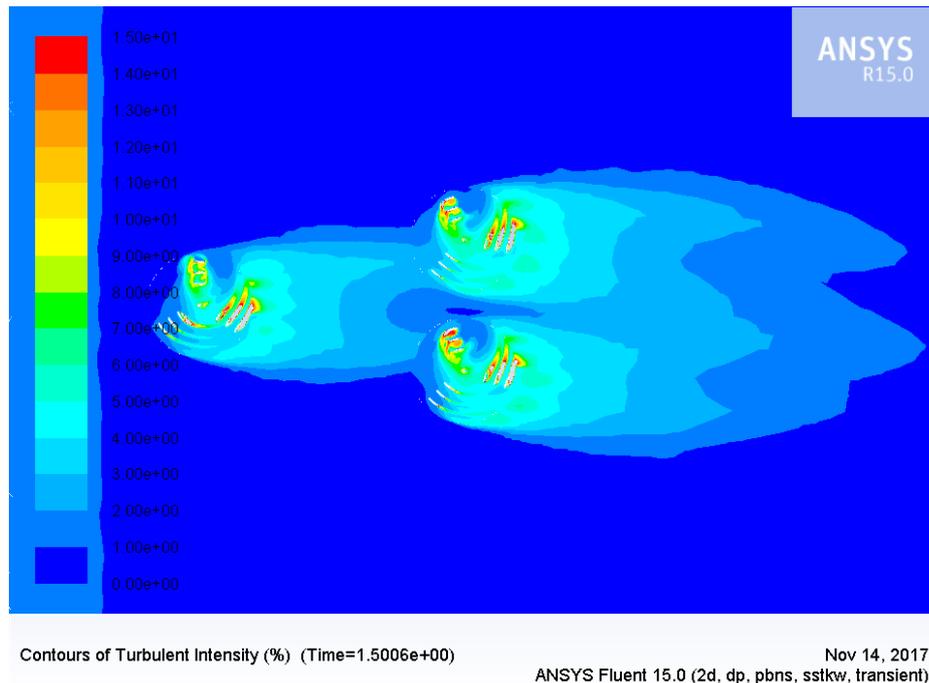
Interaksi antar turbin dalam suatu *array* merupakan hal yang penting untuk dikaji lebih lanjut. Turbin yang terpasang dalam suatu *array* akan saling mempengaruhi satu sama lain, sehingga kinerja masing-masing turbin tidak sama dengan *stand-alone* turbin. Pada sub bab sebelumnya telah dijelaskan bahwa interaksi antar turbin yang saling berdampingan (*side-by-side*) memberikan efek positif terhadap kinerja masing-masing turbin. Hal ini terjadi karena munculnya efek kanal atau *jet-flow* efek pada daerah interaksi aliran. Interaksi aliran tidak hanya terjadi pada turbin yang berdampingan saja, namun juga muncul pada turbin yang tersusun dalam baris yang berbeda, seperti pada konfigurasi 3T-A. Dalam konfigurasi ini, terdapat dua baris turbin, yaitu turbin baris pertama yang disebut sebagai turbin *upstream* dan turbin pada baris kedua yang disebut sebagai turbin *downstream*. Dalam suatu *array* turbin, turbin *downstream* bekerja pada daerah *wake* turbin *upstream* sehingga pemasangan turbin *upstream* akan sangat berpengaruh terhadap kinerja dari turbin *downstream*. Dengan pemasangan *array* dalam konfigurasi *zig-zag* pengaruh buruk *wake* dapat minimalisir.

Profil kecepatan aliran dan intensitas turbulensi dianalisa lebih lanjut untuk mengetahui interaksi yang muncul pada masing-masing turbin dalam konfigurasi 3T-A. Gambar 4.39 menunjukkan kontur kecepatan pada konfigurasi 3T-A. Selama turbin berputar, *wake* turbin A cenderung mengarah ke turbin C, sehingga turbin C mendapatkan kecepatan aliran yang lebih rendah. Kecepatan aliran yang mengenai *passive-pitch blade* pada kuadran III hanya berkisar antara 0,6 – 0,8 m/s. Sementara itu turbin B mendapatkan kecepatan aliran yang lebih tinggi, yaitu berkisar antara 0,8 – 1 m/s.



Gambar 4.39 Kontur kecepatan pada konfigurasi 3T-A

Ekstraksi energi oleh turbin A mengakibatkan terganggunya aliran dibelakang turbin dan penurunan kecepatan pada bagian *downstream*. Daerah tersebut disebut sebagai daerah *wake*. Terjadi proses transfer momentum antara daerah *wake* dan daerah lain di sisi turbin sehingga dalam jarak tertentu *wake* akan terkonservasi. Salah satu tanda bahwa *wake* telah terkonservasi adalah peningkatan kecepatan hingga mencapai kecepatan semula. Panjangnya daerah *wake* dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya intensitas turbulensi dan kecepatan aliran datang (*incoming flow*). Dalam kasus ini, aliran yang datang pada *downstream* turbin mengalami fluktuasi baik secara spasial maupun temporal, yang ditandai dengan peningkatan intensitas turbulensi. Aliran dengan karakteristik seperti ini merupakan aliran yang sulit untuk di konservasi, sehingga daerah *wake* turbin *downstream* lebih panjang jika dibandingkan dengan turbin *upstream*. Dari hasil simulasi juga menunjukkan bahwa turbin C memiliki *wake* yang lebih panjang jika dibandingkan dengan turbin B. Fenomena ini terjadi karena turbin C mendapatkan kualitas aliran yang lebih buruk, ditandai dengan kecepatan yang lebih rendah dan intensitas turbulensi yang lebih tinggi sehingga bagian *downstream* turbin C lebih berfluktuasi dan sulit untuk terkonservasi.



Gambar 4.40 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi 3T-A

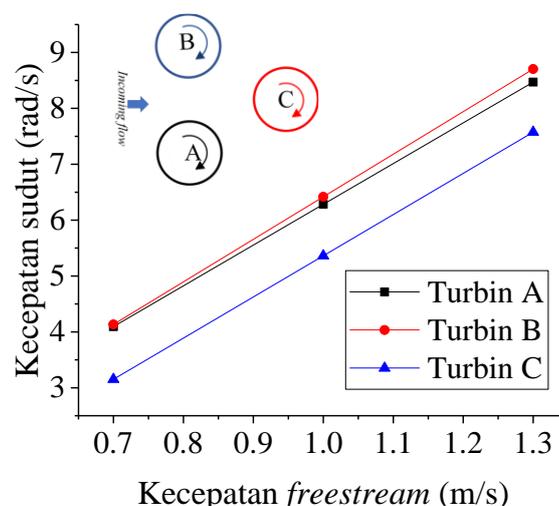
Pemasangan turbin dalam suatu kanal akan menimbulkan efek *blockage* yang memberikan pengaruh terhadap kinerja turbin. Namun, pengaruh *blockage* dengan nilai *blockage ratio* kurang dari 5% dapat diabaikan. Hasil perhitungan pada sub bab 4.1 menunjukkan bahwa nilai *blockage ratio* untuk konfigurasi 3TA adalah 1,33 %, sehingga pengaruh *blockage* dapat diabaikan. Sementara itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaruh *blockage* memberikan percepatan aliran di bagian antara turbin dan dinding. Percepatan aliran terbesar terjadi pada *downstream* turbin. Jarak antara *downstream* turbin dan dinding yang lebih dekat menyebabkan peningkatan nilai *blockage ratio* dan peningkatan kecepatan aliran. Terjadi percepatan aliran di daerah antara turbin dan dinding hingga mencapai kecepatan 1,4-1,6 m/s. Adanya dinding di dekat turbin ini menyebabkan munculnya gelombang permukaan pada air. Sisi *windward* memberikan pengaruh yang lebih luas, sementara itu pengaruh sisi *leeward* terhadap dinding tidak terlalu luas.

Gambar 4.40 menunjukkan bahwa peningkatan intensitas turbulensi secara langsung mengenai turbin B dan C, sehingga sangat berpengaruh

terhadap kinerja kedua turbin tersebut. Pengaruh buruk dialami oleh turbin C, dimana turbin tersebut memperoleh aliran dengan intensitas turbulensi yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin B, yaitu mencapai 2-3%. Akibatnya ekstraksi energi oleh turbin C tidak berjalan dengan optimal. Turbin C memiliki performansi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin B. Hasil tersebut sesuai dengan hasil yang diperoleh dari pengujian turbin, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.37. Namun, interkasi aliran serta efek kanal yang muncul pada daerah antara turbin A dan B memberikan efek konstruktif untuk kedua turbin, dimana kedua turbin memiliki C_p yang lebih baik jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin.

4.7 KONFIGURASI TIGA TURBIN B (3T-B)

Konfigurasi 3T-B merupakan modifikasi dari konfigurasi *co-rotating* dengan penambahan turbin *clockwise* (CW) dibelakang konfigurasi *co-rotating*. Konfigurasi ini terdiri dua baris, baris pertama terdiri dari 2 turbin (A dan B) dan baris kedua terdiri dari sebuah turbin (C), seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7(b). Jarak antara turbin A dan B adalah $1,5D$ dan jarak antara baris pertama dan kedua adalah $3D$. Jarak $3D$ dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *wake* *ter-recovery* setelah jarak $3D$. Sehingga diharapkan dapat meminimalisir efek buruk *wake* yang dialami oleh turbin C.



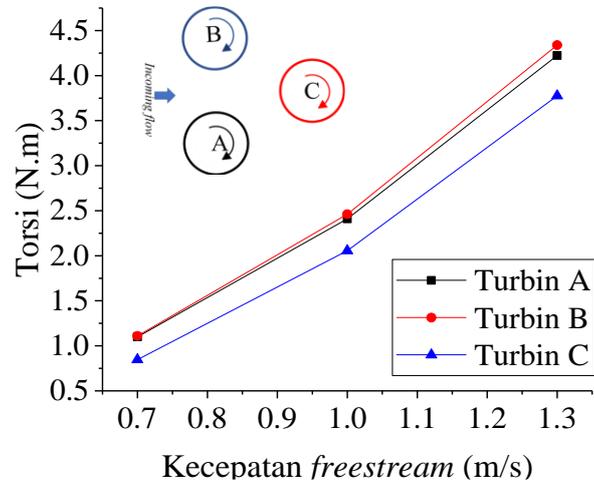
Gambar 4.41 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap kepatan sudut turbin pada konfigurasi 3T-B

4.7.1 Efek Kecepatan *Freestream* Terhadap Kinerja Turbin pada Konfigurasi Tiga Turbin A (3T-B)

Seperti pada konfigurasi sebelumnya, peningkatan kecepatan *freestream* menyebabkan peningkatan kecepatan sudut dan torsi yang dihasilkan oleh masing-masing turbin. Gambar 4.41 dan 4.42 menunjukkan fenomena tersebut. Berdasarkan kedua Gambar tersebut diketahui bahwa turbin C memiliki kecepatan sudut dan torsi terkecil jika dibandingkan dengan turbin A, turbin B dan *stand-alone* turbin. Torsi yang dihasilkan oleh turbin C 19% lebih rendah dari pada torsi yang dihasilkan oleh turbin A dan B. Besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan oleh turbin C untuk variasi kecepatan *freestream* 0,7; 1 dan 1,3 m/s secara berturut-turut adalah 3,15; 5,36 dan 7,57 rad/s. Sementara itu, besarnya torsi yang mampu dihasilkan secara berturut-turut adalah 0,846; 2,056 dan 7,574 N.m.

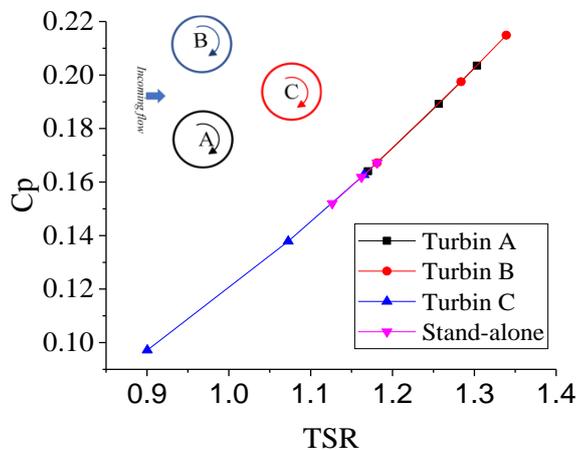
Karena turbin A dan B mendapatkan kecepatan *freestream* yang sama, kedua turbin ini menghasilkan kecepatan sudut dan torsi yang hampir sama. Kecepatan sudut yang dihasilkan oleh turbin A untuk variasi kecepatan 0,7; 1 dan 1,3 m/s secara berturut-turut adalah 4,095; 6,282 dan 8,47 dengan nilai torsi secara berturut-turut adalah 1,099; 2,409 dan 4,223 N.m. Sementara itu, kecepatan sudut yang dihasilkan oleh turbin B pada variasi kecepatan tersebut secara berturut-turut adalah 4,133; 6,418 dan 8,703 rad/s dengan nilai torsi secara berturut-turut adalah 1,109; 2,461 dan 4,339 N.m.

Performansi dari masing-masing turbin dalam konfigurasi 3T-B ditampilkan pada Gambar 4.43. Dari gambar tersebut diketahui bahwa turbin A dan B memiliki nilai performansi yang hampir sama, namun turbin B cenderung lebih baik jika dibandingkan dengan turbin A. Pada saat dilakukan pengujian, C_p dari turbin A berkisar antara 0,164 sampai 0,203 dan bekerja pada rentang TSR sebesar 1,17 sampai 1,3. Sementara itu, turbin B menghasilkan C_p dengan rentang 0,167 dan 0,215 dan bekerja pada rentang TSR 1,181 sampai 1,339. Selain itu, turbin A dan turbin B memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin.



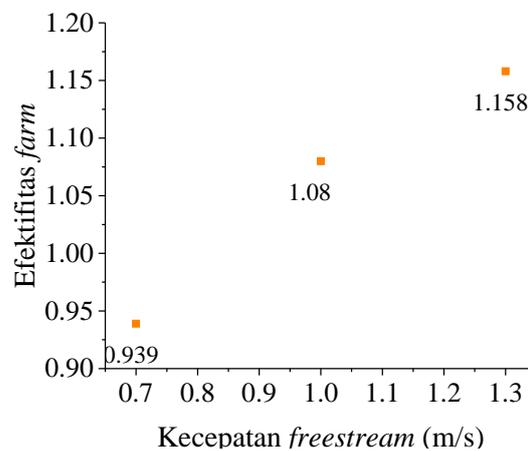
Gambar 4.42 Pengaruh kecepatan *freestream* terhadap torsi pada konfigurasi 3T-B

Jika dibandingkan dengan turbin A, B dan *stand-alone* turbin, turbin C memiliki performansi yang paling rendah. Hal ini karena turbin C bekerja pada daerah *wake*. *Wake* merupakan olakan dibelakang turbin yang ditandai dengan penurunan kecepatan yang cukup besar dan peningkatan level turbulensi [5]. Sehingga turbin yang berada di daerah *wake* mengalami penurunan performansi. Fenomena ini dialami oleh turbin C. Akibatnya, turbin C memiliki performansi yang lebih buruk jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.27. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diketahui bawah turbin C memiliki C_p sebesar 0,097 sampai 0,162 yang bekerja pada rentang TSR 0,9 sampai 1,165.



Gambar 4.43 Performansi masing-masing turbin pada konfigurasi 3T-B

Performansi *array* secara keseluruhan yang direpresentasikan dalam bentuk efektifitas *farm* diGambarkan pada Gambar 4.44. Hasil eksperimental menunjukkan bahwa nilai efektifitas *farm* meningkat dengan peningkatan kecepatan *freestream*. Nilai efektifitas *farm* dari konfigurasi 3T-B untuk variasi kecepatan 0,7; 1 dan 1,3 m/s adalah 0,939; 1,08 dan 1,15. Penurunan efektifitas *farm* ini juga disebabkan oleh rendahnya performansi turbin C. Performansi turbin C yang rendah tidak dapat terkompensasi dengan performansi turbin A dan B, walaupun kedua turbin ini telah mendapatkan efek konstruktif akibat interaksi aliran dan peningkatan intensitas turbulensi disekitar turbin.

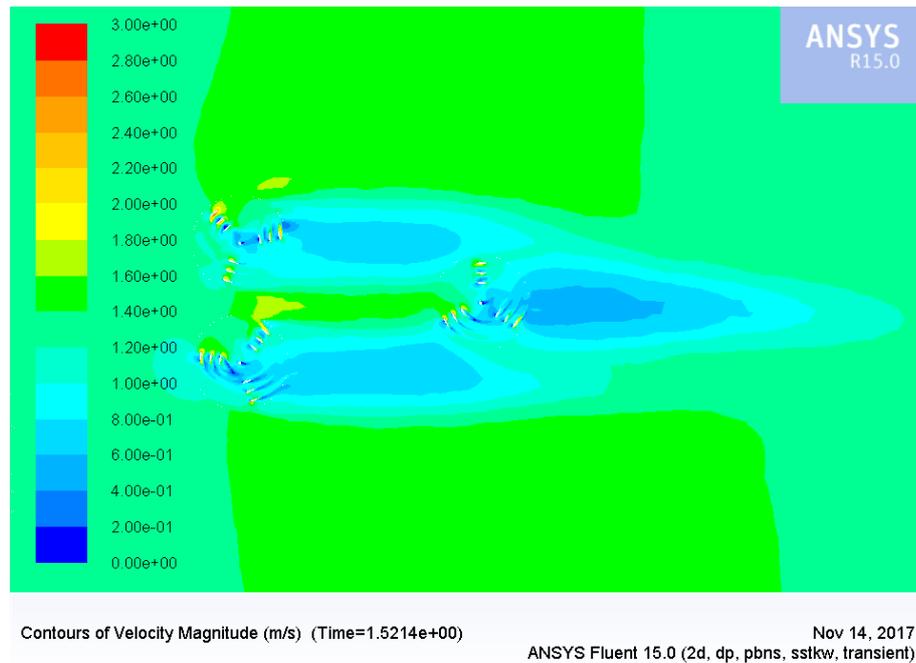


Gambar 4.44 Efektifitas *farm* konfigurasi 3T-B

4.7.2 Simulasi Numerik untuk Konfigurasi 3T-B

Simulasi numerik juga dilakukan untuk konfigurasi 3T-B untuk memperoleh informasi mendalam mengenai interaksi aliran yang terjadi pada masing-masing turbin dalam konfigurasi tersebut. Gambar 4.45 dan 4.46 menunjukkan kontur kecepatan aliran dan kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi 3T-B. Dari Gambar 4.45 terlihat bahwa turbin C bekerja dalam daerah *wake* turbin A dan B, sehingga *blade* pada kuadran II dan III mendapatkan kecepatan aliran yang lebih rendah jika dibandingkan dengan kecepatan *freestream*, yaitu hanya sebesar 0,8 – 1 m/s. Hal tersebut

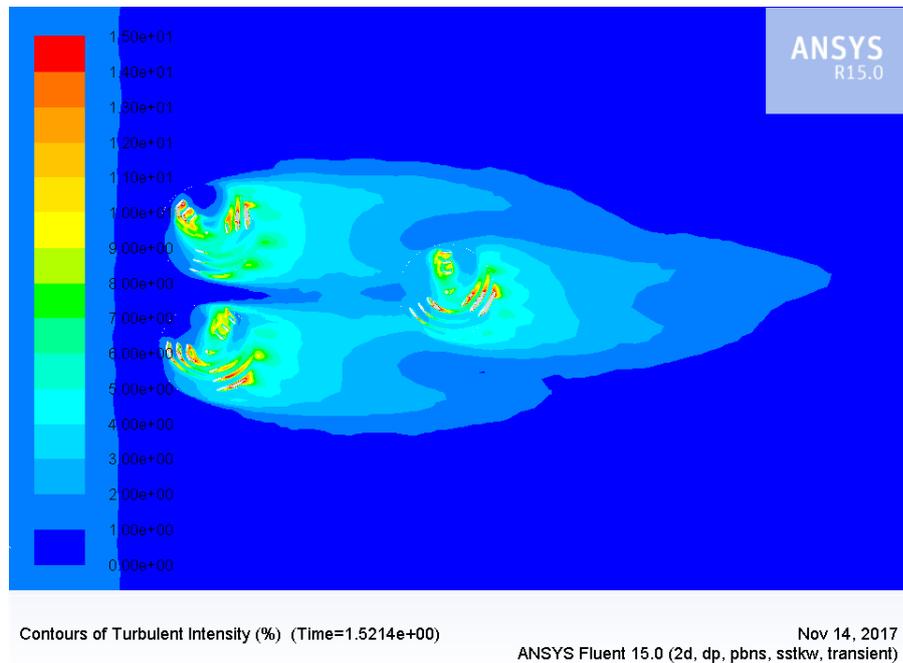
menyebabkan turbin C tidak dapat bekerja secara optimal, sehingga memiliki performansi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan performansi dua turbin lainnya. Hasil simulasi tersebut juga didukung dengan hasil eksperimental yang menyatakan bahwa turbin C memiliki nilai C_p dan TSR yang rendah, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.43.



Gambar 4.45 Kontur kecepatan untuk konfigurasi 3T-B

Sementara itu, turbin A dan B memperoleh kecepatan *freestream* dengan nilai yang hampir sama sehingga kedua turbin tersebut memiliki performansi yang tidak jauh berbeda. Efek kanal atau efek *jet-flow* juga dapat ditemukan pada konfigurasi 3T-B, dimana terjadi peningkatan kecepatan aliran di daerah diantara turbin A dan B. Percepatan aliran ini dapat dirasakan sampai turbin C, dimana turbin C memperoleh kecepatan aliran yang lebih besar jika dibandingkan dengan turbin A dan B. Namun, aliran yang mengenai turbin C merupakan aliran yang sudah terganggu dan memiliki intensitas turbulensi yang tinggi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.46. Dari gambar tersebut terlihat bahwa turbin C bekerja pada daerah *wake* turbin A dan B yang memiliki nilai intensitas turbulensi mencapai 2-3 % (nilai intensitas turbulensi untuk aliran datang). Intensitas turbulensi yang terlalu tinggi menyebabkan penurunan kinerja turbin C jika dibandingkan dengan turbin A dan B, yang

dijelaskan dalam Gambar 4.43. Bahkan intensitas turbulensi yang tinggi ini menyebabkan kinerja turbin C lebih rendah jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin. Hal ini lah yang menyebabkan efektifitas *farm* pada konfigurasi 3T-B lebih rendah jika dibandingkan dengan konfigurasi 3T-A.



Gambar 4.46 Kontur intensitas turbulensi untuk konfigurasi 3T-B

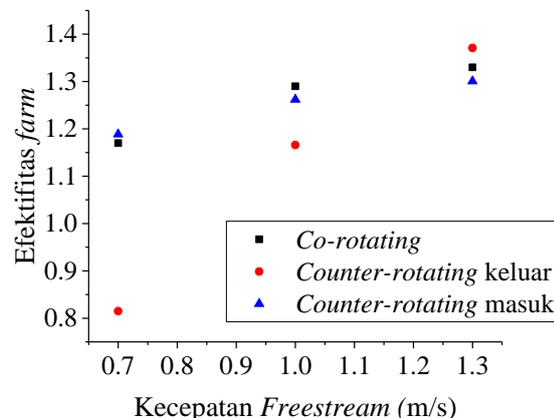
Tingginya intensitas turbulensi dari aliran datang yang mengenai turbin C merupakan indikasi bahwa aliran tersebut tidak stabil dan fluktuatif, sehingga lebih susah untuk terkonservasi. Hal ini menyebabkan *wake* turbin C lebih panjang jika dibandingkan dengan turbin A dan turbin B. Selain itu, penurunan kecepatan pada daerah *wake* turbin lebih besar jika dibandingkan dengan dua turbin lain. Kecepatan terendah pada daerah *wake* turbin C mencapai 0,2 – 0,4 m/s. Sementara itu, kecepatan terendah pada daerah *wake* turbin lain hanya mencapai 0,6 – 0,8 m/s.

Seperti pada konfigurasi sebelumnya, efek *blockage* pada konfigurasi 3T-B juga dapat diabaikan karena nilai *blockage ratio* pada konfigurasi ini hanya 1,33 %. *Blockage ratio* ini dapat menggambarkan adanya interaksi antara turbin dan dinding di sekitar turbin. Walaupun secara perhitungan nilai *blockage* dapat diabaikan, namun hasil simulasi menunjukkan bahwa fenomena *blockage* menyebabkan percepatan aliran di sisi turbin. Hasil

simulasi menunjukkan efek percepatan aliran tersebut berbeda antara sisi *windward* dan sisi *leeward*. Percepatan aliran pada sisi *leeward* muncul pada area yang lebih luas daripada sisi *windward*.

4.8 DISKUSI

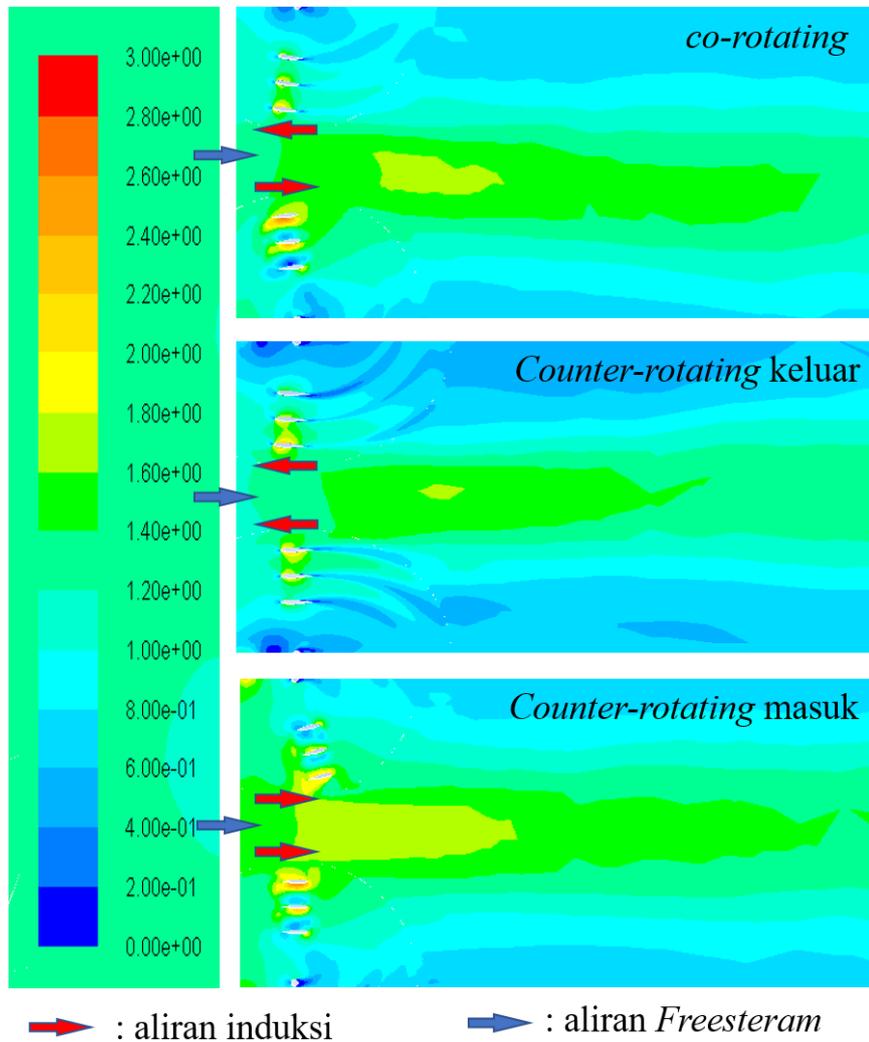
Hidrokinetik turbin merupakan salah satu teknologi konversi energi air menjadi energi listrik yang potensial untuk dikembangkan. Dari berbagai jenis hidrokinetik turbin yang telah dikembangkan melalui berbagai penelitian, hidrokinetik turbin jenis Darrieus *Straight Blade* merupakan jenis yang cocok diterapkan di Indonesia. Salah satu pengembangan yang dilakukan untuk meningkatkan kinerja (performansi) dan kemampuan *self-starting* dari turbin jenis ini adalah dengan penggunaan mekanisme *cascaded blade* dan mekanisme *passive-pitch*. Penggunaan mekanisme ini terbukti mampu meningkatkan kinerja turbin.



Gambar 4.47 Efektifitas *farm* untuk masing-masing konfigurasi

Turbin hidrokinetik dipasang dalam konfigurasi *array* turbin hidrokinetik dengan tujuan untuk memenuhi kapasitas produksi. Dalam suatu *array* hidrokinetik terdapat beberapa turbin yang dipasang pada suatu lokasi tertentu. Posisi turbin, jarak antara turbin dan arah rotasi turbin menjadi parameter penting yang sangat berpengaruh terhadap performansi masing-masing turbin. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah rotasi turbin terhadap performansi masing-masing turbin dalam konfigurasi *array*. Untuk mencapai tujuan penelitian, dilakukan pengujian konfigurasi *array* (studi eksperimental) di *Towink Tank*. Sementara itu,

studi numerik dengan *Computational Fluid Dynamics* digunakan untuk memperoleh informasi lebih mendalam terkait dengan aliran disekitar turbin dan di daerah interaksi aliran.



Gambar 4.48 Perbandingan kecepatan aliran pada daerah interaksi

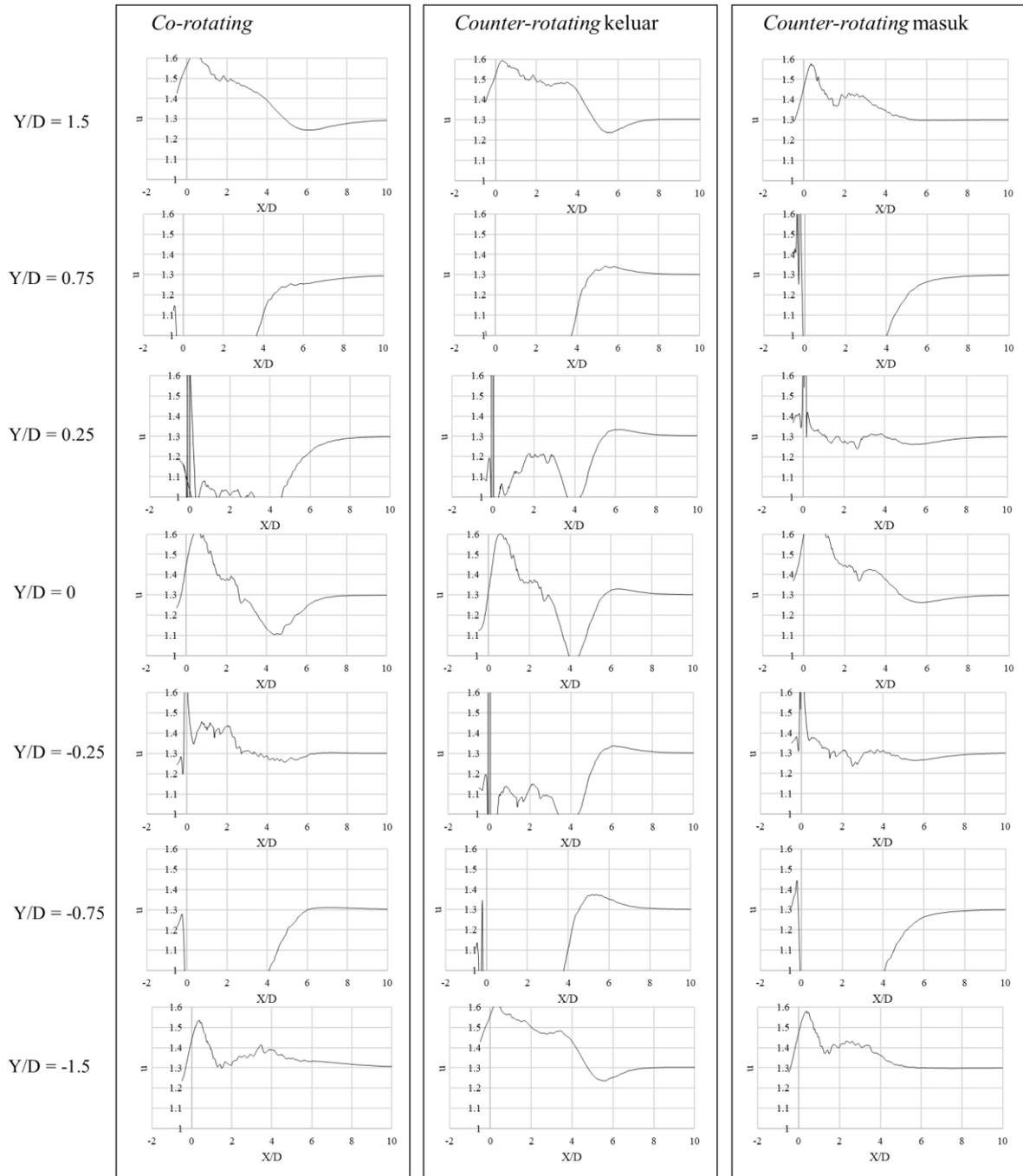
Hasil eksperimental menunjukkan bahwa masing-masing konfigurasi *array* turbin memiliki performansi yang berbeda. Gambar 4.47 menunjukkan perbandingan performansi turbin untuk masing-masing *array*. Performansi *array* direpresentasikan dengan nilai efektifitas *farm*. Konfigurasi *co-rotating* dan *counter-rotating* masuk memiliki nilai efektifitas *farm* yang hampir sama, sementara itu turbin dengan konfigurasi *counter-rotating* keluar memiliki performansi paling buruk. Hal ini terjadi karena arah aliran induksi yang berbeda,

seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7 (*array co-rotating*), 4.18 (*array counter-rotating* masuk) dan 4.28 (*array counter-rotating* keluar). Aliran induksi yang diakibatkan karena perputaran turbin A dan B pada konfigurasi *counter-rotating* keluar berlawanan arah dengan kecepatan *free stream*. Superposisi ini menyebabkan kecepatan yang rendah pada daerah interaksi aliran, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.48. Gambar 4.48 memberikan gambaran interaksi aliran yang terjadi untuk kecepatan *freestream* 1,3 m/s dan *cross-stream distance* sebesar 1.5D. Kecepatan pada daerah interaksi aliran untuk konfigurasi *counter-rotating* keluar lebih rendah jika dibandingkan dengan dua konfigurasi yang lain, yaitu hanya berkisar antara 1,2 – 1,6 m/s. Sementara itu kecepatan pada daerah interaksi untuk konfigurasi *co-rotating* adalah sebesar 1,4 – 1,6 m/s dan untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk adalah sebesar 1,6 – 1,8 m/s. Pada konfigurasi *counter-rotating* masuk, aliran induksi searah dengan kecepatan *freestream* sehingga superposisi ketiga kecepatan tersebut memberikan peningkatan kecepatan aliran yang cukup besar pada daerah interaksi aliran.

Terjadi percepatan aliran pada daerah interaksi aliran. Fenomena tersebut terjadi untuk semua konfigurasi. Superposisi aliran induksi dan aliran *freestream* mengakibatkan percepatan aliran. Nilai percepatan tersebut bergantung pada arah rotasi masing-masing turbin. Fenomena percepatan aliran pada daerah interaksi disebut sebagai efek kanal, atau beberapa literature menyebutnya sebagai *jet-flow effect*. Adanya percepatan aliran memberikan pengaruh yang baik terhadap performansi turbin, yang ditandai dengan peningkatan C_p dari masing-masing turbin dalam *array*. Masing-masing turbin pada *array* memiliki C_p yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan *stand-alone* turbin.

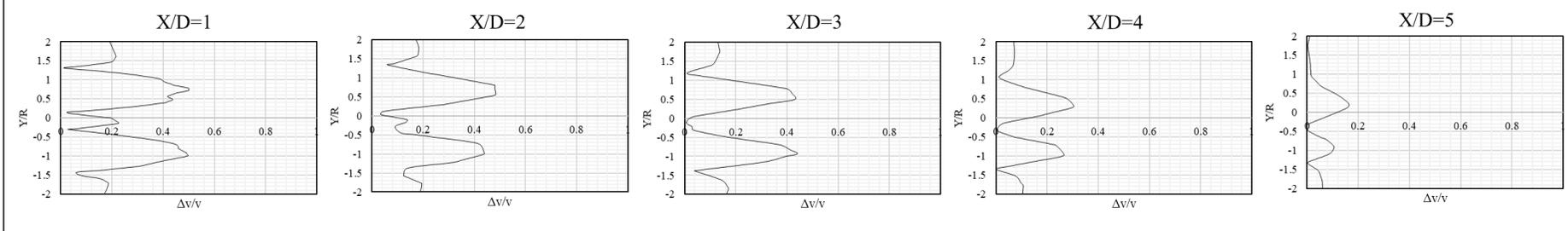
Karakteristik kecepatan aliran disekitar turbin lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.49. Daerah $Y/D = 0,25 - 1,5$ dan $-0,25 - -1,5$ merupakan profil kecepatan di area turbin (di dalam turbin), sementara itu $Y/D=0$ merupakan profil kecepatan di daerah interaksi aliran. Area turbin memiliki fluktuasi kecepatan yang cukup besar jika dibandingkan dengan daerah interaksi aliran. Dari gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa interaksi aliran pada konfigurasi counter rotating masuk memiliki kecepatan induksi yang lebih besar jika dibandingkan dengan konfigurasi yang lain. Fenomena ini dapat terlihat untuk $Y/D=0$. Kecepatan induksi yang besar

ini menyebabkan konfigurasi *counter-rotating* masuk memiliki performansi yang lebih besar jika dibandingkan dengan performansi konfigurasi yang lain.

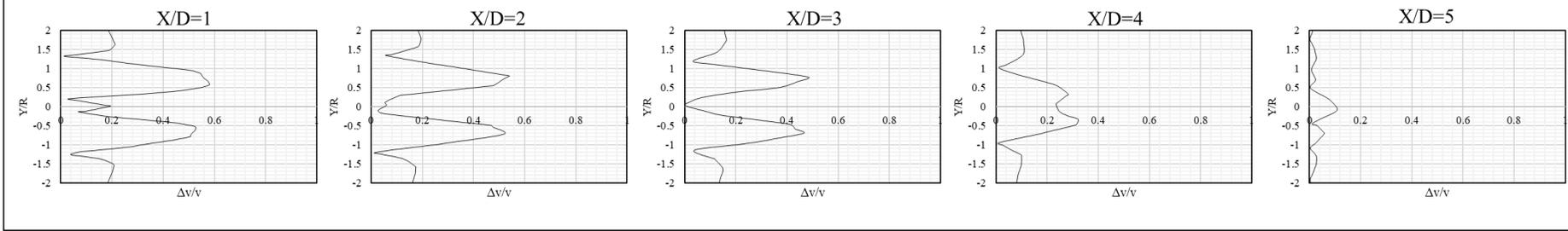


Gambar 4.49 Plot kecepatan sepanjang sumbu X (*Streamwise*)

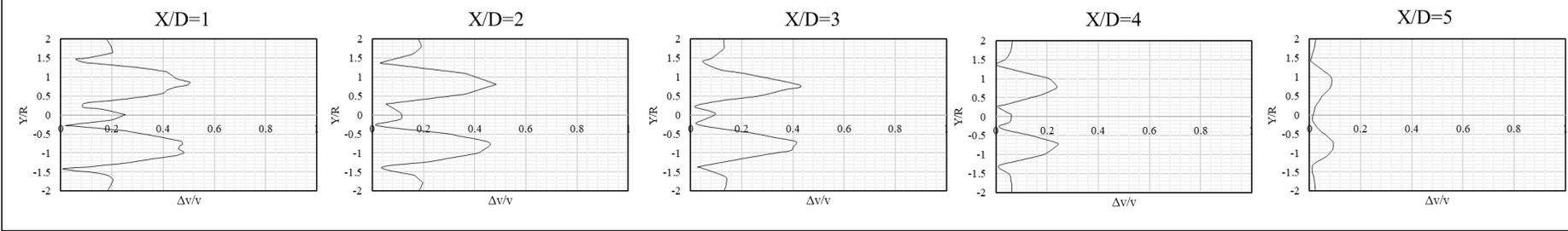
Co-rotating



Counter-rotating keluar

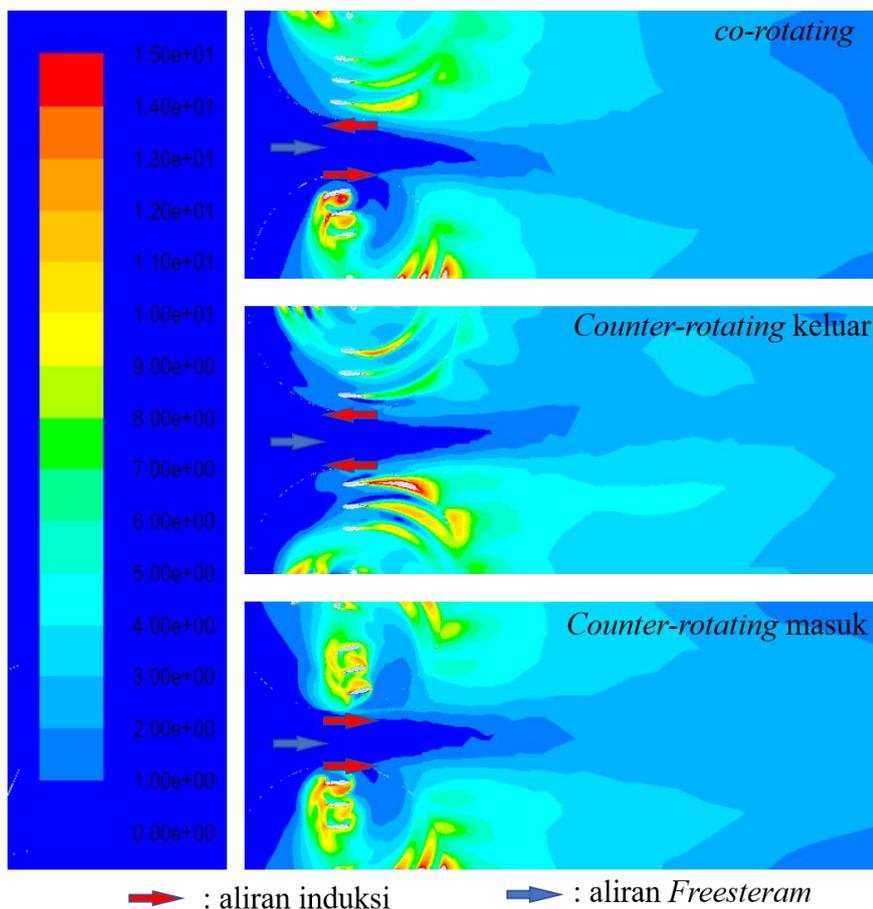


Counter-rotating masuk



Gambar 4.50 Profil penurunan kecepatan sepanjang sumbu Y (*Crosstream*)

Daerah *wake* merupakan daerah dibelakang turbin yang memiliki karakteristik kecepatan aliran yang rendah dan intensitas turbulensi yang tinggi. Muncul interaksi antara daerah *wake* dan daerah lain disekitar *wake* sehingga terjadi proses transfer energi dan *wake* terkonservasi pada jarak tertentu. Ciri dari *wake* yang sudah terkonservasi adalah nilai kecepatan *wake* kembali ke kecepatan semula, yaitu mendekati kecepatan *freestream*. Gambar 4.50 menunjukkan panjang *wake* untuk masing-masing konfigurasi. Wake pada daerah interaksi aliran ($Y/D = -0,75$ sampai $0,75$) telah terkonservasi setelah jarak $X/D=2$. Pada jarak tersebut, nilai penurunan kecepatan di bawah 10%. Namun pada konfigurasi *couter-rotating* keluar dan *counter-rotating* masuk, penurunan kecepatan justru meningkat pada jarak $X/D=4$. Secara umum, penurunan kecepatan sekitar 10% pada jarak $X/D=5$.



Gambar 4.51 Perbandingan *contour* intersitas turbulensi pada daerah interaksi aliran

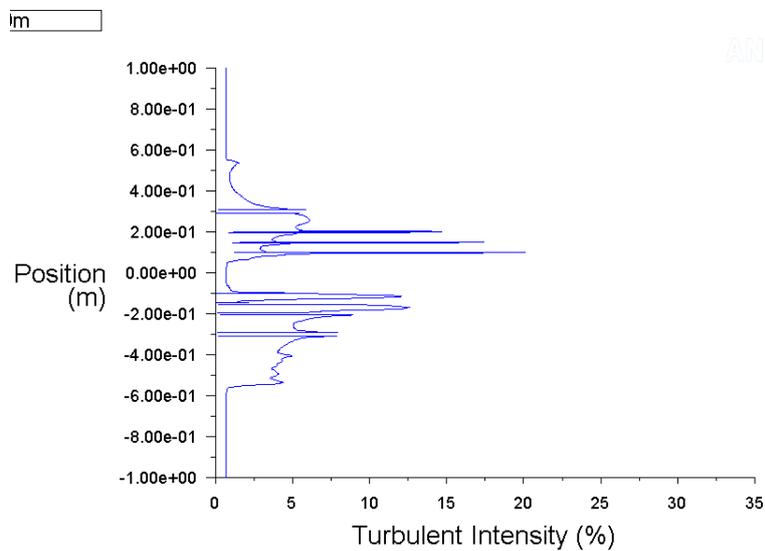
Gambar 4.51 menunjukkan perbandingan intensitas turbulensi pada daerah interaksi aliran untuk masing-masing konfigurasi. Intensitas turbulensi merupakan perbandingan antara fluktuasi kecepatan dengan kecepatan aliran rata-rata pada suatu titik. Karakteristik intensitas turbulensi di daerah sekitar turbin mempengaruhi kualitas aliran yang mengenai turbin, sehingga sangat berpengaruh terhadap performansi dari turbin tersebut. Perbedaan yang signifikan terjadi pada konfigurasi *counter-rotating* masuk. Pada konfigurasi tersebut, aliran induksi searah dengan aliran *freestream* sehingga fluktuasi aliran tidak terlalu besar. Sehingga memiliki intensitas turbulensi yang cenderung lebih kecil jika dibandingkan dengan konfigurasi yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa aliran pada daerah interaksi aliran cenderung lebih stabil. Karena konfigurasi *counter-rotating* masuk memiliki daerah interaksi aliran dengan kecepatan tinggi dan intensitas turbulensi yang cenderung rendah, maka efektifitas *farm* konfigurasi ini cenderung lebih tinggi jika dibandingkan dengan konfigurasi lain.

Perbedaan intensitas turbulensi yang signifikan bukan terjadi pada daerah interaksi aliran, perbedaan yang signifikan justru terjadi pada aliran di dalam turbin. Gambar 4.52 memberikan gambaran lebih jelas mengenai besarnya intensitas turbulensi di dalam turbin. Gambar tersebut merupakan plot intensitas turbulensi yang diambil pada garis $x=0$ m. Dari gambar tersebut bahwa intensitas turbulensi pada konfigurasi *counter-rotating* keluar lebih besar jika dibandingkan dengan kedua konfigurasi yang lain. Intensitas turbulensi pada konfigurasi *counter-rotating* keluar bahkan mencapai 25%. Sementara itu, intensitas turbulensi untuk konfigurasi *co-rotating* hanya mencapai 20% dan 12,5% untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk. Arah interaksi aliran yang berbeda-beda untuk masing-masing konfigurasi menyebabkan karakteristik intensitas turbulensi yang berbeda-beda.

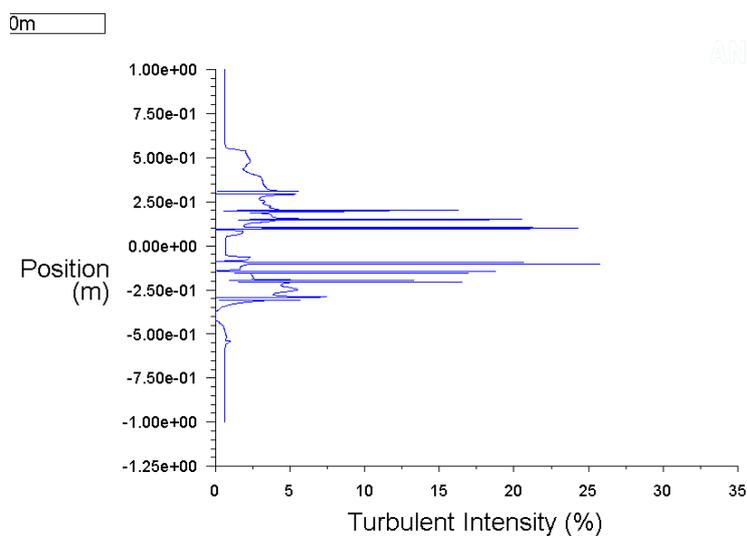
Intensitas turbulensi terbesar muncul pada daerah sekitar *blade*, terutama pada daerah *trailing edge*. Di sekitar daerah *trailing edge* terjadi separasi aliran sehingga banyak terbentuk struktur vorteks. Struktur vorteks merupakan aliran yang tidak stabil dan biasanya memiliki intensitas turbulensi yang besar.

Karakteristik aliran disekitar turbin vertikal aksis cukup kompleks. Bagian *downstream blade* dan *upstream blade* memiliki karakteristik aliran yang berbeda. Akibatnya adanya *upstream blade*, bagian *downstream* mendapatkan aliran yang

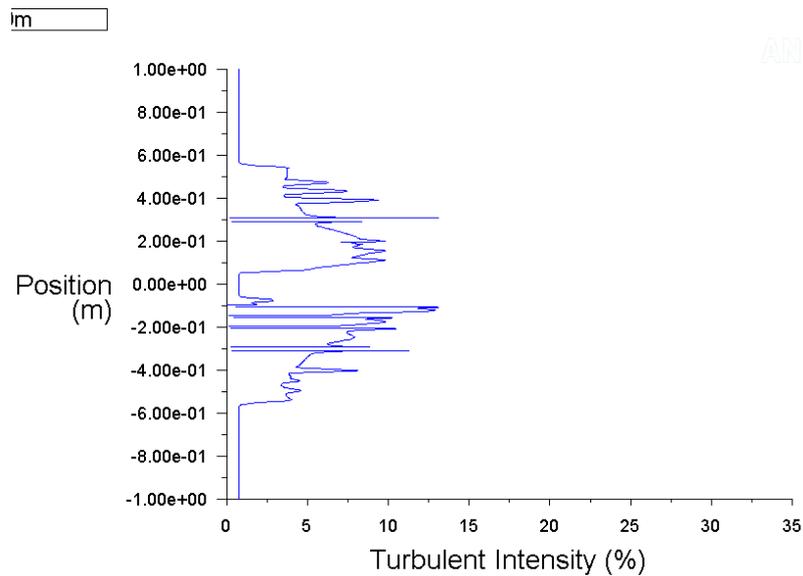
sudah terganggu dan banyak mengandung vorteks. Proses ekstraksi energi oleh *downstream blade* membuat struktur vorteks yang terbentuk menjadi semakin kompleks. Hal ini menyebabkan perbedaan intensitas turbulensi pada bagian *upstream* dan *downstream*. Bagian *downstream* memiliki intensitas turbulensi yang lebih besar. Selain itu, terdapat perbedaan yang signifikan antara intensitas turbulensi pada daerah produksi *lift* tinggi dan daerah produksi *lift* rendah. Daerah produksi *lift* tinggi cenderung memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi jika dibandingkan daerah produksi *lift* rendah. Daerah produksi *lift* tinggi cenderung memiliki kecepatan aliran yang lebih tinggi.



(a)



(b)



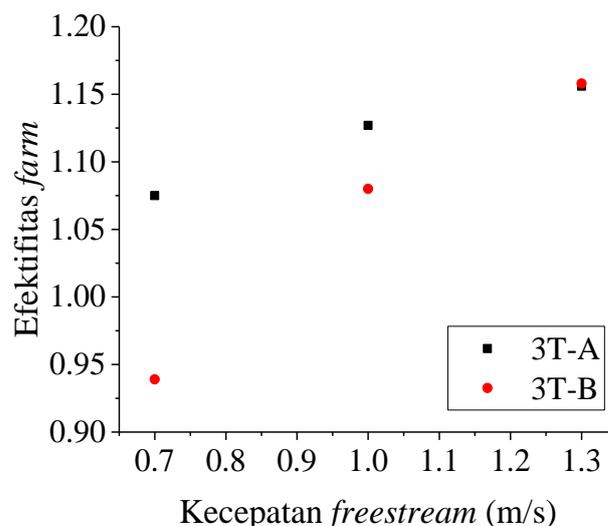
(c)

Gambar 4.52 Perbandingan plot intensitas turbulensi pada $x=0$ m pada konfigurasi (a). *co-rotating*; (b). *counter-rotating* keluar; (c). *counter-rotating* masuk

Turbulen yang terbentuk akibat perputaran turbin merupakan turbulen lemah yang mudah untuk terdisipasi. Turbulen membutuhkan suplai energi yang berkelanjutan untuk mengatasi kehilangan akibat efek kekentalan fluida. Jika tidak ada energi yang disuplai, turbulensi akan cepat menghilang atau terdisipasi [26]. Pada kasus turbin, pergerakan turbin akan menyebabkan banyak struktur vorteks terbentuk dan mensuplai kebutuhan energi dari turbulensi. Oleh karena itu, aliran turbulen di dalam area turbin akan selalu ada selama turbin berputar. Turbulensi ini merambat sampai ke daerah *downstream* (merambat ke arah sumbu x), sehingga daerah-daerah dibelakang turbin memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan turbulensi pada daerah *inlet*. Selain itu daerah *downstream* merupakan daerah yang memiliki banyak struktur vorteks yang terbentuk akibat ekstraksi energi oleh turbin, sehingga kecepatan pada daerah tersebut menjadi tidak stabil. Namun, efek pertambahan intensitas turbulensi ini tidak terlalu jauh. Semakin jauh dari turbin maka turbulensi akan semakin cepat terdisipasi. Sementara itu, perambatan turbulensi ke daerah sisi turbin tidak besar (perambatan ke sumbu y). Turbulensi yang merambat ke sisi turbin lebih mudah

terdisipasi daripada turbulensi yang merambat ke daerah *downstream*. Hal ini yang mengakibatkan turbulensi di daerah interaksi aliran bernilai rendah. Arah putaran turbin tidak memberikan efek yang signifikan terhadap intensitas turbulensi pada daerah interaksi aliran, namun justru memberikan efek yang besar terhadap intensitas turbulensi pada area di dalam turbin.

Berdasarkan hasil eksperimen yang telah dilakukan menunjukkan bahwa perubahan *cross-stream distance* memberikan efek yang cukup signifikan terhadap performansi *array*. Efektifitas *farm* cenderung mengalami peningkatan dengan jika jarak *cross-stream distance* dipersempit. Dengan *cross-stream distance* yang sempit, maka percepatan aliran yang terjadi di daerah interaksi meningkat. Hal ini sesuai dengan hukum Kontinuitas yang menyatakan bahwa penurunan luas penampang mengakibatkan peningkatan kecepatan aliran. Efek ini semakin besar jika kecepatan *freestream* semakin besar.



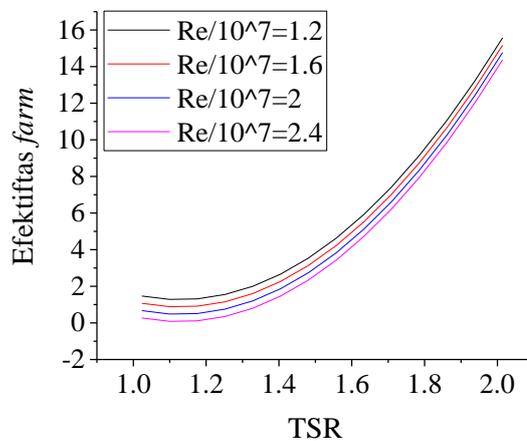
Gambar 4.53 Perbandingan kinerja konfigurasi tiga turbin

Turbin hidrokinetik merupakan jenis turbin arus yang dapat diterapkan di berbagai lokasi instalasi, sebagai contoh di kanal, di sungai ataupun di laut. Masing-masing lokasi instalasi memiliki karakteristik yang berbeda. Sungai dan kanal biasanya memiliki arus searah. Sementara itu, laut memiliki aliran dengan arah arus yang berubah-ubah dalam periode tertentu. Untuk lokasi pemasangan yang memiliki arus yang sering berubah arah, pemasangan konfigurasi *counter-rotating* masuk justru merugikan ketika arus berubah dari arah yang berlawanan. Ketika arus

berubah dari arah yang berlawanan, maka konfigurasi *counter-rotating* masuk akan berubah menjadi konfigurasi *counter-rotating* keluar yang memiliki nilai efektifitas *farm* lebih buruk. Oleh karena itu, pemasangan *array* turbin jenis konfigurasi *co-rotating* lebih dianjurkan untuk digunakan pada lokasi yang memiliki arah arus berubah.

Pemasangan *array* dalam satu baris kurang efektif jika diaplikasikan pada lokasi instalasi yang sempit. Agar kapasitas produksi tetap terpenuhi, maka *array* turbin biasanya disusun dalam beberapa baris (terdiri dari turbin *upstream* dan turbin *downstream*). Kelemahan dari metode pemasangan ini adalah kinerja turbin *downstream* turbin yang tidak optimal karena bekerja pada daerah *wake* turbin *upstream*. Turbin *downstream* sebenarnya harus dipasang di luar daerah *wake* agar pengaruh buruk *wake* dapat dihindari. Namun dengan keterbatasan lokasi instalasi, biasanya pemasangan turbin *downstream* tetap dipasang di daerah *far wake*. Untuk mengurangi efek buruk daerah *wake* maka turbin dipasang dalam konfigurasi *zig-zag*, seperti pada konfigurasi 3T-A dan 3T-B. Gambar 4.53 menunjukkan perbandingan efektifitas *farm* untuk konfigurasi 3 turbin. Dari Gambar tersebut dapat diketahui bahwa konfigurasi 3T-A memiliki performansi lebih baik jika dibandingkan dengan konfigurasi 3T-B. Pada konfigurasi 3T-A, terdapat dua buah turbin *downstream* yang bekerja berdampingan. Interaksi kedua turbin ini akan menimbulkan efek kanal dan meningkatkan performansi masing-masing turbin. Efek konstruktif ini mampu mengkompensasi efek destruktif akibat *wake* turbin *upstream* sehingga turbin *downstream* tetap mengalami peningkatan kinerja. Sementara itu pada konfigurasi 3T-B, hanya terdapat sebuah turbin *downstream* sehingga tidak muncul efek kanal, akibatnya turbin *downstream* mengalami penurunan kinerja yang cukup signifikan. Hal inilah yang menyebabkan konfigurasi 3T-B memiliki performansi yang lebih buruk jika dibandingkan dengan konfigurasi 3T-A. Fenomena yang terjadi pada konfigurasi tiga turbin semakin menguatkan bahwa pemasangan dua turbin yang saling berdampingan (*side-by-side*) memberikan peningkatan performansi yang cukup signifikan. Bahkan peningkatan performansi ini mampu mengkompensasi efek buruk yang terjadi akibat *wake*.

Analisa dimensional dengan menggunakan teorema Pi-Buckingham dilakukan untuk mengetahui keterkaitan masing-masing variable yang berpengaruh terhadap kinerja *array* turbin. Variabel terkait yang diduga berpengaruh meliputi daya, diameter turbin, massa jenis fluida, viskositas fluida, kecepatan sudut turbin dan kecepatan *freestream*. Dengan menggunakan teorema Pi-Buckingham, diketahui bahwa kinerja dari *array* turbin dipengaruhi oleh TSR rata-rata dari semua turbin dan bilangan *Reynold*, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.54. Analisa dimensional dengan menggunakan teorima Pi-Buckingham dapat dilihat lebih lanjut dalam Lampiran 8. Gambar tersebut merupakan grafik hubungan variabel pada konfigurasi *co-rotating*. Untuk nilai bilangan Reynold yang sama, peningkatan TSR menyebabkan peningkatan efektifitas *farm*. Namun untuk nilai TSR yang sama, semakin tinggi bilangan Reynold, maka semakin rendah efektifitas *farm*. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja turbin rendah, karena bilangan Reynold yang tinggi namun TSR turbin rendah. Gambar 4.54 dapat dijadikan ajuan untuk menentukan efektifitas *farm* jika bilangan Reynold dan TSR rata-rata diketahui.



Gambar 4.54 Pengaruh Re dan TSR terhadap kinerja *array*

BAB V

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa

- a. Pemasangan turbin dalam konfigurasi *array* mampu meningkatkan performansi dari masing-masing turbin, sehingga *array* memiliki performansi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *stand alone* turbin.
- b. Interaksi aliran antar dua turbin menyebabkan superposisi kecepatan antara kecepatan induksi dan kecepatan *freestream* sehingga terjadi percepatan aliran. Selain itu, percepatan aliran juga disebabkan karena *cross-stream distance* yang dekat sehingga muncul efek kanal atau *jet-type flowfield*. Nilai superposisi kecepatan berbeda untuk masing-masing konfigurasi dimana konfigurasi *counter-rotating* masuk menghasilkan superposisi kecepatan aliran yang lebih besar daripada konfigurasi yg lain. Hal ini juga mengakibatkan intensitas turbulensi pada konfigurasi *counter-rotating* masuk cenderung lebih rendah.
- c. Pada kecepatan yang tinggi dan jarak *crosstreem-distance* yang rendah, efek interaksi alirsn semakin besar. Semua konfigurasi menunjukkan efek konstruktif yang ditandai dengan peningkatan nilai *efektifitas farm*.
- d. Panjang daerah *wake* hampir sama untuk semua konfigurasi. Pada $X/D=5$ nilai penurunan kecepatan adalah sekitar 10%.
- e. Berdasarkan hasil perhitungan *efektifitas farm*, diketahui bahwa konfigurasi *co-rotating* dan *counter-rotating* masuk memiliki konfigurasi yang hampir sama, yaitu 1,33 untuk konfigurasi *co-rotating* dan 1,37 untuk konfigurasi *counter-rotating* masuk. Namun konfigurasi *co-rotating* lebih direkomendasikan karena performasinya tidak dipengaruhi oleh arah aliran *freestream*.
- f. Pada konfigurasi tiga turbin, konfigurasi tiga turbin A (3T-A) memiliki *efektifitas farm* yang lebih besar jika dibandingkan dengan konfigurasi tiga turbin B (3T-B) terutama untuk kecepatan yang rendah.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Vennell, S. W. Funke, S. Draper, C. Stevens, and T. Divett, 'Designing large arrays of tidal turbines: A synthesis and review', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 454–472, 2015.
- [2] S. W. Funke, P. E. Farrell, and M. D. Piggott, 'Tidal turbine array optimisation using the adjoint approach', *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 658–673, 2014.
- [3] Y. Li and S. M. Calışal, 'Modeling of twin-turbine systems with vertical axis tidal current turbines: Part I-Power output', *Ocean Eng.*, vol. 37, no. 7, pp. 627–637, 2010.
- [4] J. Bartl, *Wake Measurements Behind an Array of Tow Model Wind Turbines*, no. October. 2011.
- [5] B. Sanderse, 'Aerodynamics of wind turbine wakes: Literature review', *Energy Res. Cent. Netherlands*, pp. 1–46, 2009.
- [6] V. Movahed, H. Sharafi, M. H. Baziar, and H. Shahnazari, 'An Experimental Investigation on the Effects of Turbine Rotation Directions on the Wake Interference of Wind Turbines', *5th Int. Conf. Earthq. Eng.*, no. January, pp. 1–16, 2011.
- [7] R. Conzemius, 'Wind turbine and sodar observations of wakes in a large wind farm', in *19th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*, 2010, p. 7.
- [8] W. Yuan, O. Ahmed, W. Tian, and H. Hu, 'An Experimental Investigation on the Effect of Turbine Rotation Direction on the Wake Interference of Wind Turbine', in *Aiaa*, 2013, vol. 3815, no. January, pp. 1–18.
- [9] N. J. Lee, I. C. Kim, C. G. Kim, B. S. Hyun, and Y. H. Lee, 'Performance study on a counter-rotating tidal current turbine by CFD and model experimentation', *Renew. Energy*, vol. 79, no. 1, pp. 122–126, 2015.
- [10] M. Borg, A. Shires, and M. Collu, 'Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modelling state of the art. part I: Aerodynamics', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 1214–1225, 2014.
- [11] C. S. Ferreira *et al.*, 'Comparison of aerodynamic models for Vertical Axis Wind Turbines', *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 524, p. 12125, 2014.
- [12] G. Tescione, C. J. Simão Ferreira, and G. J. W. van Bussel, 'Analysis of a free vortex wake model for the study of the rotor and near wake flow of a vertical axis wind turbine', *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 552–563, 2016.
- [13] H. Beri and Y. Yao, 'Double Multiple Streamtube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine', *Energy Power Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 262–270, 2011.
- [14] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain, 'Vertical axis wind turbine - A review of various configurations and design techniques', *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1926–1939, 2012.
- [15] N. Fujisawa and S. Shibuya, 'Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades', *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 89, no. 2, pp. 201–214, 2001.
- [16] R. Hantoro, I. K.A.P Utama, E. Erwandi, and A. Sulistyono, 'An

- Experimental Investigation of Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine’, *ITB J. Eng. Sci.*, vol. 43, no. 1, pp. 27–40, 2011.
- [17] F. Jing, Q. Sheng, and L. Zhang, ‘Experimental research on tidal current vertical axis turbine with variable-pitch blades’, *Ocean Eng.*, vol. 88, pp. 228–241, 2014.
- [18] K. K. M. N. P. Samaraweera, K. a B. Pathirathna, a G. T. Sugathapala, and S. Lanka, ‘Development of Darrieus-type vertical axis wind turbines for stand-alone applications’, *Int. Conf. Sustain. Built Environ.*, no. December 2010, pp. 13–14, 2010.
- [19] H. Faez Hassan, A. El-Shafie, and O. A. Karim, ‘Tidal current turbines glance at the past and look into future prospects in Malaysia’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 8, pp. 5707–5717, 2012.
- [20] Erwandi *et al.*, ‘Rancang Bangun Prototipe Wave-Current Rotor Converter untuk Konversi Energi Kinetik Arus Laut dan Energi Potensial Gelombang Laut Menjadi Energi Listrik’, pp. 1–24, 2015.
- [21] K. R. Dixon, *The Near Wake Structure of a Vertical Axis Wind Turbine*. 2008.
- [22] I. Paraschivoiu, F. Delclaux, P. Fraunié, and C. Béguier, ‘Aerodynamic Analysis of the Darrieus Wind Turbines Including Secondary Effects’, *J. Energy*, vol. 7, no. 5, pp. 416–422, 1983.
- [23] A. H. Birjandi, ‘Effect of Flow and Fluid Structures on the Performance of Vertical River Hydrokinetic Turbines’, p. 238, 2012.
- [24] M. Ragheb and A. M. Ragheb, ‘Wind Turbines Theory - The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio’, vol. 1, no. 1, 1926.
- [25] S. Eriksson, H. Bernhoff, and M. Leijon, ‘Evaluation of different turbine concepts for wind power’, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 5, pp. 1419–1434, 2008.
- [26] H. Tennekes and J. . Lumley, *A first course in turbulence*. Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press.
- [27] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD - Wilcox*. California: DCW Industries.
- [28] K. Mikkelsen, ‘Effect of free stream turbulence on wind turbine performance’, no. June, 2013.
- [29] A. Posa, C. M. Parker, M. C. Leftwich, and E. Balaras, ‘Wake structure of a single vertical axis wind turbine’, *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 61, pp. 75–84, 2016.
- [30] C. J. S. Ferreira, A. Van Zuijlen, H. Bijl, G. Van Bussel, and G. Van Kuik, ‘Simulating dynamic stall in a two-dimensional vertical-axis wind turbine : verification and validation with particle image velocimetry data’, no. May 2009, pp. 1–17, 2010.
- [31] C. Li, S. Zhu, Y. Xu, and Y. Xiao, ‘2 . 5D large eddy simulation of vertical axis wind turbine in consideration of high angle of attack fl ow’, *Renew. Energy*, vol. 51, pp. 317–330, 2013.
- [32] C. Garrett and P. Cummins, ‘The power potential of tidal currents in channels.’, *Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 461, no. 2060, pp. 2563–2572, 2005.
- [33] R. Vennell, ‘Exceeding the Betz limit with tidal turbines’, *Renew. Energy*,

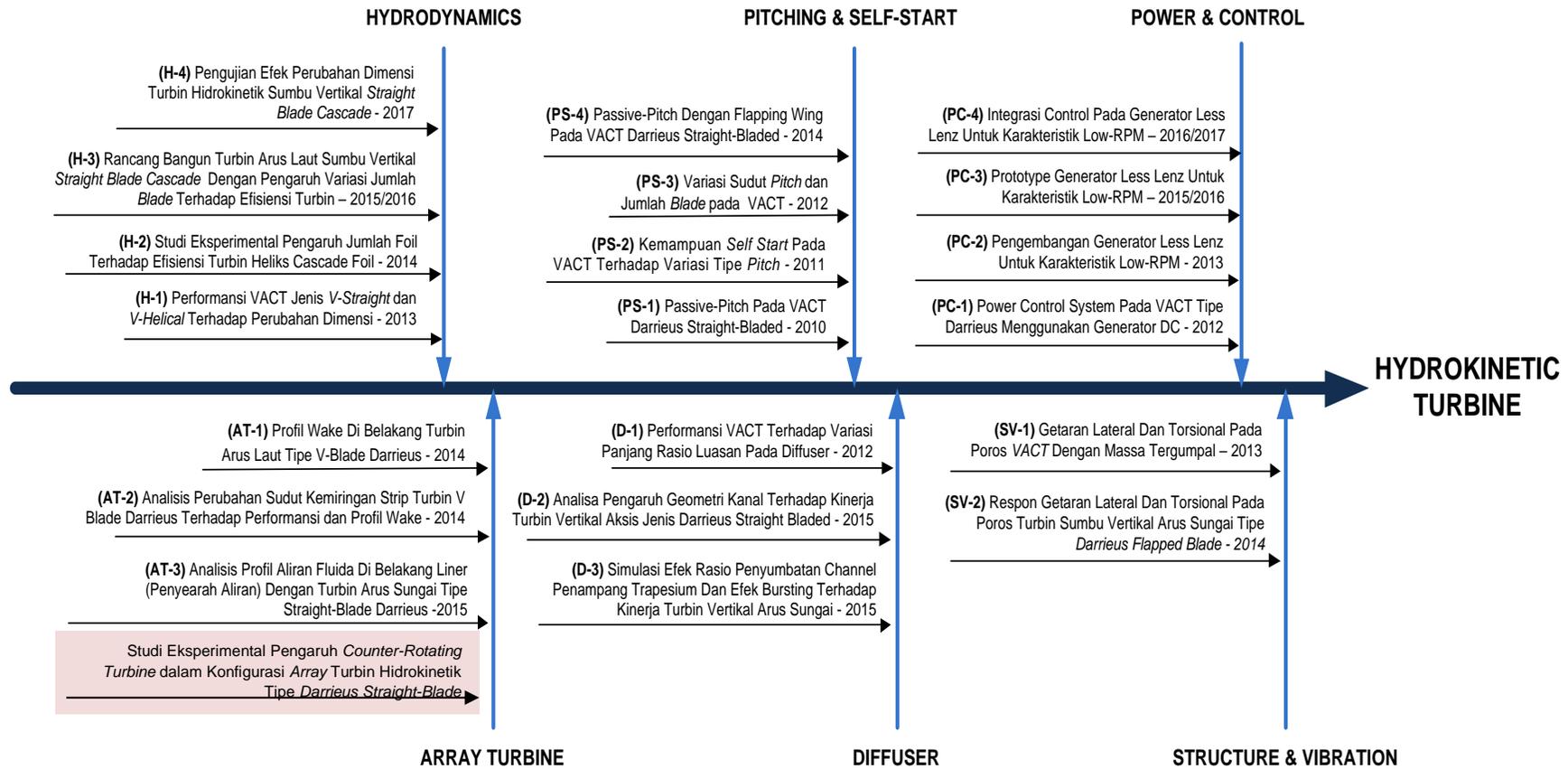
- vol. 55, pp. 277–285, 2013.
- [34] R. Vennell, ‘Tuning turbines in a tidal channel’, *J. Fluid Mech.*, vol. 663, no. November, pp. 253–267, 2010.
- [35] R. Vennell, ‘The energetics of large tidal turbine arrays’, *Renew. Energy*, vol. 48, pp. 210–219, 2012.
- [36] C. A. Douglas, G. P. Harrison, and J. P. Chick, ‘Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine’, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part M-Journal Eng. Marit. Environ.*, vol. 222, no. M1, pp. 1–12, 2008.
- [37] R. Vennell, ‘Tuning tidal turbines in-concert to maximise farm efficiency’, *J. Fluid Mech.*, vol. 671, no. November, pp. 587–604, 2011.
- [38] Y. Li, ‘On the definition of the power coefficient of tidal current turbines and efficiency of tidal current turbine farms’, *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 868–875, 2014.
- [39] A. J. MacLeod, Be. S. Barnes, Be. K. G Rados, and I. G. Bryden, ‘Wake effects in tidal current turbine farms’, *Marec*, p. 5, 2002.
- [40] S. H. Lee, S. H. Lee, K. Jang, J. Lee, and N. Hur, ‘A numerical study for the optimal arrangement of ocean current turbine generators in the ocean current power parks’, *Curr. Appl. Phys.*, vol. 10, no. 2 SUPPL., pp. S137–S141, 2010.
- [41] R. Malki, I. Masters, A. J. Williams, and T. Nick Croft, ‘Planning tidal stream turbine array layouts using a coupled blade element momentum - computational fluid dynamics model’, *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 46–54, 2014.
- [42] A. S. Bahaj and L. E. Myers, ‘Shaping array design of marine current energy converters through scaled experimental analysis’, *Energy*, vol. 59, pp. 83–94, 2013.
- [43] M. E. Harrison, W. M. J. Batten, L. E. Myers, and A. S. Bahaj, ‘A comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines’, *Renew. Power Gener.*, vol. 4, no. 6, pp. 613–627, 2010.
- [44] R. Hantoro, E. Septyaningrum, N. Hamidah, and G. Nugroho, ‘An Analysis of Wake Behind V-Blade Darrieus Ocean Current Turbine Profile Based On Computational Fluid Dynamics’, vol. 3, no. 1, pp. 1–11, 2012.
- [45] H. . Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics*, vol. M. 2007.
- [46] J. F. Van Der Auweraert, ‘Modeling of wind turbine wake with a sliding mesh’, 2016.
- [47] G. Zhao, R. S. Yang, Y. Liu, and P. F. Zhao, ‘Hydrodynamic performance of a vertical-axis tidal-current turbine with different preset angles of attack’, *J. Hydrodyn.*, vol. 25, no. 2, pp. 280–287, 2013.
- [48] ‘Ask the experts ANSYS CFD CONVERGENCE’, no. October, pp. 78–79, 2014.
- [49] ANSYS, ‘ANSYS USER GUIDE’, 2015.
- [50] F. R. Menter, ‘Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications’, *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, 1994.
- [51] P. Marsh, D. Ranmuthugala, I. Penesis, and G. Thomas, ‘Numerical investigation of the influence of blade helicity on the performance

- characteristics of vertical axis tidal turbines’, *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 926–935, 2015.
- [52] B. K. Kirke and L. Lazauskas, ‘Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch’, *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 893–897, 2011.
- [53] B. Yang and C. Lawn, ‘Fluid dynamic performance of a vertical axis turbine for tidal currents q ’, *Renew. Energy*, vol. 36, no. 12, pp. 3355–3366, 2011.
- [54] S. Zanforlin, F. Burchi, and N. Bitossi, ‘Hydrodynamic Interactions between Three Closely-spaced Vertical Axis Tidal Turbines’, *Energy Procedia*, vol. 101, no. September, pp. 520–527, 2016.
- [55] M. S. Siddiqui, A. Rasheed, T. Kvamsdal, and M. Tabib, ‘Effect of turbulence intensity on the performance of an offshore vertical axis wind turbine’, *Energy Procedia*, vol. 80, no. 1876, pp. 312–320, 2015.
- [56] M. Ahmadi-Baloutaki, R. Carriveau, and D. S. K. Ting, ‘A wind tunnel study on the aerodynamic interaction of vertical axis wind turbines in array configurations’, *Renew. Energy*, vol. 96, pp. 904–913, 2016.
- [57] I. Ross and A. Altman, ‘Wind tunnel blockage corrections: Review and application to Savonius vertical-axis wind turbines’, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, no. 5, pp. 523–538, 2011.

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Road map penelitian hidrokinetik turbin



LAMPIRAN 2

Kinerja *stand-alone* turbin

Kecepatan <i>freestream</i>	Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	C _p
0.7	37.63	1.06	3.94	1.126355	27.44	4.17189532	0.15
1	55.46	2.23	5.81	1.162065	80	12.94641637	0.16
1.3	73.29	3.83	7.68	1.181294	175.76	29.39235605	0.17

LAMPIRAN 3

Kinerja Konfigurasi *Co-rotating*

a. Kinerja masing-masing turbin

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A							Turbin B						
			Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp	Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp
1	0.7	2.5	35.788	1.006	3.7492	1.0712	27.44	3.7734	0.1375	39.591	1.113	4.1477	1.1850	27.44	4.6180	0.1683
2		2	40.539	1.140	4.2469	1.2134	27.44	4.8416	0.1764	42.407	1.193	4.4426	1.2693	27.44	5.2982	0.1931
3		1.5	41.493	1.140	4.3469	1.2420	27.44	4.9556	0.1806	40.630	1.143	4.2565	1.2161	27.44	4.8635	0.1772
4	1	2.5	61.015	2.451	6.3920	1.2784	80	15.6685	0.1959	62.584	2.514	6.5564	1.3113	80	16.4847	0.2061
5		2	61.822	2.484	6.4766	1.2953	80	16.0859	0.2011	63.382	2.546	6.6400	1.3280	80	16.9079	0.2113
6		1.5	64.207	2.484	6.7264	1.3453	80	16.7064	0.2088	62.569	2.546	6.5548	1.3110	80	16.6910	0.2086
7	1.3	2.5	86.242	4.504	9.0349	1.3900	175.76	40.6946	0.2315	85.577	4.469	8.9652	1.3793	175.76	40.0690	0.2280
8		2	83.106	4.340	8.7064	1.3394	175.76	37.7889	0.2150	84.358	4.406	8.8375	1.3596	175.76	38.9356	0.2215
9		1.5	86.921	4.340	9.1060	1.4009	175.76	39.5237	0.2249	84.508	4.406	8.8532	1.3620	175.76	39.0050	0.2219

b. Efektifitas *farm*

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A		Turbin B		Daya total (Watt)	Daya <i>Stand-alone</i> (Watt)	Efektifitas <i>farm</i>
			Daya (Watt)	Cp	Daya (Watt)	Cp			
1	0.7	2.5	3.7734	0.1375	4.6180	0.1683	8.3914	4.17189532	1.005703
2		2	4.8416	0.1764	5.2982	0.1931	10.1398	4.17189532	1.215245
3		1.5	4.9556	0.1806	4.8635	0.1772	9.8191	4.17189532	1.176809
4	1	2.5	15.6685	0.1959	16.4847	0.2061	32.1533	12.9464164	1.241783
5		2	16.0859	0.2011	16.9079	0.2113	32.9938	12.9464164	1.274245
6		1.5	16.7064	0.2088	16.6910	0.2086	33.3974	12.9464164	1.289831
7	1.3	2.5	40.6946	0.2315	40.0690	0.2280	80.7636	29.392356	1.373888
8		2	37.7889	0.2150	38.9356	0.2215	76.7246	29.392356	1.305179
9		1.5	39.5237	0.2249	39.0050	0.2219	78.5287	29.392356	1.33587

LAMPIRAN 4

Kinerja Konfigurasi *Counter-rotating* keluar

a. Kinerja masing-masing turbin

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A							Turbin B						
			Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp	Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp
1	0.7	2.5	36.779	1.034	3.8530	1.1009	27.44	3.9852	0.1452	29.071	0.818	3.0455	0.8702	27.44	2.4899	0.0907
2		2	39.496	1.111	4.1376	1.1822	27.44	4.5957	0.1675	31.609	0.889	3.3114	0.9461	27.44	2.9436	0.1073
3		1.5	36.794	1.035	3.8546	1.1013	27.44	3.9884	0.1453	30.877	0.868	3.2347	0.9242	27.44	2.8088	0.1024
4	1	2.5	54.085	2.173	5.6661	1.1332	80	12.3115	0.1539	44.804	1.800	4.6938	0.9388	80	8.4487	0.1056
5		2	55.227	2.219	5.7857	1.1571	80	12.8370	0.1605	49.545	1.990	5.1904	1.0381	80	10.3313	0.1291
6		1.5	64.546	2.593	6.7620	1.3524	80	17.5345	0.2192	54.839	2.203	5.7450	1.1490	80	12.6571	0.1582
7	1.3	2.5	71.392	3.729	7.4791	1.1506	175.76	27.8864	0.1587	60.537	3.162	6.3420	0.9757	175.76	20.0511	0.1141
8		2	70.959	3.706	7.4338	1.1437	175.76	27.5495	0.1567	67.481	4.406	7.0694	1.0876	175.76	31.1461	0.1772
9		1.5	92.298	4.820	9.6694	1.4876	175.76	46.6109	0.2652	78.801	4.116	8.2553	1.2701	175.76	33.9751	0.1933

b. Efektifitas *farm*

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A		Turbin B		Daya total (Watt)	Daya <i>Stand-alone</i> (Watt)	Efektifitas <i>farm</i>
			Daya (Watt)	C _p	Daya (Watt)	C _p			
1	0.7	2.5	3.9852	0.1452	2.4899	0.0907	6.4750	4.171895	0.77603
2		2	4.5957	0.1675	2.9436	0.1073	7.5393	4.171895	0.903582
3		1.5	3.9884	0.1453	2.8088	0.1024	6.7972	4.171895	0.814645
4	1	2.5	12.3115	0.1539	8.4487	0.1056	20.7602	12.94642	0.801773
5		2	12.8370	0.1605	10.3313	0.1291	23.1683	12.94642	0.894776
6		1.5	17.5345	0.2192	12.6571	0.1582	30.1916	12.94642	1.166023
7	1.3	2.5	27.8864	0.1587	20.0511	0.1141	47.9375	29.39236	0.815476
8		2	27.5495	0.1567	31.1461	0.1772	58.6956	29.39236	0.998483
9		1.5	46.6109	0.2652	33.9751	0.1933	80.5860	29.39236	1.370866

LAMPIRAN 5

Kinerja Konfigurasi *Counter-rotating* masuk

a. Kinerja masing-masing turbin

No	Kecepatan <i>Freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A							Turbin B						
			Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp	Rpm	Torsi (N.m)	ω (rad/s)	TSR	Daya air (Watt)	Daya mekanik (Watt)	Cp
1	0.7	2.5	40.234	1.183	4.2149	1.2043	27.44	4.9855	0.1817	42.060	1.131	4.4062	1.2589	27.44	4.9855	0.1817
2		2	39.866	1.056	4.1765	1.1933	27.44	4.4118	0.1608	37.562	1.121	3.9351	1.1243	27.44	4.4118	0.1608
3		1.5	40.260	1.176	4.2177	1.2051	27.44	4.9584	0.1807	41.804	1.132	4.3794	1.2513	27.44	4.9584	0.1807
4	1	2.5	62.489	2.457	6.5465	1.3093	80	16.0853	0.2011	61.160	2.510	6.4073	1.2815	80	16.0853	0.2011
5		2	62.572	2.397	6.5552	1.3110	80	15.7158	0.1964	59.676	2.514	6.2518	1.2504	80	15.7158	0.1964
6		1.5	62.372	2.501	6.5342	1.3068	80	16.3397	0.2042	62.244	2.506	6.5208	1.3042	80	16.3397	0.2042
7	1.3	2.5	84.745	4.192	8.8780	1.3658	175.76	37.2147	0.2117	80.261	4.426	8.4083	1.2936	175.76	37.2147	0.2117
8		2	85.278	4.272	8.9339	1.3744	175.76	38.1621	0.2171	81.790	4.454	8.5684	1.3182	175.76	38.1621	0.2171
9		1.5	84.484	4.412	8.8507	1.3616	175.76	39.0525	0.2222	82.685	4.318	8.6622	1.3326	175.76	37.4068	0.2128

b. Efektifitas *farm*

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Variasi Jarak (D)	Turbin A		Turbin B		Daya total (Watt)	Daya <i>Stand- alone</i> (Watt)	Efektifitas <i>farm</i>
			Daya (Watt)	Cp	Daya (Watt)	Cp			
1	0.7	2.5	4.9855	0.1817	4.9855	0.1817	9.9709	4.171895	1.195011
2		2	4.4118	0.1608	4.4118	0.1608	8.8235	4.171895	1.057495
3		1.5	4.9584	0.1807	4.9584	0.1807	9.9168	4.171895	1.188525
4	1	2.5	16.0853	0.2011	16.0853	0.2011	32.1705	12.94642	1.242448
5		2	15.7158	0.1964	15.7158	0.1964	31.4315	12.94642	1.213907
6		1.5	16.3397	0.2042	16.3397	0.2042	32.6794	12.94642	1.262104
7	1.3	2.5	37.2147	0.2117	37.2147	0.2117	74.4294	29.39236	1.266135
8		2	38.1621	0.2171	38.1621	0.2171	76.3243	29.39236	1.29837
9		1.5	39.0525	0.2222	37.4068	0.2128	76.4592	29.39236	1.300666

LAMPIRAN 6

Kinerja konfigurasi 3T-A

a. Kinerja turbin A

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin A					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	Cp	TSR
1	0.7	27.44	37.631	3.942	1.058	4.172	0.152	1.126
2	1	80	55.462	5.810	2.228	12.946	0.162	1.162
3	1.3	175.76	73.294	7.678	3.828	29.392	0.167	1.181

b. Kinerja turbin B

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin B					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	Cp	TSR
1	0.7	27.44	41.584	4.356	1.169	5.095	0.186	1.245
2	1	80	59.979	6.284	2.410	15.141	0.189	1.257
3	1.3	175.76	78.375	8.211	4.093	33.609	0.191	1.263

c. Kinerja turbin C

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin B					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	Cp	TSR
1	0.7	27.44	37.722	3.952	1.061	4.192	0.153	1.129
2	1	80	61.058	6.397	2.453	15.691	0.196	1.279
3	1.3	175.76	84.394	8.841	4.408	38.969	0.222	1.360

d. Efektifitas farm

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Daya Total (Watt)	Efektifitas <i>farm</i>
1	0.7	27.44	13.459	1.075
2	1	80	43.778	1.127
3	1.3	175.76	101.970	1.156

LAMPIRAN 7

Kinerja konfigurasi 3T-B

a. Kinerja turbin A

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin A					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	C _p	TSR
1	0.7	27.44	39.460	4.134	1.110	4.587	0.167	1.181
2	1	80	61.270	6.419	2.462	15.800	0.197	1.284
3	1.3	175.76	83.080	8.704	4.339	37.765	0.215	1.339

b. Kinerja turbin B

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin B					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	C _p	TSR
1	0.7	27.44	39.088	4.095	1.099	4.501	0.164	1.170
2	1	80	59.972	6.283	2.409	15.137	0.189	1.257
3	1.3	175.76	80.856	8.471	4.223	35.770	0.204	1.303

c. Kinerja turbin C

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Turbin B					
			RPM	rad/s	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	C _p	TSR
1	0.7	27.44	30.082	3.151	0.846	2.666	0.097	0.900
2	1	80	51.192	5.363	2.057	11.030	0.138	1.073
3	1.3	175.76	72.302	7.575	3.776	28.603	0.163	1.165

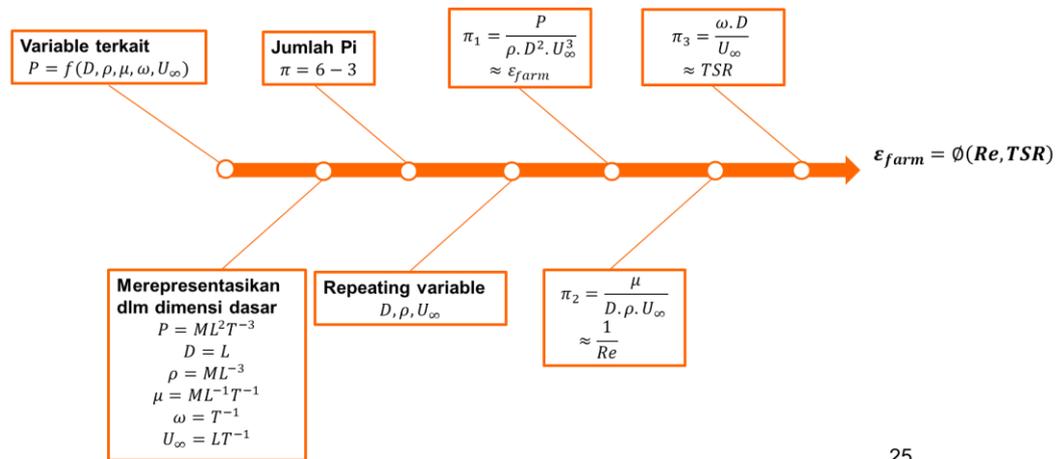
d. Efektifitas *farm*

No	Kecepatan <i>freestream</i> (m/s)	Daya air (Watt)	Daya Total (Watt)	Efektifitas <i>farm</i>
1	0.7	27.44	11.755	0.939
2	1	80	41.967	1.081
3	1.3	175.76	102.138	1.158

LAMPIRAN 8

Analisa dimensional dengan Pi-Buckingham

Keterbatasan data dalam studi eksperimental sering kali merupakan salah satu kendala dalam melakukan analisa. Diperlukan tahapan eksperimental yang kompleks untuk menentukan keterkaitan antar variabel. Namun penggunaan analisa dimensional dapat digunakan untuk menganalisa keterkaitan antar variabel tersebut. Salah satu cara untuk melakukan analisa dimensional adalah dengan teorema Pi-Buckingham. Dalam penelitian ini, penulis melakukan analisa Pi-Buckingham untuk mengentahui keterkaitan variabel-variabel dalam yang mempengaruhi produksi daya *farm*. Alur analisa yang dilakukan dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Beriku ini merupakan prosedur analisa Pi-Buckingham pada *array* turbin hidrokinetik:

- a. Variabel yang terkait

$$P = f(D, \rho, \mu, \omega, U_{\infty})$$

- b. Menyatakan variabel terkait dalam bentuk dimensi dasar

$$P = ML^2T^{-3}$$

$$D = L$$

$$\rho = ML^{-3}$$

$$\mu = ML^{-1}T^{-1}$$

$$\omega = T^{-1}$$

$$U_{\infty} = LT^{-1}$$

c. Jumlah Pi yang dibutuhkan

$$\pi = k - r$$

$$\pi = 6 - 3$$

k = Jumlah variable terkait

r = Jumlah referensi dimensi (M, L, T)

d. Repeating variable

Variabel yang digunakan sebagai *repeating variable* adalah variabel yang memiliki dimensi yang sederhana. Dalam kasus ini, yang dipilih sebagai

repeating variable adalah D, ρ, U_∞

e. Menghitung π_1, π_2, π_3

Menentukan π_1 :

$$\pi_1 = P \cdot D^a \cdot \rho^b \cdot U_\infty^c$$

$$\pi_1 = (M \cdot L^2 \cdot T^{-3}) \cdot L^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L \cdot T^{-1})^c$$

Sehingga diperoleh:

$$\pi_1 = P \cdot D^{-2} \cdot \rho^{-1} \cdot U_\infty^{-3}$$

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho \cdot D^2 \cdot U_\infty^3} \approx \mathcal{E}_{farm}$$

Menentukan π_2 :

$$\pi_2 = \mu \cdot D^a \cdot \rho^b \cdot U_\infty^c$$

$$\pi_2 = (M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}) \cdot L^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L \cdot T^{-1})^c$$

Sehingga diperoleh:

$$\pi_2 = \mu \cdot D^{-1} \cdot \rho^{-1} \cdot U_\infty^{-1}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu}{\rho \cdot D \cdot U_\infty} \approx \frac{1}{Re}$$

Menentukan π_3 :

$$\pi_3 = \omega \cdot D^a \cdot \rho^b \cdot U_\infty^c$$

$$\pi_3 = (T^{-1}) \cdot L^a \cdot (M \cdot L^{-3})^b \cdot (L \cdot T^{-1})^c$$

Sehingga diperoleh:

$$\pi_3 = \omega \cdot D^1 \cdot \rho^0 \cdot U_\infty^{-1}$$

$$\pi_1 = \frac{\omega \cdot D}{U_\infty} \approx TSR$$

f. Diperoleh hubungan

$$\varepsilon_{farm} = \Phi(\text{Re}, TSR)$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kota Rembang, Jawa Tengah pada tanggal 25 September 1992. Tamat SD N Leteh III (2005), SMP N 2 Rembang (2008) dan SMA N 1 Rembang (2011). Setelah tamat SMA, penulis melanjutkan studinya ke Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Bidang minat yang diambil penulis ketika menempuh perkuliahan jenjang sarjana adalah Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Judul tugas akhir yang diangkat adalah Analisis Profil *Wake* Di Belakang Turbin Arus Laut Tipe *V-Blade Darrieus* Berbasis *Computational Fluid Dynamics*. Setelah menyelesaikan studi sarjana, penulis melanjutkan studi magister di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan mengambil bidang minat Rekayasa Energi Terbarukan. Selama menempuh Pendidikan magister, penulis telah melakukan beberapa publikasi ilmiah, diantaranya “*Experimental Study for Side-by-side Darrieus Cascade Turbines Array to Analyze the Effect of Rotational Direction on Turbine Performance*”, RCEEE-2017 dan “*Performance Investigation of an Innovative Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC) for Low Current Speed*”, ICOSMEE-2017. Penulis dapat dihubungkan melalui alamat email erna.septya@gmail.com.

