



**TUGAS AKHIR - TF181801**

**ANALISIS KENAIKAN LEVEL AIR DARI SUSUNAN  
*VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE-  
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)*  
PADA KANAL**

**NURIL HIDAYATI  
NRP. 0231164000026**

**Dosen Pembimbing :  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020**





**FINAL PROJECT - TF181801**

**ANALYSIS ON LEVEL ELEVATION OF ARRAY  
OF VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE-  
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC) ON  
AN OPEN CHANNEL**

**NURIL HIDAYATI  
NRP. 0231164000026**

**Supervisors :  
Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.**

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technogy  
and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2020**



## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Nuril Hidayati  
NRP : 02311640000026  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan  
Rekayasa Sistem  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Analisis Kenaikan Level Air dari Susunan *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine-Straight Blade Cascaded* (VAHT-SBC) pada Kanal" adalah benar-benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari orang lain. Apalagi di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia untuk menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 20 Januari 2020  
Yang membuat pernyataan,

  
Nuril Hidayati  
NRP. 02311640000026



LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR

ANALISIS KENAIKAN LEVEL AIR DARI SUSUNAN  
*VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE-STRAIGHT  
BLADE CASCADED (VAHT-SBC) PADA KANAL*

Oleh:

Nuril Hidayati

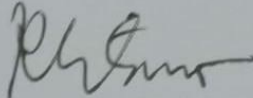
NRP. 023116400001026

Surabaya, 20 Januari 2020

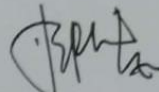
Menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



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



Erna Septyaningrum, S.T., M.T.  
NPP. 1992201912073

Mengetahui,

Kepala Departemen  
Teknik Elektro FTIRS-ITS







**ANALISIS KENAIKAN LEVEL AIR DARI SUSUNAN  
VERTICAL AXIS VERTICAL HYDROKINETIC TURBINE-  
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)  
PADA KANAL**

**TUGAS AKHIR**

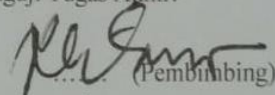
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

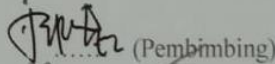
**NURIL HIDAYATI**  
**NRP. 0231164000026**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

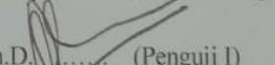
1 Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T.

  
..... (Pembimbing)

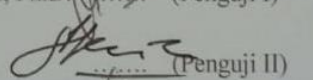
2. Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

  
..... (Pembimbing)

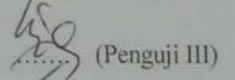
3 Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D. .... (Penguji I)



4 Ir. Sarwono, M.M.

  
..... (Penguji II)

5 Lizda Johar Mawarani, S.T., M.T.

  
..... (Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI 2020**



**ANALISIS KENAIKAN LEVEL AIR DARI SUSUNAN  
VERTICAL AXIS VERTICAL HYDROKINETIC TURBINE-  
STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC)  
PADA KANAL**

**Nama** : Nuril Hidayati  
**NRP** : 02311640000026  
**Departemen** : Teknik Fisika FTIRS-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T  
Erna Septyaningrum, S.T., M.T.

**Abstrak**

Salah satu dampak dari pemasangan turbin pada suatu kanal terbuka adalah kenaikan level permukaan air kanal yang dapat membawa efek negatif pada operasional turbin dan mengakibatkan banjir bila kenaikannya melebihi dari batas toleransi kanal. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh susunan turbin dan kecepatan aliran terhadap kenaikan level permukaan air dan pengaruhnya terhadap *blockage effect*. Terdapat empat variasi susunan turbin yaitu kanal tanpa turbin sebagai kondisi referensi, 1 turbin, susunan 3 turbin, dan 6 turbin yang disusun berdampingan. Sedangkan variasi kecepatan aliran masukan yang digunakan adalah 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 m/s. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah simulasi *Computational Fluid Dynamic*. Dari hasil yang didapatkan, diketahui bahwa kenaikan level permukaan air maksimal terjadi pada jarak  $1,5D$  hingga  $0,5D$  pada aliran hulu turbin. Nilai ini meningkat seiring dengan peningkatan jumlah turbin dan kecepatan aliran. Presentase kenaikan level permukaan air maksimum untuk susunan 1, 3, dan 6 turbin secara berturut-turut adalah 1,92%, 6,11% dan 8,99%. *Blockage effect* yang terdapat pada penelitian ini adalah *solid blockage* pada aliran dekat dinding dan aliran antar turbin. Selain itu terdapat fenomena *wake* pada aliran belakang turbin. Distribusi kecepatan menunjukkan bahwa susunan dengan jumlah turbin lebih banyak mengalami *wake recovery* lebih cepat. Pada sisi hilir, presentase penurunan level dari susunan 1, 3 dan 6 turbin dengan kecepatan inlet 3 m/s

berturut-turut adalah -26,59%, -11,16%, dan -10,99%. Ditinjau dari distribusi tekanannya, semakin banyak jumlah turbin dan semakin tinggi kecepatan aliran inlet maka penurunan tekanan pada jarak 1 diameter di belakang turbin akan semakin besar. Hubungan ini didukung dengan data *pressure drop* pada susunan 1, 3, dan 6 turbin untuk kecepatan aliran 3 m/s berturut-turut adalah 1337,6 Pa, 2529,8 Pa, dan 2719,2 Pa.

**Kata kunci :** *blockage*, kanal, level, VAHT

# **ANALYSIS ON WATER LEVEL ELEVATION OF ARRAY OF VERTICAL AXIS HYDROKINETIC TURBINE- STRAIGHT BLADE CASCADED (VAHT-SBC) ON AN OPEN CHANNEL**

**Name** : *Nuril Hidayati*  
**NRP** : *0231164000026*  
**Departement** : *Engineering Physics, FTIRS-ITS*  
**Supervisor** : *Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T*  
*Erna Septyaningrum, S.T., M.T.*

## ***Abstract***

*One of the effects of a turbine deployment in an open channel is an increase in the water level of the canal which can have a negative effect on turbine operations and cause flooding if the increase exceeds the tolerance limit of the canal. This research was conducted to determine the effect of turbine arrangement and stream velocity on water level elevation and its effect on the blockage effect. There are four variations of the turbine arrangement which are channels without turbines as reference conditions, 1 turbine, 3 turbine arrays, and 6 turbines arranged side by side. While the variation of input stream velocities used are 1; 1,5; 2; 2,5; and 3 m / s. The method used in this study is a Computational Fluid Dynamic simulation. From the results obtained, it is known that the increase in the maximum water level occurs at a distance of 1,5D to 0,5D in the upstream turbine flow. This value increases with the increasing number of turbines and the stream velocity. Percentage increase in maximum water level for the arrangement of 1, 3, and 6 turbines in a row is 1,92%, 6,11% and 8,99%. The blockage effect in this study is a solid blockage in the flow near the wall and the flow between turbines. In addition there is a wake phenomenon in the turbine backflow. Speed distribution shows that the arrangement with the number of turbines has a faster wake recovery. On the downstream side, the percentage decrease in the level of arrangement of 1, 3 and 6*

*turbines with an inlet stream velocity of 3 m/s were -26,59%, -11,16%, and -10,99%. In terms of the pressure distribution, the higher the number of turbines and its inlet stream velocity, the greater the pressure drop behind the turbine. This connection is supported by pressure drop data on the arrangement of 1, 3, and 6 turbines for 3 m/s stream velocity respectively are 1337,6 Pa, 2529,8 Pa, and 2719,2 Pa.*

**Keywords :** *blockage, canal, level, VAHT*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini dengan judul “**Analisis Kenaikan Level Air dari Susunan *Vertical Axis Vertical Hydrokinetic Turbine-Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)* pada Kanal**”

Dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga penulis, Bapak Mas’udi, Ibu Sukriyah, Mbak Lia, dan Mas Rozak. Terima kasih atas doa, dukungan, dan kepercayaan yang selalu diberikan
2. Bapak Dr. Suyanto, S.T., M.T. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika ITS
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, ST, MT dan Ibu Erna Septyaningrum, ST, MT., selaku dosen pembimbing tugas akhir terimakasih atas segala dukungan, bimbingan, motivasi, nasihat, dan segenap pembelajaran selama ini
4. Bapak Ir. Sarwono selaku dosen wali yang telah mengayomi penulis
5. Bapak Gunawan Nugroho, ST, MT, PhD selaku Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, terimakasih atas fasilitas dan dukungan yang diberikan
6. Teman-teman KSE Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan, Putri, Indjra, Rodzan, Nesa, Aresyah, Shafly, Qori, Irul, Ester, Hanif, Samsul, Ivan, Icha, Nova, Khoodi, dan lainnya. Terima kasih atas bantuan, dukungan, dan kenangannya.
7. Dea, Nariman, Aji, Dewi, Hesti, Hauna, dan Jovan terima kasih untuk selalu percaya dan atas dukungannya.
8. Teman-teman TAWAN Bidang Minat Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan

9. Teman-teman Teknik Fisika angkatan 2016, Thalassinus Fortis yang telah memberikan banyak cerita
10. Seluruh dosen, karyawan, dan civitas akademika Departemen Teknik Fisika ITS, terimakasih atas kerjasamanya
11. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan tugas akhir ini

Semoga laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembacanya. Penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan dalam laporan tugas akhir ini, maka dari itu penulis terbuka untuk kritik dan saran yang membangun.

Surabaya, 20 Januari 2020

Penulis



# DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Abstrak .....	xi
<i>Abstract</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR .....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxiii
DAFTAR SIMBOL.....	xxv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Energi Hidrokinetik.....	5
2.2 <i>Vertical Axis Hydrokinetic Turbine-Straight Blade         Cascaded (VAHT-SBC)</i> .....	8
2.3 Konsep Lift dan Drag.....	10
2.4 Aliran Kanal Terbuka.....	11
2.5 Aliran Kanal dengan Kedalaman Seragam .....	13
2.6 Bendung Berpuncak Lebar.....	14
2.7 <i>Blockage Effect</i> .....	16
3 <i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> .....	16

BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	21
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	21
3.2 Desain Turbin dan Kanal.....	23
3.3 Desain Susunan Turbin pada Kanal .....	25
3.4 Simulasi CFD .....	25
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....	33
4.1 Validasi Hasil Simulasi .....	33
4.2 Kenaikan Level Permukaan Air .....	34
4.3 Distribusi Kecepatan .....	42
4.4 Distribusi Tekanan .....	50
4.5 Diskusi.....	58
BAB V KESIMPULAN .....	65
DAFTAR PUSTAKA.....	67
LAMPIRAN A .....	71
LAMPIRAN B.....	79
LAMPIRAN C.....	81
BIODATA PENULIS.....	83

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Berbagai desain dari teknologi hidrokinetik (Yuce & Muratoglu, 2015) .....	6
<b>Gambar 2.2</b> (a) VAHT 3 Blades, (b) VAHT-SBC 6 Blades, (c) VAHT-SBC 9 Blades (Hantoro R. , Utama, Arief, A, & Manggala, 2018) .....	9
<b>Gambar 2.3</b> Gaya yang bekerja pada turbin hidrokinetik sumbu vertikal (Khalid, Liang, Qi-hu, & Xue-Wei, 2013) .....	10
<b>Gambar 2.4</b> Klasifikasi aliran kanal terbuka (Muhson, 2009) .....	12
<b>Gambar 2.5</b> Aliran seragam (Muhson, 2009) .....	13
<b>Gambar 2.6</b> Distribusi kecepatan pada penampang kanal terbuka (Muhson, 2009) .....	14
<b>Gambar 2.7</b> Geometri dari bendung berpuncak lebar (Muhson, 2009) .....	15
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian .....	22
<b>Gambar 3.2</b> Desain susunan 6 turbin pada kanal .....	26
<b>Gambar 3.3</b> Desain susunan 3 turbin pada kanal .....	26
<b>Gambar 3.4</b> Geometri turbin .....	27
<b>Gambar 3.5</b> Domain rotating .....	27
<b>Gambar 3.6</b> Domain kanal .....	28
<b>Gambar 3.7</b> Meshing domain kanal .....	29
<b>Gambar 3.8</b> Meshing domain rotating .....	30
<b>Gambar 3.9</b> Meshing pada turbin .....	30
<b>Gambar 4.1</b> Kontur level permukaan air pada kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping .....	36
<b>Gambar 4.2</b> Kontur level permukaan air pada kanal dengan 1 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping .....	37
<b>Gambar 4.3</b> Kontur level permukaan air pada kanal dengan 3 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping .....	37
<b>Gambar 4.4</b> Kontur level permukaan air pada kanal dengan 6 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping .....	38

<b>Gambar 4.5</b>	Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 1 m/s.....	38
<b>Gambar 4.6</b>	Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 1,5 m/s.....	39
<b>Gambar 4.7</b>	Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2 m/s.....	40
<b>Gambar 4.8</b>	Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2,5 m/s.....	41
<b>Gambar 4.9</b>	Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 3 m/s.....	42
<b>Gambar 4.10</b>	Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) kanal tanpa turbin (b) susunan 1 turbin (c) susunan 3 turbin (d) susunan 6 turbin.....	44
<b>Gambar 4.11</b>	Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 1,5 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	46
<b>Gambar 4.12</b>	Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 2 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	47
<b>Gambar 4.13</b>	Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 2.5 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	48
<b>Gambar 4.14</b>	Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 3 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	50
<b>Gambar 4.15</b>	Kontur tekanan pada kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (tampak atas).....	51
<b>Gambar 4.16</b>	Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	52
<b>Gambar 4.17</b>	Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 1,5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin.....	53

<b>Gambar 4.18</b>	Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 2 m/s (a) susunan 2 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin .....	54
<b>Gambar 4.19</b>	Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 2,5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin.....	56
<b>Gambar 4.20</b>	Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 3 m/s (a) susunan 2.5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin.....	57
<b>Gambar 4.21</b>	Presentase kenaikan level permukaan air maksimum pada variasi jumlah turbin.....	58
<b>Gambar 4.22</b>	Presentase kenaikan level permukaan air maksimum pada variasi kecepatan aliran .....	60
<b>Gambar 4.23</b>	Presentase penurunan level permukaan air maksimum pada variasi jumlah turbin dan kecepatan aliran .....	60
<b>Gambar 4.24</b>	Presentase penurunan kecepatan pada kecepatan aliran inlet 3 m/s .....	62
<b>Gambar 4.25</b>	Hubungan pressure drop dengan kecepatan aliran dan jumlah turbin .....	63

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Data ukuran turbin.....	24
<b>Tabel 3. 2</b> Data kanal outlet UP Paiton.....	24
<b>Tabel 3. 3.</b> Detail meshing pada simulasi .....	29
<b>Tabel 3. 4</b> Parameter yang digunakan.....	30
<b>Tabel 3. 5</b> Kondisi batas simulasi CFD .....	31
<b>Tabel 4. 1</b> Data Validasi.....	34

Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR SIMBOL

$E_k$	Enegi kinetic (Joule)
$m$	Massa (kg)
$v$	Kecepatan aliran (m/s)
$P_W$	Daya ekstraksi dari air (Watt)
$\rho$	Massa jenis (kg/m <sup>3</sup> )
$A$	Luas penampang (m <sup>2</sup> )
$r$	Jari-jari turbin (m)
$\omega$	Kecepatan sudut (rad/s)
$\alpha$	<i>Angle of attack</i>
$F_L$	Gaya <i>Lift</i> (angkat)
$F_D$	Gaya <i>Drag</i> (hambat)
$C_L$	<i>Coefficient of Lift</i>
$C_D$	<i>Coefficient of Drag</i>
$Re$	Bilangan Reynold
$R_h$	Jari-jari hidrolik kanal (m)
$\mu$	Viskositas dinamis (Pa. s)
$Fr$	Bilangan Froude
$g$	Gravitasi (m/s <sup>2</sup> )
$l$	Kedalaman aliran (m)
$D$	Diameter turbin (m)
$C_p$	<i>Coefficient Performance</i>
$C_T$	<i>Coefficient of torque</i>
$H$	Jarak antara permukaan air terhadap bagian atas bendung pada aliran masuk (m)
$P$	Tekanan (Pa)
$y_c$	Tinggi kritis dari bagian tengah puncak bendung ke permukaan air (m)
$V_1$	Kecepatan aliran saat memasuki bendung (m/s)
$V_c$	Kecepatan aliran kritis (m/s)
$t$	Waktu (sekon)
$x$	Koordinat sumbu x

$y$	Koordinat sumbu $y$
$z$	Koordinat sumbu $z$
$u$	Komponen kecepatan sumbu $x$ (m/s)
$v$	Komponen kecepatan sumbu $y$ (m/s)
$w$	Komponen kecepatan sumbu $z$ (m/s)

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Profil kecepatan aliran di perairan Indonesia menunjukkan nilai yang beragam tetapi cenderung rendah. Hal ini dapat dibuktikan dari studi fisibilitas arus air laut pada Selat Alas (Aziz, 2009) dan Selat Larantuka (Orhan, dkk., 2015) yang menunjukkan kecepatan 2 m/s – 4 m/s. Sedangkan kecepatan aliran air laut pada pulau-pulau kecil seperti pulau Berhala, Anambas, dan Biawak menunjukkan rata-rata kecepatan aliran air pada 0,14 m/s, 0,06 m/s, dan 0,27 m/s.

Teknologi yang tepat untuk mengekstraksi energi dari profil kecepatan rendah adalah turbin hidrokinetik yang dapat bekerja dari rentang kecepatan 0,8 – 3 m/s (Guney M. S., 2011). Salah satu jenis turbin hidrokinetik yang cocok digunakan adalah turbin vertikal *straight-bladed* atau darrieus karena memiliki konstruksi bilah yang lebih sederhana dan dapat menghasilkan kecepatan putar yang tinggi pada kecepatan arus rendah (Hantoro, dkk., 2018).

Untuk mengembangkan potensi turbin hidrokinetik, ada beberapa tahap yang perlu diperhatikan yaitu fase desain, instalasi, dan operasional. Ditinjau dari sisi desainnya, sebelumnya telah dilakukan berbagai penelitian terkait dengan *Vertical Axis Hydrokinetic Turbine*, salah satunya adalah dengan menggunakan kombinasi bilah yang disusun bertumpuk (*cascade*) antara mekanisme *fixed pitch* dan *passive variable pitch*. Inovasi berupa *variable-pitch* terbukti dapat mengurangi potensi terjadinya *stall* dan meningkatkan gaya angkat pada sebagian besar posisi azimuth turbin (Hantoro, dkk., 2011). Berdasarkan studi eksperimental yang dilakukan sebelumnya, didapatkan bahwa turbin tersebut memiliki *coefficient of performance* tertinggi dengan konstruksi 9 bilah, yang mana  $C_p$  tertingginya adalah 0,42 yang tercapai pada *tip speed ratio* 2,19 (Hantoro dkk., 2018). Desain *vertical axis hydrokinetic turbine – straight blade cascaded* (VAHT-SBC) ini akan digunakan pada penelitian kali ini.

Setelah mengoptimalkan turbin hidrokinetik dari sisi desainya, tahap instalasi juga penting untuk diperhatikan. Produksi energi turbin hidrokinetik secara langsung berhubungan dengan kecepatan air yang tersedia. Kecepatan yang lebih tinggi menghasilkan keluaran daya yang secara eksponensial lebih tinggi (Cada, dkk., 2007). Faktor lain yang secara tidak langsung memengaruhi keluaran energi adalah jumlah turbin yang dipasang, sebuah penelitian terkait hal ini menunjukkan hasil bahwa seiring dengan penambahan jumlah turbin akan terdapat puncak produksi energi dan setelah itu terjadi penurunan (Kartezhnikova & Ravens, 2013). Adanya hasil ini membuka peluang untuk dapat memaksimalkan keluaran daya dari instalasi VAHT-SBC. Studi sebelumnya telah membuktikan bahwa susunan *array triangular*, persegi, dan belah ketupat adalah susunan yang signifikan terkait dengan kemampuan produksi dayanya, dan susunan segitiga adalah yang terbaik karena kecepatan rata-rata yang melalui turbinnya adalah yang tertinggi (At-Tasneem, dkk., 2014).

Disamping peluang diatas, terdapat faktor lain yang perlu diperhatikan yaitu kenaikan ketinggian permukaan air dan kecepatan aliran air pada kanal. Perubahan ketinggian air yang signifikan dan *loss* dari energi hidrodinamik secara umum adalah hal yang tidak diinginkan (Gunawan, dkk., 2015). Berdasarkan studi yang pernah dilakukan sebelumnya, diketahui bahwa semakin tinggi *blockage ratio*, maka penurunan ketinggian muka air dan *head loss* juga meningkat. Hal ini disebabkan oleh lebih tingginya ekstraksi daya dari turbin dan laju pencampuran yang lebih tinggi antara aliran berkecepatan tinggi yang melalui turbin dan *wake* pada turbin (Matle, dkk., 2013).

Fenomena kenaikan muka air pada kanal instalasi turbin yang terlalu tinggi tidak hanya merugikan bagi operasional turbin hidrokinetik, tetapi juga akan berpengaruh pada saluran irigasi bahkan kenaikan muka air yang berlebihan dapat menimbulkan banjir. Terlebih jika turbin dipasang pada kanal dengan kemampuan menampung kenaikan level permukaan air tertentu. Maka kenaikan level permukaan level air dari pemasangan beberapa turbin sekaligus tersebut menjadi penting untuk dikaji

dalam menentukan fisibilitas pemasangannya. Untuk menghindari dampak kenaikan permukaan air pada instalasi VAHT-SBC, maka perlu adanya studi lebih lanjut terkait dengan analisis pengaruh dari instalasi beberapa turbin sekaligus, terhadap kenaikan permukaan air pada kanal.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

- Bagaimana pengaruh susunan turbin dan kecepatan aliran terhadap kenaikan level permukaan air pada kanal?
- Bagaimana pengaruh susunan turbin dan kecepatan aliran terhadap *blockage effect*?

## 1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini terdapat beberapa batasan masalah diantaranya sebagai berikut:

- Turbin yang digunakan berjenis *vertical axis hydrokinetic turbine – straight blade cascaded* (VAHT – SBC)
- Turbin dalam *multi array* pada penelitian kali ini dioperasikan dengan diputar searah
- Variasi pada penelitian ini adalah jumlah turbin dan kecepatan aliran inlet
- Variable terikat dari penelitian ini adalah kenaikan level permukaan air, profil kecepatan, dan profil tekanan pada aliran kanal

## 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

- Mengetahui pengaruh susunan turbin dan kecepatan aliran terhadap kenaikan level permukaan air pada kanal
- Mengetahui pengaruh susunan turbin dan kecepatan aliran terhadap *blockage effect*

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Energi Hidrokinetik**

Tenaga air adalah energi terbarukan dengan potensi yang melimpah. Potensi tenaga hidro di Inonesia mencapai 75.000 MW yang tersebar di seluruh kepulauan di Indonesia dengan kapasitas pembangkit listrik tenaga air yang terpasang hanya 7.573 MW yaitu 10,1% dari potensi yang ada (Nasional, 2013) Tenaga air dapat dimanfaatkan dengan dua cara yaitu mendapat energi dari perbedaan ketinggian pada air yang secara konvensional diterapkan pada bendungan dan memanfaatkan kecepatan air. Dalam istilah lain, dua jenis tersebut adalah bentuk pemanfaatan dari energi potensial dan energi kinetik dari air. Pemanfaatan energi kinetik inilah yang selanjutnya lebih sering dikenal dengan energi hidrokinetik.

Dalam pendekatan hidrokinetik, energi kinetik pada aliran air secara langsung dikonversi menjadi listrik oleh turbin yang biasanya berskala kecil tanpa adanya penahan dan hampir tanpa ada perbedaan ketinggian (Guney & Kaygusuz, 2010). Teknologi hidrokinetik didesain untuk dipasang pada aliran-aliran alami seperti sungai, muara laut, arus laut, gelombang, kanal buatan manusia (Lago, Ponta, & Chen, 2010) dan pada fasilitas lain dengan aliran air yang memiliki kecepatan optimum.

Jumlah daya hidrokinetik yang tersedia bergantung terhadap kecepatan aliran sungai, laut, dan arus pasang surut dan merupakan fungsi dari densitas air dan pangkat tiga dari kecepatan aliran. Untuk dapat beroperasi, teknologi hidrokinetik memerlukan kecepatan aliran dan kedalaman air tertentu. Kecepatan aliran air terendah untuk dapat mengoperasikan teknologi hidrokinetik umumnya adalah 2-4 knot (1 – 2 m/s), dengan nilai terendah yang masih memungkinkan adalah 1 knot (0,5 m/s), nilai ini bergantung pada desain teknologi yang digunakan. Kedalaman air adalah faktor penting untuk menentukan total energi yang dapat diekstrak dari lokasi, karena area *cross-sectional* dari wilayah ekstraksi turbin bergantung pada ketinggian air diatas turbin yang cukup.

Perangkat hidrokinetik idealnya dipasang pada lokasi dengan kecepatan aliran yang stabil sepanjang tahun dan tidak beresiko tinggi terhadap kejadian-kejadian seperti banjir, turbulensi, atau kejadian surutnya air untuk periode-periode tertentu (Johnson & Pride, 2010).

Terdapat beberapa cara untuk mengategorikan teknologi hidrokinetik, tetapi secara sederhana teknologi ini dapat diklasifikasikan menjadi dua yaitu mesin berputar (*rotating machine*) dan konverter energi gelombang (Bedard, 2005). Klasifikasi mesin berputar dapat dibandingkan dengan turbin angin, dimana sebuah rotor berputar sebagai respon terhadap pergerakan dari sungai atau arus laut. Di sisi lain, sebagian besar teknologi energi gelombang mengkonversi energi hidrostatik yang dimiliki oleh air karena relativitas ketinggiannya terhadap sebuah titik referensi. Perangkat ini beroperasi berdasarkan perubahan ketinggian dari gelombang laut. Pada Gambar 2.1 terdapat contoh dari realisasi desain dari dua klasifikasi yang telah disebutkan (Cada, Ahlgrimm, Bahleda, Bigford, & al, 2007).



**Gambar 2.1** Berbagai desain dari teknologi hidrokinetik (Yuce & Muratoglu, 2015)

Enregi hidrokinetik memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan metode produksi tenaga hidro konvensional. Sistem hidrokinetik membutuhkan upaya kegiatan sipil yang minimum karena tidak dibutuhkan biaya besar untuk membangun bendungan untuk mengumpulkan air (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2008). Walaupun skala produksi daya yang dapat dihasilkan oleh energi hidrokinetik relatif kecil, tetapi beberapa perangkat dapat dipasang persamaan dalam *multi array* untuk meningkatkan



ekstraksi energinya (Lago, Ponta, & Chen, 2010). Sistem hidrokinetik juga memiliki sumber energi yang lebih bisa diprediksi dan bernilai dari pada sumber energi lain seperti angin dan matahari (Fraenkel, 2007). Di sisi lain, pengaplikasian turbin hidrokinetik dapat menjadi cara yang paling cocok dan murah untuk memasok listrik pada daerah pelosok yang tidak terjangkau oleh jalur transmisi. (Balat, 2006). Sistem hidrokinetik ini juga memiliki dampak lingkungan yang lebih kecil jika dibandingkan dengan bendungan (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2008).

Tidak hanya kelebihan, tentunya sistem hidrokinetik ini juga memiliki beberapa kekurangan. Sistem ini memiliki skala produksi energi dengan koefisien daya yang rendah. Efisiensi maksimum dari sebuah turbin hidrokinetik arus adalah 59,3% yang diketahui sebagai limit Betz. Hanya sistem dengan kualitas yang sangat bagus saja yang dapat mencapai efisiensi 50%. Masalah lain yang dapat ditimbulkan adalah kemungkinan adanya kavitasi yang dapat menurunkan kualitas turbin. Faktor lokasi pemasangan, misalkan turbin akan dipasang pada air laut, maka sistem konversi energi gelombang harus didesain untuk mampu menahan beban air yang tinggi dan tidak teratur. Ditinjau dari dampak pemasangannya, pemasangan turbin hidrokinetik dapat menghalangi navigasi dan kegiatan penangkapan ikan (Yuce & Muratoglu, 2015).

Persamaan umum dari energi kinetik yang didapatkan dari aliran air dinyatakan pada Persamaan 2.1.

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.1)$$

Maka daya yang bisa didapat dari aliran air dengan asumsi bahwa air mengalir dengan kecepatan konstan, dapat dinyatakan dengan Persamaan 2.2:

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

Dimana nilai luasan sapuan turbin dinyatakan pada Persamaan 2.3.

$$A = \pi r^2 \quad (2.3)$$

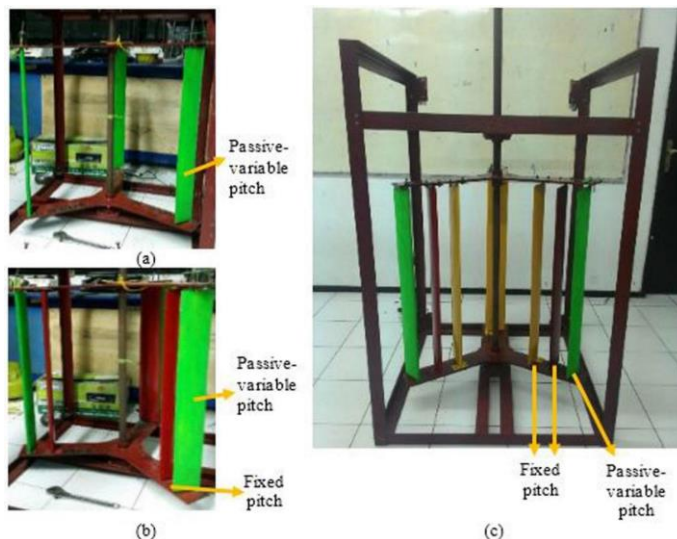
## 2.2 Vertical Axis Hydrokinetic Turbine-Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC)

Hidrokinetik turbin dapat dikategorikan menjadi dua tipe. Yaitu *vertical axis turbine*, dengan sumbu putar yang tegak lurus dengan arah aliran. Yang kedua adalah *horizontal axis turbine*, dengan sumbu putar mengikuti arah aliran. Dilihat dari efisiensinya, turbin hidrokinetik vertikal memang memiliki efisiensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan turbin horizontal. Tetapi jenis turbin vertikal memiliki kelebihan yaitu mampu untuk mengekstrak energi dari segala arah, sehingga tidak diperlukan mekanisme ekor (*tail mechanism*) untuk memutar turbin ke arah datangnya arus air. Turbin vertikal juga tidak memerlukan *yaw control* untuk mengurangi pengaruh anggukan turbin yang dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan kerusakan (Septyaningrum, 2015).

Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan penelitian untuk meningkatkan efisiensi turbin vertikal ini dengan menggunakan berbagai jenis *airfoil* diantaranya adalah NACA 63418, NACA 63415, NACA 6312, AH93W215, AG18, AH93W174, NACA 0021, NACA 0018, NACA 0015, NACA 0010, FX71L150, FXL142K, FXLV152, FX77W258, FX66S196, S-809, S-9000, S-1046, S-1014, dan AH94W301. Dari jenis *airfoil* tersebut, NACA 0018 adalah *airfoil* seri NACA terbaik yang dapat digunakan pada turbin ini karena kemampuannya untuk menahan *bending* (Mohamed, 2012).

Upaya lain melalui variasi *solidity* juga telah dilakukan. *Solidity* sendiri berhubungan dengan luas sapuan turbin, dimana semakin besar luas sapuan turbin akan semakin besar gaya angkat yang dihasilkan sehingga torsi akan semakin besar. Penelitian mengenai *solidity* ini menyatakan bahwa koefisien performa turbin dapat mencapai titik maksimumnya dengan nilai *solidity* sebesar 0,3.

Metode berikutnya yang dapat digunakan adalah dengan penyusunan *cascade blade* yang mengkombinasikan *fixed pitch* dan *passive pitch*, yang selanjutnya disebut dengan *straight blade cascaded*. Kombinasi ini memungkinkan turbin memiliki gaya dan torsi yang lebih besar, serta luasan area yang lebih besar sehingga mendapatkan lebih banyak tekanan (Immanudin, 2016). Sebelumnya telah terdapat sebuah penelitian eksperimental terkait susunan dan jumlah *straight blade cascaded* (3, 6, dan 9 *blade*) pada berbagai kecepatan aliran air (1.1, 1.2, dan 1.3 m/s) yang memberikan nilai koefisien performansi tertinggi.



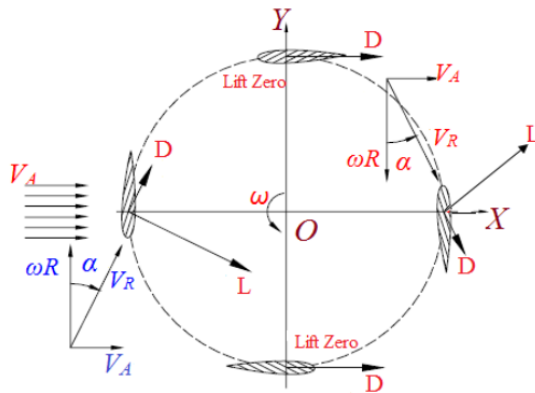
**Gambar 2.2** (a) VAHT 3 Blades, (b) VAHT-SBC 6 Blades, (c) VAHT-SBC 9 Blades (Hantoro R. , Utama, Arief, A, & Manggala, 2018)

Semakin tinggi nilai koefisien performansi ( $C_p$ ) maka semakin besar daya yang dapat diekstraksi oleh turbin. Pada penelitian eksperimental ini, nilai  $C_p$  terbesar dihasilkan pada VAHT-SBC dengan 9 *blade*, dengan nilai  $C_p$  0.42 pada TSR 2,19. Inovasi berupa SBC juga dapat meningkatkan gaya angkat dan momen inersia yang berdampak pada peningkatan nilai  $C_p$  dan torsi. Selain

itu SBC juga berguna untuk meningkatkan nilai ekstraksi daya turbin, tanpa membuat dimensi turbin bertambah besar (Hantoro R. , Utama, Arief, A, & Manggala, 2018). VAHT-SBC yang telah diinovasikan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.2.

### 2.3 Konsep Lift dan Drag

Berdasarkan koordinat pada bilah turbin, gaya yang bekerja pada bilah dapat dibagi menjadi 2 komponen yaitu gaya *drag*  $F_D$  dan gaya *lift*  $F_L$  (Birjandi, 2012). Dilihat dari tampak atasnya, maka turbin hidrokinetik sumbu vertikal dapat digambarkan sebagai skema yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, dengan bilah yang terhubung dengan *shaft* melalui tiga lengan turbin (Khalid, Liang, Qi-hu, & Xue-Wei, 2013).



**Gambar 2.3** Gaya yang bekerja pada turbin hidrokinetik sumbu vertikal (Khalid, Liang, Qi-hu, & Xue-Wei, 2013)

Pada Gambar 2.3, terdapat aliran air disimbolkan dengan  $V_A$  yang tegak lurus dengan kecepatan rotasi  $\omega R$ . Resultan dari dua kecepatan yang saling tegak lurus tersebut adalah  $V_R$ . Sudut yang terbentuk antara kecepatan resultan dan kecepatan rotasi adalah  $\alpha$  yaitu sudut serang. Pada sudut serang yang kecil, gaya *lift* dihasilkan oleh *foil* dan memiliki komponen tangensial pada arah rotasi. Gaya *lift* merupakan komponen gaya pada turbin yang tegak

lurus dengan kecepatan aliran air, sedangkan gaya yang searah dengan aliran disebut gaya *drag*.

Karakteristik *lift* dan *drag* dapat dinyatakan dalam koefisien *lift* dan *drag* yang merupakan besaran tanpa satuan. Keduanya dapat dinyatakan dalam Persamaan 2.4 dan 2.5.

Koefisien *lift*:

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho v^2 A} \quad (2.4)$$

Koefisien *drag*:

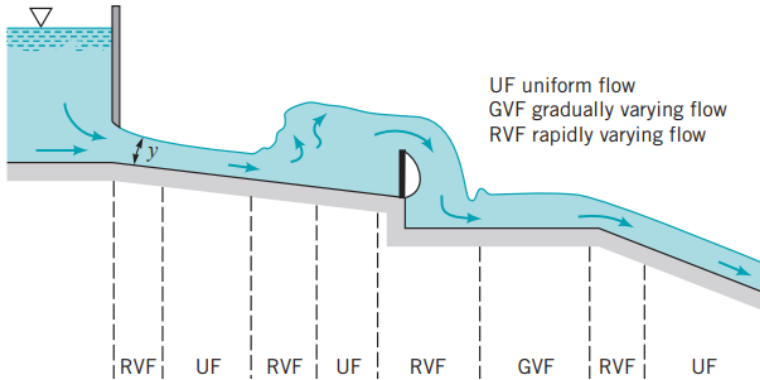
$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho v^2 A} \quad (2.5)$$

## 2.4 Aliran Kanal Terbuka

Aliran kanal terbuka melibatkan aliran-aliran dari fluida di dalam kanal atau saluran yang tidak terisi penuh. Terdapat permukaan bebas antara fluida yang mengalir (biasanya air) dengan fluida di atasnya (biasanya udara atmosfer). Gaya penggerak utama dari aliran-aliran ini adalah berat fluida – gaya gravitasi untuk mengalir turun. Tidak seperti aliran dalam pipa, pada aliran kanal terbuka tidak terdapat gaya tekanan sebagai penggerak dari fluida melalui kanal. Upaya apapun untuk memberikan gradien tekanan dalam arah aliran akan gagal karena efek-efek inersia dan viskos dari atmosfer di atas fluida yang mengalir dapat diabaikan. Untuk aliran kanal terbuka yang tunak, berkembang penuh, distribusi tekanan di dalam fluida semata-mata akibat tekanan hidrostatis.

Perilaku kedalaman fluida,  $y$ , bervariasi terhadap waktu,  $t$ , dan jarak sepanjang kanal,  $x$ , digunakan untuk mengklasifikasikan sebuah aliran. Sebagai contoh, aliran tunak dan tidak tunak bergantung apakah kedalaman pada lokasi yang diberikan berubah atau tidak berubah menurut waktu. Sebuah aliran kanal terbuka digolongkan sebagai aliran seragam/*uniform flow* jika kedalaman airnya tidak bervariasi sepanjang kanal ( $dy/dx = 0$ ). Sebaliknya, jika aliran tidak seragam atau aliran bervariasi jika kedalaman

bervariasi dengan jarak ( $dy/dx \neq 0$ ). Aliran yang bervariasi secara perlahan/*gradually varying flow* (GVF) adalah aliran yang kedalamannya berubah secara perlahan dengan jarak sepanjang kanal;  $dy/dx \ll 1$ . Klasifikasi-klasifikasi ini ditunjukkan pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Klasifikasi aliran kanal terbuka (Muhson, 2009)

Seperti halnya untuk suatu bentuk geometri aliran apapun, aliran kanal terbuka mungkin laminar, transisi, atau turbulen, tergantung pada berbagai kondisi yang terlibat. Yang mana nilai untuk menentukannya adalah melalui bilangan Reynold dengan formula seperti pada Persamaan 2.6.

$$Re = \rho VR_h / \mu \quad (2.6)$$

Aturan umumnya adalah bahwa aliran kanal terbuka laminar jika  $Re < 500$ , turbulen jika  $Re > 12.500$ , selain itu aliran berada pada fase transisi. Karena kebanyakan aliran kanal terbuka melibatkan air yang memiliki nilai viskositas sangat kecil dan memiliki panjang karakteristik yang relatif besar, maka adalah hal yang tidak biasa mendapati suatu aliran kanal terbuka dalam kondisi laminar.

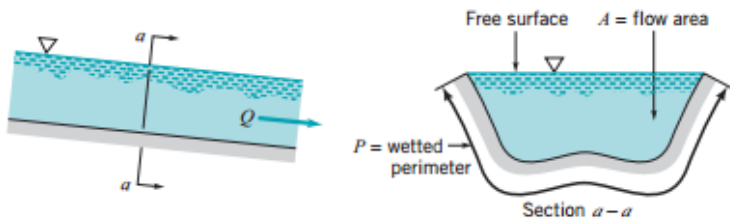
Aliran kanal terbuka melibatkan sebuah permukaan bebas yang dapat berdeformasi dari konfigurasi tak terganggu yang relatif rata sehingga membentuk sebuah gelombang. Gelombang

serupa itu bergerak melintasi permukaan dengan kecepatan yang tergantung pada ukurannya (tinggi dan panjangnya) dan sifat-sifat dari kanal (kedalaman, kecepatan fluida dan lain-lain). Karakter dari sebuah aliran kanal terbuka dapat sangat tergantung pada seberapa cepat fluida mengalir relatif terhadap berapa cepat suatu gelombang permukaan tertentu bergerak relatif terhadap fluida. Parameter tak berdimensi yang menggambarkan ini disebut sebagai bilangan Froude yang didefinisikan pada Persamaan 2.7.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gl}} \quad (2.7)$$

Suatu kasus khusus dengan  $Fr = 1$  disebut sebagai aliran kritis (*critical flow*). Jika bilangan Froude kurang dari 1, alirannya disebut aliran subkritis atau tenang. Sedangkan dengan bilangan Froude lebih dari 1 disebut superkritis atau cepat.

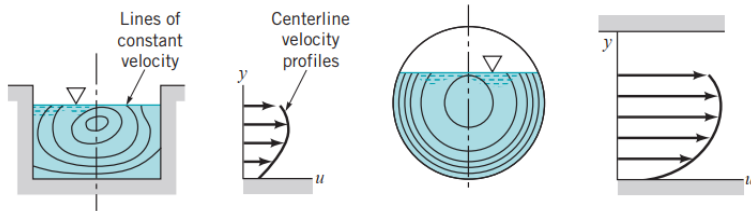
## 2.5 Aliran Kanal dengan Kedalaman Seragam



**Gambar 2.5** Aliran seragam (Muhson, 2009)

Pendekatan aliran seragam yang dimaksud disini adalah tinjauan aliran pada kanal terbuka dengan bentuk ukuran penampang yang konstan sehingga kedalaman dari aliran tetap konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5. Luas dari penampang adalah  $A$  dan keliling terbasahi (*wetted perimeter*) yaitu panjang dari keliling pada penampang yang bersentuhan langsung dengan fluida adalah  $P$ . Pada kasus ini diasumsikan

bahwa interaksi antara fluida dan atmosfer pada permukaan bebas dapat diabaikan sehingga bagian dari keliling ini tidak turut didefinisikan sebagai keliling terbasahi.



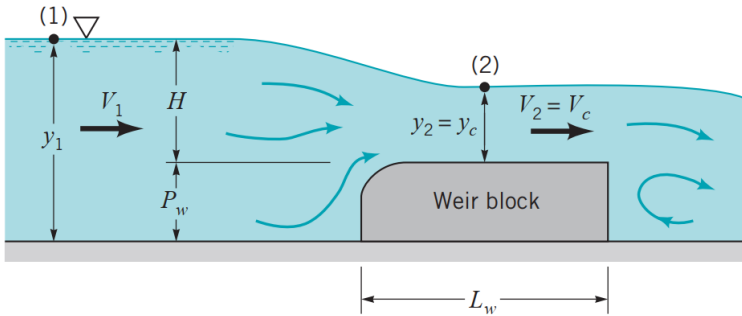
**Gambar 2.6** Distribusi kecepatan pada penampang kanal terbuka (Muhson, 2009)

Karena fluida harus mengikuti permukaan padat, maka kondisi aktual dari distribusi kecepatan pada kanal terbuka menjadi tidak seragam. Gambar 2.6 menunjukkan profil kecepatan yang diukur pada beberapa bentuk kanal terbuka. Kecepatan maksimum sering dijumpai pada bagian agak bawah dari permukaan bebas, pada keliling terbasahi kecepatan fluidanya adalah nol, dimana suatu tegangan geser dinding terbentuk.

## 2.6 Bendung Berpuncak Lebar

Sebuah bendung berpuncak lebar adalah suatu struktur di dalam kanal terbuka yang mempunyai puncak horizontal yang mana diatas struktur tersebut tekanan fluidanya dapat dianggap hidrostatis. Konfigurasi dari bendung ini biasanya dapat dinyatakan pada skema di Gambar 2.7. Secara umum, untuk memastikan pengoperasian yang benar, terdapat nilai rasio yang harus diperhatikan yaitu  $0,08 < H/L_w < 0,5$ . Jika rasionya kurang dari 0,08 maka kerugian *head* pada bendung tidak bisa diabaikan. Di sisi lain untuk balok bendung yang pendek, dengan rasio lebih dari 0,5 maka garis-garis arus dari aliran di atas balok tidak horizontal.





**Gambar 2.7** Geometri dari bendung berpuncak lebar (Muhson, 2009)

Cara kerja dari bendung berpuncak lebar didasarkan pada prinsip bahwa aliran kritis yang hampir seragam dicapai pada belokan yang dekat diatas balok bendung. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa sewaktu aliran melewati balok bendung, aliran tersebut mengalami percepatan dan mencapai kondisi kritis  $y_2 = y_c$  dan  $Fr_2 = 1$ .

Persamaan Bernoulli dapat diterapkan antara titik (1) di hulu dari bendung dan titik (2) di atas bendung di mana aliran kritis terjadi, persamaan dapat dilihat pada Persamaan 2.8.

$$H + P_w + \frac{V_1^2}{2g} = y_c + P_w + \frac{V_c^2}{2g} \quad (2.8)$$

Atau jika *head* kecepatan hulu dapat diabaikan, maka:

$$H - y_c = \frac{V_c^2 - V_1^2}{2g} = \frac{V_c^2}{2g} \quad (2.9)$$

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

$$H - y_c = \frac{y_c}{2} \quad (2.10)$$

Atau

$$y_c = \frac{2H}{3} \quad (2.11)$$

### 2.7 *Blockage Effect*

Ketika terdapat penghalang, dalam hal ini turbin, pada sebuah aliran, *blockage ratio* didefinisikan sebagai rasio antara luas area dari sungai dibanding dengan area digunakan oleh turbin hidrokinetik. Hal ini adalah salah satu faktor yang perlu diperhatikan dalam memilih lokasi pemasangan turbin, karena nilai *blockage ratio* yang tinggi dapat menaikkan level permukaan air hingga terjadi banjir (Niebuhr, Dijk, Neary, & Bhagwan, 2019). Hal ini tentunya menjadi hal yang tidak diinginkan.

Komponen *blockage effect* dapat dikategorikan menjadi tiga komponen yaitu *solid blockage*, *wake blockage* yang menyebabkan peningkatan kecepatan aliran di sekitar turbin, dan *boundary blockage* yang menimbulkan *wake* dan meningkatkan gaya *drag*. *Solid blockage* terjadi ketika aliran yang menuju arah hilir mengalami peningkatan kecepatan lokal. Fenomena ini juga mengakibatkan gradasi tekanan simetris dan peningkatan hambatan. Kecepatan aliran yang meningkat selanjutnya meningkatkan ketebalan lapisan batas pada permukaan turbin. Fenomena ini biasa dinamakan *wake blockage* (Aan, 2015).

*Wake blockage* dapat membawa dampak yang tidak diinginkan yaitu peningkatan gaya *drag*, penurunan kecepatan aliran, dan peningkatan level turbulensi. Penurunan kecepatan yang signifikan dapat berpengaruh pada penurunan ekstraksi energi oleh turbin. Dampak lain dari adanya *wake* adalah adanya pemisahan aliran.

### 3 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

*Computational Fluid Dynamic* adalah seni untuk mengganti integral dan derivatif parsial pada persamaan ini dengan bentuk aljabar diskrit, yang selanjutnya diselesaikan untuk mendapatkan hasil dari nilai *flow field* pada titik-titik diskrit dalam waktu atau

ruang. Secara singkat, CFD adalah teknik numerik untuk menyelesaikan dan menganalisa aliran fluida dengan bantuan komputer.

Berikut adalah tiga persamaan yang digunakan:

a. Persamaan Konservasi Masa

Pada intinya persamaan ini menyatakan bahwa, ‘pada sebuah volume fluida, laju dari pertambahan masa kedalam volume tersebut pasti sama dengan kecepatan aliran masa disepanjang kontrol volume tersebut.’ Secara matematis persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagai :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

b. Persamaan Navier-Stokes

Persamaan ini adalah pernyataan matematis dari gerakan fluida berdasarkan hukum newton kedua, yang menyatakan bahwa ‘laju perubahan momentum pada partikel fluida sama dengan jumlah dari gaya-gaya pada sebuah partikel.’ Adapun persamaan matematisnya adalah sebagai berikut (Versteeg & Malalasekera, 1996):

Persamaan pada komponen sumbu x:

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \\ = \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial x} + X \end{aligned} \quad (2.13)$$

Persamaan pada komponen sumbu Y:

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \\ = \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial y} + Y \end{aligned} \quad (2.14)$$

Persamaan pada komponen sumbu Z:

$$\rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial p}{\partial z} + Z \quad (2.15)$$

Kode CFD adalah suatu algoritma numerikal yang terstruktur untuk menyelesaikan fenomena aliran fluida. Proses dari kerja CFD secara umum dapat dibagi menjadi 3 bagian. Bagian pertama adalah *pre processor*. Pada bagian ini pengguna memberikan input pada CFD untuk diproses dan diselesaikan. Input yang harus dimasukkan adalah geometri dari fenomena fluida yang akan diselesaikan, geometri ini juga dapat didefinisikan sebagai domain komputasi yang selanjutnya akan dibagi menjadi bagian yang lebih kecil dalam bentuk elemen-elemen kontrol volume atau *cell*. Hal lain yang perlu didefinisikan antara lain adalah properti fluida dan *boundary condition*. Setelah itu domain tadi melalui tahap *meshing*. Salah satu parameter yang dapat menentukan akurasi CFD adalah jumlah *cell* pada *grid*, tetapi perlu dicatat juga bahwa semakin banyak jumlah *cell*, maka beban komputasi juga akan semakin berat.

Setelah melalui tahapan *pre processor*, lalu masuk pada bagian *solver*. Pada tahap ini fenomena aliran fluida akan diselesaikan dengan teknik solusi numerikal yang dipilih oleh pengguna. Teknik tersebut antara lain adalah *finite difference*, *finite element*, dan *spectral method*. Langkah-langkah dari algoritma solusi numerikal ini antara lain adalah integrasi dari persamaan aliran fluida, deskritisasi, dan metode iterasi. Iterasi dibutuhkan karena fenomena fisis yang disimulasikan bersifat kompleks dan tidak linear, prosedur iterasi yang sering digunakan adalah TDMA (*tri diagonal matrix algorithm*) dan algoritme SIMPLE. Tahapan terakhir adalah *post processing* yang lebih terfokus pada visualisasi dari data yang akan dianalisis.

Parameter yang perlu diperhatikan dari simulasi CFD adalah model turbulensi yang digunakan. Pada fluktuasi kecepatan yang

merupakan ciri dari aliran turbulen, terjadi pencampuran kuantitas yang dibawa, diantaranya adalah momentum, energi, energi kinetik, dan konsentrasi fasa yang juga mengalami fluktuasi. Karena fluktuasi ini dapat memiliki nilai yang kecil tetapi berfrekuensi tinggi, maka parameter ini menambah beban komputasi pada simulasi yang dijalankan. Oleh karena itu terdapat model turbulensi yang memodifikasi persamaan asalnya berdasarkan *time-averaged*, *ensemble-averaged*, atau dimanipulasi untuk menghapus komponen perhitungan dengan skala kecil, sehingga beban komputasinya menjadi lebih rendah untuk dapat diselesaikan (Al-Hashimi, Madhloom, & Nahi, 2017). Salah satu model turbulensi yang bisa digunakan adalah model  $k-\varepsilon$  *realizable* yang dapat digunakan pada kasus khusus. Istilah *realizable* merujuk pada kondisi batas matematis tertentu terkait dengan tegangan normalnya. Hal ini dijelaskan pada kombinasi antara hubungan Boussinesq dan definisi viskositas *eddy* yang menghasilkan persamaan tegangan normal Reynold pada aliran inkompresibel seperti yang dinyatakan pada persamaan 2.16 dan 2.17 (Shih, Liou, Shabbir, & Zhu, 1995).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial k}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (2.16)$$

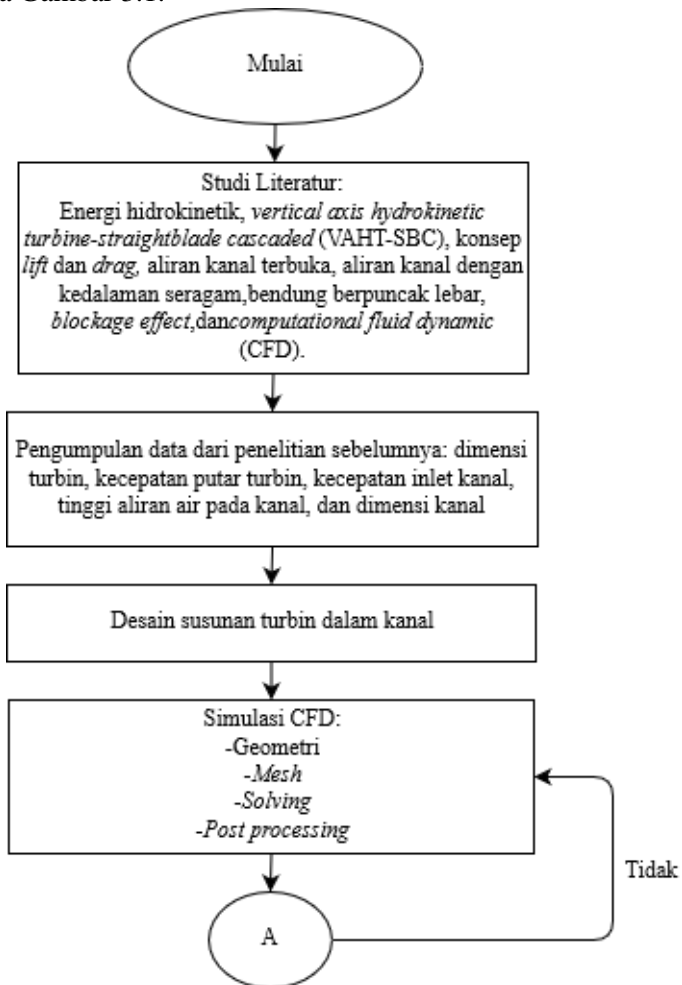
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon \\ - \rho C_1 \frac{E^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

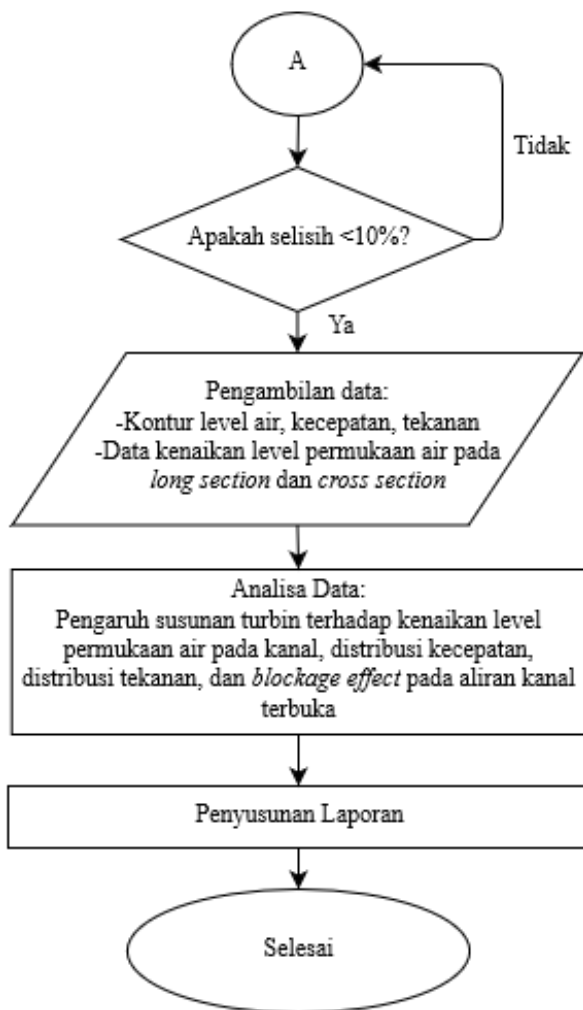
Halaman ini sengaja dikosongkan

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Urutan langkah-langkah yang dilakukan dalam pelaksanaan penelitian ini terdapat pada diagram alir pelaksanaan penelitian pada Gambar 3.1.





**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur mengenai energi hidrokinetik, *vertical axis hydrokinetic turbine-straight blade*



*cascaded* (VAHT-SBC), konsep *lift* dan *drag*, aliran kanal terbuka, aliran kanal dengan kedalaman seragam, bendung berpuncak lebar, *blockage effect*, dan *computational fluid dynamic* (CFD). Literatur terkait bahasan tersebut selanjutnya di-*review* untuk memberikan pemahaman lebih utuh yang dibutuhkan dalam proses simulasi dan analisis hasil simulasi.

Langkah selanjutnya adalah mengumpulkan data sekunder yang didapat dari pihak ketiga dan dari penelitian sebelumnya. Data-data yang dibutuhkan untuk menunjang tugas akhir ini antara lain adalah data dimensi turbin, kecepatan putar turbin, kecepatan inlet kanal, tinggi aliran air pada kanal, dan dimensi kanal. Setelah data tersebut didapatkan, dilakukan desain susunan turbin dalam kanal untuk menentukan variasi jumlah turbin yang diberikan sesuai dengan data geometrinya.

Simulasi dilakukan dengan perangkat lunak *Computational Fluid Dynamic* (CFD) yang didalamnya terdiri dari tahap geometri, *meshing*, pemberian *set up* yang sesuai untuk simulasi, *solution*, dan mengekstrak hasil-hasil simulasi pada *CFD result*. Apabila simulasi dasar untuk kondisi yang mewakili tujuan simulasi kali ini menunjukkan hasil dengan selisih kurang dari 10% dari data acuan, maka variasi-variasi simulasi lainnya dapat dilakukan. Data yang didapat dari simulasi adalah data perubahan ketinggian level air, data kontur kecepatan, kontur tekanan, dan data kecepatan serta tekanan maksimum pada bidang yang ditinjau. Pada simulasi ini terdapat 20 variasi yang disimulasikan, yaitu 5 variasi kecepatan aliran yang terdiri dari 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 m/s serta empat variasi jumlah turbin pada kanal yaitu kanal tanpa turbin, kanal dengan satu, tiga, dan enam turbin. Hasil-hasil yang didapat kemudian dianalisis untuk diambil kesimpulan dan hubungan dari variasi yang dilakukan terhadap parameter yang akan dianalisis.

### **3.2 Desain Turbin dan Kanal**

Secara keseluruhan data yang dibutuhkan terbagi menjadi dua yaitu data mengenai turbin dan data pada kanal. Data turbin yang digunakan sebagai acuan pada simulasi ini adalah turbin hidrokinetik yang telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya

oleh Seno Widya Manggala pada tahun 2016. Pada penelitian tersebut, dimensi panjang *foil* yang digunakan adalah 80 cm sedangkan pada simulasi ini dimensi dari penelitian tersebut didesain kembali dengan skala 2:1. Tabel 3.1 menyajikan data dimensi turbin hidrokinetik yang digunakan.

**Tabel 3.1** Data ukuran turbin

Parameter	Ukuran (cm)
Panjang shaft	200
Diameter shaft	8
Diameter turbin	160
Tinggi turbin	160
Panjang chord blade (tipe NACA0018)	20
Panjang span blade (tipe NACA0018)	160
Jarak antar blade	20

Data lain yang dibutuhkan adalah data kanal. Data ini didapatkan dari pengukuran terakhir yang dilakukan oleh Unit Pembangkitan Paiton, Jawa Timur yang mana kanal outlet kondensernya digunakan sebagai rujukan desain kanal untuk digunakan pada simulasi ini. Dimensi kanal disajikan pada Tabel 3.2. Tetapi pada penelitian ini tidak dilakukan simulasi untuk keseluruhan panjang kanal 1,77 km tetapi diambil domain lurus dengan panjang 3D untuk jarak turbin ke bagian inlet dan 7D sebagai jarak turbin ke bagian outlet. Nilai D adalah diameter turbin yaitu 1,6 m.

**Tabel 3.2** Data kanal outlet UP Paiton

Parameter	Nilai
Level kedalaman air	2.5 m
Lebar	22 m
Panjang	1770 m
Kecepatan rata-rata aliran	2,92 m/s
Debit	137.5 m <sup>3</sup> /s

### 3.3 Desain Susunan Turbin pada Kanal

Syarat yang ditetapkan pada penyusunan turbin dalam kanal adalah turbin akan disusun secara serial, dengan kata lain disusun berdampingan pada satu garis yang sama. Susunan ini menguntungkan karena tidak terdapat turbin pada aliran hilir, yang mana pada aliran tersebut kecepatan dan tekanan aliran akan terdampak dari *blockage* yang diberikan turbin di depannya.

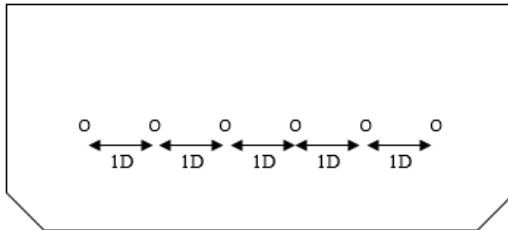
Jarak antar turbin dan jarak antar turbin dengan dinding ditentukan minimal 1D yaitu 1,6 m. Pada Tabel 3.2 diketahui bahwa lebar kanal adalah 22 m, dengan membagi nilai lebar tersebut dengan diameter turbin yang digunakan maka jumlah turbin terbanyak yang dapat dipasang pada kanal tersebut adalah 6 turbin. Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 menunjukkan ilustrasi desain susunan turbin yang diinginkan. Pada variasi dengan jumlah turbin 3 dan 1, salah satu turbin diletakkan pada sisi tengah kanal sebagai patokan seperti pada Gambar 3.3.

Ditinjau dari kedalamannya, turbin diletakkan pada bagian tengah kedalaman kanal. Mengingat *shaft* turbin memiliki panjang 2 m dan kedalaman kanal adalah 2,5 m, maka pada penelitian kali ini ditentukan bahwa jarak antara dasar kanal dengan turbin adalah 0,3 m sedangkan jarak antara turbin dengan permukaan air adalah 0,2 m. Bila turbin diletakkan pada posisi yang terlalu dekat dengan dasar kanal, maka efek aliran air terhadap dasar kanal akan memengaruhi aliran yang mengenai turbin dan memengaruhi ekstraksi energinya. Tetapi bila diletakkan terlalu dekat dengan permukaan air maka efek kenaikan permukaan air akan semakin besar. Selain itu, jika terdapat bagian bilah turbin yang berada pada udara, hal tersebut akan mengurangi nilai ekstraksi daya yang mampu dihasilkan turbin.

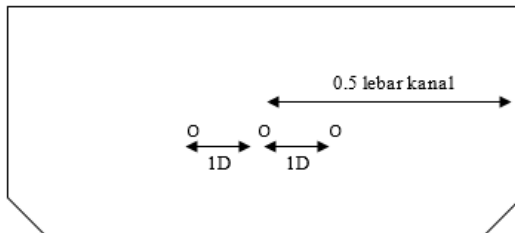
### 3.4 Simulasi CFD

Tahap pertama dari simulasi CFD adalah pembuatan geometri yang akan disimulasikan. Sesuai dengan variasi jumlah turbin yang terdapat pada kanal, pada simulasi ini terdapat 4 variasi geometri yaitu geometri kanal tanpa turbin, geometri kanal dengan 1 turbin didalamnya, kanal dengan 3 turbin, dan kanal dengan 6 turbin.

Geometri turbin yang digunakan pada simulasi ini dibuat dengan perangkat lunak *Autodesk Fusion 360 (Education License)*. Pada simulasi ini bagian turbin yang dimasukkan hanya *foil* dan *shaft* saja, bagian lengan turbin tidak disimulasikan karena keberadaannya tidak memberikan dampak besar pada analisis penelitian. Pertimbangan lainnya adalah untuk menghemat beban komputasi yang harus dijalankan.



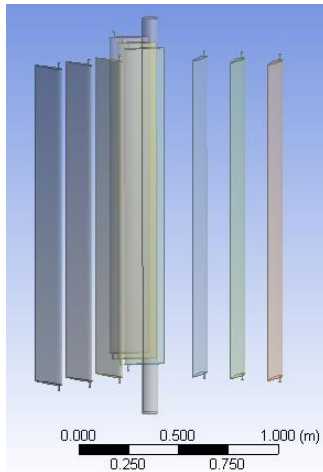
**Gambar 3.2** Desain susunan 6 turbin pada kanal



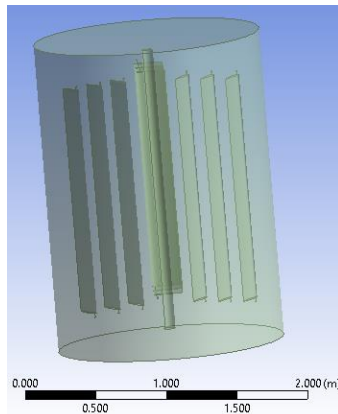
**Gambar 3.3** Desain susunan 3 turbin pada kanal

Selanjutnya geometri turbin yang telah dibuat di-*import* pada perangkat lunak CFD. Geometri turbin yang telah di-*import* terdapat pada Gambar 3.4. Pada variasi kanal dengan turbin, terdapat dua domain pada geometrinya, yaitu domain kanal dan domain *rotating* pada kanal yang ditunjukkan pada Gambar 3.5 dan 3.6. Domain *rotating* adalah silinder yang menyelubungi turbin sebagai representasi putaran turbin. Domain *rotating* dibuat dari silinder dengan diameter 1,6 m dan tinggi 2,2 m. Domain kanal dibuat sesuai dengan data pada Tabel 3.2, sisi depan dari domain kanal yang selanjutnya didefinisikan sebagai tempat masuknya air

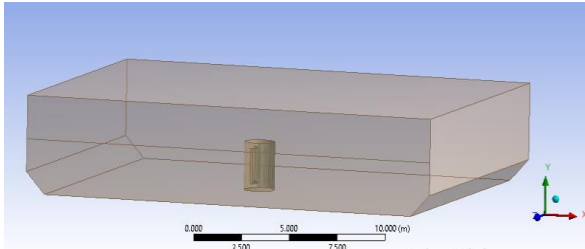
dibagi menjadi dua sisi. Dua sisi tersebut adalah sisi tempat masuknya udara dan air secara terpisah, untuk kemudian keluar melalui satu sisi outlet yang sama. Domain *rotating* terletak pada bagian dalam domain kanal sehingga domain kanal memiliki lubang dengan dimensi yang sesuai dengan domain *rotating*.



**Gambar 3.4** Geometri turbin



**Gambar 3.5** Domain *rotating*



**Gambar 3.6** Domain kanal

Tahap kedua dari simulasi CFD yaitu *meshing*. Pada tahap ini, geometri yang telah dibuat dibagi menjadi kontrol volume yang lebih kecil. Kontrol volume yang terbentuk akan menjadi tempat perhitungan persamaan dasar pada simulasi CFD yaitu kekekalan massa, kekekalan energi, dan persamaan navier-stokes. Ukuran dari *meshing* harus diatur sedemikian rupa sehingga jumlah elemen *meshing* masih sesuai dengan kemampuan komputasi tetapi simulasi yang dilakukan juga memiliki hasil yang akurat. Geometri yang memberikan dampak besar pada simulasi, dalam kasus ini adalah geometri turbin, diberikan ukuran *mesh* yang lebih kecil. Hal ini bertujuan untuk membuat semakin banyak kontrol volume pada geometri tersebut sehingga perhitungan menjadi lebih detail.

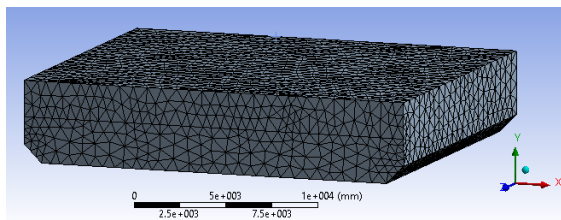
*Meshing* yang diberikan pada simulasi ini memiliki ukuran kontrol volume yang berbeda untuk tiap-tiap bagian. Sisi-sisi dari turbin diberikan ukuran 100 mm dengan *size function curvature*, satu bagian domain *rotating* dengan ukuran 200mm dengan *size function uniform*, dan ukuran *global* pada domain kanal yaitu 1300 mm dengan *size function curvature*. Selain itu pada geometri yang terdapat turbin dalam kanalnya, ditambahkan metode *patch independent* untuk domain kanal dan domain *rotating* nya. Pada metode *patch independent*, *mesh* tetragonal dihasilkan dari bagian dalam geometri. Keuntungan metode tersebut adalah kemampuannya untuk mengabaikan kontrol volume pada model yang tidak memiliki hubungan dengan komputasi yang diperlukan. Strategi tersebut dapat menghemat beban komputasi yang diperlukan. Detail *mesh* untuk masing-masing domain terdapat pada Gambar 3.7, 3.8, dan 3.9.

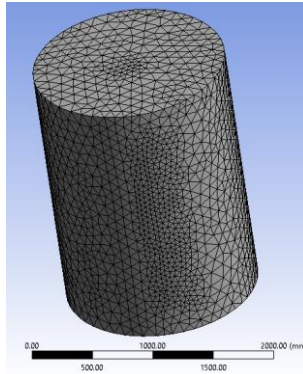
**Tabel 3. 3.** Detail meshing pada simulasi

Jumlah Turbin	Jumlah Elemen	Rata-Rata Skewness
0	297446	0,21297
1	953285	0,27184
3	2267752	0,31053
6	3691250	0,31669

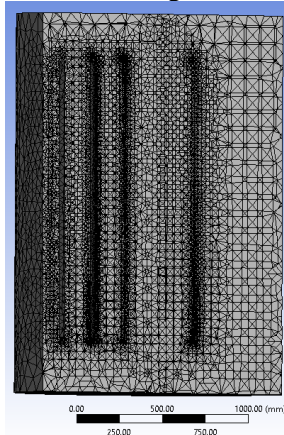
Untuk menentukan kualitas dari tahap *meshing*, terdapat beberapa parameter kualitas diantaranya *skewness*. Semakin kecil nilai *skewness*, hingga mendekati 0, maka kualitas *mesh* semakin baik. Nilai *skewness* yang masih diizinkan adalah 0,8 – 0,94. Detail dari jumlah elemen dan rata-rata *skewness* pada masing-masing geometri susunan turbin ditampilkan pada tabel 3.3.

Setelah *meshing* dilakukan, tahap selanjutnya adalah memberikan masukan nilai inisiasi dan kondisi batas pada simulasi CFD. Parameter-parameter umum dari simulasi yang dilakukan terdapat pada Tabel 3.4. Model turbulensi yang digunakan pada simulasi ini adalah  $k-\varepsilon$  karena data utama yang ingin didapatkan dari simulasi ini didapat dari perilaku alirannya. Model turbulensi ini memiliki performa bagus untuk digunakan pada simulasi dengan aliran berputar untuk melihat laju penyebaran fluidanya.

**Gambar 3.7** Meshing domain kanal



**Gambar 3.8** Meshing domain rotating



**Gambar 3.9** Meshing pada turbin

**Tabel 3. 4** Parameter yang digunakan

<b>Parameter</b>	<b>Jenis</b>
Model Geometri	3D
Keadaan	Transient
Multiphase model	Volume of fluid
Viscous model	K- $\epsilon$ ,
Material properties	Fluid : air and water Solid : wall kanal



**Tabel 3. 5** Kondisi batas simulasi CFD

No	Kondisi Batas	Lokasi	Kondisi
<i>Domain Kanal (Fluid Domain)</i>			
1	Velocity - inlet	Face pada sumbu +z domain kanal (1 face dibagi menjadi 2, untuk <i>inlet air</i> dan <i>inlet water</i> )	<i>Inlet air – phase: mixture</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kecepatan aliran: 0,2 m/s</li> <li>• <i>Turbulence intensity</i>: 20%</li> </ul> <i>Inlet water – phase: mixture</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kecepatan aliran: sesuai variasi</li> <li>• <i>Turbulence intensity</i>: 10%</li> </ul> <i>Inlet water – phase: water</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Volume fraction: 1</li> </ul>
2	Pressure - outlet	Face pada sumbu -z dan sumbu +y	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Backflow direction specification method: from neighboring cell</i></li> <li>• <i>Backflow turbulent intensity</i>: 10%</li> <li>• <i>Free surface</i>: 2,5 m</li> </ul>
3	Wall	Face pada sumbu -x, +x dan -y	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>No slip wall</i></li> <li>• <i>Roughness height</i>: 0,0004 m</li> <li>• <i>Roughness constant</i>: 0,7</li> </ul>
<i>Domain rotating (Fluid Domain)</i>			
1	Interface	Face pada +y, -y, dan selubung tabung	<i>Rotating wall</i>
<i>Turbin (Solid)</i>			
1	Turbin	<i>Airfoil dan shaft</i>	Wall

Halaman ini sengaja dikosongkan

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Validasi Hasil Simulasi**

Validasi hasil simulasi adalah tahap membandingkan hasil simulasi yang didapat dengan hasil eksperimen atau teori. Dalam metode simulasi *Computational Fluid Dynamic*, selisih yang dapat ditoleransi antar kedua nilai tersebut adalah di bawah 10% (William , 2002). Bila selisih dari validasi yang dilakukan telah mencapai nilai dibawah 10% maka simulasi CFD yang dilakukan bisa dikatakan dapat diterima.

Parameter utama dari simulasi CFD *multiphase* pada penelitian adalah kenaikan level permukaan air. Sehingga parameter kenaikan level permukaan air menjadi parameter validasi yang dilakukan. Validasi dilakukan dengan melakukan simulasi aliran kanal terbuka melalui bendung berpuncak lebar. Geometri ini dipilih karena karakteristiknya yang unik, yaitu level permukaan air diatas bendung mengindikasikan tinggi kritisnya. Berdasarkan perhitungan maka level permukaan air di atas bendung dapat dihitung melalui Persamaan 10 pada Bab II.

Desain dari geometri berpuncak lebar pada kanal ini disesuaikan dengan karakteristik yang diperlukan yaitu bahwa rasio antara  $H_0/L$  berada diantara nilai 0,08 dan 0,5. Pada simulasi ini, jarak antara bendung terhadap permukaan air yang stabil sebelum air mengalami penurunan ketika melalui bendung adalah 0,17 m, dengan lebar bendung ditinjau dari sisi *long section* kanal terbuka adalah 0,4 m, sehingga rasio keduanya adalah 0,34. Selain itu aliran pada kanal terbuka yang simulasikan adalah aliran subkritis dengan bilangan Froude 0,35.

Formula yang terdapat pada Persamaan 10 menunjukkan bahwa tinggi kritis dari bendung berpuncak datar yang digunakan pada simulasi validasi adalah 0.11 m. Hasil dari percobaan validasi yang dilakukan ditunjukkan pada Tabel 4.1. Dalam proses validasi ini, terdapat dua model turbulensi yang digunakan yaitu k- $\epsilon$  dan k- $\omega$  SST, yang mana ternyata keduanya tidak menunjukkan hasil dengan perbedaan yang cukup jauh.

**Tabel 4. 1** Data Validasi

Model Turbulensi	Tinggi Kritis Teori (m)	Tinggi Kritis Simulasi (m)	Selisih (%)
k- $\epsilon$	0,1133	0,1072	5,3839
k- $\omega$ SST		0,1069	5,6487
	Rata-Rata		5,5163

Data validasi yang didapat menunjukkan bahwa persentase selisih antara hasil perhitungan analitis dan hasil simulasi adalah 5,5163%. Hasil validasi yang dilakukan menunjukkan bahwa untuk menunjukkan parameter mengenai aliran model turbulensi yang lebih cocok digunakan adalah k- $\epsilon$ . Hasil ini sesuai dengan teori-teori yang ada.

#### 4.2 Kenaikan Level Permukaan Air

Pemasangan turbin hidrokinetik pada aliran kanal terbuka dapat menghambat aliran air pada kanal. Hambatan ini selanjutnya berdampak pada perubahan level permukaan air pada kanal. Pada penelitian ini, kenaikan level permukaan air disajikan dengan grafik kenaikan level air pada jarak ternormalisasi. Jarak ternormalisasi yang dimaksud adalah jarak titik tersebut terhadap pusat putaran turbin, yang dinyatakan dalam satuan D yaitu diameter turbin. Jarak yang dimaksud ditinjau dari sisi *long section* kanal atau penampang samping kanal dengan panjang total 17,6 m. Untuk jarak ternormalisasi 3D, maka dalam satuan metrik jaraknya adalah 3 dikalikan 1,6 m yaitu 4,8 m. Penggunaan jarak ternormalisasi diharapkan dapat mempermudah pengambilan kesimpulan untuk dapat digeneralisasi pada turbin sejenis dengan diameter yang berbeda. Sumbu vertikal pada grafik yang digunakan adalah presentase kenaikan level. Presentase menyatakan perbandingan antara level air pada titik tersebut terhadap level permukaan air pada inlet yang nilainya adalah 2,5 m.

Untuk memastikan bahwa data kenaikan level yang disajikan merupakan data yang representatif, maka data tidak hanya diambil

pada satu bidang *long section* saja. Melainkan diambil pada 13 bidang *long section*. Variasi dari bidang-bidang tersebut adalah jaraknya dari dinding samping kanal, yaitu titik-titik di sepanjang permukaan tampak depan kanal dengan lebar 22 m. Titik acuan yang digunakan adalah bagian tengah dari lebar kanal yang berjarak 11 m dari dinding samping kanan dan kiri kanal. Dari titik tersebut, selanjutnya titik acuan *long section* yang digunakan berjarak 0D,  $\pm 1D$ ,  $\pm 2D$ ,  $\pm 3D$ ,  $\pm 4D$ ,  $\pm 5D$ , dan  $\pm 6D$ . Data kenaikan level yang disajikan adalah rata-rata dari 13 bidang *long section* tersebut.

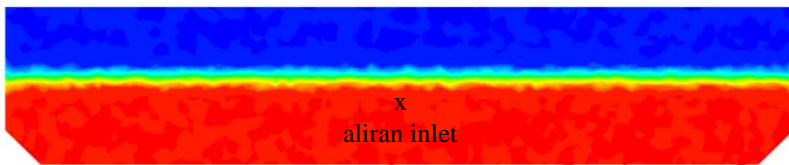
Kontur yang digunakan sebagai acuan pengambilan data adalah kontur densitas seperti yang terdapat pada Gambar 4.1. Pada kontur tersebut, warna biru menunjukkan densitas udara dengan nilai  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , warna merah menunjukkan kontur dari air yaitu  $998 \text{ kg/m}^3$ , dan terdapat beberapa warna diantaranya dengan nilai densitas transisi antara air dan udara. Variasi kontur ini menunjukkan dua fase dalam satu domain kanal. Kontur dengan nilai densitas transisi memberikan tantangan pada penentuan kontur dan nilai densitas yang dijadikan sebagai acuan pengambilan data level air dari dasar kanal. Tantangan ini selanjutnya di atasi dengan memanfaatkan kontur densitas yang terdapat pada kanal tanpa turbin. Pada bagian permukaan kanal tanpa turbin dilakukan pengukuran jarak 2,5 dari dasar kanal sebagai tinggi referensi. Selanjutnya dilihat nilai densitas dan warna kontur densitas yang terdapat pada jarak 2,5 m untuk selanjutnya dijadikan sebagai nilai dan kontur densitas acuan untuk melakukan pengambilan data level di kecepatan inlet yang sama.

#### **4.2.1 Kenaikan Level Permukaan Air pada Kecepatan Aliran 1 m/s**

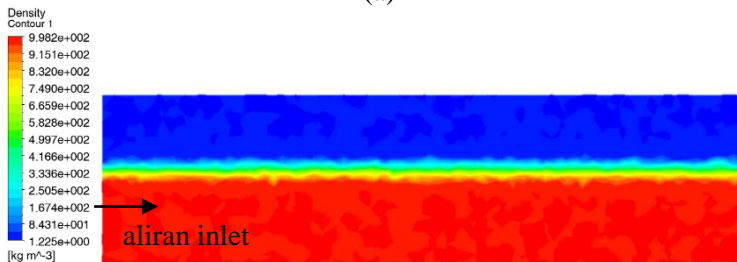
Pada penelitian ini, grafik kenaikan level permukaan air dinyatakan untuk masing-masing kecepatan aliran. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara kenaikan level permukaan air dalam kaitannya dengan kecepatan aliran dan jumlah turbin dalam suatu susunan turbin. Selain digambarkan dalam grafik, pada variasi kecepatan aliran 1 m/s ditampilkan pula

kontur level permukaan air pada kanal untuk variasi kanal tanpa turbin, susunan 1 turbin, susunan 3 turbin, dan susunan 6 turbin yang berturut-turut dapat dilihat pada Gambar [4.1] – [4.4]. Adapun kontur level permukaan air untuk variasi kecepatan aliran yang lain dapat dilihat pada lampiran A.

Level permukaan air pada kanal diambil dari bidang penampang *long section* yang memotong kanal pada setengah lebar kanal. Bidang ini dipilih karena lebih merepresentasikan kenaikan level permukaan air jika dibandingkan dengan sisi dinding. Bidang ini yang digunakan sebagai representasi kontur level permukaan air dan sebagai bidang pengambilan data pada grafik kenaikan level permukaan air.

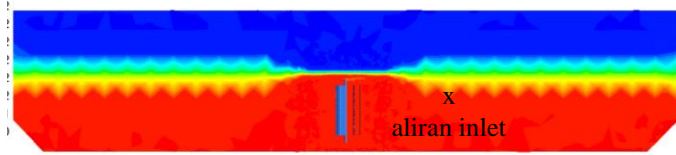


(a)

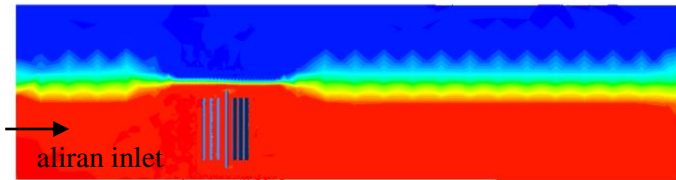


(b)

**Gambar 4.1** Kontur level permukaan air pada kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping

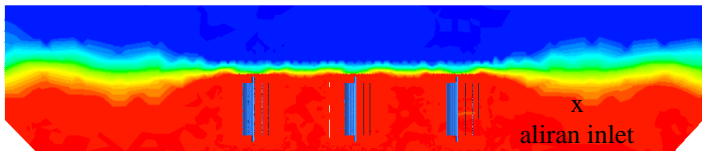


(a)

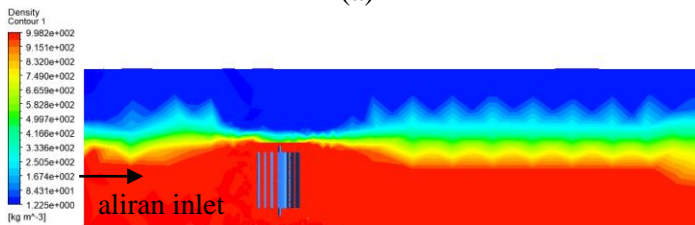


(b)

**Gambar 4.2** Kontur level permukaan air pada kanal dengan 1 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping

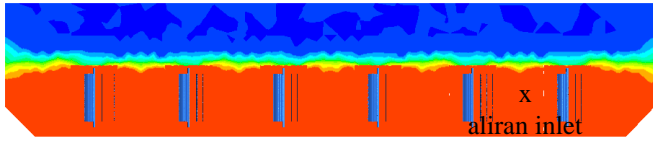


(a)

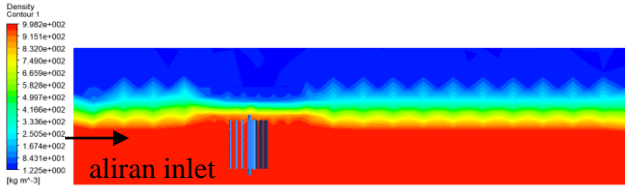


(b)

**Gambar 4.3** Kontur level permukaan air pada kanal dengan 3 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping



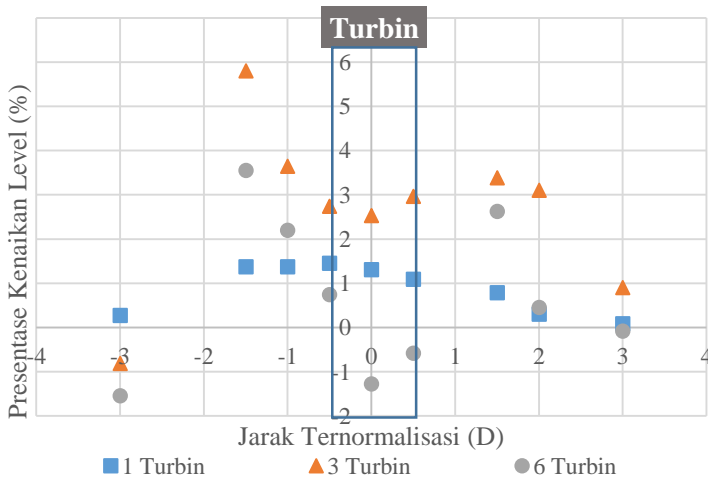
(a)



(b)

**Gambar 4.4** Kontur level permukaan air pada kanal dengan 6 turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) tampak depan (b) tampak samping

Data kuantitatif berupa presentase kenaikan level pada jarak sekian D dari turbin dinyatakan pada grafik pada Gambar 4.5 dibawah.



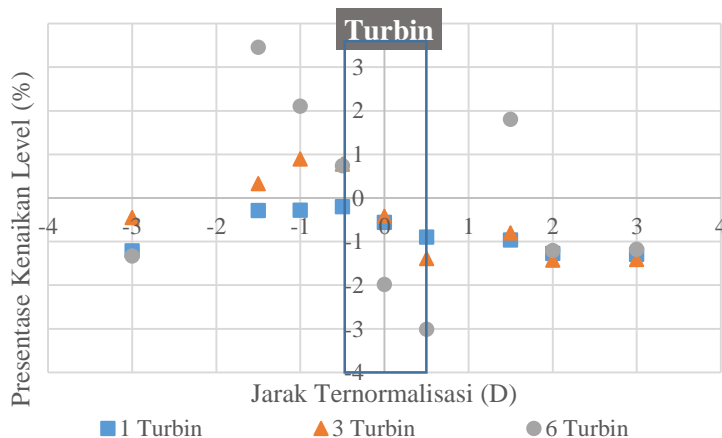
**Gambar 4.5** Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 1 m/s



Kenaikan level permukaan air tertinggi pada variasi kecepatan aliran 1 m/s terjadi pada susunan 3 turbin dengan kenaikan 5,8% sedangkan kenaikan level permukaan air tertinggi pada susunan 6 turbin adalah 3,56%. Kenaikan level permukaan air tertinggi terjadi pada jarak 1.5D pada aliran hulu turbin, yaitu aliran sebelum mengenai turbin. Hal ini disebabkan oleh terhambatnya aliran pada arah hilir oleh instalasai turbin, sehingga terjadi kenaikan level pada bagian hulunya. Simulasi yang dilakukan menunjukkan beberapa lapisan kontur densitas yang berada pada transisi antara air dan udara. Interaksi antara air dan udara yang terjadi pada permukaan air pada kanal menyebabkan hal tersebut dibaca sebagai kontur transisi pada simulasi *multiphase*.

#### 4.2.2 Kenaikan Level Permukaan Air pada Kecepatan Aliran 1.5 m/s

Gambar 4.6 dibawah menunjukkan grafik level permukaan air pada kecepatan aliran 1,5 m/s.

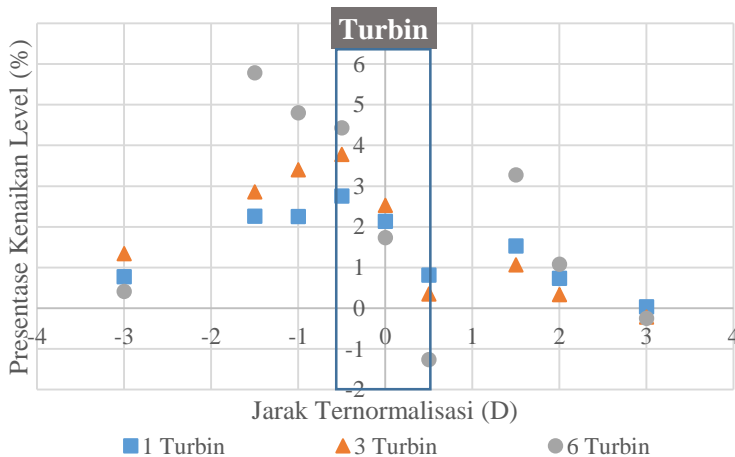


**Gambar 4.6** Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 1,5 m/s

Grafik pada Gambar 4.6 menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah turbin pada suatu susunan, maka kenaikan level permukaannya juga akan meningkat. Kenaikan level tertinggi terdapat pada jarak  $-1.5D$  pada susunan 6 turbin dengan presentase kenaikan level 3,46%. Puncak kenaikan tertinggi pada susunan 3 terdapat pada jarak  $-1 D$  dengan presentase kenaikan berturut-turut adalah 0,89%. Pada susunan 1 turbin, tidak terdapat kenaikan level sama sekali karena pada sepanjang alirannya level air dibawah level inlet yang ditentukan. Faktor yang menyebabkan fenomena ini terjadi adalah level air pada kondisi normal di titik-titik pengambilan data tersebut nilainya kurang dari 2,5 m, ditambah faktor dari penurunan level dari kondisi normal tersebut sehingga nilainya semakin menurun.

#### 4.2.3 Kenaikan Level Permukaan Air pada Kecepatan Aliran 2 m/s

Grafik kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2 m/s dapat dilihat pada Gambar 4.7.

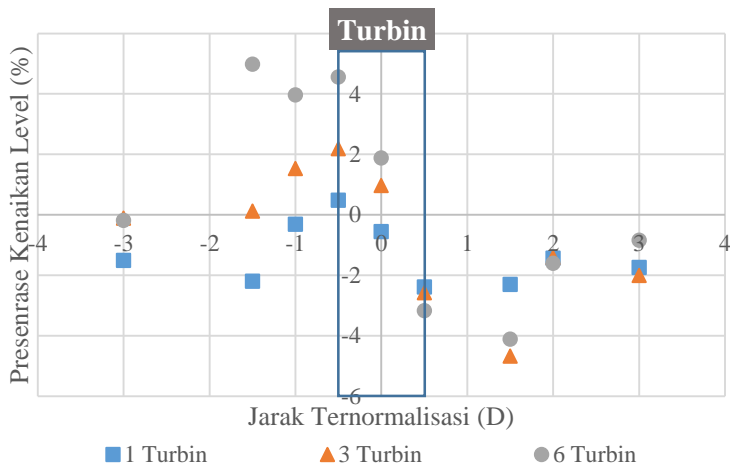


**Gambar 4.7** Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2 m/s

Sesuai dengan kecenderungan data pada kecepatan aliran 1.5 m/s, data pada kecepatan aliran 2 m/s menunjukkan bahwa kenaikan level permukaan air tertinggi terdapat pada susunan 6 turbin pada jarak  $-1,5D$  dengan presentase kenaikan level 5,78%. Selanjutnya pada susunan 3 dan 1 turbin, kenaikan level tertinggi pada jarak  $-0,5D$  berturut-turut adalah 3,78% dan 2,75%.

#### 4.2.4 Kenaikan Level Permukaan Air pada Kecepatan Aliran 2.5 m/s

Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2,5 m/s ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada kecepatan aliran 2,5 m/s, presentase kenaikan level pada kanal terbuka memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran 2 m/s. Kenaikan level tertinggi pada susunan 6, 3, dan 1 turbin nilainya berturut-turut adalah 4,98%, 2,19%, dan 0,48%. Rentang jarak dengan kenaikan level tertinggi adalah pada jarak  $1,5D$  di depan turbin pada susunan 6 turbin, dan  $0,5D$  pada aliran hulu untuk susunan 1 dan 3 turbin.

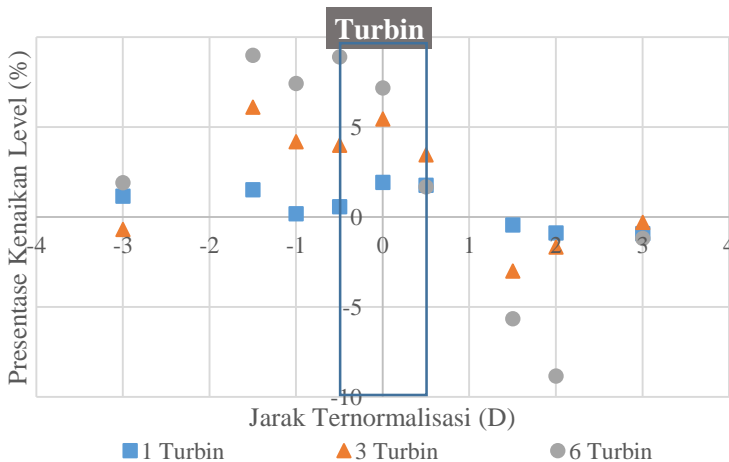


**Gambar 4.8** Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 2,5 m/s

#### 4.2.5 Kenaikan Level Permukaan Air pada Kecepatan Aliran 3 m/s

Pada kecepatan aliran 3 m/s, semua susunan turbin memiliki presentase kenaikan level tertinggi dibanding pada kecepatan aliran yang lain. Kenaikan level tertinggi terjadi pada kanal dengan susunan 6 turbin dengan presentase 8,99%. Selanjutnya adalah pada susunan 3 turbin dengan presentase kenaikan level 6,11%. Kenaikan level permukaan air terkecil terdapat pada susunan 1 turbin dengan presentase kenaikan level 1,92%. Data kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 3 m/s terdapat pada Gambar 4.9.

Presentase kenaikan level yang tinggi pada kecepatan ini mendukung kecenderungan bahwa semakin tinggi kecepatan aliran, maka kenaikan level permukaan air pun akan semakin tinggi.



**Gambar 4.9** Kenaikan level permukaan air pada kecepatan aliran 3 m/s

#### 4.3 Distribusi Kecepatan

Distribusi kecepatan pada aliran ini ditunjukkan pada kontur kecepatan pada permukaan air dengan jarak 1m dari permukaan kanal. Karena ketika kontur kecepatan diambil pada permukaan

bebas air maka nilai kecepatannya adalah cenderung seragam dan tidak ditunjukkan efek *blockage* dari pemasangan beberapa turbin pada kanal tersebut. Pada konsep aliran fluida pada kanal terbuka dengan pendekatan aliran seragam, dinyatakan bahwa kecepatan fluida pada keliling terbasahi termasuk pada permukaan aliran yang memiliki kontak dengan udara adalah nol, dimana tegangan geser dinding terbentuk ( (Muhson, 2009).

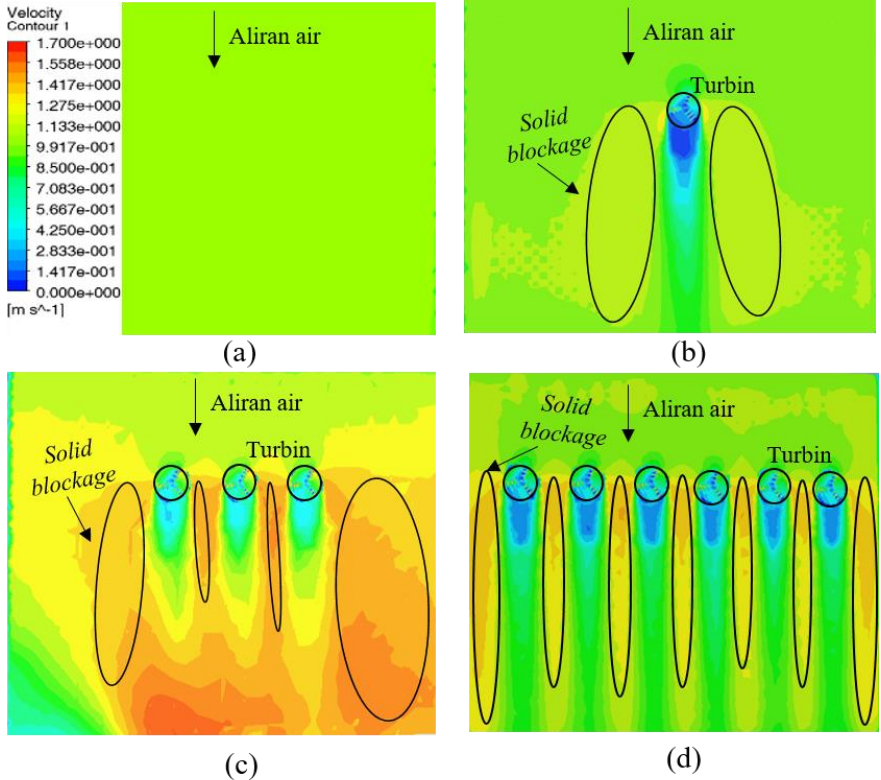
Parameter yang akan dianalisa dari kontur kecepatan adalah profil *wake* dan *blockage effect* pada aliran. *Wake* atau aliran tidak beraturan yang terjadi ketika fluida melewati benda padat merupakan fenomena yang biasa ditemui pada turbin yang berputar. Pada daerah *wake*, terbentuk vortex pada aliran di belakang turbin. Fenomena ini terjadi akibat adanya *turbulence mixing* antara aliran berkecepatan rendah di belakang turbin dengan aliran berkecepatan tinggi yang berasal dari lingkungan. *Turbulence mixing* yang terjadi selanjutnya mengakibatkan terjadinya pertukaran energi dari lingkungan ke daerah *wake* dan membuat kecepatan pada daerah *wake* perlahan-lahan menyesuaikan dengan kecepatan lingkungan atau mengalami *wake recovery*. Dengan mengetahui jarak *wake recovery* dari suatu aliran, maka dapat diperkirakan jarak antar turbin yang akan disusun secara paralel. Karena turbin pada daerah hilir dapat beroperasi dengan nilai masukan kecepatan yang sudah normal dan tidak terdampak dari efek *wake* dari turbin di depannya.

Parameter kedua yaitu *blockage effect* adalah gaya hambat oleh *fluida* karena interaksi fluida di sekitar turbin dengan fluida di sekitar dinding kanal yang menyebabkan perubahan pola aliran *free stream*. Terdapat tiga jenis dari *blockage effect* yaitu *solid blockage*, *wake blockage*, dan *boundary blockage*. Jenis *blockage effect* yang terdapat pada penelitian ini adalah *solid blockage* yang terjadi pada bagian samping turbin dan dinding dengan peningkatan kecepatan aliran di daerah tersebut.

#### **4.3.1 Kontur Kecepatan Aliran pada Kecepatan Inlet 1 m/s**

Gambar 4.10 menunjukkan kontur kecepatan aliran pada aliran dengan kecepatan 1 m/s pada kanal tanpa turbin. Pada

kondisi kanal kosong, kecepatan aliran memiliki persebaran kecepatan yang merata. Sehingga pada kecepatan aliran lain, kontur kecepatan pada kanal kosong tidak ditampilkan. Melainkan dilampirkan pada lampiran B.



**Gambar 4.10** Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) kanal tanpa turbin (b) susunan 1 turbin (c) susunan 3 turbin (d) susunan 6 turbin

*Solid blockage* yang terdapat pada susunan 1 turbin adalah bentuk interaksi dari *blockage* berupa turbin dengan dinding pada kanal dengan peningkatan kecepatan 0,11 m/s. Sedangkan pada susunan 3 dan 6 turbin, terdapat efek *solid blockage* akibat adanya

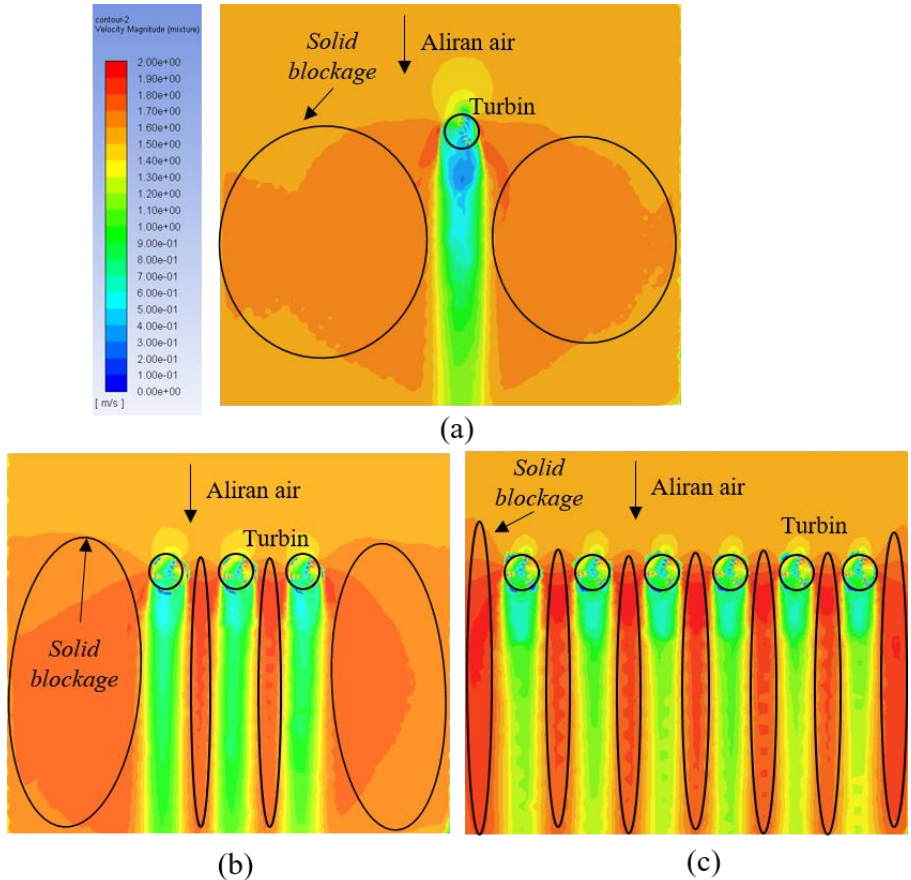
turbin disampingnya yang turut dipasang secara serial dengan peningkatan sekitar 0,36 m/s. Aliran pada susunan 3 turbin menunjukkan kontur *solid blockage* yang beragam dan terdapat peningkatan kecepatan aliran pada bagian belakang aliran.

Pada kecepatan aliran 1 m/s, dapat dilihat daerah *wake recovery* dan susunan turbin. Pada susunan 1 turbin, daerah ini terletak pada jarak 3,9 m dari pusat putaran turbin hingga kecepatan mulai kembali menjadi 0,8 m/s. Susunan 3 turbin tidak menunjukkan kontur ini karena aliran hilirnya mengalami *solid blockage* yang besar. Sedangkan pada susunan 6 turbin, kecepatan 0,8 m/s telah dicapai pada jarak 3,4 m.

#### **4.3.2 Kontur Kecepatan Aliran pada Kecepatan Inlet 1.5 m/s**

*Solid blockage* yang terdapat pada susunan satu turbin memiliki area yang lebih luas dibandingkan pada kecepatan aliran 1 m/s. Peningkatan kecepatan aliran pada daerah *solid blockage* adalah 0,1 hingga 0,2 m/s. Susunan 3 turbin memiliki variasi peningkatan pada area *solid blockage*-nya dengan peningkatan terbesar terdapat pada jarak antar turbin bernilai 0,3 m/s. Pada susunan 6 turbin dengan *blockage ratio* yang lebih besar, peningkatan kecepatan aliran pada jarak antar dindingnya mencapai lebih dari 0,5 m/s. Semakin banyak jumlah turbin dalam suatu susunan, kontur pada Gambar 4.11 menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan di sekitar area *solid blockage* nya juga semakin tinggi.

Ditinjau dari pola olakan aliran air ketika sudah melalui turbin, *recovery wake* terjadi lebih cepat pada aliran dengan jumlah susunan turbin lebih banyak yaitu 6 turbin. Pada bagian ujung hilir dari susunan 6 turbin, kecepatan aliran sudah mulai kembali pada rentang 1,4 m/s, sedangkan pada susunan 1 dan 3 turbin nilai kecepatan alirannya baru mencapai 1,2 m/s. Pada susunan dengan jumlah turbin yang lebih banyak, kecepatan aliran di belakang turbin lebih cepat terpulihkan sehingga kembali ke kecepatan inletnya.



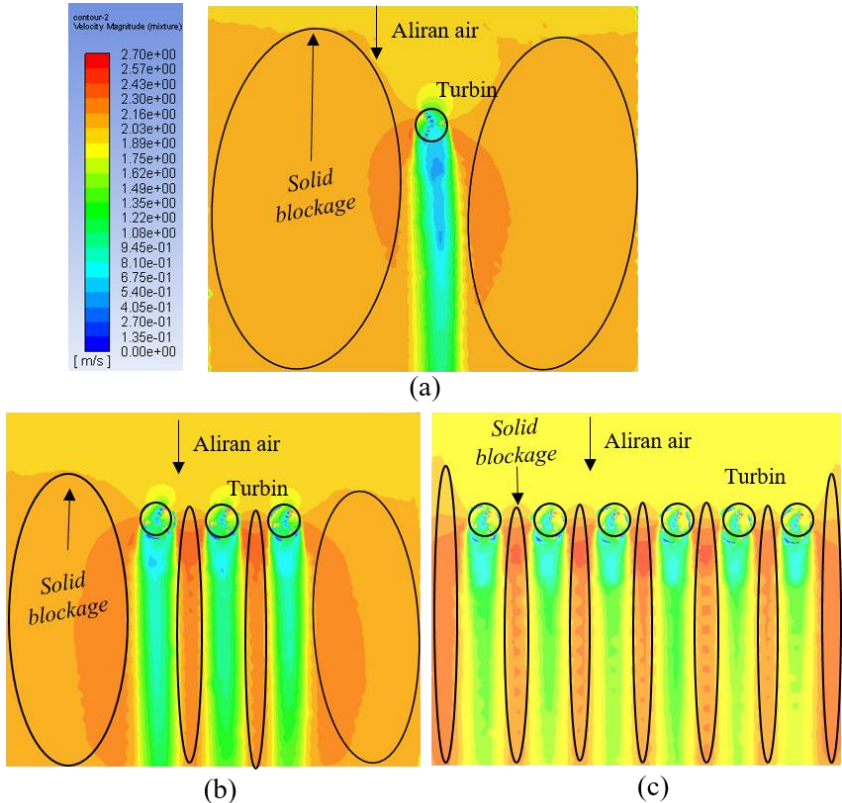
**Gambar 4.11** Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 1,5 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

### 4.3.3 Kontur Kecepatan Aliran pada Kecepatan Inlet 2 m/s

Pada kecepatan aliran 2 m/s, *solid blockage* pada susunan 1 turbin memiliki persebaran yang merata hingga ke dinding. Areanya yang luas hingga menuju pada arah inlet. Peningkatan kecepatan pada area ini berkisar antara 0,16 hingga 0,3 m/s.



Susunan 3 dan 6 turbin memiliki *solid blockage* pada susunan turbin samping dan dinding, serta pada area antar turbin. Peningkatan kecepatannya antara 0,16 hingga 0,43 m/s.

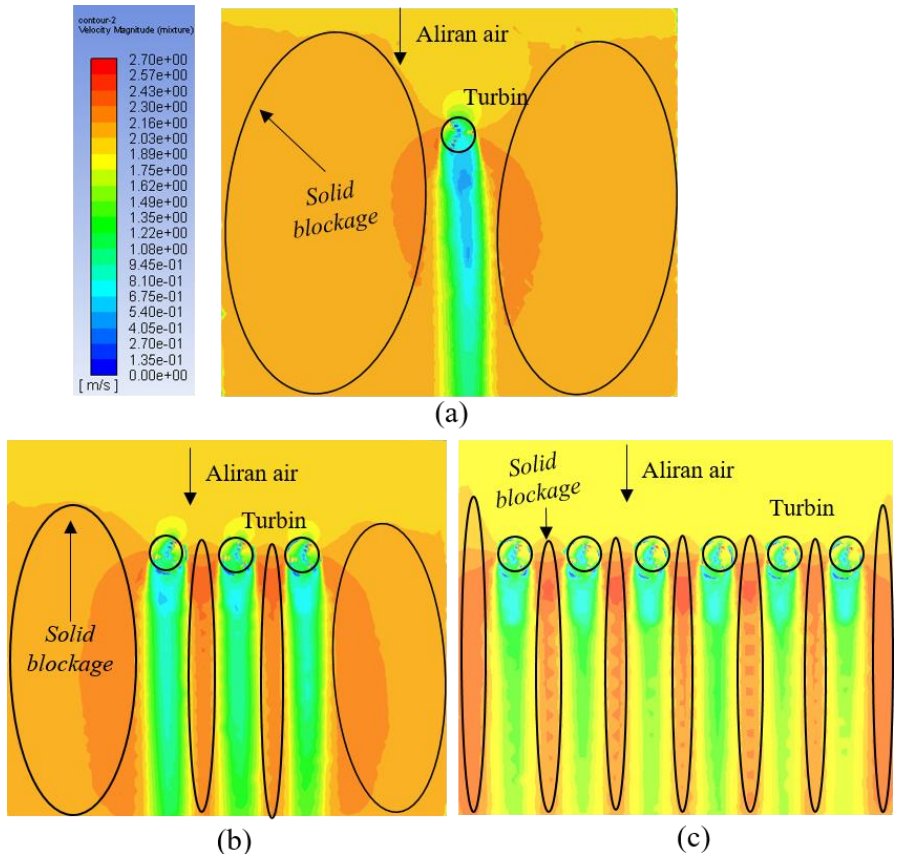


**Gambar 4.12** Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 2 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

Dampak penurunan kecepatan aliran lebih terlihat pada susunan turbin dengan jumlah turbin yang sedikit. Pada daerah belakang susunan 1 turbin, kecepatan aliran turun hingga nilai 0,54 m/s. Bagian hilir dari susunan 1 turbin menunjukkan bahwa

kecepatan alirannya adalah 1,35 m/s. Pada susunan 3 turbin, kecepatan aliran pada ujung hilir meningkat yaitu 1,49 – 1,62 m/s. Susunan 6 turbin memiliki pemulihan kecepatan aliran terbaik dengan nilai kecepatan aliran 1,89 m/s pada ujung hilirnya.

#### 4.3.4 Kontur Kecepatan Aliran pada Kecepatan Inlet 2.5 m/s



**Gambar 4.13** Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 2.5 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

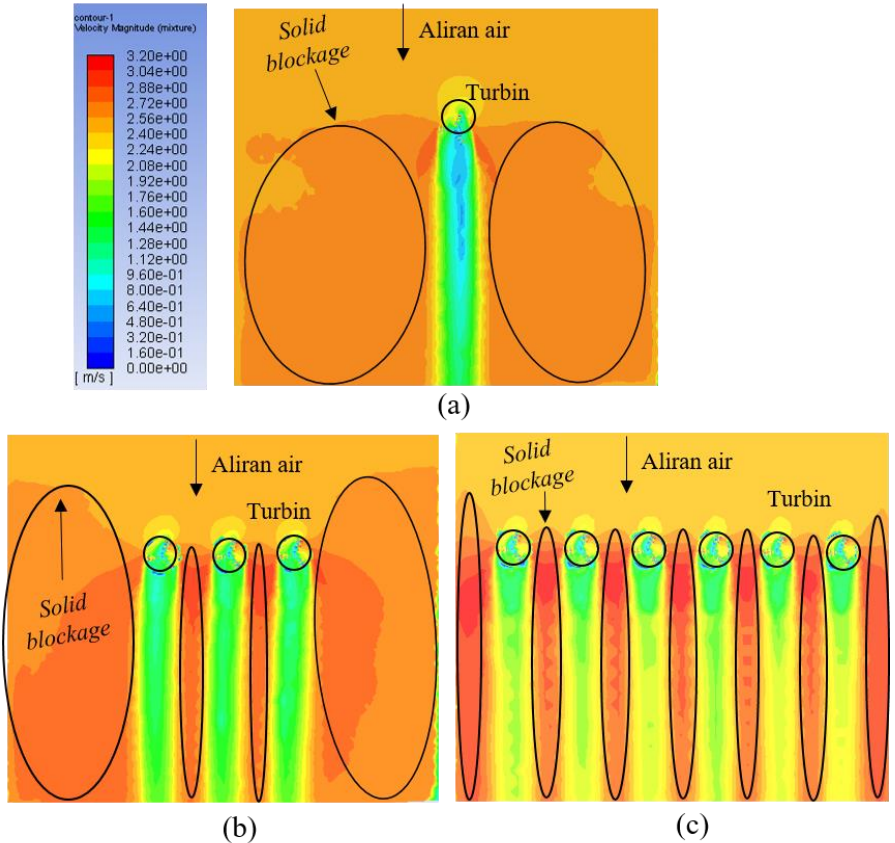
Luas area dari *solid blockage* pada susunan 1 turbin pada kecepatan 2,5 m/s lebih kecil dibanding dengan pada kecepatan 2 m/s. Peningkatan kecepatan alirannya berkisar antara 0,16 – 0,22 m/s. *Solid blockage* pada susunan 3 dan 6 turbin memiliki area yang cenderung lebih maju pada tepi kanan kirinya. Hal ini disebabkan oleh efek dinding. Peningkatan kecepatan aliran pada daerah *solid blockage* meningkat seiring dengan peningkatan jumlah turbin dalam suatu susunan turbin. Pada susunan 3 turbin, peningkatan kecepatannya adalah 0,22 – 0,38 m/s. Sedangkan pada susunan turbin nilainya adalah 0,38 – lebih dari 0,7 m/s.

Tidak ada susunan turbin yang mengalami *wake recovery* hingga ujung *outlet*. *Recovery* yang dimaksud disini adalah kecepatan aliran benar-benar kembali pada kecepatan aliran awalnya. Susunan 6 turbin memiliki kecepatan tertinggi pada bagian hilir yaitu 2,24 m/s.

#### **4.3.5 Kontur Kecepatan Aliran pada Kecepatan Inlet 3 m/s**

Interaksi antara *solid blockage* dengan dinding tidak nampak terlalu signifikan pada kecepatan aliran ini. Tapi peningkatan kecepatan pada daerah *solid blockage* memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan nilai peningkatan pada kecepatan aliran dibawahnya. Pada susunan 1 turbin, peningkatan kecepatannya berkisar pada nilai 0,32 m/s. Sedangkan pada susunan 3 dan 6 turbin, secara berturut-turut rata-rata peningkatan kecepatan tertingginya adalah pada rentang 0,51 dan 0,71 hingga lebih dari 0,9 m/s.

Seperti kecenderungan yang di dapat pada kecepatan aliran sebelumnya, *wake recovery* terjadi lebih cepat pada susunan 6 turbin dengan nilai kecepatan 2,73 m/s pada aliran hilirnya. Pada susunan 3 turbin, nilai kecepatan hilirnya berkisar antara 2,34 hingga 2,73 m/s pada aliran hilir. Sedangkan pada susunan dengan jumlah turbin paling sedikit yaitu 1 turbin, kecepatan pada aliran hilirnya adalah 1,95 – 2,34 m/s.

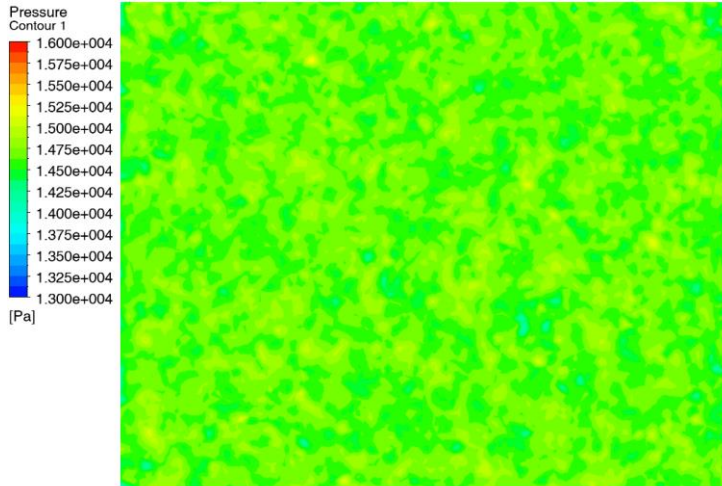


**Gambar 4.14** Kontur kecepatan aliran pada kanal dengan kecepatan aliran 3 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

#### 4.4 Distribusi Tekanan

*Blockage* yang diberikan pada aliran kanal berupa turbin memberikan efek distribusi tekanan yang beragam pada permukaan aliran. Bidang yang dipilih untuk menunjukkan kontur tekanan pada aliran air berjarak 1 m diatas dasar kanal. Untuk variable referensi yaitu aliran kanal tanpa turbin, pada lima

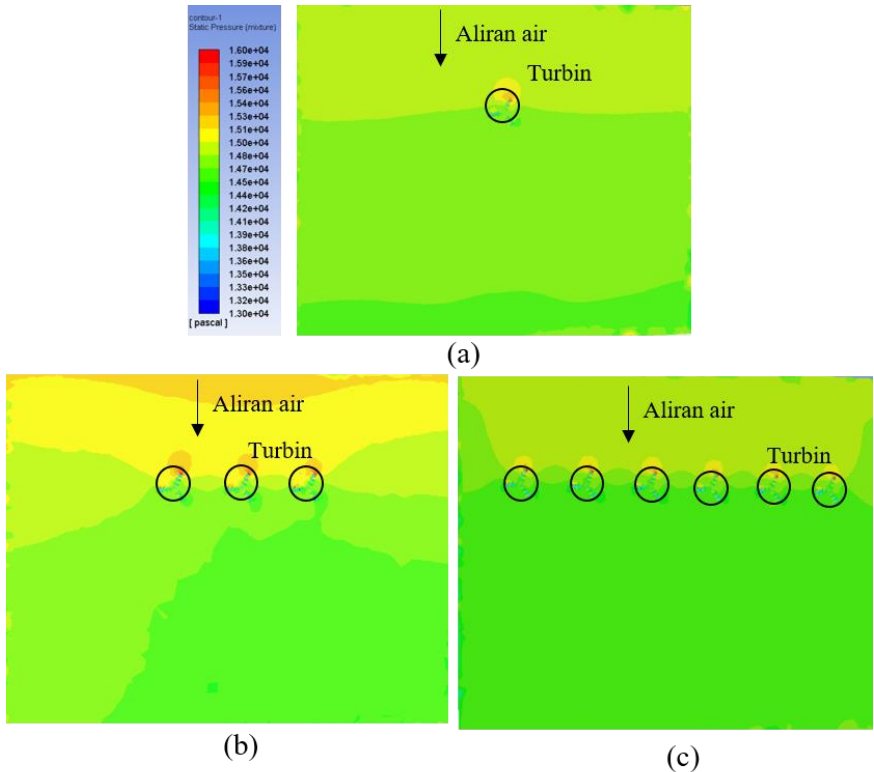
kecepatan aliran yang berbeda, distribusi tekanannya seragam seperti yang ditampilkan pada lampiran C. Sehingga kontur tekanan pada kanal tanpa turbin hanya ditampilkan untuk satu kecepatan aliran yaitu 1 m/s.



**Gambar 4.15** Kontur tekanan pada kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1 m/s (tampak atas)

#### 4.4.1 Kontur Tekanan pada Kecepatan Inlet 1 m/s

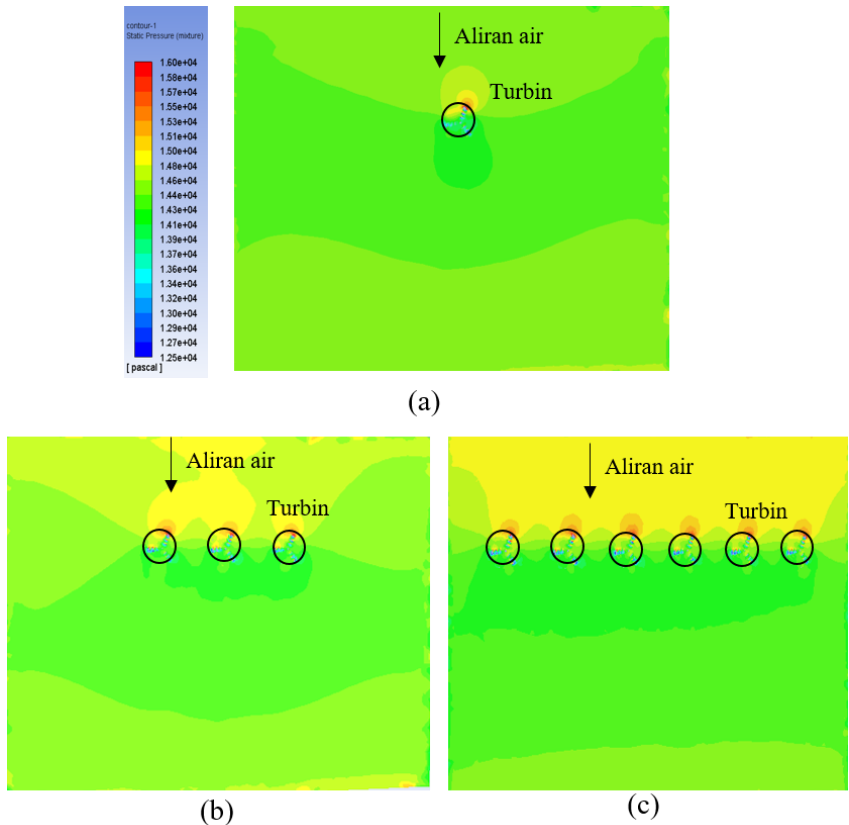
Terdapat peningkatan tekanan pada bagian ujung turbin hingga 15100 Pa, peningkatan tekanannya lebih tinggi pada titik ujung dari bilah terluar turbin dengan tekanan mencapai 16000 Pa.. Setelah melalui turbin, tekanan menurun pada aliran kanal. Pada susunan turbin dengan *blockage area* yang lebih tinggi, terlihat interaksi peningkatan tekanan antara turbin dengan dinding. Area aliran kanal yang lebih kecil membuat tekanan meningkat pada wilayah samping dinding.



**Gambar 4.16** Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 1 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

Jumlah turbin yang lebih banyak pada suatu kanal membuat peningkatan tekanannya juga lebih tinggi. Susunan 1 turbin memiliki nilai tekanan 14800 Pa pada daerah belakang turbinnya. Sedangkan susunan 6 turbin memiliki nilai tekanan 14400 Pa hingga 14500 Pa.

#### 4.4.3 Kontur Tekanan pada Kecepatan Inlet 1.5 m/s

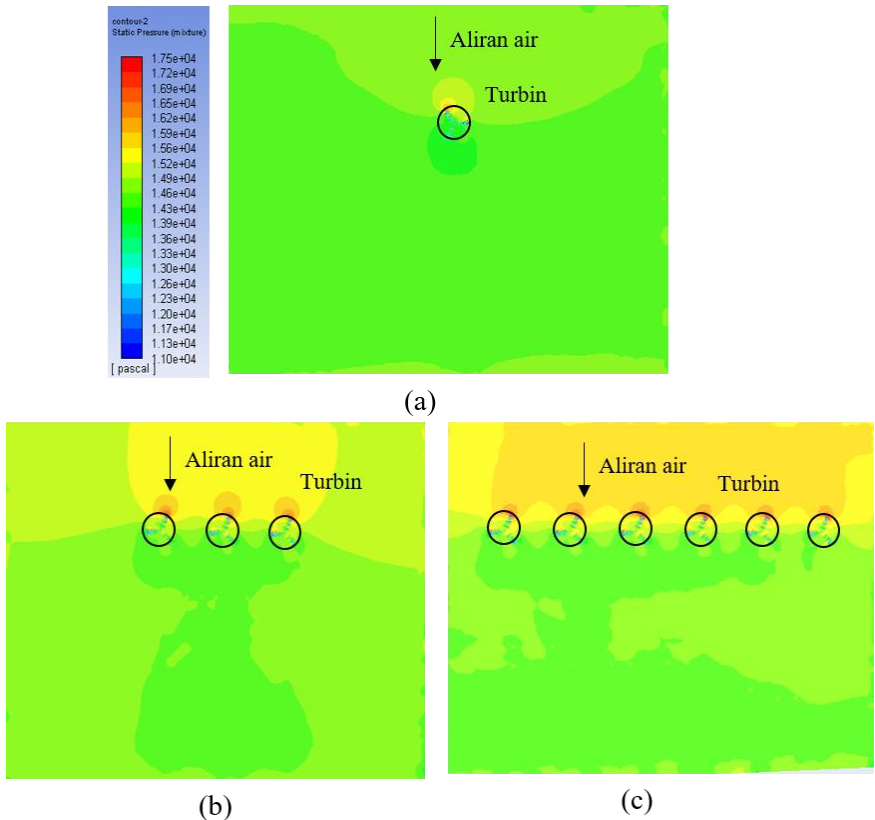


**Gambar 4.17** Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 1,5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

Penurunan tekanan yang lebih drastis terjadi pada aliran kanal dengan susunan 6 turbin. Setelah melalui turbin, aliran kanal dengan 1 turbin pada kecepatan 1,5 m/s memiliki nilai tekanan yang sama seperti pada aliran inlet sebelum mengenai turbin yaitu 14400 Pa. Sedangkan pada susunan 6 turbin, tekanannya belum ter *recovery*, tetapi seiring dengan semakin bertambahnya jarak dari

turbin, terdapat peningkatan tekanan. Efek dinding terlihat sangat jelas pada susunan 3 turbin, dengan tekanan 15000 Pa pada bagian tengah inlet, lalu efek dinding membuat teknannya lebih rendah yaitu 148000 Pa.

#### 4.4.4 Kontur Tekanan pada Kecepatan Inlet 2 m/s



**Gambar 4.18** Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 2 m/s (a) susunan 2 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin



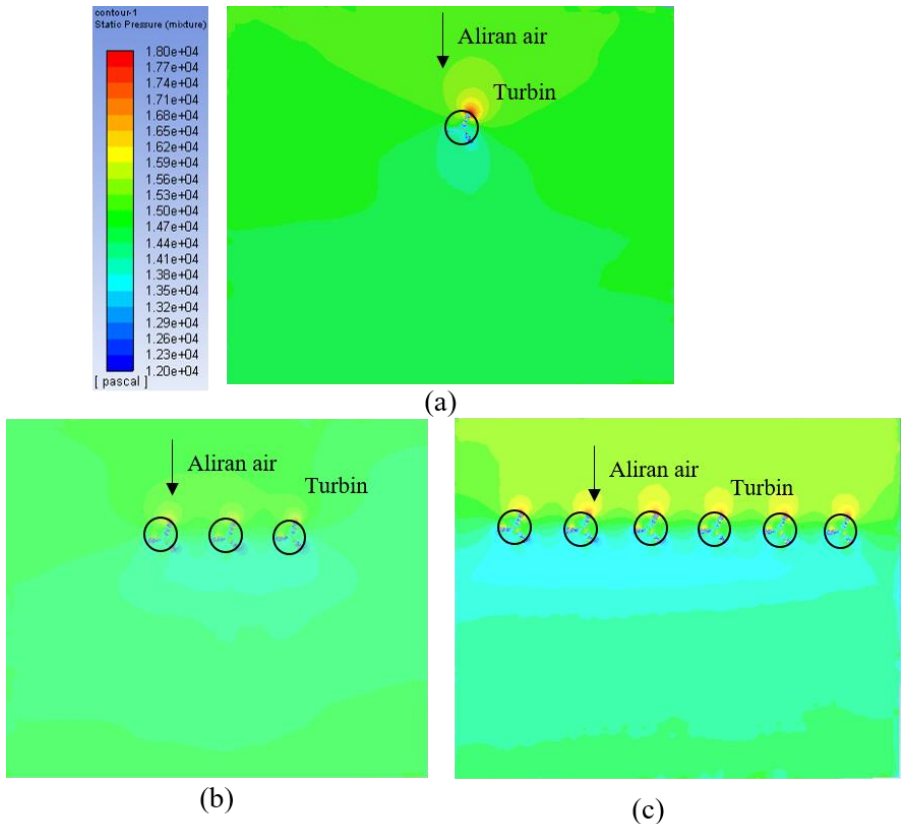
Kontur tekanan pada kecepatan 2 m/s juga memiliki pola yang mirip dengan kontur tekanan pada kecepatan aliran sebelumnya. Dimana area penurunan tekanan terbesar terdapat pada aliran kanal dengan susunan turbin yang lebih banyak. Kontur tekanan pada susunan 1 turbin menunjukkan nilai tekanan yang sudah *te-recovery* pada aliran outletnya.

Tekanan aliran tertinggi pada susunan 3 dan 6 turbin terdapat pada aliran dari sisi inlet hingga bilah pada bagian paling depan jika ditinjau dari sisi inlet. Nilai tekanan pada susunan 3 dan 6 turbin berturut-turut adalah 15200 Pa dan 15900 Pa. Efek dinding dan *blockage* yang diberikan oleh turbin tersebut selanjutnya menurunkan nilai tekanan aliran di bagian hulu.

#### **4.4.5 Kontur Tekanan pada Kecepatan Inlet 2,5 m/s**

Kontur tekanan pada aliran di kanal terbuka mengikuti posisi susunan turbin pada kanal tersebut. Pada kanal dengan susunan 1 turbin, tekanan awal akan mengerucut pada 1 turbin tersebut dan aliran disampingnya mengalami penurunan tekanan. Hal yang sama juga terdapat pada kontur penurunan tekanan di belakang turbin, semakin banyak jumlah turbin pada suatu susunan maka kontur penurunan tekanan juga akan meluas sesuai dengan jumlah turbinnya.

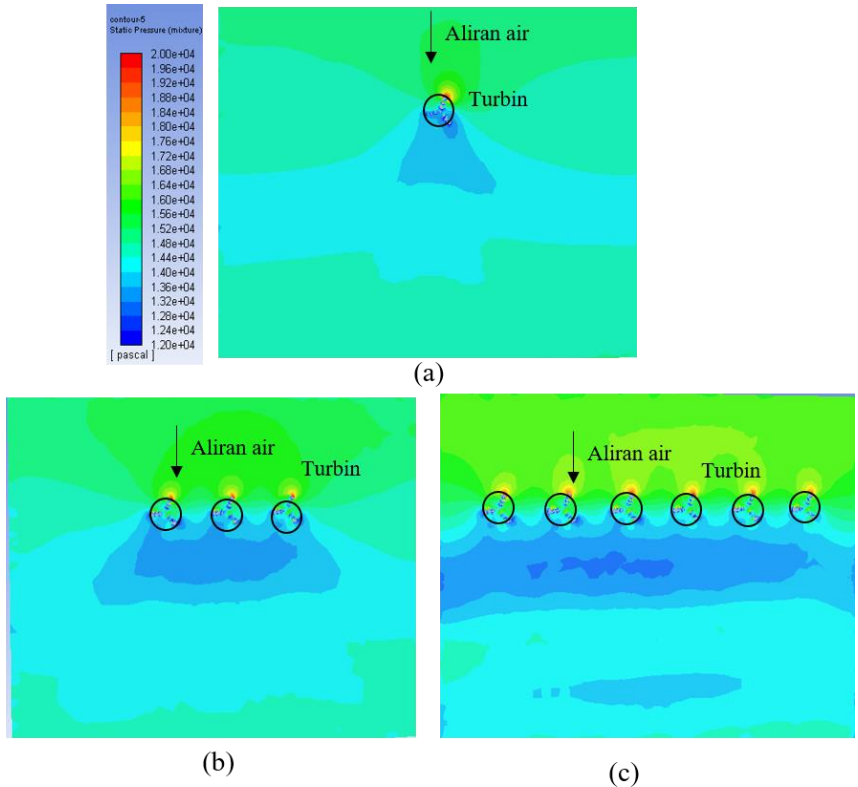
Nilai penurunan tekanan pada daerah belakang turbin memiliki kisaran nilai yang sama yaitu 13500 – 13800 Pa. Tetapi jumlah turbin yang berbeda pada masing-masing susunan membuat kontur penurunan tekanannya juga berbeda. *Blockage ratio* lebih besar pada susunan 6 turbin membuat area penurunan tekanannya juga lebih luas, jika dibandingkan pada susunan 1 turbin.



**Gambar 4.19** Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 1 m/s (a) susunan 2,5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

#### 4.4.6 Kontur Tekanan pada Kecepatan Inlet 3 m/s

Peningkatan kecepatan aliran air membuat tekanan dari aliran terhadap bilah terluar, bila ditinjau dari sisi inlet, juga semakin besar. Nilai dari tekanan tertinggi pada kecepatan aliran ini mencapai lebih dari 20000 Pa. Tetapi pada aliran di belakang turbin, tentunya terdapat penurunan tekanan yang juga besar.



**Gambar 4.20** Kontur tekanan aliran pada tampak atas kanal dengan kecepatan aliran 3 m/s (a) susunan 2.5 turbin (b) susunan 3 turbin (c) susunan 6 turbin

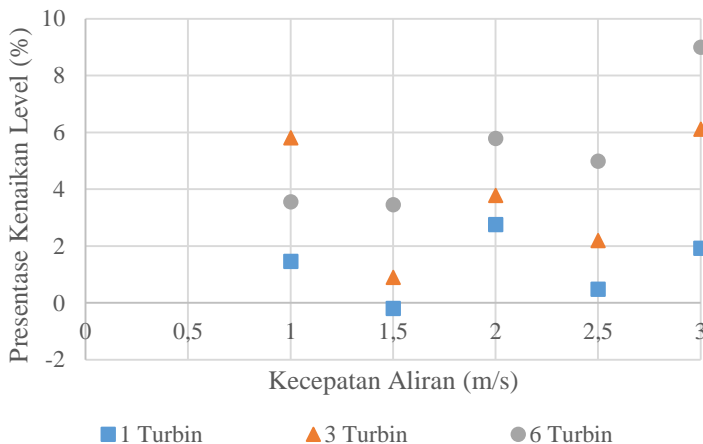
Tekanan aliran di belakang susunan 1 turbin mengalami penurunan sehingga tekanan pada bagian belakang turbinnya adalah 14000 Pa, lalu secara perlahan nilainya meningkat menjadi 14400 Pa dan meningkat lagi hingga memiliki tekanan aliran 14800 Pa pada bagian outletnya yang berjarak  $7.5D$  dari poros turbin.

Susunan dengan jumlah 3 dan 6 turbin membutuhkan jarak pemulihan tekanan yang lebih jauh. Hal ini ditunjukkan oleh penurunan nilai tekanan dari 16400 Pa hingga 14400 Pa pada aliran

mendekati sisi hilir. Pada susunan 3 turbin, tekanan 14400 Pa telah terdapat pada jarak 4,4 m dari turbin sedangkan pada susunan 6 turbin tekanan tersebut baru terjadi pada jarak 5,7 m dari pusat turbin.

#### 4.5 Diskusi

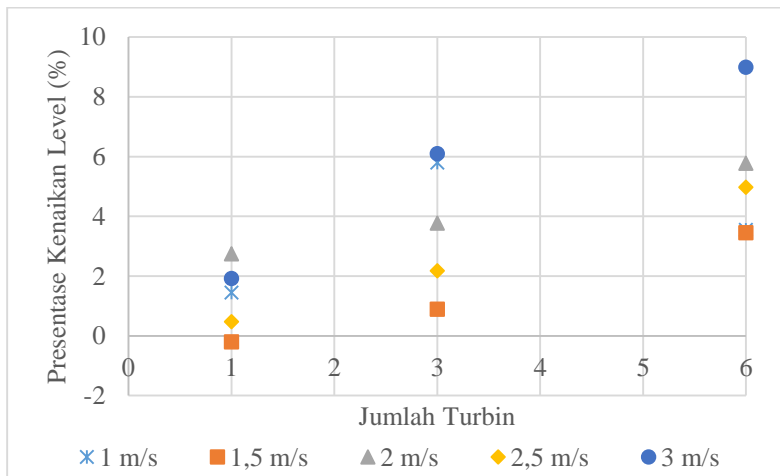
Dalam tahap instalasi turbin hidrokinetik pada suatu kanal terbuka terdapat batas ketinggian level air yang dapat ditoleransi oleh kanal terbuka. Khususnya pada kanal buatan dengan toleransi tinggi maksimum tertentu. Ketika aliran pada kanal tersebut dihambat dengan adanya turbin yang merupakan *blockage* bagi aliran, maka level permukaan aliran hulu (sebelum mengenai turbin) akan mengalami kenaikan. Pada Gambar 4.21 ditunjukkan grafik presentase kenaikan level permukaan air maksimum pada variasi jumlah turbin dan kecepatan aliran. Presentase yang dimaksud adalah presentase antara selisih level air maksimum dengan level pada inlet yaitu 2,5 m.



**Gambar 4.21** Presentase kenaikan level permukaan air maksimum pada variasi jumlah turbin

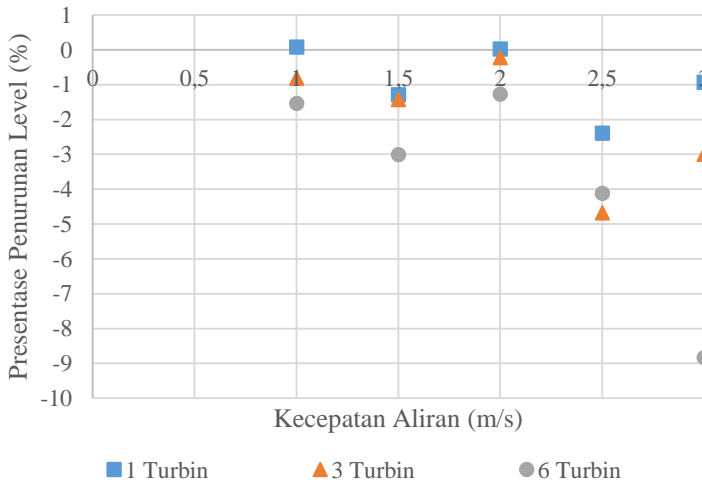
Grafik pada Gambar 4.21 menunjukkan bahwa seiring dengan kenaikan kecepatan aliran inlet dan bertambahnya jumlah turbin pada suatu susunan maka kenaikan level air pada kanal juga akan meningkat. Hal ini dikarenakan semakin banyak jumlah turbin pada suatu susunan, maka presentase *blockage* yang diberikan terhadap aliran kanal akan semakin besar. Presentase kenaikan level air tertinggi terdapat pada susunan 6 turbin dengan kecepatan aliran 3 m/s dengan presentase 8,99 %. Pada kecepatan aliran ini, penambahan 1 turbin menjadi 3 turbin membuat level air naik sebesar 4,18% sedangkan penambahan dari 3 ke 6 turbin menambah 2,89%.

Ditinjau dari Gambar 4.22, tren kenaikan level yang signifikan terdapat pada kecepatan aliran tertinggi yaitu 3 m/s, sedangkan tren terendah terdapat pada kecepatan aliran 1,5 m/s. Pada kecepatan 1,5 m/s, kenaikan level ketika dipasang 1 turbin adalah -0,2%, pada 3 turbin adalah 0,89%, dan pada susunan 6 turbin kenaikannya hanya 3,56%. Informasi ini selanjutnya dapat dijadikan bahan pertimbangan untuk mengkaji apakah presentase kenaikan level tersebut masih sesuai dengan batas toleransi dari bangunan kanal yang akan digunakan sebagai lokasi pemasangan turbin.



**Gambar 4.22** Presentase kenaikan level permukaan air maksimum pada variasi kecepatan aliran

Jarak puncak kenaikan level air terhadap turbin rata-rata terdapat pada 1,5D pada aliran hulu turbin untuk susunan 6 turbin. Sedangkan pada susunan 1 dan 3 turbin, puncaknya bervariasi pada jarak 0 hingga 1D dari poros turbin. *Blockage area* yang lebih luas pada susunan 6 turbin membuat aliran air sudah mengalami kenaikan sebelum aliran memasuki daerah putaran turbin, sehingga lokasi puncak kenaikan level pada susunan 6 turbin lebih jauh dibandingkan susunan dengan 1 dan 3 turbin.



**Gambar 4.23** Presentase penurunan level permukaan air maksimum pada variasi jumlah turbin dan kecepatan aliran

Bila ditinjau dari presentase penurunannya pada Gambar 4.23, selaras dengan hubungan kenaikan level permukaan air terdapat korelasi positif antara peningkatan jumlah turbin dan kecepatan aliran inlet dalam suatu susunan terhadap penurunan levelnya. Semakin tinggi kecepatan inlet, maka energi kinetik aliran yang dapat diekstraksi juga semakin besar. Demikian pula dengan jumlah turbin yang lebih banyak, akan meningkatkan luas area

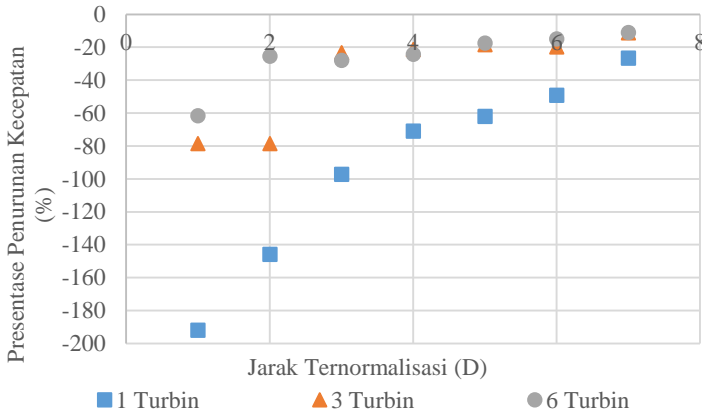
sapuan turbin sehingga energi yang dapat diekstrak juga semakin besar. Peningkatkan jumlah energi air yang diekstraksi tersebut meningkatkan presentase penurunan level air. Setelah mengalami penurunan level, ketinggian air pada susunan turbin pada kecepatan inlet 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 m/s mendekati tinggi normalnya pada jarak 3D pada aliran hilir turbin.

Pemasangan turbin pada suatu kanal terbuka menimbulkan *blockage effect* pada aliran kanal. Karena aliran air harus mengenai hambatan atau *blockage* yang berupa turbin. Pada simulasi ini *blockage* yang terdapat pada aliran air adalah *solid blockage*. Pada daerah *solid blockage* terdapat peningkatan kecepatan aliran yang mana peningkatannya selaras dengan kecepatan inlet dan jumlah turbin dalam suatu susunan. Efek ini berkerja berdasarkan prinsip Bernoulli dimana ketika suatu fluida melewati penampang yang lebih sempit dibanding dengan penampang mula-mulanya, maka kecepatan fluida tersebut akan meningkat. Aliran dengan *solid blockage* terdapat pada bagian samping turbin yang berinteraksi dengan dinding, dan terdapat pada area antar turbin. Peningkatan kecepatan yang lebih besar terdapat pada *solid blockage* diantara turbin.

Kontur *solid blockage* pada bagian kiri dan kanan dinding tidak selalu menunjukkan bentuk yang seragam. Hal ini disebabkan oleh putaran turbin dan lokasi sudut azimuth dari bilah-bilah turbin. Aliran permukaan dengan *blockage ratio* yang tinggi seperti pada susunan 6 turbin membuat aliran pada kanal memiliki jarak yang lebih dekat terhadap dinding. Dekatnya jarak pada dinding tersebut membuat bentuk dari *solid blockage* pada aliran tersebut semakin maju dengan jarak 1 hingga 2D di aliran hulu pada area dekat dinding.

Selain berpengaruh pada *solid blockage*, kontur kecepatan juga menunjukkan adanya fenomena penurunan kecepatan aliran pada daerah belakang turbin yaitu *wake*. Pada daerah ini akan terbentuk vortex pada bagian belakang turbin. Secara perlahan-lahan kecepatan tersebut akan kembali menyesuaikan kecepatan lingkungan. Fenomena ini disebut dengan *wake recovery* yang merupakan panjang *wake* maksimal sehingga kecepatan aliran

dapat kembali seperti semula atau sesuai dengan lingkungannya. Pada simulasi ini tidak terdapat suatu variasi yang secara sempurna telah mencapai *wake recovery* hingga kembali pada kecepatan awalnya.

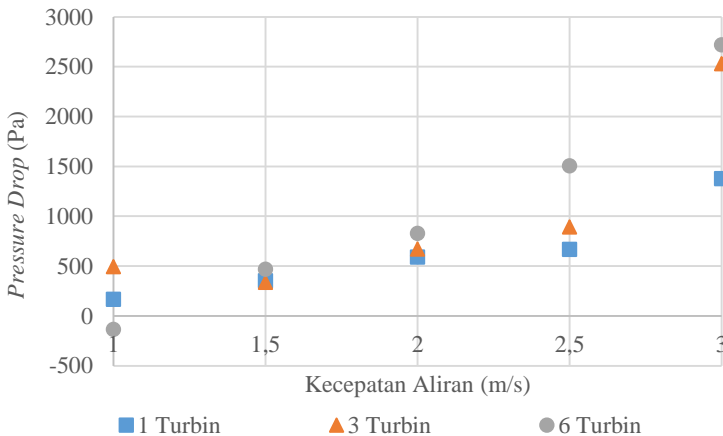


**Gambar 4.24** Presentase penurunan kecepatan pada kecepatan aliran inlet 3 m/s

Berdasarkan pengamatan pada kontur kecepatan dari semua variasi dapat ditarik kesimpulan bahwa *wake recovery* lebih cepat terjadi pada susunan turbin dengan jumlah turbin yang lebih banyak. Hubungan ini dapat dilihat dengan lebih jelas pada Gambar 4.23 yang menunjukkan presentase penurunan kecepatan pada tiga susunan turbin dengan kecepatan aliran inlet 3 m/s. Kecepatan aliran ini dipilih ini untuk menggambarkan hubungan dari besarnya *blockage* yang diberikan jumlah turbin terhadap *wake recovery*. Sumbu X dari gambar tersebut menunjukkan jarak ternormalisasi, yaitu jarak dalam satu D atau diameter turbin dari poros putaran turbin, yang mana pada penelitian ini 1D bernilai 1.6 m. Adapun sumbu Y mengatakan presentase penurunan kecepatan, yaitu selisih antara kecepatan aliran inlet dengan kecepatan pada titik tersebut. Dari Gambar 4.24 dapat dilihat bahwa pada jarak ternormalisasi yang sama, presentase penurunan kecepatan pada susunan 6 turbin secara konsisten menunjukkan nilai yang lebih kecil. Pada kecepatan aliran 3 m/s, presentase penurunan terbesar



pada jarak 1D terdapat pada susunan 1 turbin dengan nilai -191,9%, sedangkan pada jarak yang sama presentase pada susunan 6 turbin adalah -61,49%. Pada sisi hilir, presentase penurunan level dari susunan 1, 3 dan 6 turbin berturut-turut adalah -26,59%, -11,16%, dan -10,99%. Hubungan ini disebabkan karena tingginya kecepatan aliran yang melalui dan di sekitar turbin pada aliran kanal dengan *blockage ratio* yang tinggi. Kecepatan yang tinggi ini dapat meningkatkan pencampuran aliran cepat dan lambat pada bagian belakang turbin, yaitu pada daerah *wake*.



**Gambar 4.25** Hubungan *pressure drop* dengan kecepatan aliran dan jumlah turbin

Ditinjau dari kontur tekanannya, bilah turbin dengan posisi terdekat dari sisi inlet mengalami peningkatan tekanan karena terdapat aliran air yang menabrak *blockage* berubah bilah. Sedangkan tekanan pada aliran air setelah melalui turbin mengalami penurunan tekanan. Gambar 4.25 menunjukkan besarnya *pressure drop* yang terjadi pada masing-masing susunan turbin untuk tiap-tiap kecepatan aliran. *Pressure drop* yang ditampilkan adalah selisih dari tekanan pada bagian tengah inlet dengan kecepatan pada jarak 1D di belakang turbin. Berbeda

dengan kontur kecepatan yang menunjukkan penurunan kecepatan pada bagian belakang turbin dan kenaikan kecepatan pada bagian samping turbin dan diantara turbin, kontur tekanan menunjukkan adanya penurunan tekanan secara merata pada aliran di belakang turbin.

*Pressure drop* yang terdapat pada aliran memiliki hubungan positif dengan peningkatan kecepatan inlet dan jumlah turbin pada suatu susunan. Hubungan ini selaras dengan hubungan terbalik antara tekanan dan kecepatan pada Hukum Bernoulli, jadi meningkatnya tekanan aliran di belakang turbin karena *efek blockage* selanjutnya membuat tekanan pada aliran tersebut semakin rendah. Semakin rendah tekanan aliran di belakang turbin, maka perbedaan tekanan atau *pressure drop* nya juga semakin besar. Hal ini terbukti dengan tren yang terdapat pada Gambar 4.25 yang menunjukkan bahwa *pressure drop* tertinggi untuk semua susunan turbin terdapat pada kecepatan aliran inlet 3 m/s dengan nilai *pressure drop* untuk susunan 1, 3, dan 6 turbin berturut-turut adalah 1337,6 Pa, 2529,8 Pa, dan 2719,2 Pa. Selain itu juga dibutuhkan jarak yang lebih jauh untuk mengembalikan tekanan aliran sesuai dengan tekanan aliran pada bagian *inlet*. Informasi dari kontur kecepatan dan kontur tekanan yang diberikan dapat menjadi informasi untuk menentukan lokasi pemasangan turbin selanjutnya pada aliran hilir bila akan dilakukan susunan turbin secara paralel pada kanal terbuka.

## BAB V KESIMPULAN

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

1. Simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa seiring dengan peningkatan jumlah turbin dan kecepatan aliran inlet maka kenaikan level permukaan air juga semakin tinggi. Presentase kenaikan level permukaan air maksimum untuk susunan 1, 3, dan 6 turbin secara berturut-turut adalah 1,92%, 6,11% dan 8,99%. Kenaikan level maksimal ini terdapat pada kecepatan aliran inlet 3 m/s. Kecepatan aliran dengan presentase kenaikan level air yang paling kecil adalah pada 1,5 m/s dengan presentase kenaikan level pada susunan 1, 3 dan 6 turbin berturut-turut adalah -0,2%, 0,89%, dan 3,45 %. Presentase kenaikan level tertinggi terdapat pada jarak 1.5D hingga 0.5 pada aliran hulu, yaitu aliran sebelum mengenai turbin. Sedangkan rentang jarak penurunan level permukaan air terdapat pada poros turbin hingga 2D pada aliran hilir.
2. Pemasangan turbin pada kanal terbuka menimbulkan adanya *blockage effect* yang berupa *solid blockage*. Fenomena ini merupakan peningkatan kecepatan aliran pada area dengan luas yang lebih sempit, yaitu antara turbin dengan dinding dan pada area antar turbin. Selain itu terdapat fenomena *wake* pada aliran belakang turbin. *Wake recovery* terjadi lebih cepat pada susunan dengan jumlah turbin yang lebih banyak. Pada sisi hilir yaitu outlet dari kanal, presentase penurunan level dari susunan 1, 3 dan 6 turbin dengan kecepatan inlet 3 m/s berturut-turut adalah -26,59%, -11,16 %, dan -10,99%. Selain itu, ditinjau dari distribusi tekanannya maka terdapat penurunan tekanan pada aliran di belakang turbin. Semakin banyak jumlah turbin dalam suatu susunan dan semakin tinggi kecepatan aliran, maka penurunan tekanan akan semakin besar dan dibutuhkan jarak yang lebih jauh untuk membuat tekanan aliran kembali seperti tekanan pada aliran inlet. Hubungan ini

didukung dengan data *pressure drop* pada susunan 1, 3, dan 6 turbin untuk kecepatan aliran 3 m/s berturut-turut adalah 1337,6 Pa, 2529,8 Pa, dan 2719,2 Pa.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aan, H. (2015). *Investigation of blokage correction methods for full-scale wind tunnel testing of trucks*. KTH: Royal institute of Technology.
- Al-Hashimi, S., Madhloom, H., & Nahi, T. (2017). Experimental and Numerical Simulation of Flow Over Broad Crested Weir and Stepped Weir Using Different Turbulence Models. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 28-45.
- At-Tasneem, M. A., Rao, N., Ya, T., & al., e. (2014). Numerical Simulation of Multiple Array Arrangement of Micro Hydro Power Turbine. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, VIII(5), 963-969.
- Aziz, N. (2009). *Tidal Energy Resources Assessment In Indonesia A Case Study In Alas Strait*. University of Southampton.
- Balat, M. (2006). Hydropower systems and hydropower potential in the European Union countries. *Energy Sources Part A*, 965–78.
- Bedard, R. (2005). Electric Power Research Institute (EPRI)'s Ocean Energy Research Program. *Proceedings of the Hydrokinetic and Wave Energy Technologies Technical of the Hydrokinetic and Wave Energy Technologies Technical* (pp. 77- 79). Washington DC: U.S. Department of Energy.
- Birjandi, A. H. (2012). *Effect of Flow and Fluid Structures on the Performance of Vertical River Hydrokinetic Turbines*. Winnipeg: University of Manitoba.
- Cada, G., Ahlgrimm, J., Bahleda, M., Bigford, T., & al, e. (2007). Potential Impacts of Hydrokinetic and Wave Energy Conversion Technologies on Aquatic environments. *Future: Bioengineering*, 174 - 180.
- Fraenkel, P. (2007). Marine current turbines: pioneering the development of marine kinetic energy converters. *Journal of Power and Energy*, 159–69.

- Gunawan, B., Roberts, J., & Neary, V. (2015). Hydrodynamic effects of hydrokinetic turbine deployment in an irrigation canal. *Marine energy technology symposium*, 1-6.
- Guney, M. S. (2011). Evaluation and measures to increase performance coefficient of hydrokinetic turbine. *Renew Sustain Energy Rev*, XV(8), 3669-675.
- Guney, M., & Kaygusuz, K. (2010). Hydrokinetic Energy Conversion Systems: a Technology Status Review. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2996–3004.
- Hantoro, R., Prananda, J., Mahmashani, A. W., Septraningrum, E., & Imanuddin, F. (2018). Performance investigation of an innovative Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded (VAHT SBC). *Journal of Physics*, 1-8.
- Hantoro, R., Utama, I. K., Arief, I. S., A, I., & Manggala, S. W. (2018). Innovation in Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC) design and testing for low current speed power generation. *Journal of Physics*, 1-8.
- Hantoro, R., Utama, L., Erwandi, & Sulisetyno, A. (2011). An Experiment Investigation on Passive Variable-Pitch Vertical-Axis Ocean Current Turbine. *Journal Engineering Science*, 43(1), 27-40.
- Immanudin, F. (2016). Studi Numerik Pengaruh Jumlah Hydrofoil Terhadap Karakteristik Turbin Arus Laut Vertikal Aksis Jenis Straight Blade Berbasis Computational Fluid Dynamics.
- Johnson, J. B., & Pride, D. J. (2010). *River, Tidal, and Ocean Current Hydrokinetic Energy Technologies: Status and Future Opportunities in Alaska*. Alaska: Alaska Center for Energy and Power.
- Kartezhnikova, M., & Ravens, T. (2013). Hydraulic impacts of hydrokinetic devices. *Renew Energy*(66), 25-432.
- Khalid, S., Liang, Z., Qi-hu, S., & Xue-Wei, Z. (2013). Difference between Fixed and Variable Pitch Vertical Axis Tidal Turbine-Using CFD Analysis in CFX. *Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 319-25.

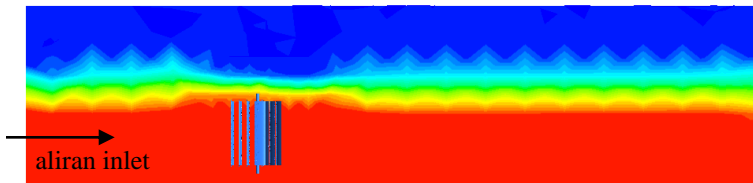
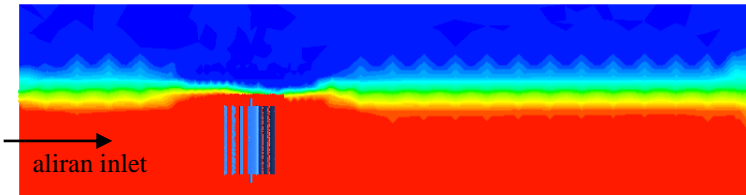
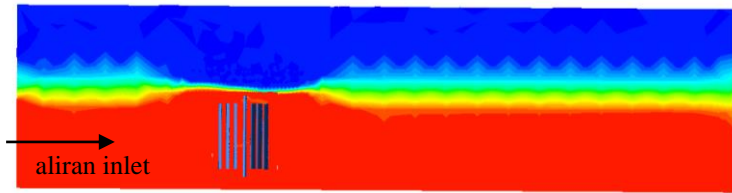
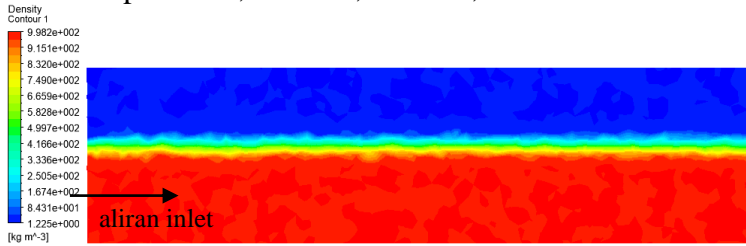
- Khan, M., Iqbal, M., & Quaiocoe, J. (2008). River current energy conversion systems: progress, prospects and challenges. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2177–93.
- Lago, L., Ponta, F., & Chen, L. (2010). Advances and Trend in Hydrokinetic Turbine Systems. *Energy Sustainable Dev*, 287–296.
- Matle, P. C., Riley, J. J., & Novosselov, I. V. (2013). *Analysis of hydrokinetic turbine in open channel flows (Thesis Book)*. Washington: Master of Science in Mechanical Engineering University of Washington.
- Mohamed, M. (2012). Performance investigation of H-rotor Darrieus turbine with new airfoil shapes. *Energy*, 522 - 530.
- Muhson, B. R. (2009). *Mekanika fluida edisi 6*. USA: Wiley.
- Nasional, D. E. (2013). *Outlook Energi Indonesia*. Dewan Energi Nasional.
- Niebuhr, C., Dijk, M. v., Neary, V., & Bhagwan, J. (2019). A Review of Hydrokinetic Turbines and Enhancement Techniques for Canal Installation: Technology, Applicability, and Potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1-18.
- Orhan, K., Mayerle, R., & Pandoe, W. W. (2015). Assessment of energy production potential from tidal stream current in Indonesia. *Energy Procedia*(76), 7-16.
- Septyaningrum, E. (2015). *Analisis Profil Wake di Belakang Turbin Arus Laut Tipe V-Blade Darrieus Berbasis Computational Fluid Dynamic*. Surabaya: Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Shih, T., Liou, W., Shabbir, A., & Zhu, J. (1995). A New k- $\epsilon$  Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 227-238.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1996). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method Approach*. Prentice Hall.

- William, L. O. (2002). *verification and validation in computational fluid dynamics*. USA: Elsevier.
- Yuce, M., & Muratoglu, A. (2015). Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , 72-82.

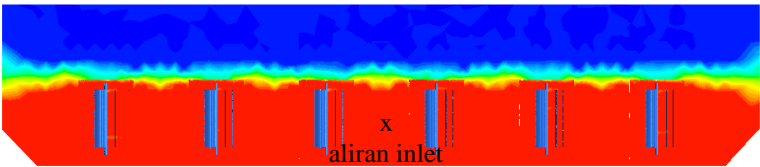
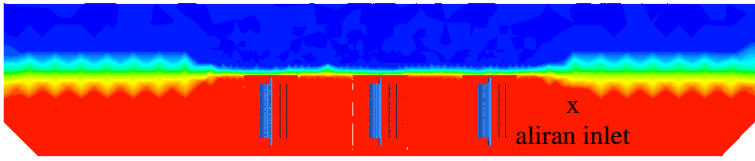
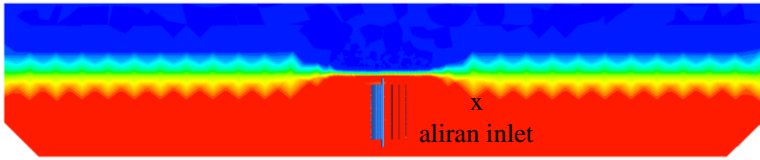
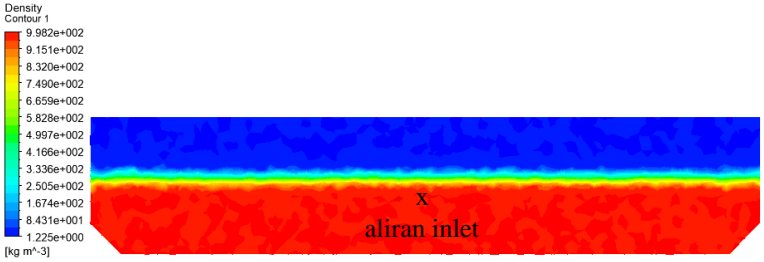


## LAMPIRAN A

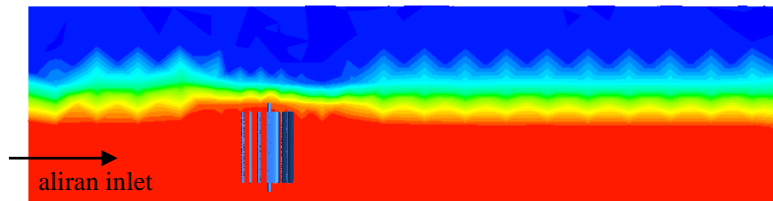
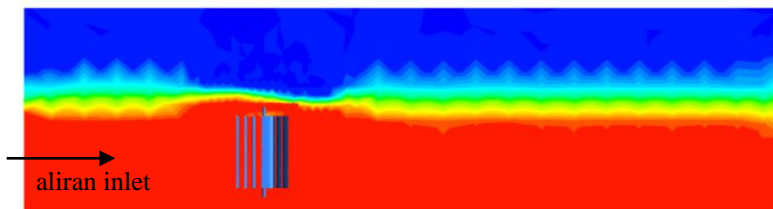
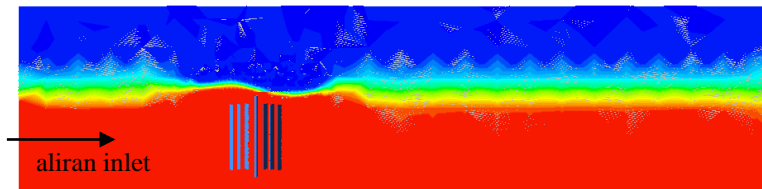
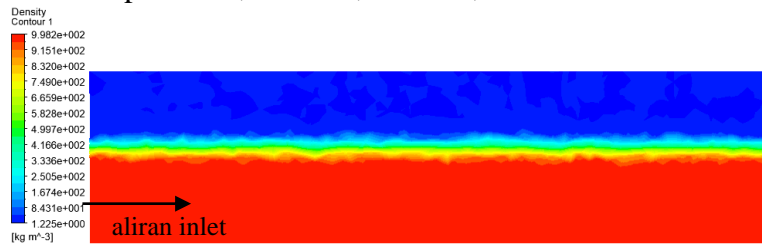
Kontur level permukaan air pada penampang *longsection* (tampak samping) pada kecepatan aliran 1.5 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin:



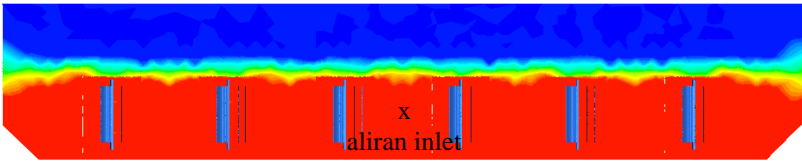
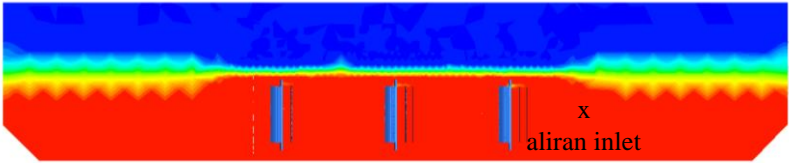
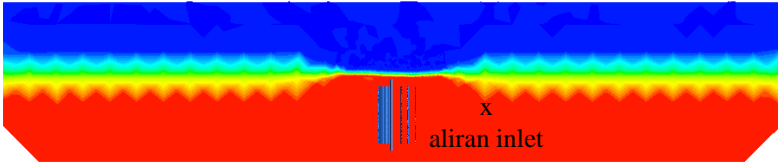
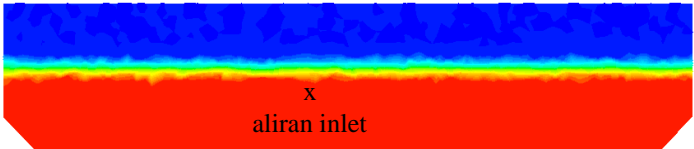
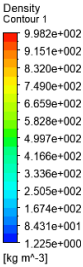
Kontur level permukaan air pada penampang *crosssection* (tampak depan) pada kecepatan aliran 1.5 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin::



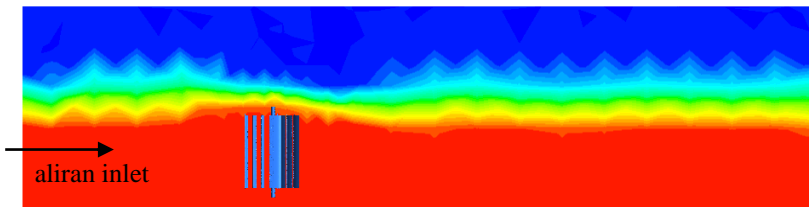
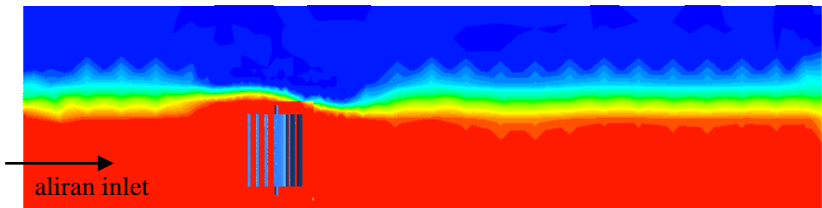
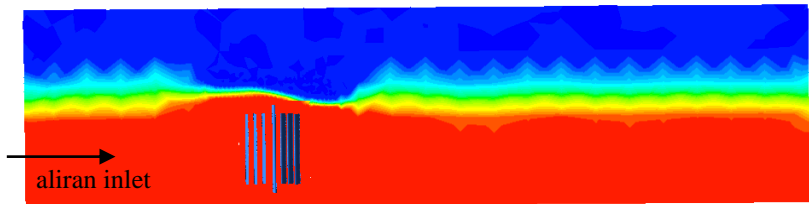
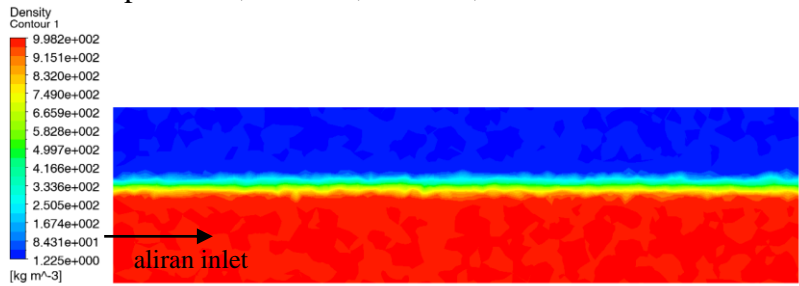
Kontur level permukaan air pada penampang *longsection* (tampak samping) pada kecepatan aliran 2 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin::



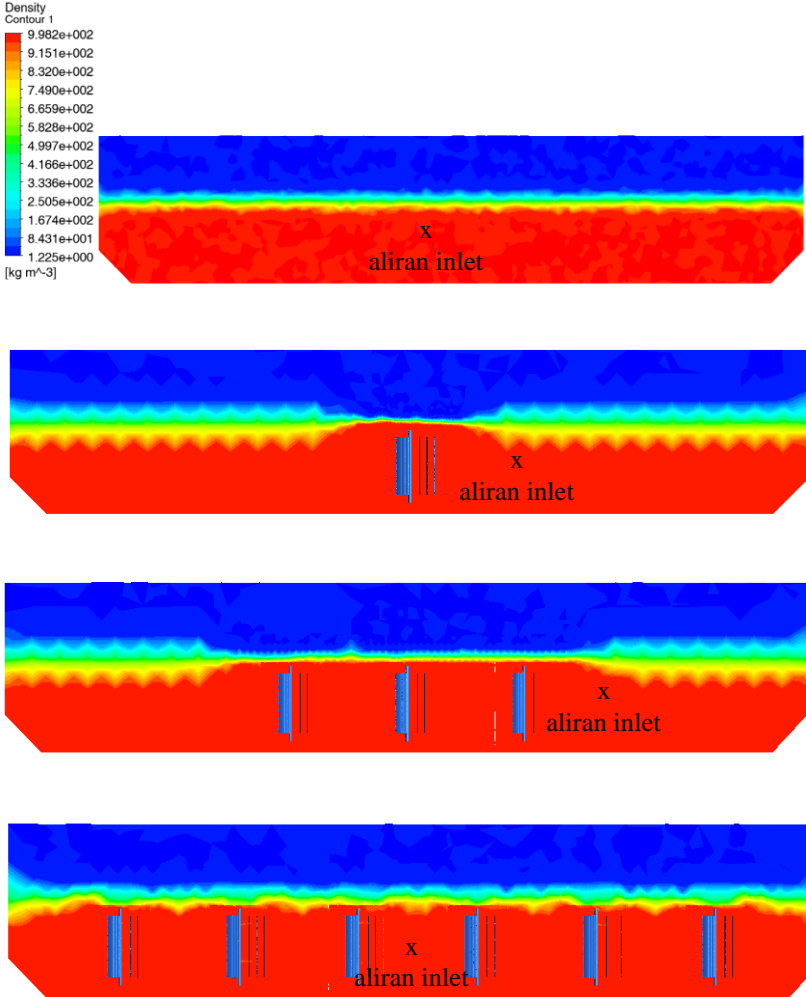
Kontur level permukaan air pada penampang *crosssection* (tampak depan) pada kecepatan aliran 2 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin::



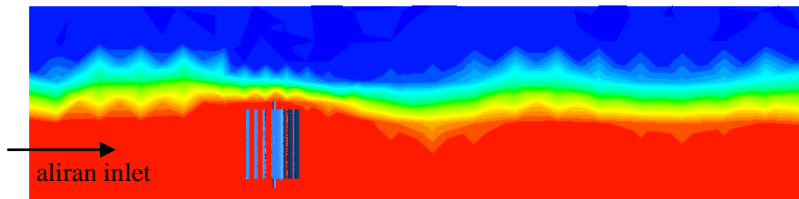
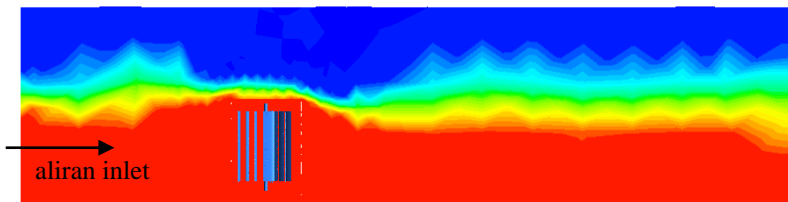
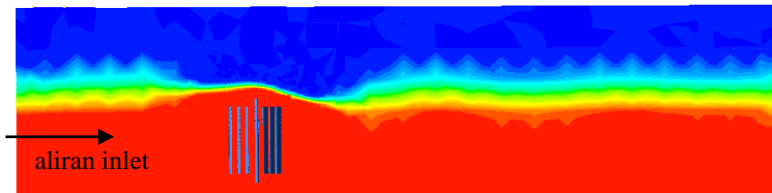
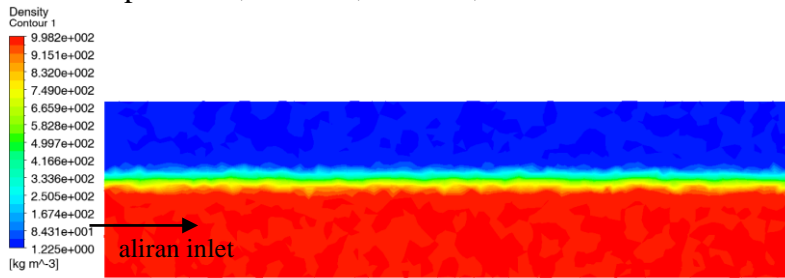
Kontur level permukaan air pada penampang *longsection* (tampak samping) pada kecepatan aliran 2.5 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin:



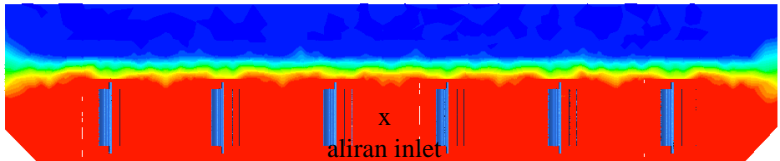
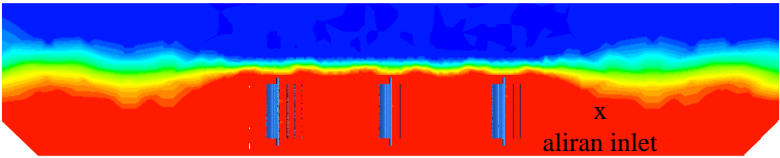
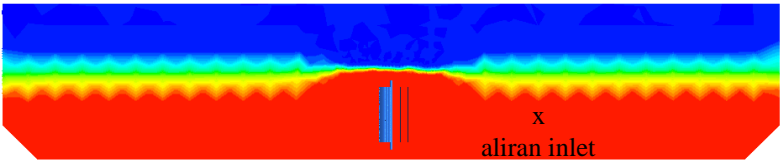
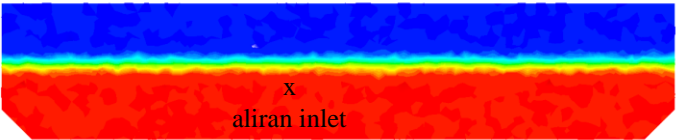
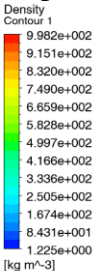
Kontur level permukaan air pada penampang *crosssection* (tampak depan) pada kecepatan aliran 2.5 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin:



Kontur level permukaan air pada penampang *longsection* (tampak samping) pada kecepatan aliran 3 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin:



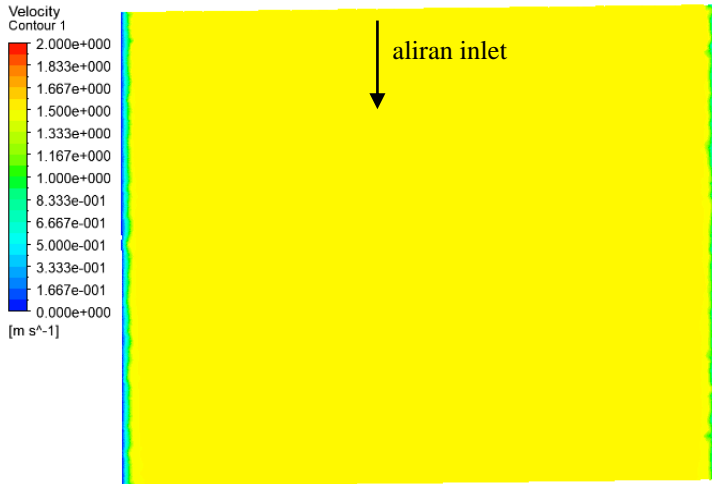
Kontur level permukaan air pada penampang *crosssection* (tampak depan) pada kecepatan aliran 3 m/s pada aliran kanal tanpa turbin, 1 turbin, 3 turbin, dan 6 turbin:





## LAMPIRAN B

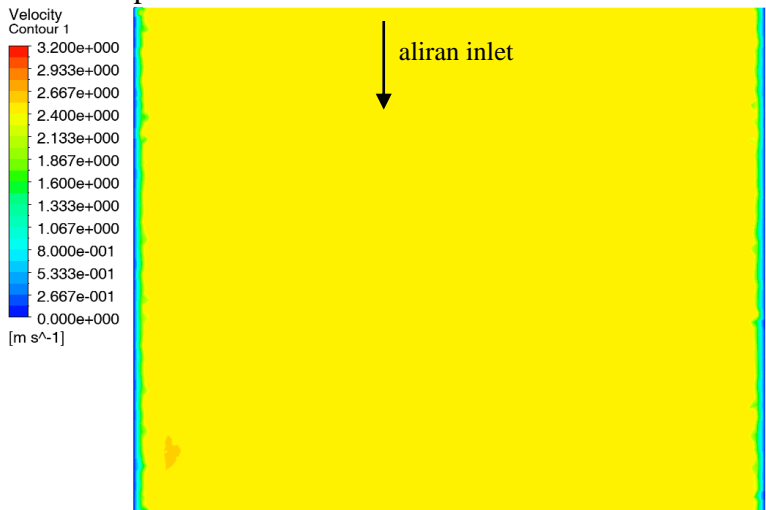
Kontur kecepatan aliran pada panampang dengan jarak 1 m dari dasar kanal pada aliran kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1.5 m/s:



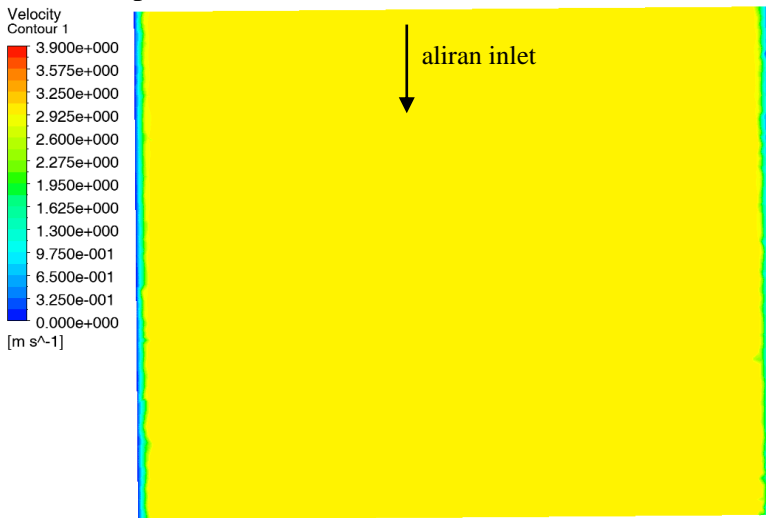
Pada kecepatan aliran 2 m/s:



Pada kecepatan aliran 2.5 m/s:

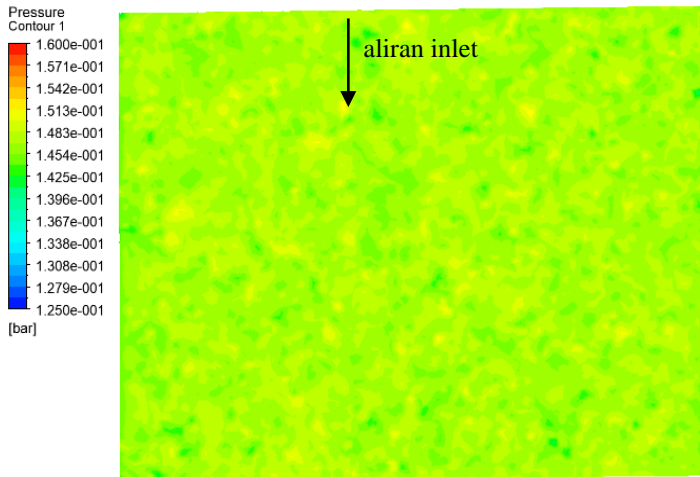


Pada kecepatan aliran 3 m/s:

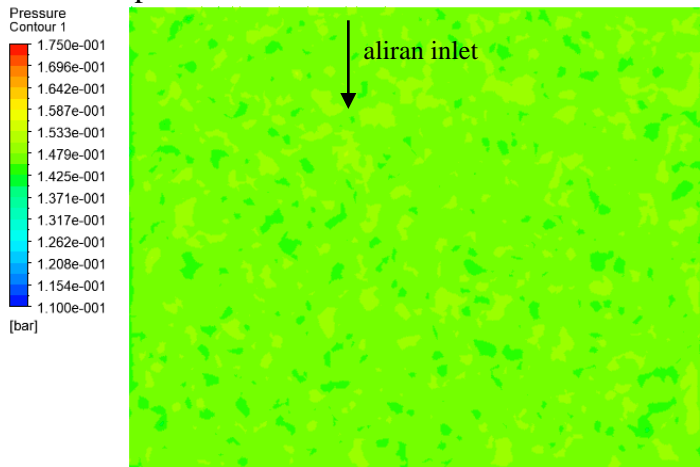


## LAMPIRAN C

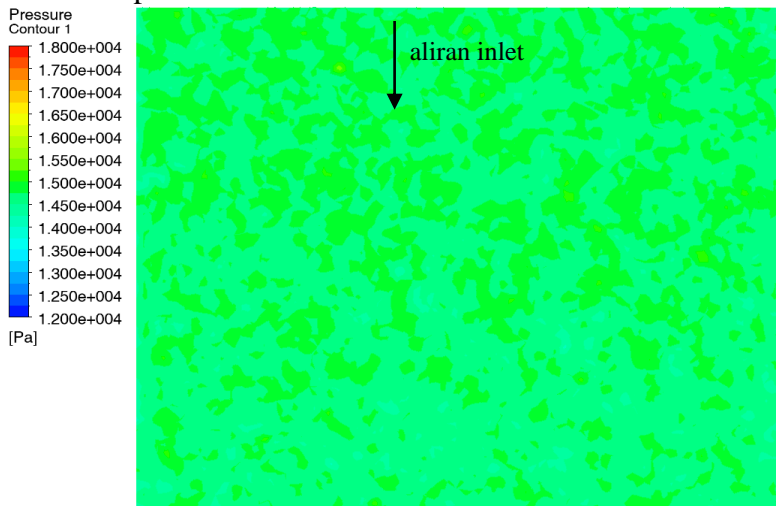
Kontur tekanan pada panampang dengan jarak 1 m dari dasar kanal pada aliran kanal tanpa turbin dengan kecepatan aliran 1.5 m/s:



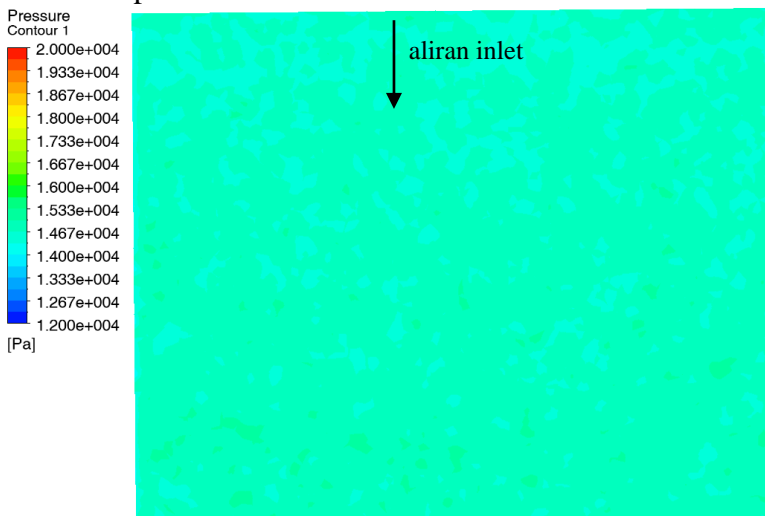
Pada kecepatan aliran 2 m/s:



Pada kecepatan aliran 2.5 m/s:



Pada kecepatan aliran 3 m/s:



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Kabupaten Pasuruan pada 26 Februari 1999. Penulis menempuh pendidikan di SD Negeri Bajangan (2004 – 2010), SMP Negeri 1 Pasuruan (2010 – 2013), SMA Negeri 1 Pasuruan (2013 – 2016), dan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menjadi mahasiswa, penulis mengambil bidang minat rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan dan menjadi asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan. Penulis juga pernah menjadi koordinator divisi *internationalization and development for ITS student* pada Volunteer ITS International Office untuk periode kepengurusan 2017 – 2018. Pada Juni – Agustus penulis melakukan *internship* pada Departemen Engineering di Tunjungan Plaza 6, PT. Pakuwon Jati, Tbk. Pada *internship* tersebut penulis melakukan analisis pada penghematan listrik pada motor *exhaust* dan *supply fan* pada Plant *Demand-Controlled Kitchen Ventilation*. Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* [nuril.nurilhidayati@gmail.com](mailto:nuril.nurilhidayati@gmail.com).