TUGAS AKHIR - TF 141581

ANALISIS POTENSI HIDROKINETIK DAN PENGURANGAN EFEK PENGGERUSAN PADA TAILRACE TURBIN GENERATOR PLTA BALAMBANO PT. VALE INDONESIA DENGAN MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

IQBAL LUCKY EPTANTO
NRP. 02311440000045

Dosen Pembimbing :
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

*FIN*AL *PROJECT* - TF 141581

ANALYSIS OF HIDROKINETIC POTENTIAL AND REDUCING SCOURING EFFECT IN BALAMBANO HYDRO POWER PT VALE INDONESIA BY USING COMPUTATIONAL FLUIDS DYNAMICS

IQBAL LUCKY EPTANTO
NRP. 02311440000045

Supervisor :
Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama	: Iqbal Lucky Eptanto
NRP	: 02311440000045
Departemen/ Prodi	: Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika
Fakultas	: Fakultas Teknologi Industri
Perguruan Tinggi	: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "Analisis Potensi Hidrokinetik dan Pengurangan Efek Penggerusan pada Tailrace Turbin Generator PLTA Balambano PT. Vale Indonesia dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*" adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 24 Juli 2018
Yang membuat pernyataan,

Iqbal Lucky Eptanto
NRP. 02311440000045

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POTENSI HIDROKINETIK DAN PENGURANGAN EFEK PENGGERUSAN PADA TAILRACE TURBIN GENERATOR PLTA BALAMBANO PT. VALE INDONESIA DENGAN MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Oleh:
Iqbal Lucky Eptanto
NRP. 02311440000045

Surabaya, 24 Juli 2018

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

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

Menyetujui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS

Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIP. 19780902 200312 1 002

vii

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS POTENSI HIDROKINETIK DAN PENGURANGAN EFEK PENGGERUSAN PADA TAILRACE TURBIN GENERATOR PLTA BALAMBANO PT. VALE INDONESIA DENGAN MENGGUNAKAN *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

TUGAS AKHIR
Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu
Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
IQBAL LUCKY EPTANTO
NRP. 02311440000045

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T. ..... (Pembimbing I)
2. Dr. Suyanto, S.T, M.T. ..... (Penguji I)
3. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA. ..... (Penguji II)
4. Detak Yan Pratama, S.T, M.Sc, ... (Penguji II)

SURABAYA
JULI 2018

ANALISIS POTENSI HIDROKINETIK DAN PENGURANGAN EFEK PENGGERUSAN PADA TAILRACE TURBIN GENERATOR PLTA BALAMBANO PT. VALE INDONESIA DENGAN MENGGUNAKAN METODE *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*

Nama : **Iqbal Lucky Eptanto**
NRP : **02311440000045**
Departemen : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T**

ABSTRAK

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral mencatat pada tahun 2016, Indonesia memiliki potensi energi hidro sebesar 75 giga watt. Oleh karena itu, penelitian mengenai potensi hidrokinetik di PLTA Balambano PT Vale Indonesia ini dilakukan. Tujuannya adalah untuk mengetahui potensi hidrokinetik pada *outflow* turbin generator PLTA Balambano dan untuk mengurangi penggerusan yang terjadi di dinding muka *draft tube*. Untuk mengurangi penggerusan, penulis menggunakan tiga variasi kemiriangan dinding muka *draft tube* terhadap dasar sungai, yaitu 90^o, 105^o, dan 120^o. Data yang diambil dari lokasi berupa data kecepatan di dua penampang melintang sungai, dan data kedalaman sungai. Selanjutnya, data tersebut diolah menggunakan metode *computational fluid dynamic* untuk mendapatkan profil alirannya.

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, penampang B1 memiliki potensi hidrokinetik sebesar 180 W/m^2. Sedangkan penampang B2 memiliki potensi hidrokinetik sebesar 240 – 270 W/m^2. Dari 3 variasi sudut kemiringan dinding *draft tube* terhadap dasar sungai yang paling efektif untuk mengurangi penggerusan adalah 120^O derajat.

Kata Kunci: **Hidrokinetik, penggerusan, *computational fluid dynamics***

ABSTRACT

Name : Iqbal Lucky Eptanto
NRP : 02311440000045
Department : Engineering Physics Department FTI-ITS
Supervisor : Dr. Ridho Hantoro, S.T, M.T

Abstract

The Ministry of Energy and Mineral Resources noted in 2016, Indonesia has 75 giga watts of hydro energy potential. Therefore, research on hydrokinetic potential in Balambano *hydro power* PT Vale Indonesia *is done. The objective is to know the hydrokinetic potential from outflow of turbine generator* Balambano *hydropower and to reduce the scouring on the wall in front of draft tube. The authors used three slope variations of stilling basin wall against the river bed, ie 90^o, 105^o, and 120^o. Data that taken from the site are water velocity in two cross-sectional, and river depth bathimetri. Furthermore, Data processed using computational fluid dynamic method to get the water flow profile.*

Based on the result of the simulation, cross section B1 has a hydrokinetic potential of 180 W/m^2. *While the second cross-section has a hydrokinetic potential of 24*0 - 270 W/m^2. *The variation in the slope angle of the draft tube wall against the river bed most effective for reducing scouring is 120^O degree.*

Keywords: ***Hydrokinetic, scouring, computational fluid dynamics***

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. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul : "Analisis Potensi Hidrokinetik Dan Pengurangan Efek Penggerusan Pada *Tailrace* Turbin Generator PLTA Balambano PT. Vale Indonesia dengan Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics"***.** Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam program studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah memberikan petunjuk dan bimbingan kepada penulis.
2. Bapak Hendra Cordova, S.T., M.T. yang telah membimbing penulis selama berkuliah di Departemen Teknik Fisika ITS Surabaya.
3. Bapak Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing tugas akhir yang dengan sabar memotivasi dan membimbing penulis untuk menyelesaikan tugas akhir.
4. Bapak Dr. Gunawan Nugroho, S.T., Ph.D, selaku kepala laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan.
5. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di Departemen Teknik Fisika yang telah banyak memberikan ilmunya sehingga penulis dapat menyelesaikan jenjang kuliah hingga tugas akhir ini.
6. Segenap keluarga penulis yang telah memberikan dukungan penuh serta doa terhadap penyelesaian tugas akhir ini.

7. Rekan-rekan F49 yang telah memotivasi penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Rekan – rekan dari PT Vale Indonesia dan Geomatch yang bersedia membantu penulis dalam memperoleh data lapangan.
9. Rekan – rekan angkatan 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, dan 2016 yang senantiasa menemani penulis dalam suka dan duka di Kantin Ijo Teknik Fisika ITS.
10. Babe dan Cak Apin yang telah menyediakan pangan untuk peperangan penting di Departemen Teknik Fisika.
11. Mahsa Ridhani Jordan yang senantiasa memberi semangat dan dukungan kepada penulis untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Semua pihak yang telah membantu, terima kasih banyak.

Penulis menyadari bahwa masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran untuk penulis diterima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya.

Surabaya, 24 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR - TF 141581 i
*FIN*AL *PROJECT* - TF 141581 iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME v
LEMBAR PENGESAHAN vii
LEMBAR PENGESAHAN ix
ABSTRAK xi
ABSTRACT xiii
KATA PENGANTAR xv
DAFTAR ISI xvii
DAFTAR GAMBAR xix
DAFTAR TABEL xxi
DAFTAR NOTASI xxiii
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan Masalah 3
1.5 Sistematika Laporan 4
BAB II DASAR TEORI 5
2.1 Kanal Terbuka 5
2.2 Hidrokinetik 7
2.3 Arus Sungai 8
2.4 Sungai Tidak Beraturan 9
2.5 Penggerusan 10
2.6 *Computational Fluid Dynamics* 11
2.7 Navier-Stokes 12
2.8 k-ε 15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN 17
3.1 Diagram Alir Penelitian 17
3.2 Pengumpulan Data 18
3.3 Pembuatan Geometri Sungai dan *Tailrace* 24
3.4 *Meshing* 27
3.5 *Pre-processing* dan *Processing* 28
3.6 *Solver* 30

3.7 *Post-processing* 30
3.8 Analisa Data 30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....31
4.1 Validasi Hasil Simulasi 31
4.2 Profil Kecepatan Aliran.....32
4.3 Profil Tekanan Aliran 38
4.4 *Power Density* 40
4.5 Potensi Penggerusan.....41
BAB V PENUTUP.....47
5.1 Kesimpulan.....47
5.2 Saran.....47
DAFTAR PUSTAKA.....49
LAMPIRAN
BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Klarifikasi Aliran 5
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian..... 17
Gambar 3.2 Bathimetri Sungai Balambano hingga Genangan Karebbe 20
Gambar 3.3 Lokasi Penampang Melintang..... 21
Gambar 3.4 Penampang Melintang B1 22
Gambar 3.4 Penampang Melintang B2 23
Gambar 3.5 Outflow Penstonk PLTA Balambano 24
Gambar 3.6 Dimensi Penampang Sungai Tampak Atas 25
Gambar 3.7 Dimensi Outflow Draft Tube 26
Gambar 3.8 (a) Variasi 90^o, (b) Variasi 105^o, dan (c) Variasi 120^o 27
Gambar 3.10 Meshing pada daerah sekitar draft tube 28
Gambar 4.1 Kontur Kecepatan Aliran Air tampak Atas 33
Gambar 4.2 Garis Aliran Air pada Outlet Draft Tube..... 34
Gambar 4.3 Kontur Kecepatan Aliran Air tampak Atas 35
Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Aliran Air pada Penampang B1 35
Gambar 4.5 Kontur Kecepatan Aliran Air pada Penampang B2 36
Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Kecepatan dan Bilangan Froude Terhadap Jarak..... 37
Gambar 4.7 Kontur Tekanan Aliran Air pada Penampang B1 38
Gambar 4.8 Kontur Tekanan Aliran Air pada Penampang B2 39
Gambar 4.9 Kontur Tekanan Aliran Air pada Outlet Draft Tube 39
Gambar 4.10 Kontur Power Density pada Penampang B1 40
Gambar 4.11 Kontur Power Density pada Penampang B2 41
Gambar 4.12 Kontur Shear force pada Variasi 90^o..... 42
Gambar 4.13 Kontur Shear Force pada Variasi 105^o..... 42
Gambar 4.14 Kontur Shear force pada Variasi 120^o..... 43

Gambar 4.15 Grafik rata – rata shear force terhadap variasi kemiringan dinding kolam olak 43
Gambar 4.16 Hubungan Antara Potensi Hidrokinetik dan Potensi Penggerusan 44

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Flow Meter.....19
Tabel 3.2 Pengukuran Kecepatan Sungai 19
Tabel 3.3 Klasifikasi Bagian Domain dengan kondisi batasnya.29
Tabel 3.4 Inisialisasi CFD 29
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Kecepatan Sungai.....31

DAFTAR NOTASI

Q	Debit (m/s^3)
v	Kecepatan aliran (m/s)
A	Luas penampang (m^2)
P	Daya yang dihasilkan (watt)
H	*Head* tekanan (m)
F_r	Bilangan Froude
a	Percepatan (m/s)
T_w	Lebar permukaan bebas (m)
d_h	Kedalaman hidrolis
Re	Bilangan Reynold
ω	*Stream power*
Γ	Gaya geser
τ	Tegangan Geser (N/m^2)
S_0	Slope
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 kecepetan sumbu z (m/s)
t	Waktu (sekon)
ρ	Massa jenis (kg/m^3)
P	Tekanan (Pa)
g	Gravitasi (m/s^2)

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, energi senantiasa menjadi isu yang hangat diperbincangan di masyarakat. Mengingat energi fosil yang kian hari kian menipis menuntut manusia untuk mengolah energi terbarukan yang tersedia di alam dengan jumlah tak terbatas. Indonesia sebagai negara kepulauan memiliki potensi energi terbarukan yang melimpah, khususnya energi hidro. Menurut jurnal yang diterbitkan kementrian ESDM tahun 2016, Indonesia memiliki potensi energi hidro sebesar 75 Gigawatt. Sedangkan pemanfaatannya hingga kini masih belum maksimal. Berdasarkan catatan kementrian ESDM, Energi Baru Terbarukan hanya menyumbangkan lima persen dari kebutuhan total nasional Indonesia. Sedangkan mayoritas masyarakat masih bertumpu pada energi fosil yang mancapai angka 47 persen. Penggunaan energi fosil sendiri memiliki berbagai persoalan, salah satunya adalah emisi yang dihasilkan cenderung merusak alam sekitar. (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016)

Sebagai bentuk kepedulian terhadap alam sekitar, PT Vale Indonesia Tbk (PT Vale) sebagai perusahaan yang mendapat lisensi dari Pemerintah Indonesia untuk melakukan eksplorasi, penambangan, pengolahan dan produksi nikel, melakukan segala kegiatannya dengan penerapan dan pemanfaatan teknologi yang ramah lingkungan. Termasuk dalam menciptakan energi bagi kebutuhan produksi melalui pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Setelah lebih dari empat dasawasarsa beroperasi, kini PT Vale Indonesia memiliki tiga PLTA yakni, Larona, Balambano, dan Karebbe. Listrik yang dihasilkan ketiga PLTA tersebut berfungsi sebagai pamasok tenaga listrik untuk pengoperasian *furnace* (tanur peleburan dan pengolahan bijih nikel) di pusat pengolahan (*process plant*) di Sorowako, Sulawesi Selatan. Untuk sumber tenaganya, PLTA disuplai dari tiga danau yang berada di Luwu Timur, yakni Matano, Mahalona, dan Towuti yang mengalirkan air melalui Sungai Larona menuju turbin. (PT Vale Indonesia, 2016)

Namun, pemanfaatan ketiga PLTA PT Vale Indonesia kurang maksimal. Pasalnya, *outflow tailrace* turbin generator masih memiliki potensi untuk dikonversi menjadi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. Bila energi hidro pada tailrace dimanfaatkan, maka akan berpeluang untuk menambah daya yang dihasilkan oleh masing – masing PLTA PT Vale Indonesia. Selain itu, penambahan turbin pada tailrace berpeluang untuk mengurangi efek pengikisan yang terjadi di dinding kanal akibat profil aliran tailrace.

Penelitian mengenai potensi hidrokinetik pada arus sungai/kanal terbuka telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pembangunan Pembangkit Listrik Mikrohidro dapat dilakukan pada sungai yang memiliki arus rendah, atau tidak memerlukan kolam penampung untuk menggerakkan turbin (Pasalli & Rehiara, 2014), (Nasir, 2014). Perancangan pembangkit mikro-hidro juga tidak lepas dari faktor penggerusan sendimentasi pada dasar dan dinding sungai. Sehingga, kecepatan aliran sungai yang paling baik untuk pemasangan turbin mikro-hidro adalah 1.5 m/s (Zdankus, Punys, & Zdankus, 2014). Sedangkan pemanfaatan energi kinetik dari aliran discharge Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) telah dilakukan oleh Liu dan Packey (Liu & Packey, 2014). Penilaian potensi dilakukan dengan pengambilan data berupa karakteristik aliran kanal berupa kecepatan arus, debit, dan kedalaman kanal (Khan, Iqbal, & Quaicoe, 2008).

Selain itu, untuk mengurangi efek pengikisan pada dinding sungai, dilakukan evaluasi bentuk geometri sungai berdasarkan karakteristik aliran pertemuan sungai dan tailrace turbin generator (tailrace) PLTA. Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dilakukan, penggerusan terjadi pada dasar dan sisi kanal. Untuk mengurangi penggerusan pada dasar kanal, Abbaspour dkk menggunakan plat besi sebagai penahan penggerusan (Abbaspour, Parvini, & Dalir, 2017). Sedangkan penelitian mengenai penggerusan pada sisi kanal khususnya untuk pertemuan dua buah kanal, telah dilakukan oleh Ghobadian dkk dengan menggunakan simulasi menggunakan SSIIM1 (Ghobadian & Basiri, 2015). Modifikasi geometri kanal menjadi salah satu solusi untuk mengurangi penggerusan yang terjadi. Hal tersebut dilakukan oleh santoso dengan melakukan penambahan

tiang pancang pada sisi luar kanal guna mengurangi kecepatan aliran (Santoso, 2004).

Metode eksperimental sering menyita waktu, mahal dan terkadang sulit untuk memecahkannya. Penyelesaian melalui metode numerik atau simulasi menjadi alternatif untuk memprediksi aliran pada suatu kanal. Sehingga, pada penelitian ini akan dilakukan analisis potensi hidrokinetik pada tailrace dan mengurangi dampak penggerusan yang terjadi pada sungai.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, permasalahan yang diangkat pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana profil aliran pada *tailrace* turbin generator PLTA Balambano PT Vale Indonesia ?
2. Bagaimana pengikisan yang terjadi pada pertemuan *tailrace* turbin generator PLTA Balambano PT Vale Indonesia dan sungai ?

1.3 Tujuan Penelitian

Untuk menyelesaikan permasalahan diatas maka dilakukan tugas akhir dengan tujuan sebagai berikut:

1. Mengetahui profil aliran pada *outflow tailrace* di PLTA Balambano PT Vale Indonesia.
2. Mengetahui penggerusan yang terjadi pada dinding kolam olakan *tailrace* PLTA Balambano PT Vale Indonesia.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Lokasi studi merupakan wilayah kerja PT Vale Indonesia.
2. Menggunakan data – data aliran kanal, *penstock flow*, *bathimetri* di PLTA PT Vale Indonesia
3. Penelitian berfokus pada evaluasi tailrace di PLTA PT Vale Indonesia dan rekomendasi potensi hidrokinetik.
4. Validasi didapatkan dari data lapangan di lokasi PLTA PT. Vale Indonesia.

1.5 Sistematika Laporan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini akan disusun dengan sistematika sebagai berikut:

BAB I Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika laporan

BAB II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi teori – teori penunjang yang mendasari Tugas Akhir ini, baik yang bersumber dari buku, jurnal, maupun laporan tugas akhir atau penelitian terkait.

BAB III Metodologi Penelitian

Dalam bab ini dijelaskan mengenai tahapan – tahapan yang dilakukan dalam pelaksanaan Tugas Akhir, dimulai dari studi literatur hingga pengambilan data, pembahasan, dan penarikan kesimpulan.

BAB IV Analisis Data dan Pembahasan

Pada bab ini ditampilkan data yang didapat dari proses simulasi disertai analisisnya. Dari hasil analisis tersebut dilakukan pembahasan sesuai tujuan penelitian.

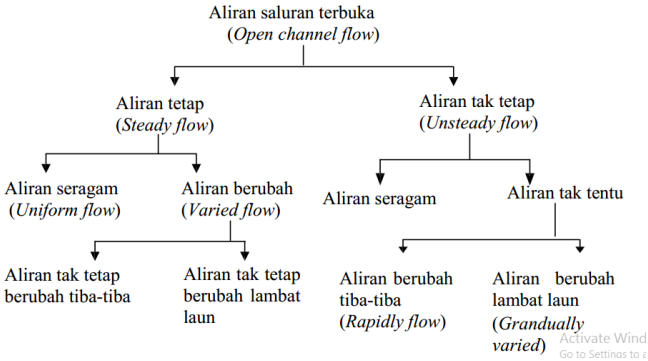
BAB V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dari keseluruhan Tugas Akhir serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

BAB II
DASAR TEORI

2.1 Kanal Terbuka

Aliran kanal-terbuka melibatkan aliran-aliran dari cairan di dalam kanal atau saluran yang tidak terisi sepenuhnya. Terdapat permukaan bebas antara fluida yang mengalir (biasanya air) dan fluida di atasnya (biasanya udara atmosfer). Pada saluran terbuka, variabel aliran sangat tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel tersebut adalah penampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, debit aliran, dan sebagainya. Chow (Ven, 1985) menggolongkan saluran terbuka sebagai berikut :



Gambar 2.1 Skema Klarifikasi Aliran (Chow, 1985)

Aliran tetap merupakan aliran yang memiliki kedalaman tidak berubah atau konstan selama suatu jangka waktu tertentu. Sedangkan Aliran tak tetap bila kedalamannya berubah sesuai dengan waktu.

Gaya penggerak utama dari aliran – aliran ini adalah berat fluida (Ven, 1985). Berat fluida erat hubungannya dengan pengaruh gaya gravitasi bumi. Akibat dari gaya gravitasi terhadap keadaan aliran dinyatakan dengan perbandingan gaya inersia dengan gaya tarik bumi. Perbandingan ini ditetapkan sebagai bilangan froude, didefinisikan sebagai :

$$Fr = \frac{V}{(gl)^{\frac{1}{2}}} \tag{2.1}$$

Dengan V merupakan kecepatan rata – rata aliran, g adalah percepatan gravitasi dalam m/s^2, dan l merupakan panjang karakteristik dibuat sama dengan kedalaman hidrolis d_h (*hydraulic depth*) yang didefinisikan sebagai luas penampang melintang air dalam arah tegak lurus aliran (A) dibagi dengan lebar permukaan bebas T_w (m), didefinisikan sebagai :

$$d_h = A/T_w \tag{2.2}$$

Bila Fr = 1, persamaan menjadi $V = (gd_h)^{1/2}$, maka aliran dikatakan berada dalam keadaan kritis. Bila Fr kurang dari 1 atau $V < (gd_h)^{1/2}$, aliran bersifat sub-kritis. Dalam keadaan ini peranan gaya tarik bumi lebih menonjol, sehingga aliran mempunyai kecepatan rendah dan sering dikatakan tenang. Bila Fr lebih dari 1 atau $V > (gd_h)^{1/2}$ maka aliran bersifat super kritis. Dalam keadaan ini gaya – gaya inersia sangat menonjol, sehingga aliran mempunyai kecepatan tinggi dan biasanya disebut jeram. Kecepatan kritis $(gd_h)^{1/2}$ adalah gangguan amplitudo kecil yang terjadi di permukaan bebas, gelombang kecil ini terjadi pada air dangkal di saluran akibat perubahan sekejap kedalaman air setempat.

Faktor penting dalam penempatan turbin hidrokinetik dengan menghindari aliran yang memiliki sifat super-kritis. Karena aliran ini mengalami perubahan mendadak dari kedalaman dangkal dan kecepatan yang tinggi ke arus sub-kritis dengan kedalaman lebih besar dan kecepatan yang lebih lambat. Energi aliran diredam oleh tahanan gesek saluran. Transisi turbulen yang terjadi biasa disebut *hydraulic jump*. Lompatan ini mengakibatkan rugi energi yang signifikan. Selain itu, terjadi pusaran berlawanan arah jarum jam yang bergerak naik di permukaan bebas. Sifat aliran ini bergantung pada parameter bilangan Reynolds. Bilangan Reynolds merupakan bilangan yang menyatakan profil aliran, didefinisikan sebagai berikut :

$$Re = \frac{VL}{v} \quad (2.3)$$

Dimana V sebagai kecepatan aliran; L adalah panjang karakteristik; dan v menunjukkan kekentalan kinematik air (m^2/s). Kombinasi parameter diatas, dapat menunjukkan profil aliran yang terjadi, apakah itu laminer, transien, dan turbulen. Untuk aliran pada kanal terbuka, bila bilangan Re yang didapat > 2100 maka aliran tersebut termasuk dalam aliran turbulen.

2.2 Hidrokinetik

Secara sederhana, energi hidrokinetik sungai dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = \rho g Q H \quad (2.4)$$

Dimana $\rho = 1000\ kg/m^3$ yang merupakan massa jenis air. g merupakan ketetapan gravitasi bumi dengan nilai 9.81 m/s^2. Q adalah debit air dan H merupakan *head* tekanan. H menunjukkan potensi yang memiliki nilai energi kinetik dan energi potensial. Hal tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut

$$H = h + av^2/(2g) \quad (2.5)$$

Dimana, h menunjukkan ketinggian permukaan yang menunjukkan *head* tekanan (energi potensial). Sedangkan $av^2/(2g)$ merupakan potensi energi kinetik aliran. a merupakan koefisien Coriolis dan v merupakan rata – rata kecepatan kanal. Persamaan debit adalah $Q = Av$, dimana A merupakan luas daerah pada potongan melintang dan asumsikan $a = 1$ dalam persamaan 2.7. Sehingga, berdasarkan persamaan diatas, dapat disimpulkan persamaan energi kinetik pada kanal terbuka sebagai berikut :

$$P = \frac{1}{2}\rho Q v^2 \quad (2.6)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (2.7)$$

Dimana P merupakan daya dalam arus. Sedangkan A adalah luas penampang melintang dalam satuan meter persegi (m^2). v adalah kecepatan titik yang tidak terganggu oleh aliran yang datang pada penampang. Selanjutnya, diperlukan faktor efisiensi dalam penggunaan alat konversi untuk mengekstrak daya yang tersedia. Sehingga, daya hidrokinetik yang dihasilkan sebagai berikut (Arango, 2011) :

$$P = \frac{1}{2}\rho A v^3 \eta \quad (2.8)$$

η merupakan efisiensi sistem dalam mengkonversi daya yang tersedia. A merupakan luas daerah pada potongan melintang. Berdasarkan persamaan 2.8, dimana daya hidrokinetik yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan aliran pangkat tiga, maka pengaruh kecepatan aliran terhadap daya hidrokinetik yang dihasilkan sangat besar. Sehingga, penentuan lokasi turbin yang tepat akan mengoptimalkan daya hidrokinetik yang dihasilkan.

2.3 Arus Sungai

Sungai terbentuk ketika air yang terendapkan tertimbun di saluran sungai dan mengalir ke bawah. Sungai terbentuk ketika air yang terendapkan tertimbun di saluran sungai dan mengalir ke bawah. Dalam pergerakannya, aliran air memiliki energi kinetik terhadap kecepatannya, dan energi potensial terhadap elevasinya. Transportasi menurun mungkin berbeda tergantung pada bagaimana air di sungai digunakan. Energi potensial, misalnya, ditangkap dan diubah menjadi listrik menggunakan tenaga air. Ini, bagaimanapun, membutuhkan penggunaan bendungan untuk mengakumulasi air.

Seperti semua saluran air, saluran sungai memiliki kedalaman dan lebar yang terbatas. Agar aliran sungai menjadi menarik untuk tujuan konversi energi hidrokinetik, kecepatannya harus

tinggi, dan ini dapat dicapai dengan debit yang cukup besar dan bentuk penampangnya.

Tentu saja, debit tinggi tidak selalu berarti kecepatan tinggi. Kemiringan dasar sungai, bersama dengan sifat hilir sungai, menentukan kecepatan aliran. Untuk mengkarakterisasi properti sungai, bilangan Froude, Fr, dapat digunakan sesuai dengan:

$$Fr = \frac{V}{(gl)^{\frac{1}{2}}} \tag{2.9}$$

dimana V adalah kecepatan di sungai, g akselerasi karena gravitasi dan l kedalaman. Persamaan memberikan hubungan antara kecepatan aliran dan kecepatan gelombang gravitasi. Jika Fr> 1 alirannya superkritis dan kecepatannya lebih tinggi dari kecepatan gelombang gravitasi. Debit ini kemudian tergantung pada level air hulu. Aliran ini dicirikan oleh kemiringan tempat tidur yang curam dan kecepatan tinggi. Untuk Fr <1, aliran sub-kritis dan ketinggian air di sungai tergantung pada kondisi hilir.

Hanya aliran subkritis yang dipertimbangkan. Dengan demikian kondisi hilir sangat penting.

2.4 Sungai Tidak Beraturan

Bentuk penampang sungai berbeda dengan bentuk kanal. Karena bentuk sungai mengikuti elevasi alam dimana air dapat dialirkan. Sehingga, persebaran kecepatannya tidak teratur. Kecepatan rata-rata sungai, u, didefinisikan sebagai berikut:

$$u = \frac{Q}{Ac} = \frac{Q}{Wd} \tag{2.10}$$

Dimana Ac adalah area cross-sectional, W lebar saluran dan d kedalaman. Baik lebar saluran dan kedalaman bervariasi dengan debit, Q. Namun, perubahan debit mempengaruhi kecepatan terutama, dan pada tingkat lebih rendah, kedalaman aliran sungai. Lebar sungai cukup konstan kecuali pada debit rendah atau selama banjir. Namun, ketinggian air mempengaruhi kecepatan; hubungan antara kecepatan dan debit dengan demikian tidak

linier. Hubungan kecepatan dan debit ditemukan oleh Julien (Guo & Julien, 2008), dengan $u = k1Qk2$, di mana k1 dan k2 adalah parameter khusus lokasi. Hubungan non-linear lainnya disajikan dalam laporan EPRI (Previsic, Bedard, & Polagye, 2008), di mana lima sungai di Alaska dianalisis. Untuk empat sungai, hubungan ditemukan dijelaskan oleh:

$$u(t) = k1 \ln\big(Q(t)\big) - k2 \tag{2.11}$$

Dengan konstanta k1 dan k2 adalah situs yang spesifik.

2.5 Penggerusan

Penggerusan merupakan perubahan bentuk morfologi sungai akibat dari interaksi air terhadap dasar atau tebing sungai. Hal tersebut menyebabkan bentuk sungai/kanal menjadi tidak teratur. Penggerusan terjadi akibat dari pengaruh tikungan sungai, penyempitan aliran, pintu air, dan sebagainya. Proses penggerusan terjadi karena ada perubahan profil aliran air yang melewati sungai/kanal, sehingga menyebabkan pemindahan material sungai/kanal dari tempat asalnya. Hal tersebut berlangsung berulang hingga tercapai keseimbangan sungai/kanal yang baru. Berdasarkan (Raudkivi & Etema, 1983), penggerusan dibagi menjadi beberapa tipe, yaitu :

a. Gerusan umum, penggerusan yang terjadi secara alami. Sehingga, keberadaan bangunan sungai tidak berpengaruh terhadap penggerusan yang terjadi
b. Gerusan dilokalisir, disebabkan oleh penyempitan aliran sungai/kanal sehingga aliran menjadi terpusat.
c. Gerusan lokal, penggerusan yang terjadi karena ada pengaruh bangunan dan struktur sungai/kanal.

Ada banyak variable yang mempengaruhi terjadinya gerusan pada penampang aliran, seperti : tegangan geser aliran (τ) (Flanagan & Nearing, 1995), stream power (ω) (Nearing, et al., 1997), Unit stream power (Ω) (Morgan, et al., 1998), debit aliran (q) (Line & Meyer, 1989), dan gaya geser (Γ) (Gimenez & Govers, 2002). Gimenez berasumsi bahwa penggerusan pada

penampang aliran dikendalikan oleh nilai tegangan gesernya, dan mengabaikan tegangan geser kritikalnya. Sehingga pendekatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$D_L = a\Gamma \tag{2.12}$$

$$\Gamma = \rho \, g \, R \, S \, W_p = \rho \, g \, A \, S \tag{2.13}$$

a merupakan konstanta faktor erosi air dan S kemiringan penampang aliran. Dalam menggunakan persamaan 2.13, gaya geser (Γ) memerlukan fungsi debit. Sehingga A, dapat diprediksi dengan menggunakan (Govers, 1992) :

$$A = 0.34 \, Q^{0.732} \tag{2.14}$$

$$\Gamma = \rho \, g \, 0.34 \, Q^{0.732} \, S \tag{2.15}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.14 pada persamaan 2.14, didapatkan persamaan 2.15 dengan A sebagai fungsi debit. Pada persamaan 2.15, debit dan kemiringan penampang aliran mempengaruhi nilai dari gaya geser yang disebabkan oleh fluida mengalir. Sedangkan pada persamaan 2.4, debit juga turut berperan dalam peningkatan nilai hidrokinetik yang dapat diekstrak dari aliran air. Secara singkat, dapat disimpulkan bahwa semakin besar debit aliran air, maka semakin besar pula potensi penggerusan yang akan terjadi.

2.6 *Computational Fluid Dynamics*

CFD merupakan suatu metode algoritma dan numerik yang digunakan untuk mensimulasikan atau memprediksi profil fluida. Dengan menggunakan persamaan Navier-Stokes, CFD dapat memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena lainnya. Selain dapat menghemat biaya, simulasi dengan menggunakan CFD dapat menghemat waktu dan mempermudah dalam mengganti variabel – variabel eksperimen yang digunakan. Keakuratan CFD dipengaruhi oleh jumlah diskritisasi yang

digunakan. Penentuan jumlah diskritisasi bergantung pada pemakaian perangkat yang digunakan, perangkat yang digunakan dalam hal ini adalah komputer. Semakin banyak jumlah diskritisasi yang digunakan, maka beban kerja komputer semakin berat. Bila komputer yang digunakan memiliki spesifikasi yang tinggi, maka proses simulasi membutuhkan waktu singkat. Sebaliknya, bila jumlah diskritisasi banyak, namun tidak diikuti dengan spesifikasi komputer yang mumpuni, maka proses simulasi akan memakan waktu yang tidak sedikit. Dalam melakukan simulasi CFD, terdapat tiga tahapan yang harus dilalui, yaitu :

a. *Preprocessing*

   Pada tahap awal ini, dilakukan pembuatan geometri yang akan disimulasikan dalam CFD. Selain itu, dilakukan penentuan keadaan awal dan pemasukan data inisiasi awal sebelum melakukan simulasi.

b. Solving

   Pada tahap ini, dilakukan perhitungan – perhitungan berdasarkan data awal yang dimasukkan sebagai *input*. Metode iteratif digunakan hingga mencapai nilai *error* yang telah ditentukan sebelumnya, biasanya disebut dengan kondisi konvergen.

c. Postprocessing

   Tahap ini merupakan tahap terakhir dari penggunaan CFD. Dimana data – data hasil simulasi dapat ditampilkan berupa tabel, grafik, gambar, dan animasi. Pada tahap ini, profil aliran fluida dapat dihasilkan.

2.7 Navier-Stokes

CFD menggunakan persamaan Navier-Stokes untuk melakukan perhitungan komputasi guna mengetahui pergerakan suatu fluida. Persamaan Navier-Stokes pertama kali dikenalkan Claude-Louis Navier dan George Gabriel Stokes, lalu dikenal dengan persamaan Navier-Stokes. Persamaan ini merupakan penurunan dari hukum kedua Newton, yang menyatakan

perubahan momentum partikel fluida hanya bergantung pada gaya viskos internal dan gaya viskos tekanan eksternal yang bekerja pada fluida. Dengan demikian, persamaan Navier-Stokes menjelaskan kesetimbangan gaya-gaya yang bekerja pada fluida (Welty, 2004). Gerakan umum dari sebuah fluida Newtonian tak mampu-mampat diatur oleh persamaan kontinuitas (kekekalan massa) dan persamaan momentum. (Zhang, Shan, & Chen, 2006). Sehingga, didapatkan persamaan momentum sebagai berikut ;

a. Momentum

Terhadap sumbu x :

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial z}=\\&-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\nabla\cdot V+2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)\\&+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]+\rho f_x\end{aligned} \tag{2.16}$$

Terhadap Sumbu y :

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho vw)}{\partial z}=\\&-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]\\&+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\nabla\cdot V+2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+\rho f_y\end{aligned} \tag{2.17}$$

Terhadap Sumbu z :

$$\begin{aligned}&\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z}=\\&-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right]\\&+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\nabla\cdot V+2\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\rho f_z\end{aligned} \tag{2.18}$$

b. Kontinuitas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \tag{2.19}$$

c. Energi

$$C = -\left[\begin{array}{l} \left(\dfrac{\partial (up)}{\partial x} + \dfrac{\partial (vp)}{\partial y} \right. \\ \left. + \dfrac{\partial (wp)}{\partial z} \right) \\ + \dfrac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \dfrac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} \\ + \dfrac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \dfrac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} \\ + \dfrac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \dfrac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} \\ + \dfrac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \dfrac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} \\ + \dfrac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} \end{array}\right] dxdydz + \rho f \cdot V dxdydz \tag{2.20}$$

Berdasarkan persamaan Navier-stokes, terdapat tiga persamaan untuk perhitungan prediksi aliran fluida, yaitu momentum, kontinuitas, dan energi. Dimana variabel yang mempengaruhi persamaan navier stokes antara lain, ρ merupakan massa jenis fluida yang mengalir dengan satuan kg/m^3, v massa dari fluida dalam kg terhadap waktu t dalam detik. Sedangkan u, v, w merupakan vektor kecepatan sumbu x, y, z dalam satuan m/s^2. μ, berupa kinematik viskositas dan f merupakan resultan gaya – gaya yang bekerja pada fluida, bidang, ataupun benda yang dipengaruhi oleh aliran fluida dalam satuan Newton.

2.8 k-ε

Komputasi dalam perhitungan fluida dinamik tiga dimensi melibatkan persamaan – persamaan yang kompleks. Untuk mengetahui profil aliran pada tailrace turbin generator PLTA Balambano PT Vale Indonesia, maka penulis menggunakan persamaan turbulensi k-ε. Model standar k-ε merupakan salah satu model turbulensi semi empiris berbasis persamaan transport untuk energi kinetic turbulen (k) dan laju disipasi (ε). Persamaan yang dikembangkan oleh (Launder & Spalding, 1974), sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M - S_k \tag{2.21}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3e}G_b) - C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{2.22}$$

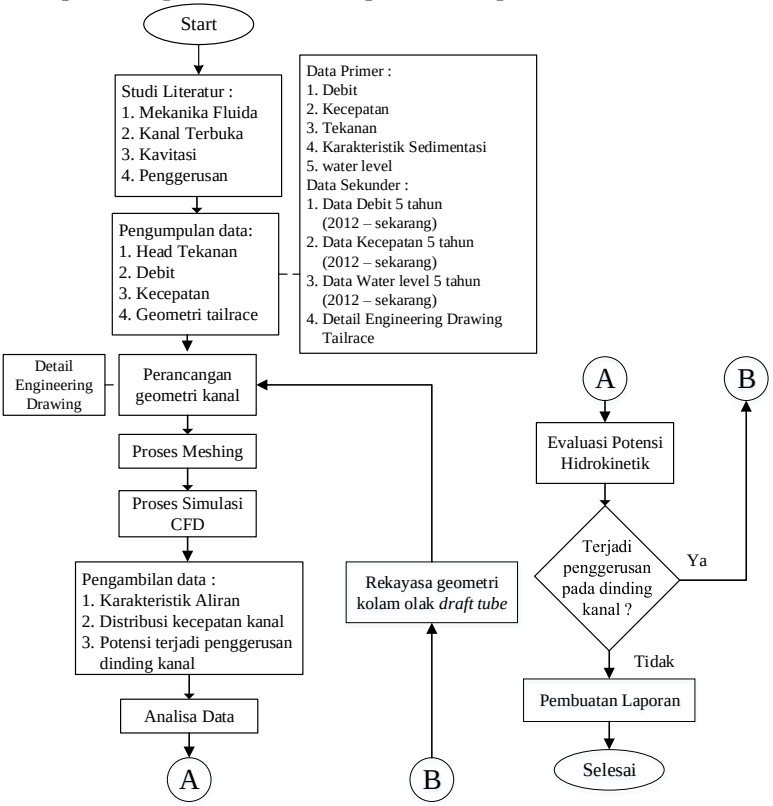
Pada persamaan diatas, G_k mewakili energi kinetik turbulensi karena gradien kecepatan rata-rata. Hal tersebut didapatkan sebagaimana dijelaskan dalam model k-ε. G_b merupakan nilai energi kinetik turbulensi karena daya apung, dipengaruh oleh *bouyancy* pada turbulensi dalam model k-ε. Y_m mewakili fluktuasi dilatasi dalam turbulensi kompresif ke tingkat disipasi keseluruhan. $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, dan $C_{3\varepsilon}$ adalah konstanta. σ_k dan σ_ε adalah bilangan Prandtl turbulen untuk k dan ε. S_k dan S_ε adalah istilah sumber yang ditetapkan pengguna.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini dirancang dengan beberapa tahapan yang digambarkan pada diagram alir di bawah ini. Tahapan-tahapan tersebut meliputi beberapa hal, antara lain:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan studi literasi. Hal tersebut bertujuan untuk meningkatkan pemahaman penulis mengenai topik penelitian yang akan dilakukan. Literasi penulis bersumber dari jurnal, laporan, buku, *website*, dan berbagai sumber lain yang mendukung. Adapun topik – topik literasi yang dipelajari adalah sebagai berikut : mekanika fluida, kanal terbuka, dan penggerusan.

Pada tahap kedua, penulis mengumpulkan data – data yang diperlukan untuk menunjang penelitian ini. Data yang akan diambil dibagi menjadi dua, yaitu data sekunder dan data primer. Data primer meliputi : Debit, Kecepatan, dan Karakteristik sedimentasi. Sedangkan data sekunder meliput : Data debit, data kecepatan, data *level* air dan *Detail Engineering Drawing*. Data tersebut selanjutnya akan menjadi parameter – parameter dalam tahap simulasi.

Tahap simulasi, dilakukan perancangan geometri sungai dan tailrace yang didasarkan pada data survey lapangan di PLTA Balambano PT Vale Indonesia. Selanjutnya dilakukan proses *meshing*, *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Data – data yang diambil dari hasil simulasi meliputi : Profil aliran, profil kecepatan, profil *power density*, dan potensi terjadinya penggerusan.

3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data terbagi menjadi dua, yaitu data sekunder dan data primer. Data primer merupakan data yang diambil secara langsung di lapangan, meliputi : Debit, kecepatan, kedalaman sungai dan karakteristik sedimentasi. Sedangkan data sekunder merupakan data yang diambil dalam jangka waktu tertentu dan *detailed engineering drawing* dari bangunan yang turut disimulasikan, meliputi : Debit, dan *detailed engineering drawing* dari tailrace PLTA Balambano.

a. Pengukuran Kecepatan

Pengukuran kecepatan sungai dilakukan dengan menggunakan *Digital Flow Meter* yang difabrikasi oleh *Global Water* dengan spesifikasi pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Spesifikasi *Flow Meter*

Range	:	0.3 – 19.9 FPS 0.1 – 6.1 m/s
Accuracy	:	0.1 FPS
Averaging	:	True digital running average, updated once per second
Display	:	LCD
Control	:	4 Button
Datalogger	:	30 sets, MIN, MAX and AVE
Sensor	:	Protected Turbo-prop propeller with magnetic pickup

Pengukuran dilakukan di dua titik penampang melintang sungai. Lalu, setiap titik penampang dibagi menjadi sembilan titik pengukuran. Pada Tabel 3.2 menunujukkan ilustrasi lokasi pengukuran kecepatan setiap penampang, setiap sel berisi nilai kecepatan arus. Terdapat tiga titik pengukuran pada setiap penampang, yaitu sisi kiri, tengah, dan sisi kanan. Setiap titik dilakukan pengukuran berdasarkan kedalamannya. Untuk daerah atas aliran memiliki jarak 1 m dari permukaan air, pada daerah tengah aliran memiliki jarak 2 meter dari permukaan air, dan daerah terdalam aliran atau bawah yang dapat diukur, berjarak 3 meter dari permukaan air. Pembacaan arah aliran air posisi kiri, tengah, dan kanan searah dengan arah pembaca.

Tabel 3.2 Pengukuran Kecepatan Sungai

Lokasi	Posisi Kedalaman	Kecepatan (m/s)		
		Kiri	Tengah	Bawah
Penampang 1 B1	Atas	1A	4A	7A
	Tengah	2A	5A	8A
	Bawah	3A	6A	9A
Penampang 2 B2	Atas	1B	4B	7B
	Tengah	2B	5B	8B
	Bawah	3B	6B	9B

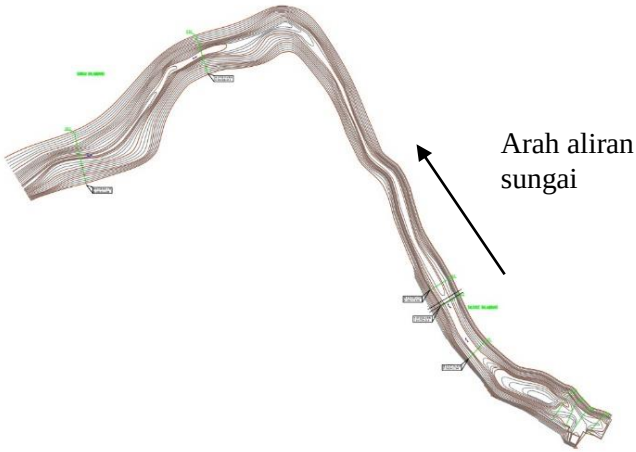
b. Pengukuran Data Bathimetri

Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui profil kedalaman sungai Balambano. Profil tersebut selanjutnya diolah menjadi citra tiga dimensi untuk mempermudah simulasi yang akan dilakukan.

Dalam pengambilan data, penulis menggunakan *Echo Sounding* sebagai alat untuk memetakan profil bawah air. Pada prinsipnya echo sounding bekerja menggunakan sinyal suara berupa getaran dan pulsa – pulsa yang dipancarkan secara vertikal ke dasar sungai. Lalu, permukaan dasar sungai akan memantulkan sinyal suara yang telah dikirimkan. Selang beberapa waktu, sensor penerima akan menerima pulsa yang telah terpantulkan. Selanjutnya, akan dihitung menggunakan rumus :

$$2d = v\,t \tag{3.1}$$

Dimana, d merupakan jarak yang ditempuh oleh gelombang suara, sedangkan v dan t berturut – turut merupakan kecepatan suara dalam fluida penghantar dan waktu tempuh hingga suara kembali diterima.

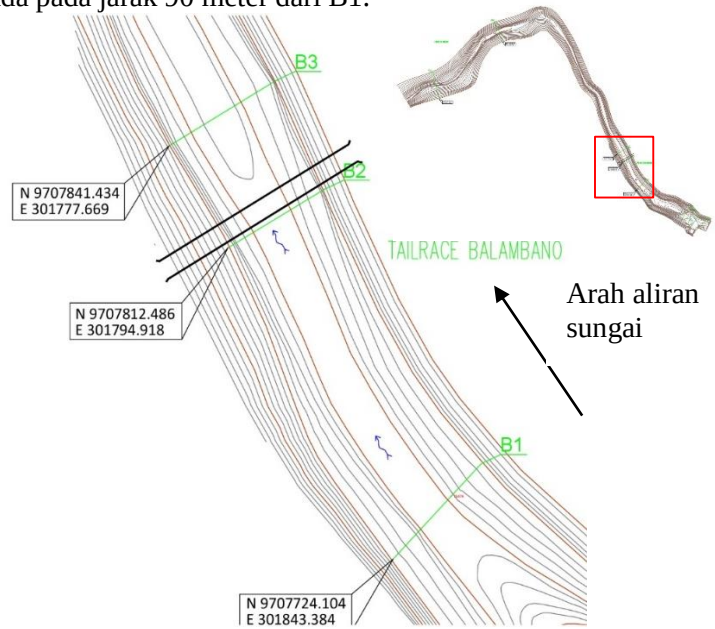


Gambar 3.2 Bathimetri Sungai Balambano hingga Genangan Karebbe

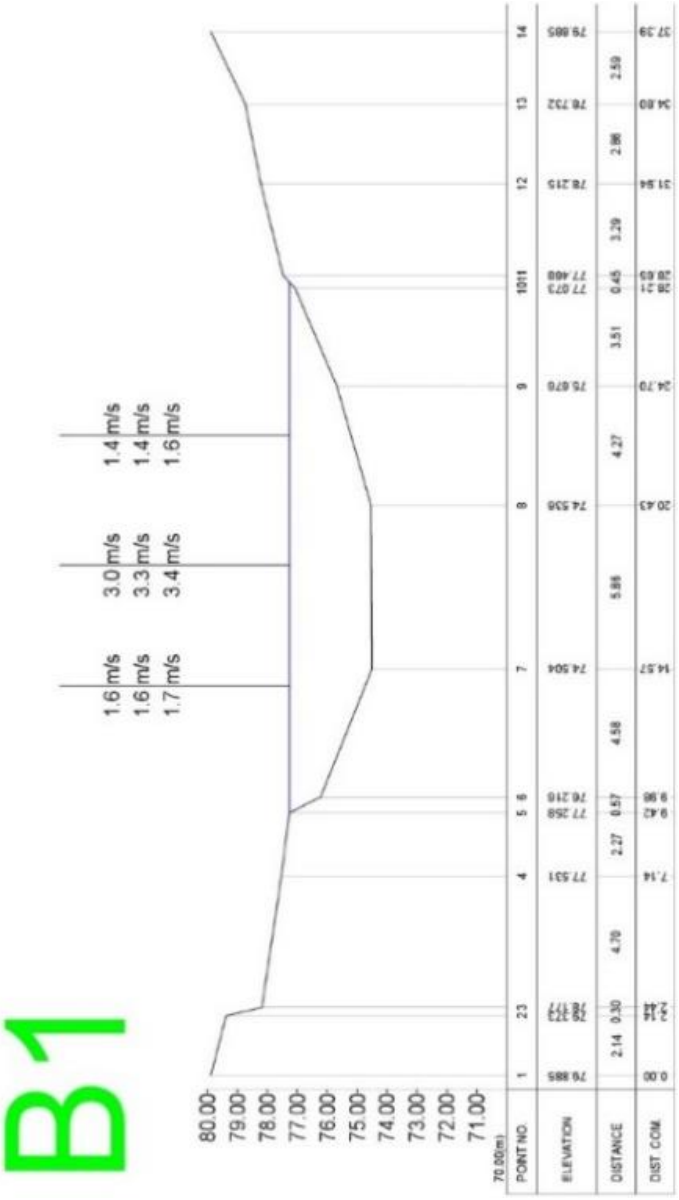
Pada Gambar 3.2, setiap garis mewakili ketinggian satu meter dengan elevasi terendah berada pada 66 meter diatas permukaan laut. Garis – garis tersebut membentuk penampang sungai dari PLTA Balambano hingga kearah *reservoir* PLTA Karebbe.

Data diambil pada penampang melintang sungai menggunakan perahu karet yang bergerak dari sisi kiri sungai, ke sisi kanan tepian sungai. Diambil dua buah penampang melintang untuk mendapatkan profil kedalaman sungai terhadap jarak dari salah satu tepiannya. Yaitu penampang B1 dan B2. Penentuan penampang melintang didasarkan pada kemudahan akses dalam menjangkau area pengukuran. Lokasi pengambilan data bathimetri pada penampang B1 dan B2 sesuai pada Gambar 3.3.

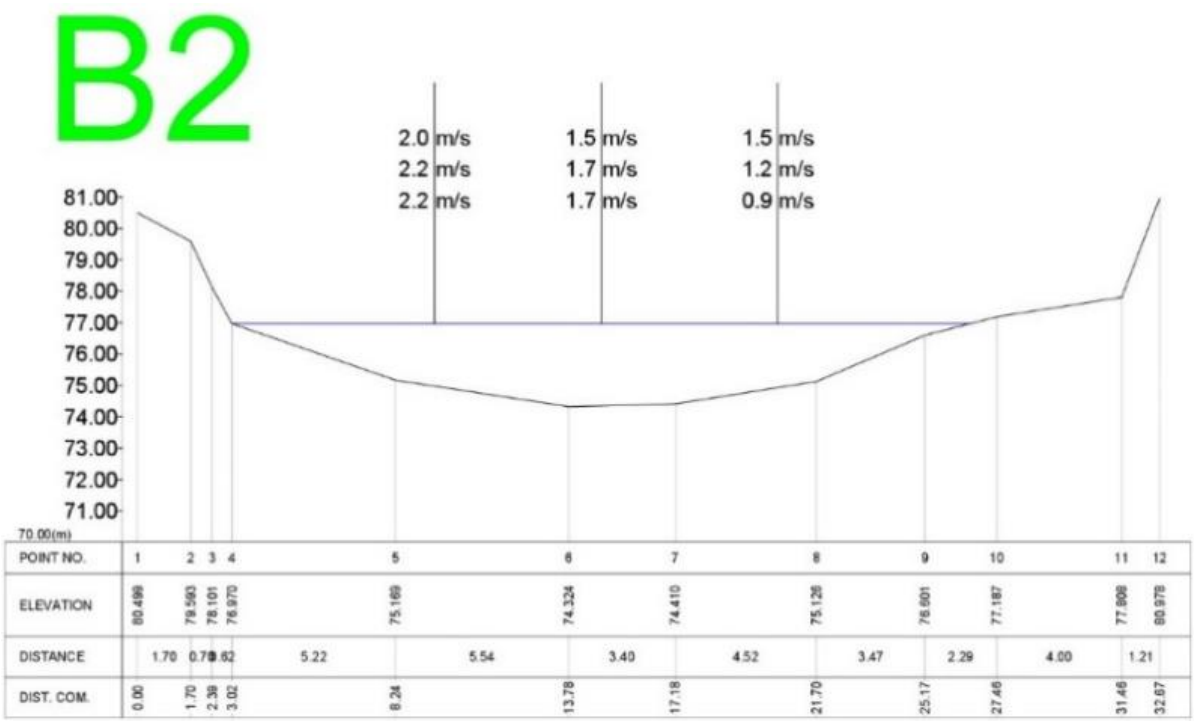
Penampang melintang B1, merupakan penampang melintang pertama yang akan dilalui oleh aliran air. Sedangkan penampang melintang B2 berada pada urutan kedua. Penampang melintang B1 berada pada jarak 253 meter dari outflow draft tube. B2 berada pada jarak 90 meter dari B1.



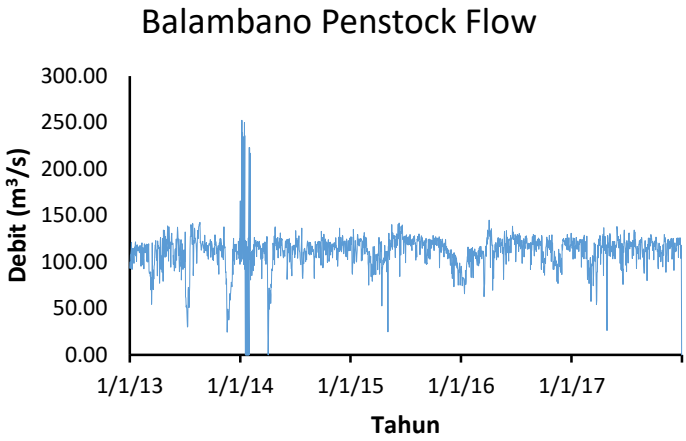
Gambar 3.3 Lokasi Penampang Melintang



Gambar 3.4 Penampang Melintang B1



Gambar 3.5 Penampang Melintang B2



Gambar 3.6 Outflow *Penstock* PLTA Balambano

c. Data Debit

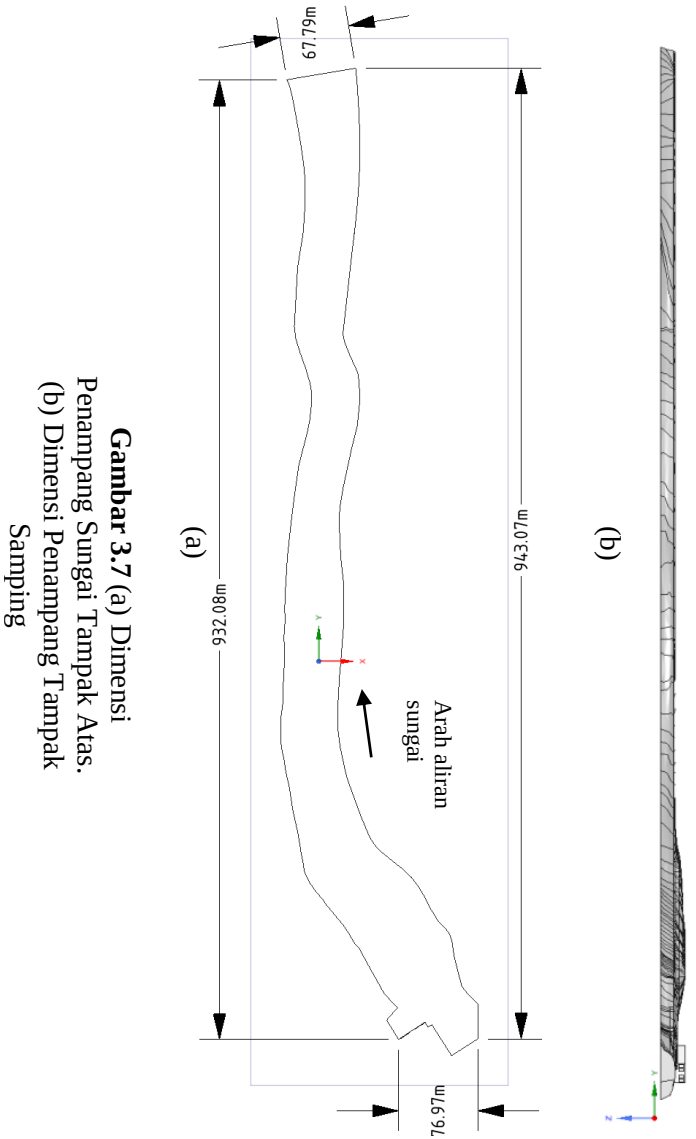
Data debit didapat dari rekaman data debit penstok balambano yang telah terekam oleh HMI (Human Machine Interface) di ruang kontrol. Adapun data yang diambil dalam rentang waktu lima tahun, dari tahun 2012 hingga tahun 2017.

Pada Gambar 3.6, terlihat outflow dari *penstock* PLTA Balambano PT Vale Indonesia berada pada rentang 100 cumec. Pada tahun 2014, outflow Balambano mencapai angka 250 cumec. Hal tersebut terjadi karena kemungkinan curah hujan pada 2014 mengalami kenaikan. Disisi lain, Beberapa titik mengalami penurunan drastis, ada sedikit penurunan pada akhir tahun 2015 hingga awal tahun 2016. Hal tersebut dapat terindikasi terjadi perawatan yang dilakukan di PLTA Balambano.

3.3 Pembuatan Geometri Sungai dan *Tailrace*

Geometri pada penelitian ini dibuat dari data bathimetri penampang sungai Balambano yang telah di ambil. Data masih berupa garis elevasi seperti pada Gambar 3.2, sehingga perlu dilakukan pembuatan bidang dan kemudian dijadikan volume.

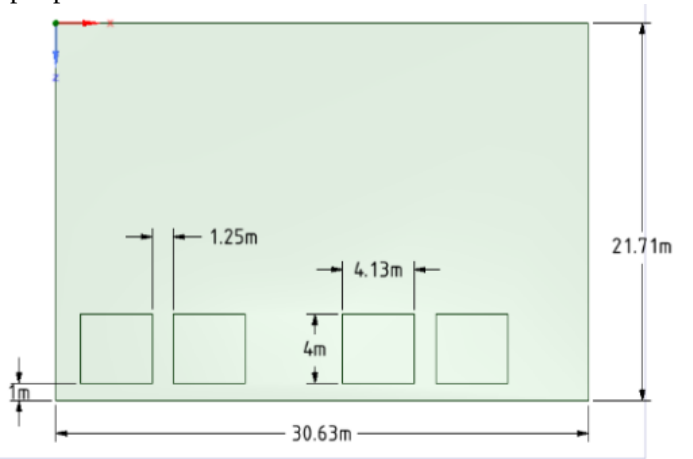
Pada geometri ini hanya terdapat satu domain sebagai tempat fluida mengalir.



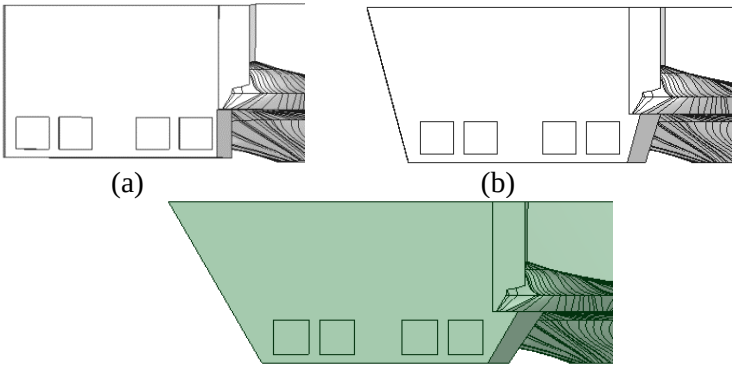
Gambar 3.7 (a) Dimensi Penampang Sungai Tampak Atas. (b) Dimensi Penampang Tampak Samping

Gambar 3.7, merupakan dimensi seluruh sungai yang akan disimulasikan. Dengan panjang 943.07 meter, hilir sungai 76.97 meter, dan hulu sungai 67.79 meter. Sedangkan pada gambar 3,6b merupakan bentuk volume penampang sungai bila dilihat dari sumbu x. Gambar tersebut membuktikan bahwa kedalaman sungai mengalami perubahan seiring dengan sumbu y. Hal tersebut juga berlaku dengan sumbu x yang mewakili perubahan pada lebar penampang sungai seiring bertambahnya nilai sumbu y. Sedangkan sumbu z merupakan sumbu yang mewakili garis gravitasi.

Detailed engineering drawing draft tube PLTA Balambano yang bersinggungan dengan sungai Balambano ditunjukkan oleh gambar 3.8. *Draft tube* merupakan saluran penghubung antara penstock dengan sungai. Draft tube berfungsi untuk mengkonversi energi kinetik menjadi energi potensial. PLTA Balambano memiliki dua buah turbin generator yang bertugas untuk menghasilkan listrik dari debit air yang masuk melalui penstock. Setiap turbin generator dihubungkan pada sebuah draft tube. Setiap *draft tube* memiliki dua pipa pelimpahan yang akan mengalirkan air ke sungai. Sehingga, terdapat empat buah pipa pelimpahan draft tube dari dua turbin generator yang terdapat pada PLTA Balambano.



Gambar 3.8 Dimensi *Outlet Draft Tube*



Gambar 3.9 (a) Variasi 90^{o}, (b) Variasi 105^{o}, dan (c) Variasi 120^{o}

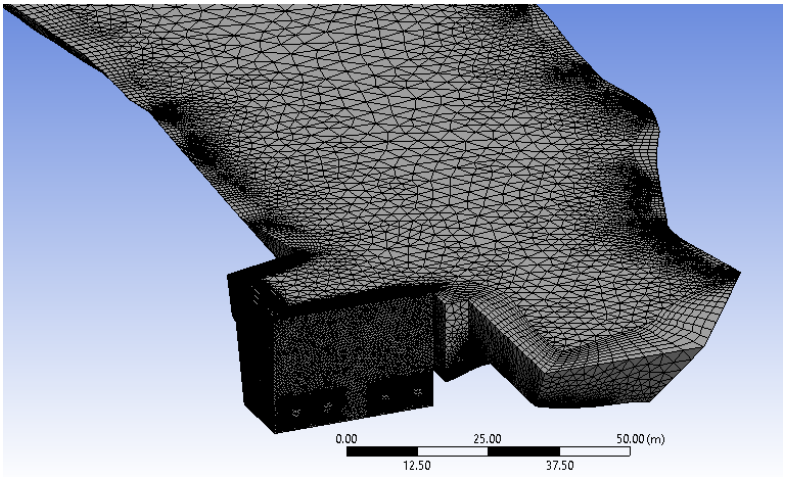
Pada tahap evaluasi penggerusan yang terjadi pada dinding sungai muka draft tube, maka dibuat variasi sudut kemiringan dinding sungai terhadap dasarnya. Adapun variasi yang digunakan yaitu 90^{o}, 105^{o}, dan 120^{o}. Variasi tersebut berlaku pada dinding sisi kiri dan depan draft tube, seperti diilustrasikan pada Gambar 3.9.

3.4 Meshing

Meshing merupakan tahap untuk membagi geometri menjadi bagian – bagian kecil yang disebut dengan *control volume*. Ukuran mesh sangat menentukan validitas hasil dari simulasi yang dihasilkan. Karena, persamaan – persamaan perhitungan akan dilakukan pada setiap control volume. Sehingga, semakin kecil mesh yang digunakan, maka akurasi perhitungannya akan semakin valid. Namun, hal tersebut juga memberikan pengaruh terhadap proses komputasi yang dijalankan.

Selain ukuran mesh, jenis dan bentuk mesh juga mempengaruhi kualitas mesh. Simulasi yang akan dilakukan menggunakan mesh dengan jenis tetrahedral dan pyramid. Karena kedua jenis mesh tersebut cocok diterapkan pada geometri yang kompleks.

Ilustrasi proses meshing ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 *Meshing* pada daerah sekitar *draft tube*

Untuk mendapatkan hasil simulasi yang valid dan tidak memerlukan komputasi yang berat, maka mesh memiliki ukuran yang berbeda – beda pada setiap bagian. Bagian volume penampang sungai memiliki ukuran antara 0.14 – 10 m. Sedangkan pada bagian dinding penampangnya digunakan ukuran mesh sebesar 5 m. Pada dinding depan *outlet draft tube*, digunakan ukuran mesh sebesar 0.5 m. Hal tersebut dilakukan guna meningkatkan akurasi perhitungan untuk mendapatkan hasil potensi penggerusan dan pergerakan fluida yang akurat di daerah yang sempit. Guna menghasilkan pergerakan fluida yang dipengaruhi oleh penampang sungai, maka digunakan metode infiltrasi 10 lapisan pada setiap sisi geometri sungai .

3.5 *Pre-processing* dan *Processing*

Pre-processing merupakan awal dari proses simulasi CFD. Penentuan kondisi – kondisi batas simulasi ditentukan pada tahap ini. Geometri yang akan disimulasikan ditentukan kondisi batasnya. Pada Tabel 3.3, Bagian - bagian pada domain simulasi akan diklasifikasikan sesuai dengan kondisi batasnya masing – masing.

Tabel 3. 3 Klasifikasi Bagian Domain dengan kondisi batasnya

No.	Bagian Domain	Kondisi Batas
1	Outlet *Draft tube*	Inlet
2	Hilir Sungai	Outlet
3	Atmosphere	Opening
4	Dinding Sekitar *Draft tube*	Wall
5	Penampang Sungai	Wall

Setelah kondisi batas ditentukan, selanjutnya menentukan kondisi inisialisasi pada proses simulasi yang akan dilakukan. Inisialisasi ini ditetapkan kecepatan inlet yang didapat dari konversi debit pada outlet draft tube, nilai tekanan atmosphere, dan nilai kekasaran permukaan dinding. Secara detail kondisi inisialisasi dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Inisialisasi CFD

No.	Kondisi Batas	Inisialisasi
1	Domain Interface	• 2 Continuous Fluid, yaitu air dan udara • Free Surface • K-epsilon • Surface tension 0.072 N/m^2
2	Inlet	Pemberian kecepatan sesuai dengan kondisi sebenarnya
3	Opening	Tekanan normal, 1 atm
4	Outlet	Tekanan normal, 1 atm
5	Wall	Free slip wall dengan nilai roughness, • Short Concrete : 0,012 m • Batuan : 0.04 m

3.6 Solver

Pada tahap *solver*, komputasi akan dilakukan terhadap objek yang telah melewati tahap *pre-processing*. Model turbulensi yang digunakan pada tugas akhir ini adalah K-*epsilon* standar. Proses komputasi dikatakan selesai ketika nilai RMS berada dibawah 10^{-4}. Apabila proses komputasi selesai, maka hasil simulasi dapat dilanjutkan pada tahap *post-processing*.

3.7 Post-processing

Post-processing adalah tahap terakhir dalam proses simulasi CFD. Pada tahap ini hasil simulasi sudah dapat dilihat dan ditampilkan dalam bentuk grafik, kontur maupun angka.

3.8 Analisa Data

Setelah melalui proses simulasi CFD, data hasil simulasi berupa kecepatan dan temperatur akan dianalisa lebih lanjut sehingga dapat mencapai tujuan dari tugas akhir ini. Setelah analisa data dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan dari tugas akhir ini dan penyusunan laporan tugas akhir dapat dimulai.

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Hasil Simulasi

Validasi merupakan proses untuk memastikan hasil simulasi yang didapat mendekati kebenaran yang sesungguhnya. Pada penelitian ini, penulis melakukan validasi dengan membandingkan data kecepatan sungai yang sebenarnya dengan hasil simulasi. Diambil persen rata - rata pada kedua penampang melintang sungai, lalu dibandingkan nilainya dengan penampang melintang yang sama pada simulasi CFD. Pengukuran dilakukan di dua titik penampang melintang sungai. Lalu, setiap titik penampang dibagi menjadi sembilan titik pengukuran yang diilustrasikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Kecepatan Sungai

Lokasi	Posisi Kedalaman	Kecepatan (m/s)		
		Kiri	Tengah	Bawah
Penampang 1 B1	Atas	1.6	3	1.3
	Tengah	1.6	3.3	1.4
	Bawah	1.7	3.4	1.6
Penampang 2 B2	Atas	2	1.5	1.5
	Tengah	2.2	1.7	1.2
	Bawah	2.2	1.7	1.6

Proses validasi dilakukan dengan cara mensimulasikan kondisi lapangan yang sesungguhnya. Variabel yang di-*input*kan pada *boundary condition* CFD berupa *outflow* pada *draft tube* PLTA Balambano ketika melakukan pengukuran. Validasi simulasi didasarkan dari jurnal milik Oberkampf .L et. Al, yang mengatakan bahwa proses validasi dianggap benar bila selisih eror yang telah dibandingkan dengan data eksperimen kurang dari 10 persen (Oberkampf & Trucano, 2002).

Pada simulasi yang telah dilakukan, hasil pengukuran berupa kecepatan air pada penampang B1 dan B2. Pada penampang B1

didapatkan rata – rata kecepatan sebesar 2,1 m/s. Sedangkan rata – rata kecepatan pada penampang B2, didapatkan sebesar 1.65 m/s. Bila dibandingkan dengan hasil simulasi, penampang B1 dan B2 memiliki rata – rata kecepatan berturut – turut 2.047 m/s dan 1.64 m/s. Sehingga selisih eror pada penampang B1 sebesar 2.9 %. Sedangkan untuk penampang B2 memiliki eror sebesar 0.6 %.

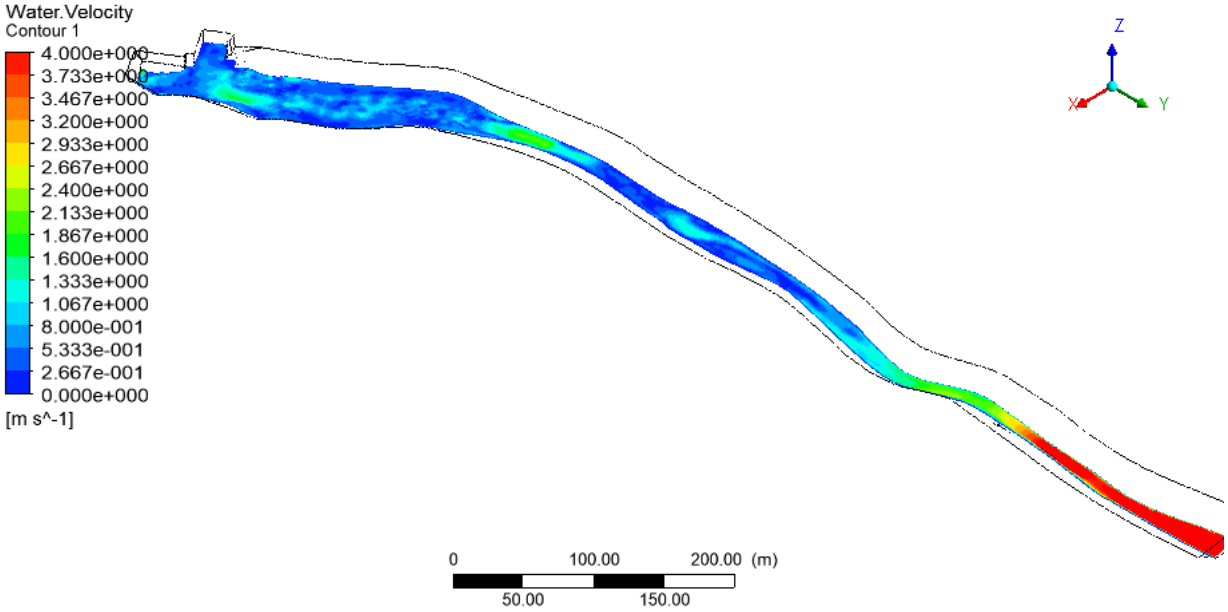
Error pada masing – masing penampang dibawah 10 %. Sehingga, simulasi telah tervalidasi dengan baik terhadap data lapangan.

4.2 Profil Kecepatan Aliran

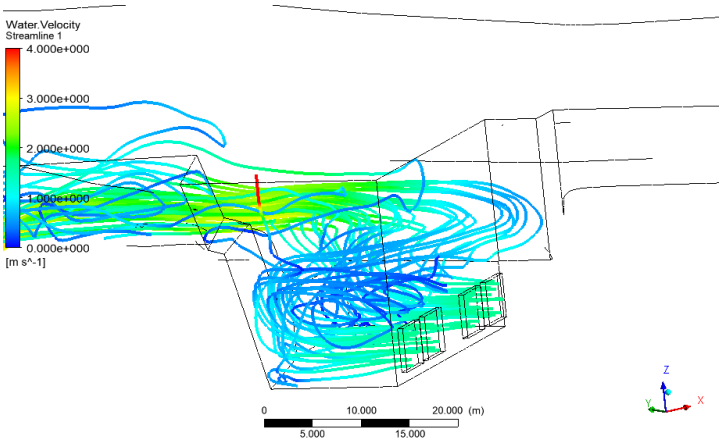
Profil kecepatan merupakan persebaran kecepatan aliran sungai berdasarkan gradien warna. Aliran sungai merupakan aliran yang diklasifikasikan sebagai aliran pada saluran terbuka. Karena terdapat permukaan bebas yang bersinggungan dengan tekanan atmosfir. Dengan adanya permukaan bebas dan gesekan sepanjang dinding penampang, maka kecepatan pada saluran terbuka terbagi menjadi tidak merata. Kecepatan maksimumnya biasanya berada dibawah permukaan bebas (Ven, 1985).

Setelah dilakukan simulasi, didapatkan profil persebaran kecepatan dari *outlet draft tube* PLTA Balambano hingga sungai Balambano sejauh 938 m. Pada gambar 4.1, terlihat bahwa persebaran kecepatan tidak merata. Ketidak merataan ini dipengaruhi oleh bentuk penampang, kekasaran permukaan penampang dan lekukan – lekukan yang tidak teratur.

Pada daerah sekitar *Draft tube*, kecepatan air akibat dari 110 *cumec outflow* rata - rata dibawah 1 m/s. Rendahnya kecepatan air pada *outflow draft tube* dikarenakan adanya genangan air yang terjadi pada kolam olak. Genangan air ini disebabkan karena kolam olak *draft tube* memiliki volume yang kecil. Sehingga, air mengalami backflow dan turbulensi yang tinggi. Hal tersebut dapat terlihat pada Gambar 4.2, dimana aliran air mengalami turbulensi ke arah atas. Turbulensi inilah yang menyebabkan dinding depan *draft tube* menerima gaya gesek yang besar akibat dari arah aliran air yang berputar. Hal ini menyebabkan pontesi penggerusan pada dinding disekitar *outlet draft tube* sangat besar.



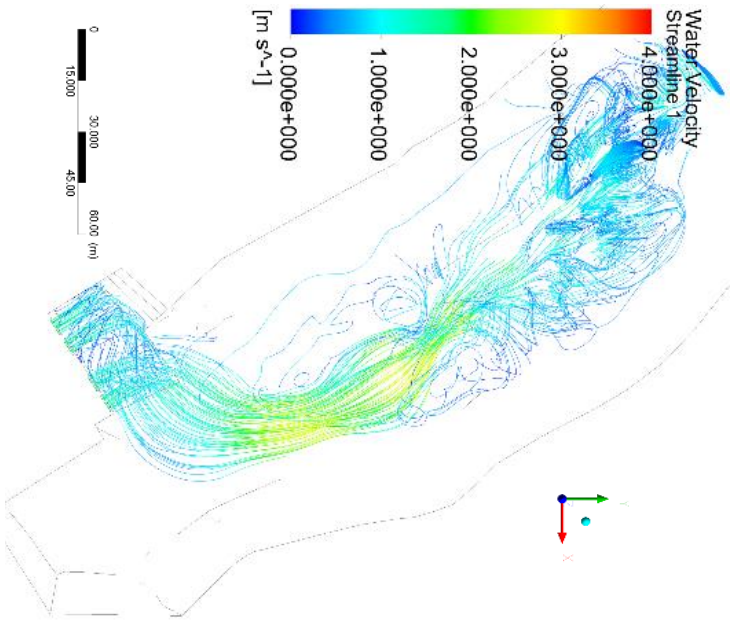
Gambar 4.1 Kontur Kecepatan Aliran Air tampak Atas



Gambar 4.2 Garis Aliran Air pada *Outlet Draft Tube*

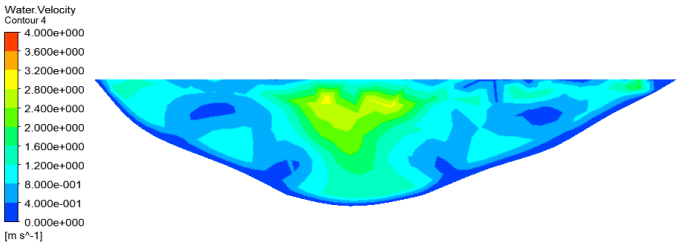
Beberapa meter kemudian, aliran mengalami penurunan kecepatan yang signifikan. Hal ini disebabkan melebarnya penampang basah sungai. Didasarkan pada persamaan 2.10, dimana luas area basah mengalami peningkatan, maka kecepatan aliran air mengalami penurunan. Luas area basah merupakan pembagian antara luas penampang basah dengan lebar permukaan airnya. Sehingga, faktor - faktor yang menyebabkan penurunan kecepatan, yaitu : kedalaman sungai, dan lebar sungai. Sementara profil aliran pada daerah ini berupa turbulen. Hal tersebut terjadi lataran perubahan morfologi sungai yang signifikan. Dari kolam olakan yang memiliki penampang basah yang sangat kecil ke sungai alam yang memiliki penampang basah yang sangat besar.

Pada gambar 4.3, *streamline* aliran air mengalami pembelokan tajam dari tepian kiri ke tepian kanan sungai. Selain itu, kecepatan aliran air yang menghantam dinding sungai mencapai 3 m/s. Bila didasarkan pada persamaan 2.15, dimana debit yang dipengaruhi variabel kecepatan air berbanding lurus dengan nilai gaya gesernya. Sehingga, dinding sungai pada tepian kanan menerima gaya geser yang besar seiring dengan tingginya kecepatan aliran air.

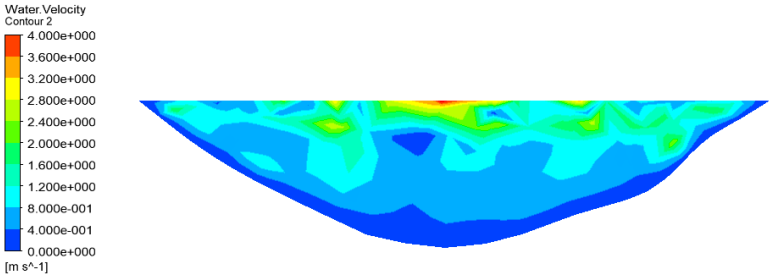


Gambar 4.3 Kontur Kecepatan Aliran Air tampak Atas

Penampang melintang B1 (Gambar 4.4) terletak di pada jarak 250 m dari *outlet draft tube* Balambano. Berdasarkan kontur kecepatan, kecepatan tertinggi terpusat di tengah penampang. Hal ini disebabkan oleh penyempitan pada penampang sungai. Sehingga, aliran air pada sisi kiri dan kanan penampang mengalami pemampatan. Pemampatan inilah yang menyebabkan kenaikan kecepatan yang signifikan. Kecepatan pada titik tengah penampang berkisar antara 2,8 – 2,4 m/s.



Gambar 4.4 Kontur Kecepatan Aliran Air pada Penampang B1

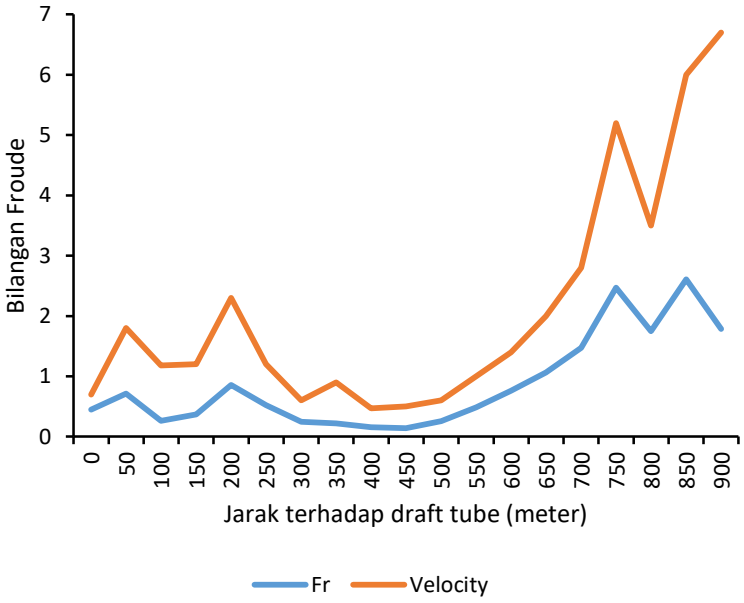


Gambar 4.5 Kontur Kecepatan Aliran Air pada Penampang B2

Penampang B2 (Gambar 4.5) terletak sejauh 400 meter dari *outlet draft tube*. Pada penampang melintang ini terlihat bahwa kecepatan aliran air mulai mengalami pemerataan. Pada penampang B1, kecepatan tertinggi terpusat di tengah penampang. Sedangkan pada penampang B2, kecepatan air mengalami pemerataan pada permukaan dengan rentang kecepatan 1,2 – 2 m/s. Hal tersebut disebabkan adanya kenaikan elevasi pada dasar sungai. Sehingga, aliran air pada dasar sungai mengalami pemampatan kearah permukaan. Sedangkan kecepatan pada dasar penampang berkisar antara 0,4 – 0,8 m/s.

Penempatan turbin bergantung pada nilai Froude pada suatu aliran. Bilangan Froude merupakan pengaruh gravitasi terhadap profil suatu aliran. Aliran yang baik dalam penempatan turbin memiliki nilai $Fr < 1$. Atau merupakan aliran sub-kritis. Bilangan Froude memiliki hubungan yang erat dengan profil kecepatan aliran dan profil penampang hidrolis saluran. Berdasarkan persamaan 2.1, kecepatan berbanding lurus dengan bilangan Froude. Namun, luas penampang basah berbanding terbalik dengan bilangan Froude.

Kecepatan dan luas penampang basah merupakan faktor – faktor yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan lokasi penempatan turbin. Sehingga, untuk dapat mengekstrak potensi hidrokinetik yang besar, diperlukan pemilihan lokasi yang memiliki kecepatan yang tinggi, namun tidak mengabaikan karakteristik aliran sub-kritis.



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Antara Kecepatan dan Bilangan *Froude* Terhadap Jarak

Berdasarkan Gambar 4.6, kecepatan aliran air mengalami fluktuasi hingga jarak 300 m dari *outlet draft tube*. Hal tersebut dikarenakan terdapat transisi dari kolam olakan ke sungai balambano. Sehingga aliran air memiliki profil turbulen mengalami fluktuasi kecepatan. Namun, pada jarak diatas 300 m, aliran air mengalami peningkatan kecepatan yang signifikan. Hal tersebut dikarenakan penurunan elevasi dasar sungai dan juga penyempitan penampang sungai. Pada rentang jarak 700 – 900 m, kecepatan sungai mengalami fluktuasi. Hal tersebut disebabkan karena pembelokan pada penampang sungai. Sehingga, aliran air mengalami penurunan kecepatan akibat gesekan dengan penampang sungai.

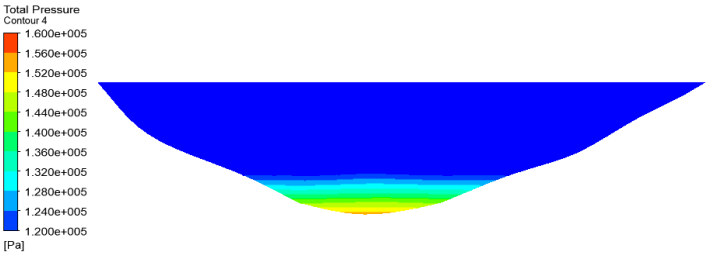
Sehingga, penempatan turbin yang baik menurut Gambar 4.6 berada pada rentang 300 – 650 m dari outlet draft tube. Karena memiliki bilangan Froude dibawah 1.

4.3 Profil Tekanan Aliran

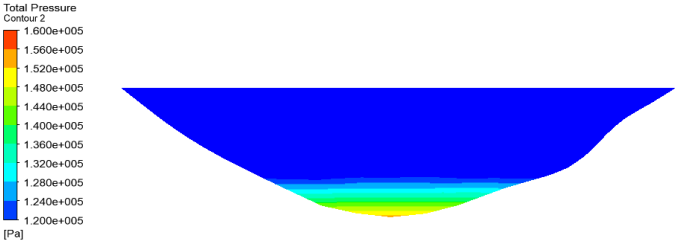
Kecepatan air memberikan beberapa pengaruh terhadap bentuk penampang sungai. Hal tersebut dikarenakan semakin besar nilai kecepatannya, maka tekanan yang diberikan akan semakin besar. Selain itu, tekanan oleh fluida dapat disebabkan oleh head tekanan yang dimilikinya, atau perbedaan ketinggian dimana fluida akan mengalir. Semakin tinggi selisih ketinggiannya, maka tekanan yang dihasilkan akan semakin besar.

Profil tekanan aliran pada penampang melintang B1 (Gambar 4.7) menunjukkan bahwa tekanan yang terjadi cenderung dibagi menjadi beberapa segmen. Semakin dalam, maka nilai tekanannya semakin meningkat. Hal tersebut disebabkan ketinggian air yang disebabkan oleh gaya gravitasi. Selain itu, tekanan tersebut juga dipengaruhi oleh kecepatan yang mengalir pada penampangnya.

Pada permukaan air memiliki tekanan sebesar 128000 – 132000 Pa. Sedangkan pada bagian tengah, tekanan air berkisar antara 132000 – 148000 Pa. Tekanan terbesar terjadi didasar penampang dengan rentang 148000 - 156000 Pa. Kecepatan air yang mengalami peningkatan karena mengalami penurunan luas daerah basahnya.

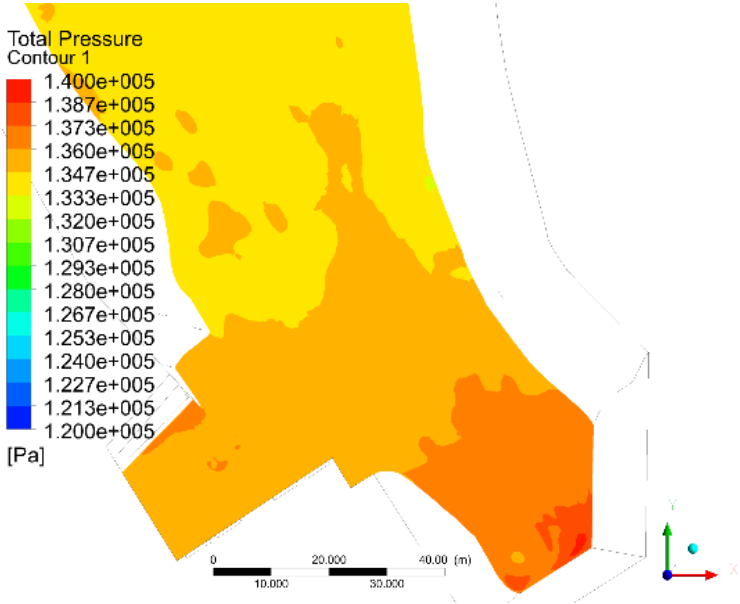


Gambar 4.7 Kontur Tekanan Aliran Air pada Penampang B1



Gambar 4.8 Kontur Tekanan Aliran Air pada Penampang B2

Sedangkan tekanan pada dasar penampang B2 (Gambar 4.8) mengalami penurunan. Hal tersebut terlihat pada tekanan dasarnya, dimana rentang tekanan 148000 – 152000 Pa menempati daerah yang lebih kecil dibandingkan dengan penampang B1. Selain itu, kedalaman pada penampang B2 lebih kecil dibanding penampang B1. Sehingga, berat fluida yang disebabkan oleh ketinggian air mengalami penurunan.



Gambar 4.9 Kontur Tekanan Aliran Air pada Outlet Draft Tube

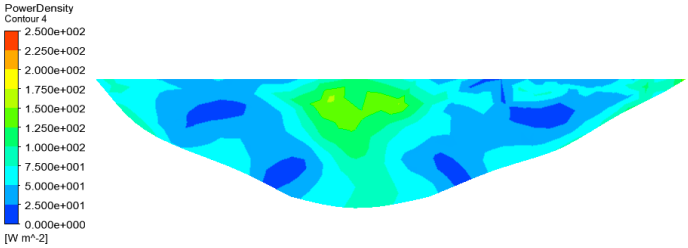
Selain itu, tekanan pada dinding muka draft tube dapat terlihat dari Gambar 4.9. Tekanan yang diterima oleh dinding muka draft tube sebesar 137300 - 136000 Pa. Sehingga, daerah tersebut rawan sekali mengalami penggerusan.

4.4 *Power Density*

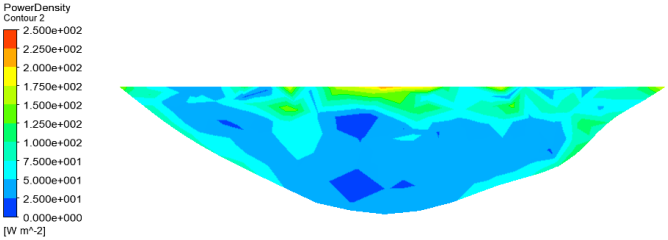
Power density merupakan variabel potensi hidrokinetik yang dapat diekstrak dari aliran sungai Balambano. Artinya, potensi energi yang tersimpan dari profil aliran air. Ada beberapa variabel yang mempengaruhi *power density*, yaitu : Kecepatan, *total energy*, dan tekanan yang dihasilkan. Pada penelitian ini, *power density* diambil dari setiap penampang yang telah ditentukan yaitu, B1 dan B2.

Pada penampang B1 (Gambar 4.10), profil *Power Density* terbesar berada pada sisi kiri penampang (Pembaca sesuai arah aliran). Sesuai dengan kontur kecepatannya, nilai tertinggi berada di tengah penampang. Selain itu, hal ini disebabkan oleh penyempitan penampang basah sungai. Rentang potensi hidrokinetik yang dapat diekstrak dari aliran ini sebesar 150 – 200 W/m^2.

Pada penampang B2 (Gambar 4.11), power density terbesar yang didapatkan sebesar 100 – 175 W/m^2. Power density penampang B2 mengalami penurunan dibanding dengan penampang melintang B1. Hal tersebut disebabkan oleh pemerataan kecepatan aliran pada penampang B2. Selain itu, peningkatan elevasi dasar sungai juga berpengaruh terhadap profil power density yang dihasilkan.



Gambar 4.10 Kontur *Power Density* pada Penampang B1



Gambar 4.11 Kontur *Power Density* pada Penampang B2

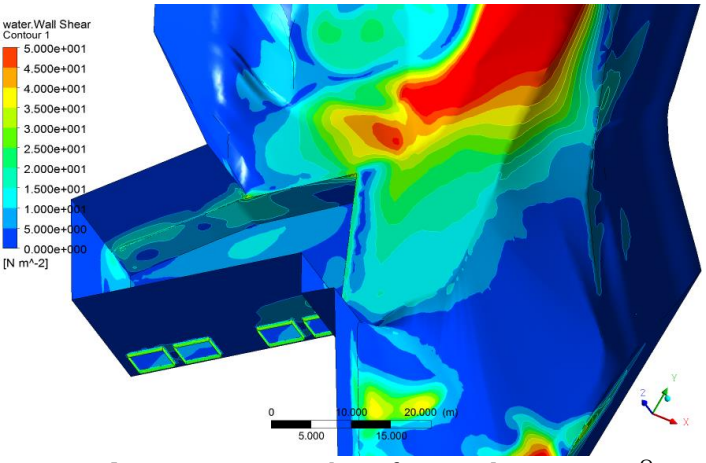
4.5 Potensi Penggerusan

Penggerusan merupakan hasil dari pengikisan, penggalian, dan pembawaan material dasar ataupun dinding akibat dari arus fluida terhadap penampang sungai (Jalali, 2014). Aliran air yang terhalang akan menyebabkan terjadinya turbulensi (*horseshoe vortex*). *Horseshoe vortex* inilah yang menyebabkan meningkatnya nilai tegangan geser yang diterima oleh penampang sungai. Bila nilai tegangan geser meningkat, maka potensi penggerusan yang terjadi akan semakin meningkat (Manes & Brocchini, 2015).

Memiliki *outflow* yang besar dengan kolam olakan yang kecil, membuat dinding muka *draft tube* rawan akan mengalami gerusan. Pada bagian ini, potensi penggerusan ditampilkan dalam bentuk N/m^2. Artinya, semakin besar gaya yang diterima oleh penampang, maka potensi terjadinya penggerusan akan semakin besar.

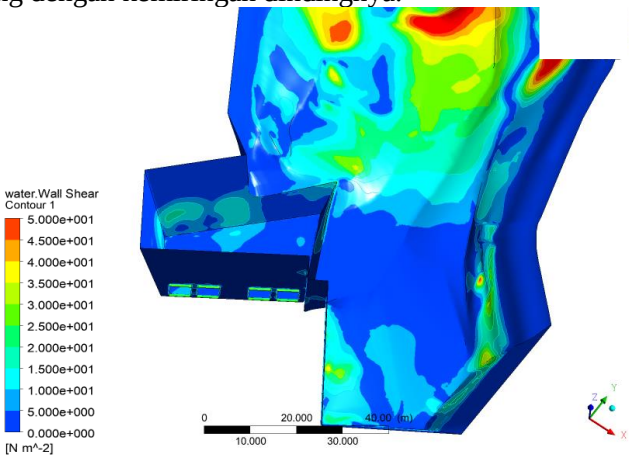
Maka variasi sudut kemiringan dinding terhadap dasar penampang menjadi variasi dalam penilitian ini. Adapun sudut yang digunakan 90^o, 105^o, dan 120^o.

Pada variasi 90^o, didapatkan kontur gaya seperti pada gambar 4.12. Dimana muka *draft tube* menerima gaya berkisar antara 15 – 25 N/m^2. Hal tersebut dikarenakan dinding pada muka draft tube tegak lurus terhadap penampang dasarnya. Sehingga, arah vektor kecepatan air pun tegak lurus terhadap dindingnya. Maka gaya yang diberikan pun besar.

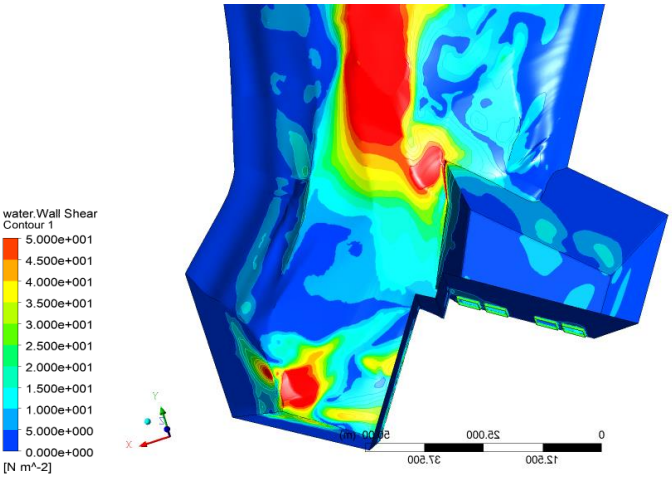


Gambar 4.12 Kontur *Shear force* pada Variasi 90^{O}

Pada variasi 105^{o}, didapatkan kontur gaya seperti pada Gambar 4.13. Dimana muka draft tube menerima gaya dengan rentang 10 – 20 N/m^2. Hal tersebut dikarenakan dinding pada muka draft tube memiliki kemiringan terhadap penampang dasarnya. Sehingga, kecepatan air yang diterima oleh dinding merupakan resultan gaya dari arah aliran air yang mengenai dinding dengan kemiringan dindingnya.

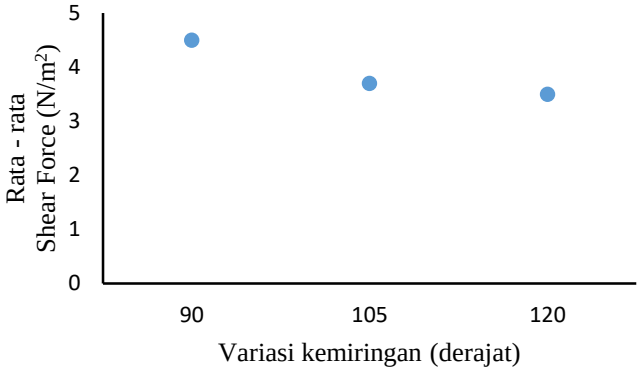


Gambar 4.13 Kontur *Shear Force* pada Variasi 105



Gambar 4.14 Kontur *Shear force* pada Variasi 120^{O}

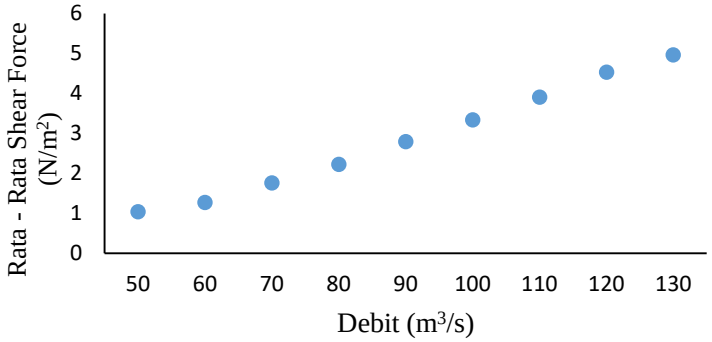
Pada variasi 120^{o}, didapatkan kontur gaya seperti pada Gambar 4.14. Dimana muka *draft tube* menerima gaya dibawah 15 N/m^2. Hal tersebut dikarenakan variasi 120^{o} kemiringan dinding pada muka *draft tube* memiliki kemampuan lebih baik dalam meredam kecepatan aliran air yang keluar dari draft tube. Sehingga, kecepatan *vortex* yang terjadi pun kecil. Sehingga, potensi penggerusan yang terjadi semakin kecil.



Gambar 4.15 Grafik rata – rata *shear force* terhadap variasi kemiringan dinding kolam olak

Gambar 4.15 merupakan grafik rata – rata gaya diterima oleh permukaan dinding kolam olak akibat dari profil aliran air. Berdasarkan grafik tersebut, rata – rata *shear force* yang diterima oleh permukaan dinding kolam olak mengalami penurunan dari sudut 90^0 hingga 120^o. Penurunan drastis terjadi antara sudut 90^o dan 105^o. Sedangkan antara sudut 105^o dan 120^o terjadi penurunan yang sangat kecil. Sehingga, berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa dari tiga variasi sudut yang digunakan, yang paling optimal untuk mengurangi efek penggerusan adalah sudut 120^o.

Pendekatan hubungan potensi penggerusan terhadap potensi hidrokinetik diinterpretasikan melalui persamaan 2.4 dan 2.15. Dimana pada persamaan 2.4, debit memberikan pengaruh pada potensi hidrokinetik yang dapat di ekstrak. Selain itu, Debit juga memiliki hubungan linier dengan gaya geser pada persamaan 2.15. Artinya, semakin besar debitnya, maka nilai gaya gesernya juga semakin besar. Sehingga, potensi penggerusan yang terjadi juga semakin meningkat. Secara singkat, dapat disimpulkan bahwa semakin besar debit fluida yang mengalir pada suatu penampang, maka potensi terjadi penggerusan pun semakin meningkat. Pada penelitian ini, hal tersebut diinterpretasikan pada grafik hubungan antara debit dan rata – rata gaya geser yang diterima oleh penampang sungai.



Gambar 4.16 Hubungan Antara Potensi Hidrokinetik dan Potensi Penggerusan

Pada gambar 4.16, hubungan antara potensi hidrokinetik yang diinterpretasikan dengan debit dan potensi terjadinya penggerusan yang diinterpretasikan oleh gaya geser/*shear force* (N/m^2). Berdasarkan grafik tersebut, terjadi kenaikan potensi penggerusan seiring dengan peningkatan debit. Hal itu disebabkan karena kecepatan dari aliran fluida meningkat, sehingga aliran turbulen yang terbentuk semakin cepat. Sehingga, hal tersebut mengakibatkan proses penggerusan yang terjadi akan semakin besar dan cepat.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisa data yang telah dilakukan, maka pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Bentuk penampang sungai mempengaruhi profil kecepatan dan tekanan. Pada belokan, kecepatan tertinggi cenderung berada pada sisi sungai yang berlawanan dengan arah beloknya. Sedangkan penyempitan penampang basah sungai, menyebabkan kecepatan tertinggi berada di tengah penampang.
2. Variabel kecepatan memiliki pengaruh yang besar terhadap potensi hidrokinetik yang dapat diekstrak. Semakin tinggi kecepatannya, maka potensi hidrokinetik yang dihasilkan akan semakin besar. Berdasarkan hasil simulasi, jarak 300 – 650 m dari *outlet draft tube* merupakan lokasi terbaik untuk mengekstrak potensi hidrokinetik sungai Balambano.
3. Pada penampang B1, potensi hidrokinetik tertinggi sebesar 150 - 200 W/m^2. Sedangkan pada penampang B2, potensi hidrokinetiknya sebesar 100 - 175 W/m^2.
4. Diantara 3 variasi sudut kemiringan dinding kolam olak yang digunakan, Sudut 120^o merupakan sudut yang paling optimal guna mengurangi penggerusan yang terjadi.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan dalam tugas akhir ini adalah diperlukan penelitian dengan menggunakan susunan variasi kecepatan *outlet draft tube* dan variasi material yang digunakan untuk mengetahui ketahanan dinding muka *draft tube*.terhadap potensi penggerusan yang terjadi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

Abbaspour, A., Parvini, S., & Dalir, A. H. (2017). *Effect of buried plates on scour profiles downstream of hydraulic jump in open channels with horizontal and reverse bed slopes.* Tabriz: Elsevier.

Arango, M. A. (2011). *Resource Assessment and Feasibility Study for Use of Hydrokinetic Turbines in the Tailwaters of the Priest Rapids Project.*

Flanagan, D., & Nearing, M. (1995). USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope profile and watershed model documentation. *NSERL Rep*, 10.

Ghobadian, R., & Basiri, M. (2015). *The Effect of downstream curved edge on local scouring at 60 degree open channel junction using SSIIM1 model.* Kermanshah: Aim Shams Engineering Journal.

Gimenez, R., & Govers, G. (2002). Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds. *Soilless Science Society of America Journal*, 1475-1483.

Govers, G. (1992). Relationship between discharge, velocity and flow. *Earth Surface Processes and Landforms 17*, 515-528.

Guo, J., & Julien, P. Y. (2008). Application of the Modified Log-Wake Law in Open-Channels . *Journal of Applied Fluid Mechanics, 1*(2), 17-23.

Jalali, S. K. (2014). *Prediction of Clear-water Local Scour at Bridge Piers.* Milan: Politecnico Di Milano.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2016). *Jurnal Energi.* Indonesia: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.

Khan, M., Iqbal, M., & Quaicoe, J. (2008). *River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges.* Canada: Elsevier.

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The Numerical Computation Of Turbulent Flows. *Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering 3*, 269-289.

Line, D., & Meyer, L. (1989). Evaluating interrill and rill erodibilities for soils of different textures. *Transactions of the ASAE*, 1995-1999.

Liu, Y., & Packey, D. J. (2014). *Combined-cycle hydropower systems - The Potential of applying hydrokinetic turbines on the tailwaters of existing conventional hydropower stations.* Perth: Elsevier.

Manes, C., & Brocchini, M. (2015). Local scour around structures and the phenomenology of turbulence. *J. Fluid Mech.*, 309-324.

Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., . . . Styczen, M. (1998). The European soil erosion model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 527-544.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2005). *Mekanika Fluida.* Jakarta: Erlangga.

Nasir, B. A. (2014). *Design Considerations Of Micro-Hydro-Electric Power Plant.* Kirkuk: Energy Procedia.

Nearing, M., Norton, L., Bulgakov, D., Larionov, G., West, L., & Dontsova, K. (1997). Hydraulics and erosion in eroding rills. *Water Resources Research*, 865-876.

Oberkampf, W. L., & Trucano, T. G. (2002). *Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics.* New Mexico: Sandia National Laboratories.

Pasalli, Y. R., & Rehiara, A. B. (2014). *Design Planning of Micro-hydro Power Plant in Hink River.* Manokwari: Procedia Environmental Sciences.

Previsic, M., Bedard, R., & Polagye, B. (2008). *System Level Design, Performance, Cost and Economic.* EPRI RP 006 Alaska .

PT Vale Indonesia. (2016). *Energi: Pembangkit Listrik Tenaga Air*. (Mining) Retrieved January 17, 2018, from www.vale.com

Raudkivi, & Etema, R. (1983). Clear-water scour at cylindrical piers. *Journal Of hydraulic Engineering*, 338-349.

Santoso. (2004). *Kajian Pengaruh Konfigurasi Bangunan Krib Pada Belokan Sungai Dengan Sudut Belokan 90.* Semarang.

Ven, T. C. (1985). *Hidrolika Saluran Terbuka.* Jakarta: Erlangga.

Welty, J. (2004). *Dasar-Dasar Fenomena Transport Edisi Keempat Volume 1 Transfer Momentum (Terjemahan).* Jakarta: Erlangga.

Zdankus, N., Punys, P., & Zdankus, T. (2014). *Conversion of Lowland River Flow Kinetic Energi.* Kaunas: Elsevier.

Zhang, R., Shan, X., & Chen, H. (2006). Efficient Kinetic Method For Fluid Simulation Beyond The Navier-Stokes Equation. *Physics*, 74.

Halaman ini sengaja dikosongkan

Lampiran A
PLTA Balambano

Gambar PLTA Balambano PT Vale Indonesia

Data PLTA Balambano PT Vale Indonesia (PT Vale Indonesia, 2016)

Bendungan:

Tipe	: Roller Compact Concrete(RCC)
Maksimum Tampung	: 31.5 juta m^3
Panjang Puncak	: 350 m
Elevasi Puncak	: 167 mdpl

Pelimpahan:

Kapasitas	: 3 x 750 m^3/s
Ukuran	: 8 X 15.076 m

Turbin:

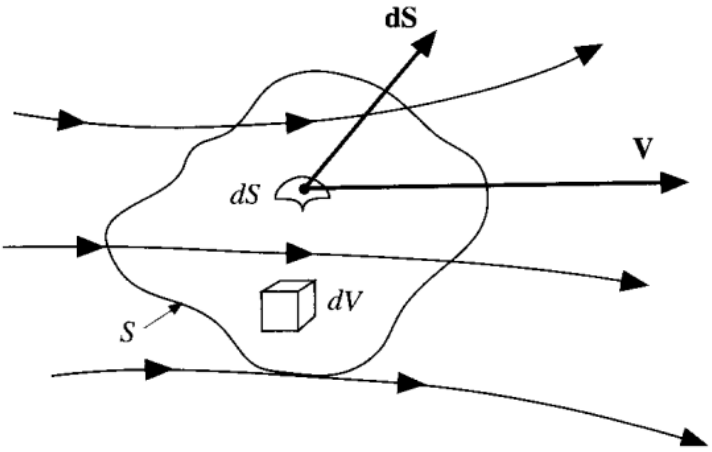
Tipe	: Francis Vertical Shaft
Produsen	: GE-Kanada
Putaran	: 214.3 rpm
Head	: 83.5 – 86.5 m
Kapasitas	: 67.7 – 68.5 mWatt

Generator:

Tipe	: Umbrella
Produsen	: GE-Kanada
Putaran	: 214.3 rpm
Kapasitas	: 80 MVA
Tegangan	: 11 kV
Jumlah Kutub	: 28 ea

LAMPIRAN B

I. Persamaan kontinuitas



Gambar b.1 Finite control volume fixed in space (Anderson, 1995)

Berdasarkan Gambar didapat kan persamaan massa aliran dari fluida yang melewati area dS adalah

$$\rho V_n dS = \rho V \bullet dS \quad \text{.....(1)}$$

Jika persamaan (1) dibawa ke bentuk integral akan menjadi

$$B = \iint_S \rho V \bullet dS \quad \text{.....(2)}$$

Massa dalam elemn volume dV adalah ρdV maka total massa dalam *control volume* adalah :

$$\iiint_v \rho dV \quad \text{.....(3)}$$

Perubahan massa di dalam volum V adalah

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho dV \quad \text{.....(4)}$$

Perubaha massa terhadap waktu $= \dfrac{\partial \rho}{\partial t}(dxdydz)$ .....(5)

Prinsip fisika dari konservasi massa dapat di rumuskan dalam persamaan berikut

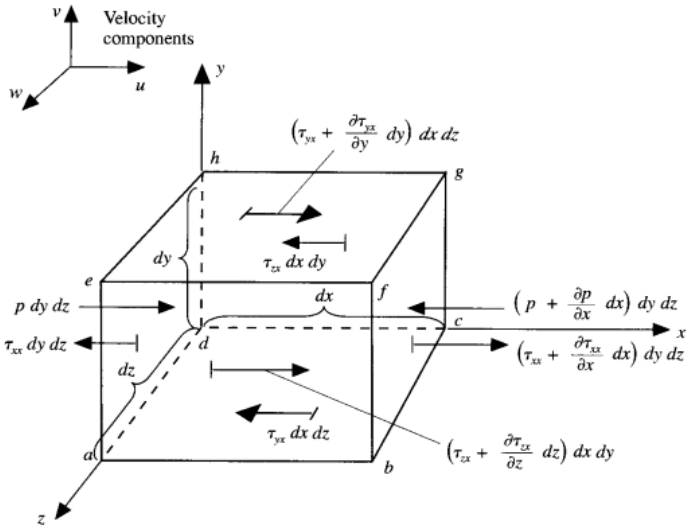
$$\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right]dxdydz=$$

$$-\frac{\partial\rho}{\partial t}(dxdydz)\frac{\partial\rho}{\partial t}+\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right]=0 \quad \text{.....(6)}$$

Atau dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho V)=0 \quad \text{.....(7)}$$

II. Persamaan momentum



Gambar b.2 Pergerakan fluida, gaya pada sumbu x untuk menurunkan persamaan momentum (Anderson, 1995)

Hukum Newton 2 pada sumbu x dapat dirumuskan sebagai :

$$F_x = ma_x \quad \text{.....(7)}$$

Elemen fluida yang bergerak dapat dirumuskan sebagai berikut :

Net surface force arah x

$$
\begin{aligned}
&= \left[p - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) \right] dydz \\
&+ \left[\left(\tau_{xx} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) - \tau_{xx} \right] dydz \\
&+ \left[\left(\tau_{yx} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) - \tau_{yx} \right] dxdz \\
&+ \left[\left(\tau_{zx} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) - \tau_{zx} \right] dxdy
\end{aligned}
\quad . \qquad (8)
$$

Total gaya yang bekerja pada sumbu x menjadi :

$$F_x = \left[-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] dxdydz + \rho f_x dxdydz \quad \text{.....(9)}$$

Massa dari elemen fluida akan sama dengan :

$$m = \rho dxdydz \quad \text{.....(10)}$$

Percepatan didapatkan dari perubahan kecepatan terhadap waktu

$$a_x = \frac{Du}{Dt} \quad \text{.....(11)}$$

Menggabungkan persamaan 7, 9 dan 11, maka akan didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad \text{.....(12a)}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad \text{.....(12b)}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad \text{.....(12.c)}$$

Persamaan Navier-Stokes dapat dituliskan dalam bentuk turunan, sehingga didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho V \cdot \nabla u \quad \text{.....(13)}$$

Atau juga dapat disusun menjadi

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = \rho \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad \text{.....(14)}$$

Jika ditambahkan vektor menjadi :

$$\nabla \cdot (\rho u V) = u \nabla \cdot (\rho V) - (\rho V) \cdot \nabla u$$

$$\rho V \cdot \nabla u = \nabla \cdot (\rho u V) - u \nabla \cdot (\rho V) \quad \text{.....(15)}$$

Substitusikan persamaan 13, 14, 15 didapatkan

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \frac{\partial p}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - u \left[\frac{\partial p}{\partial t} - u \nabla \cdot (\rho V) \right] + \nabla \cdot (\rho u V) \quad \text{.....(16)}$$

Dapat disederhanakan menjadi

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) \quad \text{.....(17)}$$

Substitusikan persamaan 12 dan 17, didapatkan

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad \text{....(18a)}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad \text{....(18b)}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f z \quad \text{...(18c)}$$

Berdasarkan penemuan yang didapatkan oleh Stokes tahun 1845 yaitu :

$$\tau_{xx} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{.....(19a)}$$

$$\tau_{yy} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \text{.....(19b)}$$

$$\tau_{zz} = \lambda(\nabla \cdot V) + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{.....(19c)}$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu\left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right] \quad \text{.....(19d)}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu\left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right] \quad \text{.....(19e)}$$

$$\tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right] \quad \text{.....(19f)}$$

Jika μadalah viskositas molekular dan λ adalah koefisien viskositas kedua, Stokes menjabarkan bahwa :

$$\lambda = -\frac{2}{3}\mu \quad \text{.....(20)}$$

Substitusi persamaan 18 dan 19 didapatkan persamaan konservasi momentum yaitu :

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\nabla \cdot V + 2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad \text{.....(21a)}$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)\right] \quad \text{.....(21b)}$$

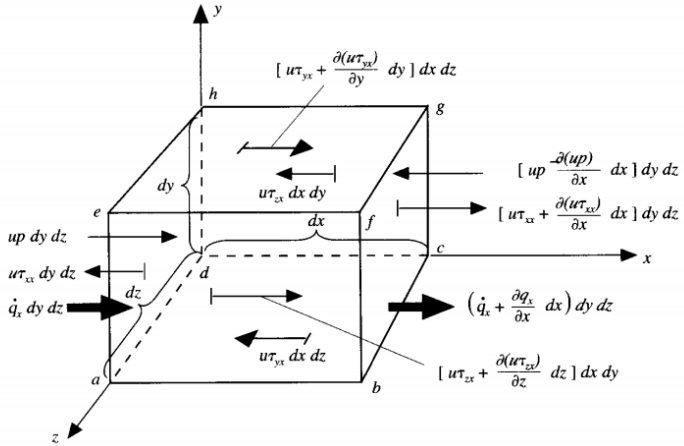
$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\nabla \cdot V + 2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)\right] + \rho f_y$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z}=$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)\right] \qquad \text{.....(21c)}$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\nabla\cdot V+2\mu\frac{\partial w}{\partial z}\right)+\rho f_z$$

III. Persamaan energi



Gambar b.3 Energi flux pada elemen fluida yang bergerak (Anderson,1995)

Prinsip dari konservasi energi Perubahan energi (A) = Flux heat elemen(B) + Gaya (C) atau dapat ditulis menjadi :

$A=B+C$ .....(22)

Gaya yang bekerja karena *body* adalah

$V=\rho f\cdot V(dxdydz)$.....(23)

Gaya yang bekerja oleh tekanan pada sumbu x adalah :

$$\left[up-\left(up+\frac{\partial(up)}{\partial x}dx\right)\right]dydz=-\frac{\partial(up)}{\partial x}dxdydz \text{.....(24)}$$

Hampir mirip, gaya yang bekerja oleh tegangan dan reganagan permukaan pada sumbu x adalah :

$$\left[\left(u\tau_{yx}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}\right)-u\tau_{yx}\right]dxdz=\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}\,dxdydz \quad \text{.....(25)}$$

Gaya yang bekerja pada elemen yang bergerak dalam fluida adalah

$$\left[-\frac{\partial(up)}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}\right]dxdydz$$

.....(26)

C dapat dirumuskan seperti persamaan berikut

$$C=-\left[\begin{array}{l}\left(\dfrac{\partial(up)}{\partial x}+\dfrac{\partial(vp)}{\partial y}\right.\\ \left.+\dfrac{\partial(wp)}{\partial z}\right)\\ +\dfrac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x}+\dfrac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}\\ +\dfrac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}+\dfrac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x}\\ +\dfrac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y}+\dfrac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z}\\ +\dfrac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x}+\dfrac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y}\\ +\dfrac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z}\end{array}\right]dxdydz+\rho f\cdot Vdxdydz \quad \text{.....(27)}$$

Penambahan perubahan panas per satuan massa

$$\textit{Volumetric heating of element}=\rho\dot{q}\,dxdydz \quad \text{.....(28)}$$

Perpindahan panas pada sumbu x karena konduksi panas adalah :

$$\left[\dot{q}_x-\left(\dot{q}_x+\frac{\partial\dot{q}_x}{\partial x}\right)\right]dydz=-\frac{\partial\dot{q}}{\partial x}\,dxdydz \quad \text{.....(29)}$$

$$\textit{Heating of fluid element by conduction} = -\left(\begin{array}{l} \dfrac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} \\ + \dfrac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} \\ + \dfrac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \end{array} \right) dxdydz$$

...(30)

B adalah penjumlahan dari persamaan 29 dan 30, dapat ditulis :

$$B = \left[\rho \dot{q} - \left(\frac{\partial \dot{q}_x}{\partial x} + \frac{\partial \dot{q}_y}{\partial y} + \frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right] dxdydz \text{.....(31)}$$

Berdasarkan hukum Fourier tentang konduksi panas persamaan 31 dapat ditulis ulang menjadi

$$B = \left[\rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dxdydz \text{..(32)}$$

Dengan mempertimbangkan A sebagai energi total, didapatkan persamaan berikut :

$$A = \rho \frac{D}{Dt}\left(e + \frac{V^2}{2} \right) dxdydz \text{.....(33)}$$

Bentuk akhir dari persamaan energi adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt}\left(e + \frac{V^2}{2} \right) &= \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y}\left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} + \frac{\partial (vp)}{\partial y} + \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial (u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} \\ &+ \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot V \end{aligned} \quad \text{.....(34)}$$

Dengan memepertimbangkan energi internal, persamaan 34 dapat ditulis kembali sebagai berikut :

$$\rho \frac{D(u^2/2)}{Dt} = -u\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho u f_x \quad \text{.....(35)}$$

$$\rho \frac{D(v^2/2)}{Dt} = -v\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho v f_y \quad \text{.....(36)}$$

$$\rho \frac{D(w^2/2)}{Dt} = -w\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho w f_z \quad \text{.....(37)}$$

Menjumlahkan persamaan 25, 36 dan 37 dean $u^2+v^2+w^2 = V^2$ kemudian dikurangi dengan persamaan 34 didapatkan persamaan baru yaitu :

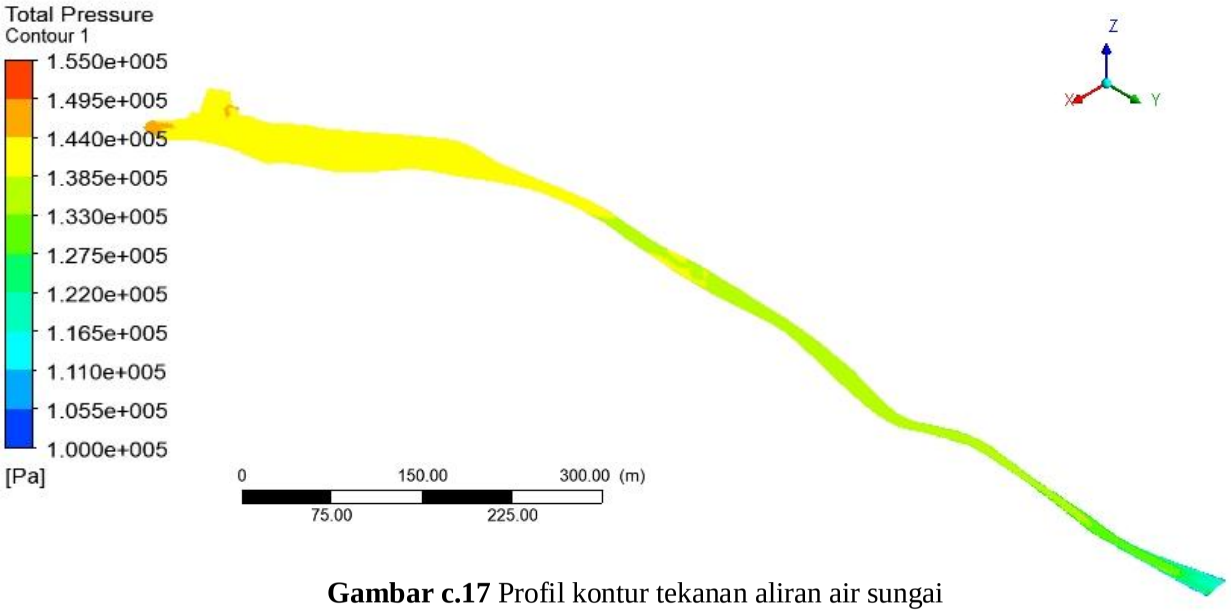
$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho\dot{q} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)$$

$$- p\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) + \tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x} \quad \text{...(38)}$$

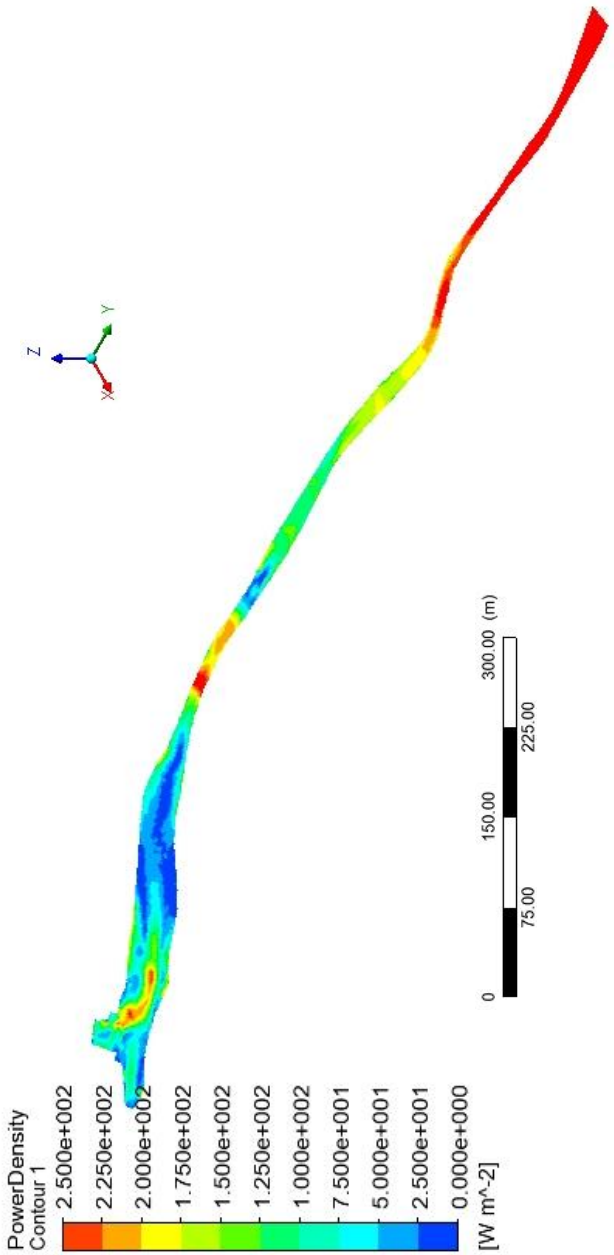
$$+ \tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z}$$

Halaman ini sengaja dikosongkan

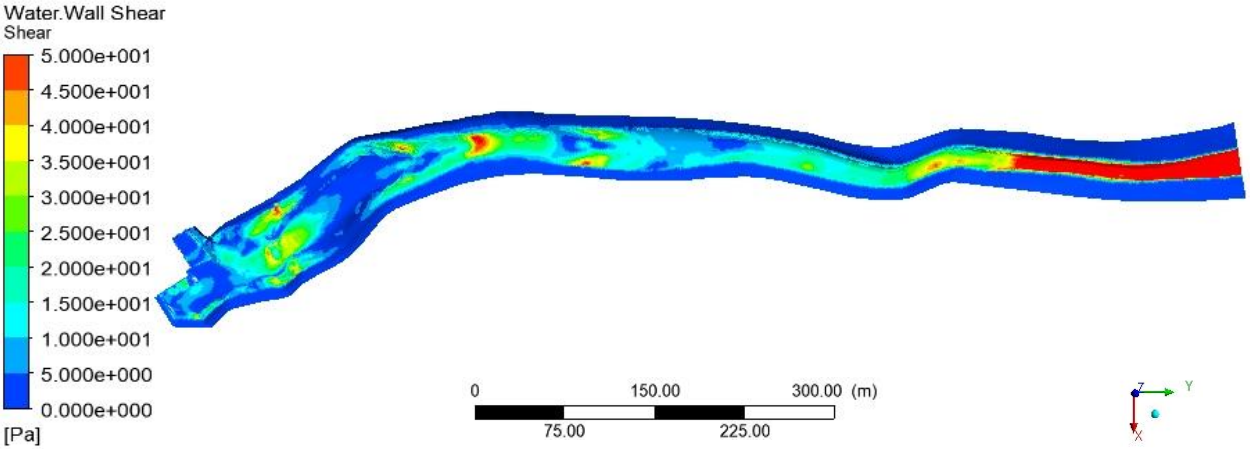
LAMPIRAN C



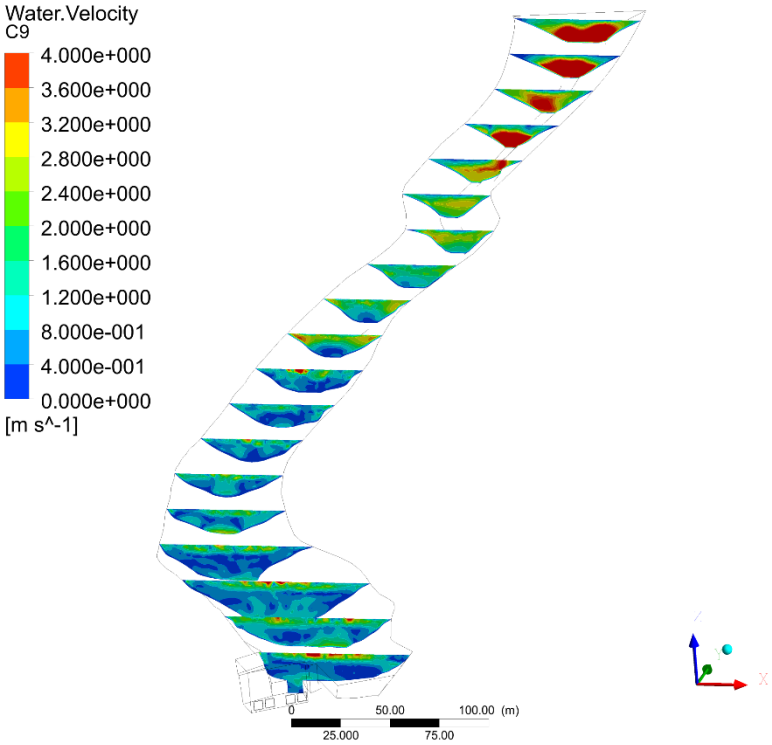
Gambar c.17 Profil kontur tekanan aliran air sungai Balambano



Gambar c.2 Profil kontur power density aliran air sungai Balambano



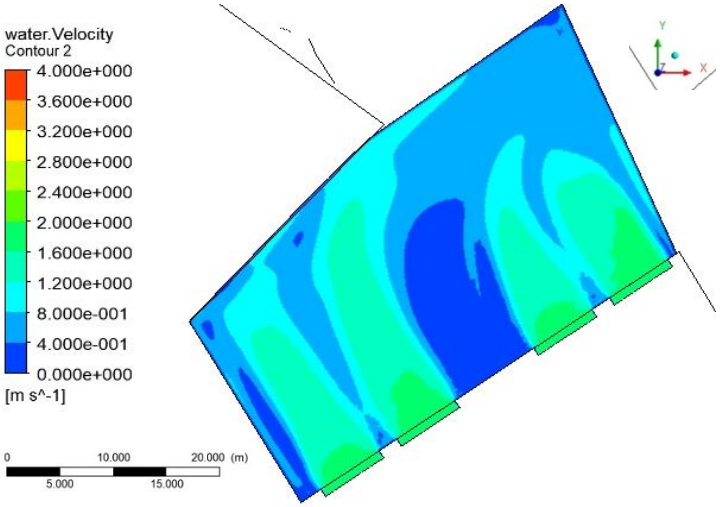
Gambar c.3 Profil kontur *shear force* penampang sungai Balambano pada kondisi normal 110 m^3/s



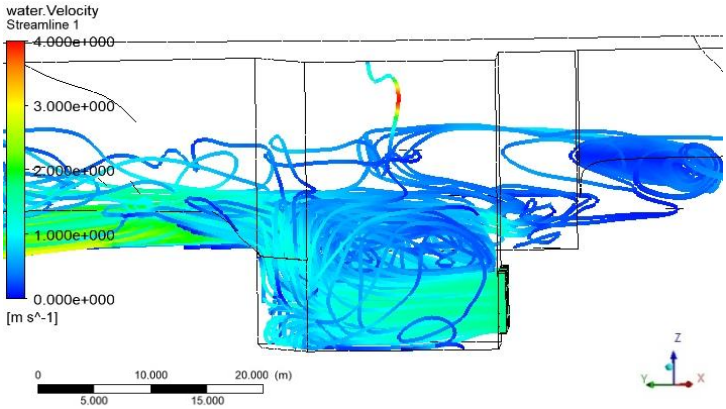
Gambar c.4 Perubahan kontur kecepatan terhadap jarak dari *outlet draft tube*

LAMPIRAN D

1. Variasi 90^{o}

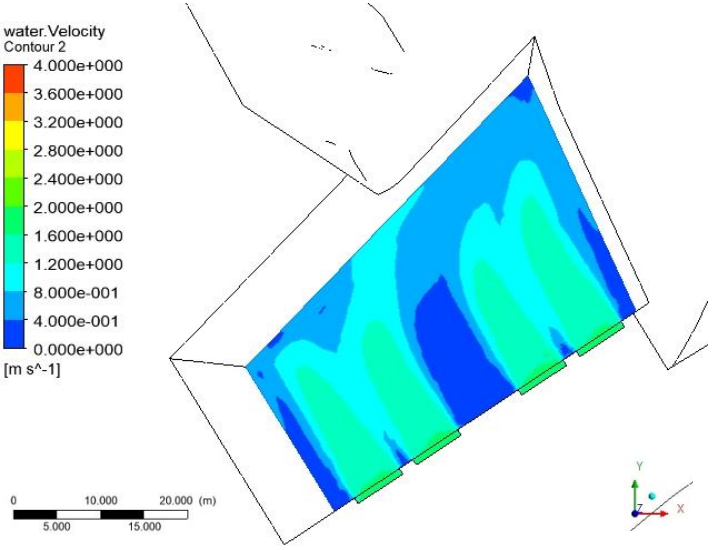


Gambar d.1 Kontur kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 90^{o}

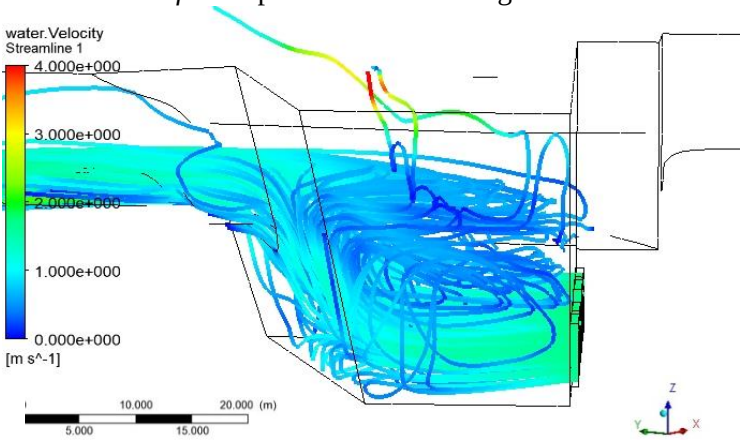


Gambar d.2 *Streamline* kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 90^{o}

2. Variasi 105º

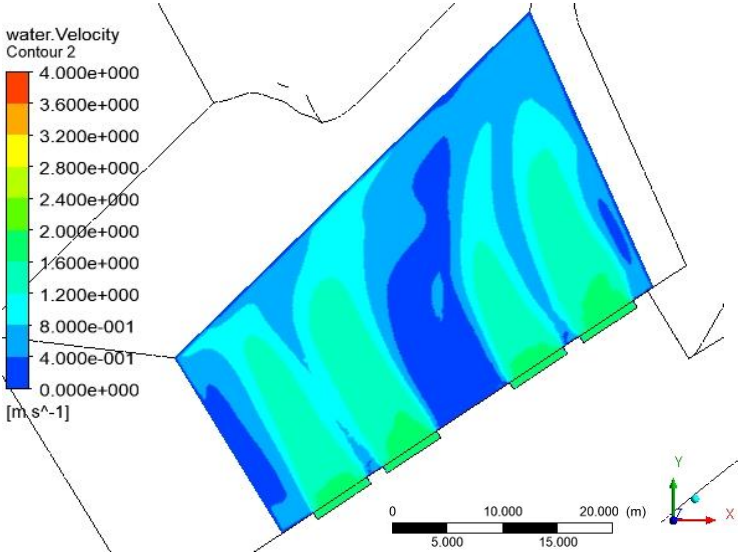


Gambar d.3 Kontur kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 105º

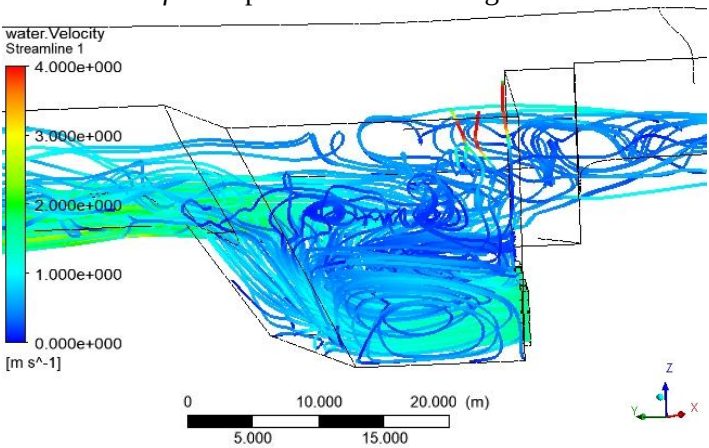


Gambar d.4 *Streamline* kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 105º

3. Variasi 120º



Gambar d.5 Kontur kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 120º



Gambar d.6 *Streamline* kecepatan aliran di daerah sekitar *outlet draft tube* pada variasi kemiringan 120º

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Nama penulis adalah Iqbal Lucky Eptanto, biasa dipanggil Iqbal, lahir di Kabupaten Bondowoso pada 7 Juli 1995. Penulis adalah anak pertama dari pasangan Sudaryanto dan Nisfatin. Penulis menempuh pendidikan di SDN Kotakulon 1 Bondowoso (2002 – 2008), SMPN 1 Bondowoso (2008 – 2011), dan SMAN 1 Jember (2011 – 2014). Penulis menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama berkuliah, penulis fokus mengambil bidang minat instrumentasi dan kontrol, dan energi terbarukan. Selama menjadi mahasiswa penulis aktif sebagai pengurus di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika selama dua periode, yaitu periode 2015-2016 sebagai staff Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa dan periode 2016-2017 sebagai Kepala Departemen Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa. Selain itu, penulis juga aktif sebagai wartawan di ITS media sejak 2016 hingga 2018. Pada bulan Juli-Agustus 2017 penulis melakukan intership program di divisi *Engineering*, departemen *Control and Instrumentation*, PT Indonesia Power UP Bali. Penulis mengambil topik mengenai kalibrasi instrumen pada *wastegate* dan *combustion chamber* diesel *engine.* Pada bulan Juni 2018 penulis telah menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Analisis Potensi Hidrokinetik dan Pengurangan Efek Penggerusan pada Tailrace Turbin Generator PLTA Balambano PT. Vale Indonesia dengan Menggunakan *Computational Fluid Dynamics*".

Penulis dapat dihubungi melalui *e-mail*
iqbal.lucky7@gmail.com