



SKRIPSI - ME 141501

**ANALISIS LAJU EROSI PIPA *DISCHARGE SLURRY* JENIS HDPE
PADA KAPAL KERUK ISAP (*CUTTER SUCTION DREDGER*)
YANG BEROPERASI DI *CANAL WATER INTAKE* PLTGU GRATI
MENGUNAKAN SIMULASI CFD**

**BAHRUL ILMI
NRP. 0421144000082**

**Dosen Pembimbing
Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



SKRIPSI - ME 141501

**ANALISIS LAJU EROSI PIPA *DISCHARGE SLURRY* JENIS
HDPE PADA KAPAL KERUK ISAP (*CUTTER SUCTION
DREDGER*) YANG BEROPERASI DI *CANAL WATER INTAKE*
PLTGU GRATI MENGGUNAKAN SIMULASI CFD**

**BAHRUL ILMU
NRP. 0421144000082**

**Dosen Pembimbing
Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil**

**Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



BACHELOR THESIS - ME 141501

**ANALYSIS OF EROSION RATE ON DISCHARGE SLURRY
HDPE PIPE CUTTER SUCTION DREDGER IN CANAL WATER
INTAKE PLTGU GRATI USING CFD SIMULATION**

**BAHRUL ILMI
NRP. 0421144000082**

**Supervisor
Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil**

**Departement of Marine Engineering
Faculty of Marine Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS LAJU EROSI PIPA *DISCHARGE SLURRY* JENIS HDPE PADA
KAPAL KERUK ISAP (*CUTTER SUCTION DREDGER*) YANG BEROPERASI
DI *CANAL WATER INTAKE* PLTGU GRATI MENGGUNAKAN SIMULASI
CFD**

SKRIPSI

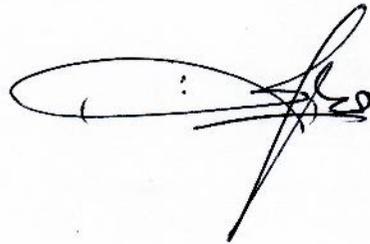
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi *Marine Machinery and System* (MMS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh

BAHRUL ILMI
NRP. 04211440000082

Disetujui oleh Pembimbing Skripsi:

Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil
NIP. 196809281991021001



SURABAYA
JULI 2018

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS LAJU EROSI PIPA *DISCHARGE SLURRY* JENIS HDPE PADA KAPAL KERUK ISAP (*CUTTER SUCTION DREDGER*) YANG BEROPERASI DI *CANAL WATER INTAKE* PLTGU GRATI MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

SKRIPSI

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi *Marine Machinery and System* (MMS)
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh

BAHRUL ILMI

NRP. 04211440000082

Disetujui oleh:

Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



Dr. Eng. M. Bahrus Zaman, ST., MT.

NIP. 19770802 2008 01 1007

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALISIS LAJU EROSI PIPA *DISCHARGE SLURRY* JENIS HDPE PADA KAPAL KERUK ISAP (*CUTTER SUCTION DREDGER*) YANG BEROPERASI DI *CANAL WATER INTAKE* PLTGU GRATI MENGGUNAKAN SIMULASI CFD

Nama : Bahrul Ilmi
NRP : 0421144000082
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan
Dosen Pembimbing : Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil.

ABSTRAK

Pengerukan pada *canal water intake* PLTGU Grati merupakan upaya untuk menjaga kedalaman dari kanal yang berkurang akibat terjadinya sedimentasi. Proses pengerukan sendiri menggunakan *cutter suction dredger*. Untuk mendistribusikan *mud* atau *slurry* (campuran air dan pasir) hasil dari pengerukan ke area pembuangan (*dumping area*) pihak PLTGU Grati menggunakan HDPE (*high density polyethylene*), sebagai material pipa. Pipa HDPE tidak mengalami keausan akibat korosi melainkan erosi. Erosi didefinisikan sebagai kerugian atau hilangnya material yang diakibatkan oleh partikel padat (pasir) dalam aliran multi fase yang bergesekan atau bertubrukan dengan permukaan dinding material. Keausan akibat erosi sendiri diakui sebagai salah satu masalah yang dialami beberapa industri yang mendistribusikan *slurry* dalam prosesnya. Tugas akhir ini menganalisis dan memprediksi laju erosi yang terjadi pada pipa HDPE yang dialiri *slurry* dari hasil pengerukan sedimentasi di PLTGU Grati menggunakan metode CFD (*computational fluid dynamic*). Akan dilakukan beberapa variasi berupa konsentrasi *slurry*, sudut belok pada pipa, besar diameter partikel dan juga kecepatan dari *slurry* untuk mengetahui pengaruhnya terhadap laju erosi yang terjadi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi *slurry*, sudut belok pada pipa, besar diameter partikel dan juga kecepatan dari *slurry* berbanding lurus dengan laju erosi yang pada pipa HDPE.

Kata kunci: Laju erosi, *cutter suction dredger*, HDPE, CFD, *slurry*, multi fase

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

ANALYSIS OF EROSION RATE ON DISCHARGE SLURRY HDPE PIPE CUTTER SUCTION DREDGER IN CANAL WATER INTAKE PLTGU GRATI USING CFD SIMULATION

Student Name : Bahrul Ilmi
NRP : 0421144000082
Departement : Marine Engineering
Supervisor : Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil.

ABSTRACK

The dredging of the canal water intake at PLTGU Grati is an process to maintain the depth of the reduced canal due to sedimentation. The dredging process itself uses a cutter suction dredger. To distribute mud or slurry (mixture of water and sand) result of dredging to dumping area of PLTGU Grati using HDPE (high density polyethylene), as pipe material, hence pipe not wear due to corrosion but erosion. Basicly, erosion is caused by impact of solid particle (sand) which is suspended inflow (multiphase) on a solid wall boundary. Wear caused by erosion itself is recognized as one of the problems in some industries that distribute slurry in their process. This bachelor thesis analyzes and predicts the rate of erosion occurring in HDPE pipes that are transported slurry from the sedimentation dredging in PLTGU Grati using CFD (computational fluid dynamic) method. Variations of slurry concentration, impact angel, particle diameter and velocity of the slurry will be performed to determine the effect on the rate of erosion. The results of this bachelor thesis showed that the concentration of slurry, impact angel, diameter of particle and the concentration of the slurry were directly proportional to the rate of erosion on the HDPE pipe.

Keyword: erosion rate, cutter suction dredger, HDPE, CFD, slurry, multithphase flow

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya penulis mampu menyelesaikan skripsi dengan judul “**Analisis Laju Erosi Pipa Discharge Slurry Jenis Hdpe Pada Kapal Keruk Isap (Cutter Suction Dredger) yang Beroperasi di Canal Water Intake PLTGU Grati Menggunakan Simulasi CFD**”. Laporan ini disusun untuk memenuhi mata kuliah skripsi Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.

Dalam proses penyusunan dan pengerjaan skripsi ini, penulis mendapat bantuan dan dukungan yang sangat berarti dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih khususnya kepada:

1. Orang tua dan Saudara yang telah memberikan dukungan berupa materiil, dorongan moril, serta dukungan setiap waktu kepada penulis.
2. Dr. Eng. M. Badruz Zaman, ST., MT. selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
3. Ir. Agoes Santoso, M.Sc. M.Phil selaku dosen pembimbing yang telah memberikan masukan dan pengetahuan kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini.
4. Ir. Tony Bambang Musriyadi, PGD, MMT selaku dosen wali yang selama penulis melaksanakan proses studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan selalu memberikan dukungan dan bimbingan kepada penulis.
5. Bapak Jamari selaku *Engineer* PT Banter Prima Sentosa yang telah memberikan data kepada penulis untuk menyelesaikan penelitian ini.
6. Teman-teman angkatan MERCUSUAR 14 sebagai keluarga sekaligus teman penulis selama menempuh pendidikan di Surabaya.
7. Rekan – rekan di *Marine Machinery and System laboratory* (MMS) yang saling menjaga semangat untuk menyelesaikan skripsi bersama-sama.
8. Teman-teman indekos (KG87) dan ITS REA-REO 14 yang telah menemani penulis dalam menempuh studi di Surabaya.
9. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih atas segala dukungan dan bantuan yang diberikan kepada penulis.

Dalam penulisan skripsi ini penulis menyadari bahwa laporan yang dikerjakan jauh dari kesempurnaan. Sehingga dibutuhkan kritik dan saran yang membangun bagi penulis. Besar harapan penulis, bahwasannya skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis secara khusus, pembaca, serta nusa dan bangsa.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	v
LEMBAR PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	ix
ABSTRACK.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat.....	3
BAB II.....	5
2.1 Laju Erosi.....	5
2.2 Aliran Multi Fase (<i>Multi Phase Flow</i>).....	6
2.2.1 <i>Lagrangian Discrete Phase Model</i>	7
2.2.2 <i>Discrete Element Method</i>	8
2.2.3 <i>Euler-Euler Approach</i>	9
2.2.4 <i>VOF (Volume of Fluid) Multiphase Model</i>	10
2.3 Aliran <i>Slurry</i>	10
2.3.1 Pengendapan Partikel dalam <i>Slurry</i>	13
2.3.2 Erosi <i>Slurry</i>	15
2.4 Kapal Keruk Isap (<i>Cutter Suction Dredger</i>).....	16
2.5 Pompa <i>Slurry</i>	17
2.6 <i>Canal Water Intake</i>	19
2.7 <i>High Density Polyethylene (HDPE)</i>	19
2.8 <i>Computational Fluyd Dynamic (CFD)</i>	20
2.8.1 <i>Pre-processing</i>	21
2.8.2 <i>Processing</i>	22
2.8.3 <i>Post Processing</i>	22
2.8.4 <i>Erosion Fluid Dynamics Modeling ANSYS Fluent</i>	22
BAB III.....	25
3.1 Umum.....	25
3.2 Flow chart.....	25
3.3 Langkah Pelaksanaan.....	26
3.3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	26
3.3.2 Studi Literatur.....	26

3.3.3	Pengumpulan Data	26
3.3.4	Pemodelan Tiga Dimensi Pipa	26
3.3.5	Simulasi Menggunakan CFD	27
3.3.6	Analisis Data	27
3.3.7	Kesimpulan dan Saran.....	27
BAB IV		29
4.1	Umum.....	29
4.2	Pengumpulan Data	29
4.2.1	<i>Canal Water Intake</i> PLTGU Grati	29
4.2.2	Kapal Keruk Isap (<i>Cutter Suction Dredger</i>).....	31
4.2.3	Pompa Keruk (<i>Dredge Pump</i>).....	31
4.2.4	Pipa HDPE (<i>High Density Polyethylene</i>)	34
4.2	Menghitung <i>Limiting Settling Velocity</i>	34
4.3	Menghitung Laju Aliran Massa Pasir Pada <i>Slurry</i>	36
4.4	Proses Simulasi.....	37
4.4.1	<i>Pre-Processing</i> (Pembuatan Geometri dan <i>Meshing</i>)	37
4.4.2	<i>Processing</i>	38
4.4.3	Post Prosesor	39
4.5	Laju Erosi Terhadap Variasi <i>Slurry</i> dan Sudut Belok	40
4.6	Laju Erosi Terhadap Variasi Diameter Pasir pada <i>Slurry</i>	44
4.7	Laju erosi Terhadap Variasi Kecepatan <i>Slurry</i>	45
BAB V		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....		49
LAMPIRAN		51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Transfer panas-massa dan momentum antara fase diskrit dan kontinu (ANSYS, ANSYS Help Viewer version 18.0, 2018).....	8
Gambar 2. 2 Interaksi antar partikel (ANSYS, ANSYS Help Viewer version 18.0, 2018).....	9
Gambar 2. 3 Grafik durand's limiting settling velocity	14
Gambar 2. 4 Durand's limiting settling velocity diagram	15
Gambar 2. 5 Cutter suction dredger	16
Gambar 2. 6 Bentuk sudu impeller (WARMAN, 2002)	18
Gambar 2. 7 Bentuk casing pompa (WARMAN, 2002)	18
Gambar 2. 8 Pipa HDPE digunakan untuk saluran discharge slurry kapal keruk CSD	19
Gambar 2. 9 Flowchart proses CFD.....	21
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian.....	25
Gambar 4. 1 Canal water inake PLTGU grati	29
Gambar 4. 2 Ilustrasi proses pembuangan slurry menuju dumping area.....	30
Gambar 4. 3 Pipa discharge apung yang terpasang canal water intake PLTGU Grati.....	30
Gambar 4. 4 Rencana umum cutter suction dredgr type Optima	31
Gambar 4. 5 Sunbo Pump 250G-SG	32
Gambar 4. 6 Kondisi (a) clear water (b) slurry/mud	32
Gambar 4. 7 Pemodelan tiga dimensi pipa.....	37
Gambar 4. 8 Detail meshing pipa dengan sudut belok 60°.....	38
Gambar 4. 9 Proses iterasi.....	39
Gambar 4. 10 Grafik niali Cv terhadap laju erosi	43
Gambar 4. 11 Sudut belok pipa terhadap laju erosi.....	43
Gambar 4. 12 Kontur laju erosi pada empat macam variasi pasir	44
Gambar 4. 13 Grrafik laju erosi terhadapa ukuran pasir	45
Gambar 4. 14 Kontur laju erosi pada empat simulasi kecepatan berbeda.....	45
Gambar 4. 15 Grafik laju erosi terhadap kecelaptan slurry	46

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbedaan tipe keausan akibat partikel pasir.....	5
Tabel 2. 2 Parameter yang berpengaruh terhadap laju erosi	6
Tabel 2. 3 Ukuran pasir (ISO 14688-1).....	11
Tabel 2. 4 Definisi dan ilustrasi non-setling slurry	12
Tabel 2. 5 Definisi dan ilustrasi jenis- jenis setling slurry	12
Tabel 2. 6 Varaibel-variabel yang mempengaruhi erosi slurry	16
Tabel 4. 1 Spesifikasi cutter suction dredger Optima.....	31
Tabel 4. 2 Spesifikasi Pompa Keruk	32
Tabel 4. 3 Pengukuran debit pada discharge untuk air (clear water).....	33
Tabel 4. 4 Pengukuran debit pada discharge untuk slurry	33
Tabel 4. 5 Data interpolasi performa pompa.....	33
Tabel 4. 6 Spesifikasi pipa HDPE	34
Tabel 4. 7 Nilai limitting settling velocity pada empat variasi diameter pasir	35
Tabel 4. 8 Laju aliran massa pasir dalam slurry	36
Tabel 4. 9 Spesifikasi meshing pipa dengan sudut belok 90°.....	38
Tabel 4. 10 Parameter dalam simulasi.....	38
Tabel 4. 11 Kontur nilai laju erosi pada pipa dengan sudut belok 90°	40
Tabel 4. 12 Niali laju erosi maksimal pada pada masing-masing sudut belok.....	41
Tabel 4. 13 Nilai laju erosi maksimal pada empat variasi ukuran pasir	44
Tabel 4. 14 Nilai laju erosi masimal pada empat variasi kecepatan slurry	46

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh damerianne (2013) terjadi laju sedimentasi pada *canal water intake* di PLTGU Grati sebesar 43,714.53 m³ dalam enam bulan. Hasil tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Atikasari (2015) yang menyatakan bahwa laju sedimentasi *canal water inake* di PLTGU Grati adalah sebesar 88.509,82 m³ per tahun. Hal inilah yang menjadikan dibutuhkan proses pengerukan untuk memelihara kedalaman pada *canal water intake*.

Secara teknis pengerukan adalah proses memindahkan sedimen di bawah air untuk tujuan pemeliharaan saluran sungai, danau, waduk, *canal water intake*, serta jalur laut di dermaga atau untuk keperluan penambangan (Mahendra, 2014). Pengerukan pada masa ini sudah sangat berkembang baik secara proses pelaksanaan dan metode yang digunakan. Untuk melakukan kegiatan pengerukan sedimen di bawah air memerlukan bantuan kapal keruk. Kapal keruk memiliki berbagai jenis antara lain, kapal keruk timba, kapal keruk cakram, kapal keruk penggali, kapal keruk isap (*cutter suction dredger*), dan kapal keruk *hopper* isap.

Kapal keruk isap (*cutter suction dredger*) merupakan salah satu jenis kapal keruk. Sistem kerja dari *cutter suction dredger* yaitu dengan menghisap material dari dasar air yang telah digerus oleh *cutter head* yang berputar setelah itu sedimen yang telah tergerus oleh *cutter head* akan dipompa menggunakan pompa sentrifugal menuju tempat pembuangan atau penampungan sedimen yang akan didistribusikan melalui pipa.

Akibat dari pendistribusian campuran sedimen dengan air (*slurry*) menimbulkan erosi pada sisi dalam pipa *discharge* yang berjenis HDPE (*High-density polyethylene*). Erosi sendiri adalah hilangnya material akibat hantaman atau tubrukan dari partikel terhadap suatu permukaan material (DNV, 2007). Oleh karena itu perlu diperhatikan laju erosi untuk memprediksi umur dari pipa *discharge*. Selain itu perlu juga diadakan kajian terhadap instalasi pada pipa *discharge* yang dipasang secara berbelok terhadap laju erosi. Sehingga dapat meminimalkan kerusakan pipa *discharge* untuk menghemat biaya yang disebabkan pergantian.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis mengenai laju erosi yang terjadi pada pipa *discharge* jenis HDPE kapal keruk isap (*cutter suction dredger*) menggunakan simulasi computational fluid dynamics (CFD).

Computational fluid dynamics (CFD) adalah sekumpulan metodologi yang menggunakan komputer untuk melakukan simulasi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena aliran lainnya dengan memecahkan persamaan *Navier-Stokes* secara numerik. Dan salah satu fenomena yang dapat disimulasikan dengan metode ini yaitu memprediksi laju erosi. Meskipun pemodelan erosi

melalui CFD telah dilakukan selama bertahun-tahun, masih ada kebutuhan pengetahuan yang lebih mendalam tentang model dan metode yang tersedia.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat ditarik perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana laju erosi yang terjadi pada pipa discharge slurry kapal keruk (*cutter suction dredger*) jenis HDPE yang beroperasi di *canal water intake* PLTGU Grati?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi pasir pada *slurry* terhadap aju erosi pada pipa discharge slurry kapal keruk isap jenis HDPE di *canal water intake* PLTGU Grati?
3. Bagaimana pengaruh besar partikel pasir, kecepatan aliran *slurry*, dan sudut belok pipa terhadap laju erosi pada pipa discharge slurry kapal keruk isap jenis HDPE di *canal water intake* PLTGU Grati?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dibuat agar lingkup penelitian dalam tugas akhir ini lebih fokus, yaitu:

1. *Slurry* yang dianalisis yaitu campuran pasir dan air, dengan konsentrasi berat (C_w) dari partikel pasir sebesar 0%, 20%, 40%, 60%, 80%.
2. Menggunakan empat variasi ukuran diameter pasir yaitu 0,05 mm, 0,08 mm, 0,1 mm, dan 0,14 mm.
3. Simulasi akan dilakukan pada titik belokan 15°, 30°, 45°, 60° dan 90° dengan radius 5 meter pada pipa.
4. Simulasi menggunakan *computational fluid dynamic* (CFD) dengan *software* ANSYS.
5. Fase padat dan cair pada *slurry* diasumsikan memiliki kecepatan yang sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui laju erosi yang terjadi pada pipa discharge slurry kapal keruk (*cutter suction dredger*) jenis HDPE yang beroperasi di *canal water intake* PLTGU Grati?
2. Mengetahui pengaruh konsentrasi pasir dalam *slurry* terhadap aju erosi pada pipa discharge slurry kapal keruk isap jenis HDPE di *canal water intake* PLTGU Grati?
3. Mengetahui pengaruh besar partikel pasir, kecepatan aliran *slurry*, dan sudut belok pipa terhadap laju erosi pada pipa discharge slurry kapal keruk isap jenis HDPE di *canal water intake* PLTGU Grati?

1.5 Manfaat

Manfaat yang diperoleh dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menambah wawasan tentang laju erosi pada pipa HDPE akibat aliran *slurry* di dalamnya.
2. Mengetahui laju keausan dan umur pipa jenis HDPE yang digunakan untuk mengalirkan *slurry*.
3. Hasil dari penelitian dapat digunakan untuk acuan dalam instalasi pipa discharge jenis HDPE pada kapal keruk isap untuk meminimalkan laju erosi.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

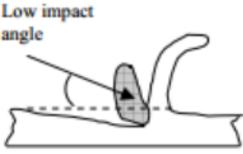
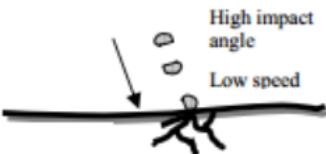
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

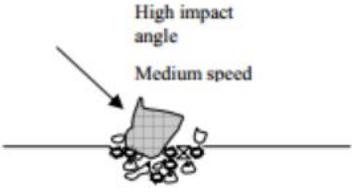
2.1 Laju Erosi

Erosi didefinisikan sebagai kerugian atau hilangnya material yang diakibatkan oleh partikel padat yang bergesekan atau bertubrukan dengan permukaan material (DNV, 2007). Secara umum erosi disebabkan oleh tubrukan dari partikel padat (*solid*) yang terdapat dalam aliran (*cair, gas, atau multi fase*) terhadap permukaan batas (*boundari*). Atau dalam bahasa lain bisa dideskripsikan dengan degradasi bertahap dari material yang diakibatkan oleh deformasi dan pengikisan yang berulang-ulang (Oka, Olmogi, Hosokawa, & Matsumura, 1997).

Dengan berbagai faktor yang mempengaruhi erosi akibat partikel padat (*solid*), berbagai jenis mekanisme keausan dapat terjadi. Sebelum masuk lebih dalam ke jenis keausan yang relevan untuk penelitian ini, daftar beberapa mekanisme keausan yang relevan dari dampak partikel tercantum dalam Tabel 2.1 (Meng & Ludena, 1995).

Tabel 2. 1 Perbedaan tipe keausan akibat partikel pasir (Meng & Ludena, 1995)

Mekanisme erosi	Definisi	Ilustrasi
<i>Abrasive erosion</i>	Partikel menghantam dinding pada sudut yang rendah dan material akan terdegradasi/terkikis. Partikel meluncur melalui permukaan.	
<i>Fatigue wear</i>	Partikel menghantam permukaan pada kecepatan yang rendah, namun dengan sudut yang besar dari permukaan. Permukaan material tidak berubah secara plastis, namun material akan semakin melemah akibat <i>fatigue</i> . Setelah benturan yang berulang-ulang, akan muncul retak pada material dan terkikis dari permukaan setelah beberapa kali benturan	

<i>Brittle fracture</i> (fraktur getas)	Erosi oleh fraktur getas terjadi akibat partikel menabrak dinding dengan kecepatan sedang dan sudut benturan yang besar. Hal ini kemungkinan terjadi ketika partikel memiliki ujung yang tajam.	
<i>Saltation wear</i>	Terjadi akibat pendistribusian sedimen, dimana partikel bergerak maju sepanjang pipa dan terpental sepanjang dinding.	

Dari beberapa akibat dan efek dari laju erosi pada tabel 2.1. Jelas bahwa luas material yang hilang atau terkikis tergantung pada berbagai parameter seperti jenis partikel dan sifat material, kondisi aliran dan volume fraksi partikel di dalam aliran fluida. Hal ini tercantum dalam Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Parameter yang berpengaruh terhadap laju erosi (*Eltvik, 2013*)

Kondisi aliran	Sudut impak, viskositas relatif antara permukaan dan kecepatan, turbulensi, laju aliran masa partikel, kecepatan aliran, dan gaya kavitasi
Partikel	Ukuran, densitas, ketajaman dan konsentrasi partikel
Properti Material	Kekerasan, kekuatan, <i>coating</i> , keuletan material

Selama pendistribusian *slurry* dalam jumlah besar melalui pipa, partikel-partikel akan mengendap di dinding pipa bawah karena gaya gravitasi. Hal ini menciptakan gerakan partikel yang lebih lambat dari cairan di sepanjang pipa. Fenomena yang terjadi tersebut menyebabkan kerusakan pada pipa. Dan keausan ini dikenal sebagai *abrasive wear* dan merupakan penyebab utama dalam erosi *slurry*. Partikel-partikel yang tersisa di dasar pipa diasumsikan tersuspensi atau terangkat oleh efek turbulensi dan gaya angkat partikel. Efek ini menyebabkan partikel menimpa dinding pipa, dan efek erosi ini disebut erosi berbasis impak.

2.2 Aliran Multi Fase (*Multi Phase Flow*)

Aliran multi fase didefinisikan sebagai sebuah sistem aliran yang terdiri lebih dari satu fase contohnya seperti campuran dari gas, cairan, partikel padat, tetesan,

dan gelembung. Aliran multi fase dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis yaitu sebagai berikut:

1. Aliran cairan-cairan atau cairan-gas, yang termasuk kategori ini adalah aliran *slug*, aliran gelembung, dan aliran *droplet*.
2. Arilan padat-cair, yang termasuk kategori ini adalah aliran *slurry*, yaitu ketika partikel padat didistribusikan melalui cairan.
3. Aliran gas-padat, seperti contohnya aliran partikel *laden* yang partikelnya adalah aliran *dispersed* kontinu (aliran gas).
4. Aliran tiga fase, aliran ini dapat berupa kombinasi dari ketiga jenis aliran diatas. Seperti contohnya bisa jadi aliran cairan-gas-padat atau cairan-cairan-padat.

Ada berbagai jenis aliran cairan multi fase dalam literatur yang beragam sesuai dengan proses fisik dan sifatnya, dan dapat diklasifikasikan menjadi tiga bidang utama:

1. Aliran *dispersed* ditandai dengan distribusi fase yang seragam di kedua arah radial dan aksial. Contoh aliran tersebut adalah aliran gelembung dan kabut.
2. Aliran *separated* ditandai oleh distribusi fase tidak kontinu dalam arah radial dan distribusi fasa kontinu dalam arah aksial. Contoh aliran tersebut yaitu aliran bertingkat (*stratified*) dan *annular*.
3. Aliran intermiten (*intermitent flow*) ditandai dengan tidak kontinu secara aksial, dan karena menunjukkan perilaku yang tidak stabil. Contoh dari aliran seperti itu adalah gelembung yang memanjang, aliran *churn* dan *slug* (NFOFM, 2005).

Saat ini terdapat dua jenis pendekatan untuk perhitungan numerik aliran multifase. Dan akan dijelaskan dalam bab-bab berikut dan didasarkan pada deskripsi dibawah.

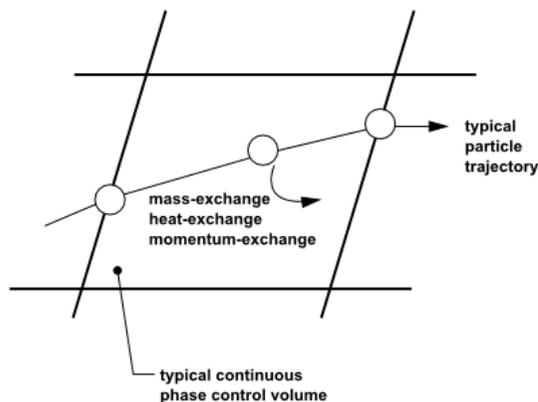
Metode *Lagrangian* dapat melacak posisi dan kecepatan sejumlah kecil partikel melalui aliran kontinu. Gerakan partikel didasarkan pada hukum newton. Keuntungan menggunakan metode *Lagrangian* adalah sangat berguna menggambarkan karakteristik partikel dalam aliran.

Sedangkan metode *Eulerian* mendeskripsikan kontrol terhadap volume atau domain aliran. Pada metode ini dimungkinkan untuk mendeskripsikan properti dari aliran pada setiap titik di ruang pada waktu yang bervariasi. Cara melihat gerakan aliran ini dengan memfokuskan pada lokasi spesifik di domain di mana cairan mengalir seiring waktu.

2.2.1 *Lagrangian Discrete Phase Model*

Lagrangian Discrete Phase Model (DPM) dalam ANSYS Fluent memakai pendekatan *Euler-Lagrange*. Sebagai aturan praktis, konsentrasi partikel harus kurang dari 10% dari volume agar pendekatan dalam model dapat berfungsi.

Fluida diperlakukan sebagai kontinum atau struktur yang dipecahkan menggunakan nilai rata-rata dari persamaan *Navier-Stokes*. Ketika fluida dipecahkan dengan benar menggunakan persamaan *Navier-Stokes* maka partikel-partikel dalam *slurry* akan terlacak dalam jumlah besar. Ketika menggunakan metode ini, partikel yang diangkut oleh cairan tidak akan mempengaruhi cairan dan volumenya, karena diabaikan. Oleh karena itu interaksi antar partikel juga dapat diabaikan (ANSYS, ANSYS Fluent Suport, 2015). Dengan fase kontinu yang tetap ini bisa juga disebut sebagai *one-way coupling* diantara fase. Meskipun dimungkinkan untuk memasukkan efek fase diskrit pada kontinum dan menjadi *two-way coupling* dalam fase. Pemecahan persamaan fase diskrit dan kontinum secara bergantian dilakukan sampai solusi pada kedua fase telah berhenti berubah.



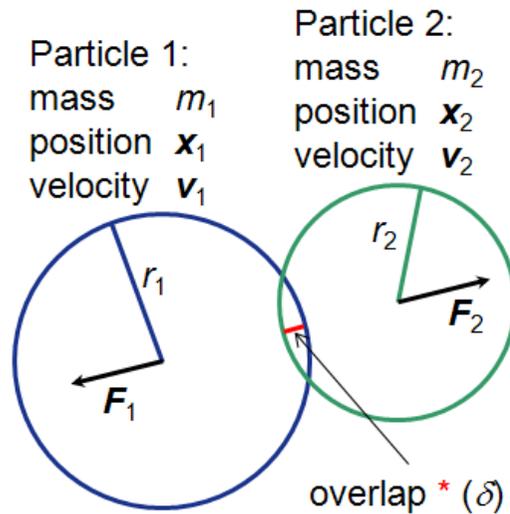
Gambar 2. 1 Transfer panas-massa dan momentum antara fase diskrit dan kuintinu (ANSYS, ANSYS Help Viewer version 18.0, 2018)

Di dalam *Fluent*, lintasan partikel dihitung secara individual pada interval tertentu selama perhitungan fase cair. Ketika mensimulasikan lintasan partikel, kondisi batas (*boundary*) perlu untuk diatur. Salah satu hal yang paling penting yaitu penentuan kondisi batas pada dinding yang menggambarkan benturan atau gesekan antara partikel dan dinding.

2.2.2 Discrete Element Method

Model *Discrete Element Methode* (DEM) didasarkan pada penelitian Cundal dan Strack (1979). Pada model ini menjelaskan gaya tabrakan yang dihasilkan antar partikel. Metode pada model ini didasarkan pada penggunaan skema numerik eksplisit dimana interaksi antar partikel dimonitor kontak perkontak, dan gerakan dimodelkan partikel per partikel. Metode *Discrete Element* cocok digunakan untuk mensimulasikan aliran granular, yang ditandai dengan tingginya jumlah partikel yang diangkut. DEM biasanya termasuk ke dalam simulasi di mana interaksi antar partikel diperhatikan.

Ketika dua partikel berinteraksi dan memantul satu sama lain, dapat dilihat seperti pada gambar 2.2 (ANSYS, ANSYS Help Viewer version 18.0, 2018).



* not to scale, greatly exaggerated

Gambar 2. 2 Interaksi antar partikel (ANSYS, ANSYS Help Viewer version 18.0, 2018)

Metode ini didasarkan pada konstanta pegas, k , dan ukurannya ketika partikel bersentuhan. Nilai k dapat diperkirakan dari persamaan berikut:

$$k = \frac{\pi v^2}{3\varepsilon_D^2} D\rho$$

Dimana:

- D = diameter partikel
- ρ = densitas partikel
- v = kecepatan relatif antar partikel yang berinteraksi
- ε_D = fraksi diameter *overlap* yang dibutuhkan

2.2.3 Euler-Euler Approach

Pada model ini pendekatan memungkinkan untuk memperlakukan masing-masing fase yang berbeda secara matematis sebagai *interpenetrating continua*. Didalam campuran, fase padat akan menempati volume, tidak seperti pendekatan *Langrangian*. Fraksi volume diasumsikan sebagai fungsi ruang dan waktu secara kontinu dan jumlahnya sama dengan satu. Persamaan konservasi untuk setiap fase diperoleh untuk mendapatkan satu set persamaan, yang memiliki struktur yang sama untuk semua fase.

Simulasi dikatakan sepenuhnya tergabung, karena fase yang berbeda berinteraksi satu sama lain, interaksi partikel-partikel terjadi dan partikel memiliki volume dalam aliran. Interaksi antar partikel, dan turbulensi yang mempengaruhi kecepatan di dekat dinding, memungkinkan partikel untuk menghantam dinding pada impact yang acak dan erosi karena partikel terjadi. Pola padatan yang berbeda dalam aliran dapat diamati tergantung pada sifat *slurry* dan kondisi aliran.

Untuk *dense slurry*, dengan konsentrasi partikel yang tinggi, simulasi CFD menggunakan pendekatan ini akan memberikan hasil terbaik dan memberikan hasil yang paling dapat diandalkan. Terdapat tiga model berbeda yang tersedia di ANSYS Fluent yaitu *Volume of Fluid (VOF) model*, *the Mixture Model* dan *Eulerian Model*.

2.2.4 VOF (Volume of Fluid) Multiphase Model

Volume of Fluid (VOF) adalah pendekatan yang simpel dan paling umum untuk memodelkan beberapa fluida yang tidak dapat bercampur. Fluida pada model ini persamaan momentum digunakan untuk menyelesaikan semua fase dan fraksi volume pada masing-masing fluida di setiap sel yang dilacak menggunakan komputasi dalam semua domain dan semua fase memiliki kecepatan, tekanan, dan temperatur yang sama. Volume fraksi pada setiap sel sama dengan nol jika tidak ada fluida di dalam sel. Namun volume fraksi akan senilai satu jika fluida penuh (sel yang ditempati).

2.3 Aliran Slurry

Slurry adalah campuran fase padat-cair dengan jumlah partikel padat yang banyak. *Slurry* terkadang dapat diklasifikasikan sebagai cairan yang memiliki kekentalan (viskositas) yang tinggi. Karena konsentrasi partikel tinggi, penting untuk memahami prinsip-prinsip fisik untuk jenis aliran ini dan juga untuk mengklasifikasikan *slurry*. Dengan konsentrasi partikel yang tinggi, fenomena keausan karena erosi akan terjadi. Erosi *slurry* adalah erosi mekanisme yang terjadi karena dinding bergesekan dengan aliran *slurry* melalui pipa yang dikombinasikan dengan dampak partikel yang acak.

Pentingnya pengklasifikasikan *slurry* yaitu untuk memberikan dasar dalam menggambarkan karakteristik fisik dan sifat aliran dari campuran fase padat dan cair. *Rheology* adalah ilmu studi tentang aliran, dan berlaku untuk zat dengan struktur yang kompleks seperti *slurry*. *Rheology* merupakan properti dimanis dari struktur mikro *slurry* dan dipengaruhi oleh berbagai sifat seperti bentuk, kepadatan, ukuran, fraksi masa partikel padat yang tersuspensi, densitas dan viskositas dari fase cairan itu sendiri (Roitto, 2014).

Pengklasifikasian aliran *slurry* juga sangat penting ketika mendesain instalasi pipa. Atribut yang paling sering digunakan untuk mengkarakterisasi suatu *slurry*

adalah sifat-sifat fisik dasar dari konstituen, khususnya dari padatan (Brown & Heywood, 1991), yaitu sebagai berikut:

1. Densitas dari *slurry*
2. Konsentrasi partikel padat dalam *slurry*
3. Ukuran dan distribusi partikel
4. Karakteristik bentuk dari partikel

Berdasarkan pada ukuran partikel, partikel diklasifikasikan menjadi partikel *coarse*, *medium* dan *fine* berdasarkan diameternya. ISO 14688-1 (2002) mengklasifikasikan beberapa ukuran pasir dan tanah yang biasanya sering digunakan untuk keperluan keteknikan. Untuk rentang ukuran untuk partikel pasir ditampikan dalam tabel 2.3 (ISO-14688-1, 2002).

Tabel 2. 3 Ukuran pasir (ISO 14688-1)

Diameter pasir d [mm]	Deskripsi
$0.063 \leq d \leq 0.2$	<i>Fine</i>
$0.2 \leq d \leq 0.63$	<i>Medium</i>
$0.63 \leq d \leq 2.0$	<i>Coarse</i>

Densitas dari *slurry* dipengaruhi oleh densitas cairan, densitas partikel padat dan konsentrasi partikel padat. Konsentrasi padat dapat dinyatakan dengan fraksi volume atau fraksi berat. Hubungan antara keduanya dapat dinyatakan sebagai berikut (Wasp, 1977):

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} = \frac{100 \frac{C_w}{\rho_s}}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}}$$

Dimana:

- C_v = konsentrasi volume dalam persen
 C_w = konsentrasi volume dalam persen
 ρ_m = densitas campuran atau *slurry* [kg/m^3]
 ρ_s = densitas padatan [kg/m^3]
 ρ_l = densitas cairan [kg/m^3]

Densitas dari *slurry* dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Wasp, 1977):

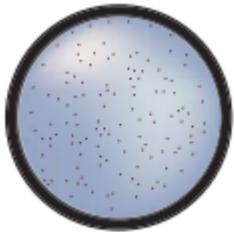
$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}}$$

Berdasarkan jumlah partikelnya, *slurry* dapat diklasifikasikan sebagai *dilute* dan *dense*. Aliran *dilute slurry* memiliki volume konsentrasi partikel yang rendah (<5-10%), dimana erosi terjadi sebagian besar disebabkan karena benturan atau

gersekan partikel ke dinding. Aliran *dense slurry* memiliki volume konsentrasi partikel yang tinggi sehingga interaksi antar partikelnya mempunyai pengaruh yang besar jika dibandingkan dengan aliran *dilute slurry*.

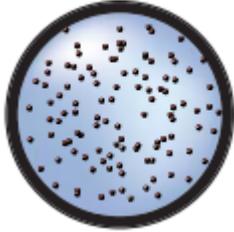
Slurry dapat diklasifikasikan menjadi *slurry* yang mengendap (*settling*) dan yang tidak mengendap (*non-settling*). *Non-settling slurry* adalah *slurry* yang partikel padatnya tidak mengendap di bagian bawah, tetapi tetap dalam suspensi untuk waktu yang lama. *Slurry* yang tidak mengendap bertindak dengan cara yang homogen dan kental, tetapi termasuk ke dalam cairan non-newtonian. Ukuran partikel dari *slurry jenis* ini kurang dari 20-100 μm . *Non-settling slurry* dapat didefinisikan sebagai *homogeneous mixture* (GLYGT, 2009). Untuk definisi dan ilustrasi dari *homogeneous mixture* dijelaskan pada tabel 2.3.

Tabel 2. 4 Definisi dan ilustrasi *non-settling slurry* (GLYGT, 2009)

Jenis <i>Slurry</i>	Defini	Ilustrasi
<i>Homogeneous mixture</i>	Campuran padatan dan cairan di mana padatan terdistribusi merata	

Untuk *settling slurries* akan terjadi pengendapan yang cepat, tapi akan tetap tersuspensi dalam keadaan turbulensi. *Slurry jenis* ini memiliki ukuran partikel yaitu lebih besar dari 100 μm . *Settling slurries* dapat digolongkan menjadi tiga jenis yaitu *pseudohomogeneous mixture*, *heterogeneous mixture partly stratified*, dan *heterogeneous mixture fully stratified* (GLYGT, 2009). Untuk definisi dan ilustrasi dari ketiga jenis *slurry* tersebut dijelaskan pada tabel 2.5.

Tabel 2. 5 Definisi dan ilustrasi jenis- jenis *settling slurry* (GLYGT, 2009)

Jenis <i>Slurry</i>	Defini	Ilustrasi
<i>Pseudohomogeneous mixture</i>	Campuran yang semua partikelnya tersuspensi namun terdapat konsentrasi yang lebih besar di bagian bawah	

<p><i>Heterogeneous mixture partly stratified</i></p>	<p>Campuran antara fase cair dan padat dimana fase padat (partikel) tidak terdistribusi secara merata namun cenderung lebih terkonsentrasi di bagian bawah pipa (jika dibandingkan dengan <i>setling slurry</i>)</p>	
<p><i>Heterogeneous mixture fully stratified</i></p>	<p>(jika dibandingkan dengan <i>setling slurry</i>)</p>	

Untuk memahami fenomena erosi dalam pipa yang dialiri *slurry* (campuran fase padat-cair), penting untuk melihat rezim aliran. Informasi kecepatan dan konsentrasi partikel akan memberikan indikasi distribusi fase padat pada penampang pipa. Berdasarkan ukuran dan kecepatan partikel, *slurry* bisa mengalami pengendapan. Jika kecepatan partikel yang melalui pipa rendah dan ukuran partikel besar, partikel akan cenderung berada di dasar pipa. *Slurry* jenis ini disebut sebagai *Newtonian settling slurry*. Jika ukuran partikel lebih kecil, *slurry* dapat digolongkan sebagai *slurry* yang tidak mengendap (*non-settling*) dan fluida *non-Newtonian*.

2.3.1 Pengendapan Partikel dalam *Slurry*

Fase cair yang mengalir di bersama partikel padat menciptakan perbedaan tekanan di sekitar dan gaya dorong yang dihasilkan dapat memindahkan partikel ke arah aliran. Kecepatan padatan lebih lambat dari fase cair, kejadian ini disebut selip. Partikel dengan ukuran dan kepadatan berbeda memiliki selip yang berbeda. Pada aliran horisontal, selip meningkat di aliran yang berada di atas dan menurun di aliran yang berada di bawah karena gaya gravitasi. Oleh karena itu konsentrasi dan ukuran fase padat mempengaruhi kecepatan *slurry*, keausan pipa dan rugi akibat gesekan.

Dalam beberapa kondisi, fase padat dapat mengendap dan memungkinkan untuk menghalangi aliran dalam pipa. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan dan pengujian. Jika ukuran, densitas dan konsentrasi dari partikel padat dalam *slurry* sudah diketahui kita dapat menghitung kecepatan rata-rata pengendapan atau V_L (*limiting settling velocity*) (WARMAN, 2002).

Limiting settling velocity (V_L) adalah batas kecepatan campuran padat dan cair dalam matriks, sehingga berpotensi mengalami pengendapan atau tidak

(Durand & Condolios, 1952). Jika kecepatan aliran *slurry* kurang dari kecepatan rata-rata pengendapan maka partikel akan cenderung mengendap dan jika kecepatan aliran lebih dari kecepatan rata-rata pengendapan *slurry* partikel akan cenderung mengalir. *Limiting settling velocity* (V_L) dapat dihitung dengan persamaan:

$$V_L = F_L \sqrt{2gD \frac{(S - S_I)}{S_I}}$$

Dimana:

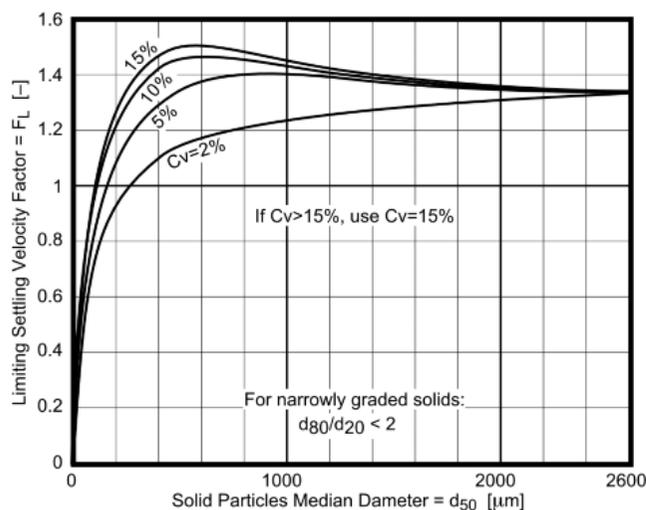
- V_L = *limiting settling velocity* [m/s]
- F_L = *settling velocity factor*
- g = gaya gravitasi [m²/s]
- D = diameter dalam pipa [m]
- S = spesifik gravitasi partikel solid
- S_I = spesifik gravitasi cairan

Settling velocity factor dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

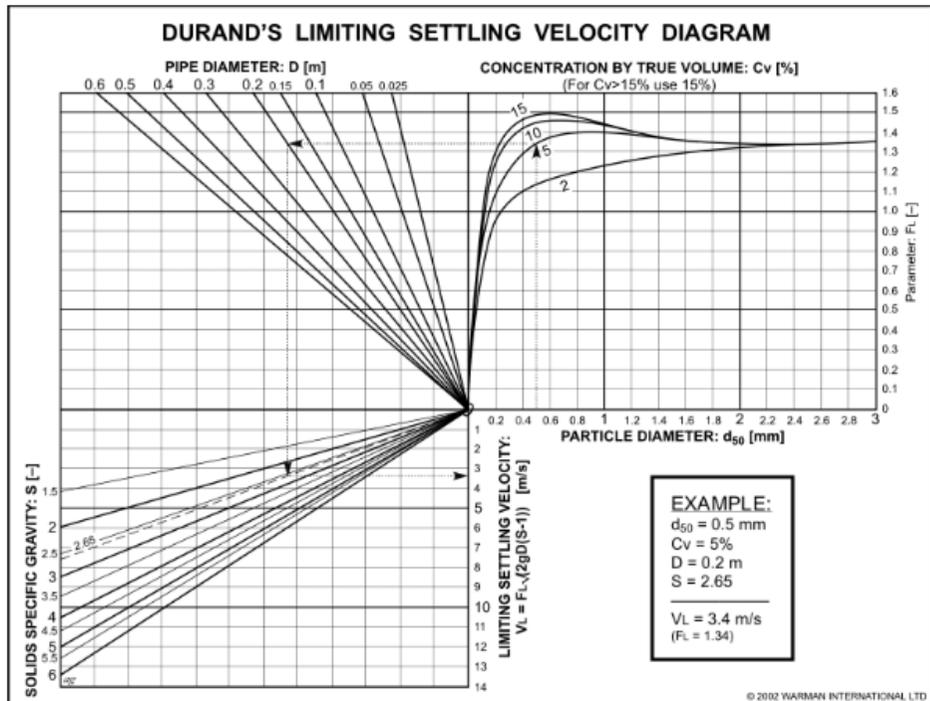
$$F_L = 0.4794 + (0.5429 \times (0.01 C_v)^{0.1058} \times (\log(d_{50}) - 1))$$

- F_L = *settling velocity factor*
- C_v = presentase volume solid [%]
- d_{50} = ukuran rata-rata partikel [m]

Untuk mengetahui nilai *settling velocity factor* (F_L) juga bisa dengan membaca grafik *durand's limiting settling velocity* yang ditampilkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Grafik *durand's limiting settling velocity*



Gambar 2. 4 Durand's limiting settling velocity diagram

Selain menggunakan formula nilai dari *limiting settling velocity* juga bisa diketahui dengan membaca digram *durand's limiting settling* jika nilai dari diameter partikel (d_{50}) konsentrasi volume partikel *solid* (C_v), diameter pipa (D), dan spesifik gravitasi (S) sudah diketahui sebelumnya.

2.3.2 Erosi Slurry

Erosi *slurry* didefinisikan sebagai salah satu keausan yang diakibatkan oleh dinding material terkena aliran *slurry* yang banyak membawa partikel padatan. Shook & Roco (1991) menyebutkan bahwa erosi akibat aliran *slurry* yang rapat disebabkan oleh tiga hal utama yaitu benturan langsung dari partikel, tubrukan secara acak antar partikel dalam gerakan turbulen, dan gesekan di bagian bawah pipa yang menekan dinding, yang dikenal sebagai kerusakan *abrasive*.

Fenomena erosi *slurry* merupakan fenomena yang kompleks karena banyaknya variabel independen yang mempengaruhinya. Variabel-variabel tersebut ditampilkan pada tabel 2.6.

Tabel 2. 6 Variabel-variabel yang mempengaruhi erosi *slurry* (Wood, Miles, & Ganeshalingham, 2001)

<i>Slurry variables</i>	
<i>Liquid</i>	<i>Viscosity, density, surface activity, lubricity, corrosivity, temperature</i>
<i>Particles</i>	<i>Brittleness, size, density, relative velocity, shape, relative hardness, concentration, particle-particle interactions</i>
<i>Flow field</i>	<i>Angle of impingement, particle impact efficiency, boundary layer, wall shear stress, particle rebound, degradation, particle drop-out, turbulence intensity</i>
<i>Component variables</i>	
<i>Bulk properties</i>	<i>Ductility or brittleness, hardness, melting point, microstructure, shape and roughness</i>
<i>Surface properties</i>	<i>Work hardening, corrosion layers, surface treatments, coating type, coating bond, microstructure</i>
<i>Service variables</i>	
<i>Contacting materials, pressure, velocity, temperature, surface finish, lubrication, corrosion, hydraulic design, intermittent slurry flows.</i>	

Erosi *slurry* tergantung pada berbagai parameter diatas, namun hal yang paling berpengaruh yaitu kondisi aliran, konsentrasi partikel dan kecepatan *slurry*.

2.4 Kapal Keruk Isap (*Cutter Suction Dredger*)

Kapal keruk berdasarkan cara penggalian dan operasinya dapat dibagi kedalam tiga jenis, yaitu secara mekanik, hidrolis dan hidrodinamik. Kapal keruk hidrolis mencakup seluruh peralatan keruk yang menggunakan pompa sentrifugal dalam sistem transportasinya memindahkan material hasil pengerukan. CSD (*cutter suction dredger*) diklasifikasikan kedalam kapal keruk hidrolis, yang memiliki kemampuan untuk mengeruk hampir seluruh jenis tanah seperti pasir, tanah liat, dan batu (Mahendra, 2014).



Gambar 2. 5 *Cutter suction dredger*

Prosedur pekerjaan pengerukan menggunakan *cutter suction dredger* yaitu pergerakan *cutter suction dredger* dalam mengeruk menggunakan jangkar yang disambung dengan sling yang diikatkan pada *cutterhead*, dengan *winch cutterhead* ditarik ke kiri dan ke kanan untuk memotong material di dalam air. Sedangkan satu *spud* bekerja agar *cutter suction dredger* tetap pada posisinya. Untuk menggerakkan *cutter suction dredger* pada lokasi lain dengan menggunakan kombinasi gerak salah satu *spud* dan *swing winch* (seperti melangkah). Untuk menggerakkan *cutter head* secara vertikal (naik-turun) menggunakan *winch* yang disambungkan dengan sling dan diikatkan pada *pontoon*. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi unjuk kerja dari *cutter suction dredger* sebagai berikut (Mahendra, 2014):

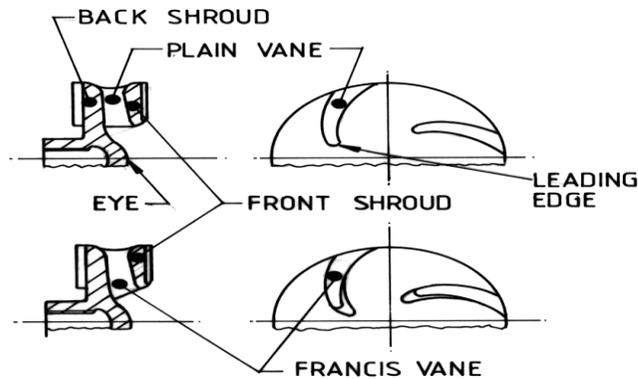
- karakteristik material yang dikeruk
- daya pompa
- jenis *cutterhead*
- kondisi cuaca, arus, pasang surut, dan ombak
- daya dari *winch*
- diameter dan panjang pipa
- kedalaman pengerukan

2.5 Pompa *Slurry*

Unruk memompa *slurry* digunakan pompa tipe sentrifugal. Pompa sentrifugal merupakan salah satu jenis pompa *non positive displacement* yang memiliki prinsip kerja mengubah energi kinetis (kecepatan) cairan menjadi energi potensial (dinamis) melalui impeller yang berputar di dalam *casing* kedalaman pompa. Tekanan dinamis mengangkat fluida dari tempat yang rendah ke tempat yang lebih tinggi.

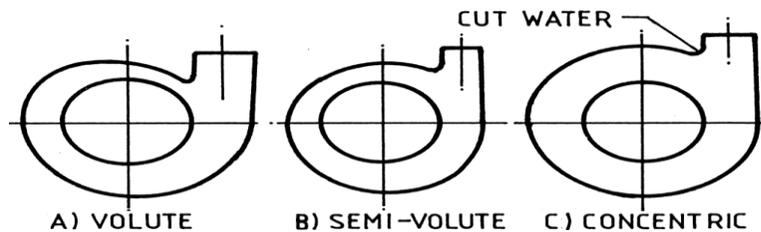
Pompa *slurry* sentrifugal harus didesain dengan saluran yang dapat dialiri partikel yang abrasif sehingga pompa *slurry* memerlukan impeller yang lebar dan kuat untuk mengakomodir partikel yang besar, juga harus dibuat dengan material khusus untuk meminimalisir keausan internal yang disebabkan oleh partikel yang abrasif. Berikut komponen-komponen pompa *slurry* yang dibedakan dengan pompa sentrifugal lainnya:

1. Impeler, Impeller merupakan komponen berputar utama yang secara normal mempunyai sudu untuk memberikan gaya sentrifugal kepada fluida. Impeller pompa *slurry* merupakan tipe sudu *plain* atau *francis*. Sudu *francis* mempunyai garis keliling yang terproyeksi terhadap mata impeller. Beberapa keuntungan dari tipe sudu *francis* yaitu memiliki efisiensi yang lebih tinggi, meningkatkan kemampuan isap dan memiliki umur yang lebih lama karena sudut benturan terhadap fluida lebih efektif. Impeller tipe sudu *plain* memperlihatkan karakteristik usia pakai yang lebih baik pada aplikasi terhadap *slurry* yang sangat kasar.



Gambar 2. 6 Bentuk sudu impeller (WARMAN, 2002)

2. *Casing*, *casing* adalah bagian terluar dari rumah pompa yang berfungsi sebagai pelindung impeller yang berputar. Bentuk *casing* secara umum untuk pompa *slurry* adalah *semi-volute* dengan celah lebar pada bagian *cut water* (Gambar 2.7), sehingga kecepatan aliran (*lifting velocity*) lebih lambat dibandingkan dengan casing pompa air bersih, dengan tujuan untuk memperkecil keausan pada *casing*. Efisiensi pada kebanyakan *casing* terbuka lebih rendah dari tipe *volute*, meskipun demikian *casing* tipe *volute* menawarkan masa pakai dengan tingkat kompromi yang paling baik untuk *slurry*.



Gambar 2. 7 Bentuk casing pompa (WARMAN, 2002)

Pada prinsipnya pompa *slurry* memindahkan material padat dalam bentuk *slurry* yang debit pemompaannya bergantung pada diameter pipa yang digunakan dan kecepatan yang direncanakan. Kapasitas pompa adalah kemampuan pompa untuk mengalirkan volume fluida dalam waktu tertentu dengan satuan m^3/detik . Oleh karena itu, perhitungan kapasitas pompa menggunakan persamaan:

$$Q = V \times A$$

Dimana:

- Q = kapasitas [m^3/s]
 A = luas penampang pipa [m^2]
 V = kecepatan aliran *slurry* [m/s]

2.6 *Canal Water Intake*

Water Intake adalah suatu bangunan yang berfungsi sebagai penampung atau penangkap air baku yang berasal dari sumbernya atau badan air seperti sungai, situ, laut, danau dan kolam sesuai dengan debit yang di perlukan untuk pengolahan (Madsuki, 2009).

Pada pembangkit listrik tenaga gas dan uap (PLTU) sering terjadi masalah yaitu pendangkalan *canal water intake* akibat adanya sedimen yang menumpuk di dasar. Pendangkalan ini menyebabkan berkurangnya serta menurunnya kualitas pasokan air pendingin kondensor sehingga menyebabkan terganggunya produktifitas PLTU.

2.7 *High Density Polyethylene (HDPE)*

Pipa HDPE adalah pipa plastik berdensitas tinggi yang banyak digunakan untuk pipa air dan gas. Disebut pipa plastik karena material berasal dari polimer minyak bumi sehingga pipa ini dapat didaur ulang. HDPE memiliki percabangan molekul yang sedikit yang menyebabkan pipa ini memiliki kekuatan tensi dan kekerrasan yang tinggi.

Polyethylene (PE) adalah salah satu bahan mentah yang terutama digunakan untuk gas dan distribusi air diseluruh dunia. Sejak perkembangannya di tahun 1954 sampai sekarang, terjadi kemajuan besar pada keandalan material HDPE. Dari generasi pertama PE 63 ketiga, PE 100 diperkenalkan ada tahun 1989 oleh Solvay Polyolefi (sekarang Ineos Polyolefins), polietilena telah menjadi salah satu bahan baku yang mendominasi untuk gas dan distribusi air. Karena bahan kimia yang memiliki tingkat resistansi yang baik, dan juga merupakan bahan pilihan untuk banyak aplikasi industri.



Gambar 2. 8 Pipa HDPE digunakan untuk saluran discharge slurry kapal keruk CSD

Bahan HDPE sudah umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan pipa yang digunakan untuk mengalirkan fluida. Pipa HDPE memiliki kelebihan yaitu

tahan terhadap korosi karena materialnya yang berupa plastik. Penggunaan pipa HDPE sekarang umumnya hanya sebagai bahan pencegah korosi pada bagian dalam pipa besi, padahal partikel pada bahan HDPE juga dapat digunakan sebagai penguat dari pipa besi tersebut.

2.8 *Computational Fluid Dynamic (CFD)*

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan salah satu cabang dari mekanika fluida yang menggunakan metode numerik dan algoritma untuk menyelesaikan dan menganalisis permasalahan yang berhubungan dengan aliran fluida. Tujuan dari CFD adalah untuk memprediksi secara akurat tentang aliran fluida, perpindahan panas, dan reaksi kimia dalam sistem yang kompleks, yang melibatkan satu atau semua fenomena di atas. Beberapa keuntungan yang didapat dalam penggunaan CFD antarlain:

1. Mempunyai kemampuan sistem studi yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit atau tidak mungkin dilakukan melalui eksperimen
2. Menekan biaya dan waktu dalam mendesain suatu produk, jika proses desain tersebut dilakukan dengan uji eksperimen dengan akurasi tinggi.
3. Mempunyai kemampuan untuk sistem studi di bawah kondisi berbahaya pada saat atau sesudah melewati titik kritis (termasuk studi keselamatan dan skenario kecelakaan).

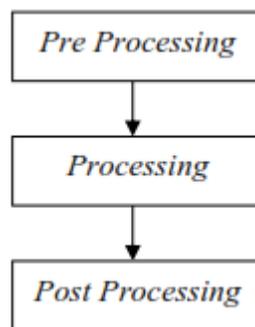
Pada umumnya proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas. Persamaan yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes, persamaan ini ditemukan oleh G.G. Stokes di Inggris dan M. Navier di Perancis sekitar awal tahun 1800. Pada dasarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang asalnya kontinu (memiliki jumlah sel tak terhingga) dirubah menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga). Ada tiga teknik solusi numerik (metode diskritisasi) aliran yang berbeda, yaitu *finite difference*, *finite element* dan *finite volume methods*. Metode diskritisasi dipilih pada umumnya untuk menentukan kestabilan dari program numerik/CFD yang dibuat atau program software yang ada. Beberapa metode diskritisasi yang digunakan untuk memecahkan persamaan-persamaan diferensial parsial, diantaranya adalah:

1. Metode beda hingga (*finite difference method*), pada metode ini area aliran dipisahkan menjadi satu set poin *grid* dan fungsi kontinu (kecepatan, tekanan, dan lainnya) didekati dengan nilai-nilai diskrit dan fungsi-fungsi ini dihitung pada titik-titik *grid*. Turunan dari fungsi didekati dengan menggunakan perbedaan antara nilai fungsi pada titik lokal *grid* dibagi dengan jarak *grid*.
2. Metode elemen hingga (*finite element method*), metode ini membagi masalah besar menjadi lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang memodelkan seluruh kasus kemudian

disusun menjadi sebuah sistem persamaan yang lebih luas. Persamaan konservasi kekekalan masa, momentum, dan energi ditulis dalam bentuk yang tepat untuk setiap elemen, dan hasil dari set persamaan aljabar untuk bidang aliran diselesaikan secara numerik.

3. Metode volume hingga (*finite volume method*), metode untuk mewakili dan mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk aljabar. Metode ini sama seperti *finite difference method* dan *finite element method*, nilai-nilai dihitung di tempat terpisah pada geometri yang di *mesh*. Metode ini mengacu pada volume kecil disekitar *node* pada *mesh*. Dalam metode ini, volume integral dalam persamaan diferensial yang memiliki istilah divergensi dikonversi ke *surface integrals* menggunakan teori divergensi.

Secara garis besar proses kerja CFD ANSYS Fluent terdiri dari tiga proses utama yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post processing*.



Gambar 2. 9 *Flowchart* proses CFD

2.8.1 *Pre-processing*

Tahap *pre processing* merupakan tahap awal dari proses CFD, pada tahap ini akan dilakukan beberapa proses sebagai berikut:

1. Definisi geometri dari benda kerja. Pada proses ini akan dilakukan proses pemodelan dari benda kerja. Proses pemodelan bisa langsung menggunakan *software* CFD, tetapi untuk benda kerja yang rumit bentuknya sebaiknya menggunakan *software assembly* seperti SolidWork, Inventor, dan lain sebagainya.
2. Pembuatan *grid (mesh)* atau disebut sebagai *meshing*. *Meshing* adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit. Semakin baik kualitas mesh maka akan semakin tinggi tingkat konvergensinya. Secara umum bentuk sel dari proses *meshing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu dua dimensi dan tiga dimensi. Untuk sel dua dimensi terdapat dua jenis bentuk sel yaitu *Triangle* dan *Quadrilateral*.

2.8.2 Processing

Processing merupakan proses kedua dari CFD, didalam tahap ini akan dilakukan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) dan pemilihan metode inisiasi. Dalam penentuan kondisi batas akan dimasukkan nilai dari parameterparameter yang dibutuhkan, adapun parameter yang termasuk kondisi batas adalah:

1. *Velocity inlet*, digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran skalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.
2. *Mass flow inlet*, pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran massa atau fluks massa, temperature fluida (apabila mengaktifkan persamaan energi), tekanan pada sisi masuk, arah aliran, dan besaran turbulensi.
3. *Pressure outlet*, pada kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya. Pada kondisi batas ini harus dimasukkan nilai tekanan statik, temperatur aliran balik (*backflow*), dan besaran turbulen aliran balik.
4. Dinding (*wall*), Kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran. Kondisi batas ini digunakan juga sebagai pembatas antara daerah fluida (cair dan gas) dan padatan.

2.8.3 Post Processing

Post processing merupakan tahapan terakhir dari proses CFD, pada tahapan ini akan ditampilkan hasil dari proses perhitungan dari kondisi batas dan metode solver yang digunakan. Dalam post processing dapat memberikan tampilan grafis yang menunjukkan *mesh*, kontur, vektor dan *pathline*. *Displaying mesh* digunakan untuk menampilkan mesh pada model yang sedang dikerjakan pada saat setup kondisi batas atau pada saat memeriksa *solution*. *Displaying contours* dan *profiles* pada menu *display* ini akan ditampilkan bentuk kontur dan profil dari model yang sedang diteliti. *Displaying vectors*, pada menu *display* ini akan ditampilkan bentuk kontur dan profil dari model yang sedang diteliti. *Pathlines* digunakan untuk memvisualisasikan aliran partikel tak bermassa yang menjadi domain permasalahan.

2.8.4 Erosion Fluid Dynamics Modeling ANSYS Fluent

ANSYS Fluent 18 memiliki beberapa model erosi yang sudah diakui oleh pihak industri. Model erosi tersebut yaitu:

1. Model erosi Finnie, model ini lebih cocok untuk material getas, di mana erosi bervariasi dengan sudut dan kecepatan benturan (Finnie, 1960)
2. Model Oka memberikan korelasi yang lebih nyata dengan memasukkan efek kekerasan material dinding (Oka & Yoshida, 2005).

3. Model erosi McLaury dikembangkan untuk memprediksi tingkat erosi partikel padat dalam air, digunakan terutama dalam aliran *slurry* (McLaurry, 1996).

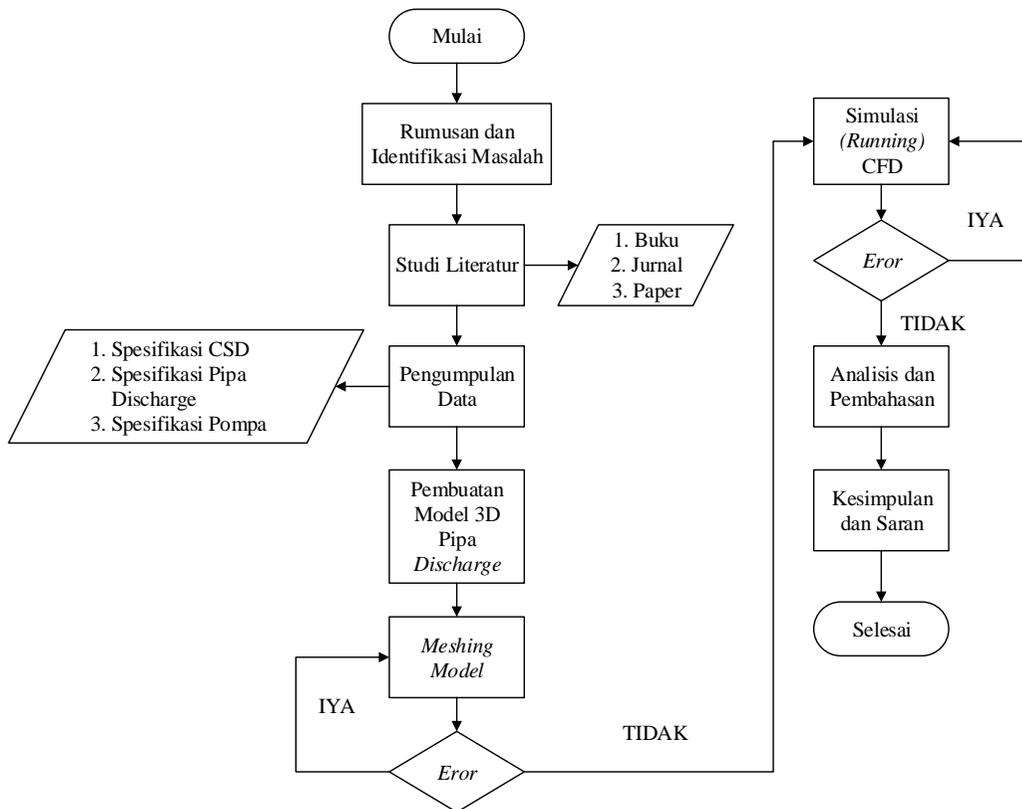
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Umum

Metode penelitan merupakan acuan atau landasan yang di gunakan dalam pekaksanaan penelitian. Secara umum metode penelitian merupakan tahapan dan proses yang di gunakan untuk mencapai tujuan dari penelitian dalam skripsi. Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah dengan metode berbasis simulasi, dimana akan dilakukan pengujian dengan menggunakan *software* untuk pemecahan masalah.

3.2 Flow chart



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

Diagram alir (*flowchart*) memperlihatkan tahapan-tahapan yang dilakukan oleh penulis untuk mencapai tujuan penelitian. Dalam penelitian ini *flowchart* penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1. Terdapat beberapa jenis simbol di dalam diagram alir (*flowchart*) seperti bentuk jajargenjang yang berfungsi untuk

menerangkan proses input atau output data, parameter dan informasi. Bentuk persegi berfungsi menerangkan proses pengolahan data atau proses perhitungan. Sedangkan arah panah menunjukkan arah aliran program atau proses.

3.3 Langkah Pelaksanaan

Dalam sub-bab ini akan dijelaskan secara lebih rinci setiap proses dalam diagram alir (*flowchart*) dalam penelitian ini yang tertampil pada gambar 3.1. Adapun uraian dari diagram alir dijelaskan seperti di bawah ini:

3.3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Tahap perumusan masalah merupakan tahap penuangan gagasan masalah yang akan dibahas. Rumusan masalah ini menjadi aspek pokok dalam analisis pada skripsi berdasarkan data yang telah didapat.

3.3.2 Studi Literatur

Studi literatur merupakan sumber atau referensi yang bertujuan untuk melengkapi dan menyiapkan konsep teori yang dibutuhkan selama mengerjakan tugas akhir. Studi literatur yang digunakan penulis meliputi:

1. Buku
2. Jurnal
3. Paper
4. Data laporan dari proses pengerukan di *canal water intake* PLTGU UP Grati

Dari sumber literatur yang ada, kemudian dipilih data-data dan metode yang mendukung proses penelitian. Data dan metode tersebut digunakan untuk mengetahui laju erosi pada pipa *discharge slurry* pada kapal keruk isap.

3.3.3 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data yang berhubungan dengan permasalahan yang didapat untuk membantu dalam pengerjaan penelitian ini. Data yang dikumpulkan berupa data spesifikasi teknis meliputi:

1. Spesifikasi kapal keruk (*cutter suction dredger*)
2. Spesifikasi pipa *discharge*
3. Spesifikasi pompa *slurry*

Data yang dibutuhkan dapat diperoleh dari laporan proses pengerukan, *project guide*, serta dari standar yang sudah ada.

3.3.4 Pemodelan Tiga Dimensi Pipa

Dengan menggunakan data spesifikasi yang telah didapat, Penulis melakukan pembuatan model pipa *discharge* dalam bentuk tiga dimensi. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak (*software*).

3.3.5 Simulasi Menggunakan CFD

Setelah melalui proses pembuatan model tiga dimensi kemudian dilakukan proses *meshing*, *running setup*, *running simulation* Menggunakan *software* Ansys fluent. *Meshing* merupakan proses penandaan titik – titik yang akan dianalisis oleh *solver* CFD. *Running setup* dilakukan untuk memasukkan data input yang akan dianalisis menggunakan *solver* CFD. Hasil dari *running simulation* adalah *post-CFD* berupa gambar animasi, table dan grafik. Hasil *output* berupa besar laju erosi pada setiap model yang divariasikan.

3.3.6 Analisis Data

Dari hasil simulasi CFD didapat nilai dari laju erosi dari beberapa variasi kedaan pipa dan *slurry*. Selain itu juga akan didapat karakteristik aliran dari *slurry* yang melalui pipa *discharge* pada kapal keruk isap (*cutter suction dredger*). Dan akan ditarik kesimpulan laju erosi terhadap varias kecepatan besar partikel dan konsentrasi dari *slurry* serta sudut pipa.

3.3.7 Kesimpulan dan Saran

Setelah mendapatkan hasil penelitian berupa laju erosi pada variasi. Langkah selanjutnya adalah membuat kesimpulan. Kesimpulan ini diharapkan bisa menjawab tujuan dari penelitian yang telah dilakukan. Kemudian diberikan juga saran atau rekomendasi yang dapat menunjang untuk dilakukan penelitian di waktu yang akan datang.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

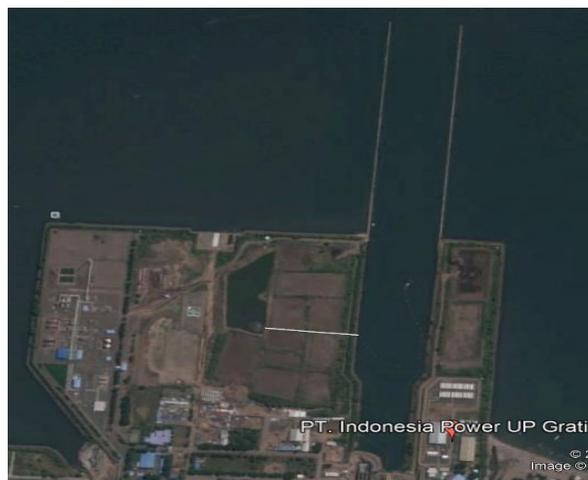
Pada bab empat ini akan dilakukan analisis data dan pembahasan mengenai permasalahan pada bab satu. Permasalahan tersebut yakni laju erosi yang terjadi pada pipa *discharge* kapal keruk isap (*cutter suction dredger*) yang dialiri *slurry* pada berbagai kondisi pipa dan karakteristik *slurry* itu sendiri. Terdapat beberapa tahapan yang dilakukan yaitu pengumpulan data yang dibutuhkan untuk memodelkan pipa dan mendefinisikan karakteristik dari *slurry*. Setelah data didapat dan diolah maka akan masuk pada tahap proses pemodelan dan simulasi. Proses simulasi secara numerik menggunakan *software* ANSYS Fluent. Setelah hasil berupa laju erosi didapat maka akan dilakukan proses pembahasan.

4.2 Pengumpulan Data

Pada bagian ini akan disajikan data-data yang telah didapatkan untuk mendukung proses pemodelan dan simulasi. Berikut data-data yang telah didapatkan:

4.2.1 Canal Water Intake PLTGU Grati

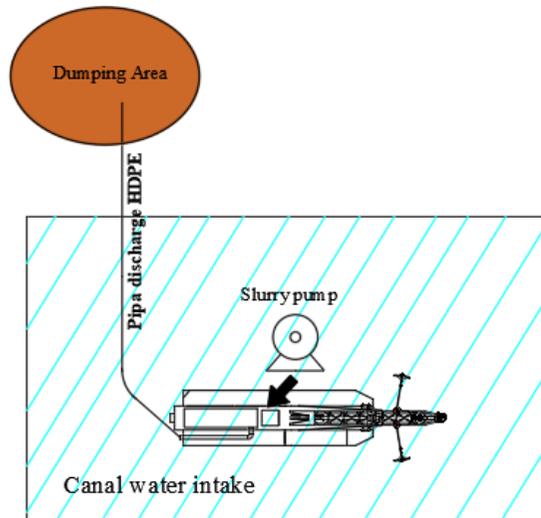
PLTGU Grati merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga gas dan uap. Pembangkit listrik tenaga gas dan uap ini terletak di Desa Wates, Kecamatan Lekok, Pasuruan, Jawa Timur ini memiliki kapasitas 760 MW yang terdiri dari Blok I sebesar 460 MW dan Blok II sebesar 300 MW. PLTGU ini juga memiliki satu *canal water intake* untuk mendukung proses kerjanya.



Gambar 4. 1 *Canal water intake* PLTGU grati

Canal water intake yang terdapat di PLTGU Grati merupakan jenis terbuka yang dilengkapi dengan dua buah *jetty*. Kedua buah *jetty* tersebut berfungsi untuk

saluran masuk air laut untuk mendinginkan mesin steam turbin. Kedua *jetty* memiliki panjang 482 m, dan luas dari *canal water intake* sebesar 10.4217 m². Untuk gambar skematik proses pendistribusian *slurry* menuju *dumping area* diilustrasikan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Ilustrasi proses pembuangan *slurry* menuju *dumping area*

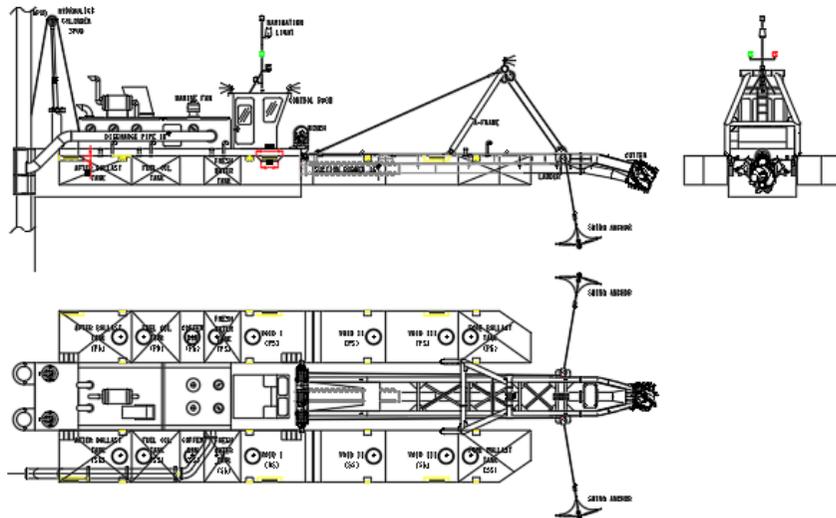
Untuk membuang hasil kerukan dari kapal keruk menuju *dumping area* dibutuhkan instalasi pipa apung (*mobile*) dan pipa darat (*fix*). Pada penelitian ini diambil sampel pipa sepanjang 6 meter untuk pipa apung yang divariasikan menjadi 5 model sudut belok yaitu 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90°.



Gambar 4. 3 Pipa *discharge* apung yang terpasang di *canal water intake* PLTGU Grati

4.2.2 Kapal Keruk Isap (*Cutter Suction Dredger*)

Kapal keruk yang beroperasi untuk mengeruk sedimen di *canal water intake* PLTGU UP Grati merupakan kapal keruk tipe isap (*cutter suction dredger*). *Cutter suction dredger* tipe Optima merupakan kapal keruk yang didesain dan difabrikasi oleh PT.Banter Prima Sentosa. Pada kapal keruk ini terpasang peralatan-peralatan yang digerakkan oleh sistem hidrolis untuk mendukung proses operasinya. Spesifikasi dari kapal keruk terlampir pada tabel 4.1



Gambar 4. 4 Rencana umum *cutter suction dredger* type Optima

Tabel 4. 1 Spesifikasi *cutter suction dredger* Optima

Dimensi Utama Kapal	
<i>LOA</i>	27.5 m
<i>Breath</i>	6.5 m
<i>Digging board</i>	10 m
<i>Free board</i>	0.8 m
<i>Draft</i>	1.1 m
<i>Total dry weight</i>	75 tons
<i>No. of pontoon module</i>	5
<i>Diameter discharge pipe</i>	355 mm (14 Inchi)

4.2.3 Pompa Keruk (*Dredge Pump*)

Jenis pompa pada kapal keruk yang beroperasi di *canal water intake* adalah pompa sentrifugal. Pompa tersebut berfungsi untuk mendistribusikan hasil kerukan sedimen berupa *slurry* menuju lokasi pembuangan hasil keruk (*dumping area*). Pompa yang digunakan yaitu produk dari Sumbo Pump dengan tipe 250G-SG dengan detail spesifikasi dapat dilihat pada tabel 4.2.



Gambar 4. 5 Sunbo Pump 250G-SG

Tabel 4. 2 Spesifikasi Pompa Keruk

Sunbo Pump 250G-SG	
<i>Capacity</i>	360 - 1440 m ³ /h
<i>Allowable Max. Power</i>	600 Kw
<i>Head</i>	60
<i>Speed</i>	600 – 1400 rpm
<i>Max. Eff.</i>	65%
<i>NPSH</i>	4.5 m
<i>Impeller diameter</i>	667 mm

Selain data spesifikasi yang didapat dari pihak *maker* pompa. Pihak PLTGU UP Grati dan PT. Banter Prima Sentosa selaku galangan yang memproduksi kapal tersebut juga melakukan tahap *commissioning* untuk mengetahui performa pompa saat dioperasikan. Dilakukan dua jenis pengujian yaitu pada kondisi air (*clear water*) dan lumpur pekat (*mud/slurry*).

Gambar 4. 6 Kondisi (a) *clear water* (b) *slurry/mud*

Untuk performa dari masing-masing kondisi fluida dapat dilihat pada tabel 4.3 dan 4.4 (Data Komisioning PLTGU IP Grati Pasuruan, 2016) seagai berikut:

Tabel 4. 3 Pengukuran debit pada *discharge* untuk air (*clear water*)

Kondisi Tes	<i>Clear water</i> (<i>ladder swing</i> ke kanan dan kiri)		
Putaran (Rpm)	<i>Discharge preassure (bar)</i>	Debit <i>discharge</i> (m ³ /jam)	<i>Engine Load (%)</i>
1000	2	884.9	61
1100	2.4	1061.9	63
1200	2.8	1287.1	70
1300	3.3	1318.7	73
1400	3.8	1377.1	84

Tabel 4. 4 Pengukuran debit pada *discharge* untuk *slurry*

Kondisi Tes	<i>Slurry (Cw = 80%)</i> (<i>ladder swing</i> ke kanan dan kiri)		
Putaran (Rpm)	<i>Discharge preassure (bar)</i>	Debit <i>discharge</i> (m ³ /jam)	<i>Engine Load (%)</i>
1000	2.1	897.9	52
1100	2.4	1034.4	55
1200	2.8	1105.9	63
1300	3.2	1228.7	68
1400	3.8	1352.1	87

Pada penelitian ini akan menggunakan data debit pompa (m³/jam) pada konsisi 1400 rpm dan lima konsentrasi massa pasir (Cw) pada *slurry* yaitu 0%; 20%; 40%; 60%; 80%. Karena data yang diambil pada saat *commissioning* hanya pada kondisi air (Cw: 0%) dan *slurry* (Cw: 80%), maka akan dilakukan interpolasi untuk data yang belum diketahui. Setelah melakukan interpolasi didapat data sebagai berikut:

Tabel 4. 5 Data interpolasi performa pompa

RPM	Cw	Q (m ³ /jam)
1400	0%	1377.1
1400	20%	1370.85
1400	40%	1354.6
1400	60%	1358.35
1400	80%	1352.1

4.2.4 Pipa HDPE (*High Density Polyethylene*)

Sedangkan untuk pipa HDPE yang digunakan untuk mentransmisikan *slurry* adalah pipa HDPE 14 inchi SDR 11 (PN 16) yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Spesifikasi pipa HDPE

Material	PE 100
Diameter luar	14 inchi (355 mm)
Ketebalan	32,2 mm
SDR	11
Densitas	950 kg/m ³
Max preasure	16 bar

4.2 Menghitung *Limiting Settling Velocity*

Limiting settling velocity adalah kecepatan dimana partikel-partikel padat (solid) dalam *slurry* akan mengalami pengendapan di dasar pipa. Oleh karena itu dalam perencanaan sistem perpipaan yang mengangkut *slurry* perlu dilakukan perhitungan *limiting settling velocity*. Untuk menghitung *limiting settling velocity* menggunakan persamaan Durand sebagai berikut:

$$V_L = F_L \sqrt{2gD \frac{(S - S_l)}{S_l}}$$

Dimana:

V_L = *limiting settling velocity* [m/s]

F_L = *settling velocity factor*

g = gaya gravitasi [m/s²]

D = diameter dalam pipa [m]

S = spesifik gravitasi partikel solid

S_l = spesifik gravitasi cairan

Settling velocity factor dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$F_L = 0.4794 + (0.5429 \times (0.01 C_v)^{0.1058} \times (\log(d_{50}) - 1))$$

F_L = *settling velocity factor*

C_v = presentase volume solid [%]

d_{50} = diameter rata-rata partikel [μm]

Untuk menentukan presentase volume solid (C_v) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_v = \frac{100 \frac{C_w}{\rho_s}}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}}$$

Dimana:

C_v = konsentrasi volume [%]

C_w = konsentrasi berat [%]

ρ_s = densitas padatan [kg/m^3]

ρ_l = densitas cairan [kg/m^3]

Data yang dimiliki untuk perhitungan:

Diameter dalam pipa (D) = 322.8 mm

Spesifik gravitasi pasir (S) = 2.65

Spesifik gravitasi air (S_i) = 1.025

Gaya gravitasi (g) = 9.8 m/s²

Presentase massa pasir (C_w) = 0%; 20%; 40%; 60%; 80%

Diameter partikel (d₅₀) = 0.02 mm; 0.05 mm; 0.08 mm; 0.14 mm

Densitas pasir (ρ_s) = 2650 kg/m³

Densitas air (ρ_l) = 1025 kg/m³

Dengan menggunakan tiga persamaan pada sub-bab ini maka akan didapat nilai *limiting settling velocity* sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Nilai *limiting settling velocity* pada empat variasi diameter pasir

D ₅₀ = 20 μm			
C _w (%)	C _v (%)	F _L	V ₁ (m/s)
0	0	0.4794	1.5183
20	8.817	0.60579	1.9186
40	20.5	0.61760	1.956
60	36.716	0.62639	1.9838
80	60.740	0.63443	2.0093
D ₅₀ = 50 μm			
C _w (%)	C _v (%)	F _L	V ₁ (m/s)
0	0	0.4794	1.5183
20	8.817	0.77289	2.4478
40	20.5	0.80029	2.5346
60	36.716	0.8207	2.5992
80	60.740	0.83937	2.6584
D ₅₀ = 80 μm			
C _w (%)	C _v (%)	F _L	V ₁ (m/s)
0	0	0.4794	1.5183
20	8.817	0.8586	2.7193
40	20.5	0.894	2.8314
60	36.716	0.9204	2.9149
80	60.740	0.9445	2.9913

D ₅₀ = 140 μm			
C _w (%)	C _v (%)	F _L	V ₁ (m/s)
0	0	0.4794	1.5183
20	8.817	0.9606	3.0425
40	20.5	1.0056	3.1848
60	36.716	1.039	3.2908
80	60.740	1.0697	3.3877

Nilai dari *limiting settling velocity* berbanding lurus dengan nilai *settling velocity factor*, C_w, C_v, dan diameter partikel padat (pasir) dalam *slurry*. Nilai *limiting settling velocity* terbesar pada saat C_w *slurry* sebesar 80% dan diameter pasir 140 μm yaitu 3.3877 m/s.

4.3 Menghitung Laju Aliran Massa Pasir Pada *Slurry*

Laju aliran massa dari partikel pasir dalam *slurry* menjadi salah satu nilai masukan dalam memodelkan laju erosi dalam ANSYS Fluent. Terdapat dua jenis laju aliran massa pada *slurry* yaitu laju aliran massa pada fase cair (air) dan fase padat (pasir). Pada sub-bab ini akan dilakukan perhitungan terhadap laju aliran massa pasir pada variasi *concentration of weight slurry* (C_w) 0%, 20%, 40%, 60%, dan 80%. Persamaan untuk menghitung laju aliran massa yaitu sebagai berikut:

$$\dot{m} = \rho V A$$

Dimana:

\dot{m} = laju aliran massa [kg/s]

ρ = densitas [kg/m³]

V = Kecepatan [m/s]

A = Luas penampang [m²]

Hasil perhitungan kecepatan *slurry* dan laju aliran massa pasir dalam *slurry* pada beberapa kondisi dapat dilihat pada tabel 4.8 sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Laju aliran massa pasir dalam *slurry*

C _w (%)	C _v (%)	Q (m ³ /h)	V (m/s)	\dot{m} pasir (kg/s)
0	0	1377.1	4.67231	0
20	8.9795204	1370.85	4.6511	88.9025
40	20.844327	1364.6	4.6299	205.43
60	37.228392	1358.35	4.60869	365.222
80	61.28648	1352.1	4.58748	598.473

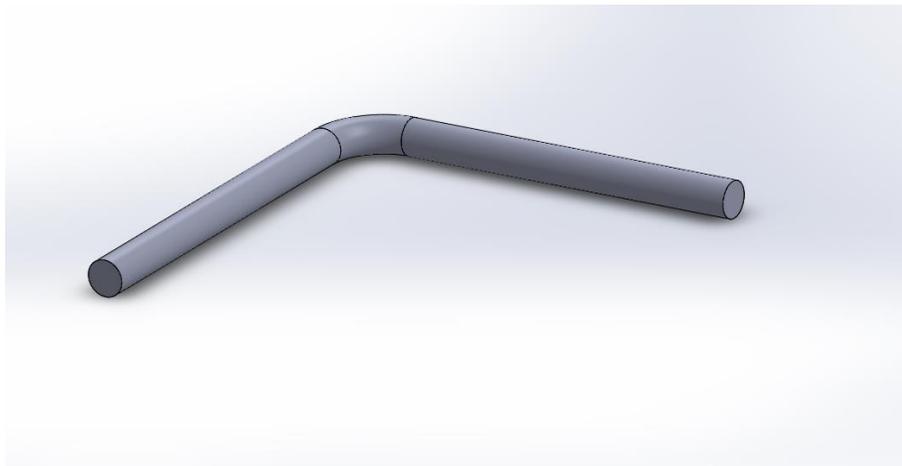
Nilai dari kecepatan *slurry* lima kondisi melebihi nilai dari *limiting settling velocity*-nya. Ini berarti tidak terjadi pengendapan partikel padat (pasir) di dasar pipa.

4.4 Proses Simulasi

Pada sub-bab ini akan menjelaskan bagaimana proses pengerjaan penelitian yang dimulai dari penggambaran hingga simulasi. Penggambaran yang harus mengetahui dimensi pipa yang dibutuhkan ketika akan melanjutkan untuk pembuatan gambar tiga dimensi. Kemudian ketika model tiga dimensi sudah terbentuk maka dilanjutkan dengan proses simulasi model yang nantinya akan menghasilkan nilai laju erosi pada pipa. Berikut langkah-langkah pada saat dilakukan proses simulasi menggunakan ANSYS Fluent:

4.4.1 *Pre-Processing (Pembuatan Geometri dan Meshing)*

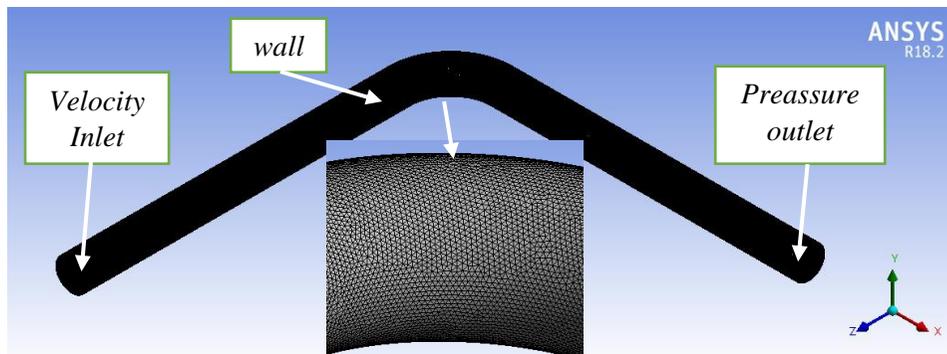
Langkah pertama yaitu melakukan proses pemodelan tiga dimensi terhadap lima sampel pipa HDPE sepanjang 6 meter yang memiliki diameter dalam sebesar 322.8 mm. Pemodelan dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak SolidWork 2014. Pemodelan menggunakan fitur *swetp* untuk membentuk sudut belok pada model.



Gambar 4. 7 Pemodelan tiga dimensi pipa

Setelah melakukan proses pemodelan tiga dimensi terhadap sampel pipa maka dilakukan proses *meshing* menggunakan ANSYS *mesh*. Pada proses *meshing* juga dilakukan penentuan geometri dan kondisi batas dari pipa. Dalam proses *meshing* perlu diperhatikan dalam menentukan kualitas *meshing* tersebut. Semakin banyak jumlah *elements* dan *nodes* maka akan semakin baik hasil *meshing* dan simulasi yang dihasilkan. Pada proses ini juga ditentukan jenis-jenis kondisi batas pada model.

Proses *meshing* akan dilakukan menggunakan fitur *meshing* pada ANSYS Fuent R18.2. Untuk detail *meshing* bisa dilihat pada gambar 4.8 dan tabel 4.9.

Gambar 4. 8 Detail *meshing* pipa dengan sudut belok 60°Tabel 4. 9 Spesifikasi *meshing* pipa dengan sudut belok 90°

<i>Detail Mesh</i>	
<i>Size function</i>	<i>Proximity and curvature</i>
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Min size</i>	<i>0.777 mm</i>
<i>Element size</i>	<i>10 mm</i>
<i>Nodes</i>	<i>638305</i>
<i>Elements</i>	<i>1976429</i>

Setelah melakukan *meshing* perlu dilakukan penamaan pada *face* sesuai dengan kondisi batasnya pada model untuk memudahkan pada saat proses selanjutnya (*processing/sover*). Dengan penggunaan fitur *inflation layers* pada dinding *mesh* diharapkan tidak terjadi *divergence* pada solusi setelah dilakukan simulasi.

4.4.2 Processing

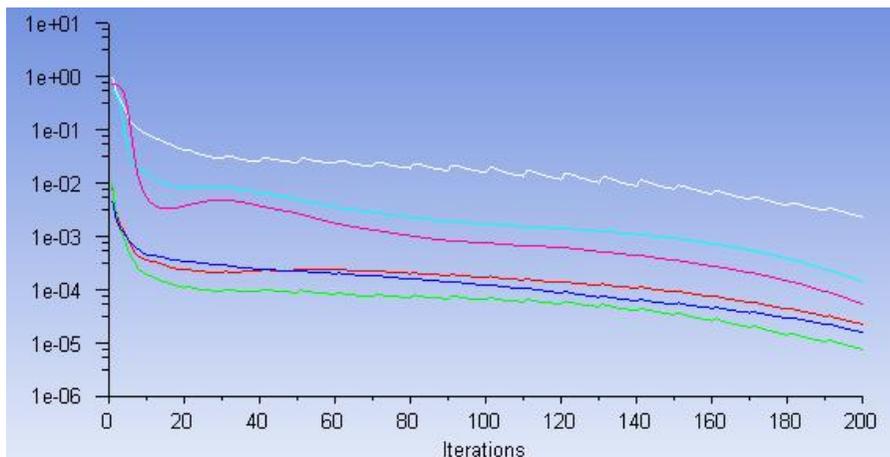
Pada langkah ini menentukan model *multiphase* pada *slurry* yaitu model DPPM (*discrete dense phase model*) satu fase utama cairan kontinu dan satu *discrete phase*. Kondisi batas kemudian diatur pada inlet (*velocity inlet*), dinding (*wall*), dan outlet (*preassure outlet*). Untuk kondisi inlet perlu ditentukan kecepatan dan aju aliran masa *slurry*. Metode solusi yang digunakan dalam simulasi ini dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 10 Parameter dalam simulasi

<i>Multiphase Model</i>	<i>Multiphase model</i>	<i>Eulerian</i>
	<i>Eulerian parameter</i>	<i>DDPM</i>
<i>Fluid</i>	<i>Fluid</i>	<i>Water</i>
	<i>Fluid viscosity</i>	<i>1.003e⁻³ kg/ms</i>
	<i>Fluid density</i>	<i>1025 kg/m³</i>

<i>Solid Particle</i>	<i>Solid</i>	<i>Sand</i>
	<i>Density</i>	2650 kg/m ³
	<i>Diameter [mm]</i>	0.05; 0.08; 0.1; 0.14
<i>Turbulence model</i>	<i>Turbulence model</i>	Realizable k- ϵ
	<i>Wall functions</i>	Scalable
<i>Wall</i>	<i>Wall</i>	HDPE
	<i>Density</i>	950 kg/m ³
<i>Boundary Conditions</i>	<i>Inlet mass flow [kg/s]</i>	0; 88.97; 205.92; 367.13; 604.55
	<i>Wall boundary</i>	No slip
	<i>Erosion model</i>	Mclaurry

Pada tahap ini akan dilakukan proses perhitungan terhadap model yang dibuat pada tahap *pre-proces*. Kerangka utama metode numerik untuk dasar sebuah *solver* terdiri dari langkah aproksimasi variabel-variabel aliran yang tidak diketahui dengan fungsi-fungsi sederhana, diskretisasi dengan substitusi aproksimasi ke dalam persamaan atur aliran dan manipulasi matematis lanjut, dan solusi persamaan-persamaan aljabar. Perbedaan utama di antara ketiga macam teknik adalah pada cara aproksimasi variabel-variabel aliran dan proses diskretisasi. Pada setiap simulasi yang dilakukan pada penelitian ini akan dilakukan dengan jumlah iterasi sebanyak 200.



Gambar 4. 9 Proses iterasi

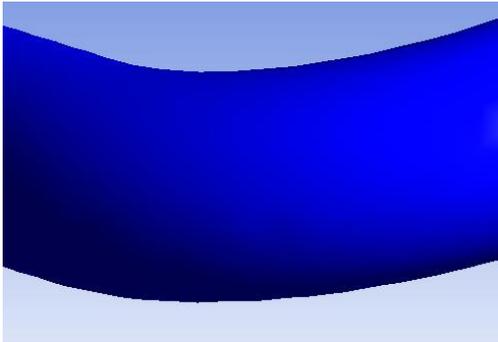
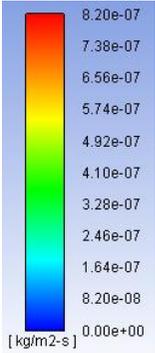
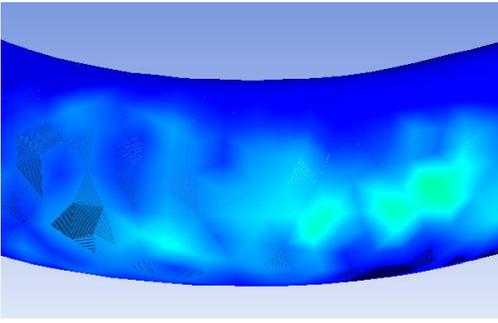
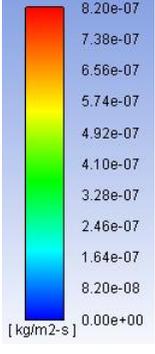
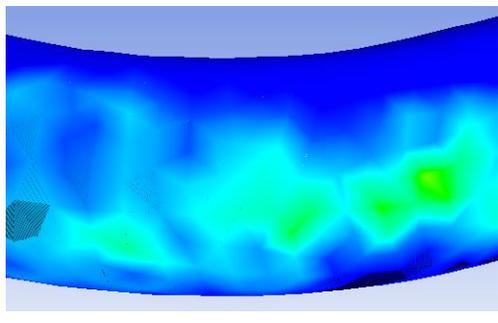
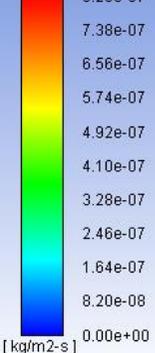
4.4.3 Post Prosesor

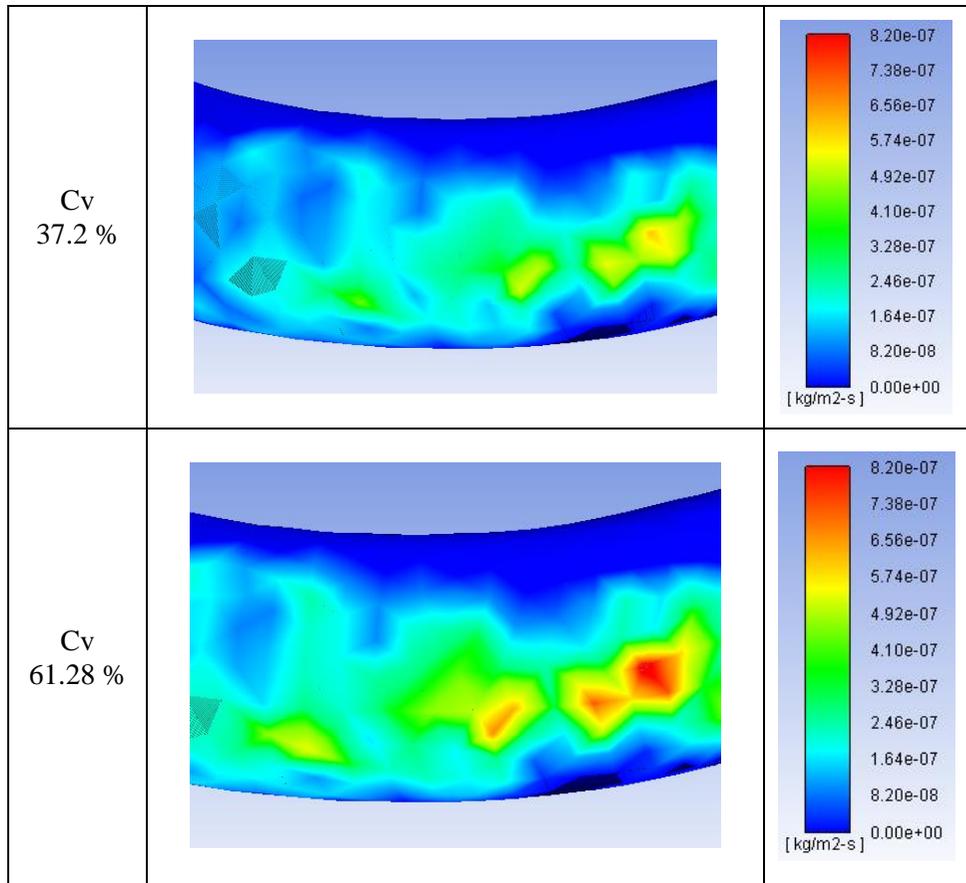
Setelah selesai melakukan proses *solver* atau *processing* pada model. Maka akan didapat nilai dari laju erosi dan kontur dari nilai laju erosi pada belokan pipa. Hasil dari simulasi akan dijelaskan pada sub-bab 4.4.4 – 4.4.6.

4.5 Laju Erosi Terhadap Variasi Slurry dan Sudut Belok

Pipa HPDE dengan sudut belok 15°, 30°, 45°, 60°, dan 90° akan dialiri lima variasi nilai *concentration of weight* (C_w) slurry sebesar 0%, 20%, 40%, 60%, 80% dan diameter pasir senilai 0.14 mm (140 μm). Setelah melakukan simulasi akan didapatkan data berupa nilai dan kontur laju erosi dengan slurry pada pipa. Tabel 4.11 memperlihatkan gambar kontur dari pipa dengan sudut 90° yang dialiri oleh lima variasi slurry. Untuk gambar kontur laju erosi pada sudut 15°, 30°, 45°, dan 60°, dan 90° ditampilkan pada lampiran.

Tabel 4. 11 Kontur nilai laju erosi pada pipa dengan sudut belok 90°

Slurry	Sudut 90°	
Cv 0 %		
Cv 8.98 %		
Cv 20.84 %		



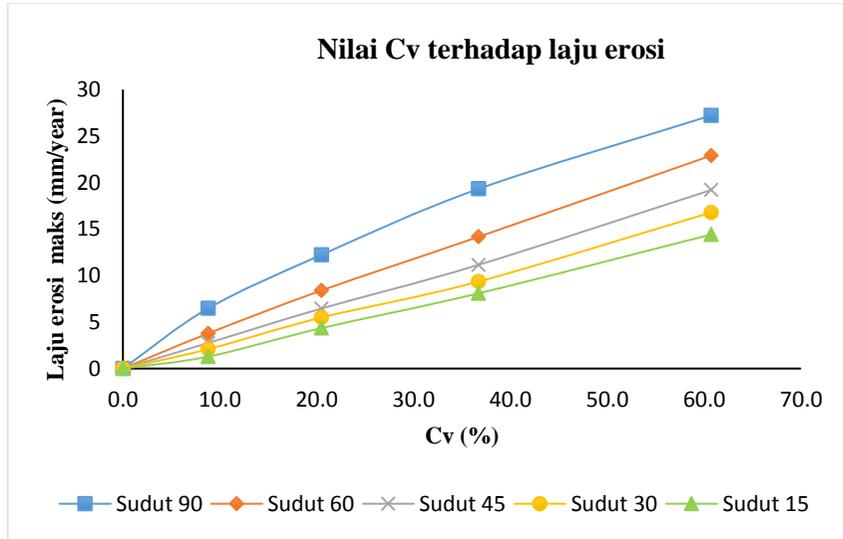
Dari gambar pada tabel 4.11 bisa dilihat gambar berupa kontur dan nilai dari laju erosi. Nilai dari laju erosi tertinggi pada saat pipa dialiri dengan C_w *slurry* 80% memiliki nilai laju erosi maksimal sebesar $8.54 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$. Dan pipa tidak mengalami erosi pada saat dialiri dengan air bersih. Nilai tersebut akan dikonversi menjadi (mm/tahun) dengan dilakukan pengalihan dengan nilai densitas dari pipa HDPE dan dilakukan pengorvesian satuan. Nilai maksimal laju erosi dari masing-masing variasi *slurry* dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Nilai laju erosi maksimal pada pada masing-masing sudut belok

Sudut 90°						
Cw (%)	Cv (%)	Mass flow pasir (kg/s)	V (m/s)	Laju erosi maks (kg/m ² s)	Laju erosi maks (mm/s)	Laju erosi maks (mm/year)
0	0.00	0.000	4.672	0	0	0
20	8.98	88.902	4.651	1.95E-07	2.05E-07	6.4745
40	20.84	205.430	4.630	3.68E-07	3.88E-07	12.2260
60	37.22	365.222	4.609	5.82E-07	6.13E-07	19.3199
80	61.28	598.473	4.587	8.20E-07	8.63E-07	27.2205

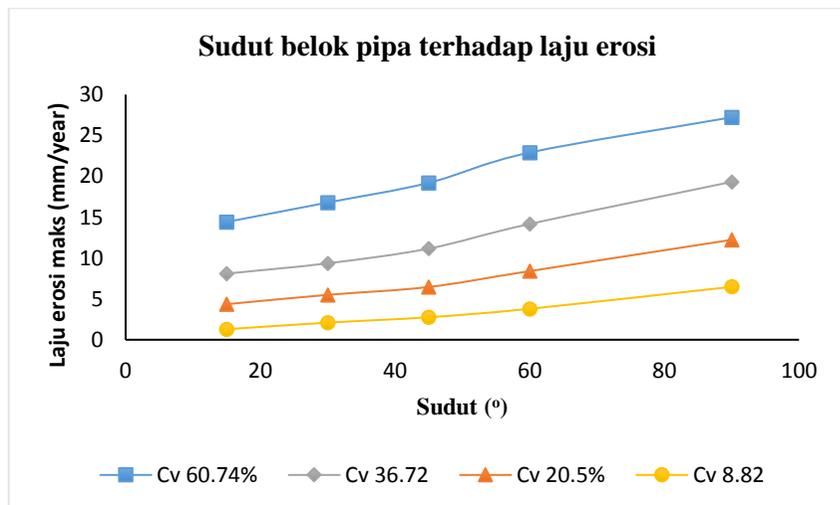
Sudut 60°						
Cw (%)	Cv (%)	Mass flow pasir (kg/s)	V (m/s)	Laju erosi max (kg/m ² s)	Laju erosi max (mm/s)	Laju erosi max (mm/year)
0	0.00	0.00	4.672	0	0	0
20	8.98	88.90	4.651	1.14E-07	1.20E-07	3.78432
40	20.84	205.43	4.630	2.53E-07	2.66E-07	8.39853
60	37.23	365.22	4.609	4.27E-07	4.49E-07	14.1679
80	61.29	598.47	4.587	6.90E-07	7.26E-07	22.9051
Sudut 45°						
Cw (%)	Cv (%)	Mass flow pasir (kg/s)	V (m/s)	Laju erosi max (kg/m ² s)	Laju erosi max (mm/s)	Laju erosi (mm/year)
0	0.00	0.0	4.672	0	0	0
20	8.98	88.9	4.651	8.30E-08	8.74E-08	2.75525
40	20.84	205.4	4.630	1.95E-07	2.05E-07	6.45658
60	37.23	365.2	4.609	3.36E-07	3.54E-07	11.1537
80	61.29	598.5	4.587	5.78E-07	6.09E-07	19.2004
sudut 30°						
Cw (%)	Cv (%)	Mass flow pasir (kg/s)	V (m/s)	Laju erosi (kg/m ² s)	Laju erosi (mm/s)	Laju erosi (mm/year)
0	0.00	0.0	4.672	0	0	0
20	8.98	88.9	4.651	6.30E-08	6.63E-08	2.091334
40	20.84	205.4	4.630	1.65E-07	1.74E-07	5.490583
60	37.23	365.2	4.609	2.82E-07	2.97E-07	9.354573
80	61.29	598.5	4.587	5.06E-07	5.32E-07	16.78711
Sudut 15°						
Cw (%)	Cv (%)	Mass flow pasir (kg/s)	V (m/s)	Laju erosi (kg/m ² s)	Laju Erosi (mm/s)	Laju erosi (mm/year)
0	0.00	0.0	4.672	0	0	0
20	8.98	88.9	4.651	3.87E-08	4.08E-08	1.28567
40	20.84	205.4	4.630	1.31E-07	1.38E-07	4.34864
60	37.23	365.2	4.609	2.44E-07	2.57E-07	8.08981
80	61.29	598.5	4.587	4.34E-07	4.57E-07	14.41361

Dari tabel diatas akan dibuat grafik dari laju erosi maksimal yang dialami oleh masing-masing variasi belokan pipa akibat benturan dari partikel padat (pasir). Hal ini untuk memudahkan analisis pengaruh sudut belok pada pipa dan variasi konsentrasi *slurry*. Pengaruh konsentrasi *slurry* terhadap laju erosi ditunjukkan grafik pada gambar 4.10.



Gambar 4. 10 Grafik nilai Cv terhadap laju erosi

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa konsentrasi volume dari *slurry* (C_v) berbanding lurus terhadap laju erosi pada nilai kecepatan yang relatif hampir sama. Semakin besar kandungan konsentrasi dari partikel padat (pasir) dalam *slurry* maka semakin tinggi juga laju erosinya. Dapat dilihat bahwa nilai laju erosi maksimal tertinggi yaitu pada C_v (*concentration of volume*) sebesar 60.74% dan sudut belok pipa 90° yaitu 27.22 mm/tahun. Sementara pada air bersih (*clear water*) tidak mengalami erosi.



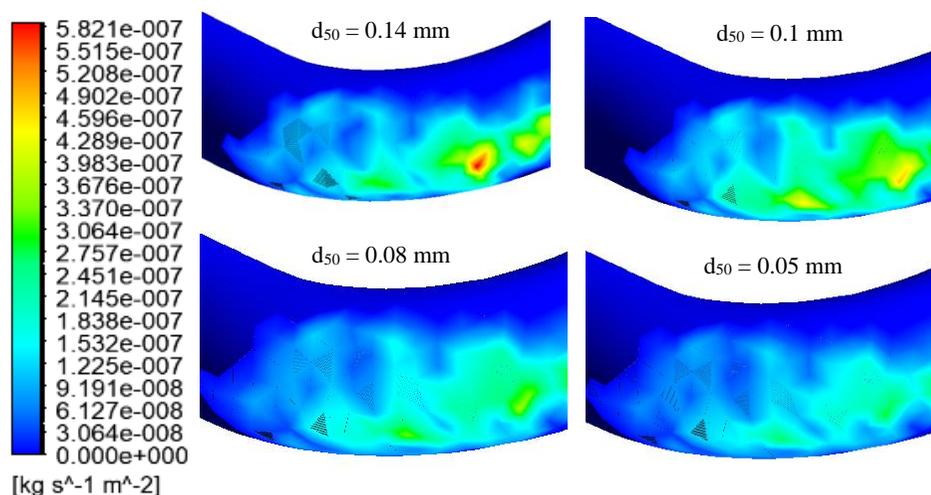
Gambar 4. 11 Sudut belok pipa terhadap laju erosi

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat grafik pengaruh sudut belok pada pipa HDPE yang dijamin pipa *discharge slurry*. Besar sudut belok pada pipa berbanding

lurus terhadap laju erosi hal itu dapat dilihat pada grafik yang menunjukkan bahwa pada empat variasi *slurry* yang semuanya mengalami kenaikan laju erosi. Nilai dari laju erosi maksimal pada sudut belok pipa 90° yaitu pada Cv 8.82% sebesar 6.47 mm/tahun, Cv 20.5% sebesar 12.23 mm/tahun, Cv 36.72% sebesar 19.13 mm/tahun dan Cv 60.74% sebesar 27.22 mm/tahun.

4.6 Laju Erosi Terhadap Variasi Diameter Pasir pada Slurry

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengaruh diameter partikel padat (pasir) terhadap laju erosi. Akan dilakukan empat kali percobaan menggunakan ukuran pasir yang berbeda yaitu 0.05mm, 0.08mm, 0.1mm, dan 0.14mm. Setelah melakukan simulasi menggunakan pipa dengan sudut belok 90° dengan konsententrasi partikel Cv 36.7% dan kecepatan *slurry* 4.6 m/s maka akan didapat kontur dari keempat simulasi tersebut yang ditampilkan pada gambar 4.12.

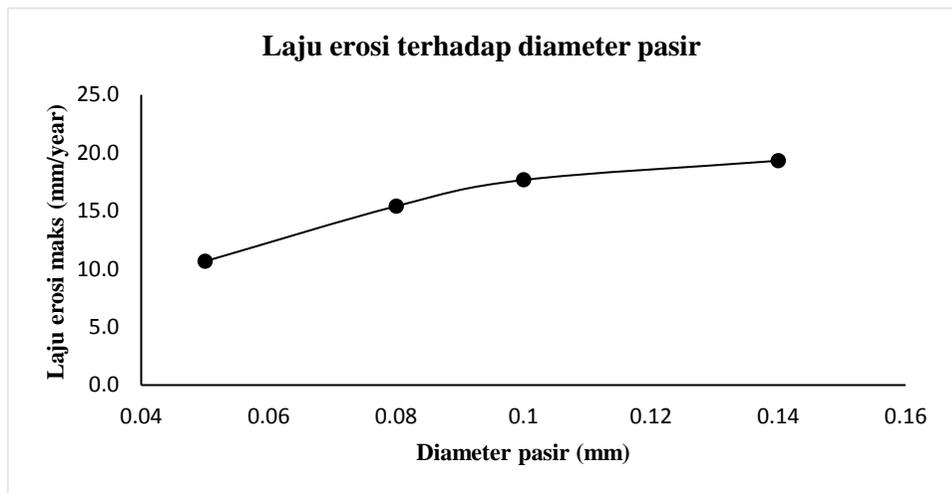


Gambar 4. 12 Kontur laju erosi pada empat macam variasi pasir

Dari kontur diatas dapat dilihat liat prediksi nilai laju erosi maksimal pada keempat simulasi menggunakan CFD. Dari kontur tersebut juga dapat dilihat persebaran niali laju erosi pada sudut belok pipa. Untuk nilai prediski laju erosi pada simulasi ini dapat dilihat pada tabel 4.13.

Tabel 4. 13 Nilai laju erosi maksimal pada empat variasi ukuran pasir

Sudut 90; Cv 36.72%; Cw 60%			
d_{50} (mm)	V (m/s)	Laju erosi maks (kg/m ² s)	Laju erosi maks (mm/year)
0.05	4.6	3.21E-07	10.6558
0.08	4.6	4.64E-07	15.4028
0.1	4.6	5.32E-07	17.6602
0.14	4.6	5.82E-07	19.3199

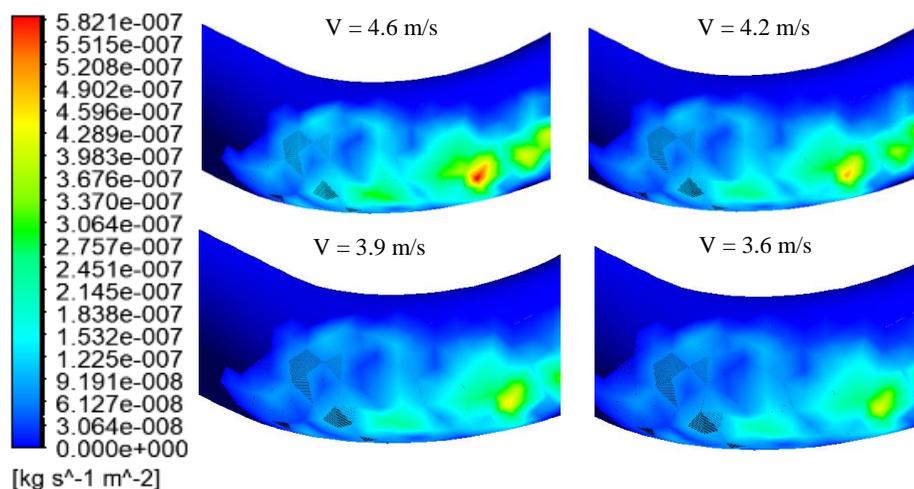


Gambar 4. 13 Grrafik laju erosi terhadap ukuran pasir

Dari grafik pada gambar 4.14 dapat dilihat hubungan besar diameter partikel padat (pasir) dalam *slurry* yaitu berbanding lurus. Nilai laju erosi tertinggi yaitu 19.32 mm/tahun ketika pasir berdiameter 0.14 mm. dan nilai laju erosi terendah pada saat pasir pada *slurry* berdiameter 0.05 mm yaitu 10.66 mm/tahun.

4.7 Laju erosi Terhadap Variasi Kecepatan Slurry

Gambar 4.15 menunjukkan kontur dari laju erosi pada pipa dengan sudut belok 90° dan Cv dari *slurry* sebesar 36.72% yang disimulasikan dengan empat kecepatan yang berbeda. Hal ini bertujuan untuk mengetahui hubungan laju erosi terhadap kecepatan *slurry*.

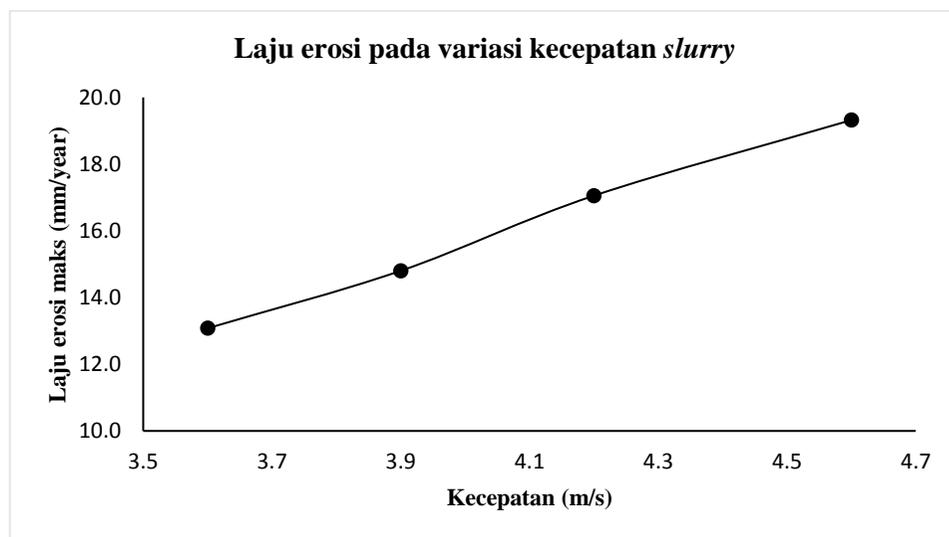


Gambar 4. 14 Kontur laju erosi pada empat simulasi kecepatan berbeda

Tabel 4. 14 Nilai laju erosi maksimal pada empat variasi kecepatan *slurry*

Sudut 90°; Cv 36.72%; Cw 60%			
V (m/s)	d ₅₀ (mm)	Laju erosi maks (kg/m ² s)	Laju erosi maks (mm/year)
3.6	0.14	3.94E-07	13.0791
3.9	0.14	4.46E-07	14.8016
4.2	0.14	5.14E-07	17.0526
4.6	0.14	5.82E-07	19.3199

Setelah melakukan pembacaan nilai laju erosi pada CFD-*post* didapat nilai dari simulasi. Nilai laju erosi maksimal pada kecepatan yang divariasikan dapat dilihat pada tabel 4.13 dan untuk melihat hubungan antara nilai laju erosi dapat dilihat pada grafik sebagai berikut.

Gambar 4. 15 Grafik laju erosi terhadap kecelaptan *slurry*

Grafik pada gambar 4.16 menunjukkan bahwa hubungan antara kecepatan *slurry* terhadap laju erosi berbanding lurus. Dari grafik tersebut juga disimpulkan bahwa semakin besar kecepatan *slurry* maka laju erosi yang dialami oleh sudut pada pipa juga semakin tinggi. Dapat dilihat bahwa laju erosi tertinggi dialami pada saat kecepatan tertinggi pula yaitu pada kecepatan 4.6 m/s dengan laju erosi maksimal sebesar 19.32 mm/tahun. Peningkatan kecepatan fluida (air) dapat mengakibatkan peningkatan laju erosi yang cukup besar saat kecepatan partikel (pasir) mendekati atau sama dengan kecepatan fluida.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis data yang menggunakan metode simulasi CFD (*computational fluyd dinamic*), maka kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini sebagaimana berikut:

1. Nilai laju erosi pada pipa HDPE yang dialiri *slurry* berbanding lurus dengan konsentrasi *slurry* dan sudut belok pipa. Hal ini dapat dilihat pada hasil penelitian yaitu semakin besar kandungan volume dari partikel padat (pasir) dalam *slurry* maka semakin besar juga laju erosinya.
2. Dengan menggunakan metode CFD pada penelitian ini nilai laju erosi terbesar dialami pada saat C_v (*consentration of volume*) *slurry* 60.74% dan pada belokan pipa 90°, yaitu sebesar 27.22 mm/tahun. Dan terjadi penurunan laju erosi sebesar sebesar 29%, 55%, dan 76% pada masing-masing nilai konsentrasi *slurry* (C_v) sebesar 36.74%, 20.5%, dan 8.81%.
3. Ukuran diameter (d_{50}) pasir mempengaruhi nilai laju erosi yang terjadi, semakin besar partikel (pasir) dalam *slurry*, semakin besar laju erosi yang terjadi dan berlaku sebaliknya.
4. Kecepatan *slurry* berbanding lurus dengan laju erosi yang dialami oleh pipa. Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada konsentrasi *slurry* (C_v) 36.72% dan sudut belok (90°) yang sama namun menggunakan empat varisasi kecepatan yang berbeda. Dengan kecepatan *slurry* 3.6 m/s, 3,9 m/s, 4.2 m/s dan 4.6 m/s mengalami laju erosi masing-masing 13.08 mm/tahun, 14,8 mm/tahun, 17.05 mm/ tahun dan 19.32 mm/tahun. Peningkatan kecepatan fluida (air) dapat mengakibatkan peningkatan laju erosi yang cukup besar saat kecepatan partikel (pasir) mendekati atau sama dengan kecepatan fluida.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan penulis merasa masih terdapat beberapa kekurangan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Namun kekurangan tersebut dapat dijadikan saran untuk dilakukan pengembangan penelitian yang akan datang. Untuk penyempurnaan penulis menyarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Diperlukan pendetailan pada hasil *meshing* dan lebih banyak iterasi supaya keseimbangan pada proses simulasi dapat tercapai sehingga hasil data yang didapatkan dapat lebih valid.
2. Perlu dilakukan simulasi menggunakan *software* lain untuk memvalidasi dan membandingkan hasil dari simulasi.
3. Perlu dilakukan proses validasi menggunakan percobaan secara langsung atau menggunakan hitungan secara matematis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS. (2015). ANSYS Fluent Suport.
- ANSYS. (2018). ANSYS Help Viewer version 18.0.
- Brown, N. P., & Heywood, N. I. (1991). Slurry Handling: Design of Solid-Liquid Systems. *Essex: Elsevier Science Publishers LTD*, 3.
- DNV. (2007). Recommended Practice RPO501 Erosive Wear In Piping Systems. 10.
- Durand, R., & Condolios, E. (1952). The hydraulic Transport of Coal and Solid Materials in Pipes. *Laboratoire*.
- Eltvik, M. (2013). Sediment erosion in Francis Turbines. *Doctoral Thesis. Norwegian University of Science and Technology*.
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 3, 87-103.
- GLYGT. (2009). Slurry handbook Guidelines for slurry pumping. 18-19.
- ISO-14688-1. (2002). Geotechnical Investigation and Testing – Identification and Classification of Soil.
- Madsuki, S. (2009). Bahan Ajar Mata Kuliah Pengolahan Air Minum. *Jurusan Teknik Lingkungan, FTSP, ITS Surabaya*.
- Mahendra, J. (2014). Cutter Suction Dredger Dan Jenis Material (Pada Pekerjaan Capital Dredging Pembangunan Pelabuhan Teluk Lamongan). *Jurnal Konstruksia*, 6, 33-43.
- McLaurry, B. S. (1996). Modeling erosion in chokes. *Proceeding of ASME Fluids Eng. Summer Meeting*.
- Meng, H., & Ludena, K. (1995). ‘Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*, 181-183, 443-457.
- NFOFM. (2005). Handbook of Multiphase FLOW Metering. 30.
- Oka, Y., & Yoshida, T. (2005). Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact. Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage. *Wear*, 259, 102-109.
- Oka, Y., Olmogi, H., Hosokawa, T., & Matsumura, M. (1997). The Impact angel dependence of erosion damage caused by solid particle. *Wear*, 203-204, 573-579.

- Roitto, V. (2014). Slurry Flows in Metallurgical Process Engineering – Development of Tools and Guidelines. *Master's Thesis. Aalto University, 6.*
- WARMAN. (2002). Slurry Pumping Manual. *A Technical Application Guide For Users Of Centrifugal Slurry Pumps And Slurry Pumping Systems.*
- Wasp, E. j. (1977). Solid-liquid Flow - Slurry Pipeline Transportation Series on Bulk. *1.*
- Wood, R., Miles, T., & Ganeshalingham, J. (2001). Upstream swirlinduction for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends. *ear, 25, 770-778.*

LAMPIRAN

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

PERHITUNGAN
LIMITING SETTLING
VELOCITY

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



**DURAND'S FORMULA FOR
DETERMINING THE LIMITING SETTLING
VELOCITY (VL)**

Project	Skripsi
Semester	Genap
Tahun	2017/2018
Rev	0

A. Menghitung Nilai Cv

Cv adalah nilai konsentrasi volume dari partikel padat dari *slurry*. Untuk menghitung Cv menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C_V = \frac{100 \frac{C_w}{\rho_s}}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{100 - C_w}{\rho_l}}$$

Diketahui :

- Concentration of solids by weight (Cw)* = 0%; 20%; 40%; 60%; 80%
- Densitas pasir (ρ_s) = 2650 kg/m³
- Densitas air (ρ_l) = 1025 kg/m³

Contoh perhitungan Cv pada Cw 20%:

$$C_V = \frac{100 \frac{20}{2650}}{\frac{20}{2650} + \frac{100 - 20}{1025}} = \frac{0.7547}{0.007547 + 0.07805} = 8.8172$$

Hasil perhitungan:

Cw (%)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_l (kg/m ³)	Cv (%)
0	2650	1025	0
20	2650	1025	8.8172
40	2650	1025	20.5
60	2650	1025	36.716
80	2650	1025	60.741

B. Menghitung *settling velocity factor*

Menggunakan persamaan

$$FL = 0.4794 + (0.5429 \times (0.01 C_V)^{0.1058} \times (\log(d_{50}) - 1))$$

Dimana:

- Concentration of solids by volume (Cv)* = 0%; 8.81%; 20.5%; 36.716%; 60.714%
- Diameter pasir (d_{50}) = 20 μ m; 50 μ m; 80 μ m; 140 μ m



**DURAND'S FORMULA FOR
DETERMINING THE LIMITING SETTLING
VELOCITY (VL)**

Project	Skripsi
Semester	Genap
Tahun	2017/2018
Rev	0

Contoh perhitungan F_L pada kondisi CV 8.98% dan diameter pasir 0.02mm

$$\begin{aligned}
 FL &= 0.4794 + (0.5429 \times (0.01 \times 20)^{0.1058} \times (\log(0.00002)-1)) \\
 &= 0.4794 + (0.5429 \times 0.9887 \times 0.30103) \\
 &= 0.4794 + 0.1264 \\
 &= 0.6058
 \end{aligned}$$

Tabel hasil perhitungan:

D ₅₀ = 20 μm			D ₅₀ = 50 μm		
Cw (%)	Cv (%)	FL	Cw (%)	Cv (%)	FL
0	0	0.4794	0	0	0.4794
20	8.8172	0.6058	20	8.8172	0.7729
40	20.5	0.6176	40	20.5	0.8003
60	36.716	0.6264	60	36.716	0.8207
80	60.741	0.6344	80	60.741	0.8394

D ₅₀ = 80 μm			D ₅₀ = 140 μm		
Cw (%)	Cv (%)	FL	Cw (%)	Cv (%)	FL
0	0	0.4794	0	0	0.4794
20	8.8172	0.8586	20	8.8172	0.9606
40	20.5	0.894	40	20.5	1.0056
60	36.716	0.9204	60	36.716	1.039
80	60.741	0.9445	80	60.741	1.0697

C. Menghitung limiting settling velocity

Limiting settling velocity adalah kecepatan dimana partikel-partikel solid dalam slurry akan mengalami pengendapan di dasar pipa. Untuk menghitungnya menggunakan persamaan Durand

$$V_L = F_L \sqrt{2gD \frac{(S - S_I)}{S_I}}$$

Diketahui :

- Gaya gravitasi (g) = 9.8 m/s²
- Dimeter dalam pipa (D) = 0.3228 m
- Spesific garvity pasir (S) = 2.65
- Spesific garvity air (S_I) = 1.025



**DURAND'S FORMULA FOR
DETERMINING THE LIMITING SETTLING
VELOCITY (VL)**

Project	Skripsi
Semester	Genap
Tahun	2017/2018
Rev	0

Contoh perhitungan F_L pada kondisi CV 8.817% dan diameter pasir 0.02mm

$$Vl = 0.60 \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.3228 \frac{(2.65 - 1.025)}{1.025}}$$

$$Vl = 0.60 \sqrt{6.326 \times 1.607}$$

$$Vl = 0.60 \sqrt{10.165}$$

$$Vl = 0.60 \times 3.198$$

$$Vl = 1.919$$

Tabel hasil perhitungan:

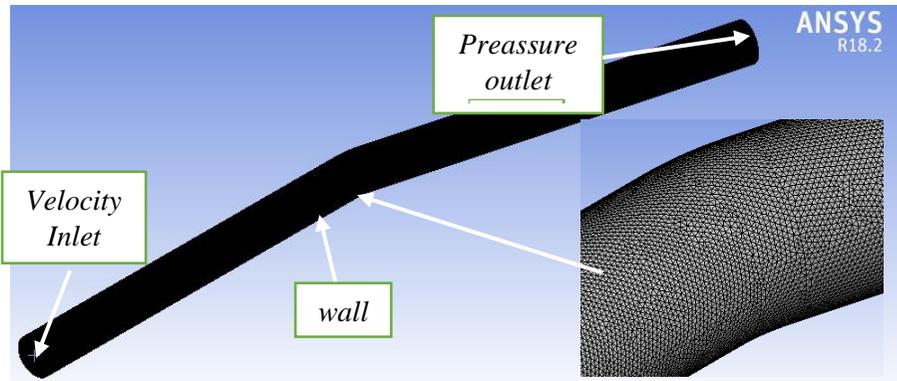
$D_{50} = 20 \mu\text{m}$				$D_{50} = 50 \mu\text{m}$			
Cw (%)	Cv (%)	FL	Vl (m/s)	Cw (%)	Cv (%)	FL	Vl (m/s)
0	0	0.4794	1.5183	0	0	0.4794	1.5183
20	8.8172	0.6058	1.9186	20	8.8172	0.7729	2.44781
40	20.5	0.6176	1.956	40	20.5	0.8003	2.5346
60	36.716	0.6264	1.9838	60	36.716	0.8207	2.59924
80	60.741	0.6344	2.0093	80	60.741	0.8394	2.65837

$D_{50} = 80 \mu\text{m}$				$D_{50} = 140 \mu\text{m}$			
Cw (%)	Cv (%)	FL	Vl (m/s)	Cw (%)	Cv (%)	FL	Vl (m/s)
0	0	0.4794	1.5183	0	0	0.4794	1.5183
20	8.8172	0.8586	2.7193	20	8.8172	0.9606	3.04245
40	20.5	0.894	2.8314	40	20.5	1.0056	3.18476
60	36.716	0.9204	2.9149	60	36.716	1.039	3.29075
80	60.741	0.9445	2.9913	80	60.741	1.0697	3.38771

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

**DETAIL *MESHING*
MODEL**

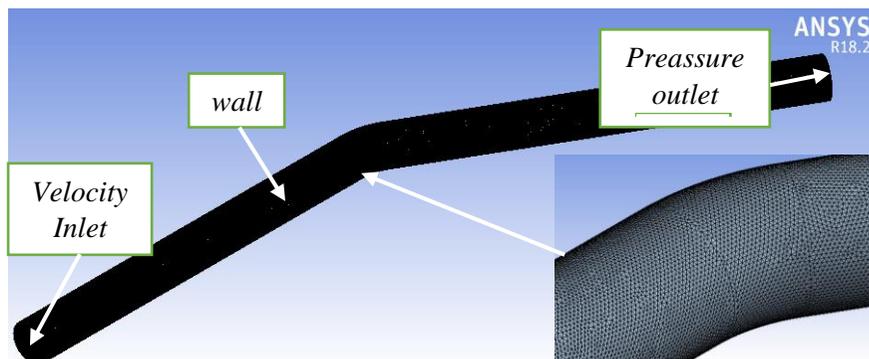
“Halaman ini sengaja dikosongkan”



Detail *meshing* pipa dengan sudut belok 15°

Spesifikasi *meshing* pipa dengan sudut belok 15°

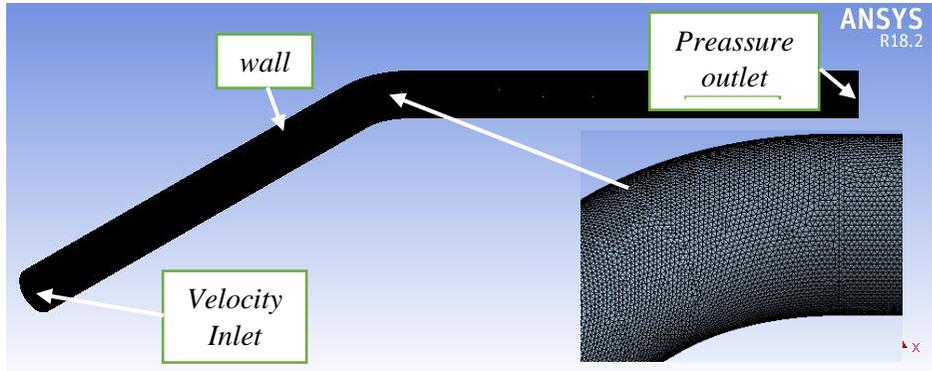
Detail Mesh	
<i>Size funtion</i>	<i>Proxiity and curvature</i>
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Min size</i>	<i>0.9014 mm</i>
<i>Element size</i>	<i>10 mm</i>
<i>Nodes</i>	<i>566040</i>
<i>Elements</i>	<i>1738409</i>



Detail *meshing* pipa dengan sudut belok 30°

Spesifikasi *meshing* pipa dengan sudut belok 30°

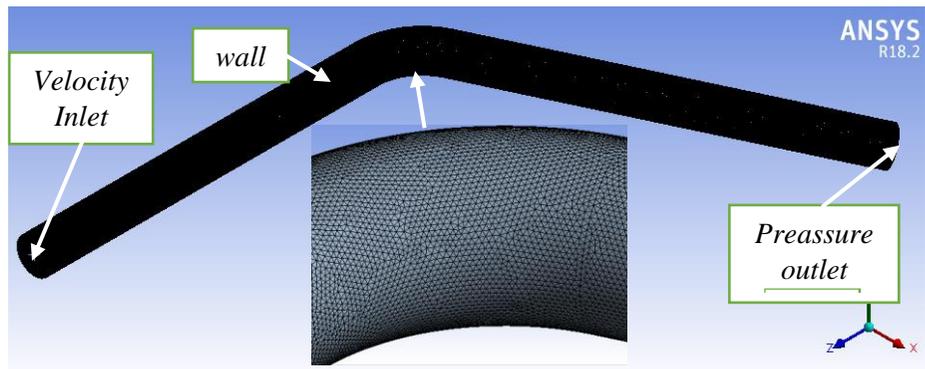
Detail Mesh	
<i>Size funtion</i>	<i>Proxiity and curvature</i>
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Min size</i>	<i>0.8851 mm</i>
<i>Element size</i>	<i>10 mm</i>
<i>Nodes</i>	<i>578885</i>
<i>Elements</i>	<i>1778195</i>



Detail *meshing* pada pipa dengan sudut belok 45°

Spesifikasi *meshing* pipa dengan sudut belok 45°

Detail Mesh	
<i>Size funtion</i>	<i>Proxiity and curvature</i>
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Min size</i>	<i>0.866 mm</i>
<i>Element size</i>	<i>10 mm</i>
<i>Nodes</i>	<i>590221</i>
<i>Elements</i>	<i>1803303</i>



Detail *meshing* pipa dengan sudut belok 60°

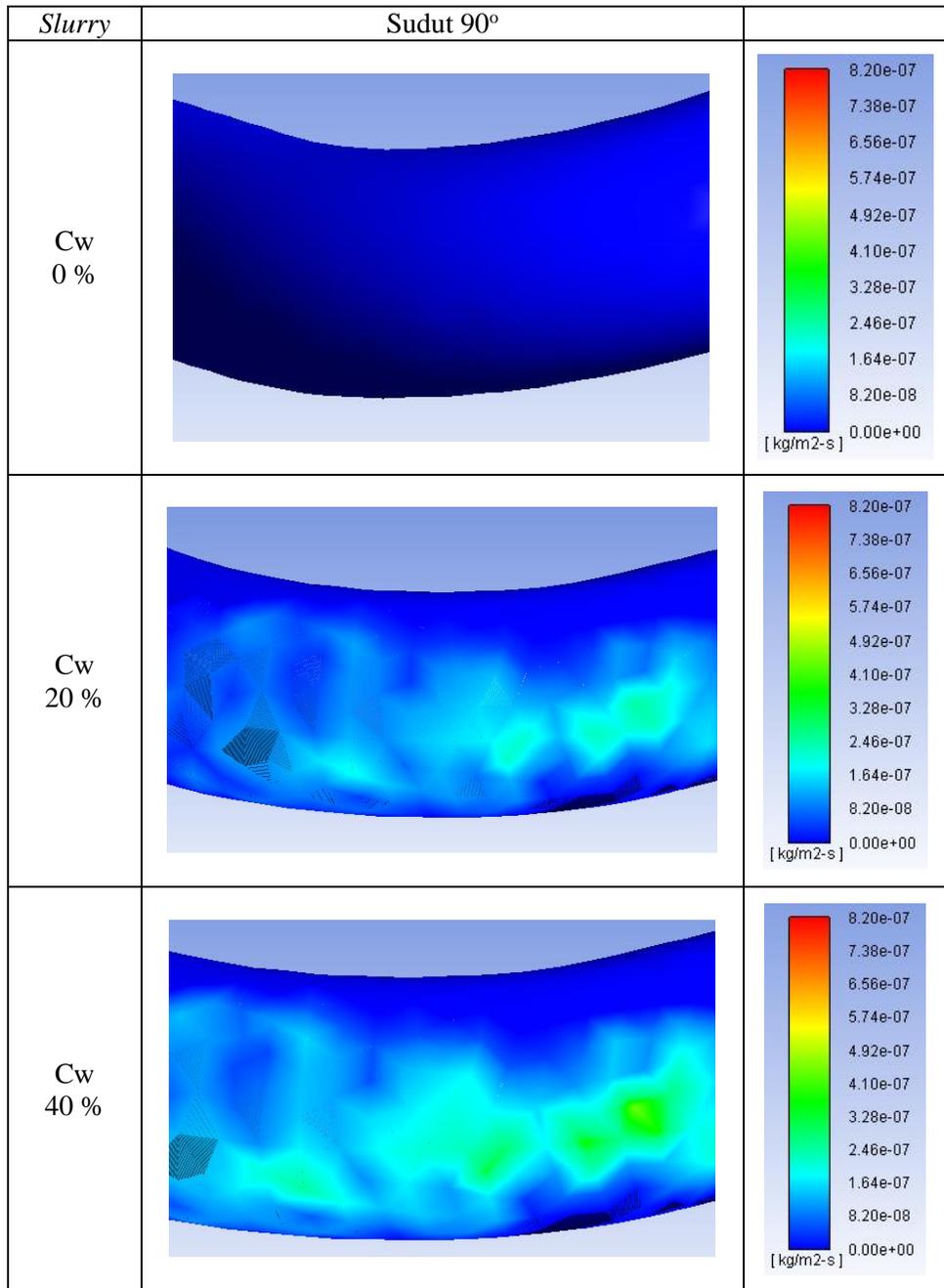
Spesifikasi *meshing* pipa dengan sudut belok 60°

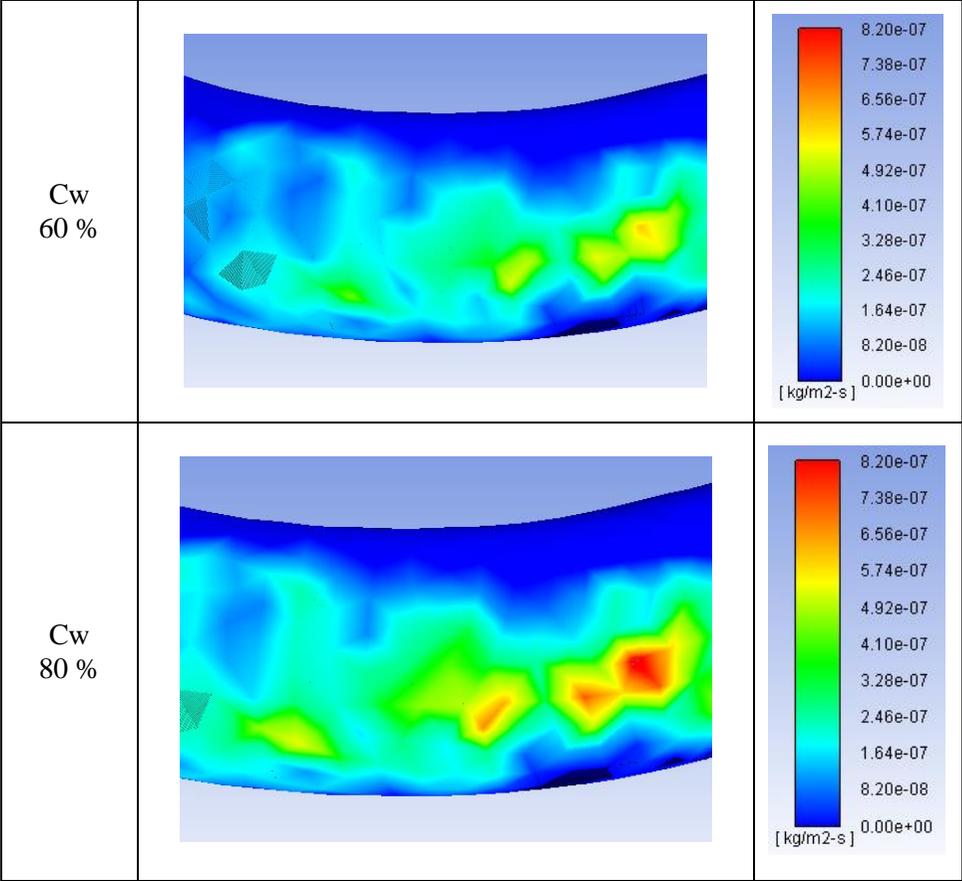
Detail Mesh	
<i>Size funtion</i>	<i>Proxiity and curvature</i>
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>High</i>
<i>Min size</i>	<i>0.8534 mm</i>
<i>Element size</i>	<i>10 mm</i>
<i>Nodes</i>	<i>589469</i>
<i>Elements</i>	<i>1838062</i>

**KONTUR HASIL
SIMULASI MODEL**

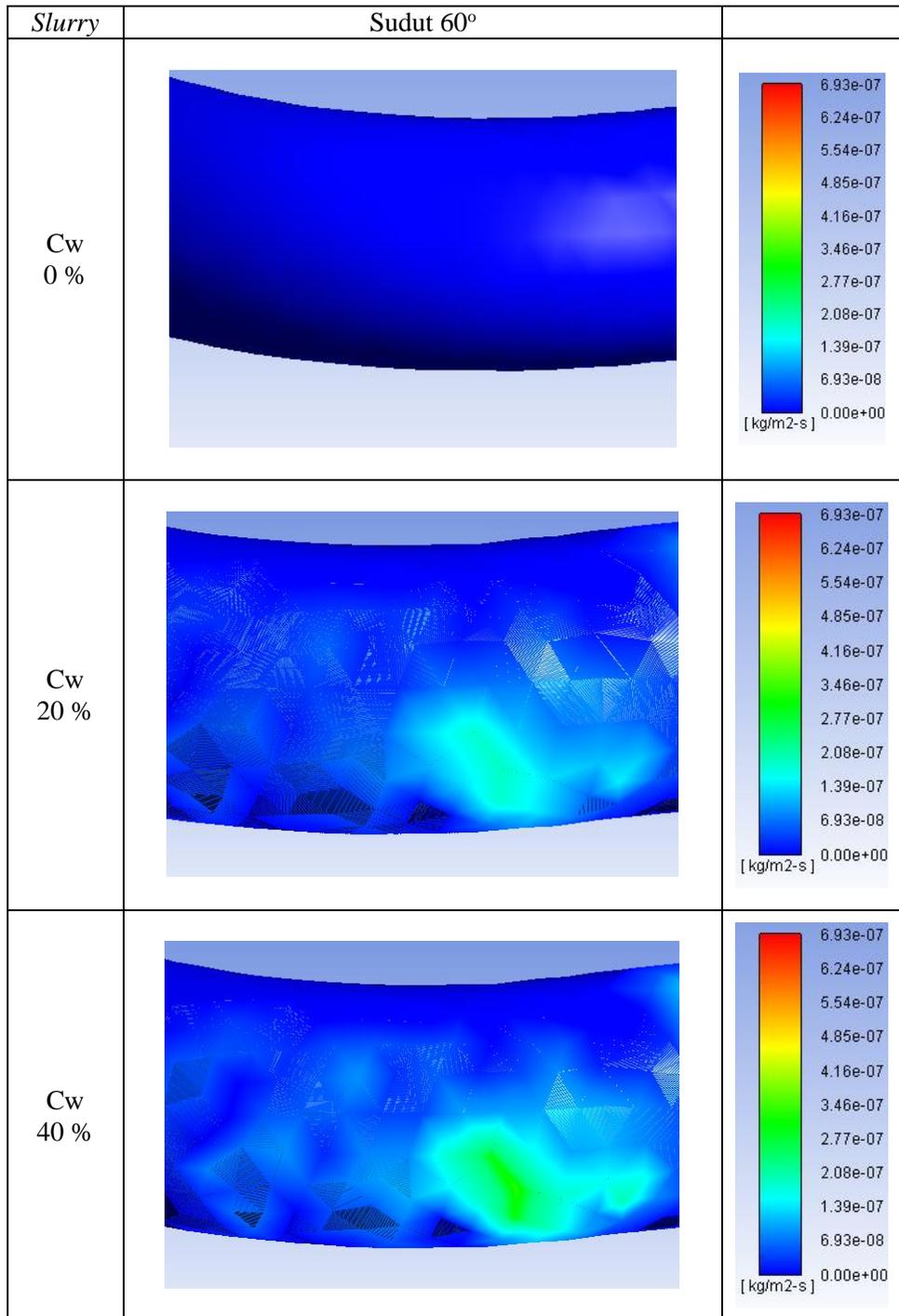
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

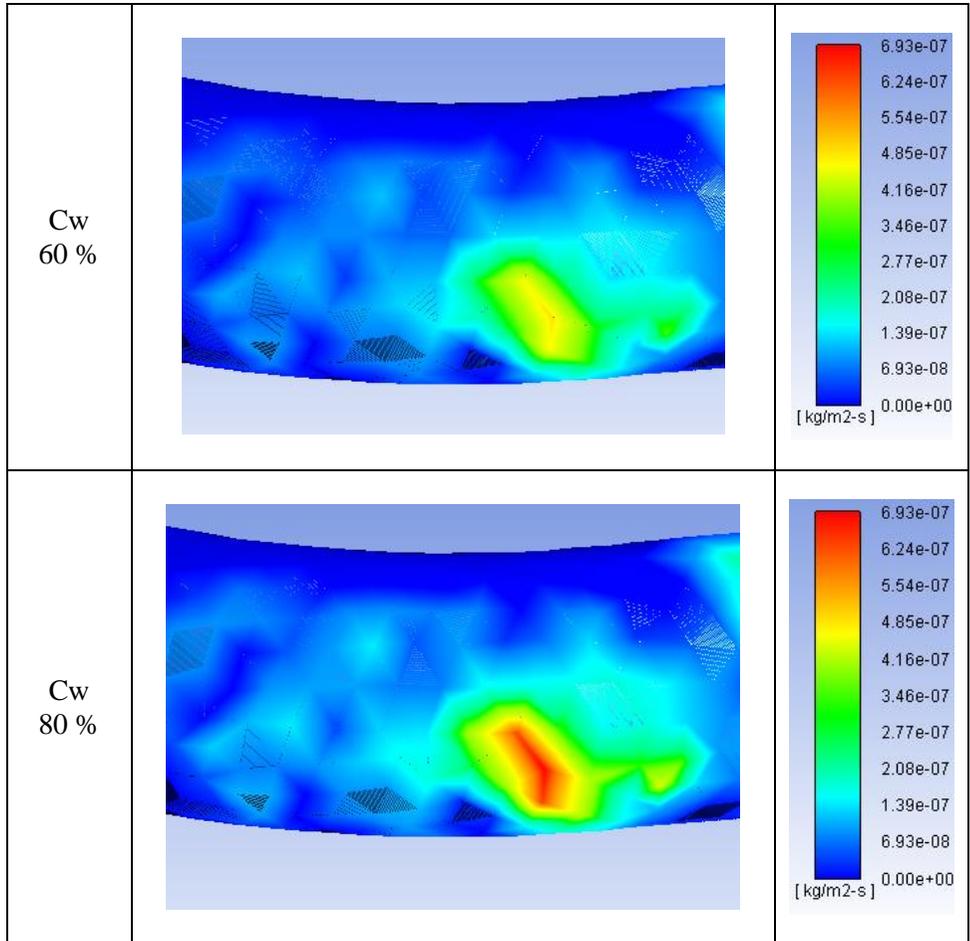
Kontur Pada Pipa Sudut Belok 90°



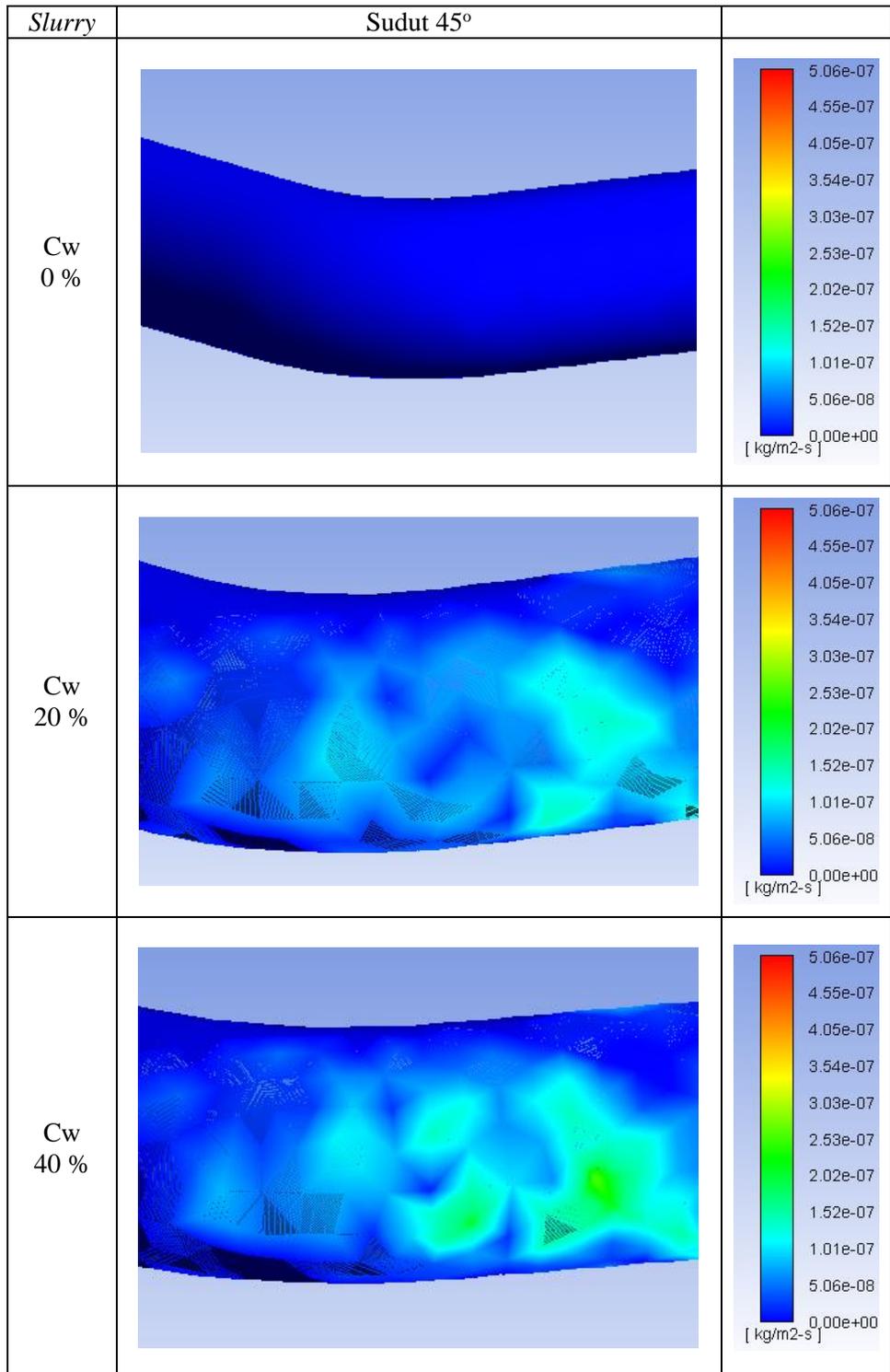


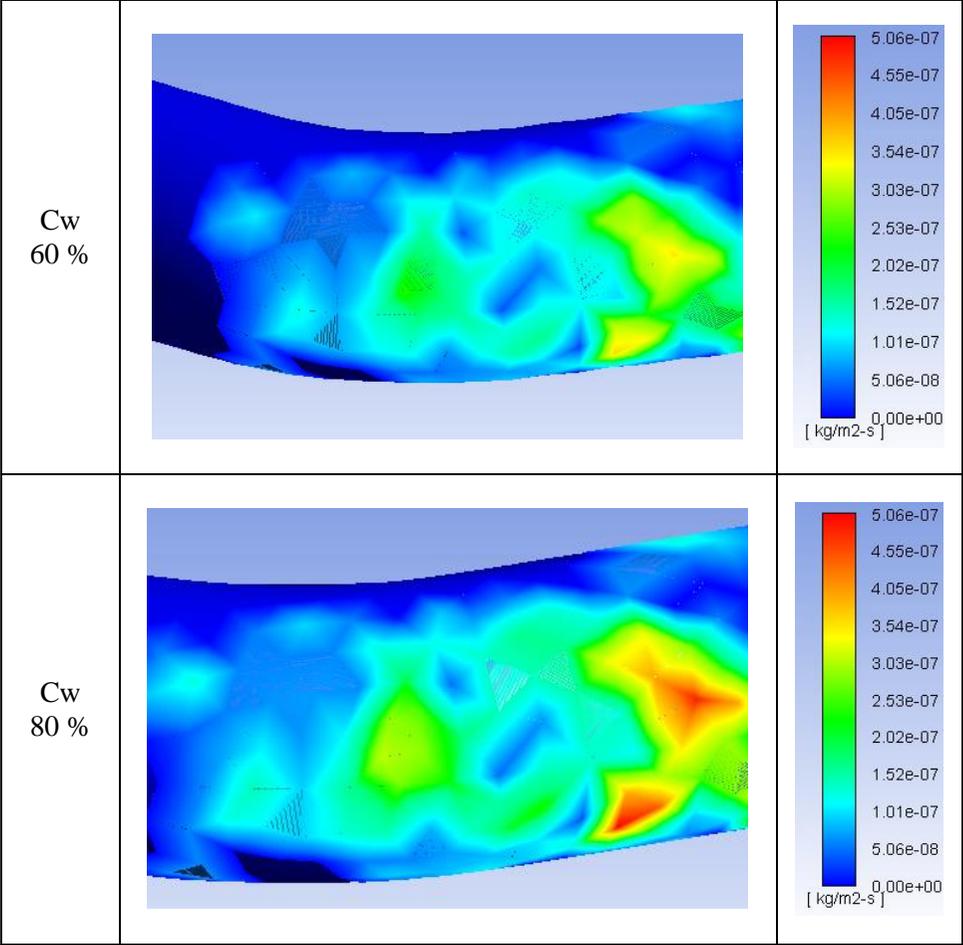
Kontur Pada Pipa Sudut Belok 60°



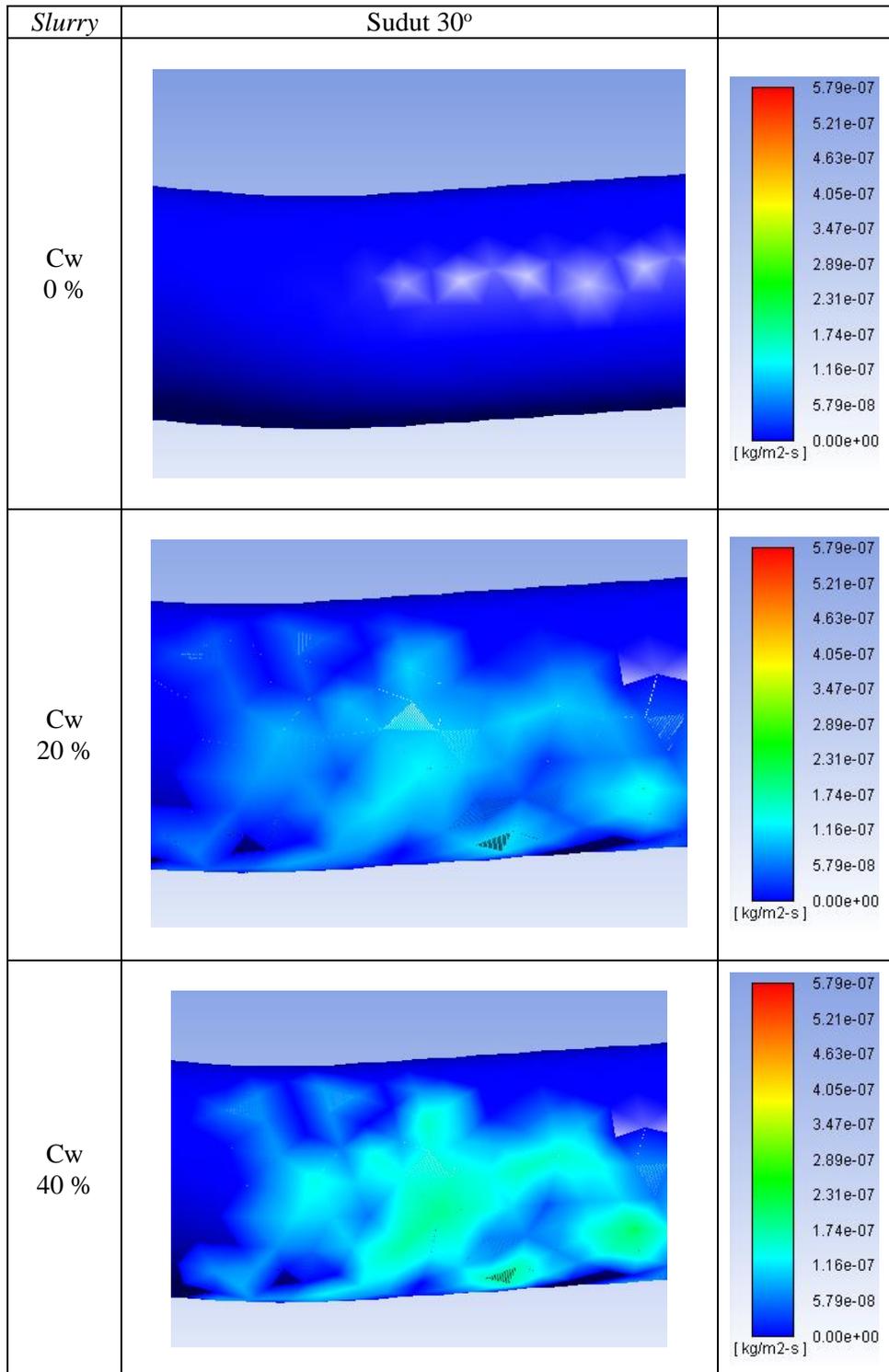


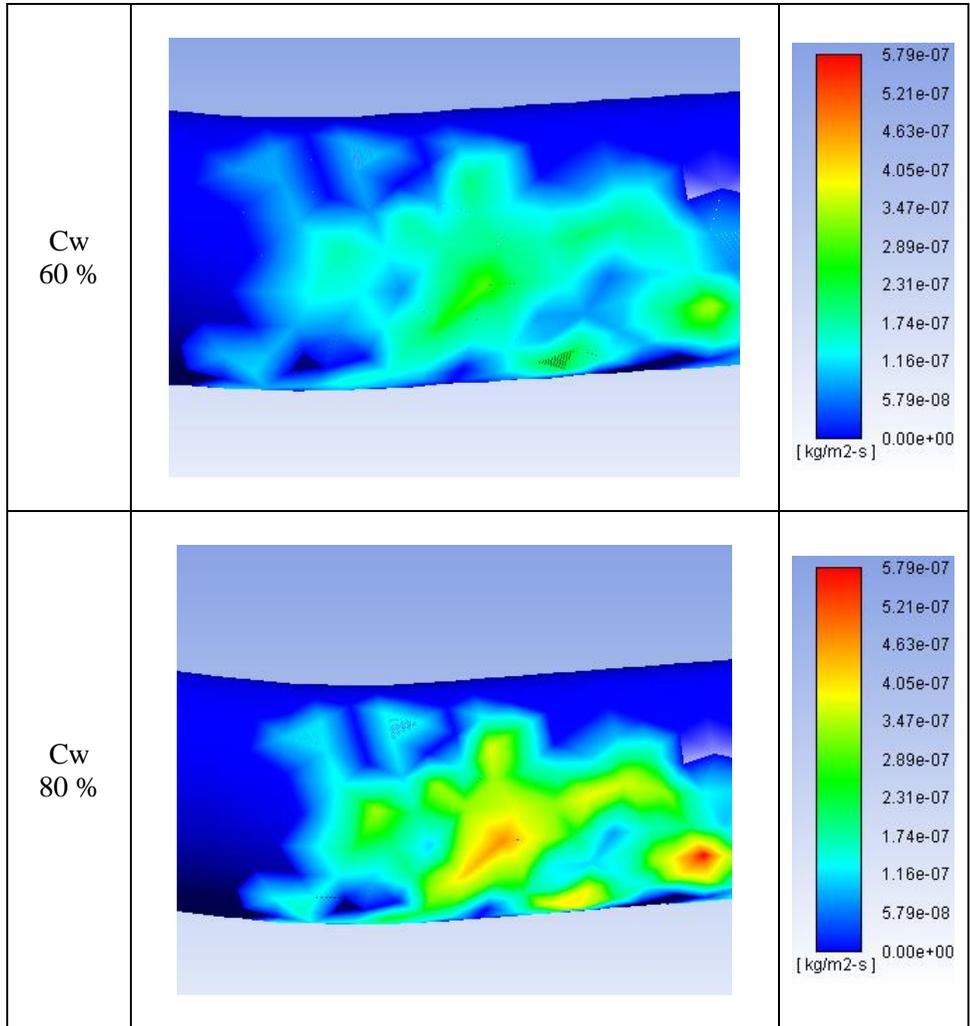
Kontur Pada Pipa Sudut Belok 45°



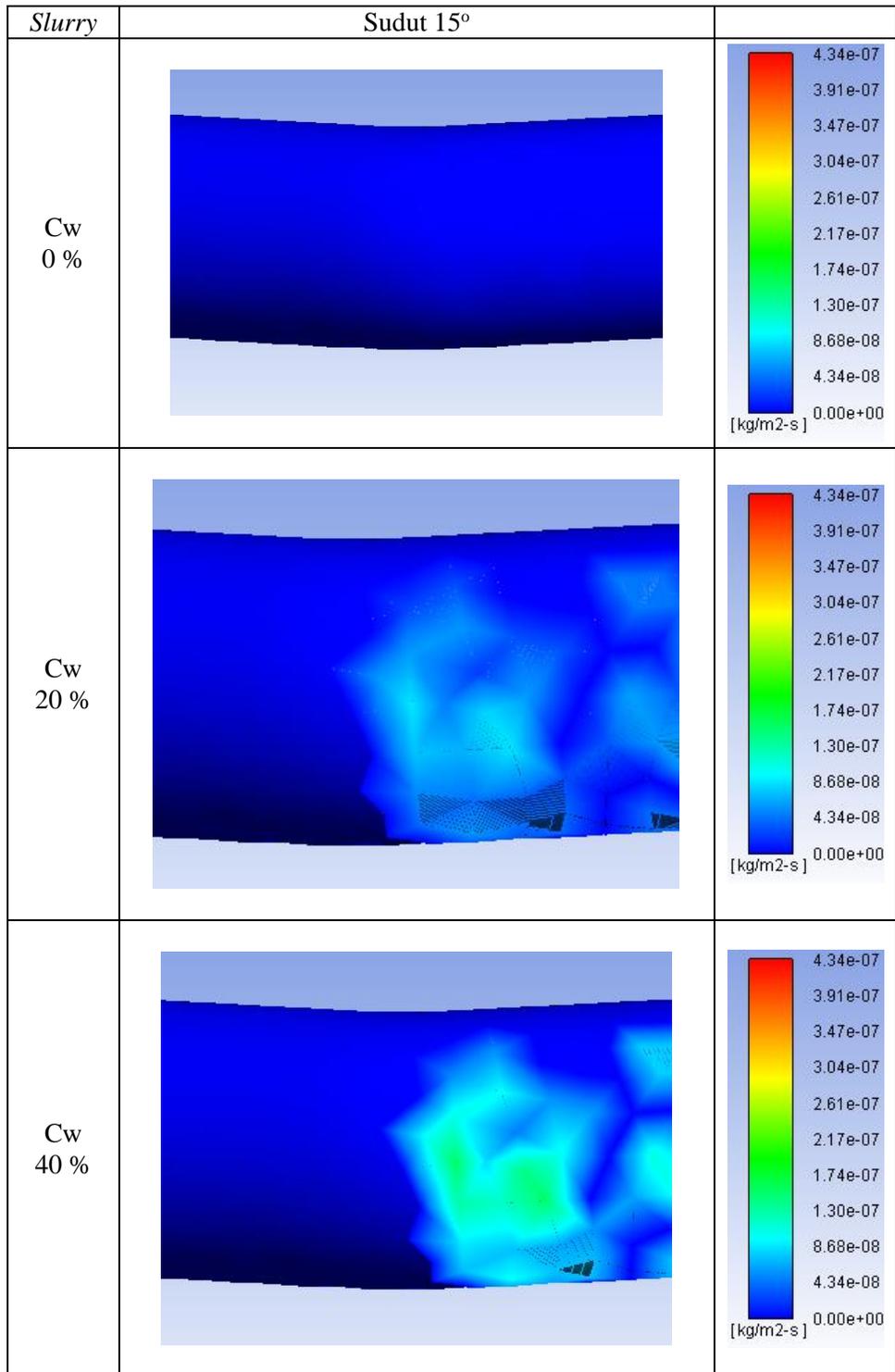


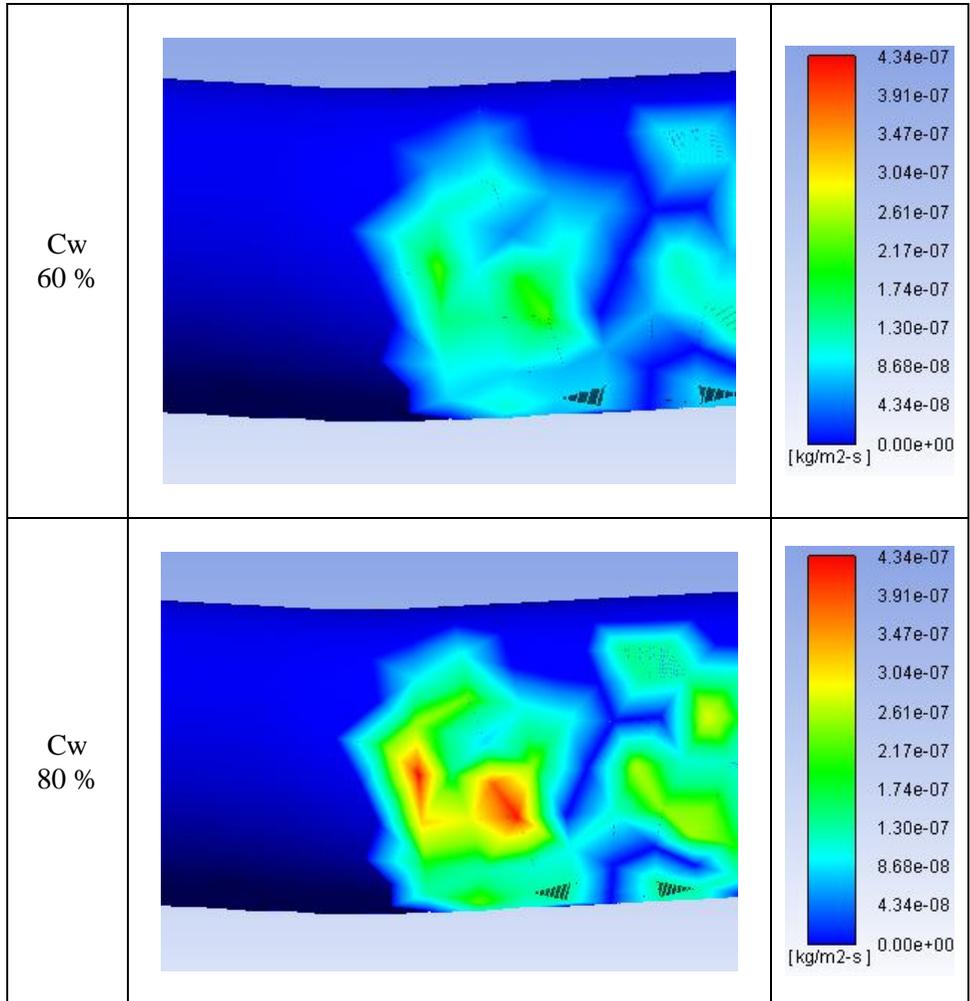
Kontur Pada Pipa Sudut Belok 30°





Kontur Pada Pipa Sudut Belok 15°





BIODATA PENULIS



Penulis, Bahrul Ilmi berasal dari kabupaten Banyuwangi dan dilahirkan di Banyuwangi pada tanggal 5 September 1995. Penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis merupakan alumni dari MI AL A'LA Pancursari, SNPN 1 Cluring, dan SMAN 1 Genteng, Banyuwangi. Setelah lulus dari Sekolah Menengah Atas pada tahun 2014 penulis melanjutkan studi Strata 1 di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember melalui jalur masuk SBMPTN. Selain kegiatan akademik penulis juga aktif dalam beberapa kegiatan dan organisasi pada saat masa perkuliahannya. Pada tahun ke-dua dan ke-tiga aktif dalam Badan Eksekutif Mahasiswa ITS (BEM ITS) sebagai Staf Kementerian Kesejahteraan Mahasiswa. Pada tahun ke-empat penulis menjadi anggota dari laboratorium *Marine Machinery and System* (MMS). Penulis pernah melakukan kerja praktik di PT Dok dan Perkapalan Surabaya dan PT Banter Prima Sentosa. Akhir kata penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Tuhan yang Maha Esa karena dapat menyelesaikan proses perkuliahan di ITS.

Bahrul Ilmi

ilmilurhab@gmail.com

“Halaman ini sengaja dikosongkan”