



Tugas Akhir – TL141584

**SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*
(CFD) EROSI PARTIKEL PASIR DALAM ALIRAN
FLUIDA GAS TURBULEN PADA *ELBOW* PIPA
VERTIKAL - HORIZONTAL**

IDO WIDYA YUDHATAMA
NRP. 0251144000079

Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



Final Project – TL141584

**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
SIMULATION OF SAND PARTICLE EROSION WITH
TURBULENT GAS FLUID FLOW IN VERTICAL –
HORIZONTAL ELBOW**

IDO WIDYA YUDHATAMA
NRP. 0251144000079

Supervisor
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Material and Metallurgical Engineering Department
Fakulty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

(This page is intentionally left blank)

**SIMULASI COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
EROSI PARTIKEL PASIR DALAM ALIRAN FLUIDA GAS
TURBULEN PADA ELBOW PIPA VERTIKAL -
HORIZONTAL**

Tugas Akhir

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

IDO WIDYA YUDHATAMA
NRP. 0251144000079

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. (Pembimbing 1)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc (Pembimbing 2)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**SIMULASI *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS* (CFD)
EROSI PARTIKEL PASIR DALAM ALIRAN FLUIDA GAS
TURBULEN PADA *ELBOW* PIPA VERTIKAL -
HORIZONTAL**

Nama : Ido Widya Yudhatama
NRP : 02511440000079
Jurusan : Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Abstrak

Erosi partikel pasir merupakan salah satu permasalahan yang serius dalam industri produksi minyak dan gas. Terdapat suatu bukti kuat bahwa kebanyakan sumur sekarang memproduksi pasir yang semakin meningkat seiring penurunan produksi utama minyak dan gas. Hal ini merupakan masalah yang luas mengingat dapat mempengaruhi laju produksi seiring bertambahnya umur asset. Prediksi erosi yang akurat terutama pada *elbow* dapat digunakan untuk meningkatkan desain kerja pipa, wilayah inspeksi, limit pengoperasian dan lainnya. Dalam penelitian ini digunakan permodelan CFD pada aplikasi ANSYS *Student Version* 19.0 untuk memprediksi erosi dalam aliran gas turbulen dengan variasi ukuran partikel pasir dan kecepatan fluida. Didapatkan hasil berupa profil erosi dan laju erosi pada *elbow* pipa yang dibandingkan dengan hasil eksperimen. Hasil simulasi menunjukkan bahwa CFD mampu untuk memprediksi laju erosi secara baik untuk ukuran partikel 300 μm dengan error sebesar 14.75% dibandingkan ukuran partikel 150 μm yang mencapai error 271.5%. Terbentuk profil erosi berbentuk huruf ‘V’ pada *elbow* pipa vertikal – horizontal.

Kata kunci: Erosi, Elbow, Partikel Pasir, Computational Fluid Dynamics, Discrete Phase Method

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
SIMULATION OF SAND PARTICLE EROSION IN
TURBULENT GAS FLUID FLOW IN VERTICAL –
HORIZONTAL ELBOW**

Name : Ido Widya Yudhatama
SRN : 02511440000079
Department : Material and Metallurgical Engineering
Pembimbing : Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

Abstract

Erosion of sand particles is one of the serious problems in the oil and gas production industry. There is strong evidence that most wells now produce increased sand as the major oil and gas production declines. This is a widespread problem as it can affect the rate of production as we age the asset. Accurate erosion prediction, especially elbow, can be used to improve pipe work design, inspection area, operating limit and others. In this study, we used CFD modeling in ANSYS Student Version 19.0 application to predict erosion in turbulent gas flow with the variation of sand particle size and fluid velocity. The results obtained were erosion profile and erosion rate in pipe elbow compared with the experimental results. Simulation results show that CFD able to predict erosion rates well for 300 μm particle size with error 14.75% compare 150 μm particle size with error 271.5%. Formed erosion profile in the form of 'V' scar on the vertical - horizontal pipe elbow.

Keywords: Erosion, Elbow, Sand Particle, Computational Fluid Dynamics, Discrete Phase Method

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas kehendak dan kasih sayang Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan kemudahan sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir beserta laporannya dengan judul: **Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) Erosi Partikel Pasir dalam Aliran Fluida Gas Turbulen pada Elbow Pipa Vertikal-Horizontal**. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan-kekurangan dalam penulisan laporan ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik serta saran dari pembaca demi penyempurnaan ilmu dan laporan ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan laporan ini.

1. Kedua orang tua yang tidak henti memberikan doa dalam diam dan semua bentuk dukungan beliau.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing pertama sekaligus dosen wali yang telah memberikan nasihat dan ilmu selama kuliah.
4. Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan berbagai ilmu pengetahuan kepada penulis.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Seluruh MT16 yang telah menemani dan memberikan warna kehidupan penulis selama perkuliahan.

Penulis sangat terbuka dengan kritik dan saran dari pembaca. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi berbagai pihak yang bersangkutan. Terimakasih.

Surabaya, 30 April 2018
Penulis,

Ido Widya Yudhatama
0251144000079

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	v
Abstrak.....	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
DAFTAR SIMBOL.....	xxi
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Hasil Penelitian	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Pengertian Erosi	5
2.2 Mekanisme Erosi.....	6
2.3 Parameter Erosi Partikel	8
2.4 Komputasi Dinamika Fluida.....	14
2.5 Persamaan Pergerakan Partikel.....	16
2.6 Permodelan Turbulen $k-\varepsilon$	18
2.7 <i>Euler-Lagrange - Discrete Element Method</i>	20
2.8 Metode Volume Hingga (<i>Finite Volume Method</i>)	22
2.9 Model Prediksi Erosi	23
2.10 Teknologi dan Penelitian Sebelumnya.....	25

METODOLOGI PENELITIAN	29
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.2 Prosedur Penelitian.....	31
3.3 Peralatan.....	33
3.4 Material Elbow Pipa dan Fluida	34
3.5 Variabel Penelitian	35
3.6 Data Partikel Pasir	35
3.7 Meshing.....	36
3.8 Pre-Proses.....	37
HASIL DAN PEMBAHASAN	39
4.1 Pengantar.....	39
4.2 Model Aliran, Pelacakan Partikel, dan Perhitungan Erosi 40	
4.3 Persamaan Erosi	44
4.4 Evaluasi Erosi CFD dan Data Eksperimen	45
4.5 Distribusi Erosi Pada Sudut Elbow.....	63
KESIMPULAN DAN SARAN	69
5.1 Kesimpulan.....	69
5.2 Saran.....	69
LAMPIRAN I	xxv
LAMPIRAN II	xxxiii
BIODATA PENULIS	xxxvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Korosi Erosi pada Pipa Elbow Gas Alam (Heidersbach, 2011).....	1
Gambar 2.1 Komponen wellhead yang tererosi (Byars, 1999).....	5
Gambar 2.2 Bentuk aliran fluida multifasa pada pipa vertikal dan horizontal (Heidersbach, 2011).....	6
Gambar 2.3 Skema erosi pada material ulet: (a) sebelum tumbukan; (b) menghasilkan fokasi dan menumpuk material pada satu sisi lubang; (c) pemisahan material dari permukaan (Parsi, 2015).....	7
Gambar 2.4 Mekanisme erosi pada material getas: (a) pertumbuhan retak kerucut dan retak median; (b) penutupan retak median dan penyusunan retakan lateral; (c) lubang erosi telah terbentuk (Sooraj & Radhakrishnan, 2013).....	8
Gambar 2.5 Variasi Erosi dengan Sudut Impak untuk Material Ulet dan Getas (Hutchings, 1992).....	10
Gambar 2.6 Rasio Erosi vs Ukuran Partikel dan Kecepatan Partikel (Tilly, 1973).....	10
Gambar 2.7 Efek dari Ukuran Partikel pada Laju Erosi pada Kecepatan Fluida 3.62 m/s, konsentrasi pasir 20 wt% (Gandhi & Borse, 2002).....	11
Gambar 2.8 Efek Kekerasan Partikel Erosi terhadap Laju Erosi pada AISI 1020 (Levy & Chick, 1983).....	12
Gambar 2.9 Hukum dinding (The law of the wall).....	20
Gambar 2.10 Partikel direpresentasikan sebagai bola (ANSYS, 2017).....	21
Gambar 2.11 Pembagian Nodes pada Volume Kontrol.....	22
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	30
Gambar 3.2 ANSYS SpaceClaim (ANSYS-Spaceclaim, 2016).....	31
Gambar 3.3 ANSYS Meshing (ANSYS-Meshing, 2016).....	32
Gambar 3.4 ANSYS Fluent (ANSYS-Fluent, 2016).....	32
Gambar 3.5 Elbow.....	34
Gambar 3.6 Permukaan Inlet Elbow.....	35
Gambar 3.7 Partikel yang digunakan untuk eksperimen (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016).....	36

Gambar 3.8 ANSYS Meshing	36
Gambar 3.9 <i>Hex-mesh</i> dan <i>inflation layer</i>	37
Gambar 4.1 Efek Kecepatan Gas dan Ukuran Partikel pada Rasio Maksimum Erosi pada Aliran Gas-Pasir (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016)	40
Gambar 4.2 Skema Arah Aliran Pada Geometri Elbow CFD.....	41
Gambar 4.3 Tiga Langkah Simulasi Erosi CFD: Model Aliran, Pelacakan Partikel, dan Kalkulasi Erosi (Parsi, 2015).....	42
Gambar 4.4 Dimensi Elbow Pipa Standart (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015).....	45
Gambar 4.5 Distribusi Kecepatan pada Elbow Standart pada Kecepatan 80 m/s (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015)	46
Gambar 4.6 Vektor Kecepatan pada Elbow (Ebara, Takamura, Hashizume, & Yamano, 2016).....	46
Gambar 4.7 Profil Kecepatan Variabel 1	47
Gambar 4.8 Profil Kecepatan Variabel 2.....	47
Gambar 4.9 Profil Kecepatan Variabel 3.....	48
Gambar 4.10 Profil Kecepatan Variabel 4.....	48
Gambar 4.11 Profil Kecepatan Variabel 5.....	49
Gambar 4.12 Profil Kecepatan Variabel 6.....	49
Gambar 4.13 Profil Kecepatan Variabel 7.....	50
Gambar 4.14 Profil Kecepatan Variabel 8.....	50
Gambar 4.15 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 (ISO)	51
Gambar 4.16 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – Bidang XZ..	52
Gambar 4.17 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 1</i>	52
Gambar 4.18 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 2</i>	52
Gambar 4.19 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 3</i>	53
Gambar 4.20 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 4</i>	53
Gambar 4.21 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 5</i>	53
Gambar 4.22 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – <i>View 6</i>	54
Gambar 4.23 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 11 m/s dan ukuran pasir 300 μm	56
Gambar 4.24 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 15 m/s dan ukuran pasir 300 μm	56

Gambar 4.25 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 23 m/s dan ukuran pasir 300 μm	57
Gambar 4.26 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 27 m/s dan ukuran pasir 300 μm	57
Gambar 4.27 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 11 m/s dan ukuran pasir 150 μm	58
Gambar 4.28 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 15 m/s dan ukuran pasir 150 μm	58
Gambar 4.29 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 23 m/s dan ukuran pasir 150 μm	59
Gambar 4.30 Pola Erosi CFD pada kecepatan Gas 27 m/s dan ukuran pasir 150 μm	59
Gambar 4.31 Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 300 μm	62
Gambar 4.32 Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 150 μm	62
Gambar 4.33 Penempatan Titik Sudut Impak pada Belokan Elbow dalam <i>CFD-Post</i>	63
Gambar 4.34 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 11 m/s.....	64
Gambar 4.35 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 15 m/s.....	65
Gambar 4.36 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 23 m/s.....	65
Gambar 4.37 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 27 m/s.....	66
Gambar 4.38 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 11 m/s.....	66
Gambar 4.39 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 15 m/s.....	67
Gambar 4.40 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 23 m/s.....	67
Gambar 4.41 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 27 m/s.....	68

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Referensi penelitian permodelan erosi sebelumnya	25
Tabel 3.1 Variabel Penelitian	35
Tabel 3.2 Informasi mesh	37
Tabel 3.3 Parameter Fluida	37
Tabel 3.4 Parameter Partikel	38
Tabel 4.1 Perbandingan Pprediksi Erosi CFD dengan Data Eksperimen ($V_{jet}=102.7$ m/s dengan jarak 12.7 mm dari Jet, Ukuran Pasir 300 μ m, Stainless Steel 316)	39
Tabel 4.2 Nilai Parameter Eksponen Persamaan Oka	44
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Prediksi Erosi CFD	60
Tabel 4.4 Perbandingan Persen Bias Dari Data UT dengan Prediksi CFD untk Model Erosi yang Berbeda (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016)	61

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

Roman

Simbol	Unit	Deskripsi
A	m ²	Luas area
Bh	GPa	Nilai kekerasan material (<i>Brinell</i>)
C _D	-	Koefisien drag
C _v	-	Kontrol volume
C _μ	-	Konstanta viskositas turbulen model k - ε
D	m	Diameter pipa
d	m	Diameter partikel
E	mm/kg	Laju erosi
E ₉₀	mm/kg	Rasio referensi erosi pada sudut 90 ⁰
F	N	Gaya yang bekerja
f(γ)	-	Fungsi impak terhadap sudut γ
g	m/s ²	Percepatan gravitasi
Hv	GPa	Nilai kekerasan material (<i>Vickers</i>)
k		Konstanta
k	m ² /s ²	Energi kinetic turbulen
m	kg	Massa
N	-	Jumlah partikel dalam control volume
n	-	Normal vektor
n ₁ , n ₂	-	Konstanta fungsi sudut
P	Pa	Tekanan
R	m	Jari-jari pipa
Re	-	Bilangan reynold
S _{ij}	1/s	Laju regangan tensor
u	m/s	Kecepatan pada arah x
\vec{u}	m/s	Kecepatan fasa fluida
\vec{u}_p	m/s	Kecepatan partikel
V	m ³	Volume
V _p	m/s	Kecepatan partikel
w	m/	Kecepatan pada arah z

Greek

Simbol	Unit	Deskripsi
Γ		Koefisien empiris persamaan (2.4 dan 2.5)
α		Sudut impak
δ_{ij}		Simbol knocker
ε	m^2/s^3	Laju dissipasi energi kinetic turbulen
η		Persamaan dashpot
θ	rad	Sudut
μ	kg/m.s	Viskositas dinamik
μ_t	kg/m.s	Viskositas turbulen
π		Konstanta matematika <i>pi</i>
ρ	kg/m ³	Massa jenis
σ_{ij}	Pa	Tegangan tensor
σ_k	-	Konstanta pada model k- ε
τ	s	Waktu relaksasi partikel

Singkatan

ANSYS	Analysis Systems
CFD	Computational Fluid Dynamics
DEM	Discrete Element Method
DPM	Discrete Phase Model
RANS	Reynold Averaging Navier-Stokes
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Keausan yang disebabkan erosi pada pipa bagian produksi dan injeksi merupakan salah satu masalah besar yang dihadapi industri perminyakan dimana konsekuensinya dapat berakibat krusial. Campuran air, minyak, gas, dan partikel pasir yang melalui pipa, dikombinasikan dengan kecepatan dan sifat fluida merupakan sebuah resiko pada peralatan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diharapkan untuk dapat memprediksi erosi secara akurat (StrØmme, 2015).



Gambar 1.1 Korosi Erosi pada Pipa Elbow Gas Alam
(Heidersbach, 2011)

Siku pipa atau *elbow* sangat sering ditemui dalam proses produksi minyak dan gas. Pengangkutan partikel yang melewati siku tersebut menyebabkan penipisan dinding akibat erosi, menjadikannya cukup sering dan juga merupakan penggantian yang membutuhkan biaya. Dalam industri minyak dan gas, produksi pasir dari sumur melalui tekanan dan kecepatan tinggi melalui *elbow* pada permukaan akan menyebabkan perhatian keamanan yang signifikan. Seperti pada industri alumina, *elbow* pada pemurnian harus diganti secara teratur untuk menghindari



kebocoran fluida yang bertekanan tinggi (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015).

Banyak peneliti tertarik untuk dapat memprediksi secara akurat karakteristik erosi pada berbagai macam geometri dan berbagai kondisi fluida. Beberapa model erosi sederhana tersedia untuk beberapa *fitting* seperti *elbow* dan *tees*. Sebagai contoh, Shirazi (Shirazi, McLaury, Shadley, & Rybicki, 1995) dan Salama (Mamdouh M. Salama; Conoco Inc, 1998) mengembangkan model erosi sederhana pada lengkungan *elbow*. Pada penelitian lainnya, Wang et al. (Wang, Shirazi, Shadley, & Rybicki, 1996) menggunakan permodelan aliran dan penelusuran partikel (*particle tracking*) untuk mempelajari efek lengkungan *elbow* pada laju erosi. Hampir semua model yang ada saat ini hanya mempertimbangkan erosi sebagai akibat dari tumbukan langsung, sedangkan efek dari fluktuasi turbulen pada erosi *elbow* tidak dipertimbangkan (Edwards, McLaury, & Shirazi, 2001).

Disaat pengukuran eksperimen memberikan data nyata dalam laju erosi yang terjadi selama kondisi aliran spesifik, hal tersebut akan selalu lebih cepat dan lebih efisien untuk menggunakan permodelan komputasi dinamika fluida (CFD) untuk menginvestigasi beragam kondisi aliran yang berbeda pada *elbow*. Bagaimanapun, akurasi dari CFD sangat tergantung pada permodelan erosi yang tergabung dalam analisa numerik. Banyak korelasi dan persamaan telah dikembangkan untuk memprediksi laju erosi dibawah kondisi yang bervariasi, dimulai dari Finnie (Finnie I. , 1960). Memang, beberapa pekerjaan numerik meneliti laju erosi pada *elbow* dengan membandingkan prediksi laju erosi pada model yang berbeda untuk mengerti kekuatannya (Pereira, Souza, & Martins, 2014). Banyak penelitian dalam literature yang menggunakan teknik komputasi yang berbeda untuk memprediksi erosi pada lekukan (*bends*). Secara umum, peneliti menggunakan standar penyelesaian *Reynold-Averaged Navier Stokes (RANS)* untuk memprediksi aliran fluida *Eulerian* yang melewati *elbow*, diikuti dengan penelusuran partikel *Lagrangian*, sehingga dapat disebut pendekatan *Euler-Lagrangian* (Pereira, Souza, & Martins,



2014) (Chen, McLaury, & Shirazi, 2004) (Kesana, Grubb, McLaury, & Shirazi, 2013) (Li & Shen, 1996) (Abdolkarimi & Mohammadikhah, 2013) (Felten, 2014) (Zhu, Zhao, Pan, & Li, 2013) (Hadziahmetovis, Hodzic, Kahrimanovic, & Dzaferovic, 2014).

Harus diakui bahwa seingkali seorang *engineer* hanya tertarik pada lokasi dan laju erosi pada titik maksimum, dimana akan selalu terjadi pada dinding *elbow* yang bertabrakan langsung dengan partikel. Bagaimanapun juga, banyak situasi yang lebih kompleks terjadi dimana erosi muncul, seperti sebuah *valve* atau *fitting*. Dalam tujuan untuk memprediksi spot erosi pada geometri tersebut, pertama-tama permodelan harus mampu secara akurat memprediksi distribusi erosi dalam geometri yang relatif sederhana seperti sebuah *elbow* (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015).

1.2 Rumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pola erosi partikel pasir yang terjadi dalam aliran fluida gas pada *elbow* dengan menggunakan permodelan CFD
2. Bagaimana estimasi laju erosi partikel pasir pada *elbow* dengan variabel kecepatan fluida

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisa permasalahan, maka dilakukan pembatasan masalah yaitu:

1. Kondisi pengoperasian berada pada tekanan atmosfer.
2. Nilai temperatur dan volume pasir dianggap konstan selama proses penelitian.
3. Partikel tidak larut dan bereaksi dengan fluida.
4. Partikel pasir dianggap berbentuk bola.
5. Tidak terdapat transfer panas.



1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah disebutkan, maka tujuan penelitian ini antara lain:

1. Menganalisa pola erosi yang terjadi dalam aliran fluida gas pada *elbow* vertikal-horizontal dengan menggunakan permodelan CFD
2. Menganalisa estimasi laju erosi partikel pasir pada *elbow* vertikal-horizontal dengan variabel kecepatan fluida dan ukuran partikel

1.5 Manfaat Hasil Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran tentang pola erosi pasir yang terjadi pada aliran fluida gas dalam *long elbow* 90⁰ dengan menggunakan permodelan CFD sekaligus didapatkan estimasi laju erosi dengan variasi kecepatan fluida yang terjadi di lapangan. Hal ini sering dijumpai pada sumur-sumur pengeboran minyak dan gas yang telah berumur dimana terjadi penurunan produksi minyak atau gas, tetapi sebaliknya terjadi peningkatan produksi pasir sehingga menyebabkan peningkatan laju erosi dan berakibat terjadinya kegagalan terutama pada *elbow pipeline*. Peristiwa tersebut menyebabkan hal yang merugikan seperti kebocoran minyak atau gas sehingga mengakibatkan *loss production*

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Erosi

Erosi merupakan suatu proses dimana material terkikis dari permukaan dinding karena deformasi mikromekanikal atau hasil kombinasi dari sebuah lingkungan kimia yang agresif dan mempunyai kecepatan fluida yang tinggi. Hal ini dapat terjadi akibat aliran fluida yang mempunyai kecepatan tinggi melewati objek atau bisa berakibat dari gerakan cepat objek benda dalam fluida, seperti peristiwa baling-baling kapal laut yang menghantam fluida. Dalam korosi erosi, efek dari mekanika lebih mendominasi (Lyons, Plisga, & Lorenz, 2015). Dalam suatu fluida yang membawa bahan (seperti gas dan air dalam turbin, pompa, *heat exchangers*), erosi permukaan disebabkan oleh tumbukan antara dinding dengan partikel padat yang dibawa oleh aliran fluida.

Komponen wellhead seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 terkadang mengalami kegagalan dalam hitungan hari dikarenakan produksi pasir atau erosi dari tetesan cairan yang berasal dari aliran gas. Permukaan yang telah mengalami erosi umumnya cukup bersih, tidak seperti permukaan terdampak korosi lainnya. Secara umum, erosi menjadi penyebab terjadinya degradasi peralatan, mengurangi performa, dan mengurangi umur (ANSYS, 2017).

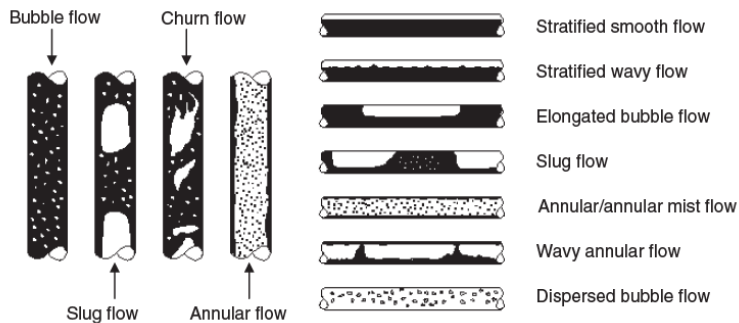


Gambar 2.1 Komponen wellhead yang tererosi (Byars, 1999)



Erosi korosi sering terjadi sebagai hasil dari permukaan yang tidak terlindungi. Banyak orang berasumsi bahwa korosi erosi terasosiasi dengan aliran turbulen. Hal ini benar, karena sistem perpipaan dalam prakteknya membutuhkan aliran turbulen. Aliran fluida akan tidak cukup cepat jika aliran dipertahankan lamellar (non turbulen).

Hampir kebanyakan tapi tidak semua, korosi erosi disebabkan oleh aliran fluida multifasa. Peta bentuk aliran (*flow regime*) ditunjukkan pada gambar 2.2 menggambarkan distribusi fluida (area gelap) dan uap (area cerah) pada aliran vertikal dan horizontal.



Gambar 2.2 Bentuk aliran fluida multifasa pada pipa vertikal dan horizontal (Heidersbach, 2011)

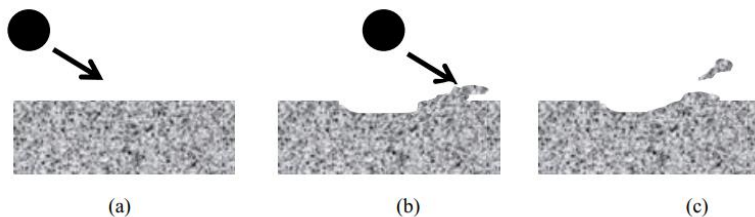
2.2 Mekanisme Erosi

Saat sebuah partikel menghantam permukaan, hal itu dapat melukai permukaan, dan bentuk dari luka tersebut tergantung pada banyak parameter seperti permukaan material, ukuran partikel, dan sudut impact. Secara umum, hal itu dianggap bahwa perubahan mekanisme erosi bergantung pada keuletan permukaan. Finnie mengusulkan model mikro-geometri untuk material ulet. Dia berpendapat bahwa erosi pada material ulet merupakan hasil dari *micro-cutting*. Saat seatu partikel menumbuk permukaan pada sudut sempit, hal ini akan menghasilkan lubang. Partikel lain yang menumbuk akan membuat lubang menjadi semakin besar dan juga

menumpuk material sekitar lubang. Model mikro-geometri menghasilkan erosi dibawah prediksi dimana dibandingkan dengan data eksperimen pada sudut yang lebih besar (Finnie, 1958).

Kemudian, Finnie memperbaiki model tersebut sebagai adanya kelemahan (Finnie I. , 1960). Berdasarkan model erosi mikro-geometri, pengerjaan pengerasan (*work hardening*) dari permukaan logam seharusnya mengurangi laju erosi. Bagaimanapun, Levy menunjukkan bahwa awal erosi yang terjadi pada kondisi awal lebih rendah daripada permukaan yang telah tererosi (Levy, 1995)

Bellman dan Levy mengajukan sebuah mekanisme erosi makroskopik. Mereka berpendapat bahwa partikel yang membentur permukaan menghasilkan lubang dangkal dan tampak seperti potongan trombosit (Bellman & Levy, 1981). Trombosit tersebut mudah untuk dipisahkan dari permukaan dengan partikel yang menghantam selanjutnya (Gambar 2.3)

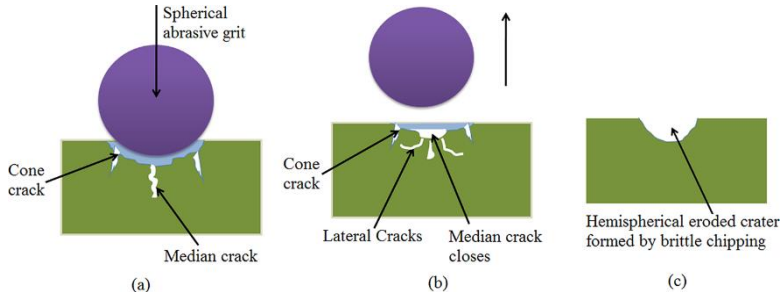


Gambar 2.3 Skema erosi pada material ulet: (a) sebelum tumbukan; (b) menghasilkan fomasi dan menumpuk material pada satu sisi lubang; (c) pemisahan material dari permukaan (Parsi, 2015)

Tidak seperti mekanisme untuk material ulet, terdapat ilmu yang luas untuk mekanisme erosi pada material getas. Hal tersebut telah disarankan bahwa pada maerial getas, erosi disebabkan oleh pembentukan retak (Srinivasan & Scattergood, 1988) (Sundarajan, 1991) (Kleis & Kulu, 2008). Saat partikel menumbuk permukaan getas, akan menciptakan retakan lateral dan radial. Tumbukan lain akan menyebabkan retakan menjadi tumbuh. Retakan tersebut



membagi permukaan menjadi potongan-potongan kecil dimana dapat disingkirkan oleh partikel lain yang menghantam permukaan (Gambar 2.4).



Gambar 2.4 Mekanisme erosi pada material getas: (a) pertumbuhan retak kerucut dan retak median; (b) penutupan retak median dan penyusunan retakan lateral; (c) lubang erosi telah terbentuk (Sooraj & Radhakrishnan, 2013)

2.3 Parameter Erosi Partikel

Banyak parameter diketahui mempengaruhi fenomena erosi partikel padat. Dengan tujuan untuk mengembangkan model erosi yang akurat, mengidentifikasi parameter yang terlibat dalam proses erosi merupakan hal yang penting (Mansouri, 2016). Clark (2002) mencantumkan parameter berikut dimana terbukti sebagai salah satu factor yang mempengaruhi erosi lumpur: (1) kecepatan impact partikel, (2) sudut impact partikel, (3) ukuran, bentuk, densitas, kekerasan, dan kerapuhan partikel, (4) konsentrasi partikel, (5) densitas dan viskositas fasa cair, (6) sifat material: kekerasan, ketangguhan (*fracture toughness*), dan lainnya (Clark, 2002). Dalam penelitian ini, review singkat dari faktor-faktor penting akan dijelaskan.

2.3.1 Kecepatan Impact Partikel

Laju erosi secara langsung mempunyai relasi terhadap kecepatan impact partikel:

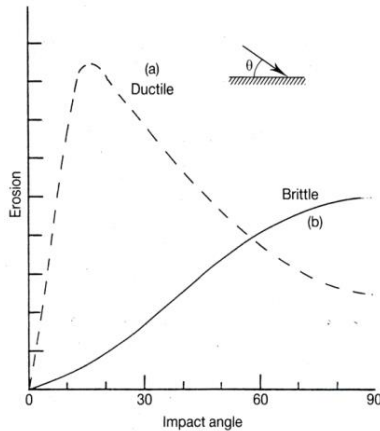


$$ER = V_p^n \quad (2.1)$$

Dimana V_p merupakan kecepatan impact partikel dan n adalah suatu konstanta. Peneliti lainnya menuliskan nilai yang berbeda untuk n . Finnie (1958) menyarankan bahwa n bernilai 2 berdasarkan kerja secara teoritis. Selanjutnya, Laitone (1979) menyarankan bahwa dimana disebabkan oleh perubahan kecepatan fluida dekat dengan permukaan eksperimen, konstanta n dapat meningkat menjadi 4 (Laitone, 1979). Observer lainnya menyatakan bahwa n dapat bervariasi dari 0.3 sampai 4.5 (Smeltzer, Gulden, & Compton, 1970) (Burnett, De Silva, & A, 1994). Dan baru-baru ini, disarankan bahwa n bukan merupakan suatu konstan dan tergantung dari kekerasan material yang tererosi (Oka & Yoshida, 2005). Nilai yang digunakan bervariasi antara 1.6 sampai 2.6.

2.3.2 Sudut Impact Partikel

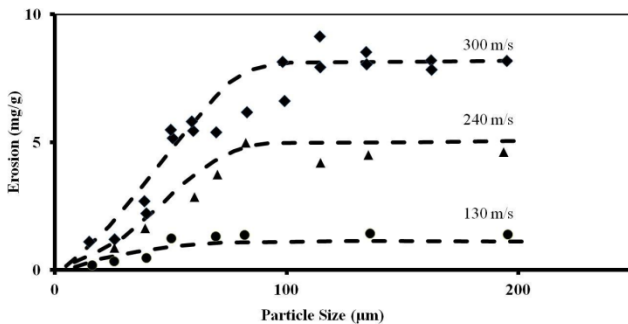
Efek dari sudut impact partikel pada erosi bervariasi berdasarkan padapermukaan material. Gambar 2.5 menunjukkan korelasi antar sudut impact partikel dan laju erosi untuk material ulet dan getas. Untuk material ulet, laju erosi terbesar terjadi pada sudut impact yang rendah. Sedangkan untuk material getas, laju erosi maksimum terjadi pada sudut impact normal, sebagai penyebab dominan erosi pada material getas yang retak. Material yang digunakan dalam industri minyak dan gas mempunyai karakteristik dari kedua material ulet dan getas. Sebagai hasilnya, fungsi variasi sudut telah ditelusuri oleh para peneliti. Banyak dari fungsi sudut merupakan fungsi empiris dan hanya valid pada kondisi tertentu.



Gambar 2.5 Variasi Erosi dengan Sudut Impak untuk Material Ulet dan Getas (Hutchings, 1992)

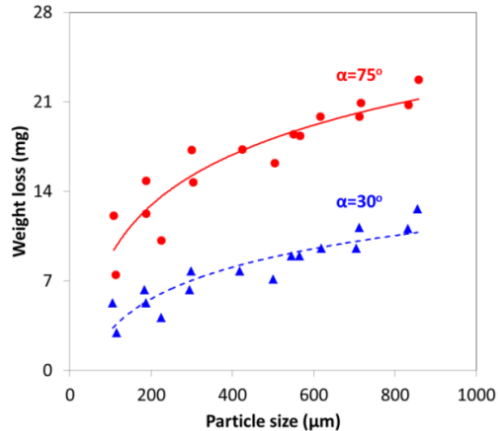
2.3.3 Ukuran Partikel

Dibandingkan dengan partikel kecil, partikel dengan ukuran besar mempunyai energi kinetic yang lebih besar bahkan mereka menumbuk dengan kecepatan yang sama. Beberapa data erosi dilaporkan sebagai fungsi dari ukuran partikel seperti pada Gambar 2.6. Gambar ini mengindikasikan bahwa rasio erosi (massa material tererosi/masa partikel) bergantung pada ukuran partikel bila partikel lebih besar dari 100 μm .



Gambar 2.6 Rasio Erosi vs Ukuran Partikel dan Kecepatan Partikel (Tilly, 1973)

Gandhi dan Borse (2002) meneliti efek dari ukuran pasir pada erosi besi tuang untuk sudut impact yang berbeda, yaitu 30 derajat dan 75 derajat. Kecepatan fluida 3.62 m/s dan konsentrasi pasir 20 wt% (Gambar 2.7).



Gambar 2.7 Efek dari Ukuran Partikel pada Laju Erosi pada Kecepatan Fluida 3.62 m/s, konsentrasi pasir 20 wt% (Gandhi & Borse, 2002)

Secara umum, pasir yang mempunyai ukuran yang lebih kecil menyebabkan laju erosi yang lebih rendah karena mereka mempunyai energi kinetic yang lebih kecil dan gaya tumbuk untuk mengerosi permukaan. Bagaimanapun juga, densitas partikel, bentuk, dan kekerasan juga mempengaruhi erosititas, tetapi secara umum pasir yang lebih besar menyebabkan kerusakan erosi yang lebih tinggi dengan kecepatan impact, bentuk, densitas, dan kekerasan yang sama karena mempunyai massa yang lebih besar.

2.3.4 Bentuk Partikel

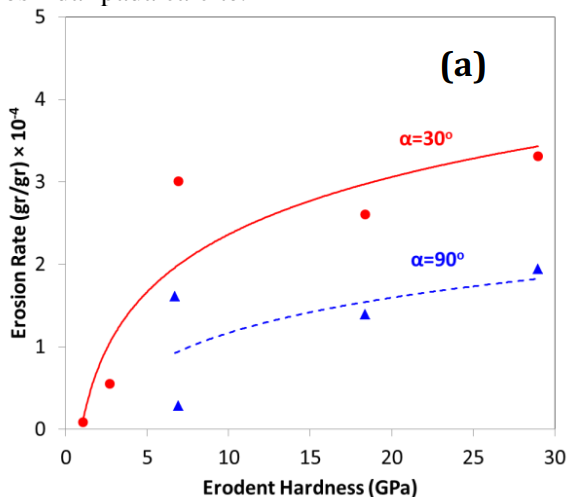
Ukuran partikel mempunyai efek yang signifikan terhadap tingginya laju erosi. Para peneliti mengembangkan dua bentuk partikel, partikel dengan sudut tajam dan partikel berbentuk bola. Hasil erosi dari partikel dengan sudut tajam memiliki empat kali lebih tinggi dibanding dengan erosi dari partikel bulat (Salik,



Buckey, & W, 1981) (Levy & Chick, 1983). Faktor bentuk partikel secara normal dijelaskan pada persamaan rasio erosi.

2.3.5 Material Partikel

Levy dan Chick (1983) meneliti efek dari komposisi partikel dalam perilaku baja karbon AISI 1020. Lima partikel yang berbeda dengan bentuk tajam dan ukuran berada antara 180-250 μm digunakan untuk mengerosi baja pada sudut aliran yang berbeda, 30 dan 90 derajat dengan kecepatan aliran 80 m/s (Gambar 2.8). Rasio erosi menjadi rendah saat partikel erosi yang halus seperti calcite dan apatite digunakan. Apatite mempunyai kekerasan yang lebih tinggi dibanding calcite dan menyebabkan sedikit erosi daripada calcite.



Gambar 2.8 Efek Kekerasan Partikel Erosi terhadap Laju Erosi pada AISI 1020 (Levy & Chick, 1983)

Saat partikel halus mengerosi dinding, dapat menyebabkan partikel pecah menjadi kepingan kecil dengan massa dan energi kinetic yang lebih kecil dan secara konsekuen menyebabkan penurunan laju erosi. Analisa SEM dari permukaan baja setelah erosi juga menunjukkan bahwa pecahnya partikel halus terhadap permukaan mengurangi energi kinetic dan juga melindungi



permukaan dengan lapisan partikel yang mana juga menghambat laju erosi (Levy & Chick, 1983). Selanjutnya, partikel yang lebih keras dapat menjadi lebih erosif karena mereka pecah lebih sedikit saat partikel tersebut menumbuk dinding target.

2.3.6 Sifat Fluida

Fluida mungkin mempunyai pengaruh yang paling besar pada laju erosi karena hal ini dapat secara langsung mempengaruhi kecepatan impak partikel. Pada aplikasi praktek dimana terdapat erosi partikel padat, partikel dibawa oleh fluida ke dinding material. Karakteristik fluida seperti viskositas dan densitas mempengaruhi tingkah laku partikel dan sebagai hasilnya juga mempengaruhi pola dan sudut. Fluida dimana mempengaruhi laju erosi jura bergantung pada geometri objek dan pola aliran. Sebagai contoh pada geometri yang bertabrakan langsung, fluida bergerak langsung menuju dinding. Karena itu, fluida membawa partikel dan memandu partikel untuk bergerak menuju dinding.

Pada geometri lainnya seperti pipa lurus, fluida bergerak melewati dinding. Pada geometri in, fluktuasi turbulen mempunyai pengaruh terhadap pergerakan partikel dan membelokkannya menuju dinding. Selanjutnya, sifat fluida secara langsung mempengaruhi konsentrasi lokal partikel. Hal ini mempunyai arti bahwa meskipun konsentrasi partikel rendah, konsentrasi partikel local dapat menjadi tinggi dikarenakan pola aliran dan dapat mempengaruhi besaran erosi dan pola erosi. Konsentrasi partikel lokal yang tinggi mempunyai arti bahwa semakin banyak interaksi antar partikel, dan efek perisai dapat terjadi (Chen, McLaury, & Shirazi, 2004).

2.3.7 Sifat Permukaan Objek

Meskipun terdapat banyak data eksperimen, korelasi antara material target dan erosi partikel target masih belum menemui titik terang (Parsi, 2015). Hal ini telah ditunjukkan dimana material dengan kekerasan lebih tinggi menghasilkan resistansi lebih tinggi (Finnie, Wolak, & Kabil, 1967).



Bagaimanapun juga, Levy (1982) menunjukkan bahwa material dengan kekerasan yang lebih tinggi dapat menghasilkan laju erosi disbanding dengan material dengan kekerasan lebih rendah. Berdasarkan pengamatan Levy, dia menuliskan bahwa keuletan mempengaruhi permukaan untuk mendistribusikan energi kinetic yang dihasilkan oleh partikel dengan deformasi plastis dimana dapat menghasilkan laju erosi yang lebih rendah.

2.3.8 Efek Temperatur

Beberapa hipotesa berbeda menuliskan untuk menjelaskan peran dari temperature pada mekanisme erosi. Smeltzer (1970) mengamati bahwa laju erosi berkurang dengan terjadinya kenaikan temperature. Selanjutnya, Levy (1979) menjelaskan bahwa keuletan logam meningkat seiring dengan meningkatnya temperature. Karena itu saat partikel menumbuk dinding, sebagian besar energi kinetic mereka diserap oleh fenomena deformasi plastis. Meskipun efek yang tepat dari temperature pada erosi tidak pasti, hal ini dianggap tidak terlalu mempengaruhi hasil.

2.4 Komputasi Dinamika Fluida

Saat aliran turbulen dimodelkan pada pipa dengan adanya pasir, perlakuan pada permukaan merupakan hal yang sangat penting untuk dilakukan dengan benar. Hal ini dikarenakan turbulen dapat memberikan dampak signifikan pada erosi yang terjadi. Pada Komputasi Dinamika Fluida, metode numeric dan permodelan fisika tersedia untuk memprediksi perkiraan pergerakan dan lintasan partikel yang tersuspendi dalam aliran turbulen (Dosanjh & Humphrey, 1985).

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas (Zikanov, 2010). Pengaturan persamaan pada aliran fluida telah diketahui selama satu abad lamanya. Persamaannya kompleks, tetapi penyelesaiannya sangat berguna untuk mengerti aliran fluida, sehubungan dengan dinamik dan perpindahan panas.



Sayangnya, persamaan tersebut tidak dapat diselesaikan secara sederhana. Sebuah pendekatan numeric digunakan sebagai prosedur komputasi untuk mencari sebuah pendekatan terhadap solusi. Pendekatan ini mengungguli secara teoritis dan eksperimen pada beberapa aspek penting seperti keuniversalan, fleksibilitas, akurasi, dan biaya. (Zikanov, 2010).

Terdapat tiga persamaan yang mendeskripsikan hukum konservasi fisika klasik:

- Konservasi masa
- Persamaan momentum
- Konservasi energi

Saat fluida bergerak melalui elemen tersebut, persamaan dapat disajikan dalam bentuk diferensial;

Persamaan kontinuitas membutuhkan konservasi massa:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.2)$$

Persamaan *Navier-Stokes* diturunkan dari hukum Newton kedua:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x_j} \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \\ + \rho f_i \end{aligned} \quad (2.3)$$

Dimana S_{ij} merupakan laju regangan tensor dan δ_{ij} merupakan *Kronecker delta-tensor*.

Persamaan energi hanya dibutuhkan jika aliran merupakan kompressibel atau dengan kondisi konduksi termal, dimana dalam hal ini tidak masuk penelitian.

ANSYS Fluent menggunakan teknik *finite volume* dengan mendiskretisasi (*discretizing*) dan menyelesaikan persamaan yang diberikan dalam setiap elemen fluida. Hal ini merupakan teknik *control-volume-based* yang terdiri dari mengintegrasikan persamaan transport tentang setiap kontrol volume. Dimulai



dengan persamaan transport dalam bentuk integral (ANSYS, 2017):

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \oint \rho\phi\vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$= \oint \Gamma_\phi \nabla\phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.4)$$

Integral volume lalu dideskripsikan dengan elemen dan diakumulasi ke kontrol volume ke bagian yang diinginkan. Integral permukaan dideskripsikan pada poin integral yang berlokasi pada pusat setiap segmen permukaan dengan elemen dan lalu didistribusikan ke kontrol volume yang berdekatan:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} V + \sum_f^{N \text{ faces}} (\rho_f \phi_f \vec{v}_f) \cdot \vec{A}_f$$

$$= \sum_f^{N \text{ faces}} \Gamma_\phi \nabla\phi_f \cdot A_f + S_\phi V \quad (2.5)$$

dengan f sebagai nilai volume control (ANSYS, 2017). Dengan beberapa penyesuaian, persamaan (2.5) dapat digunakan untuk setiap kontrol volume pada domain yang diberikan. Hasilnya akan berupa persamaan aljabar yang dapat dipecahkan menggunakan metode iterasi, seperti gradient konjugasi, *multigrid*, dan lainnya.

2.5 Persamaan Pergerakan Partikel

ANSYS Fluent memprediksi lintasan partikel *discrete phase* dengan mengintegrasikan kesetimbangan gaya partikel, dalam hal ini merupakan pendekatan Lagrangian. Persamaan kesetimbangan gaya inersia partikel dengan pengaruh gaya pada partikel, dapat ditulis dengan persamaan:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = \frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r} + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (2.6)$$

dimana,



\vec{F} merupakan akselerasi tambahan (gaya/unit massa partikel)

$\frac{\vec{u} - \vec{u}_p}{\tau_r}$ adalah gaya geser per unit massa partikel

\vec{u} merupakan kecepatan fasa fluida

\vec{u}_p merupakan kecepatan partikel

ρ merupakan densitas fluida

ρ_p merupakan densitas partikel

dan

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \frac{24}{C_d Re} \quad (2.7)$$

disini, τ_r adalah tetapan atau waktu relaksasi partikel

μ merupakan viskositas molecular fluida

Re merupakan bilangan Reynolds relative, dimana didefinisikan sebagai

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (2.8)$$

dan gaya koefisien gaya tarik untuk partikel bola (*spherical*) didapatkan dari eksperimen Morsi dan Alexander (1972), dengan konstanta a_1 , a_2 , dan a_3 yang dilakukan dalam beberapa rentang Re (Morsi & Alexander, 1972):

$$C_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (2.9)$$

\vec{F} dalam persamaan (2.6) adalah penambahan percepatan. Hal ini termasuk penambahan gaya yang dapat menjadi sangat penting dalam situasi yang berbeda, dan didefinisikan dibawah pengaturan fisika untuk partikel. Untuk eksperimen ini, penambahan gaya merupakan hal penting dalam keadaan khusus tertentu (ANSYS, 2017):

1. Gaya massa virtual dibutuhkan untuk mengakselerasi fluida disekeliling partikel. Istilah ini dapat dituliskan sebagai persamaan:

$$\vec{F} = C_{vm} \frac{\rho}{\rho_p} (\vec{u}_p \nabla \vec{u} - \frac{d\vec{u}_p}{dt}) \quad (2.10)$$



Dimana C_{vm} merupakan faktor massa virtual dengan nilai 0.5.

- Gaya tekanan gradient ditambahkan sebagai gaya tambahan dimana meningkat dari tekanan gradient dalam fluida:

$$\vec{F} = \frac{\rho}{\rho_p} \vec{u}_p \nabla \vec{u} \quad (2.11)$$

Kedua gaya sangatlah penting dimana rasio density antara partikel dan fluida lebih besar daripada 0.1. Hal ini mengartikan untuk aliran pasir-gas, dimana $\rho/\rho_p \ll 1$, tidaklah penting (ANSYS, 2017).

2.6 Permodelan Turbulen k- ϵ

Aliran akan menjadi turbulen jika berada diatas nilai Reynolds (White, 2009).

$Re_{crit} \sim 2300$,

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} \quad (2.12)$$

Hal yang paling sering digunakan industry untuk menyelesaikan permasalahan turbulen adalah dengan menggunakan model *Reynold Averaging Navier-Stokes* (RANS). Tekanan dan kecepatan didekomposisi ke dalam komponen:

$$u_i = \bar{u} + u_i^i \quad (2.13)$$

$$p = \bar{p} + p^i \quad (2.14)$$

Memasukkan persamaan tersebut kedalam fungsi *Navier-Stokes* (2.3) dan didapatkan:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \nabla^2 \vec{u}_i \quad (2.15)$$

Dan juga persamaan kontinuitas; $\frac{\partial u_i}{\partial t} = 0$

Menuliskan lagi persamaan kedalam tegangan tensor, dari relasi

$$\tau_y = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho (u_i u_j)$$

Persamaan (2.15) menjadi:



$$\rho \frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nabla \tau_y \quad (2.16)$$

Tugas utama permodelan turbulen adalah untuk mengembangkan prosedur komputasi dengan akurasi yang baik dan secara umum membantu *engineer* untuk memprediksi tegangan Reynold (Versteeg & Malalasekera, 2007).

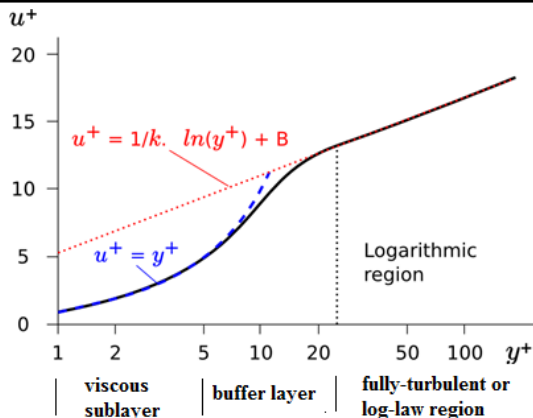
Permodelan k- ϵ telah diuji dan menjadi paling sering digunakan untuk memodelkan turbulen. Hal ini diketahui merupakan penyelesaian yang sukses diaplikasikan pada aliran dalam skala industri. Hal ini terutama terjadi pada aliran terbatas dimana tegangan geser Reynold merupakan hal yang paling penting.

Pada *Fluent* k- ϵ menggunakan pendekatan *wall-function* untuk meningkatkan ketahanan (*robustness*) dan akurasi dimana *mesh* lebih dekat ke dinding adalah baik, tetapi hal ini tidak akan menyelesaikan kondisi batas (*boundary condition*). Dengan menggunakan k- ϵ dekat terhadap permodelan dinding (*wall modelling*), aliran diasumsikan mempunyai karakteristik sebagai lapisan *boundary* yang dikembangkan secara baik. Alih-alih memecahkan persamaan pada sel pertama yang paling dekat dengan dinding, profil kecepatan dapat diasumsikan sebagai hukum dinding (*law of the wall*) Gambar 2.9. Penggunaan dari fungsi-dinding membutuhkan node pertama dari dinding untuk berada di antara $30 < y^+ < 300$. Model ini tidak sesuai dengan arus dengan pemisahan dan aliran yang berada diatas permukaan yang melengkung.

Viskositas turbulen, μ_t , dikomputasi dengan mengkombinasikan k dan ϵ (ANSYS, 2017)

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.17)$$

dimana C_μ merupakan konstanta.



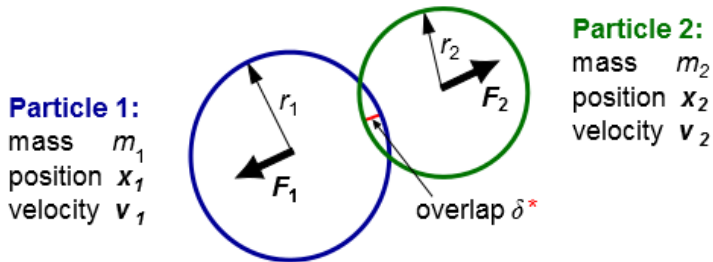
Gambar 2.9 Hukum dinding (The law of the wall)

2.7 Euler-Lagrange - Discrete Element Method

Deskripsi *Lagrangian* akan melacak posisi dan kecepatan dari partikel dalam jumlah kecil yang berada pada fluida kontinu. Pergerakan partikel secara individu didasarkan pada hukum Newton. Keuntungan menggunakan metode Lagrangian adalah hal yang sangat berguna untuk mendeskripsikan kelakuan partikel.

Metode ini didasarkan pada skema penggunaan dalam setiap interaksi partikel dilihat dengan kontak dan pergerakan partikel (Cundall & Strack, 1979). DEM tersedia untuk simulasi dan aliran granular, dimana dikarakterisasi oleh masukan partikel yang lebih tinggi. DEM selalu dimasukkan dalam simulasi ketika interaksi antar partikel merupakan hal yang penting.

Saat dua partikel berinteraksi dan saling memantul, hal ini dapat diilustrasikan pada gambar 2.10 (ANSYS, 2017).



Gambar 2.10 Partikel direpresentasikan sebagai bola (ANSYS, 2017)

Metode ini berdasarkan kontanta pegas, k , dan ukuran saat partikel saling berinteraksi. Nilai k dapat diestimasi dari persamaan berikut (ANSYS, 2017).

$$k = \frac{\pi v^2}{3\varepsilon_D^2} D \rho \quad (2.18)$$

Dimana,

D merupakan diameter partikel, ρ merupakan massa jenis partikel, v adalah kecepatan relative antara partikel yang bertabrakan, dan ε_D adalah fraksi diameter untuk tumpang tindih yang diperbolehkan.

Hukum gaya tumbukan yang digunakan dalam tugas akhir ini untuk DEM antara lain:

1. *Spring-dashpot* merupakan hukum gaya linear pegas, ditambah dengan sebuah *dashpot*. Untuk hukum *spring-dashpot*, didefinisikan konstanta K sebagai hukum tumbukan, sepanjang dengan sebuah koefisien restitusi untuk persamaan dashpot (η). Nilai $0 < \eta \leq 1$ (ANSYS, 2017). Dan dihasilkan persamaan:

$$\vec{F}_1 = (K\delta + \gamma(\vec{v}_{12} \cdot \vec{e}_{12}))\vec{e}_{12} \quad (2.19)$$

$$\vec{F}_1 = (K\delta + \gamma(\vec{v}_{12} \cdot \vec{e}_{12}))\vec{e}_{12} \quad (2.20)$$



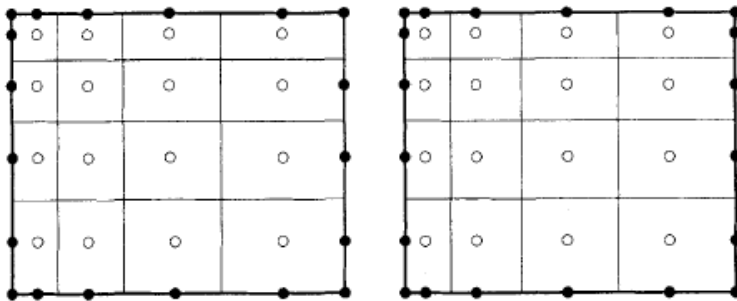
2. *Rolling Friction Collision Law for DEM* merupakan sebuah lanjutan dari hukum friksi tumbukan yang berdasarkan persamaan hukum friksi Coulomb ($F_{rolling}$):

$$F_{rolling} = \mu_{rolling} F_{normal} \quad (2.21)$$

Dimana $\mu_{rolling}$ adalah koefisien friksi putar, dan F_{normal} adalah besarnya gaya normal pada permukaan partikel atau titik pusat ke titik permukaan lainnya. Gaya friksi putar $F_{rolling}$ berlaku hanya pada torsi local pada partikel-partikel atau titik kontak partikel-dinding (ANSYS, 2017).

2.8 Metode Volume Hingga (*Finite Volume Method*)

Metode Volume Hingga menggunakan bentuk integral dari persamaan konservasi 2.4 sebagai titik awal. Daerah solusi dibagi kedalam volume kontrol (CVs) yang kecil. Pendekatannya adaah dengan mendefinisikan CVs dengan pembagian grid yang sesuai dan menetapkan titik komputasi kedalam titik tengah CV. Bagaimanapun juga, lokasi nodes didefinisikan terlebih dahulu sebagai batas lalu dilakukan konstruksi CVs disekitarnya, jadi area CV terlihat diantara nodes, seperti pada Gambar 2.11. Titik pada setiap kondisi batas diaplikasikan seperti pada gambar dibawah.



Gambar 2.11 Pembagian Nodes pada Volume Kontrol

Persamaan konservasi 2.4 diaplikasikan pada setiap CV, sebagaimana merupakan daerah solusi yang ditetapkan. Jika setiap rumus tersebut dijumlahkan pada setiap CV, kita mendapatkan persamaan konservasi global (Ferziger & Peric, 2002).



2.9 Model Prediksi Erosi

Ketahanan dinding material terhadap erosi tergantung pada kemampuan untuk berdeformasi dalam kondisi tertumbuk, diantara factor lainnya. Material getas, erosi terjadi sebagai hasil dari retakan dan pengelupasan potongan berukuran mikro dari dinding material, sedangkan pada material ulet, erosi terjadi karena deformasi mikro-plastis yang berulang. Untuk sebagian besar material, laju erosi tertinggi selalu terjadi pada sudut impak antara 20° dan 30° (Aquaro & Fontani, 2000).

Parameter yang mempengaruhi mekanisme erosi antara lain:

- Kecepatan partikel
- Sudut partikel
- Sifat mekanik material (seperti teknologi manufaktur, karakteristik mikrostruktural)
- Temperatur dinding material
- Koefisien friksi antara partikel dan target
- Efek perlindungan yang disebabkan pantulan partikel.

Data eksperimen korosi yang ditemukan dalam literature sering sekali terdapat ketidakpastian. Laju erosi dilaporkan oleh penulis dapat sangat bervariasi (meskipun dengan perintah dan material yang sama) (Aquari & Fontani, 2001)

Model yang diikuti untuk memprediksi erosi dan untuk menentukan volume material yang tererosi telah diadopsi oleh ANSYS Fluent antara lain:

2.9.1 Model Erosi Finnie

Untuk semua material ulet, erosi mempunyai variable dengan sudut impak dan kecepatan dengan persamaan:

$$E = kV_p^n f(\gamma) \quad (2.21)$$

Dimana E merupakan laju korosi, k adalah konstanta, V_p merupakan kecepatan partikel impak, dan $f(\gamma)$ merupakan fungsi impak terhadap sudut γ . Untuk logam, nilai dari eksponen n secara umum berada pada 2.3 sampai 2.5 radian.



Model Finnie menghubungkan tingkat keausan dengan laju energi kinetik impact partikel terhadap permukaan menggunakan fungsi dibawah:

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2 \gamma \text{ untuk } \gamma > 18.5^\circ \quad (2.22)$$

$$f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3\sin^2 \gamma \text{ untuk } \gamma \leq 18.5^\circ \quad (2.23)$$

Konstanta yang tersedia untuk ANSYS Fluent Model Erosi Finnie hanya valid untuk perhitungan erosi dimana partikel pasir menghantam dinding baja karbon (ANSYS, 2017).

2.9.2 Model Erosi Oka

Pada model ini, laju erosi E ditentukan sebagai:

$$E = E_{90} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^{k_3} f(\gamma) \quad (2.24)$$

Dimana

E_{90} = rasio referensi erosi pada sudut 90°

V = kecepatan partikel

V_{ref} = kecepatan referensi (104 m/s)

d & d_{ref} = diameter partikel dan diameter referensi (326 m/s)

k_2 dan k_3 = kecepatan dan diameter eksponens

$f(\gamma)$ = fungsi sudut impact

Sudut impact bergantung pada laju erosi sebagai:

$$f(\gamma) = (\sin \gamma)^{n_1} (1 + Hv(1 - \sin \gamma))^{n_2} \quad (2.25)$$

Dimana

γ = dinding sudut impact (rad)

Hv = hardness dinding material Vickers

(GPa)

n_1 dan n_2 = konstanta fungsi sudut

2.9.3 Model Erosi McLaury

McLaury memberikan sebuah model untuk memprediksi laju erosi partikel pasir dalam air (McLaury, Shirazi, Shadley, & Rybicki, 1996). Model ini secara rutin telah digunakan untuk mensimulasikan laju erosi pada lumpur. Laju Erosi McLaury (E):

$$E = AV^n f(\gamma) \quad (2.26)$$



$$A = F Bh^k \quad (2.27)$$

Dimana

- F = konstanta empiris
V = kecepatan tumbukan partikel
Bh = Hardness Brinell dinding material
k = -0.59 untuk baja karbon. Untuk lainnya

nilai eksponen k berbeda-beda dengan

$$f(\gamma) = b\gamma^2 + c\gamma \quad (2.28)$$

$$f(\gamma) = x\cos^2\gamma \sin(w\gamma) + y \sin^2(\gamma) + z \quad (2.29)$$

Konstanta b, c, w, x, dan y harus ditentukan dengan sebuah eksperimen. Sedangkan z ditentukan melalui fungsi sudut (persamaan 2.27 dan 2.28)

2.10 Teknologi dan Penelitian Sebelumnya

Berikut merupakan daftar penelitian tentang permodelan erosi sebelumnya yang dapat menunjang penelitian ini:

Tabel 2.1 Referensi penelitian permodelan erosi sebelumnya

1	Judul	Generalization of the API RP 14E Guideline for Erosive Services
	Peneliti	S.A. Shirazi, B.S. McLaury, J.R. Shadley, dan E.F Rybicki
	Tahun	1995
	Hasil	Sebuah model mekanistik dikembangkan untuk mendeskripsikan aliran dan proses erosi. Parameter tersebut merupakan kecepatan aliran; viskositas fluida dan densitas; ukuran pasir, densitas, dan bentuk; ukuran pipa dan material; dan geometri aliran.
2	Judul	An Alternative to API 14E Erosional Velocity Limits for Sand-Laden Fluids
	Peneliti	Mamdouh M. Salama



	Tahun	1996
	Hasil	Untuk aliran partikel padat yang bebas, fluida nonkorosif, laju aliran dapat dirumuskan $V = \frac{400}{\sqrt{\rho}}$
3	Judul	Application of flow modeling and particle tracking to predict sand erosion rates in 90 degree elbows
	Peneliti	J. Wang, Siamack Shirazi, J.R. Shadley, Edmund Rybicki
	Tahun	1996
	Hasil	Permodelan aliran dan penelusuran partikel (<i>particle tracking</i>) untuk mempelajari efek lengkungan <i>elbow</i> pada laju erosi. Dimana menunjukkan bahwa untuk <i>long-radius elbow</i> jumlah partikel yang menumbuk pada area yang luas, menyebabkan kepada penetrasi yang lebih rendah.
4	Judul	Application and Experimental Validation of a Computational Fluid Dynamics (CFD) – Based Erosion Prediction Model in Elbows and Plugged Tees
	Peneliti	X. Chen, B.S. McLaury, S.A. Shirazi
	Tahun	2004
	Hasil	Mengembangkan prosedur penelitian prediksi erosi melalui CFD, yaitu: 1. Simulasi Aliran; 2. Pelacakan Partikel; 3. Perhitungan Erosi. Efektifitas model prediksi CFD divalidasikan terhadap data eksperimen
5	Judul	Numerical Prediction of The Erosion due to Particles in Elbows
	Peneliti	G.C. Pereira, F.J. de Souza; D.A.D. Martins
	Tahun	2014

BAB II TINJAUAN PUSTAKA



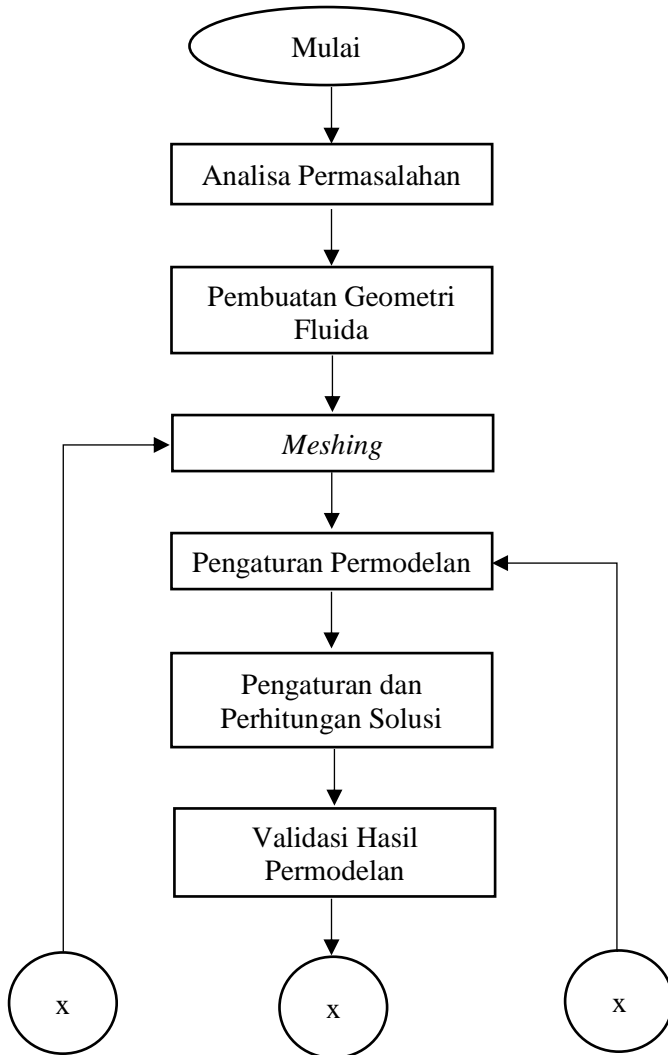
	Hasil	Membandingkan model erosi Ahlert; Neilson dan Gilchrist; Oka; Zhang terhadap eksperimen aliran gas-padat dalam elbow
6	Judul	An Experiental and Numerical Analysis of Erosion Caused by Sand Pneumatically Conveyed Through a Standard Pipe Elbow
	Peneliti	Christoper B. Solnordal, Chong Y. Wong, Joan Boulanger
	Tahun	2015
	Hasil	Efek dari kekasaran dinding pada dinamika rebound partikel telah terbukti penting dalam memprediksi distribusi erosi secara akurat

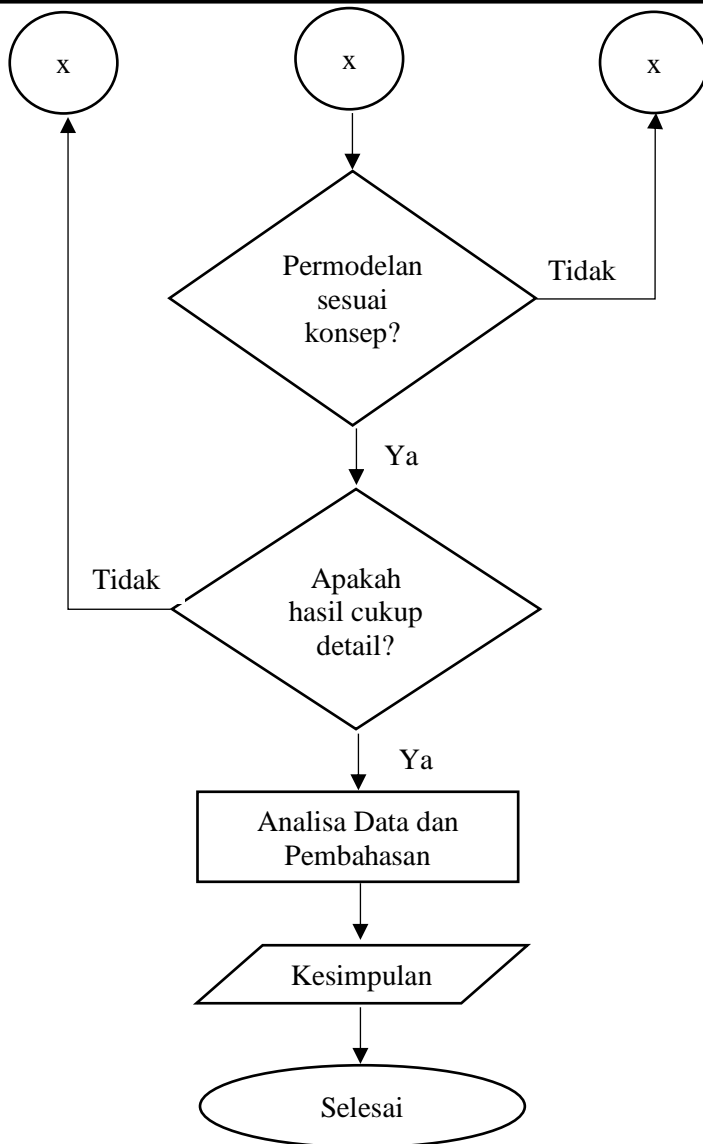


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.2 Prosedur Penelitian

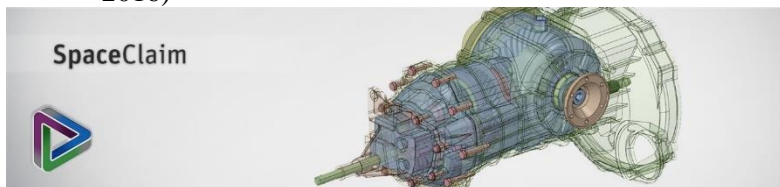
Dalam penelitian ini, pembuatan permodelan dimulai dengan beberapa tahapan dengan memperhatikan hasil eksperimen yang telah dimodelkan pada objek. Uraian lengkap metode penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Analisa Permasalahan

Menentukan target hasil dari permodelan yang akan dilakukan. Analisa pemilihan tipe model yang tepat untuk kasus peristiwa yang dipilih. Menganalisa jika terdapat suatu asumsi tertentu sehingga dapat menyederhanakan permodelan dengan hasil yang tetap akurat. Menghimpun data yang terdapat pada eksperimen untuk dapat dimasukkan pada kondisi batas permodelan.

2. Pembuatan Geometri Fluida

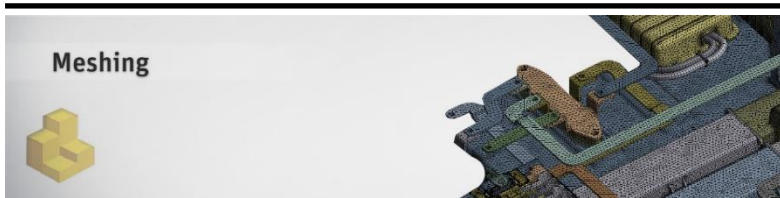
Pembuatan geometri dilakukan dalam program *ANSYS SpaceClaim* dimana program ini terdapat dalam *Workbench*. *ANSYS SpaceClaim* merupakan aplikasi permodelan 3 dimensi yang memberikan solusi efisien untuk permodelan secara umum (ANSYS-Spaceclaim, 2016)



Gambar 3.2 ANSYS SpaceClaim (ANSYS-Spaceclaim, 2016)

3. Meshing

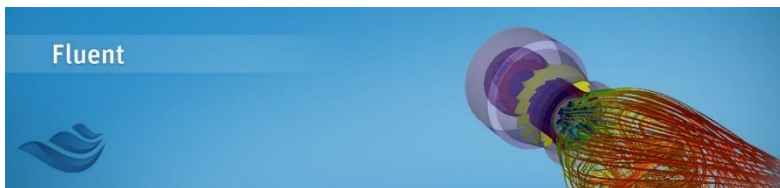
CFD dijalankan oleh program *ANSYS Fluent* dimana mempunyai konsep *Finite Volume Method*. *Meshing* berfungsi sebagai pembagi control volume geometri menjadi elemen yang lebih kecil dan halus dengan tujuan mendapatkan hasil yang lebih konvergen pada analisa.



Gambar 3.3 ANSYS Meshing (ANSYS-Meshing, 2016)

4. Pengaturan Permodelan

Dalam mengatur model mana yang paling tepat, terdapat variabel-variabel yang harus didefinisikan sebelum melakukan perhitungan dalam aplikasi Fluent. Seperti variabel multifasa yang beserta fasa-fasanya, material fluida, kondisi batas, dan kondisi pengoperasian.



Gambar 3.4 ANSYS Fluent (ANSYS-Fluent, 2016)

5. Pengaturan dan Perhitungan Solusi

Terdapat beberapa metode dan berapa kali iterasi dalam perhitungan solusi berdasarkan data model yang telah diinput sebelumnya. Dengan pemilihan metode perhitungan yang paling tepat dapat didapatkan nilai yang konvergen secara efisien.

6. Validasi Hasil Permodelan

Hasil perhitungan yang telah didapatkan dapat dibandingkan dengan eksperimen yang telah ada. Jika hasil permodelan mendekati pola dan nilai dari data eksperimen mengartikan bahwa input telah sesuai. Jika tidak sesuai atau jauh dengan hasil eksperimen, maka input



permodelan dapat diperbaiki. Jika hasil mendekati data eksperimen (Viera, Parsi, Zahedi, McLaury, & Shirazi, 2017) dan dapat dilakukan perhitungan ulang dengan penambahan iterasi dan penghalusan meshing.

7. Analisa Data dan Pembahasan

Hasil permodelan dapat dianalisa dengan program *CFD Post Processing* yang juga terdapat dalam *ANSYS Workbench*. Akan didapatkan hasil berupa kontur dan animasi dari fasa dan distribusi partikel. Hasil yang didapatkan dapat dilakukan perbandingan dengan data eksperimen.

8. Kesimpulan

Kesimpulan hasil penelitian digunakan untuk menentukan input permodelan dan variabel yang paling tepat dengan kondisi yang terdapat pada hasil eksperimen sehingga sewaktu-waktu dapat digunakan kembali dengan kondisi batas yang berbeda.

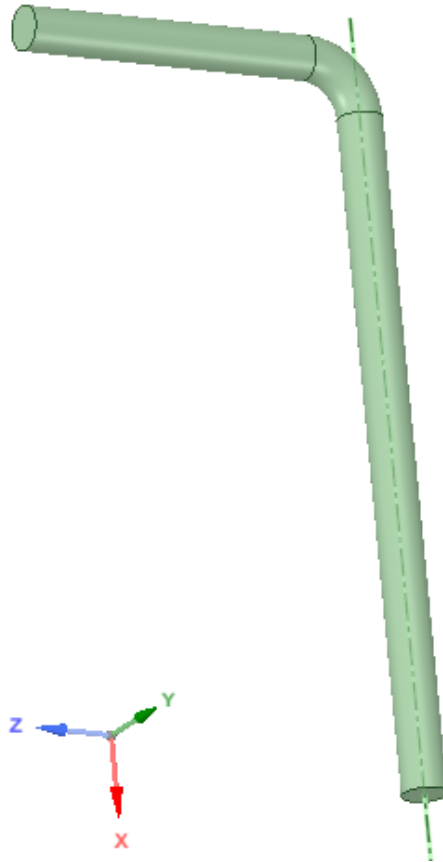
3.3 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat lunak (*software*) ANSYS. ANSYS merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mensimulasikan interaksi dari banyak disiplin ilmu fisika, structural, getaran, dinamika fluida, perpindahan panas, dan elektromagnetik untuk *engineer*. Versi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu ANSYS 19.0 *Student Version*. Dan tipe *solver* yang digunakan dalam ANSYS Workbench adalah *Fluid Flow (Fluent)*.



3.4 Material Elbow Pipa dan Fluida

3.4.1 Dimensi

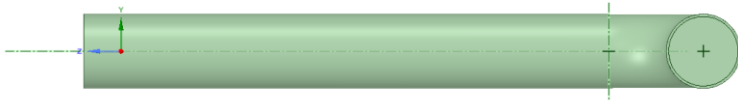


Gambar 3.5 Elbow

Pipa Elbow tipe 76.2 mm (3 in) yang digunakan sebagai objek simulasi erosi memiliki dimensi sebagai berikut:

- Diameter dalam : 60 mm
- Diameter luar : 60.5 mm
- Panjang lengan sumbu x: 1000 mm
- Panjang lengan sumbu z: 500 mm

BAB III METODOLOGI PENELITIAN



Gambar 3.6 Permukaan Inlet Elbow

3.4.2 Sifat Fisik dan Mekanik

Material	: Stainless Steel 316 (SS316)
Massa jenis	: 7990 kg/m ³
Modulus Elastisitas	: 193 GPa
Ultimate Tensile Strength	: 515 MPa
Hardness Brinell	: 178.9
Koefisien Kekasaran Absolut	: 0.015 – 0.03 mm

3.4.3 Kondisi Fluida

Massa Jenis	: 1.2 kg/m ³
Viskositas	: 1.8E-05 kg/ms

3.5 Variabel Penelitian

Tabel 3.1 Variabel Penelitian

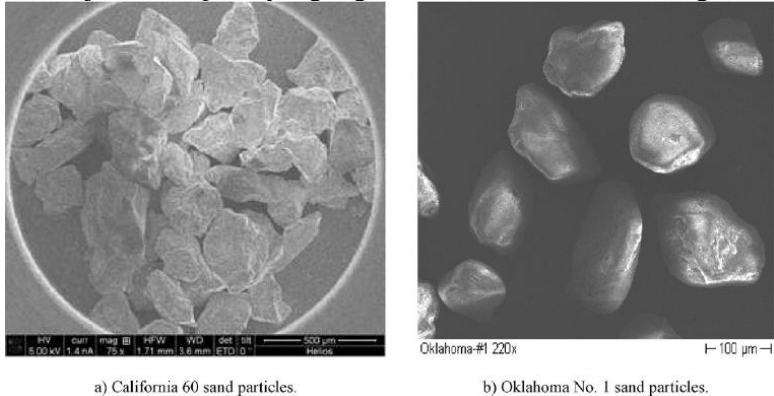
Kecepatan Gas (m/s)	Ukuran Pasir
11	300 μm
15	300 μm
23	300 μm
27	300 μm
11	150 μm
15	150 μm
23	150 μm
27	150 μm

3.6 Data Partikel Pasir

Terdapat dua jenis pasir yang digunakan dalam eksperimen, yaitu California 60 dan Oklahoma. Gambar 3.7 menunjukkan gambar *Scanning Electron Microscope* (SEM).

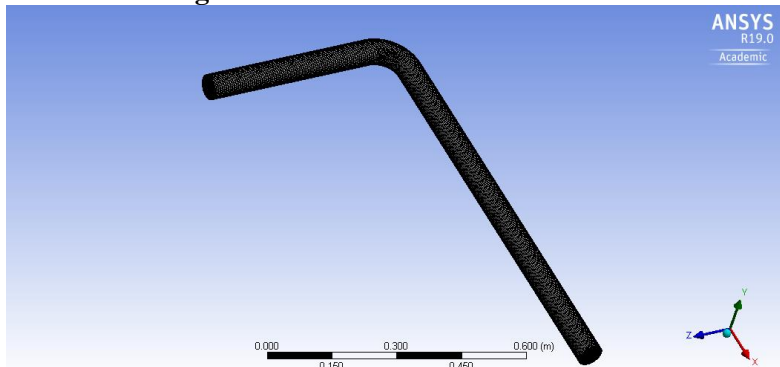


Dimana pasir California mempunyai sisi yang tajam dengan perkiraan ukuran 300 μm , sedangkan pasir Oklahoma lebih menunjukkan sisi yang bulat dengan perkiraan ukuran 150 μm . Massa jenis dari pasir yang digunakan diasumsikan 2650 kg/m^3 .



Gambar 3.7 Partikel yang digunakan untuk eksperimen (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016)

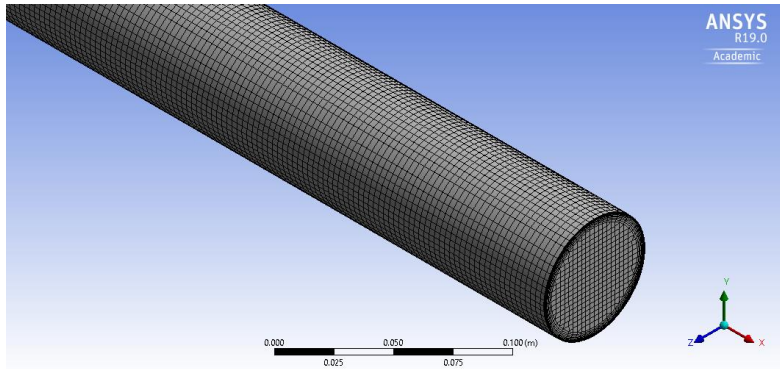
3.7 Meshing



Gambar 3.8 ANSYS Meshing

Metode *CutCell* mempunyai keunggulan dimana mempunyai sel domain yang teratur daripada tetra-mesh. Yang selanjutnya dari keteraturan tersebut dapat mempersingkat

perhitungan dan konvergensi. Ditambahkan 10 *inflation layer* pada dinding pipa untuk kondisi model turbulen $k-\epsilon$ dengan tujuan mendapatkan hasil yang detail pada domain mendekati dinding.



Gambar 3.9 *Hex-mesh* dan *inflation layer*

Detail informasi mesh ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Informasi mesh

Elemen	450444
Nodes	451199
Ukuran Elemen	3E-03 [m]
Metode	CutCell
Layer	10
Rasio Transisi	0.272

3.8 Pre-Proses

Simulasi dikondisikan pada steady state dengan metode solusi SIMPLE. Parameter fluida dan partikel sebagai validasi diberikan pada Tabel 3.3 dan 3.4. Detail *input setup* dapat dilihat pada Lampiran 1.

Tabel 3.3 Parameter Fluida

Fluida	Udara
Thermal	-
Multiphase	-



Model Turbulen	<i>Realizable k-ε</i>
<i>Near-Wall Treatment</i>	<i>Scalable Wall Functions</i>
Viskositas fluida	1.8E-05 [kg/ms]
Kecepatan inlet	11 – 27 [m/s]
Tekanan relatif outlet	0
Kondisi dinding	<i>No slip, smooth walls</i>
Gravitasi	9.81 [m/s ²]

Parameter partikel, pengaturan DPM dan kondisi batas dapat dilihat pada Tabel 3.3. Untuk detail perhitungan kondisi batas dapat dilihat pada Lampiran II.

Tabel 3.4 Parameter Partikel

Tipe Injeksi	<i>Surface [Inlet]</i>
Kecepatan	0 [m/s]
Drag Law	<i>Spherical</i>
Distribusi Diameter	<i>Uniform</i>
Massa Jenis	2650 [kg/m ³]
Model Erosi	Oka
<i>Shear Condition</i>	<i>No Slip</i>

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengantar

CFD mampu untuk menghitung (*computing*) solusi aliran, pelacakan jalur partikel pasir, dan menentukan informasi partikel impact dari permukaan dinding. Lalu, persamaan erosi digunakan untuk menterjemahkan informasi partikel impact (kecepatan partikel impact, sudut impact, dan frekuensi impact) menuju laju erosi (Mansouri, 2016). Perbandingan prediksi erosi menggunakan CFD dengan data eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4.1. Validasi prediksi Erosi berbasis CFD terdiri atas empat bagian utama: model aliran, pelacakan partikel, kalkulasi erosi, dan validasi. Gambar 4.1 menunjukkan terjadinya peningkatan rasio erosi seiring dengan meningkatnya kecepatan gas dan ukuran partikel. Eksperimen dilakukan pada elbow vertikal-horizontal dengan aliran gas berkecepatan 11 m/s sampai 27 m/s pada tekanan atmosfer. Dua ukuran pasir (150 μm dan 300 μm) juga digunakan pada eksperimen. Pengurangan massa logam diukur pada 16 lokasi berbeda dalam elbow menggunakan *dual element ultrasonic transducers*.

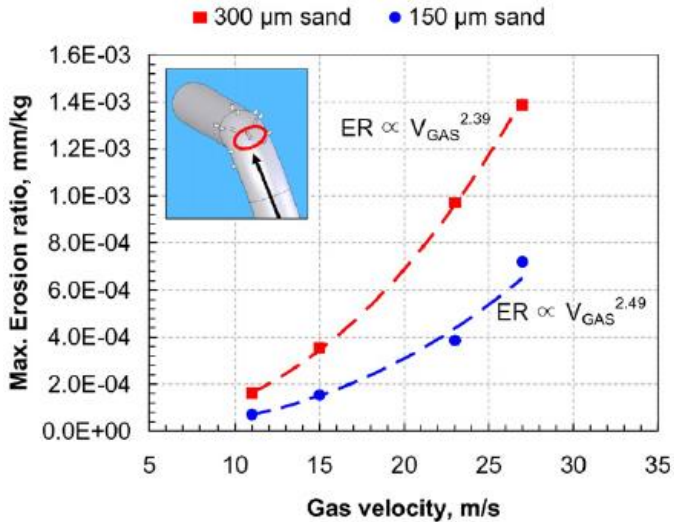
Tabel 4.1 Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Data Eksperimen ($V_{\text{jet}}=102.7$ m/s dengan jarak 12.7 mm dari Jet, Ukuran Pasir 300 μm , Stainless Steel 316)

Sudut Impact (Derajat)	Rasio Erosi (kg/kg)	
	Data Eksperimen	Prediksi CFD
90	6.30E-05	6.43E-05
75	6.63E-05	6.29E-05
60	7.77E-05	6.90E-05
45	8.67E-05	8.02E-05
30	9.07E-05	8.45E-05
15	9.03E-05	8.89E-05

Seperti ditunjukkan pada persamaan erosi 2.24 dan 2.25 oleh Oka, dimana terdapat konstanta yang nilainya berubah



berdasarkan kekerasan dinding material. Nilai konstanta tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2



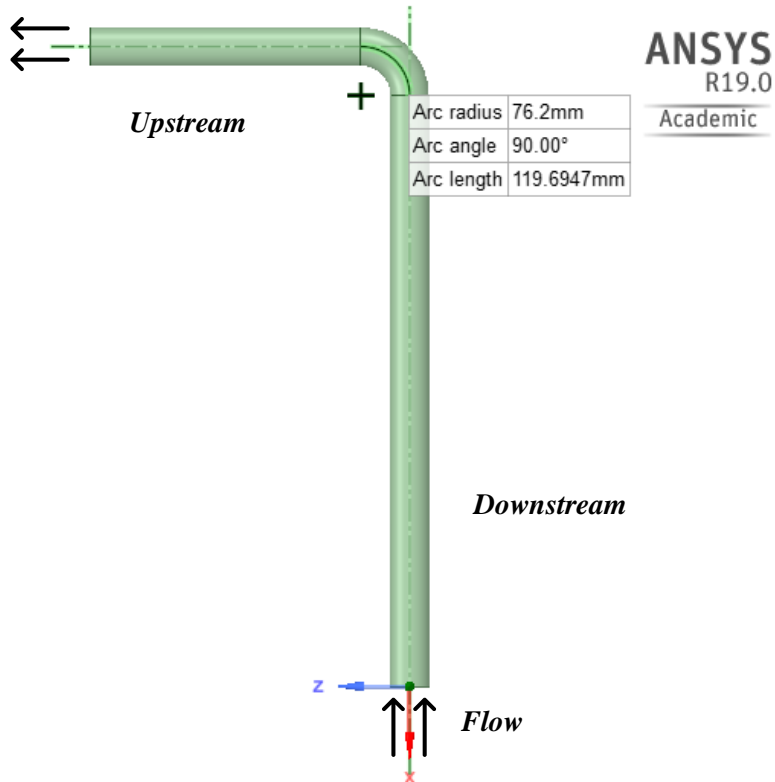
Gambar 4.1 Efek Kecepatan Gas dan Ukuran Partikel pada Rasio Maksimum Erosi pada Aliran Gas-Pasir (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016)

4.2 Model Aliran, Pelacakan Partikel, dan Perhitungan Erosi

Simulasi aliran dari fluida kontinu (*continuous fluid*) merupakan tahap pertama dari prosedur prediksi erosi berbasis CFD. FLUENT menggunakan pendekatan *finite volume* untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes (ANSYS, 2017). Hal pertama untuk mensimulasikan aliran adalah membuat daerah kalkulasi geometri (*meshing*). Gambar 4.2 menunjukkan skema arah aliran fluida yang digunakan untuk mensimulasikan. Dimana pipa mempunyai diameter sudut 76.2 mm. Aliran memasuki melalui *inlet* pipa secara lurus dengan panjang 1000 mm. Lalu



diikuti dengan bagian *elbow* 90^0 ($r/D = 1.5$), dan diakhiri dengan pipa lurus sepanjang 500 mm.

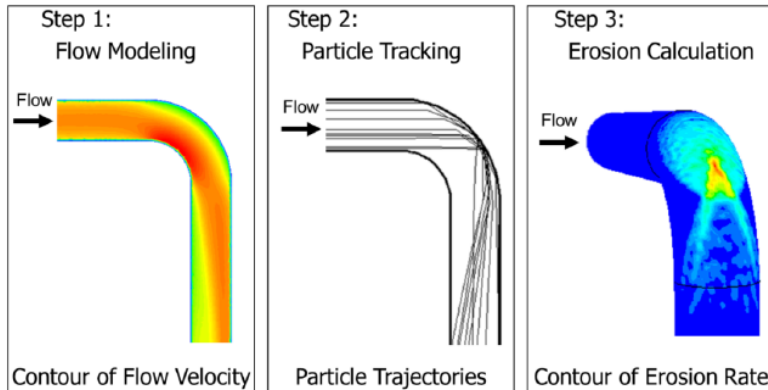


Gambar 4.2 Skema Arah Aliran Pada Geometri Elbow CFD

Tipe *grid* terstruktur digunakan untuk semua simulasi CFD. Mesh yang digunakan pada simulasi berupa *cutcell*, dimana dipilih karena lebih menjamin kestabilan perhitungan, dan didapatkan konvergen lebih mudah. Resolusi mesh yang digunakan dalam simulasi sebanyak 451199 *nodes*. *Meshing* pada *ANSYS Student Version* terbatas pada 512000 *nodes*. Mesh dibuat lebih halus dan detil mendekati dinding pipa, dengan tujuan untuk



menangkap gradien atau perbedaan pada *viscous boundary layer*. Detail meshing dapat dilihat pada Tabel 3.2.



Gambar 4.3 Tiga Langkah Simulasi Erosi CFD: Model Aliran, Pelacakan Partikel, dan Kalkulasi Erosi (Parsi, 2015)

Pengaturan solusi seperti kondisi batas *inlet* berupa input kecepatan sedangkan kondisi *outlet* berupa input *pressure*. Kondisi batas *no-slip* pada dinding Metode spesifik dipilih berupa energi kinetic turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ϵ). Efek gravitasi dianggap sama dalam semua simulasi (9.8 m/s^2). Kecepatan aliran bervariasi dari 11 m/s sampai 27 m/s . Dimana hal ini menghasilkan bilangan Reynolds antara $7.33\text{E}+05$ sampai $1.72\text{E}+06$ dimana mengindikasikan aliran sangat turbulen. Meskipun aliran turbulen sangat tidak stabil dalam kehidupan nyata, dalam kalkulasi ini digunakan nilai rata-rata aliran untuk memprediksi secara tepat hasil perhitungan laju erosi. Pemilihan model turbulen $k-\epsilon$ dikarenakan fungsi ini menghasilkan hasil yang lebih konsisten untuk *grid* yang kurang baik pada *meshing* (ANSYS, 2017).

Partikel mendapatkan gaya momentum dari fluida yang ada, dan fluida tersebut melewati jalur aliran dan memberi dampak pada dinding, menghasilkan erosi. Dalam model pelacakan partikel, sudut tubrukan, dan lokasi tubrukan dalam kapasitas intensitas tubrukan didapatkan. Dalam ANSYS Fluent, model *Discrete Random Walk* (DRW) diaplikasikan untuk merealisasikan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



interaksi antara partikel dan turbulen. Model ini mengasumsikan bahwa partikel melewati struktur aliran turbulen yang terdapat pada aliran (ANSYS, 2017). Interaksi dengan aliran turbulen menyebabkan arah partikel berubah arah lintasannya. Dengan tujuan untuk memvalidasi pelacakan partikel pada ANSYS Fluent, Leduc dkk, membandingkan simulasi CFD dengan hasil eksperimen pada kondisi tekanan rendah (Leduc, Fredriksson, & Hermansson, 2006).

Setelah partikel diinjeksi ke dalam inlet dan dilacak melalui domain, maka dapat dilakukan penerjemahan kedalam kontur erosi pada dinding pipa. Hasil laju erosi yang terdapat pada Fluent masih berupa satuan laju kehilangan massa per m² dalam satu detik (kg/m²s), dimana hasil eksperimen menunjukkan satuan unit rasio erosi (mm/kg) sehingga perlu dikonversi.

$$\begin{aligned} \text{Laju Erosi } \left[\frac{mm}{kg} \right] & \quad (4.1) \\ & = \left(\frac{\text{Laju Erosi DPM } \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] \cdot 10^3}{\text{Densitas } \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot \text{FlowRate } \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \end{aligned}$$

Dimana densitas ini merupakan massa jenis dinding material yang digunakan, dalam kasus ini merupakan Stainless Steel 316 yang mempunyai densitas 7990 kg/m³. Sedangkan *flow rate* merupakan laju pasir yang diinjeksikan ke dalam inlet dalam satuan kilogram per detik.

Sedangkan laju erosi dalam satuan milimeter per tahun dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} \text{Laju Erosi } \left[\frac{mm}{tahun} \right] & \quad (4.2) \\ & = \left(\text{Laju Erosi } \left[\frac{mm}{kg} \right] \cdot \text{Laju Massa Partikel} \left[\frac{kg}{tahun} \right] \right) \end{aligned}$$



4.3 Persamaan Erosi

Erosi terjadi saat partikel melewati jalur fluida dan menumbuk dinding geometri. Untuk perhitungan erosi, saat suatu partikel menumbuk dinding, informasi impak partikel (kecepatan dan sudut) pada setiap sel mesh selanjutnya akan disimpan. Informasi impak tersebut lalu diterjemahkan ke dalam persamaan erosi untuk mengkalkulasi laju erosi yang disebabkan oleh partikel. Dalam eksperimen ini, hanya digunakan persamaan erosi Oka (Oka & Yoshida, 2005) dikarenakan persamaan ini mengandung lebih banyak variable yang tersedia dalam ANSYS Fluent.

Dapat dilihat pada persamaan 2.24 terdapat bilangan eksponen k_2 dan k_3 dimana merupakan fungsi dari eksperimen. Sedangkan pada persamaan 2.25 terdapat eksponen n_1 dan n_2 yang merupakan fungsi dari eksperimen juga. Nilai dari masing-masing eksponen tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.2. Dimana diketahui nilai Kekerasan Vickers SS316 adalah 1.83 GPa yang selanjutnya dimasukkan dalam persamaan untuk menemukan nilai eksponen diatas. Sehingga persamaan *default* yang terdapat pada Fluent harus diubah karena tidak lagi sesuai dengan material referensi yang telah dipakai sebelumnya, karena persamaan tersebut hanya valid pada baja (ANSYS, 2017).

Tabel 4.2 Nilai Parameter Eksponen Persamaan Oka

Eksponen	Persamaan	Nilai
k_2	$2.3(Hv)^{0.038}$	2.3534
k_3	0.19	0.19
n_1	$0.71(Hv)^{0.14}$	0.77268
n_2	$2.4(Hv)^{-0.94}$	1.36

Sehingga persamaan 2.24 menjadi persamaan 4.3 sebagai berikut:

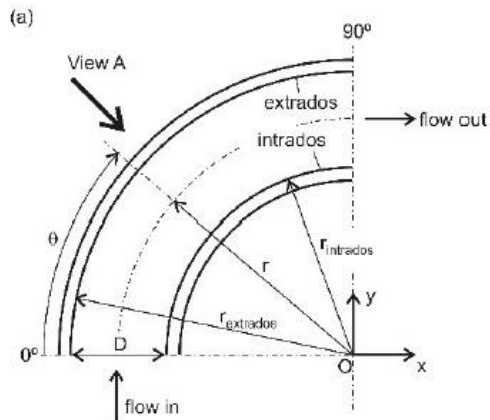
$$E = E_{90} \left(\frac{V}{104} \right)^{2.35} \left(\frac{d}{326} \right)^{0.19} f(\gamma) \quad (4.3)$$

Sedangkan persamaan sudut impak 2.25:

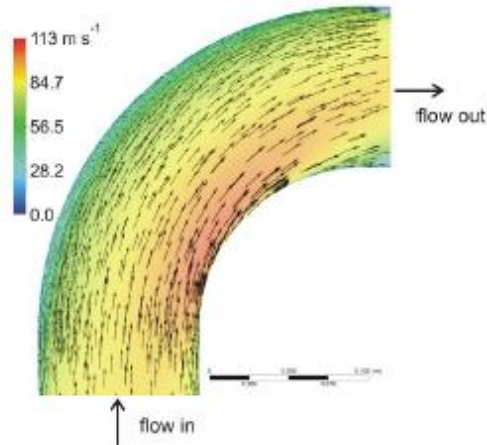
$$f(\gamma) = (\sin\gamma)^{0.77} (1 + 1.83(1 - \sin\gamma))^{1.36} \quad (4.4)$$

4.4 Evaluasi Erosi CFD dan Data Eksperimen

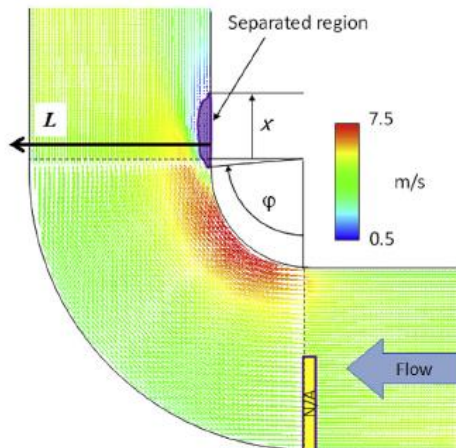
Solusi dari distribusi profil kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.7 sampai 4.14 pada setiap variable kecepatan dan ukuran partikel. Dimana menunjukkan kecepatan tertinggi berada pada *intrados* elbow pada setiap variabel. Hal ini sesuai dengan eksperimen yang dilakukan oleh Solnordal dkk pada Gambar 4.5 dan Ebara dkk pada Gambar 4.6. Dapat dilihat pada Gambar 4.7 sebagai contoh dari hasil CFD dari variabel pertama, kecepatan fluida meningkat secara signifikan saat arahnya berbelok pada sudut belokan 90° . Dengan kecepatan fluida yang semakin tinggi, dapat dilihat perbandingan pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.10 dimana daerah terpisah (*separated region*) semakin luas. *Separated region* merupakan wilayah berkecepatan rendah pada bagian inti dalam pipa (*intrados*).



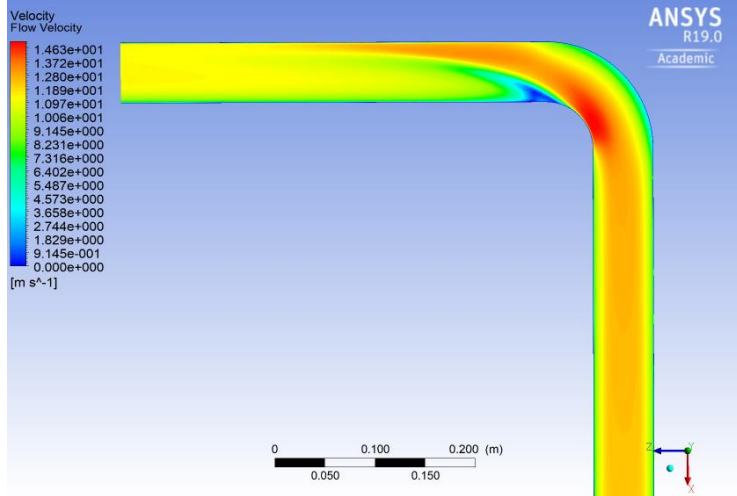
Gambar 4.4 Dimensi Elbow Pipa Standart (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015)



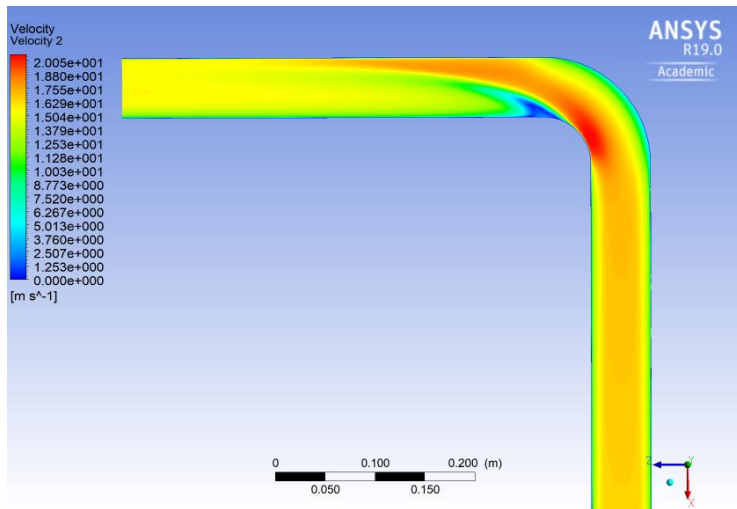
Gambar 4.5 Distribusi Kecepatan pada Elbow Standart pada Kecepatan 80 m/s (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015)



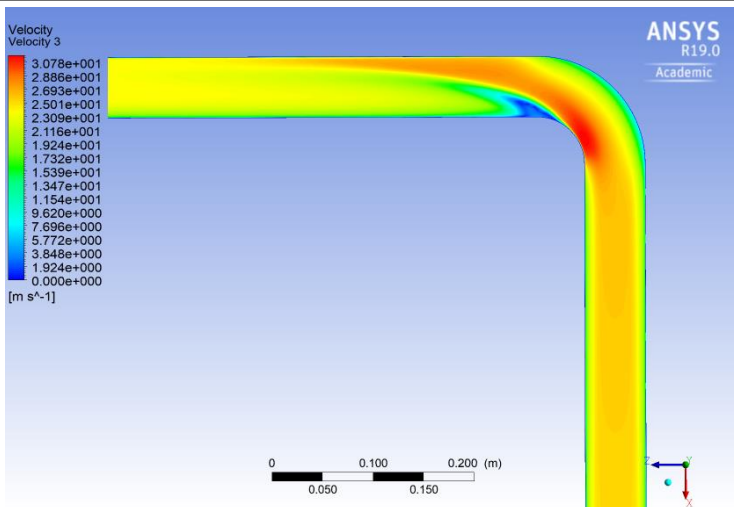
Gambar 4.6 Vektor Kecepatan pada Elbow (Ebara, Takamura, Hashizume, & Yamano, 2016)



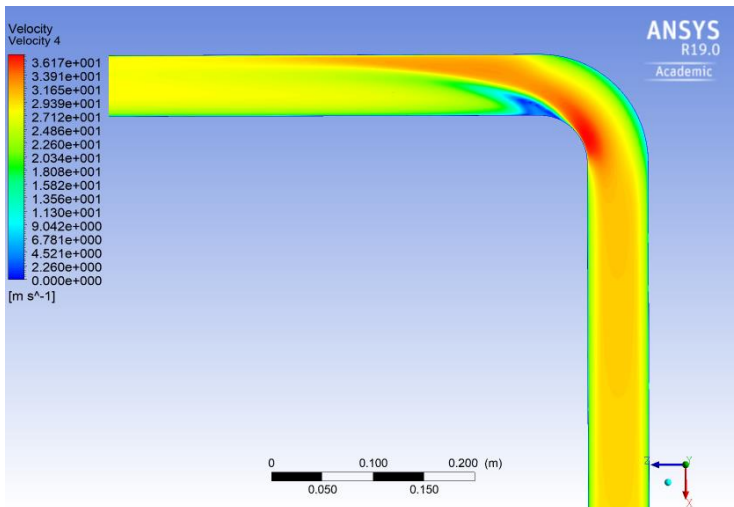
Gambar 4.7 Profil Kecepatan Variabel 1



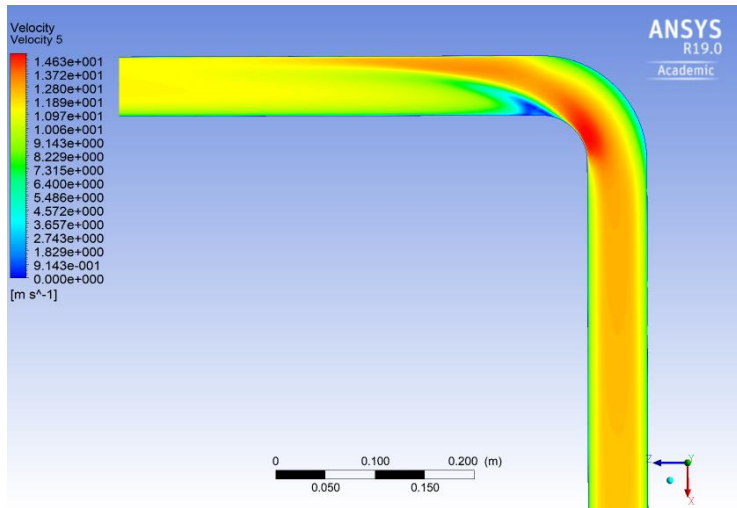
Gambar 4.8 Profil Kecepatan Variabel 2



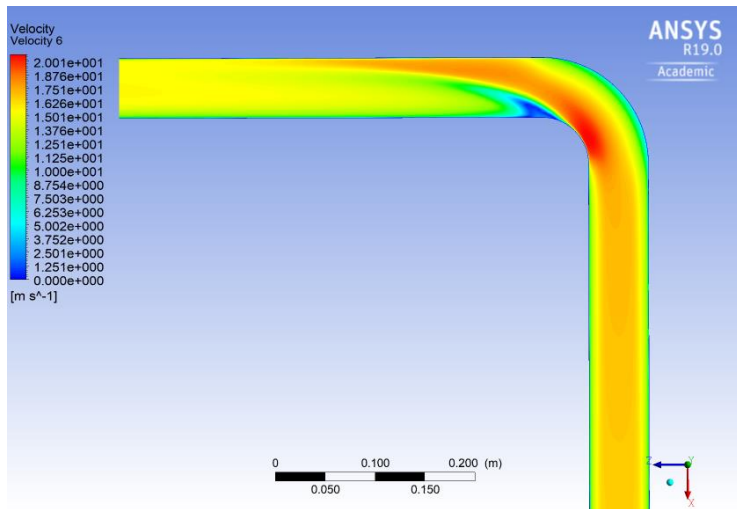
Gambar 4.9 Profil Kecepatan Variabel 3



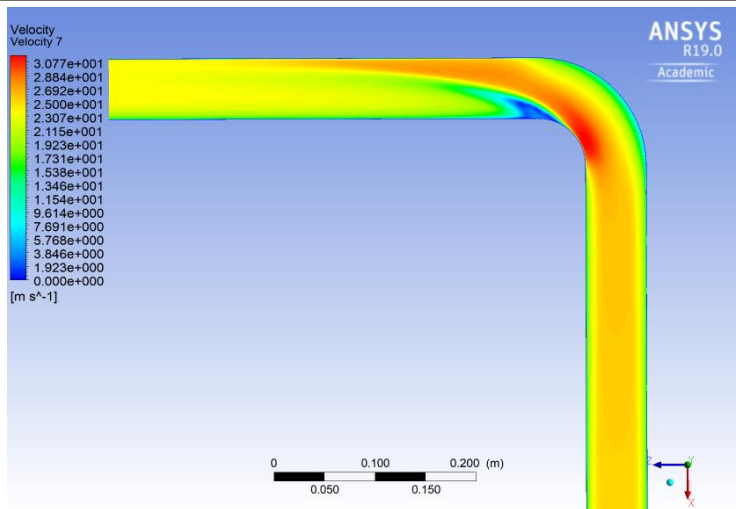
Gambar 4.10 Profil Kecepatan Variabel 4



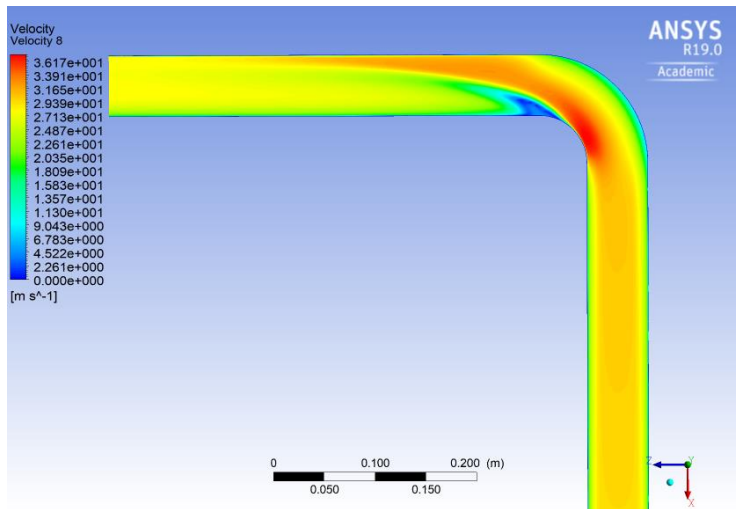
Gambar 4.11 Profil Kecepatan Variabel 5



Gambar 4.12 Profil Kecepatan Variabel 6



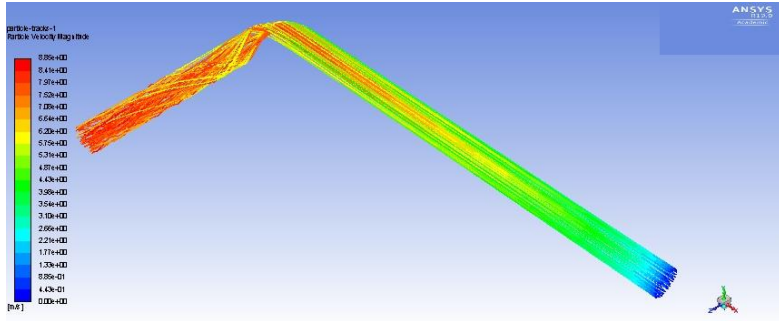
Gambar 4.13 Profil Kecepatan Variabel 7



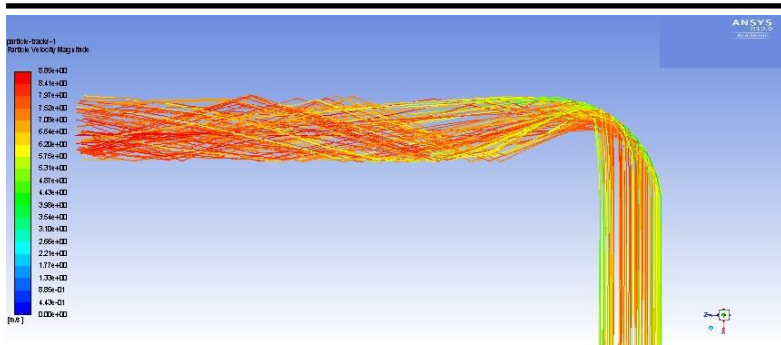
Gambar 4.14 Profil Kecepatan Variabel 8

Setelah menyelesaikan permasalahan model aliran, partikel dilepaskan pada wilayah *inlet* pipa. Profil kecepatan fluida yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 sampai Gambar 4.14 memberikan efek pada lintasan partikel yang melalui domain fluida. Saat partikel pasir mendekati belokan elbow, dan kecepatan meningkat, beberapa dari partikel tersebut menumbuk pada dinding pipa, dan memantul mengikuti fungsi sudut pada persamaan 4.4. Partikel juga berubah arah alirannya mengikuti fluida yang mengalami peningkatan besaran kecepatan (*velocity magnitude*) setelah menumbuk dinding pipa.

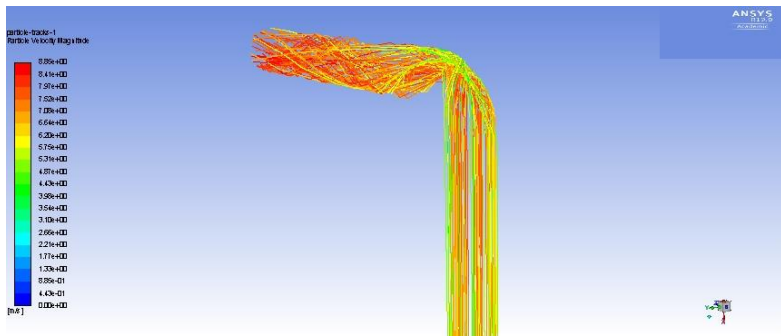
Prediksi CFD distribusi jalur partikel pasir ditunjukkan pada Gambar 4.15 sampai pada Gambar 4.23 diambil dari Variabel 1 sebagai perwakilan dari jalur partikel variabel yang lain dikarenakan distribusi jalur yang sama pada setiap variabel. Partikel pasir diprediksi akan focus menghantam titik tengah karena pantulan dari dinding pipa. Impak dari partikel yang menghantam dinding pipa menghasilkan erosi berbentuk huruf V.



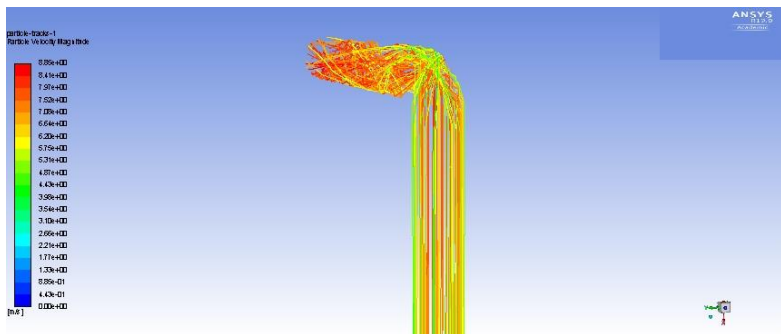
Gambar 4.15 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 (ISO)



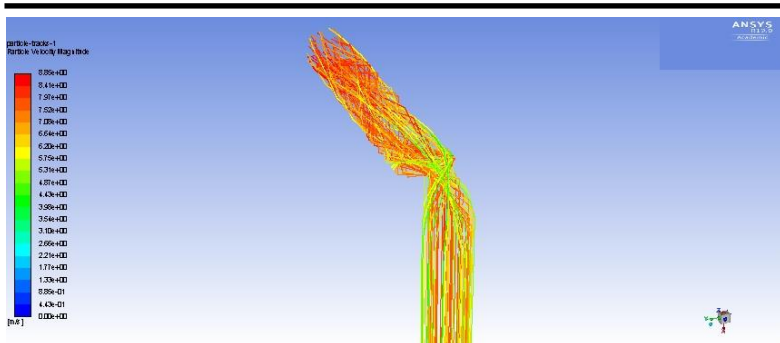
Gambar 4.16 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – Bidang XZ



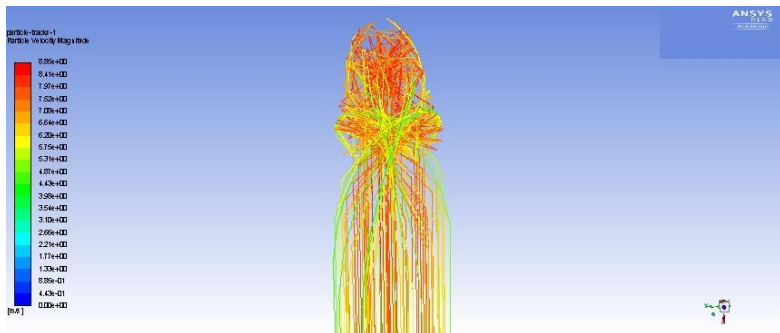
Gambar 4.17 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 1



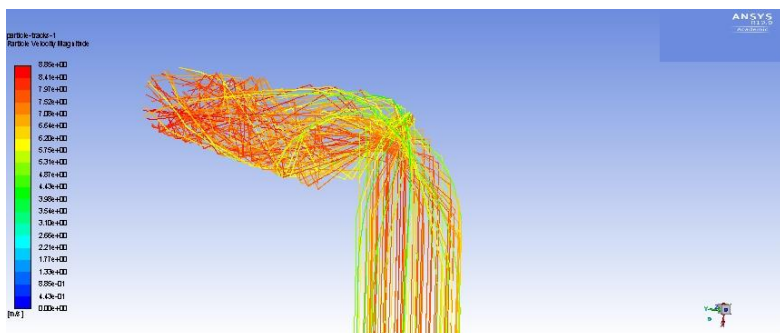
Gambar 4.18 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 2



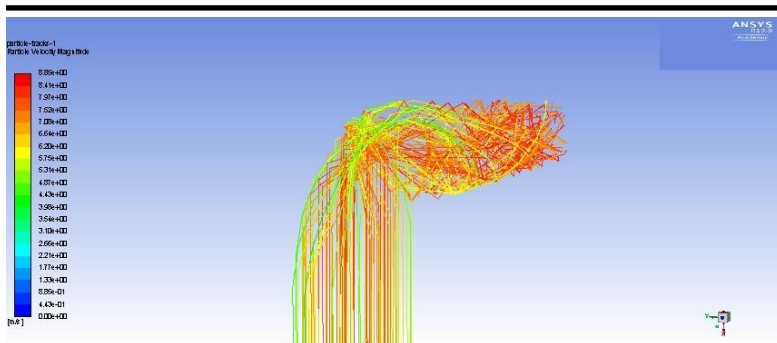
Gambar 4.19 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 3



Gambar 4.20 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 4



Gambar 4.21 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 5



Gambar 4.22 Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – View 6

Dengan kondisi profil kecepatan fluida dan jalur partikel pasir yang telah terselesaikan, kontur erosi dapat dilihat pada Gambar 4.23 sampai Gambar 4.30. Kontur laju erosi pada elbow merupakan hasil yang paling penting dalam simulasi ini, ditunjukkan dengan data pada Tabel 4.3. Dan dapat dilihat perbandingan antara eksperimen dengan simulasi pada Gambar 4.31 untuk ukuran 300 μm sedangkan Gambar 4.32 untuk ukuran pasir 150 μm dengan satuan $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$. Batang berwarna abu-abu menunjukkan laju erosi yang dihasilkan dalam eksperimen, sedangkan batang berwarna biru menunjukkan laju erosi yang dihasilkan dengan simulasi CFD. Dari plotting ini, menunjukkan bahwa laju erosi dapat dihitung dan diprediksi dengan baik oleh CFD untuk ukuran partikel 300 μm sedangkan tidak untuk ukuran partikel 150 μm . Perbandingan laju erosi dengan penelitian lain dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Terlihat jelas terdapat perbedaan hasil antara eksperimen dengan simulasi CFD salah satunya disebabkan oleh model asumsi yang menyebabkan penerapan yang terbatas, dan harus ditambahkan aspek-aspek pada system yang nyata yang tidak terdapat pada model (Solnordal, Wong, & Boulanger, 2015). Masalah yang dihadapi ini terutama model partikel menyebabkan hasil yang tidak akurat dikarenakan partikel pasir merupakan variabel relative yang sulit untuk diketahui secara detail. Seperti bentuk partikel yang berbeda, distribusi ukuran partikel, dan

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

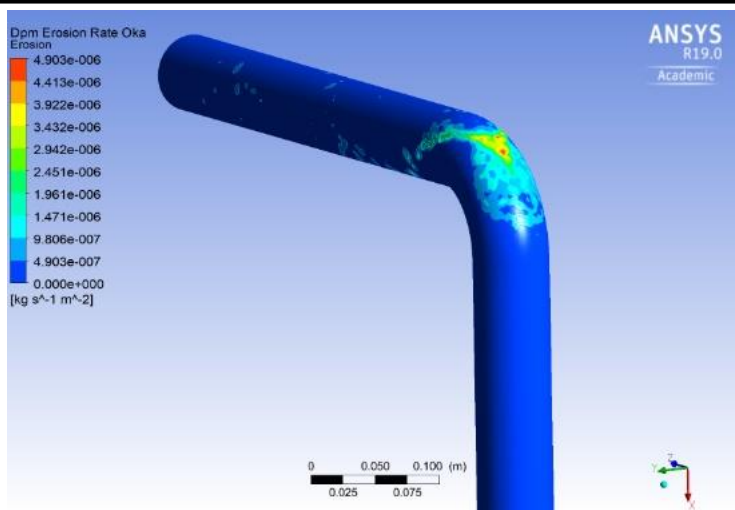


pengaruh putaran partikel yang diabaikan dalam simulasi ini karena keterbatasan model dan spesifikasi komputer yang dibutuhkan.

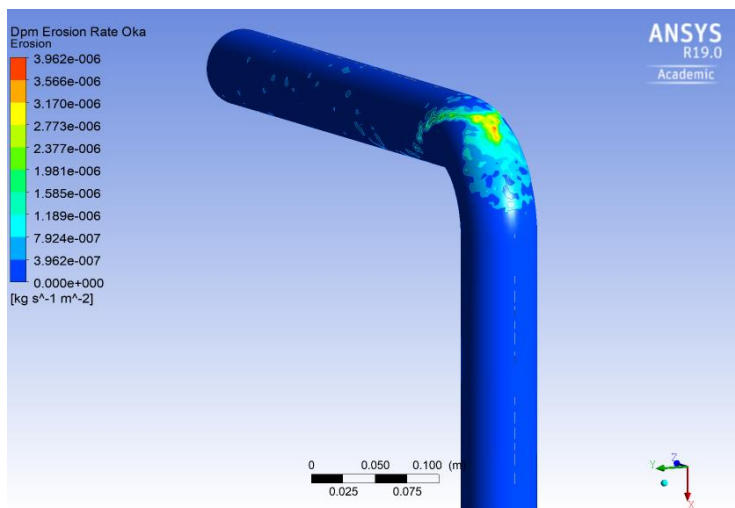
Perbedaan hasil juga disebabkan oleh efek partikel terhadap dinding material elbow. Seperti, setelah dinding elbow tererosi, profil permukaan akan berubah dan hal ini juga akan merubah distribusi partikel dan erosi. Efek dari perubahan permukaan secara terus-menerus pada perkembangan erosi telah dipelajari oleh beberapa penulis untuk system udara dan pasir yang berbeda (Solnordal & Wong, 2012).

Dalam banyak kasus erosi partikel, partikel dilepaskan pada jarak yang sangat dekat sebelum Analisa daerah erosi dan kecepatannya diasumsikan sama dengan kecepatan fluida, dimana merupakan salah satu penyebab terjadinya ketidaksamaan nilai dengan hasil eksperimen saat mensimulasikan fenomena erosi pada aplikasi secara nyata (Halima Hadžiahmetović, 2014)

Simulasi Fluent menunjukkan kontur yang hampir sama pada setiap variabel partikel, dengan bentuk huruf V pada belokan elbow dan terdapat titik-titik erosi akibat dari tumbukan partikel pasir tersebut setelah melewati elbow. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.15 sampai 4.22 terjadi fluktuasi partikel yang menyebabkan tumbukan yang tersebar pada dinding pipa setelah tumbukan utama pada belokan elbow.

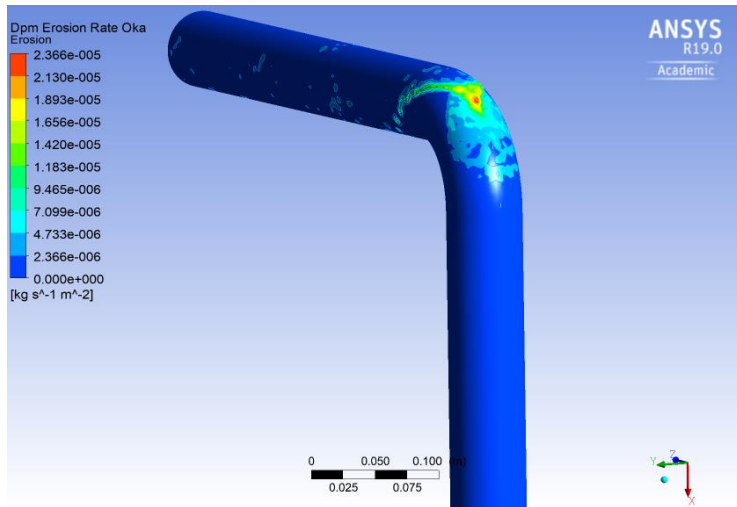


Gambar 4.23 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 11 m/s dan Ukuran Pasir 300 μm

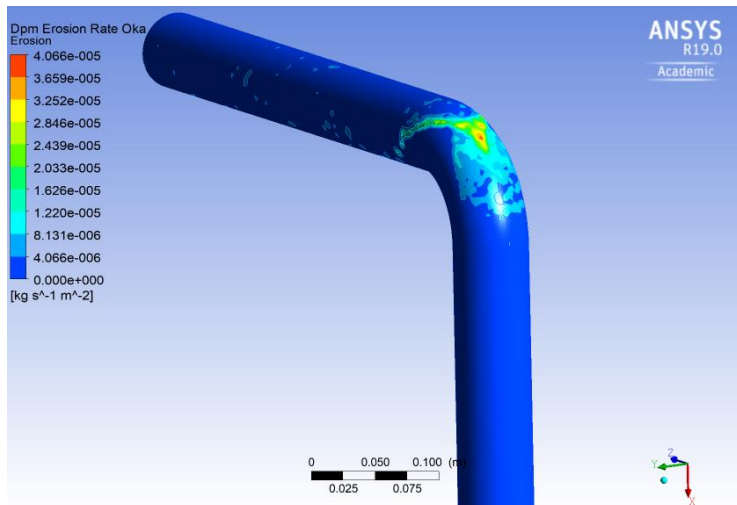


Gambar 4.24 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 15 m/s dan Ukuran Pasir 300 μm

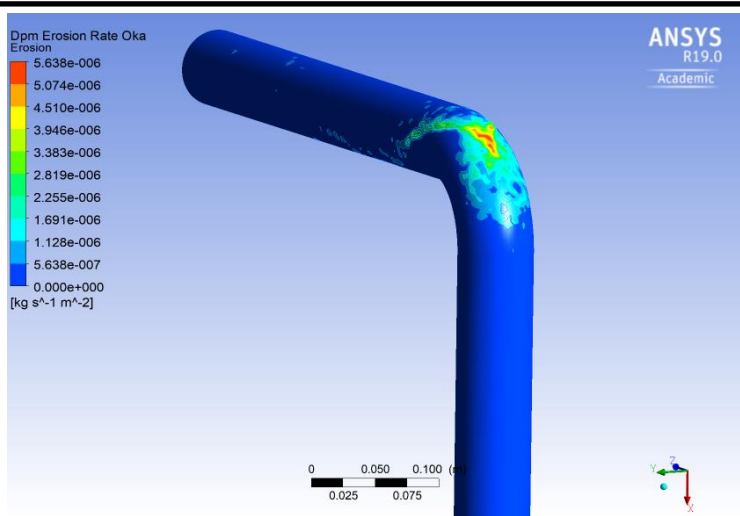
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN



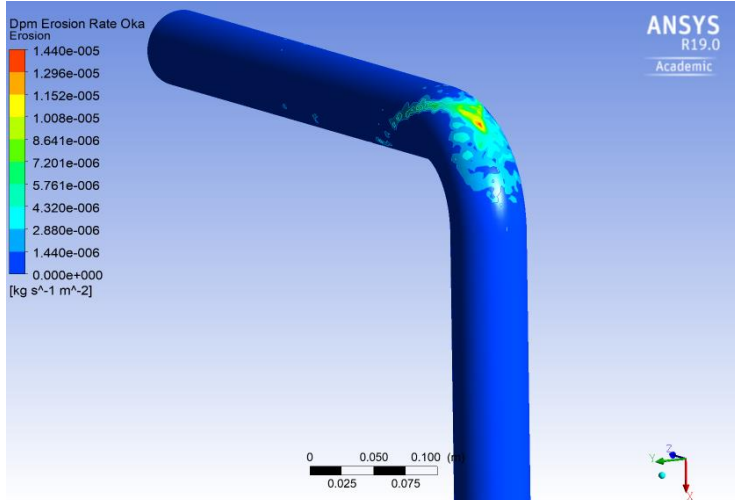
Gambar 4.25 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 23 m/s dan Ukuran Pasir 300 μm



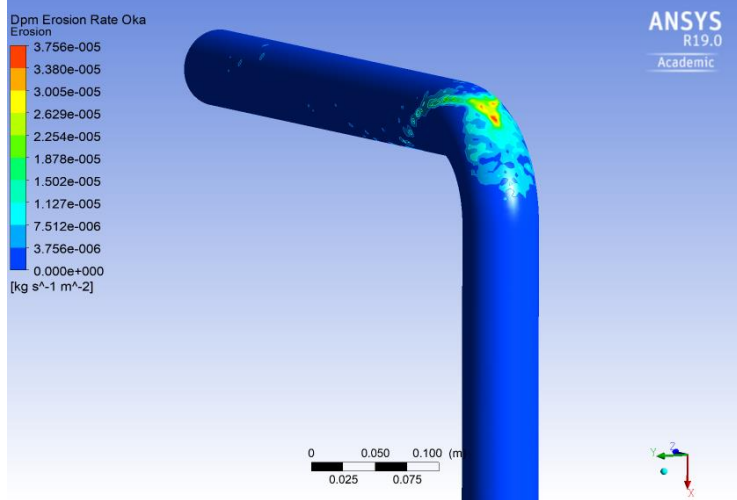
Gambar 4.26 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 27 m/s dan Ukuran Pasir 300 μm



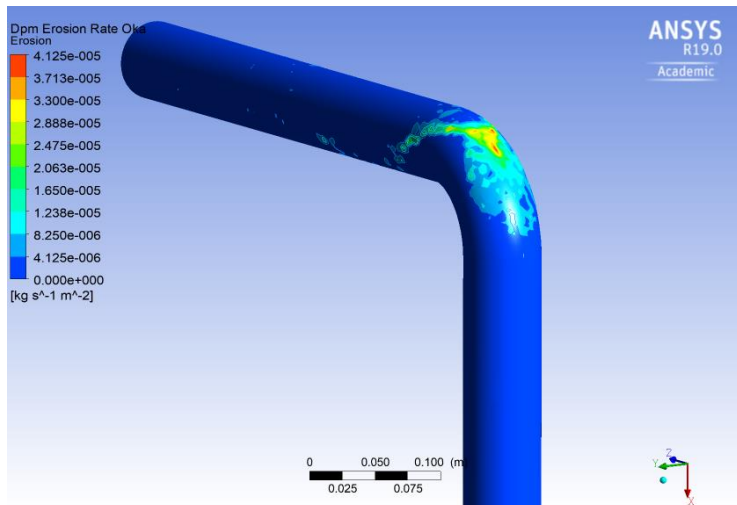
Gambar 4.27 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 11 m/s dan Ukuran Pasir 150 μm



Gambar 4.28 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 15 m/s dan Ukuran Pasir 150 μm



Gambar 4.29 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 23 m/s dan Ukuran Pasir 150 μm



Gambar 4.30 Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 27 m/s dan Ukuran Pasir 150 μm



Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Eksperimen dan Prediksi Erosi CFD

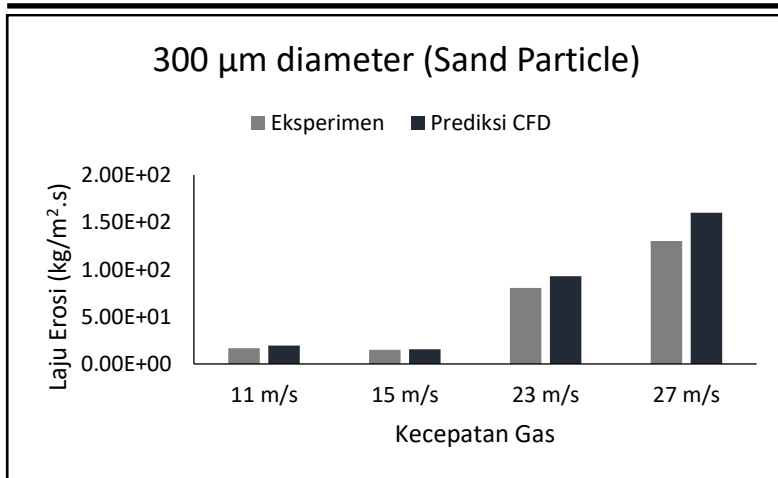
Tes	Vgas	Ukuran Partikel	Laju Pasir	Data Validasi		Prediksi CFD		Prediksi melebihi data	Error
	m/s	μm	kg/hari	mm/tahun	mm/kg	mm/tahun	mm/kg		
1	11	300	288	16.9	1.61E-04	19.34	1.84E-04	1.14	14%
2	15	300	103	14.7	3.93E-04	15.63	4.16E-04	1.06	6%
3	23	300	227	80.3	9.71E-04	93.15	1.12E-03	1.16	16%
4	27	300	256	129.6	1.39E-03	160.25	1.71E-03	1.34	23%
5	11	150	254	6.54	7.05E-05	22.22	2.39E-04	3.4	240%
6	15	150	237	13.2	1.53E-04	57.62	6.66E-04	4.35	336%
7	23	150	257	36.2	3.86E-04	148.01	1.58E-03	4.09	309%
8	27	150	206	54.0	7.19E-04	162.61	2.16E-03	3.01	201%

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

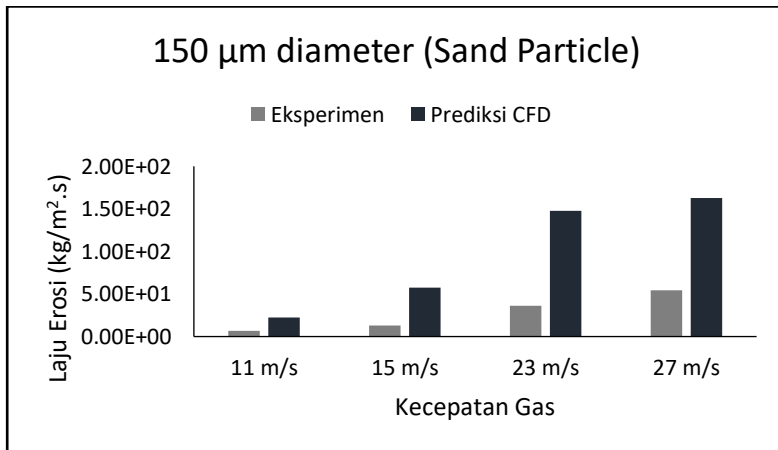


Tabel 4.4 Perbandingan Persen Bias Dari Data UT dengan Prediksi CFD untuk Model Erosi yang Berbeda (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016)

Vgas (m/s)	Ukuran (μm)	Max. UT (mm/kg)	Persen Bias			
			Oka dkk	Zhang dkk	DNV	Neilson
11	300	1.61E-04	52.3	51.8	84.6	81.6
15	300	3.93E-04	47.0	46.7	81.1	82.3
23	300	9.71E-04	35.3	32.2	74.2	81.7
27	300	1.39E-03	33.3	30.3	72.2	82.2
11	150	7.05E-05	13.7	50.7	68.7	61.3
15	150	1.53E-05	-4.2	39.1	58.5	59.3
23	150	3.86E-04	-26.0	26.9	43.6	58.3
27	150	7.19E-04	13	47.2	59.6	72.6
Rata-rata			20.46	40.61	67.81	72.41



Gambar 4.31 Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 300 μm

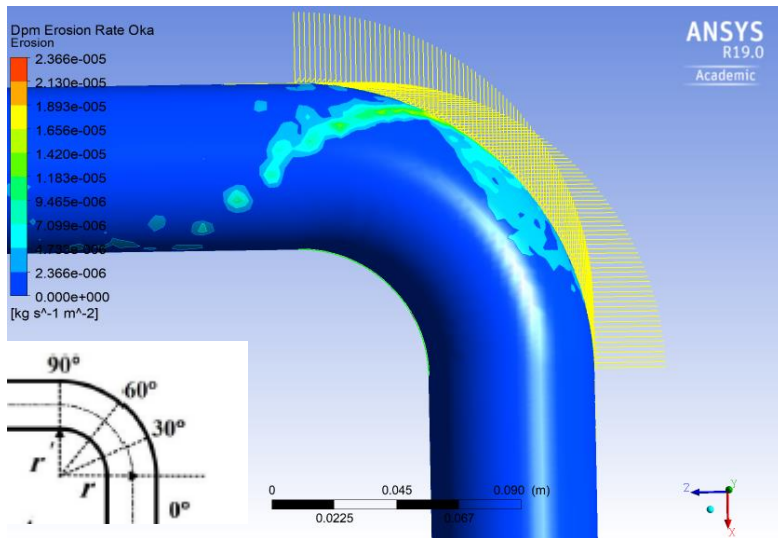


Gambar 4.32 Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 150 μm

Gambar 4.31 dan Gambar 4.32 menunjukkan perbandingan hasil eksperimen dan prediksi CFD untuk partikel

dengan diameter 150 μm dan 300 μm dengan variasi kecepatan. Nilai prediksi CFD menunjukkan hasil perbandingan yang baik dengan hasil eksperimen. Dapat diamati bahwa sesuai dengan perkiraan dan dasar teori, peningkatan kecepatan aliran dan partikel diameter mempengaruhi laju erosi, menjadi meningkat. Dimana kecepatan partikel merupakan fungsi dari kecepatan fluida menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan impact maka akan semakin tinggi juga energi impact partikel terhadap dinding pipa lalu terjadi peningkatan laju erosi.

4.5 Distribusi Erosi Pada Sudut Elbow



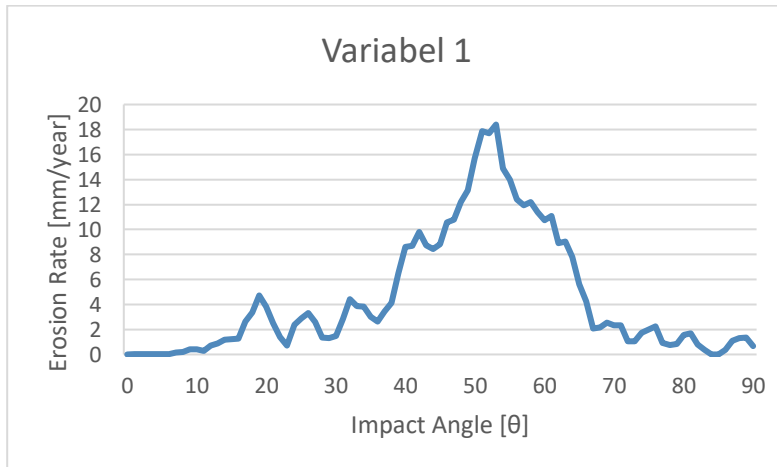
Gambar 4.33 Penempatan Titik Sudut Impact pada Belokan Elbow dalam *CFD-Post*

Pesamaan prediksi erosi yang dapat diaplikasikan pada banyak tipe material dan kondisi impact sulit untuk didapatkan karena banyaknya parameter yang terhubung dengan dampak erosi ke material. Faktor yang mempengaruhi parameter erosi secara

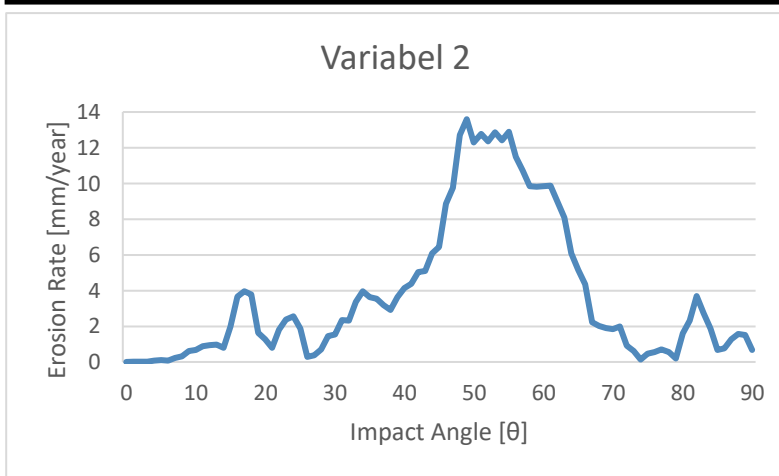


umum antara lain sudut impact, kecepatan, ukuran, bentuk, dan sifat dari partikel. Sifat mekanik dari material impact juga merupakan parameter utama yang mempengaruhi mekanisme erosi. Di sisi lain, erosi dapat sangat bervariasi bergantung pada sudut impact dan sifat material. Secara umum sifat material dan sudut impact mempengaruhi deformasi plastis yang berulang dalam keseluruhan pemuangan material (Oka, Okamura, & Yoshida, 2005)

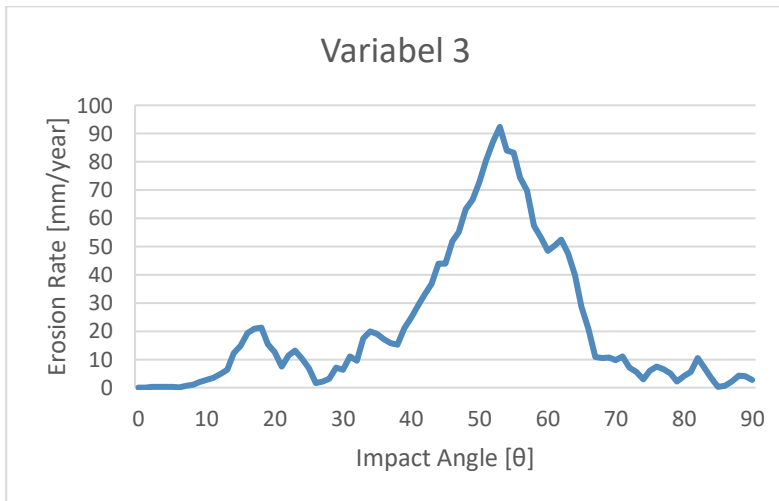
Diperlukan analisa erosi pada tiap titik elbow sepanjang garis tengah pipa untuk mengetahui pada titik mana terjadi erosi paling signifikan berdasarkan sudut impact. Dapat diteliti pada Gambar 4.34 sampai 4.41 yang menunjukkan distribusi prediksi erosi setelah pasir melaju menumbuk elbow, dan dimana puncak laju erosi tertinggi secara bervariasi terjadi pada sudut impact 50° – 55° . Hasil ini sedikit berbeda dengan eksperimen yang dilakukan oleh Viera dkk (Viera, Mansuori, McLaury, & Shirazi, 2016) dimana puncak erosi terjadi pada sudut 47° .



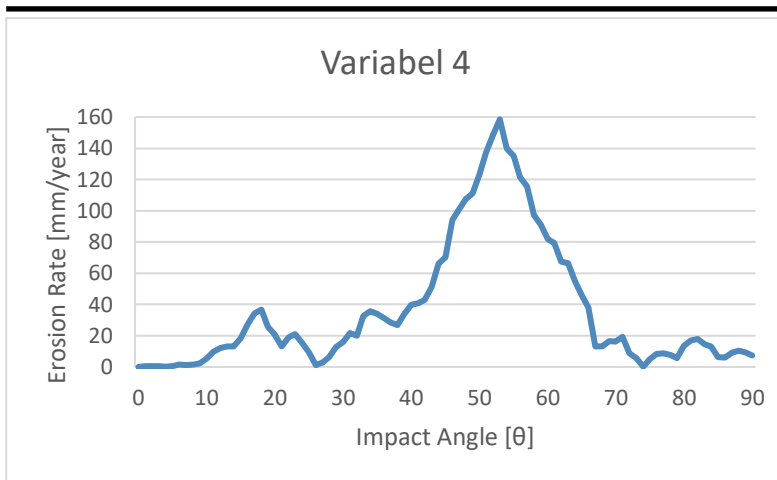
Gambar 4.34 Distribusi Erosi pada Sudut Impact Elbow untuk Diameter $300 \mu\text{m}$ dan Kecepatan Gas 11 m/s



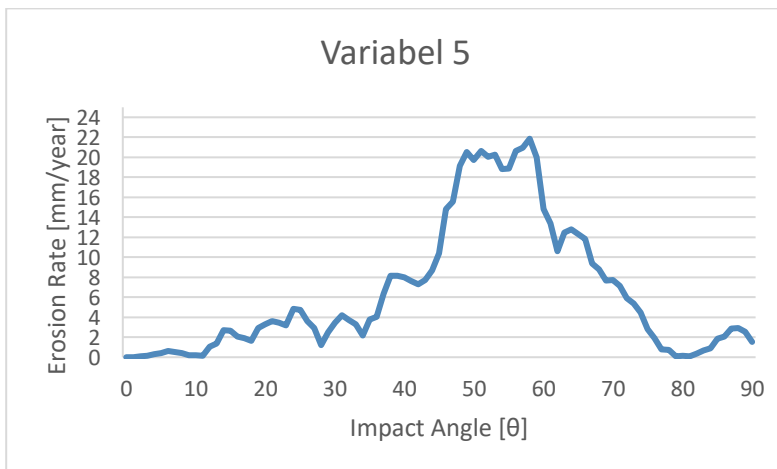
Gambar 4.35 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 15 m/s



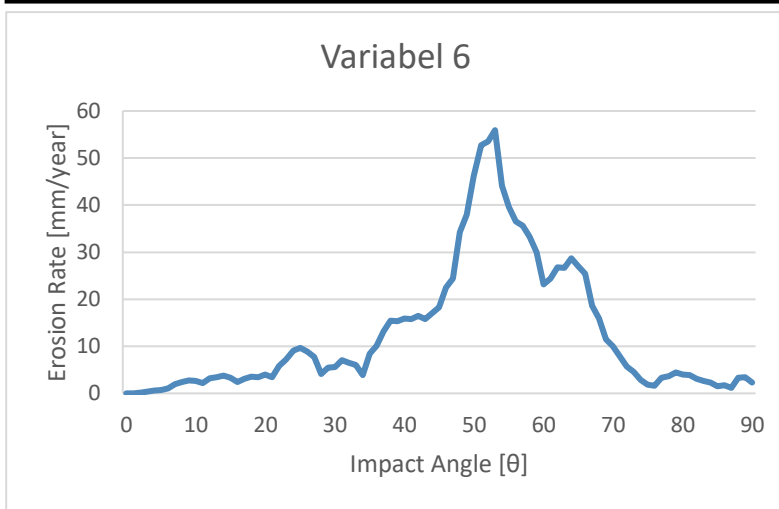
Gambar 4.36 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 23 m/s



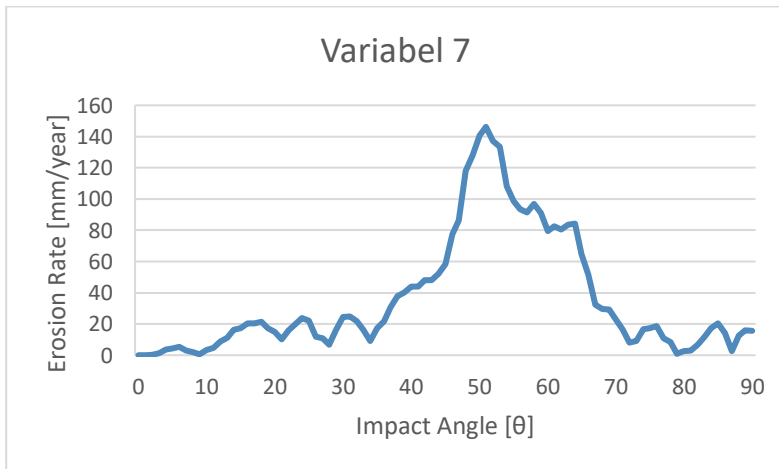
Gambar 4.37 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 27 m/s



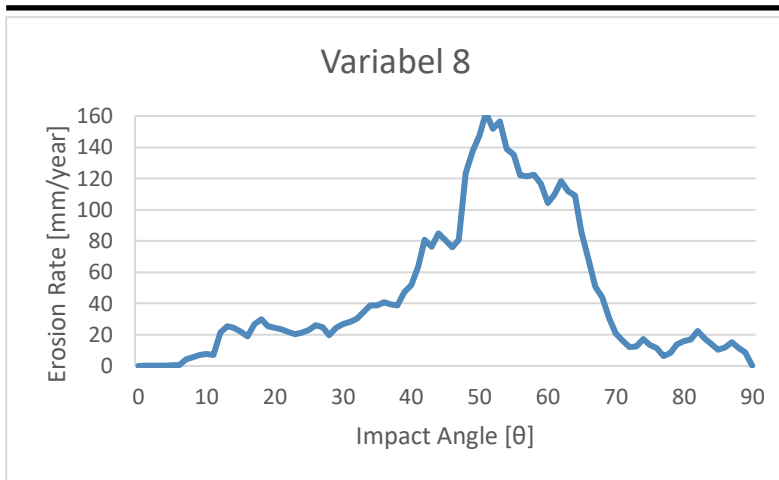
Gambar 4.38 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 11 m/s



Gambar 4.39 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 15 m/s



Gambar 4.40 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 23 m/s



Gambar 4.41 Distribusi Erosi pada Sudut Impak Elbow untuk Diameter 150 μm dan Kecepatan Gas 27 m/s

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Didapatkan pola erosi yang sama untuk kedua ukuran pasir yaitu pola berbentuk 'V' pada belokan elbow sebagai hasil dari tumbukan partikel pasir dengan dinding material.
2. Digunakan perhitungan laju erosi menggunakan persamaan Oka yang dimodifikasi menyesuaikan dengan material dinding. Untuk kedua ukuran partikel pasir, tren dari laju erosi dari simulasi CFD melebihi (*overpredict*) dengan rata-rata nilai 1.17 dengan error 14.75% untuk partikel ukuran 300 μm dan 3.71 dengan error 271.5% untuk ukuran partikel 150 μm .

5.2 Saran

Dapat dipertimbangkan untuk dikembangkan dalam penelitian selanjutnya antara lain:

1. Perlu dikembangkan model perubahan kekasaran permukaan dinding material dikarenakan sudut impak partikel akan berubah seiring dari perubahan kekasaran material target.
2. CFD perlu mengembangkan bentuk dan distribusi partikel secara detail untuk meningkatkan akurasi dari hasil.
3. Diperlukan pengembangan model erosi partikel secara lebih luas dengan perbedaan diameter dan kecepatan eksperimen yang lebih bervariasi sehingga didapatkan persamaan yang tepat.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Abdolkarimi, V., & Mohammadikhah, R. (2013, August 27). CFD Modeling of Particulate Erosive Effect on a Commercial Scale Pipeline Bend. (A. B. Yu, Ed.) *ISRN Chemical Engineering*, 2013, 10. doi:10.1155/2013/105912
- ANSYS. (2017, October). *Fluent Theory Guide*. Orlando, United States of America.
- ANSYS-Fluent. (2016). *ANSYS Fluent*. Retrieved from ANSYS: <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>
- ANSYS-Meshing. (2016). *ANSYS Meshing*. Retrieved from ANSYS: <https://www.ansys.com/products/platform/ansys-meshing>
- ANSYS-Spaceclaim. (2016). *ANSYS Spaceclaim*. Retrieved from ANSYS Product: <http://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>
- Aquari, D., & Fontani, E. (2001). Erosion of Ductile and Brittle Materials. *E. Meccanica*, 36(6), 651-661. doi:10.1023/A:1016396719711
- Aquaro, D., & Fontani, E. (2000, September). Erosion of Ductile and Brittle Materials: Comparison between Theoretical and Numerical Models and Experimental Data. *AIMETA International Tribology Conference* (pp. 20-22). Aquila: Kluwer Academic Publishers 2001.
- Bellman, R., & Levy, A. (1981). erosion Mechanism in Ductile Materials. *Wear*, 70, 1-28.
- Burnett, A., De Silva, S., & A, R. (1994). Comparison Between Sand Blast and Centripetal Effect Accelerator Type Erosion Testers. *Proceeding of the 8th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, 168-178.
- Byars, H. (1999). *Corrosion Control in Petroleum Production* (2nd ed.). Houston, Texas, USA: NACE Press.
- Chen, X., McLaury, B. S., & Shirazi, S. A. (2004). Application and Experimental Validation of a Computational Fluid



-
- Dynamics (CFD)-based Erosion Prediction Model in Elbow and Plugged Tees. *Computer and Fluids*, 33, 1251-1272. doi:10.1016/j.compfluid.2004.02.003
- Clark, H. (2002). Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements OR... Do You Know What Your Particles Are Doing? *Tribology International*, 35, 617-624.
- Cundall, P., & Strack, O. (1979, March). A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, 29(1), 47-65. doi:10.1680/geot.1979.29.1.47
- DNV. (2007). *Recommended Practice RP O501 Erosive Wear in Piping Systems*. HØvik: Det Norske Veritas.
- Dosanjh, S., & Humphrey, J. A. (1985, April 15). The Influence of Turbulence on Erosion by Particle-Laden Fluid Jet. *Wear*, 102(4), 309-330. doi:10.1016/0043-1648(85)90175-9
- Ebara, S., Takamura, H., Hashizume, H., & Yamano, H. (2016). Characteristic of Flow Field and Pressure Fluctuation in Complex Turbulent Flow in the Third Elbow of a Triple Elbow Piping with Small Curvature Radius in Three-Dimensional Layout. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1-7. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.02.068
- Edwards, J. K., McLaury, B. S., & Shirazi, S. A. (2001). Modelling Solid Particle Erosion in Elbows and Plugged Tees. *Energy Resource Technology*, 123, 277-284. doi:10.1115/1.1413773
- Felten, F. N. (2014). Numerical Prediction of Solid Particle Erosion for Elbow Mounted in Series. *ASME 2014 4th Joint US-European Fluid Engineering Division Summer Meeting* (p. 10). Chicago: The American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/FEDSM2014-21172
- Ferziger, J., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics* (3rd ed.). New York: Springer.
- Finnie. (1958). The Mechanism of Erosion of Ductile Metals. *3rd US National Congress of Applied Mechanics*, 527-532.
-



-
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 87=103.
- Finnie, I., Wolak, J., & Kabil, Y. (1967). Erosion of Metal by Solid Particles. *J. of Materials*, 2, 682-700.
- Gandhi, B., & Borse, S. (2002). Effect of Particle Size and Size Distribution on Estimating Erosion Wear of Cast Iron in Sand-Water Slurries. *Indian J. Eng. Mater. Sci*, 9, 480-486.
- Hadziahmetovis, H., Hodzic, N., Kahrimanovic, D., & Dzaferovic, E. (2014). Computational Fluid Dynamics (CFD) Based Erosion Prediction Model in Elbow. *The Vjesn*, 275-282.
- Halima Hadžiahmetović, N. H. (2014). Computaional Fluid Dynamics (CFD) based Erosion Prediction Model in Elbow. *O Hrc̑ku*, 275 - 282. Retrieved from <https://hrcak.srce.hr/120378>
- Heidersbach, R. (2011). *Metallurgy and Corrosion Control in Oil and Gas Production*. (R. W. Revie, Ed.) Hoboken, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons .
- Huser, A., & Kvernfold, O. (1998). Prediction of Sand Erosion in Process and Pipe Components. *North American Conference on Multiphase Technology* (pp. 217-227). Banff: BHR group.
- Hutchings, I. (1992). Ductile-Brittle Transitions and Wear Maps for the Erosion and Abrasion of Brittle Materials. (Wear, Ed.) *Journal of Physics D: Applied Physics*, 25, A212.
- Kesana, N., Grubb, S., McLaury, B., & Shirazi, S. (2013). Ultrasonic Measurement of Multiphase Flow Erosion Patterns in a Standard Elbow. *J Energy Resource*. 1, pp. 1183-1195. Rio Grande: The American Society of Mechanical Engineers. doi:10.1115/FEDSM2012-72237
- Kleis, I., & Kulu, P. (2008). *Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Material*. Ohio: ASM International.
- Kosel, T. H. (1992). Solid Particle Erosion. *ASM Handbook*, 18(Friction, Lubrication, and Wear Technology), 199-213.
-



-
- Laintone, J. (1979). Aerodynamics Effect in Erosion Process. *Wear*, 56, 239-246.
- Leduc, S., Fredriksson, C., & Hermansson, R. (2006). Particle-Tracking Option in Fluent Validated by Simulation of a Low-Pressure Impactor. *Advanced Powder Technology*, 17(1), 99-111. doi:<https://doi.org/10.1163/156855206775123539>
- Levy, A. (1995). Solid Particle Erosion and Erosion-Corrosion of Materials. *ASM International*.
- Levy, A., & Chick, P. (1983). The Effect of Erodent Composition and Shape on the Erosion of Steel. *Wear*, 89, 151-162.
- Li, X., & Shen, H. (1996, February 28). A Computer Simulation of Pipe Bend Erosion in a Dilute Pneumatic Transport of Granular Materials. *Particulate Science and Technology*, 14(1), 59-73. doi:10.1080/02726359608906686
- Lyons, W., Plisga, G., & Lorenz, M. (2015). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering* (3rd ed.). (W. Lyons, Ed.) Burlington: Gulf Professional Publishing.
- Mamdouh M. Salama; Conoco Inc. (1998). An Alternative to API RP 14E Erosional Velocity Limits for Sand Laden Fluids. *Offshore Technology Conference* (pp. 721-723). Texas: Society of Petroleum Engineers. doi:10.4043/8898-MS
- Mansouri, A. (2016). *A Combined CFD-Experimental Method for Developing an Erosion Equation both Gas-Sand and Liquid-Sand Flows*. Oklahoma: The University of Tulsa.
- McLaury, B., Shirazi, S., Shadley, J., & Rybicki, E. (1996). Modeling Erosion in Chokes. *Summer Meeting*. San Diego: Proceeding of ASME Fluid Engineer.
- Morsi, S., & Alexander, A. (1972, March 1). An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 55(2), 193-208. doi:10.1017/SS0022112072001806
- Oka, Y., & Yoshida, T. (2005). Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Damage Impact: Part 2:
-



-
- Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage. *Wear*, 259, 102-109.
- Oka, Y., Okamura, K., & Yoshida, T. (2005). Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Impact Part 1: Effects of Impact Parameters on a Predictive Equation. *ScienceDirect*, 95-101.
- Parsi, M. (2015). *Sand Particle Erosion in Vertical Slug/Churn Flow*. Oklahoma: The University of Tulsa.
- Pereira, G., Souza, F. d., & Martins, D. (2014). Numerical Prediction of the Erosion Due to Particles in Elbows. *Powder Technology*, 105-117.
- Salik, J., Buckley, D., & W, B. (1981). The Effect of Mechanical Surface and Heat Treatments on Erosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy. *Wear*, 65, 351-358.
- Shirazi, S., McLaury, B., Shadley, J., & Rybicki, E. (1995). Generalization of the API RP 14E Guideline for Erosive Service. *Journal of Petroleum Technology*. 47, pp. 693-698. Houston: Society of Petroleum Engineers. doi:10/2118/28518-PA
- Smeltzer, C., Gulden, M., & Compton, W. (1970). Mechanisms of Metal Removal by Impacting Dust Particles. *J. Basic Eng. Trans*, 639-654.
- Solnordal, C. B., Wong, C. Y., & Boulanger, J. (2015, April 25). An Experimental and Numerical Analysis of Erosion Caused by Sand Pneumatically Conveyed Through a Standard Pipe Elbow. (I. Hutchings, Ed.) *International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear(Wear)*, 3. doi:10.1016/j.wear.2015.04.017
- Solnordal, C., & Wong, C. (2012). Predicting Surface Profile Evolution Caused by Solid Particle Erosion. *Ninth International Conference of CFD in the Minerals and Process Industries*, 8.
- Sooraj, V. S., & Radhakrishnan, V. (2013). Elastic Impact of Abrasives for Controlled Erosion in Fine Finishing of
-



-
- Surfaces. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(5), 1-12. doi:10.1115/1.4025338
- Srinivasan, S., & Scattergood, R. (1988). Effect of erodent hardness on erosion of brittle materials. *Wear*, 128, 139-152.
- Strømme, E. G. (2015). *Simulation and Evaluation of Slurry Erosion*. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology. Retrieved October 2017
- Sundarajan, G. (1991). A comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials. *Wear*, 149, 111-127.
- Tilly, G. (1973). A Two Stage Mechanism of Ductile Erosion. *Wear*, 23(1), 87-96.
- Versteeg, H., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Edinburgh, Harlow, England: Pearson Education Limited.
- Viera, R. E., Mansuori, A., McLaury, B. S., & Shirazi, S. A. (2016, January). Experimental and Computational Study of Erosion in Elbow Due to Sand Particles in Air Flow. *Powder Technology*, 288, 339-353. doi:10.1016/j.powtec.2015.11.028
- Viera, R. E., Parsi, M., Zahedi, P., McLaury, B. S., & Shirazi, S. A. (2017, October). Sand Erosion Measurement Under Multiphase Annular Flow Conditions in a Horizontal-Horizontal Elbow. *Powder Technology*, 320, 625-636. doi:10.1016/j.powtec.2017.07.087
- Wang, J., Shirazi, S., Shadley, J., & Rybicki, E. (1996). Application of Flow Modelling and Particle Tracking to Predict Sand Erosion Rates in 90 degree Elbows. *ASME FED*, 236, 725-734. Retrieved October 2017
- White, F. M. (2009). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill.
- Zhu, H., Zhao, H., Pan, Q., & Li, X. (2013, December 11). Coupling Analysis of Fluid-Structure Interaction and Flow Erosion of Gas-Solid Flow in Elbow Pipe. (M. R.
-



-
- Salimpour, Ed.) *Advances in Mechanical Engineering*,
2014, 10. doi:10/1155/2014/815945
- Zikanov, O. (2010). *Essential Computational Fluid Dynamics*.
New Jersey: John Wiley & Sons.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN I

Input Summary

Fluent

Version: 3d, dp, pbns, rke (3d, double
precision, pressure-based, realizable k-
epsilon)

Release: 19.0.0

Title:

Models

Model	Settings

Space	3D
Time	Steady
Viscous	Realizable k-
epsilon turbulence model	
Wall Treatment	Scalable Wall
Function	
Heat Transfer	Disabled
Solidification and Melting	Disabled
Species	Disabled
Coupled Dispersed Phase	Enabled
NOx Pollutants	Disabled
SOx Pollutants	Disabled
Soot	Disabled
Mercury Pollutants	Disabled

Material Properties

Material: sand (inert-particle)



Property Value (s)	Units	Method

Density	kg/m ³	constant
2650		
Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant
1680		

Material: air (fluid)

Property Method	Value (s)	Units

Density		kg/m ³
constant	1.225	
Cp (Specific Heat)		j/kg-k
constant	1006.43	
Thermal Conductivity		w/m-k
constant	0.0242	
Viscosity		kg/m-s
constant	1.7894e-05	
Molecular Weight		kg/kmol
constant	28.966	
Thermal Expansion Coefficient		1/k
constant	0	
Speed of Sound		m/s
none	#f	

Material: ss316 (solid)

Property Value (s)	Units	Method

Density	kg/m ³	constant
7990		

LAMPIRAN



871	Cp (Specific Heat)	j/kg-k	constant
202.4	Thermal Conductivity	w/m-k	constant

Cell Zone Conditions

Zones

name	id	type
elbow_solid	2	fluid

Setup Conditions

elbow_solid

Condition	Value
Frame Motion?	no

Boundary Conditions

Zones

name	id	type
inlet	5	velocity-inlet
outlet	6	pressure-outlet
wall	7	wall

Setup Conditions

inlet

Condition	Value
-----------	-------



-----	-----	-----	-----	-----
-----	Velocity Magnitude (m/s)			11
	Turbulent Specification Method			0
0.32	Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)			
7.04	Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)			
	outlet			
	Condition			
Value	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----
	Turbulent Specification Method			
0	Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)	0.32		
	Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3)	7.04		
	wall			
	Condition			
Value	-----	-----	-----	-----
-----	-----	-----	-----	-----
	Wall Motion			0
	Shear Boundary Condition			
0	Oka Wall Material Vickers Hardness (GPa):	1.83		
	Oka Model Constant, n1:			
0.77268	Oka Model Constant, n2:			
1.36				



Oka Velocity Exponent :
 2.3534

Solver Settings

Equations

Equation	Solved

Flow	yes
Turbulence	yes

Numerics

Numeric	Enabled

Absolute Velocity Formulation	yes

Relaxation

Variable	Relaxation

Factor	

Pressure	0.3
Density	1
Body Forces	1
Momentum	0.7
Turbulent Kinetic Energy	0.8
Turbulent Dissipation Rate	0.8
Turbulent Viscosity	1
Discrete Phase Sources	0.5

Linear Solver

		Solver
Termination	Residual Reduction	



Criterion	Variable Tolerance	Type
0.1	Pressure	V-Cycle
0.1	X-Momentum 0.7	Flexible
0.1	Y-Momentum 0.7	Flexible
0.1	Z-Momentum 0.7	Flexible
0.1	Turbulent Kinetic Energy 0.7	Flexible
0.1	Turbulent Dissipation Rate 0.7	Flexible

Pressure-Velocity Coupling

Parameter	Value
Type	SIMPLE

Discretization Scheme

Variable	Scheme
Pressure	Second Order
Momentum	Second Order
Upwind	
Turbulent Kinetic Energy	First Order
Upwind	
Turbulent Dissipation Rate	First Order
Upwind	

Solution Limits



Quantity	Limit
Minimum Absolute Pressure	1
Maximum Absolute Pressure	5e+10
Minimum Temperature	1
Maximum Temperature	5000
Minimum Turb. Kinetic Energy	1e-14
Minimum Turb. Dissipation Rate	1e-20
Maximum Turb. Viscosity Ratio	100000



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



LAMPIRAN II

Perhitungan Energi Kinetik Turbulen dan Dissipasi Turbulen pada kondisi batas inlet pipa:

Bilangan Reynold (Re)

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}$$

Intensitas Turbulen (I)

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16(Re)^{-1/8}$$

Panjang Skala Turbulent (l)

$$l = 0.07 D_h$$

Energi Kinetik Turbulen (k)

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} l)^2$$

maka,

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} (0.16 (\frac{\rho u D}{\mu})^{-1/8}))^2$$

Laju Disipasi Turbulen (ε)

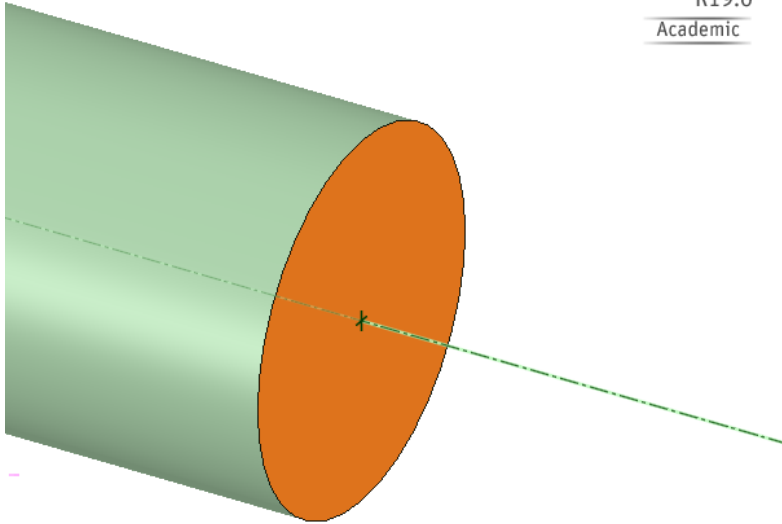
$$\varepsilon = (C_\mu)^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l}$$

maka,

$$\varepsilon = (C_\mu)^{3/4} \frac{(\frac{3}{2} (u_{avg} (0.16 (\frac{\rho u D}{\mu})^{-1/8}))^2)^{3/2}}{0.07 D_h}$$



ANSYS
R19.0
Academic



Area	2827.4334mm ²
Perimeter	188.4956mm

Parameter	Nilai	Satuan
Luas Inlet Pipa	0.002827	m ²
Keliling Inlet	0.1885	m
Densitas Fluida (ρ)	1.225	kg/m ³
Viskositas Fluida (μ)	1.79E-05	kg/ms

Contoh:

Variabel 1 ($u = 11$ m/s)

$$Re = \frac{1.225 * 11 * 0.06}{1.79e - 05} = 4.5168e + 04$$

$$I = 0.16(4.517)^{-\frac{1}{8}} = 4.5168e + 05$$

$$l = 0.07 * 0.06 = 4.2e - 03$$



$$k = \frac{3}{2}(11 * 4.5168e + 05)^2 = 0.3187$$

$$\varepsilon = (0.09)^{3/4} \frac{0.3187^{3/2}}{4.2e-03} = 7.04$$

Variabel	d _{partikel} [μm]	U [m/s]	k [m ² /s ²]	ε [m ² /s ³]
1	300	11	0.31872	7.0396
2	300	15	0.54844	15.89
3	300	23	1.1588	48.801
4	300	27	1.5341	74.34
5	150	11	0.31872	7.0396
6	150	15	0.54844	15.89
7	150	23	1.1588	48.801
8	150	27	1.5341	74.34



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Ido Widya Yudhatama (lahir di Jember, Jawa Timur, 18 Januari 1996) adalah seorang mahasiswa Insitut Teknologi Sepuluh Nopember, tepatnya pada Departemen Teknik Material dan Metalurgi. Penulis lahir dari orang tua Dodi Widiotomo dan Sri Rahayu sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Menempuh pendidikan mulai dari SDN Karangrejo II Jember (*lulus tahun 2008*), SMPN 2 Jember (*lulus tahun 2011*), SMAN 1 Jember (*lulus tahun 2014*) dan hingga akhirnya dapat menempuh pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Penulis aktif dalam berbagai kegiatan organisasi terutama dalam bidang keprofesian. Bersama rekan-rekan satu alamamater mendirikan organisasi non-profit keprofesian dalam bidang korosi yaitu NACE ITS Student Chapter. Dimana tujuan bersama mendirikan organisasi ini adalah untuk membantu mahasiswa ITS berkembang secara akademik maupun *soft skill* dan mempunyai relasi yang lebih luas secara global dengan pakar dan atau *engineer* yang bergerak dalam bidang korosi. Selain dalam hal organisasi, penulis juga berhasil dalam bidang akademik seperti menjadi Presenter dalam CORSYM 2017 di Kuala Lumpur, dan mendapatkan Juara II dalam SMASRTCOMP 2017 di Universitas Indonesia, Jakarta.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya terhadap Allah SWT atas karunianya penulis diberikan rezeki dan kesehatan sehingga dapat menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “*Simulasi CFD Erosi Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Turbulen pada Elbow Pipa Vertikal - Horizontal*”.
