



SKRIPSI - ME 184834

## **Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD**

Linggar Rhodam Krisnanda  
NRP. 0421154000035

Dosen Pembimbing 1  
Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.phil.  
NIP. 196809281991021001

Dosen Pembimbing 2  
Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.  
NIP. 197603102000031001

DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
2019

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



BACHELOR THESIS - ME 184834

## **Analysis of Erosion Rate in Pipe Elbow Due to Sand Particles in Gas Fluid Flow Using CFD Simulation**

Linggar Rhodam Krisnanda  
NRP. 0421154000035

Supervisor 1  
Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.phil.  
NIP. 196809281991021001

Supervisor 2  
Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.  
NIP. 197603102000031001

DEPARTEMENT OF MARINE ENGINEERING  
FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
2019

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

**Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam  
Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD**

### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat

Meng peroleh Gelar Sarjana Teknik

pada

Disiplin Studi *Marine Machinery and System (MMS)*

Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**Linggar Rhodan Krismanda**

NRP. 04211540000035

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

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

NIP. 196809281991021001

Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.

NIP. 197603102000031001



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LEMBAR PENGESAHAN

**Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam  
Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD**

### TUGAS AKHIR

Dijukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

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

Oleh :

**Linggar Rhodan Krimanda**  
NRP. 04211540000035

Disetujui oleh Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan :



**Dr. Eng. M. Hadris Zamani, ST., MT**  
NIP. 197708032008011007

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



## **Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD**

Nama : Linggar Rhodam Krisnanda  
NRP : 0421154000035  
Departemen : Teknik Sistem Perkapalan  
Dosen Pembimbing I : Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.phil.  
Dosen Pembimbing II : Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.

### **ABSTRAK**

Dalam industri minyak dan gas bumi sering terjadi permasalahan berupa erosi yang terjadi pada internal pipa. Erosi didefinisikan sebagai suatu kerugian hilangnya sebagian material pipa karena bergeseknya dinding material dengan partikel pasir yang terbawa dalam aliran multi fase. Aliran multi fase merupakan sebuah sistem aliran yang terdiri lebih dari satu fase, dalam hal ini fase gas dan fase padat. Menurut penelitian, sumur minyak dan gas bumi dewasa ini semakin banyak kandungan partikel pasir yang terbawa oleh fluida gas atau minyak seiring dengan menurunnya produksi minyak dan gasnya yang selaras dengan bertambahnya umur asset. Erosi terbesar terjadi pada bagian elbow dikarenakan partikel pasir dapat tertumbuk secara langsung ke dinding material dengan kecepatan tertentu yang disebabkan adanya belokan secara tiba-tiba mengikuti desain elbow. Prediksi hasil analisa yang akurat dapat digunakan sebagai acuan untuk meminimalisir kegagalan pada pipa. Dalam analisa ini menggunakan pemodelan CFD (*computational fluid dynamic*) pada aplikasi ANSYS untuk menganalisa laju erosi pada pipa dengan melakukan variasi ukuran partikel pasir, *flowrate* partikel pasir, kecepatan aliran dan jenis elbow. Didapatkan hasil berupa laju erosi pada elbow pipa yang dibandingkan dengan perhitungan menurut DNV RP O501. Hasil validasi dari perhitungan menurut DNV RP O501 dengan hasil simulasi *Ansys Fluent* menunjukkan perbedaan nilai antara 4,8% - 5,9% hal tersebut menunjukkan bahwa hasil percobaan sangat akurat. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai laju erosi berbanding lurus dengan banyaknya *flowrate* partikel pasir, besar diameter partikel dan kecepatan aliran. Pada elbow pipa 90<sup>0</sup> nilai laju erosi lebih besar dibandingkan dengan elbow pipa 45<sup>0</sup>. Nilai remaining life berbanding terbalik dengan nilai laju erosi yang terjadi pada elbow pipa.

Kata kunci : Erosi, Partikel Pasir, Elbow, CFD, Multi fase

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **Analysis of Erosion Rate in Pipe Elbow Due to Sand Particles in Gas Fluid Flow Using CFD Simulation**

Student Name : Linggar Rhodam Krisnanda  
NRP : 04211540000035  
Departement : Marine Engineering  
Supervisor I : Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.phil.  
Supervisor II : Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc.

### **ABSTRACT**

In oil and gas industry, problems occur in the form of erosion that occurs in the internal pipe. Erosion is defined as a loss of part pipe material due to the rubbing of material walls with sand particles carried in a multi-phase. Multi-phase flow is a flow system consisting of more than one phase, in this case the gas phase and solid phase. According to the study, today's oil and gas wells have more content of sand particles carried by gas, and gas production decreases which is in line with increasing asset life. The biggest erosion occurs in the elbow because sand particles can be directly crushed to the material wall at a certain speed due to sudden turns following the elbow design. Accurate prediction of analysis results can be used as a reference to minimize failures in the pipeline. In this analysis using CFD (computational fluid dynamic) modeling in the ANSYS application to analyze the erosion rate in pipe by varying the size of sand particles, sand particle flowrate, flow velocity and type of elbow. The results obtained in the form of erosion rate in the elbow pipe compared with calculations according to DNV RP O501. Validation results from calculations according to DNV RP O501 and Ansys Fluent simulation results show a difference in value between 4.8% - 5.9%, which indicates that the experimental results are very accurate. The simulation results show that the erosion rate is directly proportional to the amount of sand particle flowrate, the particle diameter and flow velocity. In the 90<sup>0</sup> pipe elbow the erosion rate is greater than the 45<sup>0</sup> pipe elbow. The remaining life value is inversely proportional to the erosion rate that occurs in the elbow pipe.

Keywords: Erosion, Sand Particles, Elbow, CFD, Multi-phase

*“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: **Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD**. 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. Eng. M. Badrus Zaman., ST., MT selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
3. Bapak Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.phil. dan Bapak Taufik Fajar Nugroho, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan nasihat dan ilmu baru mengenai erosi.
4. Ir. Hari Prastowo, M.Sc. selaku dosen wali yang selama penulis melaksanakan proses studi di Departemen Teknik Sistem Perkapalan selalu memberikan dukungan dan bimbingan kepada penulis.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS.
6. Bapak Ir. Dwi Priyanta, MSE, Bapak Ahmad Fuad Pribadi, S.T., Mas Wildan Irfansyah, S.T., Bapak Nurhadi Siswanto, S.T., M.T., dan rekan-rekan office EPC yang telah menjadi keluarga yang senantiasa memberikan bantuan dan pengalaman bagi penulis untuk meningkatkan kualitas diri dari waktu ke waktu.
7. Bapak Andi Fajar Yanto selaku *Engineer* di PT. Minarak Brantas Gas yang telah memberikan data kepada penulis untuk menyelesaikan tugas penelitian ini.
8. Teman kumpul Matha, Rendi, Arum dan Fitri yang selalu menyempatkan waktu untuk berbagi cerita serta selalu memberikan semangat kepada penulis.
9. Seluruh rekan-rekan *Salvage'15* yang telah menemani dan memberikan warna kehidupan penulis selama perkuliahan.
10. Rekan-rekan di *Marine Machinery and System Laboratory* (MMS) yang saling menjaga semangat untuk menyelesaikan skripsi.
11. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu. Terimakasih atas segala dukungan dan bantuan yang diberikan kepada penulis.

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

Surabaya, Juli 2019

Penulis

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	v
ABSTRAK .....	ix
ABSTRACT.....	xi
KATA PENGANTAR.....	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
DAFTAR TABEL .....	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan Penelitian.....	2
1.5 Manfaat Hasil Penelitian .....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Pengertian Erosi.....	5
2.2 Mekanismen Erosi .....	5
2.3 Parameter Erosi Partikel.....	6
2.3.1 Kecepatan Impak Partikel .....	6
2.3.2 Sudut Impak Partikel .....	6
2.3.3 Ukuran Partikel.....	7
2.3.4 Bentuk Partikel .....	7
2.3.5 Material Partikel.....	7
2.3.6 Sifat Fluida .....	8
2.3.7 Sifat Permukaan Objek.....	8
2.4 Komputasi Dinamika Fluida.....	9
2.4.1 Pre-Processing .....	10
2.4.2 Processing .....	10
2.4.3 Post Processing.....	10
2.5 Aliran Multi Fase .....	10

2.6	Discrete Element Method .....	11
2.7	Langrarian Discrete Phase Model.....	11
2.8	Model Prediksi Erosi .....	12
2.8.1	Model Erosi Finnie.....	12
2.8.2	Model Erosi McLaury .....	13
2.8.3	Model Erosi DNV RP O501.....	13
2.9	Penelitian Sebelumnya.....	15
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>		<b>16</b>
3.1	Diagram Alir Penelitian.....	17
3.2	Prosedur Penelitian.....	19
3.3	Peralatan.....	21
3.4	Waktu Penelitian.....	21
<b>BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>22</b>
4.1	Umum.....	23
4.2	Pengumpulan Data.....	23
4.2.1	<i>Elbow 45<sup>0</sup></i> .....	24
4.2.2	<i>Elbow 90<sup>0</sup></i> .....	24
4.3	Proses Simulasi.....	25
4.3.1	<i>Pre-Processing</i> .....	25
4.3.2	<i>Processing</i> .....	26
4.3.3	<i>Post-Processing</i> .....	28
4.4	Validasi Perhitungan Dengan Simulasi.....	28
4.4.1	Perhitungan menurut DNV RP O501 .....	28
4.4.2	Menghitung nilai laju erosi hasil simulasi .....	30
4.5	Laju Erosi Terhadap Variasi <i>Flowrate</i> Partikel Pasir.....	31
4.6	Laju Erosi Terhadap Variasi Kecepatan Aliran.....	34
4.7	Laju Erosi Terhadap Variasi Ukuran Diameter Partikel Pasir .....	40
4.8	Laju Erosi Terhadap Variasi Elbow .....	45
4.9	Remaining Life.....	50
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>52</b>



<b>5.1 Kesimpulan</b> .....	53
<b>5.2 Saran</b> .....	54
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	55
<b>LAMPIRAN</b> .....	57

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Erosi pada elbow .....	5
Gambar 2. 2 Mekanisme erosi pada material getas.....	6
Gambar 2. 3 Variasi Erosi dengan Sudut Impak untuk Material Ulet dan Getas .....	7
Gambar 2. 4 Efek Kekerasan Partikel Erosi terhadap Laju Erosi .....	8
Gambar 2. 5 Partikel direpresentasikan sebagai bola.....	11
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	18
Gambar 3. 2 ANSYS SpaceClaim .....	19
Gambar 3. 3 ANSYS Meshing.....	20
Gambar 3. 4 ANSYS Fluent .....	20
Gambar 4. 1 Lokasi Pipa (Google maps).....	23
Gambar 4. 2 Elbow 450 (Angga, 2016).....	24
Gambar 4. 3 Elbow 900 (Angga, 2016).....	24
Gambar 4. 4 Pemodelan tiga dimensi elbow pipa.....	25
Gambar 4. 5 Detail meshing elbow pipa 900.....	26
Gambar 4. 6 Distribusi jalur partikel pasir.....	27
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan nilai laju erosi perhitungan dengan simulasi .....	31
Gambar 4. 8 Grafik laju erosi dengan variasi flowrate .....	34
Gambar 4. 9 Grafik laju erosi vs kecepatan.....	39
Gambar 4. 10 Grafik laju erosi vs diameter partikel.....	44
Gambar 4. 11 Grafik laju erosi vs variasi elbow.....	49

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Timeline Penelitian .....	21
Tabel 4. 1 Spesifikasi meshing elbow pipa.....	26
Tabel 4. 2 Parameter simulasi .....	27
Tabel 4. 3 Perbedaan hasil perhitungan dengan simulasi .....	31
Tabel 4. 4 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi flowrate.....	32
Tabel 4. 5 Nilai laju erosi terhadap variasi flowrate .....	34
Tabel 4. 6 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi kecepatan.....	35
Tabel 4. 7 Nilai laju erosi terhadap variasi kecepatan .....	39
Tabel 4. 8 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi diameter partikel.....	40
Tabel 4. 9 Nilai laju erosi terhadap variasi diameter partikel .....	44
Tabel 4. 10 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi elbow .....	45
Tabel 4. 11 Nilai laju erosi terhadap variasi elbow.....	49
Tabel 4. 12 Nilai remaining life .....	50

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kecukupan kebutuhan energi dunia saat ini kebanyakan masih bergantung dari energi fosil yang tidak dapat diperbarui. Jumlah kebutuhan energi minyak dan gas semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dunia yang semakin meningkat.

Dewasa ini untuk mentransportasikan fluida hasil produksi minyak dan gas salah satunya dengan menggunakan jalur pipa atau *pipeline*. Kegagalan pada sistem perpipaan di industri minyak dan gas bumi dapat menyebabkan dampak yang dapat mengancam kehidupan manusia dan ekosistem sekitar jalur pipa tersebut.

Korosi merupakan penyebab terbesar terjadinya kegagalan pada pipa yang diikuti dengan kecelakaan dan melibatkan fluida berbahaya di amerika serikat. Menurut penelitian, kegagalan tertinggi disebabkan oleh *eksternal corrosion* dengan 119 kejadian dan disusul oleh *internal corrosion* dengan 94 kejadian (Restrepo, 2008). Erosi pada pipa merupakan bentuk dari *internal corrosion*. Campuran air, minyak, gas dan partikel pasir yang melalui pipa, dikombinasikan dengan kecepatan dan sifat fluida merupakan sebuah risiko pada peralatan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diharapkan untuk dapat memprediksi erosi secara akurat (Yudhatama, 2018).

*Fitting elbow* atau siku pada pipa banyak ditemui pada sistem perpipaan untuk memproduksi minyak dan gas. Pendistribusian partikel dengan melewati *elbow* cenderung membuat penipisan pada dinding pipa karena partikel akan secara langsung menumbuk dinding pipa yang disebut dengan erosi (Subakti, 2017). Di Lapindo Brantas, Inc partikel pasir yang terbawa oleh fluida gas semakin meningkat seiring dengan menurunnya produksi gasnya. Konsentrasi banyaknya partikel pasir dan ukuran partikel pasir yang terbawa oleh fluida gas dengan kecepatan yang tinggi menjadi perhatian khusus dari segi keamanan pada area *elbow* pipa. Oleh karena itu perlu diperhatikan laju erosi untuk memprediksi umur pipa khususnya pada bagian *elbow*.

Untuk mengetahui karakteristik erosi secara akurat pada pipa dilakukan banyak percobaan dengan berbagai variasi kondisi fluida. Pada penelitian menggunakan pemodelan aliran dan penelusuran partikel untuk mempelajari efek lengkungan *elbow* untuk mengetahui laju erosi (Yudhatama, 2018).

*Computational Fluid Dynamics* (CFD) merupakan perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas (Zikanov, 2010). Tujuan dari CFD adalah untuk memprediksi secara akurat tentang aliran fluida, perpindahan panas dan

reaksi kimia dalam sistem yang kompleks. Proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas (Rahmat, 2019).

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dapat ditarik perumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh banyaknya konsentrasi pasir atau *flowrate* pada fluida gas terhadap laju erosi pada *elbow* pipa?
2. Bagaimana pengaruh besar partikel pasir terhadap laju erosi pada *elbow* pipa?
3. Bagaimana pengaruh kecepatan aliran partikel pasir dan gas terhadap laju erosi pada *elbow* pipa?
4. Bagaimana pengaruh variasi *elbow* pipa terhadap nilai laju erosi?
5. Bagaimana nilai remaining life dari *elbow* yang terjadi erosi?

## 1.3 Batasan Masalah

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

1. Simulasi dilakukan pada *elbow* 45<sup>0</sup> dan 90<sup>0</sup>.
2. Simulasi dilakukan sampai skenario terburuk yaitu 15% kandungan partikel pasir.
3. Partikel pasir dianggap berbentuk bola.
4. Simulasi menggunakan CFD dengan software *ANSYS*.
5. Tidak ada kandungan gas yang menyebabkan korosi.

## 1.4 Tujuan Penelitian

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

1. Mengetahui pengaruh banyaknya konsentrasi pasir atau *flowrate* terhadap laju erosi pada *elbow* pipa.
2. Mengetahui pengaruh besar partikel pasir terhadap laju erosi pada *elbow*.
3. Mengetahui pengaruh kecepatan aliran partikel pasir dan gas terhadap laju erosi pada *elbow*.
4. Mengetahui pengaruh variasi *elbow* pipa terhadap nilai laju erosi.
5. Mengetahui remaining life *elbow* yang terjadi erosi.



### 1.5 Manfaat Hasil Penelitian

Manfaat yang diperoleh setelah dilakukan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan estimasi laju erosi dengan variasi konsentrasi pasir, besarnya partikel pasir dan kecepatan aliran campuran partikel pasir dan gas.
2. Mendapatkan nilai dari lifetime pada *elbow* yang terjadi erosi.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan dalam instalasi *elbow* pada pipa.
4. Menghindari terjadinya kegagalan pada elbow agar tidak terjadi kebocoran yang mengakibatkan *loss production*.

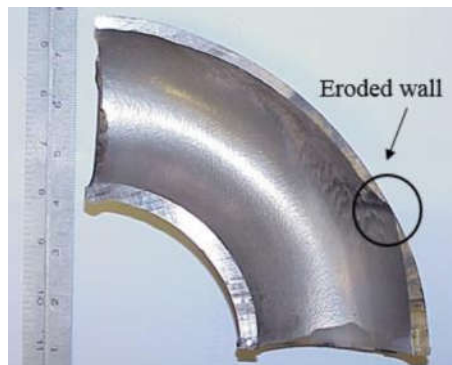
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## 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 (Mansouri, 2016). 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.

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 laminar (non turbulen). Hampir kebanyakan tapi tidak semua, korosi erosi disebabkan oleh aliran fluida multifasa.



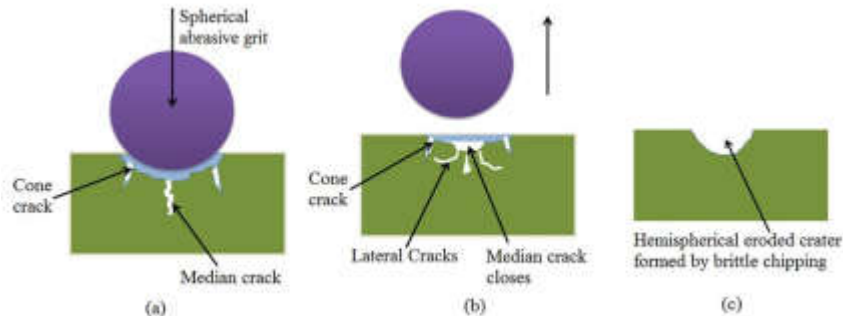
Gambar 2. 1 Erosi pada elbow (Mansouri, A. 2016)

### 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 suatu 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, 1960).

Tidak seperti mekanisme untuk material ulet, terdapat ilmu yang luas untuk mekanisme erosi pada material getas. Hal tersebut telah disarankan bahwa pada material

getas, erosi disebabkan oleh pembentukan retak (Mansouri, 2016). Saat partikel menumbuk permukaan getas, akan menciptakan retakan lateral dan radial. Tumbukan lain akan menyebabkan retakan menjadi lebih besar. Retakan tersebut membagi permukaan menjadi potongan-potongan kecil dimana dapat disingkirkan oleh partikel lain yang menghantam permukaan (Gambar 2.2).



Gambar 2. 2 Mekanisme erosi pada material getas (Parsi, 2015)

### 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) mencantumkan parameter berikut dimana terbukti sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi erosi: (1) kecepatan impact partikel, (2) sudut impact partikel, (3) ukuran partikel, (4) bentuk partikel, (5) material partikel, (6) sifat fluida, (7) sifat permukaan material 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:

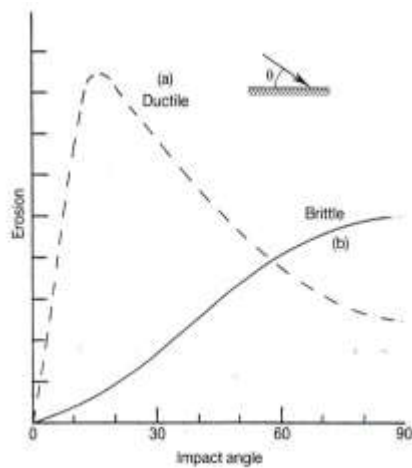
$$ER = V_p^n \quad (2.1)$$

Dimana  $V_p$  merupakan kecepatan impact partikel dan  $n$  adalah suatu konstanta. Peneliti menyarankan bahwa  $n$  bukan merupakan suatu konstan dan tergantung dari kekerasan material yang tererosi (Mansouri, 2016). 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 pada permukaan material. Gambar 2.3 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. 3 Variasi Erosi dengan Sudut Impak untuk Material Ulet dan Getas (Hutchings, 1992)

### 2.3.3 Ukuran Partikel

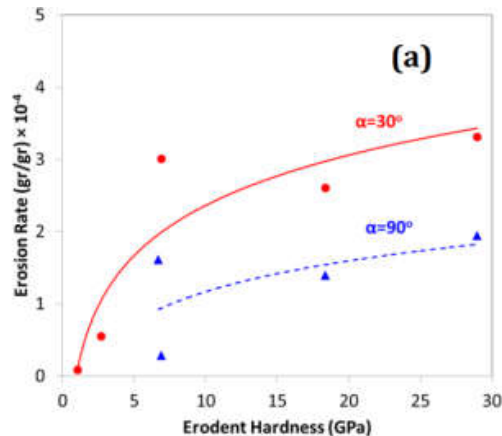
Dibandingkan dengan partikel kecil, partikel dengan ukuran besar mempunyai energi kinetik yang lebih besar bahkan mereka menumbuk dengan kecepatan yang sama. Secara umum, pasir yang mempunyai ukuran yang lebih kecil menyebabkan laju erosi yang lebih rendah karena mereka mempunyai energi kinetik yang lebih kecil dan gaya tumbuk untuk mengerosi permukaan. Bagaimanapun juga, densitas partikel, bentuk, dan kekerasan juga mempengaruhi erosivitas, 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 disbanding dengan erosi dari partikel bulat (Levy & Chick, 1983).

### 2.3.5 Material Partikel

(Mansouri, 2016) meneliti efek dari komposisi partikel dalam perilaku baja karbon AISI 1020. Lima partikel yang berbeda dengan bentuk tajam dan ukuran berada antara 180-250  $\mu\text{m}$  digunakan untuk mengerosi baja pada sudut aliran yang berbeda, 30 dan 90 derajat dengan kecepatan aliran 80 m/s (Gambar 2.4). 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. 4 Efek Kekerasan Partikel Erosi terhadap Laju Erosi (Hutchings, 1992)

Saat partikel halus mengerosi dinding, dapat menyebabkan partikel pecah menjadi kepingan kecil dengan massa dan energi kinetik 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 kinetik dan juga melindungi permukaan dengan lapisan partikel yang mana juga menghambat laju erosi (Mansouri, 2016). 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 impact 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 juga 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 ini, 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. Penelitian menunjukkan bahwa material dengan kekerasan yang lebih tinggi dapat menghasilkan laju erosi lebih besar dibanding dengan material dengan kekerasan lebih rendah. Keuletan material mempengaruhi permukaan untuk mendistribusikan energi kinetik yang dihasilkan oleh partikel dengan deformasi plastis dimana dapat menghasilkan laju erosi yang lebih rendah.

## 2.4 Komputasi Dinamika Fluida

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas (Zikanov, 2010). Tujuan dari CFD adalah untuk memprediksi secara akurat tentang aliran fluida, perpindahan panas dan reaksi kimia dalam sistem yang kompleks, yang melibatkan satu atau semua fenomena diatas. Beberapa keuntungan yang didapat dalam penggunaan CFD antara lain:

1. Mempunyai kemampuan sistem studi yang dapat mengendalikan percobaan yang sulit atau tidak mungkin dilakukan melalui eksperimen.
2. Menekan biaya dan waktu dalam mendesain suatu produk, jika proses desain tersebut dilakukan dengan uji eksperimen dengan akurasi tinggi.

Pada umumnya proses perhitungan untuk aliran fluida diselesaikan dengan menggunakan persamaan energi, momentum dan kontinuitas. Pada dasarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. Persamaan yang asalnya kontinu (memiliki jumlah sel tak terhingga) dirubah menjadi model diskrit (jumlah sel terhingga). Ada tiga teknik solusi numeric untuk menentukan kesetabilan dari program numerik/CFD yang dibuat atau program software yang ada, yaitu:

1. *Finite Difference Method* pada metode ini area aliran dipisahkan menjadi satu set poin *grid* dan fungsi kontinu (kecepatan, tekanan dan lainnya) didekati dengan nilai-nilai diskrit dan fungsi-fungsi ini dihitung pada titik-titik *grid*.
2. *Finite Element Method* metode ini membagi masalah besar menjadi lebih kecil dan sederhana yang disebut elemen hingga. Persamaan sederhana yang memodelkan seluruh kasus kemudian disusun menjadi sebuah sistem persamaan yang lebih luas. Persamaan konservasi kekekalan masa, momentum dan energy ditulis dalam bentuk yang tepat untuk setiap elemen, dan hasil dari set persamaan aljabar untuk bidang aliran diselesaikan secara numerik.
3. *Finite Volume Method* metode untuk mewakili dan mengevaluasi persamaan diferensial parsial dalam bentuk aljabar. Metode ini sama seperti *finite difference method* dan *finite element method*, nilai-nilai dihitung di tempat terpisah pada geometri yang di *mesh*. Dalam metode ini, volume integral dalam persamaan diferensial yang memiliki istilah divergensi ke *surface integrals* menggunakan teori divergensi.

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

### 2.4.1 Pre-Processing

Tahap *Pre-Processing* merupakan tahap awal dari proses CFD, pada tahap ini akan dilakukan beberapa proses sebagai berikut:

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

### 2.4.2 Processing

Tahap *Processing* akan dilakukan penentuan kondisi batas (*boundary condition*) dan pemilihan metode inisiasi. Adapun parameter yang termasuk kondisi batas adalah:

1. *Velocity Inlet*, digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran dan besaran scalar lainnya pada sisi masuk aliran. Kondisi batas ini hanya digunakan untuk aliran inkompresibel.
2. *Mass flow inlet*, pada kondisi batas ini harus dimasukkan data laju aliran masa atau fluks massa, tekanan sisi masuk, arah aliran dan besaran turbulensi.
3. *Pressure outlet*, pada kondisi batas ini dipakai pada sisi keluar fluida dan data tekanan pada sisi keluar diketahui atau minimal dapat diperkirakan mendekati sebenarnya.
4. Dinding, kondisi batas ini digunakan sebagai dinding untuk aliran fluida dalam saluran atau dapat disebut juga sebagai dinding saluran.

### 2.4.3 Post Processing

*Post Processing* merupakan tahapan terakhir dari process CFD, pada tahapan ini akan ditampilkan hasil dari proses perhitungan dari kondisi batas dan metode solver yang digunakan. Dalam *post processing* dapat memberikan tampilan grafis yang menunjukkan *mesh*, kontur, vector dan *pathline*.

## 2.5 Aliran Multi Fase

Aliran multi fase didefinisikan sebagai sebuah sistem aliran yang terdiri lebih dari satu fase contohnya seperti campuran dari gas, cairan, partikel padat, tetesan, dan gelembung (Bahrul, 2018). Aliran multi fase dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis yaitu sebagai berikut:

1. Aliran cairan-cairan atau cairan-gas, yang termasuk kategori ini adalah aliran *slug*, aliran gelembung dan aliran *droplet*.
2. Aliran padat-cair, yang termasuk kategori ini adalah aliran *slurry*, yaitu ketika partikel padat didistribusikan melalui cairan.
3. Aliran gas-padat, seperti pada sumur gas yang aliran gas nya membawa partikel pasir.

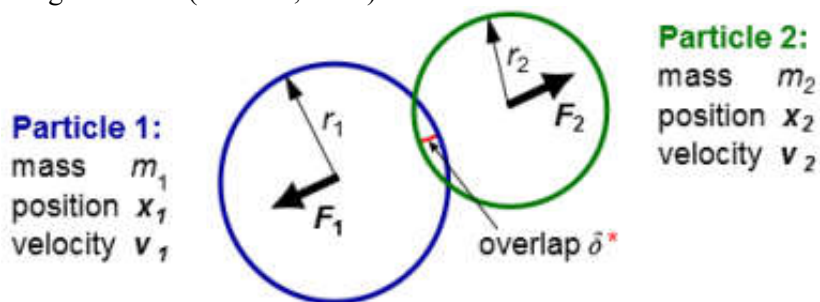


4. Aliran tiga fase, aliran ini dapat berupa kombinasi dari ketiga jenis aliran diatas. Seperti contohnya aliran cair-gas-padat.

## 2.6 Discrete Element Method

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

Ketika dua partikel berinteraksi dan memantul satu sama lain, dapat dilihat seperti pada gambar 2.5 (ANSYS, 2016).



Gambar 2. 5 Partikel direpresentasikan sebagai bola (ANSYS, 2016)

Metode ini berdasarkan kontak pegas,  $k$ , dan ukuran saat partikel saling berinteraksi. Nilai  $k$  dapat diestimasi dari persamaan berikut.

$$K = \frac{\pi v^2}{3\epsilon^2 D} DP \quad (2.2)$$

Dimana,

$D$  = diameter partikel

$P$  = densitas partikel

$V$  = kecepatan relative antar partikel yang berinteraksi

$\epsilon D$  = fraksi diameter *overlap* yang dibutuhkan

## 2.7 Langrangian Discrete Phase Model

*Langrangian Discrete Phase Model* (DPM) dalam ANSYS Fluent memakai pendekatan *Euler-Langrange*. Sebagai aturan praktis, konsekuensi partikel tidak lebih dari 10% dari volume agar pendekatan dalam model dapat berfungsi. Fluida diperlakukan sebagai struktur yang dipecahkan menggunakan nilai rata-rata dari persamaan *Navier-Stokes*. Ketika fluida dipecahkan dengan benar menggunakan persamaan *Navier-Stokes* maka partikel-partikel dalam aliran fluida gas akan teracak dalam jumlah besar. Ketika

menggunakan metode ini, partikel yang terbawa oleh fluida tidak akan mempengaruhi fluida dan volumenya, karena diabaikan. Oleh karena itu, interaksi antar partikel juga dapat diabaikan (ANSYS, ANSYS Fluent Support, 2015). Dengan fase kontinu yang tetap ini juga disebut sebagai *one-way coupling* diantara fase. Meskipun dimungkinkan untuk memasukkan efek fase diskrit ada kontinu dan menjadi *two-way coupling* dalam fase. Pemecahan persamaan fase diskrit dan kontinu secara bergantian dilakukan sampai solusi pada kedua fase telah berhenti berubah.

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

## 2.8 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.

Parameter yang mempengaruhi mekanisme erosi antara lain:

- Kecepatan partikel
- Sudut partikel
- Sifat mekanik material
- Temperature 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) (Mansouri, 2016). Model yang diikuti untuk memprediksi erosi dan untuk menentukan volume material yang tererosi telah diadopsi oleh ANSYS Fluent antara lain:

### 2.8.1 Model Erosi Finnie

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

$$E = kV_p^n f(\gamma) \quad (2.3)$$

Dimana  $E$  merupakan laju korosi,  $k$  adalah konstanta,  $V_p$  merupakan kecepatan partikel impact, dan  $f(\gamma)$  merupakan fungsi impact terhadap sudut  $\gamma$ . 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:

$$f(\gamma) = \frac{1}{3} \cos^2 \gamma \text{ untuk } \gamma > 18.5^\circ \quad (2.4)$$

$$f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3 \sin^2 \gamma \text{ untuk } \gamma \leq 18.5^\circ \quad (2.5)$$

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

### 2.8.2 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 ( $E$ ):

$$E = AV^n f(\gamma) \quad (2.8)$$

$$A = FBh^k \quad (2.9)$$

Dimana

F = konstanta empiris

V = kecepatan tumbukan partikel

Bh = Hardness Brinell dinding material

k = -0,59 untuk baja karbon.

Untuk lainnya nilai eksponen berbeda-beda, dengan:

$$f(\gamma) = by^2 + c\gamma \quad (2.10)$$

$$f(\gamma) = x \cos^2 \gamma \sin(w\gamma) + y \sin^2(\gamma) + z \quad (2.11)$$

Konstanta b, c, w, x, dan y harus ditentukan dengan sebuah eksperimen. Sedangkan z ditentukan melalui fungsi sudut (persamaan 2.9 dan 2.10)

### 2.8.3 Model Erosi DNV RP O501

Elbow pipa merupakan bagian yang paling rawan terjadi erosi pada sistem perpipaan. Hal ini dikarenakan arah aliran yang terjadi di elbow tidak akan mengikuti belokan pada elbow, tetapi akan langsung menabrak dinding pipa (DNV, 2007).

Laju erosi (mm/year) pada elbow pipa dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$EL = \frac{m_p \cdot K \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot U_p^3}{\rho_t \cdot A_{pipe}} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit} \quad (2.12)$$

Dimana,

- $EL$  = Laju erosi (mm/tahun)  
 $m_p$  = Massa aliran partikel pasir (kg/s)  
 $K$  = Konstanta material pipa  
 $F(\alpha)$  = Karakteristik elastisitas material  
 $U_p$  = Kecepatan tumbukan partikel pasir (m/s)  
 $G$  = Fungsi koreksi diameter partikel pasir  
 $C_1$  = Faktor model/geometri (2.5)  
 $C_{unit}$  = unit konversi dari m/s ke mm/tahun ( $3,15 \times 10^{10}$ )  
 $\rho_t$  = Berat jenis material ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $A_{pipe}$  = Area penampang pipa ( $\text{m}^2$ )

Menghitung karakteristik sudut impak ( $\alpha$ )

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot R_{curvature}}}\right) \quad (2.13)$$

$R_{curvature}$  = jumlah diameter pipa

Menghitung *the dimension parameter group A*

$$A = \frac{\rho_m^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot U_p \cdot D}{\rho_p \cdot \mu_m} \quad (2.14)$$

Menghitung nilai *critical particle diameter* dari hitungan *dimension parameter group A* dengan menggunakan persamaan dp,c

$$\gamma_c = \left(\frac{\rho_g}{\rho_p \cdot [1.88 \cdot \ln(A) - 6,04]}\right) \quad (2.15)$$

Menghitung *particle size correction* fungsi  $G$  menggunakan *critical particle diameter*

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_c}, \gamma < \gamma_c$$

$$\gamma = \frac{d_p}{D} \quad (2.16)$$

Menghitung *characteristic pipe bend area exposed to erosion*

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4 \sin(\alpha)} \quad (2.17)$$

Dimana,

- $\rho_m^2$  = berat jenis gas ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $D$  = Diameter dalam (m)  
 $\rho_p$  = Berat jenis partikel pasir ( $\text{kg/m}^3$ )

- $\mu_m$  = Viskositas gas (kg/ms)  
 $d_p$  = diameter partikel pasir (m)  
 $G$  = Fungsi koreksi diameter partikel pasir  
 $\gamma$  = relasi diameter  
 $c$  = indeks kritis

Mencari nilai fungsi  $F(\alpha)$

$$\begin{aligned}
 F(\alpha) = & A_1 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) - A_2 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 + A_3 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 - A_4 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 \\
 & + A_5 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^5 - A_6 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^6 + A_7 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^7 - A_8 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^8 \quad (2.18)
 \end{aligned}$$

Dimana,

$F(\alpha)$  = Karakteristik elastisitas material

$A$  = Grup parameter tanpa dimensi

$\alpha$  = Sudut impak ( $^{\circ}$ )

Model *geometri factor*, C1

C1 = 2,5 (Dari standard DNV RP O501 faktor geometri (C1) merupakan ketetapan dengan nilai sebesar 2,5.)

*Unit conversion factor* (m/s ke mm/year)

$$C_{\text{unit}} = 1000 \times 3600 \times 24 \times 365 = 3,15 \times 10^{10}$$

## 2.9 Penelitian Sebelumnya

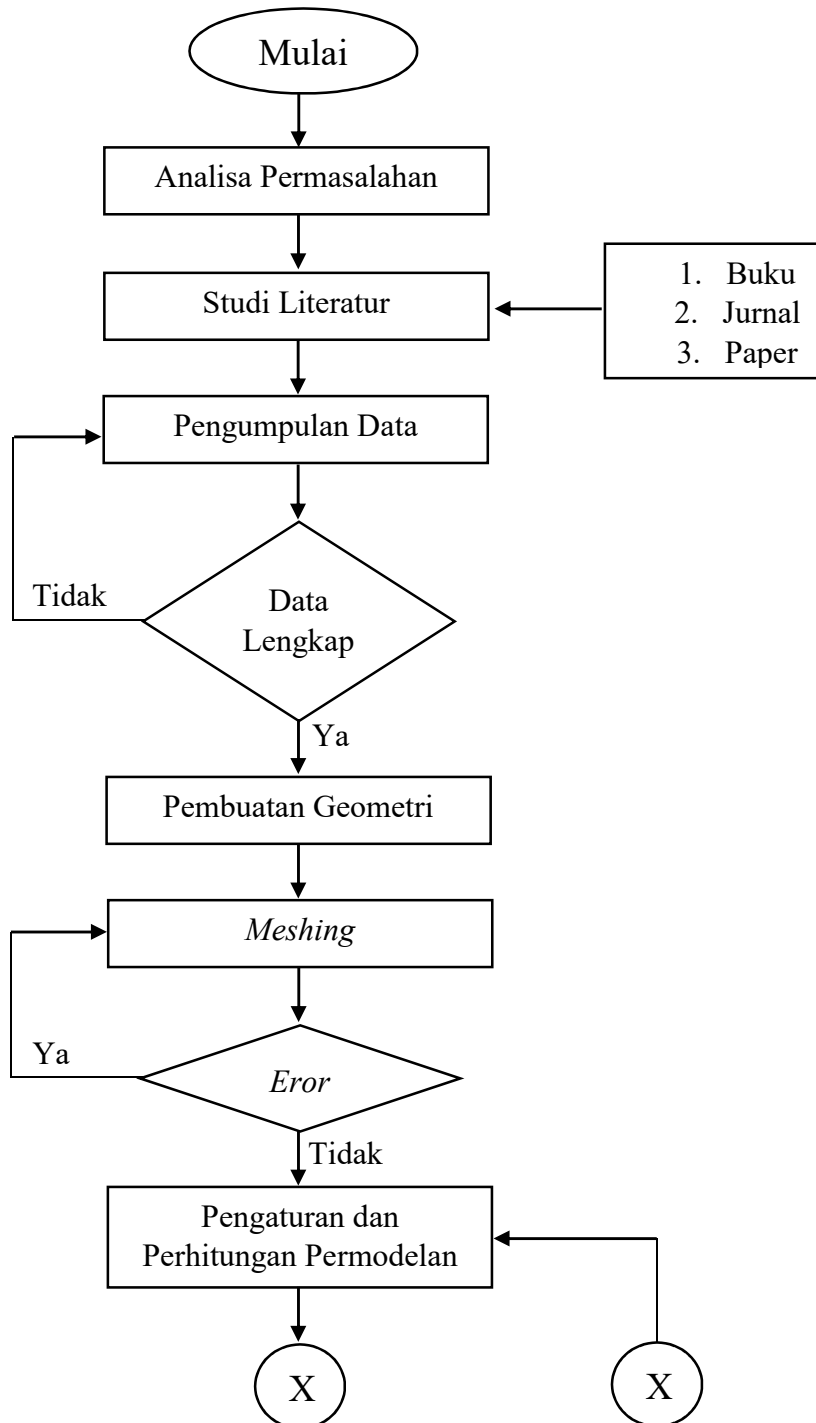
Penelitian sebelumnya dilakukan pada pipa yang mengalirkan fluida gas pada elbow 90<sup>o</sup> dengan material Stainless Steel 316 dan diameter pipa 3 inch. Analisa laju erosi menggunakan model Erosi Oka. Analisa divariasikan dengan 2 variasi diameter partikel pasir. Dari hasil analisa, didapatkan pola erosi yang sama pada kedua ukuran pasir yaitu pola berbentuk "V" pada belokan elbow sebagai hasil dari tumbukan partikel pasir dengan dinding. Dengan model erosi Oka nilai laju erosi berbanding terbalik dengan besarnya diameter partikel pasir, untuk diameter partikel pasir 300  $\mu\text{m}$  terjadi error sebesar 14,75% dan untuk diameter partikel pasir 150  $\mu\text{m}$  terjadi error sebesar 271,5% setelah dilakukan validasi dengan hitungan manual model erosi Oka.

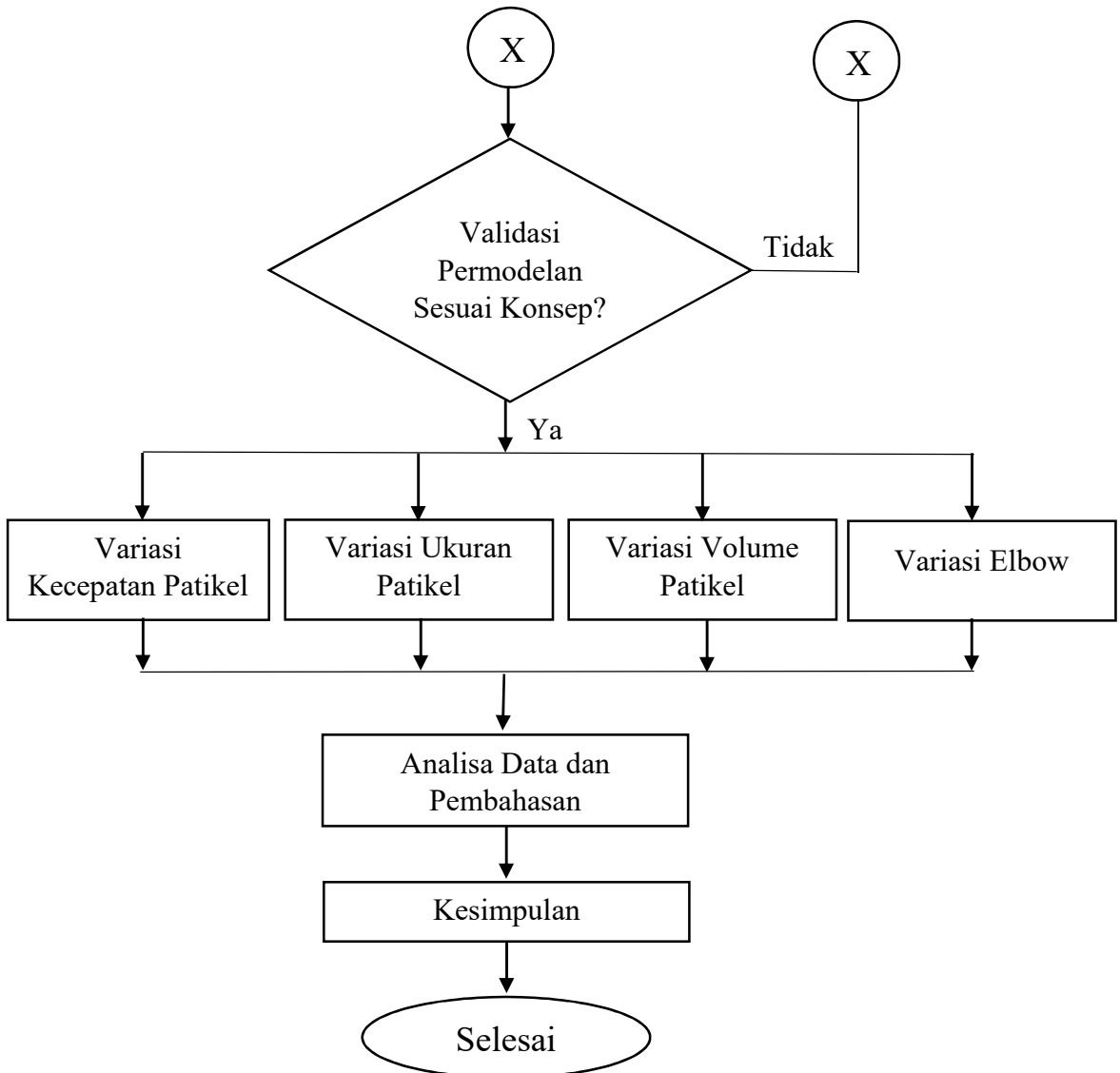
Penelitian yang lainnya dilakukan pada pipa HDPE dengan aliran *slurry*. Dari hasil penelitian didapatkan nilai laju erosi yang dipengaruhi oleh diameter partikel pasir, yaitu semakin besar diameter partikel pasir maka nilai laju erosi juga semakin besar, jadi besarnya nilai laju erosi sebanding dengan besarnya diameter partikel pasir. Nilai laju erosi terbesar terjadi pada elbow 90<sup>o</sup> dengan konsentrasi Cv (*concentration of volume*) *slurry* 60,74% yaitu sebesar 27,22 mm/tahun.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3. 1 Diagram Alir 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**  
Merupakan tahap penuangan gagasan masalah yang akan dibahas. Rumusan masalah akan menjadi aspek pokok dalam analisis pada skripsi berdasarkan data yang telah di dapat.
2. **Studi Literatur**  
Studi literatur merupakan sumber atau referensi yang bertujuan untuk melengkapi dan menyiapkan konsep teori yang dibutuhkan selama mengerjakan tugas akhir. Studi literatur yang digunakan penulis meliputi:
  - Buku
  - Jurnal
  - Paper
3. **Pengumpulan Data**  
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data-data yang berhubungan dengan permasalahan yang didapat untuk membantu dalam mengerjakan penelitian ini.
4. **Pembuatan Geometri**  
Pembuatan geometri dilakukan dalam program *SolidWork*. *SolidWork* merupakan aplikasi permodelan 3 dimensi yang memberikan solusi efisien untuk permodelan secara umum.



Gambar 3. 2 SolidWork (SolidWork)

5. **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, 2016)

6. Pengaturan dan Perhitungan 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, 2016)

7. Validasi Hasil Permodelan

Hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat dibandingkan dengan hasil simulasi yang dilakukan. Jika hasil simulasi permodelan hasilnya mendekati dengan hasil perhitungan maka penelitian telah sesuai. Jika tidak sesuai atau hasilnya berbeda jauh, maka permodelan dapat diperbaiki.

8. Variasi Kecepatan, Diameter Partikel, Jenis Elbow dan *Flowrate*.

Dalam penelitian ini dilakukan variasi kecepatan aliran fluida, diameter partikel pasir, jenis elbow dan *flowrate* partikel pasir. Hal ini guna mengetahui dampak masing-masing variasi penelitian terhadap laju erosi.

9. 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 hitungan manual.

10. 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.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Umum

Pada bab empat ini akan dilakukan analisa data dan pembahasan mengenai permasalahan pada bab satu. Permasalahan tersebut yakni laju erosi yang terjadi pada *elbow* 45<sup>0</sup> dan 90<sup>0</sup> karena adanya partikel pasir yang terbawa oleh fluida gas dengan kecepatan tertentu. Terdapat beberapa tahap yang dilakukan yaitu pengumpulan data yang diperlukan untuk melakukan analisa. Setelah kebutuhan data yang diperlukan sudah lengkap, langkah selanjutnya adalah pembuatan geometri pipa dan simulasi. Proses simulasi secara numerik menggunakan *software ANSYS Fluent*. Setelah didapatkan hasil laju erosi secara simulasi, selanjutnya dilakukan validasi dengan perhitungan untuk melakukan pembahasan dan menarik kesimpulan.

### 4.2 Pengumpulan Data

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

Lapindo Brantas, Inc merupakan perusahaan di Indonesia yang berfokus pada produksi gas bumi. Perusahaan ini terletak di Jln. Kedung boto, Tulangan, Sidoarjo. Lapindo Brantas, Inc mempunyai 21 sumur gas, 1 sumur salah satunya berada di dalam plant Wunut.



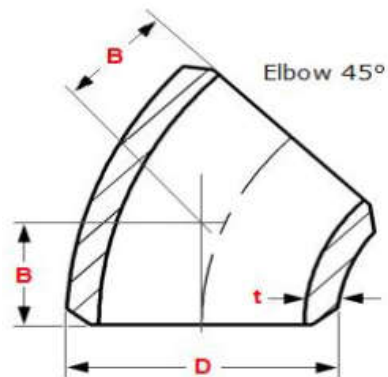
Gambar 4. 1 Lokasi Pipa (Google maps)

- Material Pipa : ASTM A 106
- Diameter Luar : 4.5 inch
- Ketebalan pipa : 4.2 mm
- Konstanta material :  $2,0 \times 10^{-9}$
- Massa jenis partikel :  $2650 \text{ kg/m}^3$

- Massa Jenis Gas : 1.225 kg/m<sup>3</sup>
- Viskositas Gas : 1,8e<sup>-05</sup> kg/ms
- Kecepatan Aliran : 11 m/s
- Flowrate partikel : 0.08 kg/s
- Diameter partikel : 300 μm

#### 4.2.1 Elbow 45°

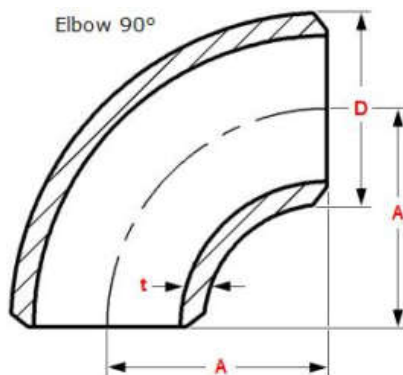
*Elbow 45°* adalah jenis *elbow* dengan sudut belokan sebesar 45°, tujuan pemilihan *elbow* dengan sudut ini biasanya disesuaikan dengan tempat pemasangannya, *elbow* jenis ini tidak memerlukan *space* sebanyak *elbow 90°* dan juga lebih irit *material cost*.



Gambar 4. 2 Elbow 45° (Angga, 2016)

#### 4.2.2 Elbow 90°

*Elbow 90°* adalah jenis *elbow* dengan sudut belokan 90° atau bisa disebut dengan sudut siku, tujuan pemilihan *elbow* jenis ini untuk menyesuaikan kebutuhan jalur pipa yang telah dirancang sebelumnya.



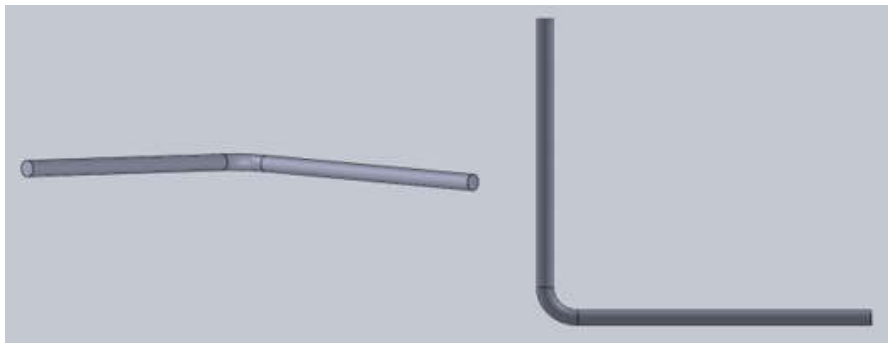
Gambar 4. 3 Elbow 90° (Angga, 2016)

### 4.3 Proses Simulasi

Pada sub-bab ini akan menjelaskan bagaimana proses pengerjaan penelitian yang dimulai dari penggambaran hingga simulasi. Penggambaran model mengacu dari dimensi pipa yang akan dilakukan analisa, model dibuat dalam bentuk tiga dimensi. Setelah model tiga dimensi sudah terbentuk maka dilanjutkan dengan proses simulasi model yang nantinya akan menghasilkan nilai laju erosi pada pipa. Berikut langkah proses simulasi dengan menggunakan *ANSYS Fluent*:

#### 4.3.1 Pre-Processing

Pada tahap ini dilakukan pembuatan geometri pipa dan *meshing*. Langkah pertama yang dilakukan yaitu melakukan proses pemodelan tiga dimensi pipa yang akan dilakukan analisa. Pipa memiliki diameter 4.5 inch. Pemodelan dilakukan menggunakan bantuan perangkat lunak *SolidWork 2016*. Pemodelan menggunakan fitur *swept* untuk membentuk model menjadi tiga dimensi.



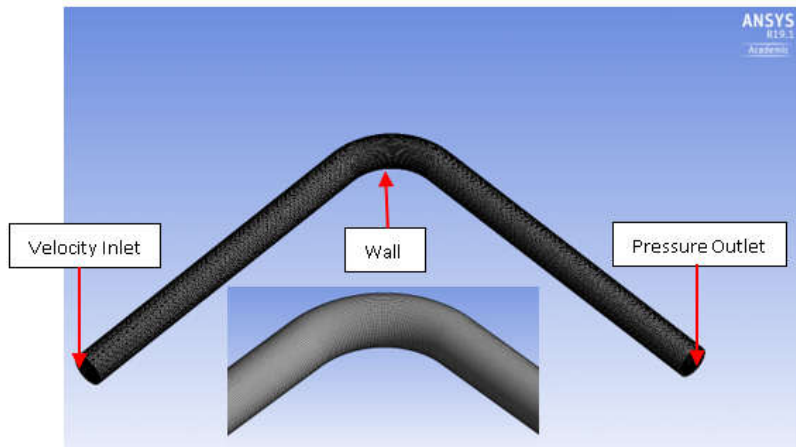
a. Pemodelan *elbow*  $90^{\circ}$



b. Pemodelan *elbow*  $45^{\circ}$

Gambar 4. 4 Pemodelan tiga dimensi elbow pipa

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



Gambar 4. 5 Detail meshing elbow pipa 90<sup>0</sup>

Tabel 4. 1 Spesifikasi meshing elbow pipa

<i>Detail Mesh</i>	
<i>Relevance centre</i>	<i>Fine</i>
<i>Smoothing</i>	<i>Medium</i>
<i>Element size</i>	<i>3,8E-003</i>
<i>Nodes</i>	<i>462984</i>
<i>Elements</i>	<i>439230</i>

Setelah melakukan *meshing* perlu dilakukan penamaan pada *face* sesuai dengan kondisi batasnya pada model untuk memudahkan pada saat proses selanjutnya (*processing*).

#### 4.3.2 *Processing*

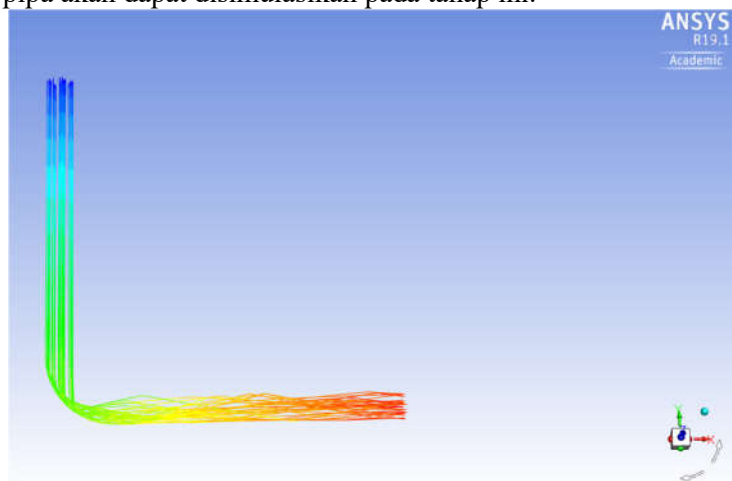
Pada proses ini menentukan model *multiphase* yaitu model DPM (*Discrete Phase Model*). Kondisi batas kemudian diatur pada inlet (*velocity inlet*), dinding (*wall*), dan outlet (*pressure outlet*). Untuk kondisi inlet perlu ditentukan kecepatan dan laju aliran massa.



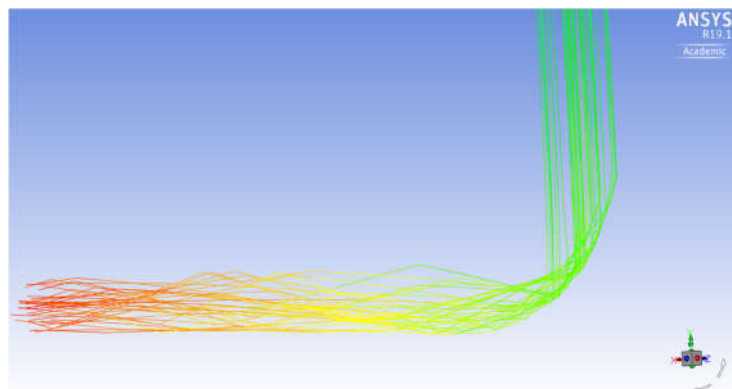
Tabel 4. 2 Parameter simulasi

<i>Fluid</i>	<i>Fluid</i>	<i>Gas</i>
	<i>Fluid density</i>	1,225 kg/m <sup>3</sup>
<i>Solid particle</i>	<i>Solid</i>	<i>Sand</i>
	<i>Density</i>	2650 kg/m <sup>3</sup>
	<i>Diameter</i>	300 $\mu\text{m}$ & 150 $\mu\text{m}$
<i>Wall</i>	<i>Wall</i>	ASTM A 106
	<i>Density</i>	7990 kg/m <sup>3</sup>

Pada tahap ini akan dilakukan proses perhitungan terhadap model yang dibuat pada tahap *pre-proces*. Distribusi jalur partikel pasir yang menumbuk elbow dinding pipa akan dapat disimulasikan pada tahap ini.



a. Distribusi jalur partikel variable 1 – view 1



b. Distribusi jalur partikel variable 1 – view 2

Gambar 4. 6 Distribusi jalur partikel pasir

### 4.3.3 Post-Processing

Setelah selesai melakukan proses *solver* atau *processing* pada model. Maka akan didapat nilai dari laju erosi dan kontur dari nilai laju erosi pada *elbow* pipa.

## 4.4 Validasi Perhitungan Dengan Simulasi

Validasi dilakukan dengan tujuan bahwa hasil percobaan yang dilakukan sudah sesuai dengan teori yang ada sehingga hasilnya dapat dipercaya.

### 4.4.1 Perhitungan menurut DNV RP O501

Laju erosi (mm/year) pada *elbow* pipa dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

- a. Menghitung sudut tumbukan

$$\alpha = \arctan \left( \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 1} \right)$$

$$\alpha = \arctan \left( \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\alpha = \arctan(0,7)$$

$$\alpha = 35$$

- b. Menghitung *the dimension parameter group A*

$$A = \frac{\rho_g^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot U_p \cdot D}{\rho_p \cdot \mu_m}$$

$$A = \frac{(1,23^2) \cdot 0,7 \cdot 11,0 \cdot 102}{2650 \cdot 0,000018}$$

$$A = 24,77$$

Jadi, nilai A yang di dapatkan dari hasil perhitungan yaitu sebesar 24,77

- c. Menghitung nilai *critical particle diameter* dari hitungan *dimension parameter group A* dengan menggunakan persamaan dp,c

$$\gamma_c = \left( \frac{\rho_g}{\rho_p \cdot [1,88 \cdot \ln(A) - 6,04]} \right)$$

$$\gamma_c = \left( \frac{1,225}{2650 \cdot [1,88 \cdot 3,2 - 6,04]} \right)$$

$$\gamma_c = \left( \frac{1,23}{12448,96} \right)$$

$$\gamma_c = 0,0000984$$

Maka, nilai  $\gamma_c = 0,0000984$

- d. Menghitung *particle size correction* fungsi G menggunakan *critical particle diameter*

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_c}, \gamma < \gamma_c$$

$$\gamma = \frac{d_p}{D}$$

$$\gamma = \frac{0,000003}{0,102}$$

$$\gamma = 0,0000293$$

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_c}$$

$$G = \frac{0,0000293}{0,0000984}$$

$$G = 0,298$$

- e. Menghitung *characteristic pipe bend area exposed to erosion*

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4 \sin(\alpha)}$$

$$A_t = \frac{3,14 \times (0,102^2)}{4 \times 0,57}$$

$$A_t = 0,014 \text{ m}^2$$

- f. Mencari nilai fungsi  $F(\alpha)$

$$F(\alpha) = A_1 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) - A_2 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 + A_3 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 - A_4 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4$$

$$+ A_5 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^5 - A_6 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^6 + A_7 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^7 - A_8 \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^8$$

$$F(\alpha) = 9,37 \left(\frac{35,3,14}{180}\right) - 42,3 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^2$$

$$+ 110,9 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^3 - 175,8 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^4$$

$$+ 170,1 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^5 - 98,4 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^6$$

$$+ 31,07 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^7 - 20 \left(\frac{35,3,14}{180}\right)^8$$

$$F(\alpha) = 0,691$$

- g. Model *geometri factor*, C1

$$C1 = 2,5$$

Dari standard DNV RP O501 faktor geometri (C1) merupakan ketentuan dengan nilai sebesar 2,5.

- h. *Unit conversion factor* (m/s ke mm/year)

$$C_{\text{unit}} = 1000 \times 3600 \times 24 \times 365 = 3,15 \times 10^{10}$$

### Erosion Rate

$$E_L = \frac{m_p \cdot K \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot U_p}{\rho_t \cdot A_{pipe}} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit}$$

$$E_L = \frac{0,08 \cdot 2e^{-9} \cdot 0,691 \cdot 0,57 \cdot 11}{7990 \cdot 0,0082} \cdot 0,298 \cdot 2,5 \cdot 3,15e^{10}$$

$$E_L = 0,248 \text{ mm/year}$$

#### 4.4.2 Menghitung nilai laju erosi hasil simulasi

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 *Ansys Fluent* masih berupa satuan laju kehilangan massa per m<sup>2</sup> dalam satu detik (kg/m<sup>2</sup>s), dimana hasil eksperimen menunjukkan satuan unit rasio erosi (mm/kg) sehingga perlu dikonversi.

$$\text{Laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] = \left( \frac{\text{Laju erosi} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \cdot 10^3}{\text{Densitas} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{Flow rate} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} \right)$$

Dimana densitas ini merupakan massa jenis dinding material yang digunakan, sedangkan *flowrate* merupakan laju pasir yang diinjeksikan ke dalam inlet dalam satuan kilogram per detik.

Sedangkan laju erosi dalam satuan millimeter per tahun dapat dirumuskan:

$$\text{Laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{tahun}} \right] = (\text{laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] \cdot \text{flowrate partikel} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{tahun}} \right])$$

$$\text{a. Laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] = \left( \frac{\text{Laju erosi} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \cdot 10^3}{\text{Densitas} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{Flow rate} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} \right)$$

$$\text{Laju Erosi} = \left( \frac{6,62e^{-08} \cdot 10^3}{7990 \times 0,08} \right)$$

$$\text{Laju Erosi} = 1,036^{-07} \text{ mm/kg}$$

$$\text{b. Laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{tahun}} \right] = \text{laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] \cdot \text{flowrate partikel} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{tahun}} \right]$$

$$\text{Laju Erosi} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{tahun}} \right] = 1,036^{-07} \times 2,52e^{06}$$

$$\text{Laju Erosi} = 0.2615 \text{ mm/tahun}$$

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai laju erosi dalam satuan mm/tahun pada tabel berikut:

Tabel 4. 3 Perbedaan hasil perhitungan dengan simulasi

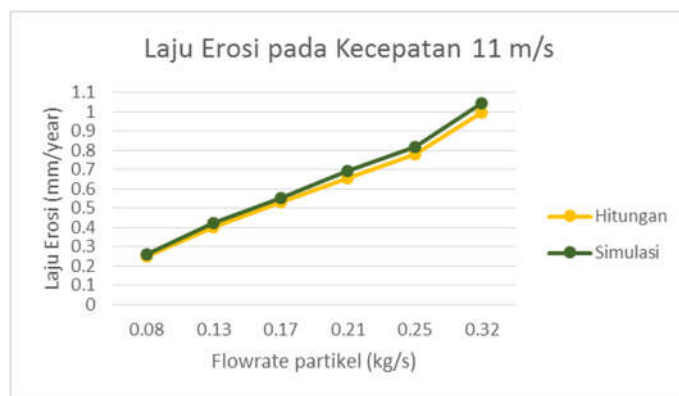
Kecepatan 11 m/s						
	0.08	0.13	0.17	0.21	0.25	0.32
<b>Hitungan</b>	0.248	0.403	0.527	0.652	0.776	0.993
<b>Simulasi</b>	0.261	0.422	0.553	0.691	0.817	1.046
<b>Error</b>	5.4%	4.8%	4.9%	5.9%	5.3%	5.3%

Terdapat perbedaan hasil antara hitungan DNV RP O501 dengan simulasi CFD salah satunya disebabkan karena keterbatasan permodelan dan spesifikasi komputer yang digunakan yang menyebabkan proses *meshing* terbatas.

Simulasi Fluent menunjukkan kontur yang sama pada setiap variable partikel, dengan bentuk huruf V pada belokan elbow dan terdapat titik-titik erosi akibat dari tumbukan partikel pasir tersebut setelah melewati *elbow*.

Menurut MAPE (*Mean Absolut Percentage Error*) yang merupakan rata-rata kesalahan selisih antara nilai actual dengan nilai percobaan, apabila terjadi selisih kurang dari 10% maka suatu percobaan tersebut dikatakan sangat akurat (Lewis, 1982).

Gambar 4.7 menunjukkan nilai laju erosi dari hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai laju erosi dari hasil simulasi.



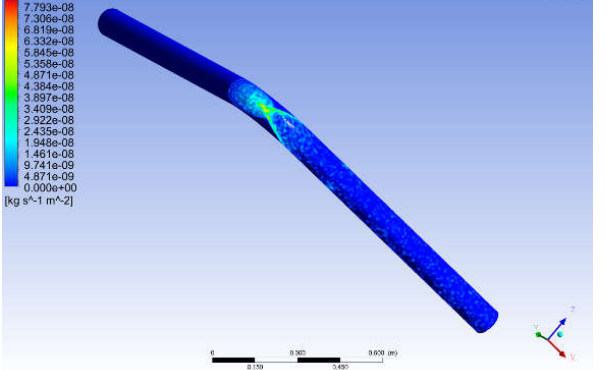
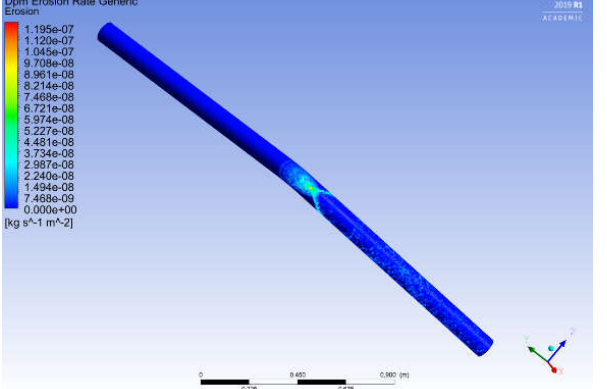
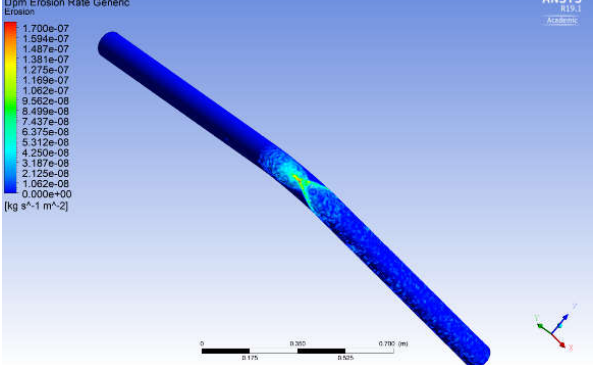
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan nilai laju erosi perhitungan dengan simulasi

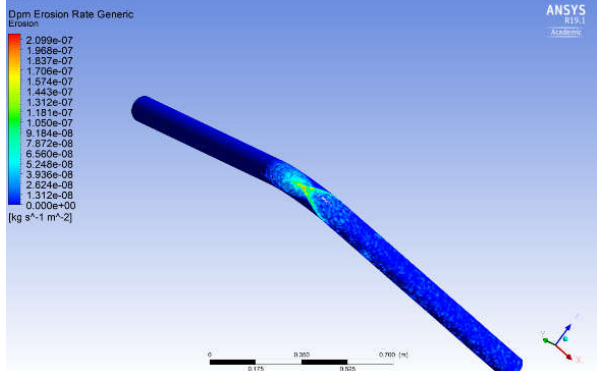
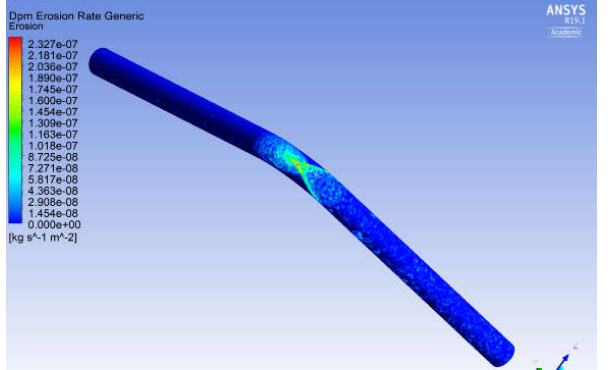
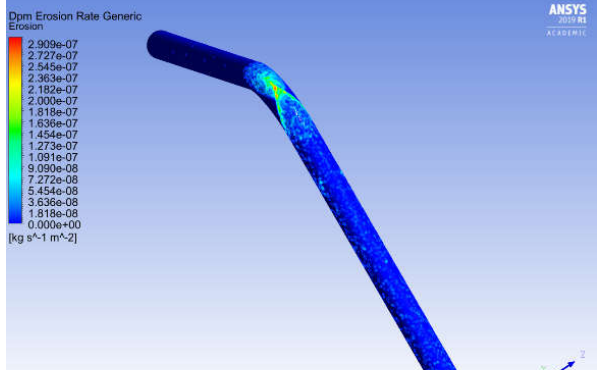
#### 4.5 Laju Erosi Terhadap Variasi *Flowrate* Partikel Pasir

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengaruh banyaknya *flowrate* partikel pasir terhadap laju erosi. Dalam percobaan ini dilakukan 6 variasi *flowrate*, yaitu pada *flowrate* 0,08 kg/s, 0,13 kg/s, 0,17 kg/s, 0,21 kg/s, 0,25 kg/s dan 0,32 kg/s

dengan diameter partikel pasir 300  $\mu\text{m}$ . Setelah melakukan simulasi akan di dapatkan data berupa nilai laju erosi pada *elbow* pipa.

Tabel 4. 4 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi *flowrate*

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
1	11 m/s	0,08 kg/s	
2	11 m/s	0,13 kg/s	
3	11 m/s	0,17 kg/s	

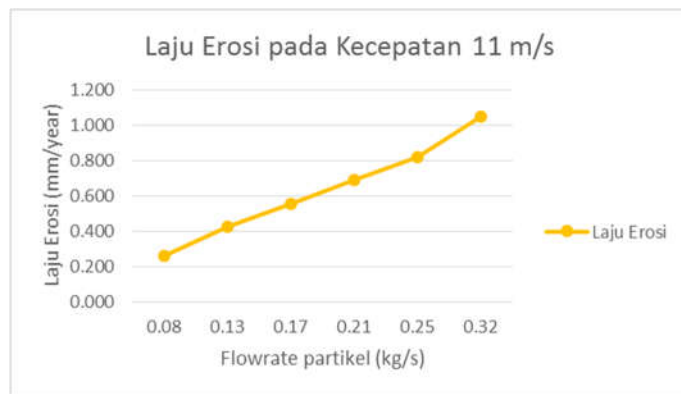
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
4	11 m/s	0,21 kg/s	
5	11 m/s	0,25 kg/s	
6	11 m/s	0,32 kg/s	

Dari tabel 4.4 dapat dilihat gambar berupa kontur dan nilai dari laju erosi. Nilai laju erosi tertinggi pada saat pipa dialiri partikel pasir dengan flowrate 0,32 kg/s yaitu sebesar  $2,65e^{-07}$  kg/m<sup>2</sup>s. Nilai tersebut akan dikonversi menjadi (mm/tahun). Nilai laju erosi dari masing-masing variasi flowrate dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4. 5 Nilai laju erosi terhadap variasi *flowrate*

No	Mass Flow (kg/s)	V (m/s)	Laju Erosi maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/tahun)
1	0.08	11	6.62E-08	0.261
2	0.13	11	1.07E-07	0.422
3	0.17	11	1.40E-07	0.553
4	0.21	11	1.75E-07	0.691
5	0.25	11	2.07E-07	0.817
6	0.32	11	2.65E-07	1.046

Dari tabel 4.5 akan dibuat grafik dari laju erosi yang dialami oleh *elbow* pipa. Hal ini akan mempermudah analisis pengaruh variasi *flowrate* partikel pasir terhadap terjadinya laju erosi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Grafik laju erosi dengan variasi flowrate

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa banyaknya *flowrate* partikel berbanding lurus terhadap laju erosi pada kecepatan yang sama. Semakin banyak *flowrate* partikel pasir dalam aliran fluida gas maka semakin tinggi juga laju erosinya.

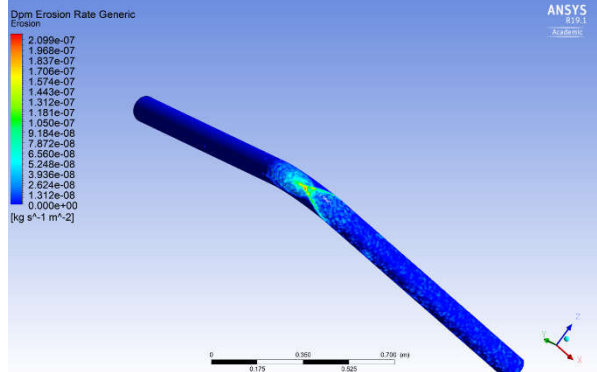
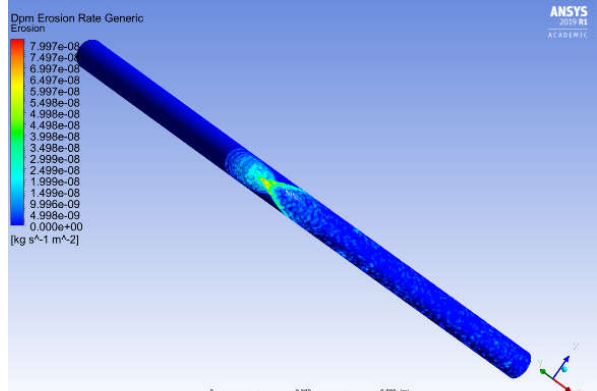
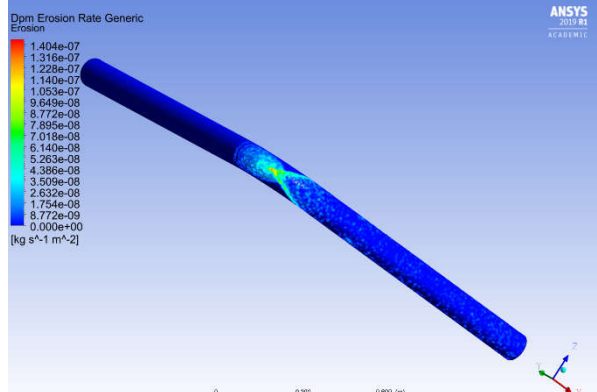
#### 4.6 Laju Erosi Terhadap Variasi Kecepatan Aliran

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengaruh kecepatan aliran terhadap laju erosi. Dalam percobaan ini dilakukan 3 variasi kecepatan, yaitu pada kecepatan 11 m/s, 15 m/s dan 20 m/s dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$ . Setelah melakukan simulasi akan didapatkan data berupa nilai laju erosi pada *elbow* pipa.

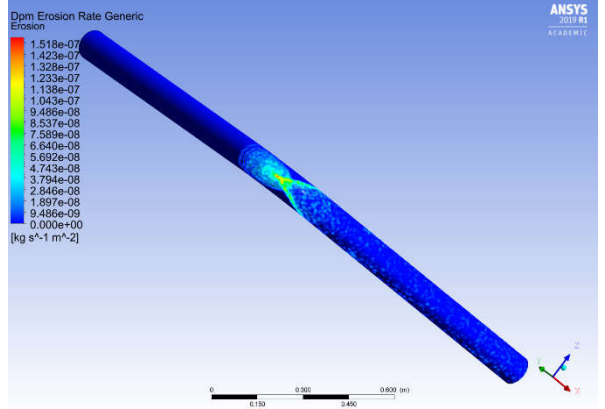
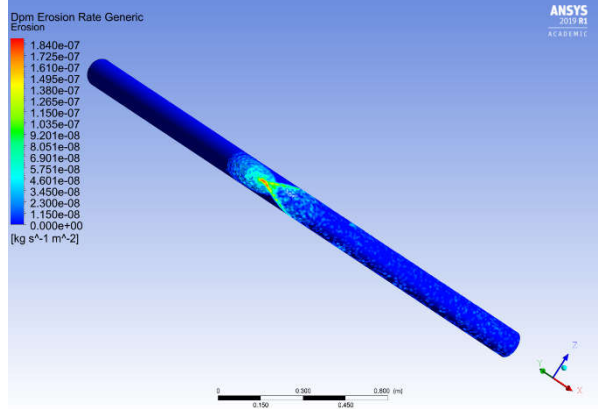
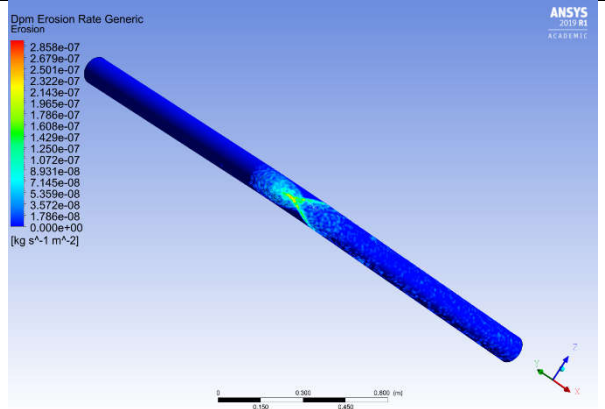


Tabel 4. 6 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi kecepatan

No	Flowrate	Kecepatan	Hasil Simulasi
1	0,08 kg/s	11 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>7.793e-08 7.306e-08 6.819e-08 6.332e-08 5.845e-08 5.358e-08 4.871e-08 4.384e-08 3.897e-08 3.409e-08 2.922e-08 2.435e-08 1.948e-08 1.461e-08 9.741e-09 4.871e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2021 R1 Academic</p>
2	0,13 kg/s	11 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.028e-06 9.842e-07 8.999e-07 8.356e-07 7.714e-07 7.071e-07 6.428e-07 5.785e-07 5.142e-07 4.500e-07 3.857e-07 3.214e-07 2.571e-07 1.928e-07 1.286e-07 6.429e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2021 R1 Academic</p>
3	0,17 kg/s	11 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.700e-07 1.594e-07 1.487e-07 1.381e-07 1.275e-07 1.169e-07 1.062e-07 9.562e-08 8.499e-08 7.437e-08 6.375e-08 5.312e-08 4.250e-08 3.187e-08 2.125e-08 1.062e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2021 R1 Academic</p>

No	Flowrate	Kecepatan	Hasil Simulasi
4	0,21 kg/s	11 m/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 ACADEMIC</p>
5	0,08 kg/s	15 m/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 ACADEMIC</p>
6	0,13 kg/s	15 m/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 ACADEMIC</p>

No	Flowrate	Kecepatan	Hasil Simulasi
7	0,17 kg/s	15 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
8	0,21 kg/s	15 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
9	0,08 kg/s	20 m/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>

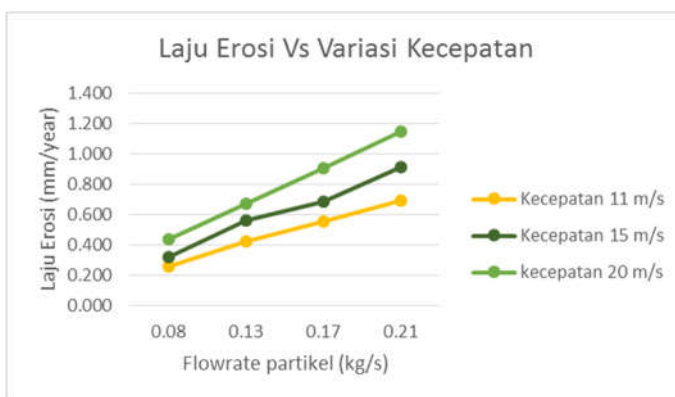
No	Flowrate	Kecepatan	Hasil Simulasi
10	0,13 kg/s	20 m/s	
11	0,17 kg/s	20 m/s	
12	0,21 kg/s	20 m/s	

Dari tabel 4.6 dapat dilihat gambar berupa kontur dan nilai dari laju erosi. Nilai dari laju erosi tertinggi pada saat kecepatan partikel 20 m/s dengan *flowrate* 0,21 kg/s yaitu sebesar  $2,91e^{-07}$  kg/m<sup>2</sup>s. Nilai tersebut akan dikonversi menjadi (mm/tahun). Nilai laju erosi dari masing-masing variasi kecepatan dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4. 7 Nilai laju erosi terhadap variasi kecepatan

No	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/tahun)
1	11	0.08	6.620E-08	0.261
2	11	0.13	1.070E-07	0.422
3	11	0.17	1.400E-07	0.553
4	11	0.21	1.750E-07	0.691
5	15	0.08	8.100E-08	0.320
6	15	0.13	1.430E-07	0.564
7	15	0.17	1.740E-07	0.687
8	15	0.21	2.310E-07	0.912
9	20	0.08	1.104E-07	0.436
10	20	0.13	1.710E-07	0.675
11	20	0.17	2.300E-07	0.908
12	20	0.21	2.913E-07	1.150

Dari tabel 4.7 akan dibuat grafik dari laju erosi maksimal yang dialami oleh *elbow* pipa. Hal ini akan mempermudah analisis pengaruh variasi kecepatan partikel pasir terhadap terjadinya laju erosi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Grafik laju erosi vs kecepatan

Gambar 4.9 menunjukkan bahwa kecepatan partikel berbanding lurus terhadap laju erosi pada *flowrate* yang sama. Semakin tinggi kecepatan partikel pasir dalam aliran fluida gas maka semakin tinggi juga laju erosinya.

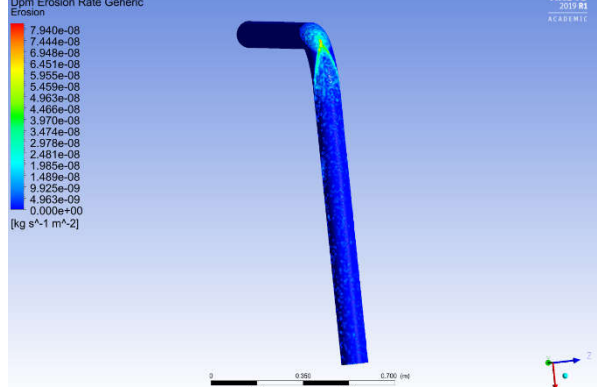
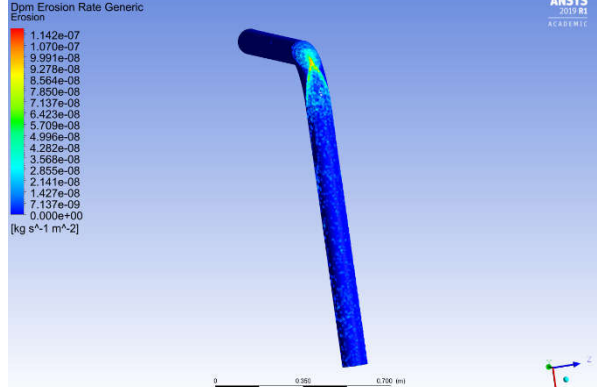
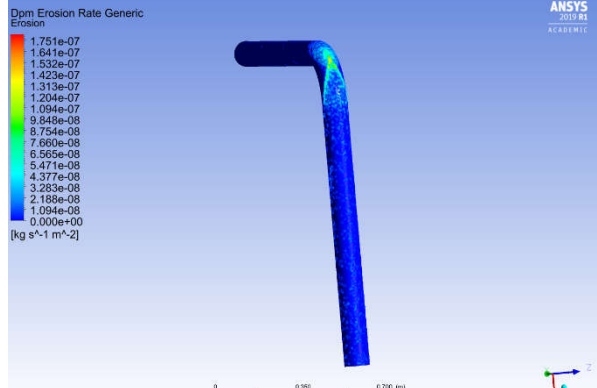
#### 4.7 Laju Erosi Terhadap Variasi Ukuran Diameter Partikel Pasir

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai ukuran diameter partikel pasir terhadap laju erosi. Dalam percobaan ini dilakukan 2 variasi ukuran diameter partikel pasir, yaitu diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  dan 150  $\mu\text{m}$ . Setelah melakukan simulasi akan didapatkan data berupa nilai laju erosi pada *elbow* pipa.



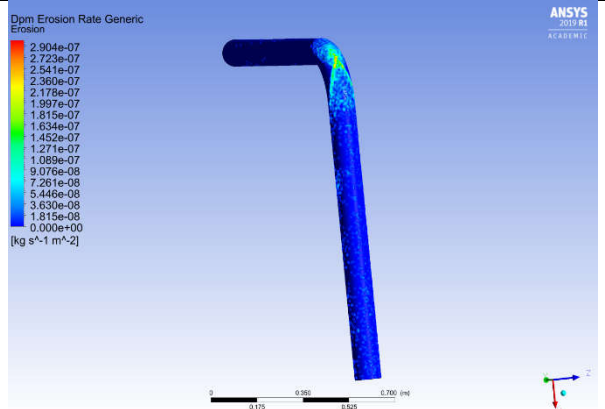
Tabel 4. 8 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi diameter partikel

No	Flowrate	Diameter	Hasil Simulasi
1	0,08 kg/s	300 $\mu\text{m}$	
2	0,13 kg/s	300 $\mu\text{m}$	
3	0,17 kg/s	300 $\mu\text{m}$	

No	Flowrate	Diameter	Hasil Simulasi
4	0,21 kg/s	300 $\mu\text{m}$	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 Academic</p>
5	0,25 kg/s	300 $\mu\text{m}$	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 Academic</p>
6	0,32 kg/s	300 $\mu\text{m}$	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2017 R1 Academic</p>

No	Flowrate	Diameter	Hasil Simulasi
7	0,08 kg/s	150 $\mu\text{m}$	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
8	0,13 kg/s	150 $\mu\text{m}$	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
9	0,17 kg/s	150 $\mu\text{m}$	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>



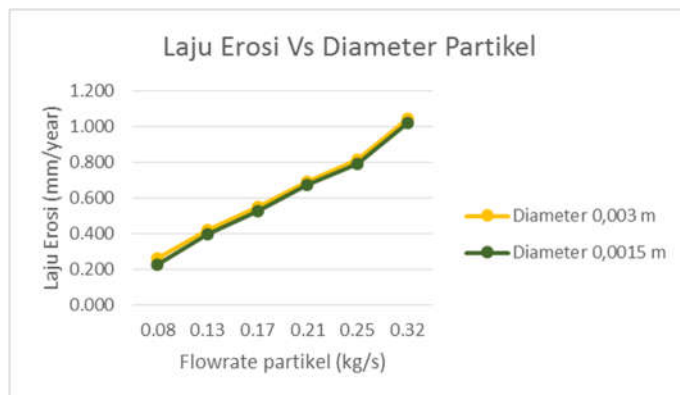
No	Flowrate	Diameter	Hasil Simulasi
10	0,21 kg/s	150 $\mu\text{m}$	
11	0,25 kg/s	150 $\mu\text{m}$	
12	0,32 kg/s	150 $\mu\text{m}$	

Dari tabel 4.8 dapat dilihat gambar berupa kontur dan nilai dari laju erosi. Nilai dari laju erosi tertinggi pada ukuran diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  yaitu sebesar  $2,65 \times 10^{-7} \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Nilai tersebut akan dikonversi menjadi (mm/tahun). Nilai laju erosi dari masing-masing variasi diameter partikel dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4. 9 Nilai laju erosi terhadap variasi diameter partikel

No	Diameter Partikel ( $\mu\text{m}$ )	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ )	Laju Erosi (mm/tahun)
1	300	0.08	6.62E-08	0.261
2	300	0.13	1.07E-07	0.422
3	300	0.17	1.40E-07	0.553
4	300	0.21	1.75E-07	0.691
5	300	0.25	2.07E-07	0.817
6	300	0.32	2.65E-07	1.046
7	150	0.08	5.70E-08	0.225
8	150	0.13	1.00E-07	0.395
9	150	0.17	1.33E-07	0.525
10	150	0.21	1.70E-07	0.671
11	150	0.25	2.00E-07	0.789
12	150	0.32	2.59E-07	1.022

Dari tabel 4.9 akan dibuat grafik dari laju erosi maksimal yang dialami oleh *elbow* pipa. Hal ini akan mempermudah analisis pengaruh variasi diameter partikel pasir terhadap terjadinya laju erosi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4. 10 Grafik laju erosi vs diameter partikel

Gambar 4.10 menunjukkan bahwa besar diameter partikel berbanding lurus terhadap laju erosi. Semakin besar diameter partikel pasir dalam aliran fluida gas maka semakin tinggi juga laju erosinya.

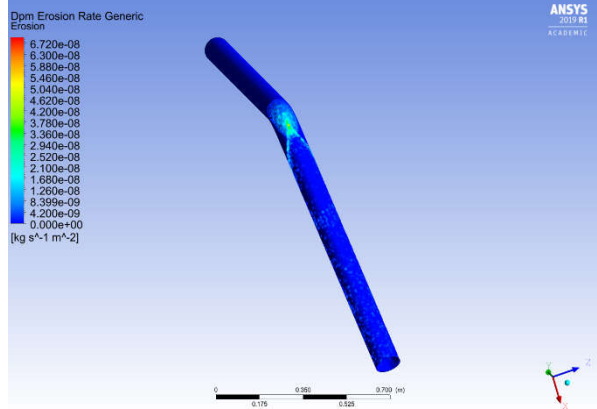
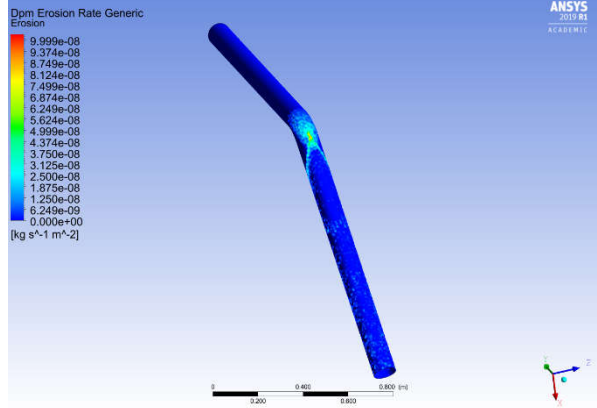
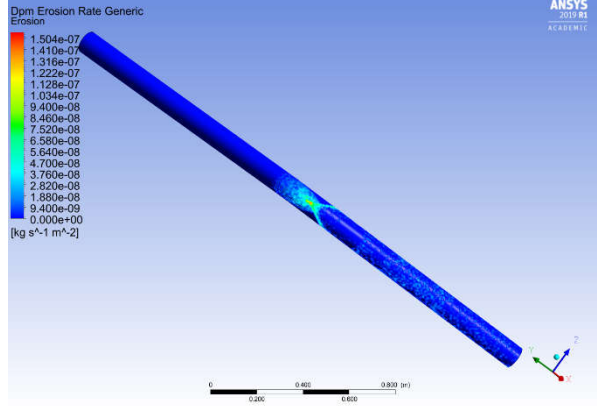
#### 4.8 Laju Erosi Terhadap Variasi Elbow

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai jenis *elbow* terhadap laju erosi. Dalam percobaan ini dilakukan 2 variasi *elbow*, yaitu *elbow*  $90^0$  dan *elbow*  $45^0$ . Setelah melakukan simulasi akan didapatkan data berupa nilai laju erosi pada *elbow* pipa.

Tabel 4. 10 Hasil simulasi laju erosi dengan variasi elbow

No	Flowrate	Elbow	Hasil Simulasi
1	0,08 kg/s	$90^0$	
2	0,13 kg/s	$90^0$	
3	0,17 kg/s	$90^0$	

No	Flowrate	Elbow	Hasil Simulasi
4	0,21 kg/s	90 <sup>0</sup>	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2017 R3 ACADEMIC</p> <p>2.099e-07 1.968e-07 1.837e-07 1.706e-07 1.574e-07 1.443e-07 1.312e-07 1.181e-07 1.050e-07 9.184e-08 7.872e-08 6.560e-08 5.248e-08 3.936e-08 2.624e-08 1.312e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>0 0.150 0.300 0.450 0.600 0.700 mm</p>
5	0,25 kg/s	90 <sup>0</sup>	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2017 R3 ACADEMIC</p> <p>2.327e-07 2.181e-07 2.036e-07 1.890e-07 1.745e-07 1.600e-07 1.454e-07 1.309e-07 1.163e-07 1.018e-07 8.725e-08 7.271e-08 5.817e-08 4.363e-08 2.909e-08 1.454e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>0 0.150 0.300 0.450 0.600 0.800 mm</p>
6	0,32 kg/s	90 <sup>0</sup>	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2017 R3 ACADEMIC</p> <p>2.909e-07 2.727e-07 2.545e-07 2.363e-07 2.182e-07 2.000e-07 1.818e-07 1.636e-07 1.454e-07 1.273e-07 1.091e-07 9.090e-08 7.272e-08 5.454e-08 3.636e-08 1.818e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>0 0.150 0.300 0.450 0.600 0.800 mm</p>

No	Flowrate	Elbow	Hasil Simulasi
7	0,08 kg/s	45 <sup>0</sup>	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
8	0,13 kg/s	45 <sup>0</sup>	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>
9	0,17 kg/s	45 <sup>0</sup>	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>ANSYS 2019 R1 ACADEMIC</p>

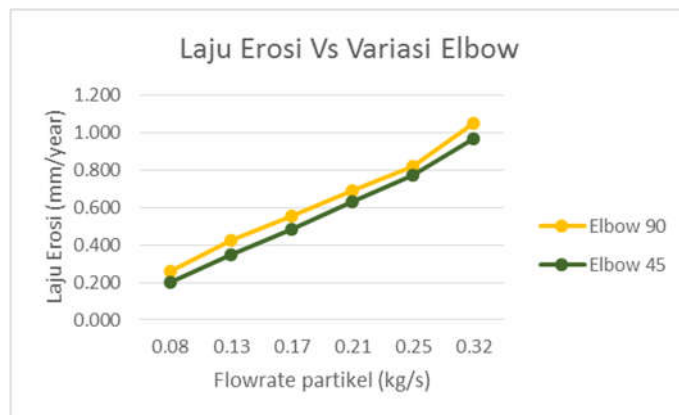
No	Flowrate	Elbow	Hasil Simulasi
10	0,21 kg/s	45 <sup>0</sup>	
11	0,25 kg/s	45 <sup>0</sup>	
12	0,32 kg/s	45 <sup>0</sup>	

Dari tabel 4.10 dapat dilihat gambar berupa kontur dan nilai dari laju erosi. Nilai dari laju erosi tertinggi pada *elbow* 90<sup>0</sup> yaitu sebesar  $2,65e^{-07}$  kg/m<sup>2</sup>s. Nilai tersebut akan dikonversi menjadi (mm/tahun). Nilai laju erosi dari masing-masing variasi *elbow* dapat dilihat pada tabel 4.11.

Tabel 4. 11 Nilai laju erosi terhadap variasi elbow

No	Elbow (°)	Diameter Partikel (μm)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/tahun)
1	90	300	0.08	6.62E-08	0.261
2	90	300	0.13	1.07E-07	0.422
3	90	300	0.17	1.40E-07	0.553
4	90	300	0.21	1.75E-07	0.691
5	90	300	0.25	2.07E-07	0.817
6	90	300	0.32	2.65E-07	1.046
7	45	300	0.08	5.06E-08	0.200
8	45	300	0.13	8.80E-08	0.347
9	45	300	0.17	1.23E-07	0.485
10	45	300	0.21	1.60E-07	0.632
11	45	300	0.25	1.96E-07	0.774
12	45	300	0.32	2.44E-07	0.963

Dari tabel 4.11 akan dibuat grafik dari laju erosi maksimal yang dialami oleh *elbow* pipa. Hal ini akan mempermudah analisis pengaruh variasi *elbow* terhadap terjadinya laju erosi yang akan ditunjukkan pada gambar 4.9.



Gambar 4. 11 Grafik laju erosi vs variasi elbow

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa nilai laju erosi yang terjadi pada *elbow* 90° lebih besar dibandingkan dengan laju erosi yang terjadi pada *elbow* 45°.

#### 4.9 Remaining Life

Pada sub-bab ini akan dilakukan perhitungan nilai remaining life dari simulasi yang telah dilakukan.

Rumus Perhitungan *Remaining Life* (RL)

$$RL = \frac{Ta - Tr}{Cr}$$

Dimana :

RL : Sisa umur pipa (tahun)

Ta : Tebal aktual pipa (mm)

Tr : Tebal *required* (mm)

Cr : Laju korosi (mm/tahun)

$$RL = \frac{4,2 - 0,61}{0,2615}$$

$$RL = 13,73 \text{ tahun}$$

Dengan cara yang sama, didapatkan nilai remaining life yang dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4. 12 Nilai remaining life

No	Elbow (°)	Diameter Partikel (µm)	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
1	90	300	11	0.08	6.62E-08	0.261	13.73
2	90	300	11	0.13	1.07E-07	0.422	8.50
3	90	300	11	0.17	1.40E-07	0.553	6.50
4	90	300	11	0.21	1.75E-07	0.691	5.20
5	90	300	11	0.25	2.07E-07	0.817	4.39
6	90	300	11	0.32	2.65E-07	1.046	3.43
7	90	150	11	0.08	5.70E-08	0.225	15.95
8	90	150	11	0.13	1.00E-07	0.395	9.10
9	90	150	11	0.17	1.33E-07	0.525	6.84
10	90	150	11	0.21	1.70E-07	0.671	5.35



No	Elbow (°)	Diameter Partikel (µm)	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
11	90	150	11	0.25	2.00E-07	0.789	4.55
12	90	150	11	0.32	2.59E-07	1.022	3.51
13	45	300	11	0.08	5.06E-08	0.200	17.96
14	45	300	11	0.13	8.80E-08	0.347	10.34
15	45	300	11	0.17	1.23E-07	0.485	7.39
16	45	300	11	0.21	1.60E-07	0.632	5.68
17	45	300	11	0.25	1.96E-07	0.774	4.64
18	45	300	11	0.32	2.44E-07	0.963	3.73
19	45	150	11	0.08	4.50E-08	0.178	20.20
20	45	150	11	0.13	8.00E-08	0.316	11.37
21	45	150	11	0.17	1.08E-07	0.426	8.42
22	45	150	11	0.21	1.41E-07	0.557	6.45
23	45	150	11	0.25	1.73E-07	0.683	5.26
24	45	150	11	0.32	1.89E-07	0.746	4.81

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil analisis data menggunakan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamic*), maka kesimpulan yang bisa diperoleh dari penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Banyaknya konsentrasi partikel pasir atau *flowrate* berbanding lurus dengan laju erosi yang dialami oleh pipa. Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada kecepatan 11 m/s dan sudut belok  $90^0$  dengan *flowrate* 0,08 kg/s, 0,13 kg/s, 0,17 kg/s, 0,21 kg/s, 0,25 kg/s dan 0,32 kg/s mengalami laju erosi masing-masing 0,261 mm/tahun, 0,422 mm/tahun, 0,553 mm/tahun, 0,691 mm/tahun, 0,817 mm/tahun dan 1,046 mm/tahun.
2. Besarnya diameter partikel pasir berbanding lurus dengan laju erosi yang dialami oleh pipa. Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada *flowrate* yang sama yaitu 0,32 kg/s, sudut belok  $90^0$  dengan kecepatan partikel pasir 11 m/s pada diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  dan 150  $\mu\text{m}$  mengalami laju erosi masing 1,046 mm/tahun dan 1,022 mm/tahun.
3. Kecepatan aliran partikel pasir berbanding lurus dengan laju erosi yang dialami oleh pipa. Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada *flowrate* yang sama yaitu 0,08 kg/s, sudut belok  $90^0$  dengan kecepatan partikel pasir 11 m/s, 15 m/s dan 20 m/s mengalami laju erosi masing-masing 0,261 mm/tahun, 0,320 mm/tahun dan 0,436 mm/tahun.
4. Nilai laju erosi yang terjadi pada *elbow*  $90^0$  lebih besar dibandingkan laju erosi yang terjadi pada *elbow*  $45^0$ . Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada sudut belok  $90^0$  mengalami laju erosi 0,261 mm/tahun dan pada sudut belok  $45^0$  mengalami laju erosi 0,200 mm/tahun.
5. Nilai remaining life dari *elbow* pipa yang mengalami erosi berbanding terbalik dengan nilai laju erosi. Semakin besar nilai laju erosi yang terjadi maka akan semakin kecil nilai remaining life. Hal ini dibuktikan dari hasil simulasi pada elbow  $90^0$  kecepatan 11 m/s, diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  nilai laju erosi 0,261 mm/tahun, 0,422 mm/tahun, 0,553 mm/tahun, 0,691 mm/tahun, 0,817 mm/tahun dan 1,046 mm/tahun didapatkan nilai remaining life masing-masing 13,73 tahun, 8,5 tahun, 6,5 tahun, 5,2 tahun, 4,39 tahun dan 3,43 tahun.

## 5.2 Saran

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

1. Apabila node pada *meshing* diperbanyak dan iterasi ketika running simulasi diperbanyak akan didapatkan hasil yang lebih valid.
2. Perlu dilakukan simulasi menggunakan *software* lain untuk memvalidasi dan membandingkan hasil dari simulasi dengan *Software Ansys*.
3. Apabila dikembangkan model perubahan kekasaran pada permukaan dalam dinding material pipa akan menghasilkan simulasi nilai laju erosi yang mendekati kondisi di lapangan. Saat ini penulis belum mampu karena keterbatasan spesifikasi peralatan yang digunakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Angga, Muhammad Raymon Satriawan. 2016. Analisa Pengaruh Erosi Terhadap Kelayakan Jalur Pipa Dari Pengaruh Inlet Separator Menuju Slug Catcher Di PGN SAKA. Teknik Perpipaan. PPNS. Surabaya
- ANSYS-Fluent. (2016). ANSYS Fluent. Retrieved from ANSYS: <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.
- 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
- DNV. (2007). Recommended Practice RP O501 Erosive Wear In Piping Systems.
- Finnie, I. (1960). Erosion of Surfaces by Solid Particles. *Wear*, 87=103.
- 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.
- Ilmi, Bahrul. 2018. Analisa Laju Erosi Pipa Discharge Slurry Jenis HDPE Pada Kapal Keruk Isap (Cutter Suction Dregger) Yang Beroperasi di Canal Water Intake PLTGU Grati Menggunakan Simulasi CFD. Departemen Teknik Sistem Perkapalan. ITS. Surabaya.
- 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. San Diego.
- Levy, A., & Chick, P. (1983). The Effect of Erodent Composition and Shape on the Erosion of Steel. *Wear*, 89, 151-162.
- Lewis, C.D. (1982). A Practical Guide to Exponential Smoothing and Curve Fitting. Butterworth Scientific: London.
- Parsi, M. (2015). Sand Particle Erosion in Vertical Slug/Churn Flow. Oklahoma: The University of Tulsa.
- Rahmat, Asep Rahmdani. 2019. Analisis Desain Baling-Baling Gottingen 428 Airfoil Turbin dengan Metode Komputasi Fluid Dinamika Cairan pada Pembangkit Listrik Vortex Air Gravitasi. Departemen Teknik Sistem Perkapalan. ITS. Surabaya.

Restrepo, 2008. United State of America.

Subakti, Yani Cordoba. 2017. Analisa Laju Korosi Pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Baja Galvanis dengan Metode Kehilangan Berat. Departemen Teknik Sistem Perkapalan. ITS. Surabaya.

Yudhatama, Ido Widya. 2018. Simulasi CFD erosi partikel pasir dalam aliran fluida gas turbulen pada elbow pipa horizontal-vertikal. Departemen Teknik Material Dan Metalurgi. ITS. Surabaya.

Zikanov, O. (2010). Essential Computational Fluid Dynamics. New Jersey: John Wiley & Sons.

**LAMPIRAN**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*



**PERHITUNGAN LAJU EROSI**

**DNV RP O501**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

# Perhitungan Laju Erosi menurut DNV RP O501

## Data Perhitungan

Material Pipa	:	Astm A 106	
OD	:	4.5	Inch
Thickness	:	0.42	mm
Material Density	:	7990	kg/m <sup>3</sup>
ρ <sub>m</sub>	:	1.225	kg/m <sup>3</sup>
U <sub>p</sub>	:	11	m/s
K	:	2.00E-09	
P <sub>p</sub>	:	2650	kg/m <sup>3</sup>
μ <sub>m</sub>	:	0.000018	kg/ms
mp	:	0.08	kg/s
Mg	:	2.1	kg/s
ρ <sub>g</sub>	:	1.225	kg/m <sup>3</sup>
V	:	11	m/s

## Perhitungan

Rumus Umum

$$EL = \frac{m_p \cdot K \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot U_p^{2.5}}{\rho_p \cdot A_{pipe}} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit}$$

1) Menghitung karakteristik sudut impak (α)

$$\begin{aligned} \alpha &= \arctan(1/V(2.R)) \\ &= \arctan 0.7 \\ &= 35 \end{aligned}$$

2) Menghitung grup parameter tanpa dimensi

$$A = \frac{\rho_m^2 \cdot \tan(\alpha) \cdot U_p \cdot D}{\rho_p \cdot \mu_m}$$

ρ <sub>m</sub> =	1.23	(kg/m <sup>3</sup> )
U <sub>p</sub> =	11.00	
D =	0.10	
P <sub>p</sub> =	2650	
μ <sub>m</sub> =	0.000018	
tan =	0.7	

$$A = 24.771386$$

- 3) Menggunakan *dimensionless parameter group* dari langkah b untuk mencari nilai critical particle diameter menggunakan persamaan dp,c

$$\begin{aligned} \gamma_c &= \frac{\rho_m}{\rho_p \cdot [1.88 \cdot \ln(A) - 6.04]} \\ &= \frac{1.23}{12448.96} \\ &= 9.84E-05 \end{aligned}$$

- 4) Menghitung *particle size correction* fungsi G menggunakan *critical particle diameter*

$$G = \frac{\gamma}{\gamma_c} \quad \gamma < \gamma_c$$

$$\begin{aligned} Y &= dp/D \\ &= 2.93E-05 \end{aligned}$$

$$G = 0.298$$

- 5) Menghitung karakteristik lengkungan pipa yang terkena erosi

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \sin(\alpha)} = \frac{A_{pipe}}{\sin(\alpha)}$$

$$A = 0.014$$

- 6) Faktor model/geometri

$$C1 = 2.5$$

- 7) konversi faktor (m/s -> mm/year)

$$Cunit = 3.15E+10$$

- 8) Menghitung nilai karakteristik elastisitas material

$$\begin{aligned} F(\alpha) &= A_1 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right) - A_2 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^2 + A_3 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^3 - A_4 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^4 \\ &\quad + A_5 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^5 - A_6 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^6 + A_7 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^7 - A_8 \cdot \left(\frac{\alpha \cdot \pi}{180}\right)^8 \end{aligned}$$

$$F(a) = 0.691$$

$$A1 = 9.37$$

$$A2 = 42.3$$

$$A3 = 110.9$$

$$A4 = 175.8$$

$$A5 = 170.1$$

$$A6 = 98.4$$

$$A7 = 31.07$$

$$A8 = 20$$

$$\alpha = 35$$

9) Laju Erosi

$$EL = \frac{m_p \cdot K \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot U_p^n}{\rho_t \cdot A_{pipe}} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit}$$

$$EL = 0.2481 \quad \text{mm/year}$$

$m_p$	=	0.08
K	=	2E-09
F(a)	=	0.691
sin a	=	0.57
Up	=	11
G	=	0.298
C1	=	2.5
Cunit	=	3.15E+10
$\rho_t$	=	7990
Apipe	=	0.0082088

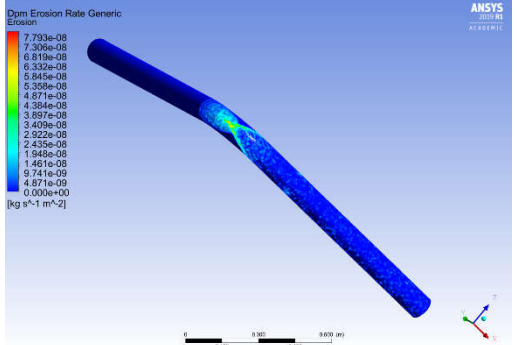
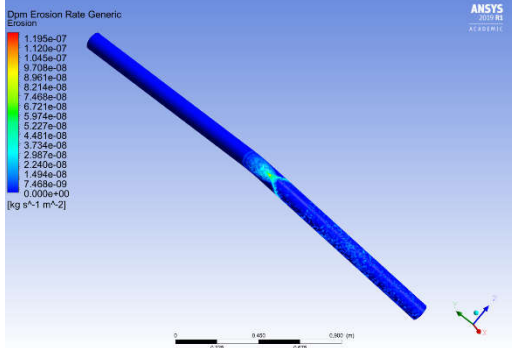
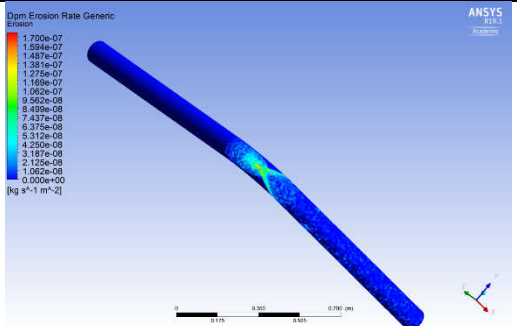
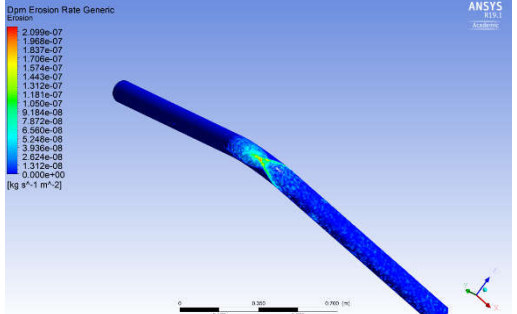
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

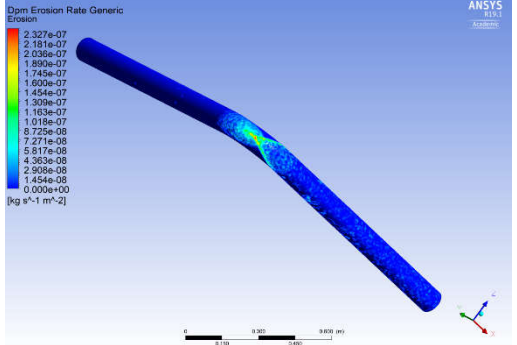
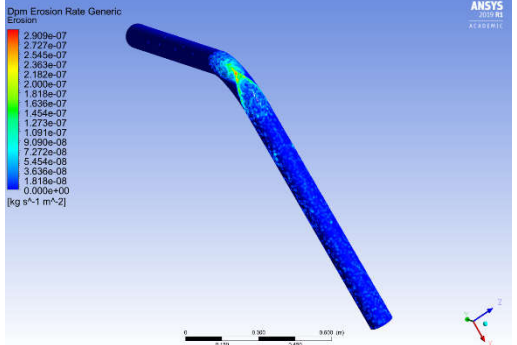
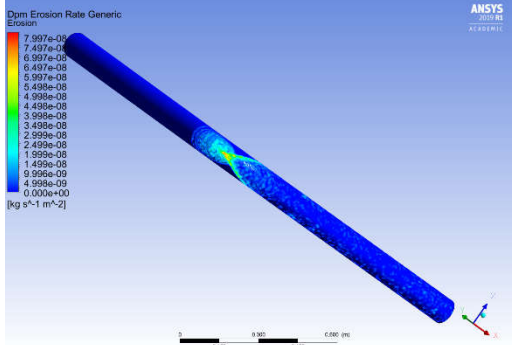
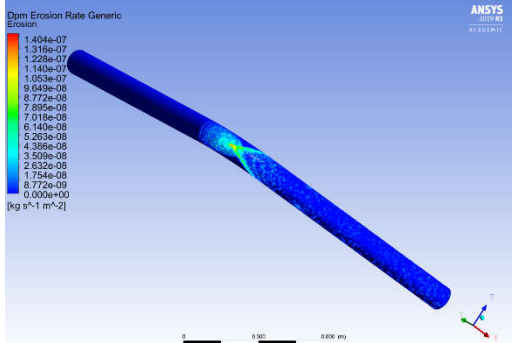
## **KONTUR HASIL SIMULASI ANSYS FLUENT**

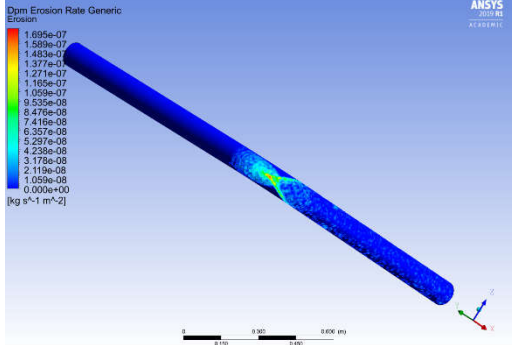
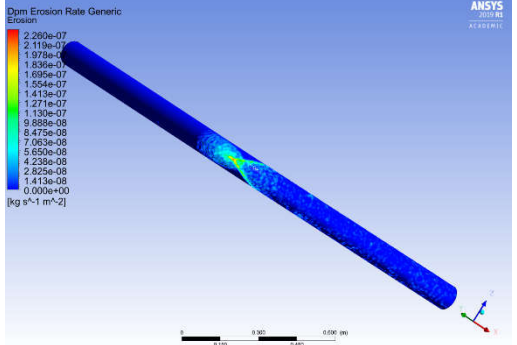
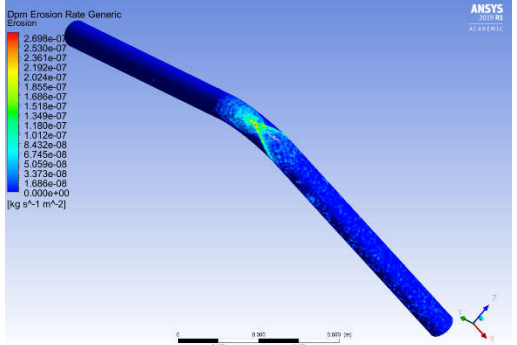
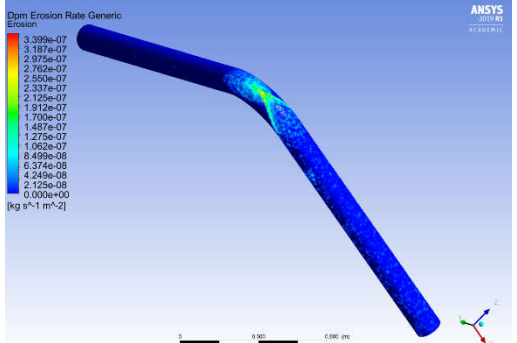
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

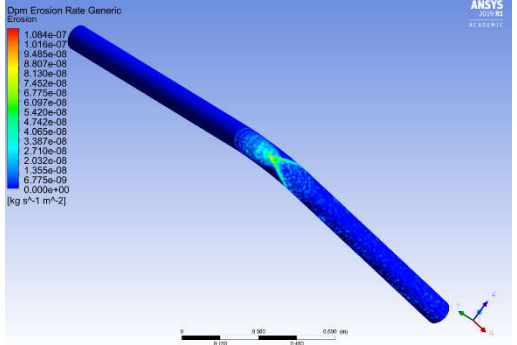
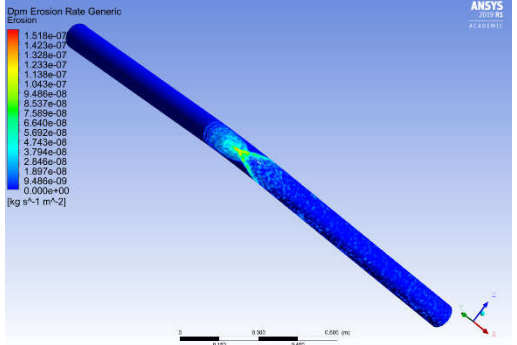
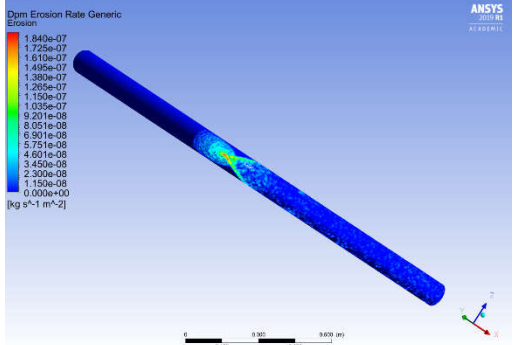
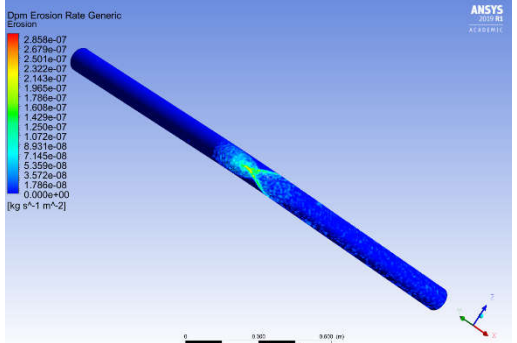


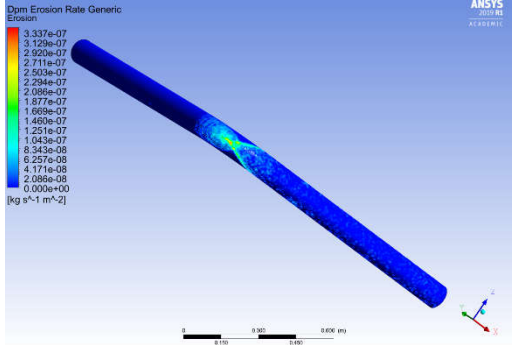
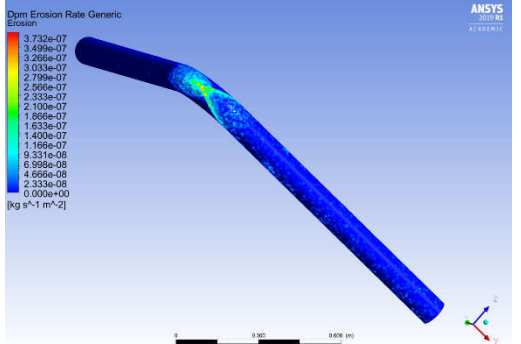
## Kontur Pada Pipa Sudut Belok 90<sup>0</sup> Dengan Diameter Partikel 0,003 m

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
1	11 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>[kg m<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
2	11 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>[kg m<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
3	11 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>[kg m<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
4	11 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>[kg m<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
5	11 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>2.327e-07 2.181e-07 2.036e-07 1.890e-07 1.745e-07 1.600e-07 1.454e-07 1.309e-07 1.163e-07 1.018e-07 8.725e-08 7.271e-08 5.817e-08 4.363e-08 2.909e-08 1.454e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
6	11 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>2.909e-07 2.772e-07 2.545e-07 2.363e-07 2.182e-07 2.000e-07 1.818e-07 1.636e-07 1.454e-07 1.273e-07 1.091e-07 9.090e-08 7.272e-08 5.454e-08 3.636e-08 1.818e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
7	15 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>7.997e-09 6.997e-08 6.497e-08 5.997e-08 5.498e-08 4.998e-08 4.498e-08 3.998e-08 3.498e-08 2.998e-08 2.498e-08 1.998e-08 1.498e-08 9.986e-09 4.986e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
8	15 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 Academic</p> <p>1.404e-07 1.316e-07 1.229e-07 1.140e-07 1.053e-07 9.649e-08 8.772e-08 7.895e-08 7.018e-08 6.140e-08 5.263e-08 4.386e-08 3.509e-08 2.632e-08 1.754e-08 8.772e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

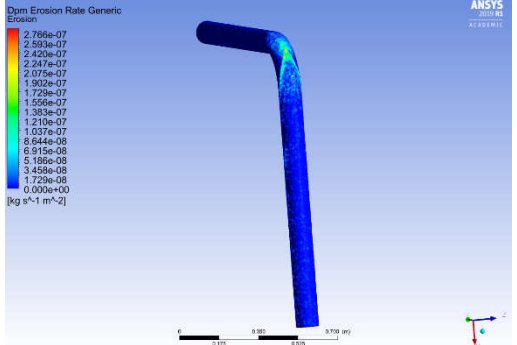
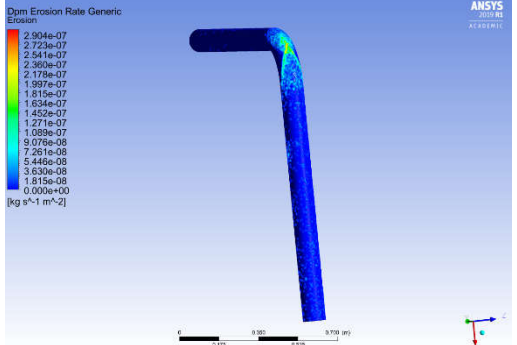
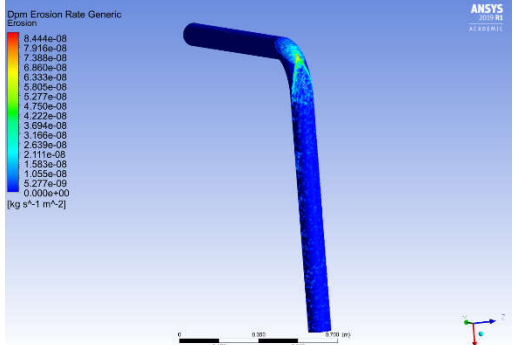
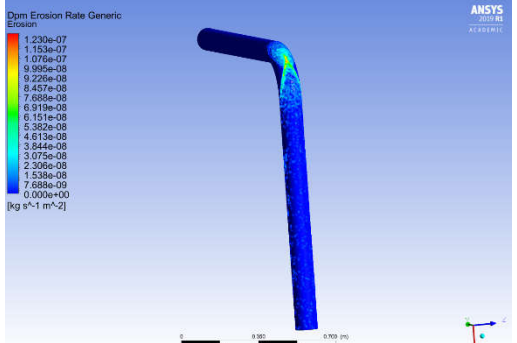
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
9	15 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.695e-07 1.589e-07 1.463e-07 1.377e-07 1.271e-07 1.165e-07 1.059e-07 9.535e-08 8.476e-08 7.416e-08 6.357e-08 5.297e-08 4.239e-08 3.178e-08 2.119e-08 1.059e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
10	15 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.290e-07 2.119e-07 1.979e-07 1.839e-07 1.699e-07 1.559e-07 1.413e-07 1.271e-07 1.130e-07 9.888e-08 8.476e-08 7.063e-08 5.650e-08 4.239e-08 2.825e-08 1.413e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
11	15 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.699e-07 2.530e-07 2.361e-07 2.192e-07 2.024e-07 1.855e-07 1.686e-07 1.518e-07 1.349e-07 1.180e-07 1.012e-07 8.452e-08 6.745e-08 5.039e-08 3.373e-08 1.686e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
12	15 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>3.399e-07 3.187e-07 2.975e-07 2.762e-07 2.550e-07 2.337e-07 2.125e-07 1.912e-07 1.700e-07 1.487e-07 1.275e-07 1.062e-07 8.499e-08 6.374e-08 4.249e-08 2.125e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

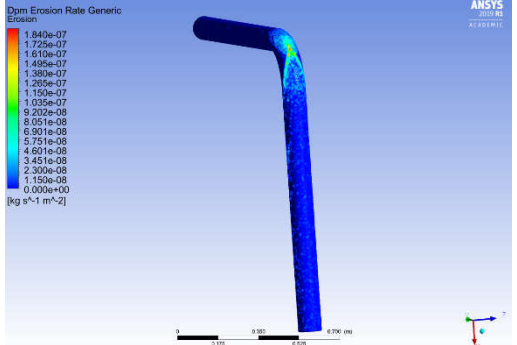

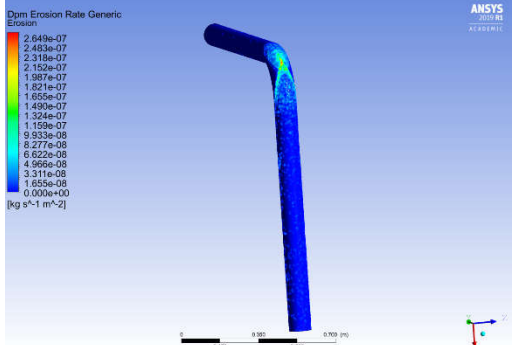
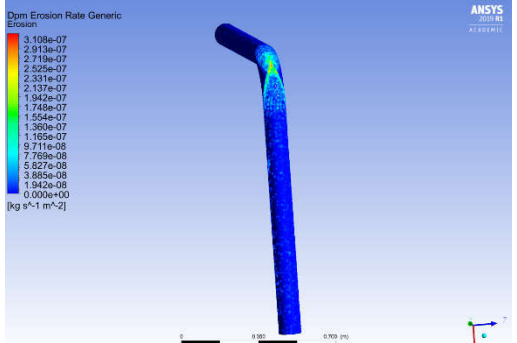
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
13	20 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.084e-07 1.019e-07 9.465e-08 8.907e-08 8.130e-08 7.452e-08 6.775e-08 6.097e-08 5.420e-08 4.742e-08 4.065e-08 3.387e-08 2.710e-08 2.032e-08 1.355e-08 6.775e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
14	20 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.518e-07 1.429e-07 1.329e-07 1.233e-07 1.138e-07 1.043e-07 9.486e-08 8.537e-08 7.589e-08 6.640e-08 5.692e-08 4.743e-08 3.794e-08 2.846e-08 1.897e-08 9.486e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
15	20 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.840e-07 1.725e-07 1.610e-07 1.495e-07 1.380e-07 1.265e-07 1.150e-07 1.035e-07 9.201e-08 8.051e-08 6.901e-08 5.751e-08 4.601e-08 3.450e-08 2.300e-08 1.150e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
16	20 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.858e-07 2.679e-07 2.501e-07 2.322e-07 2.143e-07 1.965e-07 1.786e-07 1.608e-07 1.429e-07 1.250e-07 1.072e-07 8.931e-08 7.145e-08 5.359e-08 3.572e-08 1.786e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
17	20 m/s	0,25 kg/s	 <p>ANSYS 2020 R1 KAPALRIK</p> <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3.337e-07</li> <li>3.129e-07</li> <li>2.920e-07</li> <li>2.711e-07</li> <li>2.503e-07</li> <li>2.294e-07</li> <li>2.086e-07</li> <li>1.877e-07</li> <li>1.668e-07</li> <li>1.460e-07</li> <li>1.251e-07</li> <li>1.043e-07</li> <li>8.343e-08</li> <li>6.257e-08</li> <li>4.171e-08</li> <li>2.086e-08</li> <li>0.000e+00</li> </ul> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>0 0.100 0.200 0.300 (m)</p>
18	20 m/s	0,32 kg/s	 <p>ANSYS 2020 R1 KAPALRIK</p> <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3.732e-07</li> <li>3.499e-07</li> <li>3.266e-07</li> <li>3.033e-07</li> <li>2.799e-07</li> <li>2.566e-07</li> <li>2.333e-07</li> <li>2.100e-07</li> <li>1.866e-07</li> <li>1.633e-07</li> <li>1.400e-07</li> <li>1.166e-07</li> <li>9.331e-08</li> <li>6.998e-08</li> <li>4.666e-08</li> <li>2.333e-08</li> <li>0.000e+00</li> </ul> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p> <p>0 0.100 0.200 0.300 (m)</p>

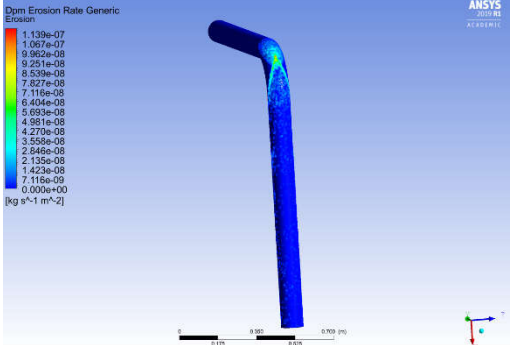
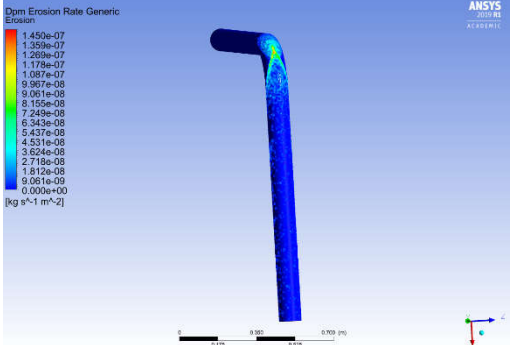
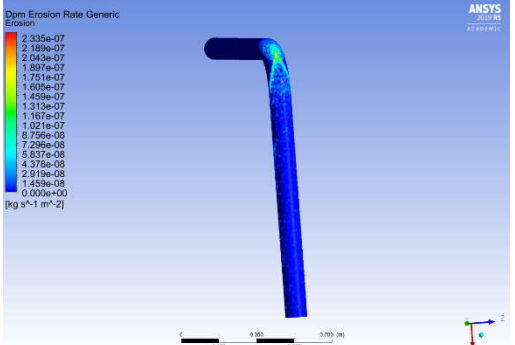
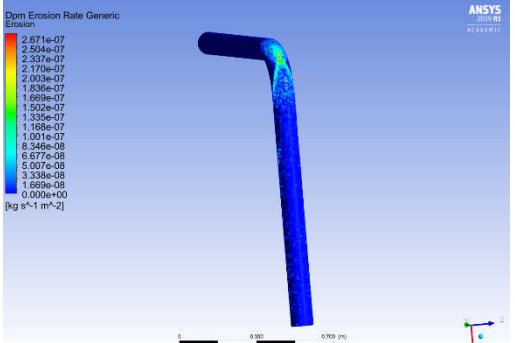
## Kontur Pada Pipa Sudut Belok 90<sup>0</sup> Dengan Diameter Partikel 0,0015 m

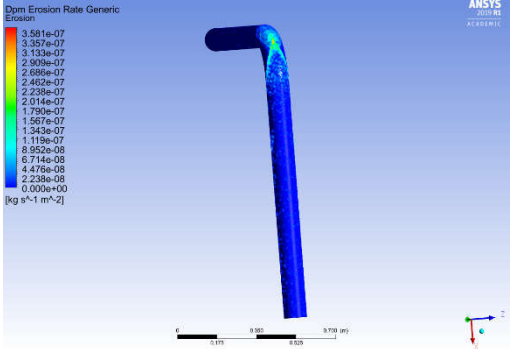
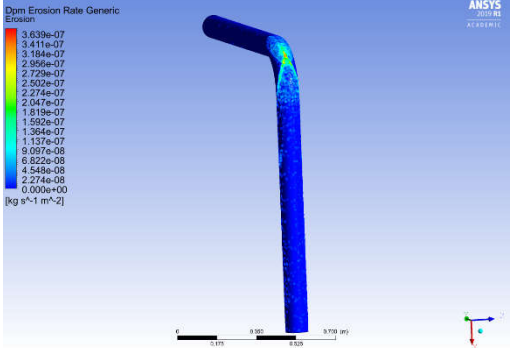
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
1	11 m/s	0,08 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>7.940e-08 7.444e-08 6.948e-08 6.451e-08 5.955e-08 5.459e-08 4.963e-08 4.466e-08 3.970e-08 3.474e-08 2.978e-08 2.481e-08 1.985e-08 1.489e-08 9.93e-09 4.963e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
2	11 m/s	0,13 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.142e-07 1.070e-07 9.991e-08 9.278e-08 8.564e-08 7.850e-08 7.137e-08 6.423e-08 5.709e-08 4.995e-08 4.282e-08 3.568e-08 2.855e-08 2.141e-08 1.427e-08 7.137e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
3	11 m/s	0,17 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.751e-07 1.641e-07 1.532e-07 1.423e-07 1.313e-07 1.204e-07 1.094e-07 9.849e-08 8.754e-08 7.660e-08 6.565e-08 5.471e-08 4.377e-08 3.283e-08 2.188e-08 1.094e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
4	11 m/s	0,21 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.104e-07 1.972e-07 1.841e-07 1.709e-07 1.578e-07 1.446e-07 1.315e-07 1.183e-07 1.052e-07 9.203e-08 7.889e-08 6.574e-08 5.259e-08 3.944e-08 2.630e-08 1.315e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
5	11 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.766e-07 2.593e-07 2.420e-07 2.247e-07 2.075e-07 1.902e-07 1.729e-07 1.556e-07 1.383e-07 1.210e-07 1.037e-07 8.644e-08 6.915e-08 5.186e-08 3.459e-08 1.729e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
6	11 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.904e-07 2.729e-07 2.554e-07 2.380e-07 2.178e-07 1.997e-07 1.815e-07 1.634e-07 1.452e-07 1.271e-07 1.089e-07 9.076e-08 7.251e-08 5.446e-08 3.630e-08 1.815e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
7	15 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>8.444e-08 7.916e-08 7.388e-08 6.860e-08 6.333e-08 5.805e-08 5.277e-08 4.750e-08 4.222e-08 3.694e-08 3.166e-08 2.639e-08 2.111e-08 1.583e-08 1.055e-08 5.277e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
8	15 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>1.230e-07 1.153e-07 1.076e-07 9.995e-08 9.225e-08 8.457e-08 7.686e-08 6.915e-08 6.145e-08 5.375e-08 4.613e-08 3.844e-08 3.075e-08 2.305e-08 1.535e-08 7.686e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
9	15 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.840e-07 1.725e-07 1.610e-07 1.495e-07 1.380e-07 1.265e-07 1.150e-07 1.035e-07 9.202e-08 8.051e-08 6.901e-08 5.751e-08 4.601e-08 3.451e-08 2.300e-08 1.150e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
10	15 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.455e-07 2.302e-07 2.149e-07 1.995e-07 1.842e-07 1.689e-07 1.535e-07 1.381e-07 1.228e-07 1.074e-07 9.203e-08 7.673e-08 6.139e-08 4.604e-08 3.069e-08 1.535e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
11	15 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.649e-07 2.443e-07 2.318e-07 2.153e-07 1.987e-07 1.821e-07 1.655e-07 1.490e-07 1.324e-07 1.159e-07 9.933e-08 8.277e-08 6.622e-08 4.966e-08 3.311e-08 1.655e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
12	15 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>3.108e-07 2.913e-07 2.719e-07 2.525e-07 2.331e-07 2.137e-07 1.942e-07 1.748e-07 1.554e-07 1.360e-07 1.165e-07 9.711e-08 7.769e-08 5.827e-08 3.885e-08 1.942e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

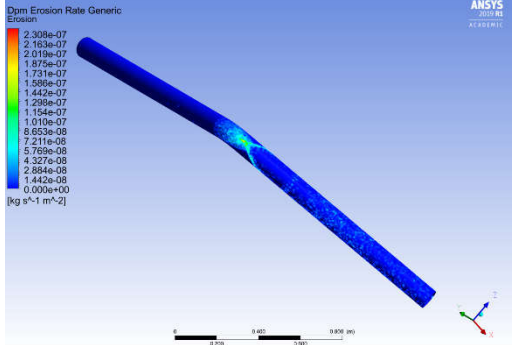
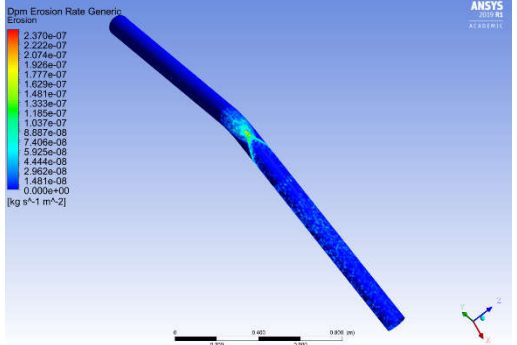
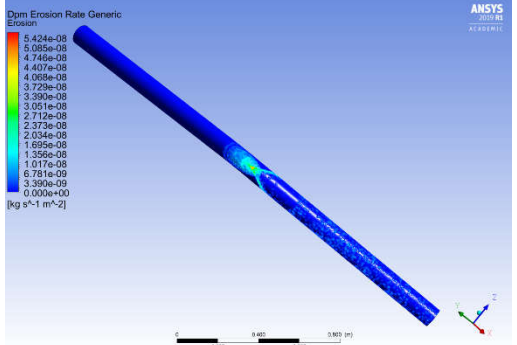
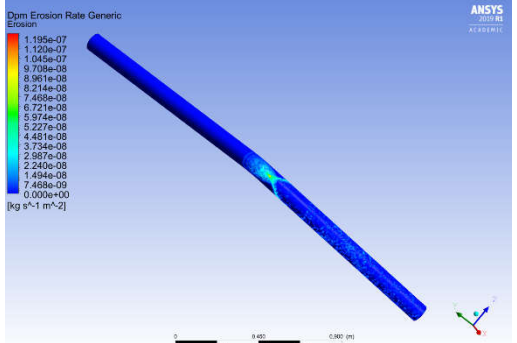


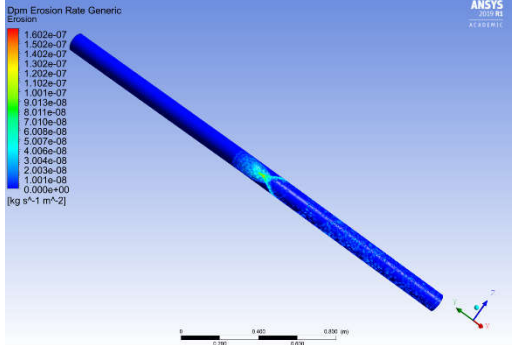
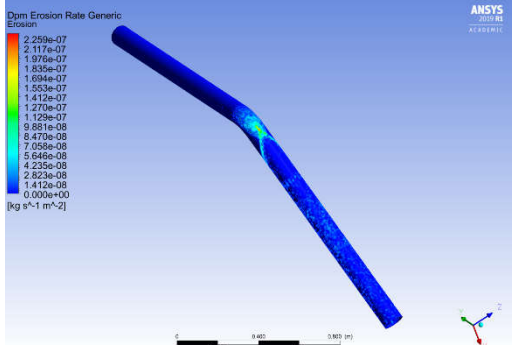
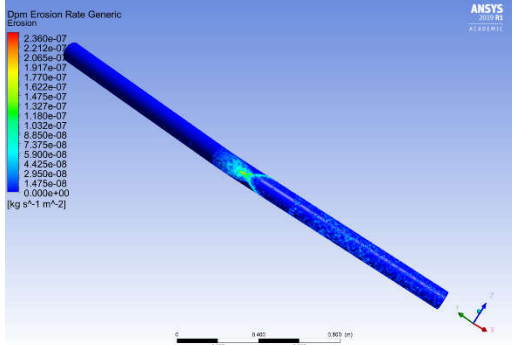
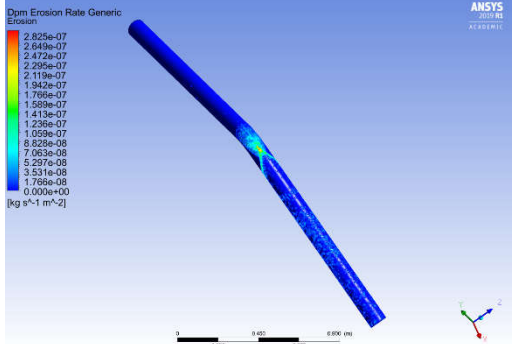
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
13	20 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM/IT</p> <p>1.139e-07 1.067e-07 9.962e-08 9.251e-08 8.539e-08 7.827e-08 7.116e-08 6.404e-08 5.693e-08 4.981e-08 4.270e-08 3.558e-08 2.846e-08 2.135e-08 1.423e-08 7.116e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
14	20 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM/IT</p> <p>1.450e-07 1.359e-07 1.268e-07 1.179e-07 1.087e-07 9.967e-08 9.061e-08 8.156e-08 7.249e-08 6.343e-08 5.437e-08 4.531e-08 3.624e-08 2.718e-08 1.812e-08 9.061e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
15	20 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM/IT</p> <p>2.335e-07 2.199e-07 2.043e-07 1.897e-07 1.751e-07 1.605e-07 1.459e-07 1.313e-07 1.167e-07 1.021e-07 8.756e-08 7.299e-08 5.837e-08 4.379e-08 2.919e-08 1.459e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
16	20 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM/IT</p> <p>2.671e-07 2.504e-07 2.337e-07 2.170e-07 2.003e-07 1.836e-07 1.669e-07 1.502e-07 1.335e-07 1.168e-07 1.001e-07 8.349e-08 6.677e-08 5.007e-08 3.336e-08 1.669e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

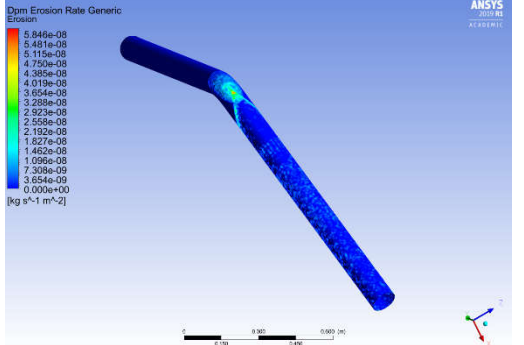
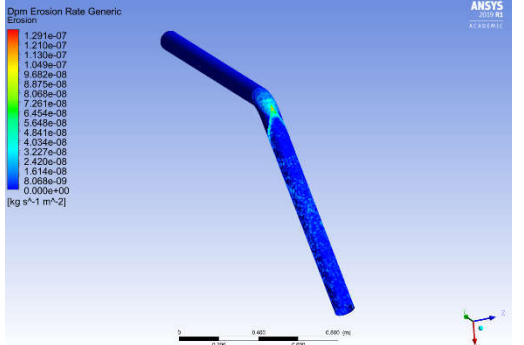
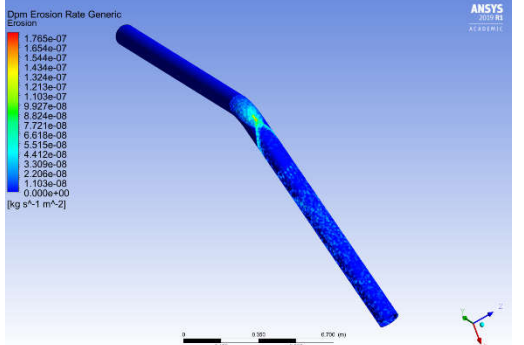
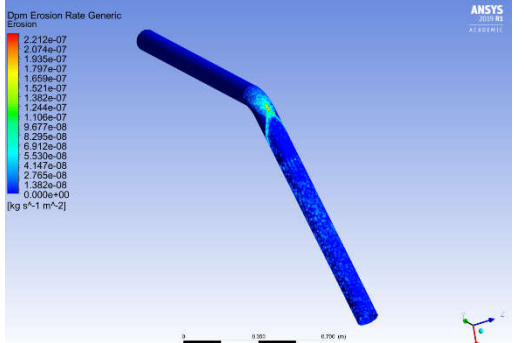
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
17	20 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>3.581e-07 3.387e-07 3.153e-07 2.909e-07 2.689e-07 2.462e-07 2.239e-07 2.014e-07 1.790e-07 1.567e-07 1.343e-07 1.119e-07 8.952e-08 6.714e-08 4.479e-08 2.238e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
18	20 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>3.639e-07 3.411e-07 3.184e-07 2.956e-07 2.729e-07 2.502e-07 2.274e-07 2.047e-07 1.819e-07 1.592e-07 1.364e-07 1.137e-07 9.097e-08 6.822e-08 4.548e-08 2.274e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

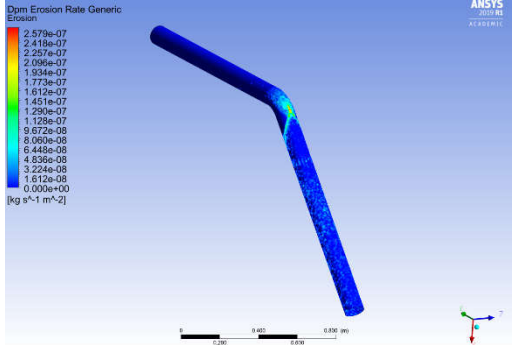
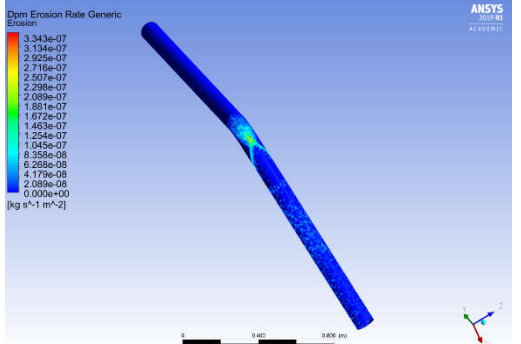
## Kontur Pada Pipa Sudut Belok 45<sup>0</sup> Dengan Diameter Partikel 0,003 m

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
1	11 m/s	0,08 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R2</p> <p>6.720e-08 5.300e-08 5.880e-08 5.460e-08 5.040e-08 4.620e-08 4.200e-08 3.780e-08 3.360e-08 2.940e-08 2.520e-08 2.100e-08 1.680e-08 1.260e-08 8.399e-09 4.200e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
2	11 m/s	0,13 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R2</p> <p>9.999e-08 9.374e-08 8.749e-08 8.124e-08 7.499e-08 6.874e-08 6.249e-08 5.624e-08 4.999e-08 4.374e-08 3.750e-08 3.125e-08 2.500e-08 1.875e-08 1.250e-08 6.249e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
3	11 m/s	0,17 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R2</p> <p>1.504e-07 1.410e-07 1.317e-07 1.222e-07 1.128e-07 1.034e-07 9.400e-08 8.460e-08 7.520e-08 6.580e-08 5.640e-08 4.700e-08 3.760e-08 2.820e-08 1.880e-08 9.400e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
4	11 m/s	0,21 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R2</p> <p>2.072e-07 1.942e-07 1.813e-07 1.684e-07 1.554e-07 1.424e-07 1.295e-07 1.165e-07 1.036e-07 9.064e-08 7.769e-08 6.474e-08 5.179e-08 3.883e-08 2.589e-08 1.295e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

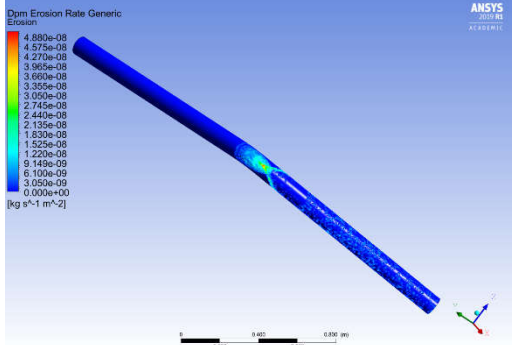
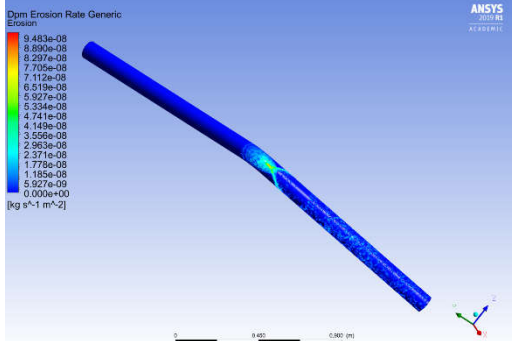
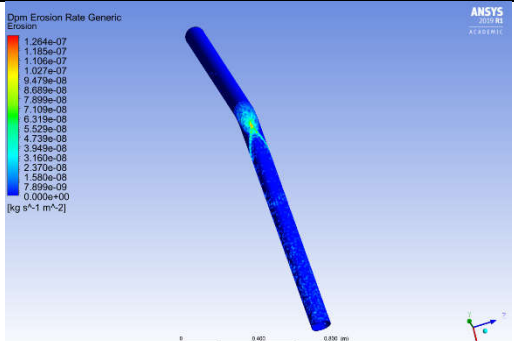
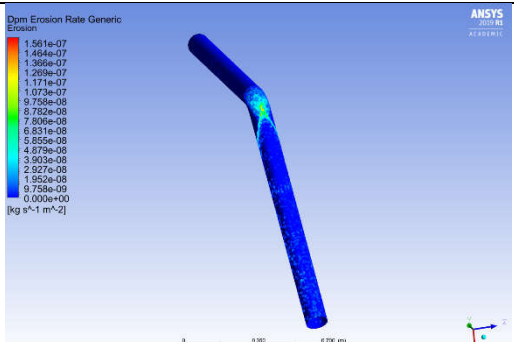
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
5	11 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.308e-07 2.163e-07 2.018e-07 1.875e-07 1.731e-07 1.588e-07 1.442e-07 1.298e-07 1.154e-07 1.010e-07 8.653e-08 7.211e-08 5.769e-08 4.327e-08 2.884e-08 1.442e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
6	11 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.370e-07 2.222e-07 2.074e-07 1.926e-07 1.777e-07 1.629e-07 1.481e-07 1.333e-07 1.185e-07 1.037e-07 8.897e-08 7.408e-08 5.920e-08 4.444e-08 2.962e-08 1.481e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
7	15 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>5.424e-08 4.985e-08 4.748e-08 4.407e-08 4.068e-08 3.729e-08 3.390e-08 3.051e-08 2.712e-08 2.373e-08 2.034e-08 1.695e-08 1.356e-08 1.017e-08 6.781e-09 3.390e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
8	15 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>1.195e-07 1.120e-07 1.045e-07 9.708e-08 9.961e-08 8.214e-08 7.468e-08 6.721e-08 5.974e-08 5.227e-08 4.481e-08 3.734e-08 2.987e-08 2.240e-08 1.494e-08 7.468e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
9	15 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACPD1011</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
10	15 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACPD1011</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
11	15 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACPD1011</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
12	15 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACPD1011</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
13	20 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>5.846e-08 5.441e-08 5.115e-08 4.750e-08 4.385e-08 4.019e-08 3.654e-08 3.259e-08 2.923e-08 2.559e-08 2.192e-08 1.827e-08 1.462e-08 1.096e-08 7.309e-09 3.654e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
14	20 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.291e-07 1.210e-07 1.130e-07 1.049e-07 9.692e-08 8.875e-08 8.068e-08 7.251e-08 6.544e-08 5.648e-08 4.841e-08 4.034e-08 3.227e-08 2.420e-08 1.614e-08 8.068e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
15	20 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>1.765e-07 1.654e-07 1.544e-07 1.434e-07 1.324e-07 1.213e-07 1.103e-07 9.927e-08 8.824e-08 7.721e-08 6.618e-08 5.515e-08 4.412e-08 3.309e-08 2.206e-08 1.103e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
16	20 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>2.212e-07 2.074e-07 1.935e-07 1.797e-07 1.659e-07 1.521e-07 1.382e-07 1.244e-07 1.106e-07 9.677e-08 8.295e-08 6.912e-08 5.530e-08 4.147e-08 2.765e-08 1.382e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

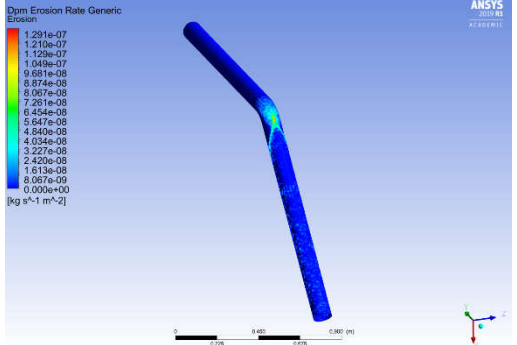
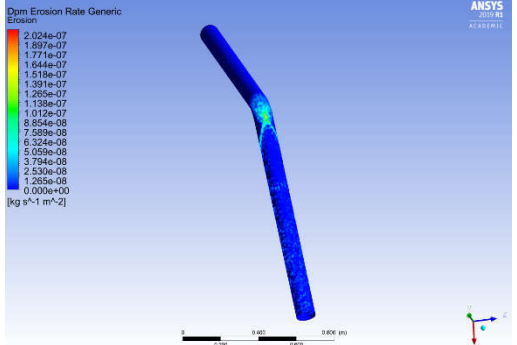
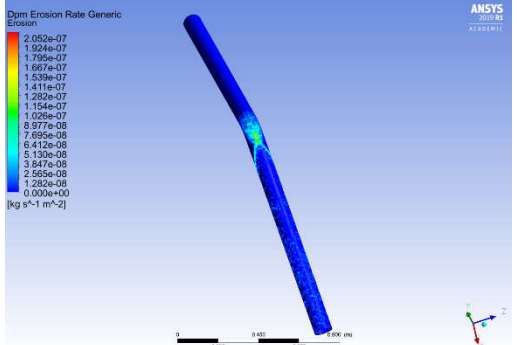
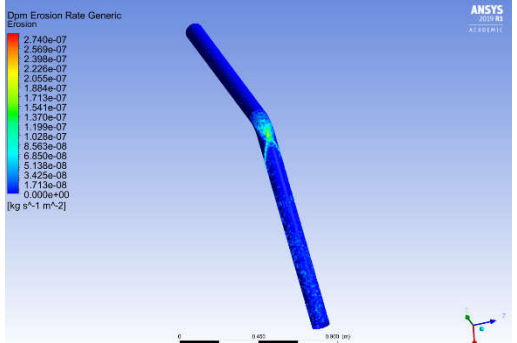
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
17	20 m/s	0,25 kg/s	 <p> <b>Dpm Erosion Rate Generic</b>  <b>Erosion</b>            2.579e-07            2.419e-07            2.257e-07            2.096e-07            1.934e-07            1.773e-07            1.612e-07            1.451e-07            1.290e-07            1.129e-07            9.672e-08            8.066e-08            6.449e-08            4.836e-08            3.224e-08            1.612e-08            0.000e+00            [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]         </p>
18	20 m/s	0,32 kg/s	 <p> <b>Dpm Erosion Rate Generic</b>  <b>Erosion</b>            3.343e-07            3.134e-07            2.925e-07            2.716e-07            2.507e-07            2.298e-07            2.089e-07            1.881e-07            1.672e-07            1.463e-07            1.254e-07            1.045e-07            8.359e-08            6.268e-08            4.179e-08            2.089e-08            0.000e+00            [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]         </p>

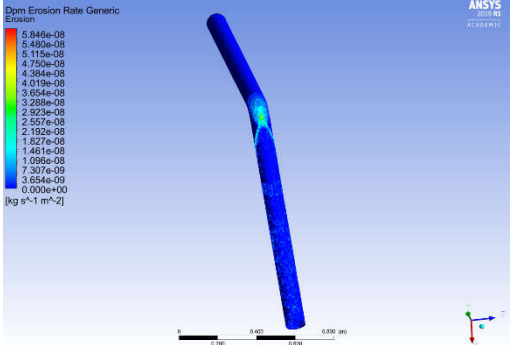
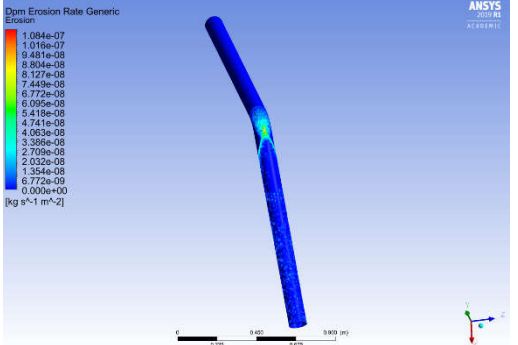
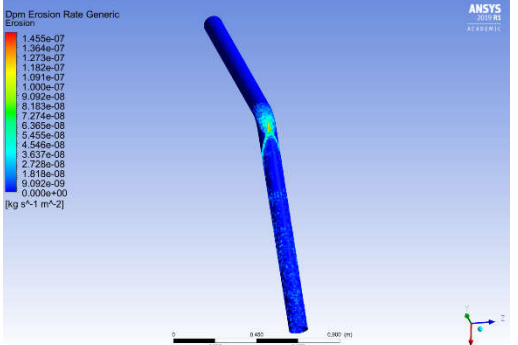
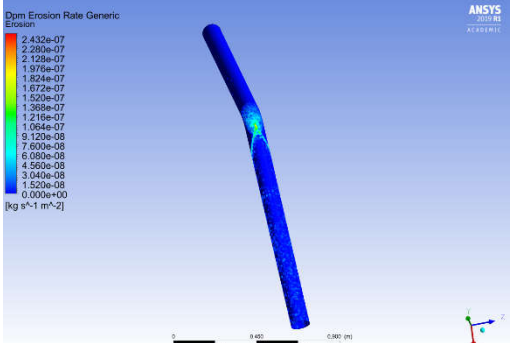
## Kontur Pada Pipa Sudut Belok 45<sup>0</sup> Dengan Diameter Partikel 0,0015 m

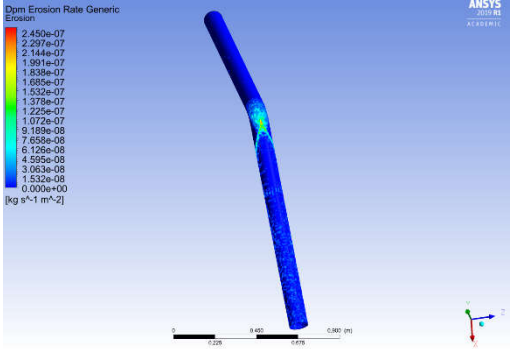
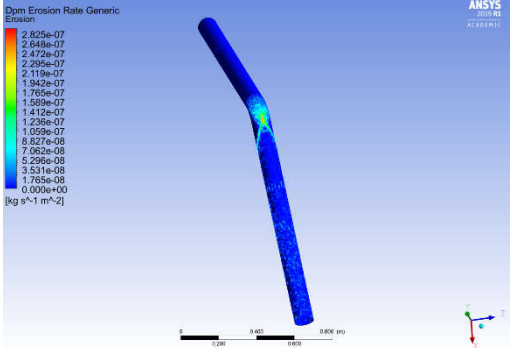
No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
1	11 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R1</p> <p>4.890e-08 4.575e-08 4.270e-08 3.965e-08 3.660e-08 3.355e-08 3.050e-08 2.745e-08 2.440e-08 2.135e-08 1.830e-08 1.525e-08 1.220e-08 9.149e-09 6.100e-09 3.050e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
2	11 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R1</p> <p>9.483e-08 8.890e-08 8.297e-08 7.705e-08 7.112e-08 6.519e-08 5.927e-08 5.334e-08 4.741e-08 4.149e-08 3.556e-08 2.963e-08 2.371e-08 1.778e-08 1.185e-08 5.927e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
3	11 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R1</p> <p>1.264e-07 1.185e-07 1.107e-07 1.027e-07 9.479e-08 8.689e-08 7.899e-08 7.109e-08 6.319e-08 5.529e-08 4.739e-08 3.949e-08 3.159e-08 2.370e-08 1.580e-08 7.899e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
4	11 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2021 R1</p> <p>1.561e-07 1.464e-07 1.366e-07 1.268e-07 1.171e-07 1.073e-07 9.755e-08 8.782e-08 7.809e-08 6.831e-08 5.855e-08 4.879e-08 3.903e-08 2.927e-08 1.952e-08 9.755e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>



No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
5	11 m/s	0,25 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
6	11 m/s	0,32 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
7	15 m/s	0,08 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
8	15 m/s	0,13 kg/s	<p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACP/PLM</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
9	15 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>1.291e-07 1.210e-07 1.129e-07 1.049e-07 9.681e-08 8.874e-08 8.067e-08 7.251e-08 6.454e-08 5.647e-08 4.840e-08 4.034e-08 3.227e-08 2.420e-08 1.613e-08 8.067e-09 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
10	15 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.024e-07 1.897e-07 1.771e-07 1.644e-07 1.518e-07 1.391e-07 1.265e-07 1.138e-07 1.012e-07 8.854e-08 7.599e-08 6.324e-08 5.059e-08 3.794e-08 2.539e-08 1.255e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
11	15 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.052e-07 1.924e-07 1.795e-07 1.667e-07 1.539e-07 1.411e-07 1.282e-07 1.154e-07 1.025e-07 8.977e-08 7.695e-08 6.412e-08 5.130e-08 3.847e-08 2.565e-08 1.282e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
12	15 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1</p> <p>2.740e-07 2.569e-07 2.399e-07 2.228e-07 2.055e-07 1.884e-07 1.713e-07 1.541e-07 1.370e-07 1.199e-07 1.028e-07 8.563e-08 6.850e-08 5.138e-08 3.425e-08 1.713e-08 0.000e+00</p> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
13	20 m/s	0,08 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACADEMIC</p> <p>5.846e-08 5.480e-08 5.115e-08 4.750e-08 4.384e-08 4.019e-08 3.654e-08 3.289e-08 2.923e-08 2.557e-08 2.192e-08 1.827e-08 1.461e-08 1.096e-08 7.307e-09 3.654e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
14	20 m/s	0,13 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACADEMIC</p> <p>1.094e-07 1.018e-07 9.481e-08 8.804e-08 8.127e-08 7.449e-08 6.772e-08 6.095e-08 5.418e-08 4.741e-08 4.063e-08 3.386e-08 2.709e-08 2.032e-08 1.354e-08 6.772e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
15	20 m/s	0,17 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACADEMIC</p> <p>1.455e-07 1.359e-07 1.273e-07 1.182e-07 1.091e-07 1.000e-07 9.092e-08 8.183e-08 7.274e-08 6.365e-08 5.456e-08 4.546e-08 3.637e-08 2.728e-08 1.818e-08 9.092e-09 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
16	20 m/s	0,21 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <p>ANSYS 2020 R1 ACADEMIC</p> <p>2.432e-07 2.280e-07 2.129e-07 1.976e-07 1.824e-07 1.672e-07 1.520e-07 1.368e-07 1.216e-07 1.064e-07 9.120e-08 7.600e-08 6.080e-08 4.560e-08 3.040e-08 1.520e-08 0.000e+00 [kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

No	Velocity	Flowrate	Hasil Simulasi
17	20 m/s	0,25 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2.450e-07</li> <li>2.297e-07</li> <li>2.144e-07</li> <li>1.991e-07</li> <li>1.838e-07</li> <li>1.685e-07</li> <li>1.532e-07</li> <li>1.379e-07</li> <li>1.225e-07</li> <li>1.072e-07</li> <li>9.189e-08</li> <li>7.656e-08</li> <li>6.123e-08</li> <li>4.590e-08</li> <li>3.053e-08</li> <li>1.532e-08</li> <li>0.000e+00</li> </ul> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>
18	20 m/s	0,32 kg/s	 <p>Dpm Erosion Rate Generic Erosion</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2.925e-07</li> <li>2.648e-07</li> <li>2.472e-07</li> <li>2.295e-07</li> <li>2.119e-07</li> <li>1.942e-07</li> <li>1.765e-07</li> <li>1.589e-07</li> <li>1.412e-07</li> <li>1.236e-07</li> <li>1.059e-07</li> <li>8.827e-08</li> <li>7.052e-08</li> <li>5.276e-08</li> <li>3.531e-08</li> <li>1.755e-08</li> <li>0.000e+00</li> </ul> <p>[kg s<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>]</p>

## **NILAI LAJU EROSI HASIL SIMULASI ANSYS FLUENT**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

**Tabel Nilai Laju Erosi Hasil Simulasi**

No	Elbow (°)	Diameter Partikel (µm)	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/kg)	Laju Erosi (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
1	90	300	11	0.08	6.62E-08	1.05E-07	0.261	13.73
2	90	300	11	0.13	1.07E-07	1.03E-07	0.422	8.50
3	90	300	11	0.17	1.40E-07	1.03E-07	0.553	6.50
4	90	300	11	0.21	1.75E-07	1.04E-07	0.691	5.20
5	90	300	11	0.25	2.07E-07	1.04E-07	0.817	4.39
6	90	300	11	0.32	2.65E-07	1.04E-07	1.046	3.43
7	90	300	15	0.08	8.10E-08	1.27E-07	0.320	11.22
8	90	300	15	0.13	1.43E-07	1.38E-07	0.564	6.36
9	90	300	15	0.17	1.74E-07	1.28E-07	0.687	5.23
10	90	300	15	0.21	2.31E-07	1.38E-07	0.912	3.94
11	90	300	15	0.25	2.74E-07	1.37E-07	1.081	3.32
12	90	300	15	0.32	3.45E-07	1.35E-07	1.362	2.64
13	90	300	20	0.08	1.10E-07	1.73E-07	0.436	8.23
14	90	300	20	0.13	1.71E-07	1.65E-07	0.675	5.32
15	90	300	20	0.17	2.30E-07	1.69E-07	0.908	3.95
16	90	300	20	0.21	2.91E-07	1.74E-07	1.150	3.12
17	90	300	20	0.25	3.65E-07	1.83E-07	1.441	2.49
18	90	300	20	0.32	4.15E-07	1.62E-07	1.638	2.19
19	90	150	11	0.08	5.70E-08	8.92E-08	0.225	15.95
20	90	150	11	0.13	1.00E-07	9.63E-08	0.395	9.10
21	90	150	11	0.17	1.33E-07	9.79E-08	0.525	6.84
22	90	150	11	0.21	1.70E-07	1.01E-07	0.671	5.35
23	90	150	11	0.25	2.00E-07	1.00E-07	0.789	4.55
24	90	150	11	0.32	2.59E-07	1.01E-07	1.022	3.51
25	90	150	15	0.08	7.80E-08	1.22E-07	0.308	11.65
26	90	150	15	0.13	1.25E-07	1.20E-07	0.493	7.28
27	90	150	15	0.17	1.60E-07	1.18E-07	0.632	5.68
28	90	150	15	0.21	2.16E-07	1.29E-07	0.853	4.21
29	90	150	15	0.25	2.59E-07	1.30E-07	1.022	3.51
30	90	150	15	0.32	3.13E-07	1.22E-07	1.235	2.91
31	90	150	20	0.08	1.05E-07	1.64E-07	0.415	8.66
32	90	150	20	0.13	1.50E-07	1.44E-07	0.592	6.06
33	90	150	20	0.17	2.13E-07	1.57E-07	0.841	4.27

No	Elbow (°)	Diameter Partikel (µm)	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/kg)	Laju Erosi (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
34	90	150	20	0.21	2.75E-07	1.64E-07	1.085	3.31
35	90	150	20	0.25	3.38E-07	1.69E-07	1.334	2.69
36	90	150	20	0.32	3.66E-07	1.43E-07	1.445	2.49
37	45	300	11	0.08	5.06E-08	7.92E-08	0.200	17.96
38	45	300	11	0.13	8.80E-08	8.47E-08	0.347	10.34
39	45	300	11	0.17	1.23E-07	9.06E-08	0.485	7.39
40	45	300	11	0.21	1.60E-07	9.54E-08	0.632	5.68
41	45	300	11	0.25	1.96E-07	9.81E-08	0.774	4.64
42	45	300	11	0.32	2.44E-07	9.54E-08	0.963	3.73
43	45	300	15	0.08	5.48E-08	8.57E-08	0.216	16.59
44	45	300	15	0.13	1.11E-07	1.07E-07	0.438	8.19
45	45	300	15	0.17	1.47E-07	1.08E-07	0.580	6.19
46	45	300	15	0.21	2.05E-07	1.22E-07	0.809	4.44
47	45	300	15	0.25	2.42E-07	1.21E-07	0.954	3.76
48	45	300	15	0.32	2.96E-07	1.16E-07	1.168	3.07
49	45	300	20	0.08	5.94E-08	9.29E-08	0.235	15.30
50	45	300	20	0.13	1.32E-07	1.27E-07	0.521	6.89
51	45	300	20	0.17	1.79E-07	1.32E-07	0.707	5.08
52	45	300	20	0.21	2.26E-07	1.35E-07	0.892	4.02
53	45	300	20	0.25	2.59E-07	1.30E-07	1.022	3.51
54	45	300	20	0.32	3.37E-07	1.32E-07	1.330	2.70
55	45	150	11	0.08	4.50E-08	7.04E-08	0.178	20.20
56	45	150	11	0.13	8.00E-08	7.70E-08	0.316	11.37
57	45	150	11	0.17	1.08E-07	7.95E-08	0.426	8.42
58	45	150	11	0.21	1.41E-07	8.40E-08	0.557	6.45
59	45	150	11	0.25	1.73E-07	8.66E-08	0.683	5.26
60	45	150	11	0.32	1.89E-07	7.39E-08	0.746	4.81
61	45	150	15	0.08	5.20E-08	8.14E-08	0.205	17.48
62	45	150	15	0.13	9.92E-08	9.55E-08	0.392	9.17
63	45	150	15	0.17	1.35E-07	9.94E-08	0.533	6.74
64	45	150	15	0.21	1.92E-07	1.14E-07	0.758	4.74
65	45	150	15	0.25	2.22E-07	1.11E-07	0.876	4.10
66	45	150	15	0.32	2.82E-07	1.10E-07	1.113	3.23
67	45	150	20	0.08	5.82E-08	9.11E-08	0.230	15.62
68	45	150	20	0.13	1.12E-07	1.08E-07	0.442	8.12



No	Elbow (°)	Diameter Partikel (µm)	Kecepatan (m/s)	Mass Flow (kg/s)	Laju Erosi Maks (kg/m <sup>2</sup> s)	Laju Erosi (mm/kg)	Laju Erosi (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
69	45	150	20	0.17	1.48E-07	1.09E-07	0.584	6.15
70	45	150	20	0.21	2.16E-07	1.29E-07	0.853	4.21
71	45	150	20	0.25	2.48E-07	1.24E-07	0.979	3.67
72	45	150	20	0.32	2.96E-07	1.16E-07	1.168	3.07

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

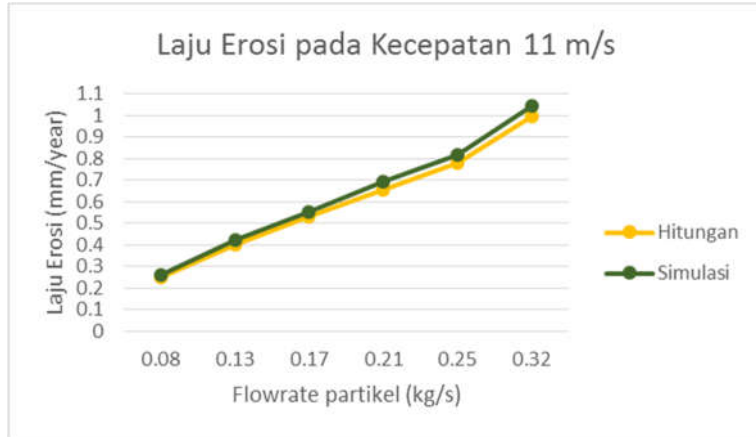
## **GRAFIK LAJU EROSI HASIL SIMULASI ANSYS FLUENT**

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## A. Validasi

### 1. Kecepatan 11 m/s

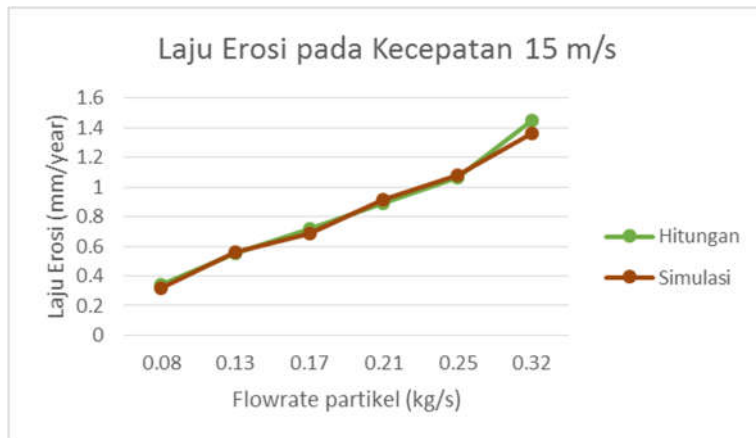
Gambar 1 menunjukkan hasil simulasi ansys dengan hitungan DNV RP O501 pada kecepatan 11 m/s.



Gambar 1. Simulasi Vs Hitungan Kecepatan 11 m/s

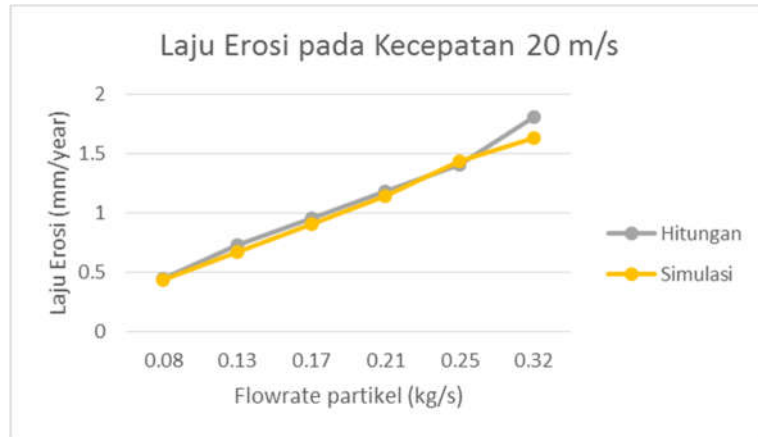
### 2. Kecepatan 15 m/s

Gambar 2 menunjukkan hasil simulasi ansys dengan hitungan DNV RP O501 pada kecepatan 15 m/s.



Gambar 2. Simulasi Vs Hitungan Kecepatan 15 m/s

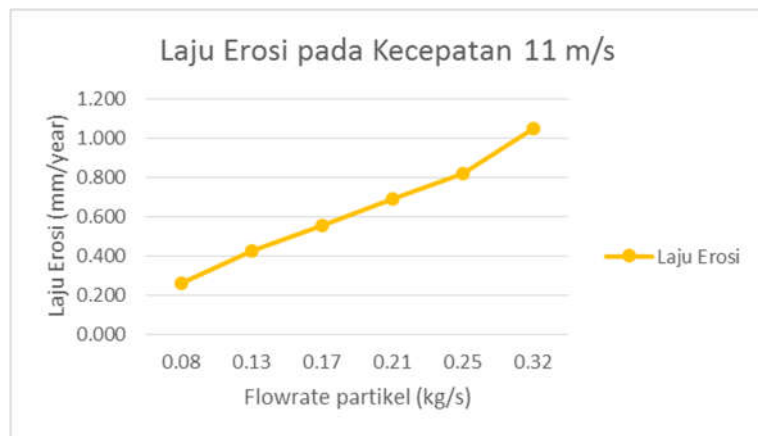
3. Kecepatan 20 m/s  
 Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi ansys dengan hitungan DNV RP O501 pada kecepatan 20 m/s.



Gambar 3. Simulasi Vs Hitungan Kecepatan 20 m/s

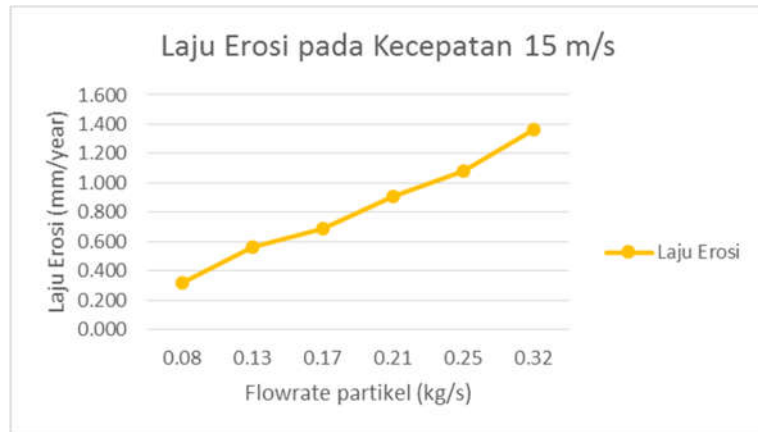
## B. Variasi

1. Elbow 90 diameter 300 kecepatan 11 m/s  
 Gambar 4 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 11 m/s elbow 90°. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



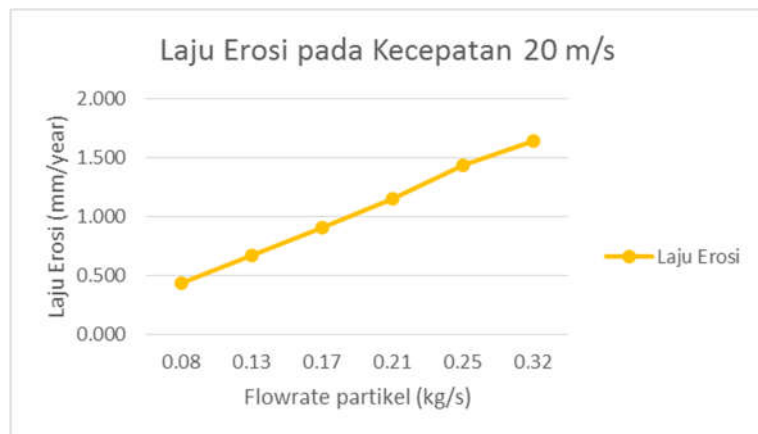
Gambar 4. Laju erosi pada kecepatan 11 m/s

2. Elbow 90 diameter 300 kecepatan 15 m/s  
Gambar 5 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 15 m/s elbow 90<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



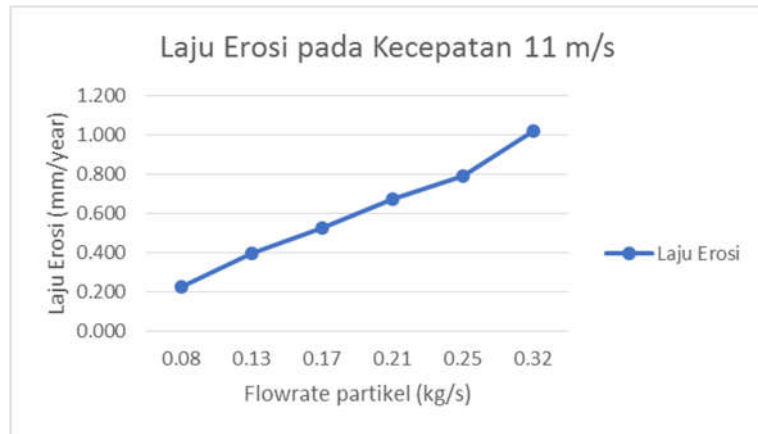
Gambar 5. Laju erosi pada kecepatan 15 m/s

3. Elbow 90 diameter 300 kecepatan 20 m/s  
Gambar 6 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 20 m/s elbow 90<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



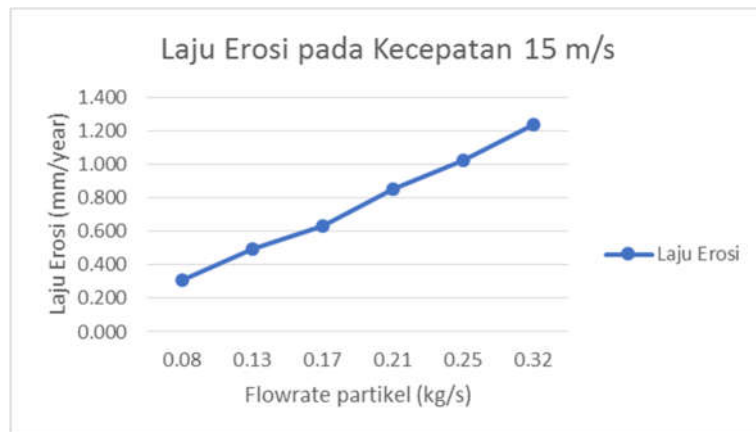
Gambar 6. Laju erosi pada kecepatan 20 m/s

4. Elbow 90 diameter 150 kecepatan 11 m/s  
Gambar 7 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 11 m/s elbow 90<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 7. Laju erosi pada kecepatan 11 m/s

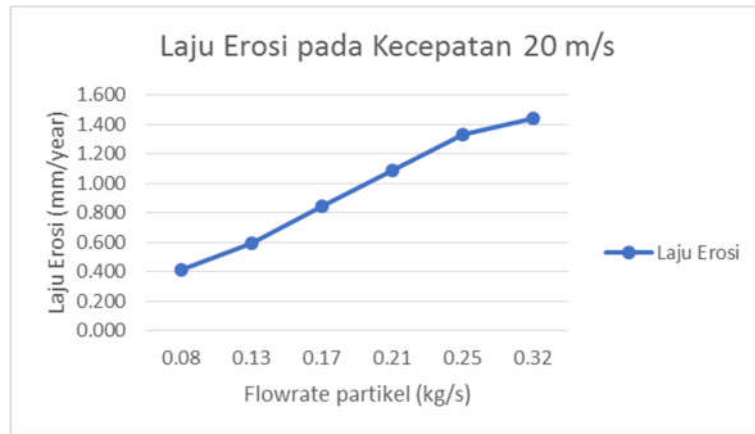
5. Elbow 90 diameter 150 kecepatan 11 m/s  
Gambar 8 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 15 m/s elbow 90<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 8. Laju erosi pada kecepatan 15 m/s



6. Elbow 90 diameter 300 kecepatan 11 m/s  
Gambar 9 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 20 m/s elbow 90<sup>o</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 9. Laju erosi pada kecepatan 20 m/s

7. Elbow 45 diameter 300 kecepatan 11 m/s  
Gambar 10 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 11 m/s elbow 45<sup>o</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



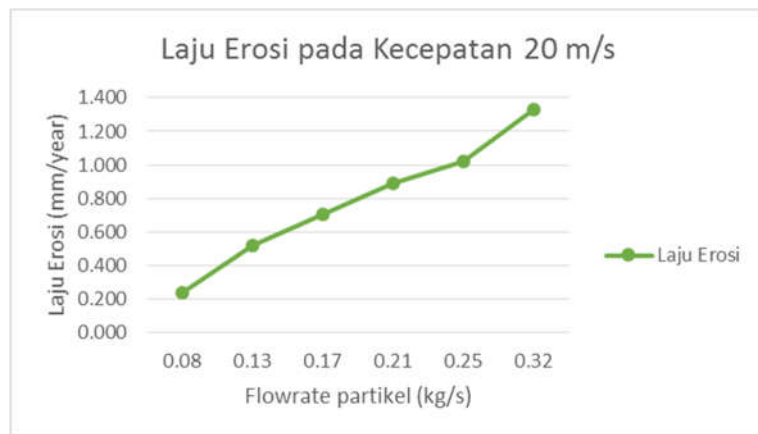
Gambar 10. Laju erosi pada kecepatan 11 m/s

8. Elbow 45 diameter 300 kecepatan 15 m/s  
Gambar 11 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 15 m/s elbow 45<sup>o</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 11. Laju erosi pada kecepatan 15 m/s

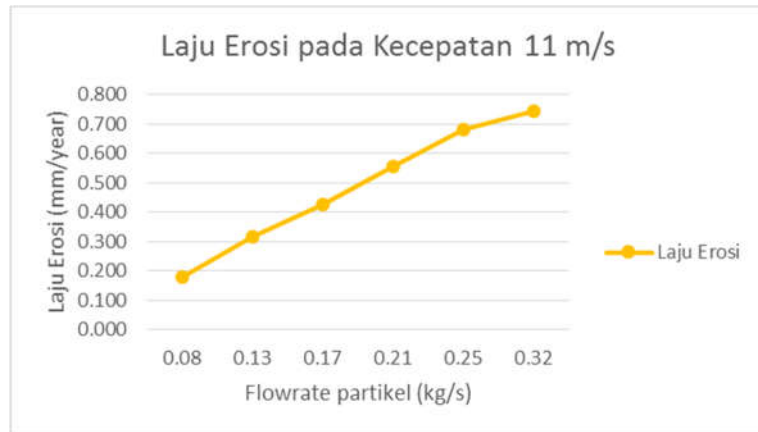
9. Elbow 45 diameter 300 kecepatan 20 m/s  
Gambar 12 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 300  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 20 m/s elbow 45<sup>o</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 12. Laju erosi pada kecepatan 20 m/s

10. Elbow 45 diameter 150 kecepatan 11 m/s

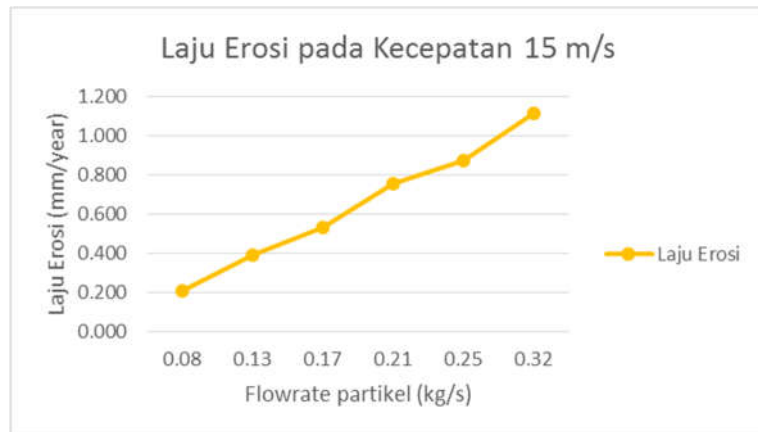
Gambar 13 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 11 m/s elbow 45<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 13. Laju erosi pada kecepatan 11 m/s

11. Elbow 45 diameter 150 kecepatan 15 m/s

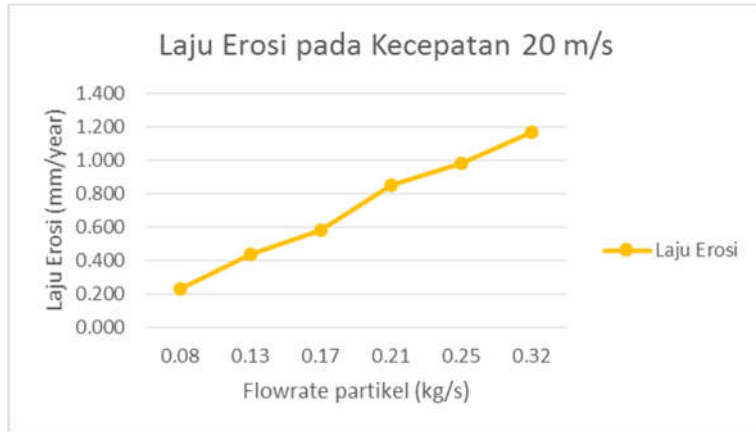
Gambar 14 menunjukkan nilai laju erosi erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 15 m/s elbow 45<sup>0</sup>. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar flowrate maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 14. Laju erosi pada kecepatan 15 m/s

12. Elbow 45 diameter 150 kecepatan 20 m/s

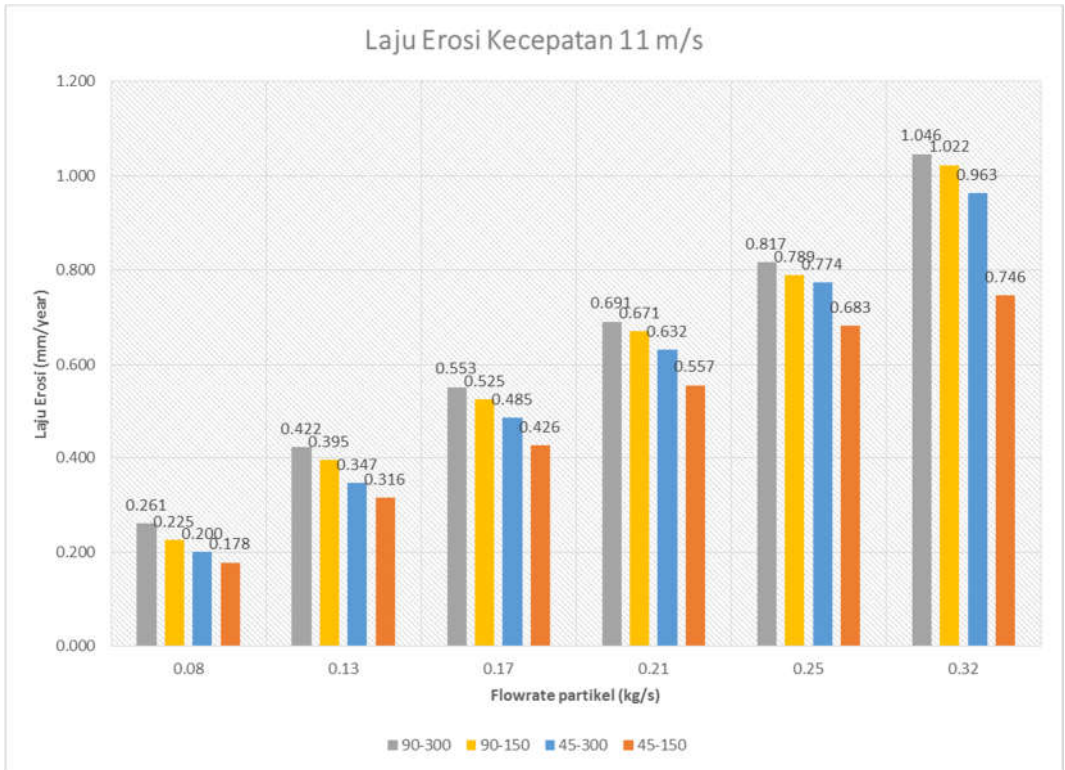
Gambar 15 menunjukkan nilai laju erosi terhadap variasi *flowrate* dengan diameter partikel 150  $\mu\text{m}$  pada kecepatan 20 m/s elbow 45°. Hasil simulasi menunjukkan semakin besar *flowrate* maka laju erosi yang terjadi juga semakin besar.



Gambar 15. Laju erosi pada kecepatan 20 m/s

13. Perbandingan 4 variasi pada kecepatan 11 m/s

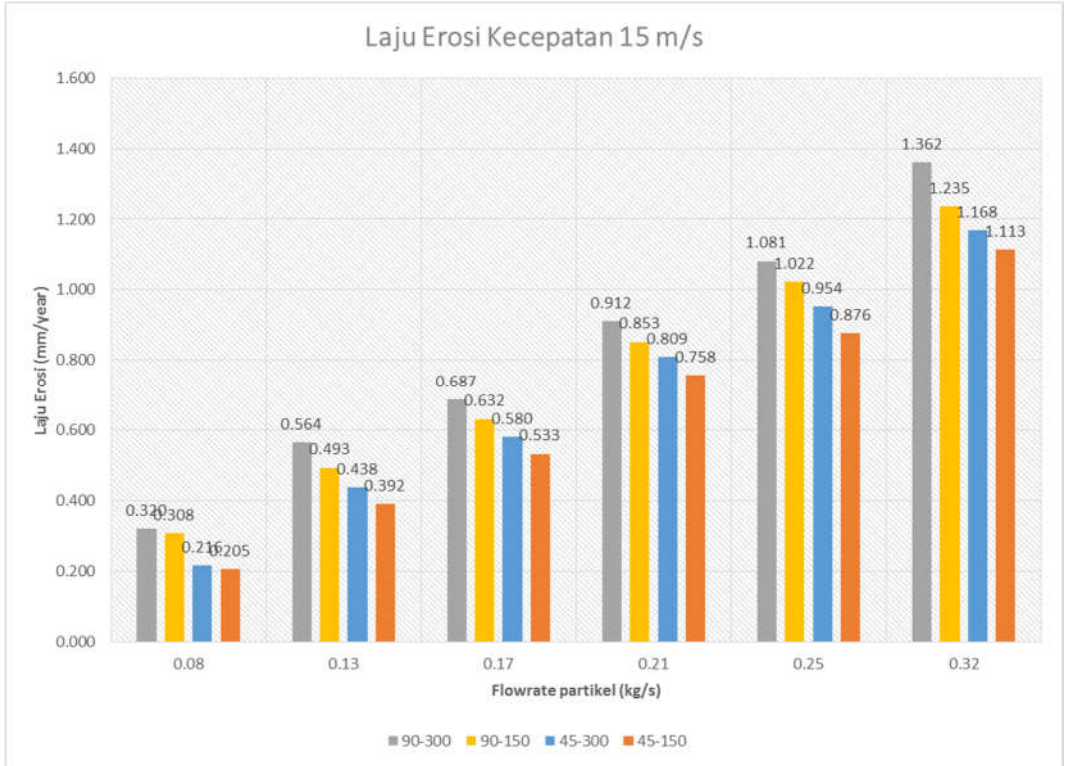
Gambar 16 menunjukkan perbandingan nilai laju erosi pada kecepatan 11 m/s dengan variasi jenis elbow, diameter partikel dan *flowrate* partikel.



Gambar 16. Laju erosi pada kecepatan 11 m/s

14. Perbandingan 4 variasi pada kecepatan 15 m/s

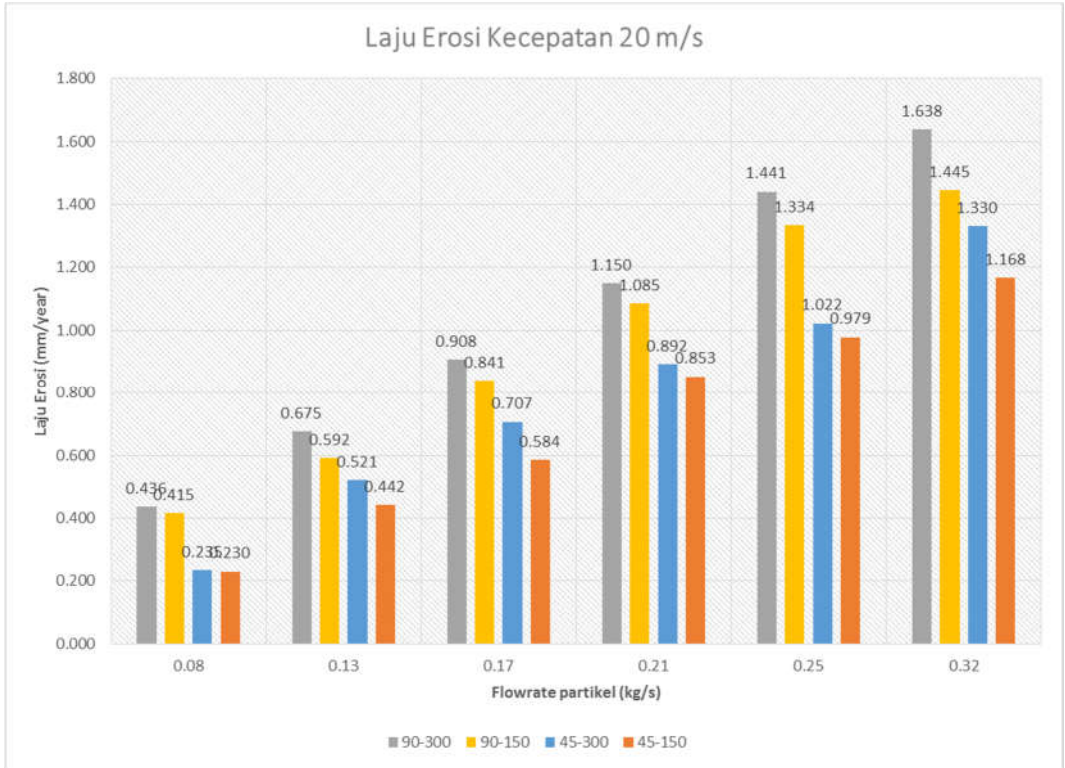
Gambar 17 menunjukkan perbandingan nilai laju erosi pada kecepatan 15 m/s dengan variasi jenis elbow, diameter partikel dan *flowrate* partikel.



Gambar 17. Laju erosi pada kecepatan 15 m/s

15. Perbandingan 4 variasi pada kecepatan 20 m/s

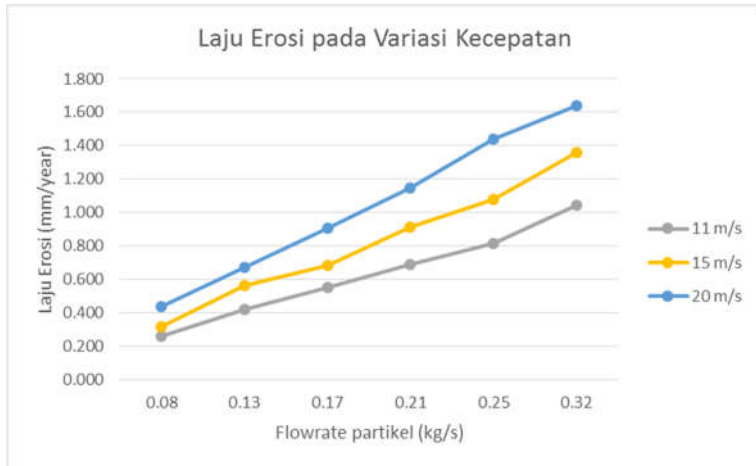
Gambar 18 menunjukkan perbandingan nilai laju erosi pada kecepatan 20 m/s dengan variasi jenis elbow, diameter partikel dan *flowrate* partikel.



Gambar 18. Laju erosi pada kecepatan 20 m/s

16. Grafik Variasi Kecepatan

Gambar 19 menunjukkan perbandingan nilai laju erosi pada 3 variasi kecepatan yaitu 11 m/s, 15 m/s dan 20 m/s.



Gambar 19. Laju erosi pada 3 variasi kecepatan



## BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Banyuwangi pada tanggal 27 November 1997, dianugrahi nama Linggar Rhodam Krisnanda. Penulis merupakan anak tunggal dari orang tua Sukarji dan Puspowati. Menempuh pendidikan mulai dari SDN 1 Sumberbulu (*lulus tahun 2009*), SMPN 1 Genteng (*lulus tahun 2012*), SMAN 1 Genteng (*lulus tahun 2015*) dan hingga akhirnya dapat menempuh pendidikan di Departemen Teknik Sistem Perkapalan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjalani masa kuliah, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Jurusan Teknik Sistem Perkapalan (HIMASISKAL) periode tahun 2016-2017 sebagai staff Kesejahteraan Mahasiswa (KESMA) dan penulis juga aktif di organisasi Paguyubab Beasiswa KSE ITS sebagai staff *Entrepreneur* pada tahun 2016-2017. Pada tahun ke-empat penulis menjadi anggota dari laboratorium *Marine Machinery and System* (MMS). Sedangkan pengalaman kerja praktek didapatkan di dua perusahaan dengan masing-masing fokus yang berbeda, yaitu di PT. Dumas Tanjung Perak Shipyards dan PT. Minarak Brantas Gas. Selain itu dalam menunjang kehidupan kampus, penulis juga turut serta dalam tim project dari Ir. Dwi Priyanta, M.SE selaku dosen di Teknik Sistem Perkapalan sebagai *Research Assistant*. Project yang dikerjakan diantaranya *Pipeline Risk Assessment*, *Pipeline Monitoring* dan *Risk Based Inspection* (RBI).

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 ***“Analisa Laju Erosi Pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir Dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD”***