

Analisa Laju Erosi pada Elbow Pipa Karena Partikel Pasir dalam Aliran Fluida Gas Menggunakan Simulasi CFD

Linggar Rhodam Krisnanda, Agoes Santoso, dan Taufik Fajar Nugroho
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: agoes@siskal.its.ac.id, tfnugroho@siskal.its.ac.id

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° nilai laju erosi lebih besar dibandingkan dengan elbow pipa 45°. Nilai remaining life berbanding terbalik dengan nilai laju erosi yang terjadi pada elbow pipa.

Kata Kunci—Erosi, Partikel Pasir, Elbow, CFD, Multi fase.

I. PENDAHULUAN

KECUKUPAN kebutuhan energi dunia saat ini kebanyakan masih bergantung dari energi fosil yang tidak dapat diperbarui. 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 korosi eksternal dengan 119 kejadian dan disusul oleh korosi internal dengan 94 kejadian [1]. 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 resiko pada peralatan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diharapkan untuk dapat memprediksi erosi secara akurat [2].

Pendistribusian partikel dengan melewati elbow cenderung membuat penipisan pada dinding pipa karena partikel akan secara langsung menumbuk dinding pipa yang disebut dengan erosi [3]. 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 dengan software CFD yang perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas [4]. Tujuan dari CFD adalah untuk memprediksi secara akurat tentang aliran fluida, perpindahan panas dan reaksi kimia dalam sistem yang kompleks [5].

II. METODE PENELITIAN

A. Pendahuluan

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 [6]. 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 [7].

B. 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. 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 [8].

C. 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. Clark mencantumkan parameter berikut dimana terbukti sebagai salah satu faktor yang mempengaruhi erosi:

kecepatan impak partikel, sudut impak partikel, ukuran partikel, bentuk partikel, material partikel, sifat fluida, sifat permukaan material dan lainnya [9].

D. 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 [10].

E. 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 dan 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.

5) Meshing

Meshing berfungsi sebagai pembagi control volume geometri menjadi elemen yang lebih kecil dan halus dengan tujuan mendapatkan hasil yang lebih konvergen pada analisa.

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.

7) Validasi Hasil Permodelan

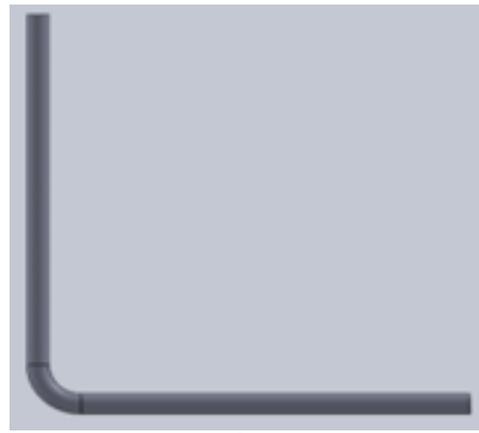
Hasil perhitungan yang telah dilakukan dapat dibandingkan dengan hasil simulasi yang dilakukan. Jika hasil simulasi permodelan hasilnya mendekati dengan hasil perhitungan maka penelitian telah sesuai. Jika tidak sesuai atau hasilnya berbeda jauh, maka permodelan dapat diperbaiki.

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



Gambar. 1. Permodelan elbow 90°

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.

F. Data Material Elbow Pipa dan Fluida

Biasanya Elbow pipa yang digunakan sebagai objek simulasi erosi memiliki dimensi sebagai berikut:

- Material Pipa : ASTM A 106
- Diameter Luar : 4.5 inch
- Ketebalan pipa : 4.2 mm
- Konstanta material : 2.0×10^{-9}
- Massa jenis partikel: 2650 kg/m^3
- Massa Jenis Gas : 1.225 kg/m^3
- Viskositas Gas : $1.8e^{-05} \text{ kg/ms}$
- Kecepatan Aliran : 11 m/s
- Flowrate partikel : 0.08 kg/s
- Diameter partikel : 300 μm

G. Komputasi Dinamika Fluida

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas. 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. Akhirnya, hasil yang diperoleh akan disajikan dalam bentuk warna, vektor dan nilai-nilai yang mudah dilihat dengan konfigurasi rentang yang diambil dari nilai terbesar dan terkecil. Secara umum, proses perhitungan CFD terdiri dari 3 bagian utama:

1) Pre-Processing

Tahap dimana data dimasukkan mulai dari mendefinisikan domain dan menentukan kondisi batas. Pada tahap ini, suatu objek akan dibagi dengan sejumlah grid atau sering disebut dengan meshing.

2) Processing

Pada tahap ini proses penghitungan data input dilakukan dengan persamaan yang terlibat secara iteratif. Ini berarti bahwa perhitungan dilakukan hingga hasilnya mengarah pada kesalahan terkecil atau untuk mencapai nilai konvergen.

Perhitungan dilakukan secara menyeluruh pada kontrol volume dengan proses integrasi persamaan diskrit.

3) *Post-Processing*

Tahap terakhir dimana hasil perhitungan diinterpretasikan ke dalam gambar, grafik dan bahkan animasi dengan pola warna tertentu. Post-prosesor semakin berkembang dengan kemajuan workstation teknik yang memiliki kemampuan grafis dan visualisasi yang cukup besar.

H. *Meshing*

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.

I. *Kondisi Batas*

D Inlet

Velocity : 11 m/s, 15 m/s dan 20 m/s

Viscous : Laminar

DPM : Escape

Injection : Sand (d=0,0003 & 0,00015 m)

Flowrate (0,08 – 0,32 kg/s)

Outlet

Gauge Press : 0 Pa (Constant)

DPM : Escape

Wall

Smooth Wall

No-slip

DPM : Reflect

J. *Perhitungan*

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

1) *Menghitung karakteristik sudut impact (α)*

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

dimana: R_{curv} = jumlah diameter pipa

2) *Menghitung grup parameter tanpa dimensi*

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

dimana:

ρ_m^2 = berat jenis gas (kg/m³)

D = Diameter dalam (m)

ρ_p = Berat jenis partikel pasir (kg/m³)

μ_m = Viskositas gas (kg/ms)

3) *Menggunakan dimensionless parameter group*

$$\gamma_c = \frac{\rho_m}{\rho_p \cdot [1,88 \cdot \ln(A) - 6,04]} \quad (3)$$

dimana:

ρ_p = Berat jenis partikel pasir (kg/m³)

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

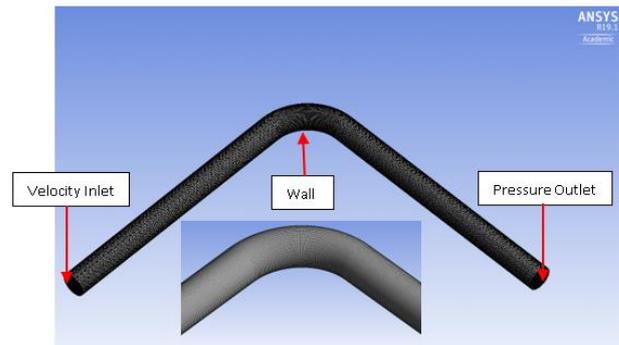
$$G = \frac{\gamma}{\gamma_c} \quad (4)$$

5) *Menghitung karakteristik lengkungan pipa yang terkena erosi*

$$A = \frac{\pi D^2}{4 \cdot \sin(\alpha)} \quad (5)$$

6) *Menghitung nilai karakteristik elastisitas material*

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



Gambar. 2. Detail meshing elbow pipa

Tabel 1. Nilai constant ratio untuk berbagai kombinasi pasangan Detail Mesh

Detail Mesh	
Relevance Centre	Fine
Smoothing	Medium
Element Size	3,8E-003
Nodes	462984
Elements	439230

1. Faktor model/geometri
 $C_1 = 2.5$
2. Konversi factor (m/s -> mm/year)
 $C_{unit} = 3.15E+10$
3. Laju Erosi [11]

$$E_L = \frac{m_p \cdot K \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) \cdot U_p}{\rho_t \cdot A_{pipe}} \cdot G \cdot C_1 \cdot C_{unit} \quad (7)$$

Dimana:

EL = Laju erosi (mm/tahun)

mp = Massa aliran partikel pasir (kg/s)

K = Konstanta material pipa

F(α) = Karakteristik elastisitas material

Up = Kecepatan tumbukan partikel pasir (m/s)

G = Fungsi koreksi diameter partikel pasir

C1 = Faktor model/geometri (2.5)

Cunit = unit konversi dari m/s ke mm/tahun

ρ_t = Berat jenis material (kg/m³)

A_{pipe} = Area penampang pipa (m²)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. *Model Aliran dan Perhitungan Erosi*

Simulasi aliran dari fluida kontinu (continuous fluid) merupakan tahap pertama dari prosedur prediksi erosi berbasis CFD. FLUENT menggunakan pendekatan finite volume untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes. Hal pertama untuk mensimulasikan aliran adalah membuat daerah kalkulasi geometri (meshing).

Pengaturan solusi seperti kondisi batas inlet berupa input kecepatan sedangkan kondisi outlet berupa input pressure. Efek gravitasi dianggap sama dalam semua simulasi (9.8 m/s²). Kecepatan aliran bervariasi dari 11 m/s sampai 20 m/s.

Partikel mendapatkan gaya momentum dari fluida yang ada, dan fluida tersebut melewati jalur aliran dan memberi

Tabel 6.
Nilai laju erosi pada variasi elbow

No	Elbow (°)	Mass Flow (kg/s)	Diameter Partikel (µm)	Maksimum Erosion rate (kg/m ² s)	Erosion rate (mm/tahun)
1	90	0,08	300	6,62E-08	0,261
2	90	0,13	300	1,07E-07	0,422
3	90	0,17	300	1,40E-07	0,553
4	90	0,21	300	1,75E-07	0,691
5	90	0,25	300	2,07E-08	0,817
6	90	0,32	300	2,65E-07	1,046
7	45	0,08	150	5,06E-08	0,200
8	45	0,13	150	8,80E-08	0,347
9	45	0,17	150	1,23E-07	0,485
10	45	0,21	150	1,60E-07	0,632
11	45	0,25	150	1,96E-07	0,774
12	45	0,32	150	2,44E-07	0,963

Tabel 7.
Nilai remaining life

No	Mass Flow (kg/s)	Diameter Partikel (µm)	Maksimum Erosion rate (kg/m ² s)	Erosion rate (mm/tahun)	Remaining Life (tahun)
1	0,08	300	6,62E-08	0,261	13,73
2	0,13	300	1,07E-07	0,422	8,50
3	0,17	300	1,40E-07	0,553	6,50
4	0,21	300	1,75E-07	0,691	5,20
5	0,25	300	2,07E-08	0,817	4,39
6	0,32	300	2,65E-07	1,046	3,43
7	0,08	150	5,70E-08	0,225	15,95
8	0,13	150	1,00E-07	0,395	9,10
9	0,17	150	1,33E-07	0,525	6,84
10	0,21	150	1,70E-07	0,671	5,35
11	0,25	150	2,00E-07	0,789	4,55
12	0,32	150	2,59E-07	1,022	3,15

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

$$Laju\ Erosi\ \left[\frac{mm}{kg}\right] = \left(\frac{Laju\ erosi\ \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right] \cdot 10^3}{Densitas\ \left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot Flow\ rate\ \left[\frac{kg}{s}\right]}\right) \quad (8)$$

$$Laju\ Erosi\ \left[\frac{mm}{tahun}\right] = (Laju\ Erosi\ \left[\frac{mm}{kg}\right] \cdot flowrate\ \left[\frac{kg}{tahun}\right]) \quad (9)$$

B. Evaluasi Erosi CFD dan Perhitungan

Dengan kondisi profil kecepatan fluida dan jalur partikel pasir yang telah diselesaikan, kontur erosi dapat dilihat pada gambar 3. Pada tabel 2 ditunjukkan perbedaan laju erosi hasil perhitungan dengan simulasi.

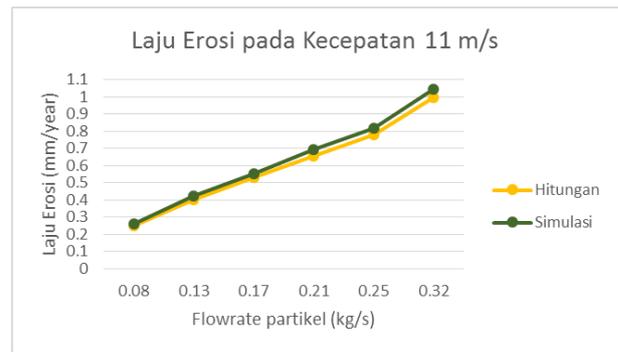
Menurut MAPE (*Mean Absolut Percentage Error*) yang merupakan rata-rata kesalahan selisih antara nilai actual dengan nilai percobaan, apabila terjadi selisih kurang dari 10% maka suatu percobaan tersebut dikatakan sangat akurat [12].

Gambar 4 menunjukkan nilai laju erosi dari hasil perhitungan dibandingkan dengan nilai laju erosi dari hasil simulasi.

Pada penelitian ini dilakukan 4 variasi, yaitu:

1) Variasi Flowrate

Variasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai laju erosi yang disebabkan karena banyaknya flowrate partikel pasir. Dalam percobaan ini dilakukan 6 variasi flowrate, yaitu pada



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

Tabel 3.
Nilai laju erosi pada variasi flowrate

No	Mass Flow (kg/s)	V (m/s)	Maksimum Erosion rate (kg/m ² s)	Erosion rate (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

Tabel 4.
Nilai laju erosi pada variasi kecepatan

No	Mass Flow (kg/s)	V (m/s)	Maksimum Erosion rate (kg/m ² s)	Erosion rate (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	0,08	15	8,10E-08	0,320
6	0,13	15	1,43E-07	0,564
7	0,17	15	1,74E-07	0,687
8	0,21	15	2,31E-07	0,912
9	0,08	20	1,10E-07	0,436
10	0,13	20	1,71E-07	0,675
11	0,17	20	2,30E-07	0,908
12	0,21	20	2,91E-07	1,150

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 µm. Pada tabel 3 menunjukkan laju erosi karena variasi flowrate partikel pasir. Dari hasil simulasi didapatkan laju erosi terbesar terjadi pada flowrate 0,32 kg/s yaitu 2,65e⁻⁰⁷ kg/m²s, nilai tersebut akan dikonversi menjadi mm/tahun. 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 pula laju erosinya.

2) Variasi Kecepatan

Variasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai laju erosi yang disebabkan karena perbedaan kecepatan partikel pasir. Dalam percobaan ini dilakukan 3 variasi kecepatan, yaitu pada kecepatan 11 m/s, 15 m/s dan 20 m/s dengan diameter partikel 300 µm. Pada tabel 4 menunjukkan laju erosi karena variasi kecepatan partikel pasir. Dari hasil simulasi didapatkan laju erosi terbesar terjadi pada flowrate 20 m/s yaitu 2,91e⁻⁰⁷ kg/m²s, nilai tersebut akan dikonversi menjadi mm/tahun. Kecepatan partikel berbanding lurus terhadap laju erosi pada flowrate yang sama. Semakin tinggi kecepatan partikel pasir dalam aliran fluida gas maka semakin tinggi pula laju erosinya.

Gambar 5 menunjukkan perbandingan nilai laju erosi pada variasi kecepatan.

3) Variasi Diameter Partikel

Variasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai laju erosi yang disebabkan karena perbedaan diameter partikel pasir. Dalam percobaan ini dilakukan 2 variasi ukuran diameter partikel pasir, yaitu diameter partikel 300 µm dan 150 µm. Setelah melakukan simulasi akan didapatkan data berupa nilai laju erosi pada elbow pipa. Pada tabel 5 menunjukkan laju erosi karena variasi diameter partikel pasir. Dari hasil simulasi didapatkan laju erosi terbesar terjadi pada diameter 0,003 m yaitu $2,65e^{-07}$ kg/m²s, nilai tersebut akan dikonversi menjadi mm/tahun. besar diameter partikel berbanding lurus terhadap laju erosi. Semakin besar diameter partikel pasir dalam aliran fluida gas maka semakin tinggi pula laju erosinya.

4) Variasi Elbow

Variasi Variasi ini bertujuan untuk mengetahui nilai laju erosi yang disebabkan karena sudut belok elbow. Dalam percobaan ini dilakukan 2 variasi elbow, yaitu elbow 90⁰ dan elbow 45⁰. Pada tabel 6 menunjukkan laju erosi pada elbow sudut 90⁰ dan 45⁰. Dari hasil simulasi didapatkan laju erosi terbesar terjadi pada elbow 90⁰ yaitu $2,65e-07$ kg/m²s, nilai tersebut akan dikonversi menjadi mm/tahun. Tabel 6. Nilai laju erosi terhadap variasi elbow. nilai laju erosi yang terjadi pada elbow 90⁰ lebih besar dibandingkan dengan laju erosi yang terjadi pada elbow 45⁰.

C. Remaining Life

Remaining life merupakan sisa umur suatu peralatan untuk di operasikan. Nilai remining life dapat diketahui dengan rumus berikut:

$$RL = \frac{Ta-Tr}{Cr} \quad (10)$$

Dimana:

- RL : Sisa umur pipa (tahun)
- Ta : Tebal aktual pipa (mm)
- Tr : Tebal required (mm)
- Cr: Laju korosi (mm/tahun)

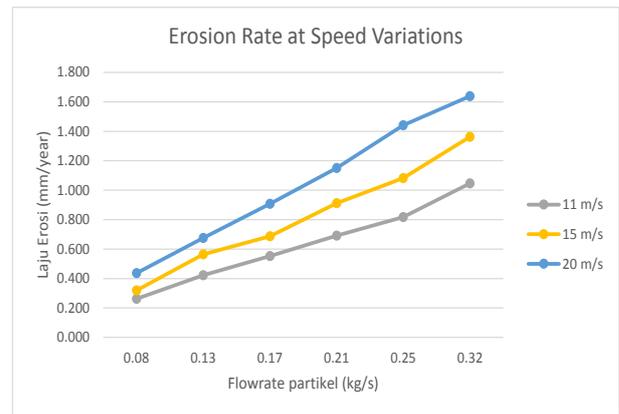
Pada tabel 7 menunjukkan nilai remaining life pada elbow pipa. Nilai remaining life berbanding terbalik dengan laju erosi, dimana elbow pipa yang mempunyai laju erosi besar akan mempunyai remaining life yang semakin kecil.

IV. KESIMPULAN

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 90⁰ 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.

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 90⁰ dengan kecepatan partikel pasir 11 m/s pada diameter partikel 300 µm dan 150 µm mengalami laju erosi masing 1,046 mm/tahun dan 1,022 mm/tahun.

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 90⁰ dengan kecepatan partikel pasir 11 m/s, 15 m/s dan 20



Gambar. 5. Grafik perbandingan laju erosi pada variasi kecepatan

Tabel 5. Nilai laju erosi pada variasi diameter partikel

No	Mass Flow (kg/s)	Diameter Partikel (µm)	Maksimum Erosion rate (kg/m ² s)	Erosion rate (mm/tahun)
1	0,08	300	6,62E-08	0,261
2	0,13	300	1,07E-07	0,422
3	0,17	300	1,40E-07	0,553
4	0,21	300	1,75E-07	0,691
5	0,25	300	2,07E-08	0,817
6	0,32	300	2,65E-07	1,046
7	0,08	150	5,70E-08	0,225
8	0,13	150	1,00E-07	0,395

m/s mengalami laju erosi masing-masing 0,261 mm/tahun, 0,320 mm/tahun dan 0,436 mm/tahun.

Nilai laju erosi yang terjadi pada elbow 90⁰ lebih besar dibandingkan laju erosi yang terjadi pada elbow 45⁰. Hal ini dibuktikan melalui simulasi pada sudut belok 90⁰ mengalami laju erosi 0,261 mm/tahun dan pada sudut belok 45⁰ mengalami laju erosi 0,200 mm/tahun.

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 90⁰ kecepatan 11 m/s, dimater partikel 300 µm 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.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Restrepo, "United State of America," 2008.
- [2] I. Yudhatama, "Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) Erosi Partikel Pasir dalam Aliran Fluida Gas Turbulen pada Elbow Pipa Vertikal-Horizontal," 2018.
- [3] Y. C. Surbakti, "Analisa Laju Korosi Pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Baja Galvanis dengan Metode Kehilangan berat," Jul. 2017.
- [4] O. Zikanov, *Essential computational fluid dynamics*. Wiley, 2010.
- [5] A. R. Rahmat, "Analisis Desain Baling-Baling Gottingen 428 Airfoil Turbin dengan Metode Komputasi Fluid Dinamika Cairan pada Pembangkit Listrik Vortex Air Gravitasi," *Dep. Tek. Sist. Perkapalan ITS, Surabaya*, 2019.
- [6] B. McLaury, S. Shirazi, ... J. S.-A.-P., and undefined 1996, "Modeling erosion in chokes," *ASME*.
- [7] A. Mansouri, Mansouri, and Amir, "A combined CFD-experimental method for developing an erosion equation for both gas-sand and liquid-sand flows," *PhDT*, 2016.
- [8] I. Finnie, "Erosion of surfaces by solid particles," *Wear*, vol. 3, no. 2, pp. 87-103, 1960, doi: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
- [9] H. M. I. Clark, "Particle velocity and size effects in laboratory

- slurry erosion measurements OR... do you know what your particles are doing?," in *Tribology International*, 2002, vol. 35, no. 10, pp. 617–624, doi: 10.1016/S0301-679X(02)00052-X.
- [10] B. Ilmi, "Analisa Laju Erosi Pipa Discharge Slurry Jenis HDPE pada Kapal Keruk Isap (Cutter Suction Dredger) yang beroperasi di Canal Water Intake PLTGU Grati menggunakan Simulasi CFD," *Dep. Tek. Sist. Perkapalan ITS Surabaya*, 2018.
- [11] Det Norske Veritas, "Recommended Practice RP O501 Erosive Wear in Piping Systems Revision 4.2," 2007.
- [12] C. Lewis, "Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting," 1982.