

Simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) Erosi Partikel Pasir dalam Aliran Fluida Gas Turbulen pada Elbow Pipa Vertikal – Horizontal

Ido Widya Yudhatama, Mas Irfan P. Hidayat, dan Wikan Jatimurti

Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: irfan@mat-eng.its.ac.id

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

Kata Kunci—Erosi, Elbow, Partikel Pasir, Computational Fluid Dynamics, Discrete Phase Method.

I. PENDAHULUAN

KEAUSAN yang disebabkan erosi pada pipa bagian produksi dan injeksi merupakan salah satu masalah besar yang dihadapi industri perminyakan dimana konsekuensinya dapat berakibat krusial. Campuran air, minyak, gas, dan partikel pasir yang melalui pipa, dikombinasikan dengan kecepatan dan sifat fluida merupakan sebuah resiko pada peralatan yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diharapkan untuk dapat memprediksi erosi secara akurat [1].

Banyak peneliti tertarik untuk dapat memprediksi secara akurat karakteristik erosi pada berbagai macam geometri dan berbagai kondisi fluida. Beberapa model erosi sederhana tersedia untuk beberapa *fitting* seperti *elbow* dan *tees*. Sebagai contoh, Shirazi [2] dan Salama [3] mengembangkan model erosi sederhana pada lengkungan *elbow*. Pada penelitian lainnya, Wang [4] menggunakan permodelan aliran dan penelusuran partikel (*particle tracking*) untuk mempelajari efek lengkungan *elbow* pada laju erosi. Hampir semua model yang ada saat ini hanya mempertimbangkan erosi sebagai akibat dari tumbukan langsung, sedangkan efek dari fluktuasi turbulen pada erosi *elbow* tidak dipertimbangkan [5].

Harus diakui bahwa seingkali seorang *engineer* hanya tertarik pada lokasi dan laju erosi pada titik maksimum, dimana akan selalu terjadi pada dinding *elbow* yang bertabrakan langsung dengan partikel. Bagaimanapun juga,

banyak situasi yang lebih kompleks terjadi dimana erosi muncul, seperti sebuah *valve* atau *fitting*. Dalam tujuan untuk memprediksi spot erosi pada geometri tersebut, pertama-tama permodelan harus mampu secara akurat memprediksi distribusi erosi dalam geometri yang relatif sederhana seperti sebuah *elbow* [6].

II. METODE PENELITIAN

A. Prosedur Penelitian

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

1. Analisa Permasalahan

Menentukan target hasil dari permodelan yang akan dilakukan dan menganalisa pemilihan tipe model yang tepat untuk kasus peristiwa yang dipilih.

2. Pembuatan Geometri Fluida

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

3. Meshing

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

4. Pengaturan Permodelan

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

5. Pengaturan dan Perhitungan Solusi

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

6. Validasi Hasil Permodelan

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

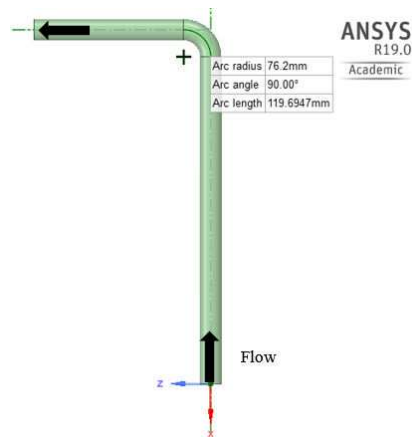
7. Analisa Data dan Pembahasan

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

8. Kesimpulan

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

B. Data Material Elbow Pipa dan Fluida



Gambar 1. Elbow dan skema aliran fluida.

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

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

Sifat Fisik dan Mekanik

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

Kondisi Fluida

Massa Jenis (ρ)	: 1.2 kg/m ³
Viskositas (μ)	: 1.8E-05 kg/ms

C. Variabel Penelitian

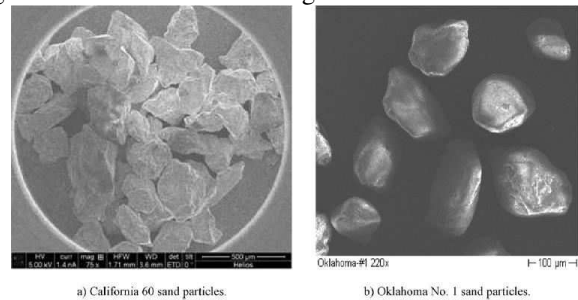
Tabel 1.
Variabel Penelitian

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

D. Data Partikel Pasir

Terdapat dua jenis pasir yang digunakan dalam eksperimen, yaitu California 60 dan Oklahoma. Gambar 2 menunjukkan gambar *Scanning Electron Microscope* (SEM). Dimana pasir California mempunyai sisi yang tajam dengan perkiraan ukuran 300 μm , sedangkan pasir

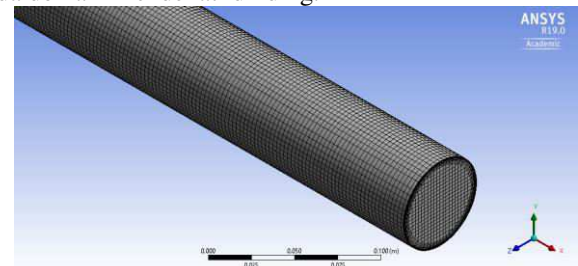
Oklahoma lebih menunjukkan sisi yang bulat dengan perkiraan ukuran 150 μm . Massa jenis dari pasir yang digunakan diasumsikan 2650 kg/m³.



Gambar 2. Partikel yang digunakan untuk eksperimen [7].

E. Meshing

Metode *CutCell* mempunyai keunggulan dimana mempunyai sel domain yang teratur daripada tetra-mesh. Yang selanjutnya dari keteraturan tersebut dapat mempersingkat perhitungan dan konvergensi. Ditambahkan 10 *inflation layer* pada dinding pipa untuk kondisi model turbulen k- ϵ dengan tujuan mendapatkan hasil yang detail pada domain mendekati dinding.



Gambar 3. Hex-mesh dan *inflation layer*.

Detail informasi mesh ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.
Informasi Mesh

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

F. Pre-Proses

Simulasi dikondisikan pada steady state dengan metode solusi SIMPLE. Parameter fluida dan partikel sebagai validasi diberikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3.
Parameter Fluida

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

Tabel 4.
Parameter Partikel

Tipe Injeksi	<i>Surface [Inlet]</i>
Kecepatan	0 [m/s]
Drag Law	<i>Spherical</i>
Distribusi Diameter	<i>Uniform</i>
Massa Jenis	2650 [kg/m ³]
Model Erosi	Oka

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Model Aliran, Pelacakan Partikel, dan Perhitungan Erosi

Simulasi aliran dari fluida kontinu (*continuous fluid*) merupakan tahap pertama dari prosedur prediksi erosi berbasis CFD. FLUENT menggunakan pendekatan *finite volume* untuk menyelesaikan persamaan Navier-Stokes [8]. Hal pertama untuk mensimulasikan aliran adalah membuat daerah kalkulasi geometri (*meshing*). Gambar 1 menunjukkan skema arah aliran fluida yang digunakan untuk mensimulasikan. Dimana pipa mempunyai diameter sudut 76.2 mm.

Pengaturan solusi seperti kondisi batas *inlet* berupa input kecepatan sedangkan kondisi *outlet* berupa input *pressure*. Kondisi batas *no-slip* pada dinding Metode spesifik dipilih berupa energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ε). Efek gravitasi dianggap sama dalam semua simulasi (9.8 m/s^2). Kecepatan aliran bervariasi dari 11 m/s sampai 27 m/s. Dimana hal ini menghasilkan bilangan Reynolds antara $7.33\text{E}+05$ sampai $1.72\text{E}+06$ dimana mengindikasikan aliran sangat turbulen. Meskipun aliran turbulen sangat tidak stabil dalam kehidupan nyata, dalam kalkulasi ini digunakan nilai rata-rata aliran untuk memprediksi secara tepat hasil perhitungan laju erosi. Pemilihan model turbulen $k-\varepsilon$ dikarenakan fungsi ini menghasilkan hasil yang lebih konsisten untuk *grid* yang kurang baik pada *meshing* [8].

Partikel mendapatkan gaya momentum dari fluida yang ada, dan fluida tersebut melewati jalur aliran dan memberi dampak pada dinding, menghasilkan erosi. Dalam model pelacakan partikel, sudut tubrukan, dan lokasi tubrukan dalam kapasitas intensitas tubrukan didapatkan. Dalam ANSYS Fluent, model *Discrete Random Walk* (DRW) diaplikasikan untuk merealisasikan interaksi antara partikel dan turbulen. Model ini mengasumsikan bahwa partikel melewati struktur aliran turbulen yang terdapat pada aliran [8]. Interaksi dengan aliran turbulen menyebabkan arah partikel berubah arah lintasannya. Dengan tujuan untuk memvalidasi pelacakan partikel pada ANSYS Fluent, Leduc dkk, membandingkan simulasi CFD dengan hasil eksperimen pada kondisi tekanan rendah [9].

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 m^2 dalam satu detik ($\text{kg/m}^2\text{s}$), dimana hasil eksperimen menunjukkan satuan unit rasio erosi (mm/kg) sehingga perlu dikonversi.

$$\text{Laju Erosi} \left[\frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] = \left(\frac{\text{Laju Erosi DPM} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right] \cdot 10^3}{\text{Densitas} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot \text{FlowRate} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]} \right) \quad (1)$$

Dimana densitas ini merupakan massa jenis dinding material yang digunakan, dalam kasus ini merupakan Stainless Steel 316 yang mempunyai densitas 7990 kg/m^3 . Sedangkan *flow rate* merupakan laju pasir yang diinjeksikan ke dalam inlet dalam satuan kilogram per detik.

Sedangkan laju erosi dalam satuan milimeter per tahun dapat dirumuskan:

$$\text{Laju Erosi} \left[\frac{\text{mm}}{\text{tahun}} \right] = \left(\text{Laju Erosi} \left[\frac{\text{mm}}{\text{kg}} \right] \cdot \text{Laju Partikel} \left[\frac{\text{kg}}{\text{tahun}} \right] \right) \quad (2)$$

B. Persamaan Erosi

Erosi terjadi saat partikel melewati jalur fluida dan menumbuk dinding geometri. Untuk perhitungan erosi, saat suatu partikel menumbuk dinding, informasi dampak partikel (kecepatan dan sudut) pada setiap sel mesh selanjutnya akan disimpan. Informasi dampak tersebut lalu diterjemahkan ke dalam persamaan erosi untuk mengkalkulasi laju erosi yang disebabkan oleh partikel. Dalam eksperimen ini, hanya digunakan persamaan erosi Oka [10] dikarenakan persamaan ini mengandung lebih banyak variabel yang tersedia dalam ANSYS Fluent.

$$E = E_{90} \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^{k_2} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right)^{k_3} f(\gamma) \quad (3)$$

Dapat dilihat pada persamaan 3 terdapat bilangan eksponen k_2 dan k_3 dimana merupakan fungsi dari eksperimen. Sedangkan pada persamaan 2.25 terdapat eksponen n_1 dan n_2 yang merupakan fungsi dari eksperimen juga. Nilai dari masing-masing eksponen tersebut ditunjukkan pada Tabel 6. Dimana diketahui nilai Kekerasan Vickers SS316 adalah 1.83 GPa yang selanjutnya dimasukkan dalam persamaan untuk menemukan nilai eksponen diatas. Sehingga persamaan *default* yang terdapat pada Fluent harus diubah karena tidak lagi sesuai dengan material referensi yang telah dipakai sebelumnya, karena persamaan tersebut hanya valid pada baja [8].

Tabel 5.
Nilai Parameter Eksponen Persamaan Oka

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

Sehingga persamaa 3 menjadi persamaan 4 sebagai berikut:

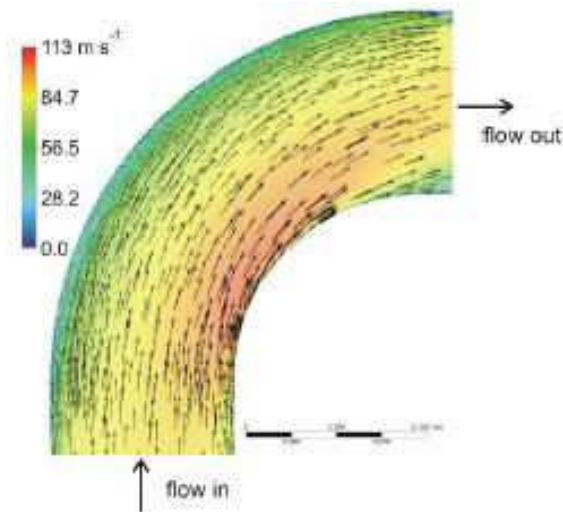
$$E = E_{90} \left(\frac{V}{104} \right)^{2.35} \left(\frac{d}{326} \right)^{0.19} f(\gamma) \quad (4)$$

Sedangkan persamaan sudut dampak:

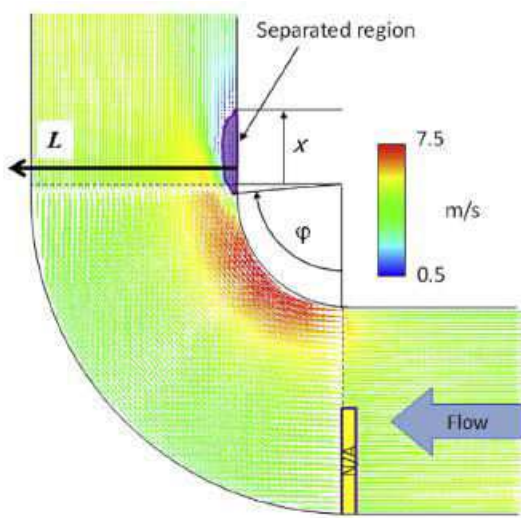
$$f(\gamma) = (\sin\gamma)^{0.77} (1 + 1.83(1 - \sin\gamma))^{1.36} \quad (5)$$

C. Evaluasi Erosi CFD dan Data Eksperimen

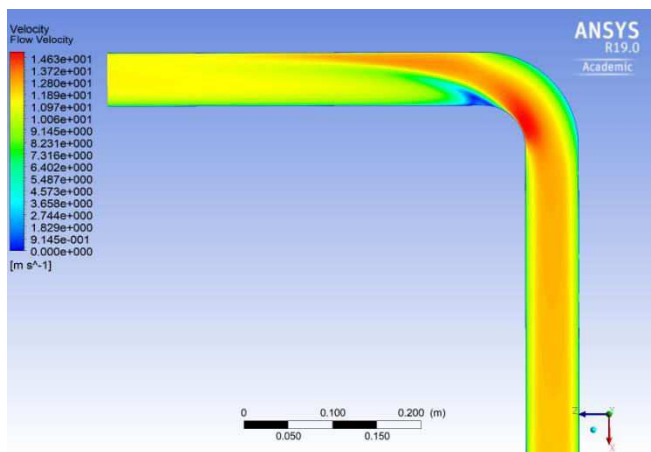
Solusi dari distribusi profil kecepatan ditunjukkan pada Gambar 6 sebagai contoh dari variabel pertama. Dimana menunjukkan kecepatan tertinggi berada pada *intrados* elbow pada setiap variabel. Hal ini sesuai dengan eksperimen yang dilakukan oleh Solnordal [11] pada Gambar 9 dan Ebara dkk pada Gambar 10. Dapat dilihat pada Gambar 11 sebagai contoh dari hasil CFD dari variabel pertama, kecepatan fluida meningkat secara signifikan saat arahnya berbelok pada sudut belokan 90° . Dengan kecepatan fluida yang semakin tinggi, dapat dilihat perbandingan pada Gambar 11 sampai Gambar 14 dimana daerah terpisah (*separated region*) semakin luas. *Separated region* merupakan wilayah berkecepatan rendah pada bagian inti dalam pipa (*intrados*).



Gambar 4. Distribusi Kecepatan pada Elbow Standart pada Kecepatan 80 m/s [6].



Gambar 5. Vektor Kecepatan pada Elbow [10].

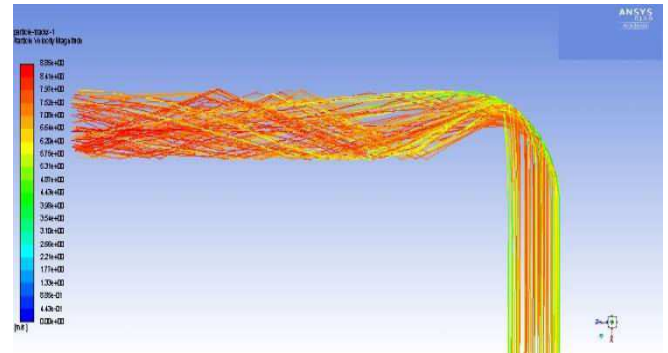


Gambar 6. Profil Kecepatan Variabel 1.

Setelah menyelesaikan permasalahan model aliran, partikel dilepaskan pada wilayah *inlet* pipa. Profil kecepatan fluida yang ditunjukkan pada Gambar 6 memberikan efek pada lintasan partikel yang melalui domain fluida. Saat partikel pasir mendekati belokan elbow, dan kecepatan meningkat, beberapa dari partikel tersebut menumbuk pada dinding pipa, dan memantul mengikuti fungsi sudut pada

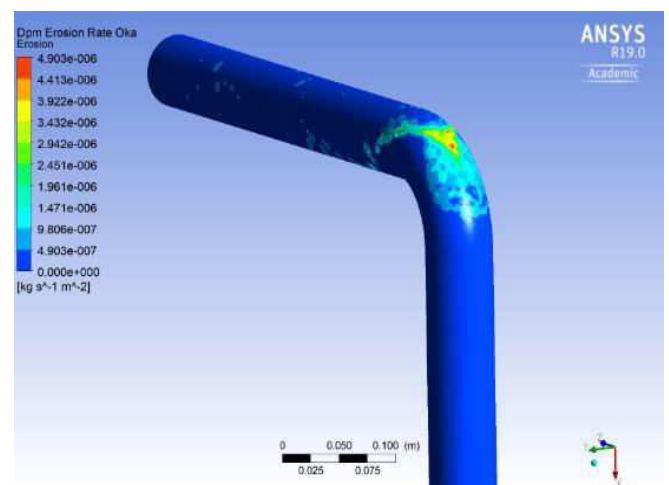
persamaan 5. Partikel juga berubah arah alirannya mengikuti fluida yang mengalami peningkatan besaran kecepatan (*velocity magnitude*) setelah menumbuk dinding pipa.

Prediksi CFD distribusi jalur partikel pasir ditunjukkan pada Gambar 7 diambil dari Variabel 1 sebagai perwakilan dari jalur partikel variabel yang lain dikarenakan distribusi jalur yang sama pada setiap variabel. Partikel pasir diprediksi akan fokus menghantam titik tengah karena pantulan dari dinding pipa. Impak dari partikel yang menghantam dinding pipa menghasilkan erosi berbentuk huruf 'V'.



Gambar 7. Distribusi Jalur Partikel Variabel 1 – Bidang XZ.

Dengan kondisi profil kecepatan fluida dan jalur partikel pasir yang telah terselesaikan, kontur erosi dapat dilihat pada Gambar 8. Kontur laju erosi pada elbow merupakan hasil yang paling penting dalam simulasi ini, ditunjukkan dengan data pada Tabel 6. Dan dapat dilihat perbandingan antara eksperimen dengan simulasi pada Gambar 9 untuk ukuran 300 μm sedangkan Gambar 10 untuk ukuran pasir 150 μm dengan satuan $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$. Batang berwarna abu-abu menunjukkan laju erosi yang dihasilkan dalam eksperimen, sedangkan batang berwarna biru menunjukkan laju erosi yang dihasilkan dengan simulasi CFD. Dari plotting ini, menunjukkan bahwa laju erosi dapat dihitung dan diprediksi dengan baik oleh CFD untuk ukuran partikel 300 μm sedangkan tidak untuk ukuran partikel 150 μm . Perbandingan laju erosi dengan penelitian lain dapat dilihat pada Tabel 7.



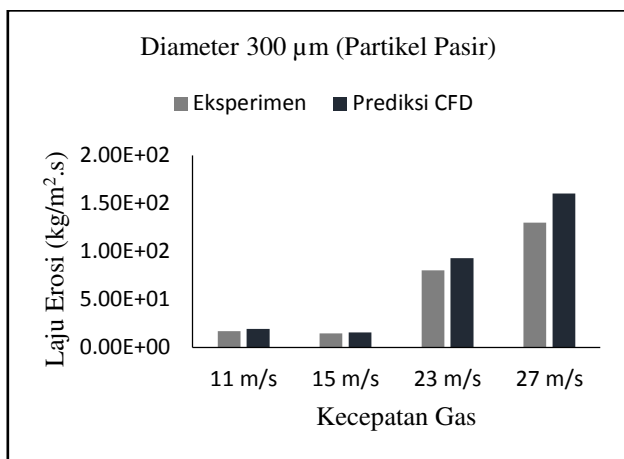
Gambar 8. Pola Erosi CFD pada Kecepatan Gas 11 m/s dan Ukuran Pasir 300 μm .

Tabel 6.
Perbandingan Hasil Eksperimen dan Prediksi Erosi CFD

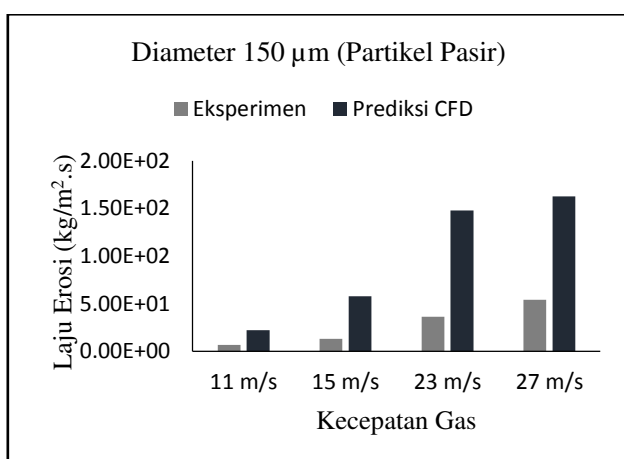
Tes	V _{gas}	Ukuran Partikel	Laju Pasir	Data Validasi		Prediksi CFD		Prediksi melebihi data	Error
	m/s	μm	kg/hari	mm/tahun	mm/kg	mm/tahun	mm/kg		
1	11	300	288	16.9	1.61E-04	19.34	1.84E-04	1.14	14%
2	15	300	103	14.7	3.93E-04	15.63	4.16E-04	1.06	6%
3	23	300	227	80.3	9.71E-04	93.15	1.12E-03	1.16	16%
4	27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

Tabel 7.
Perbandingan Persen Bias Dari Data UT dengan Prediksi CFD untuk Model Erosi yang Berbeda [7]

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



Gambar 9. Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 300 μm.



Gambar 10. Perbandingan Prediksi Erosi CFD dengan Eksperimen pada ukuran partikel pasir 150 μm.

Gambar 9 dan 10 menunjukkan perbandingan hasil eksperimen dan prediksi CFD untuk partikel dengan diameter 150 μm dan 300 μm dengan variasi kecepatan. Nilai prediksi CFD menunjukkan hasil perbandingan yang baik dengan hasil eksperimen. Dapat diamati bahwa sesuai dengan perkiraan dan dasar teori, peningkatan

kecepatan aliran dan partikel diameter mempengaruhi laju erosi, menjadi meningkat. Dimana kecepatan partikel merupakan fungsi dari kecepatan fluida menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan impact maka akan semakin tinggi juga energi impact partikel terhadap dinding pipa lalu terjadi peningkatan laju erosi.

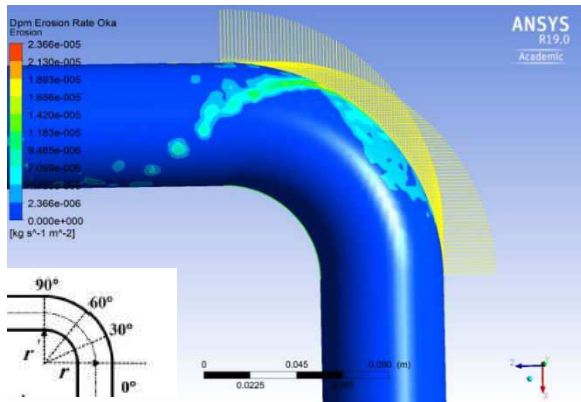
Terlihat jelas terdapat perbedaan hasil antara eksperimen dengan simulasi CFD salah satunya disebabkan oleh model asumsi yang menyebabkan penerapan yang terbatas, dan harus ditambahkan aspek-aspek pada system yang nyata yang tidak terdapat pada model [6]. Masalah yang dihadapi ini terutama model partikel menyebabkan hasil yang tidak akurat dikarenakan partikel pasir merupakan variabel relative yang sulit untuk diketahui secara detail. Seperti bentuk partikel yang berbeda, distribusi ukuran partikel, dan pengaruh putaran partikel yang diabaikan dalam simulasi ini karena keterbatasan model dan spesifikasi komputer yang dibutuhkan.

Perbedaan hasil juga disebabkan oleh efek partikel terhadap dinding material elbow. Seperti, setelah dinding elbow tererosi, profil permukaan akan berubah dan hal ini juga akan merubah distribusi partikel dan erosi. Efek dari perubahan permukaan secara terus-menerus pada perkembangan erosi telah dipelajari oleh beberapa penulis untuk system udara dan pasir yang berbeda [11].

Dalam banyak kasus erosi partikel, partikel dilepaskan pada jarak yang sangat dekat sebelum Analisa daerah erosi dan kecepatannya diasumsikan sama dengan kecepatan fluida, dimana merupakan salah satu penyebab terjadinya ketidaksamaan nilai dengan hasil eksperimen saat mensimulasikan fenomena erosi pada aplikasi secara nyata [12].

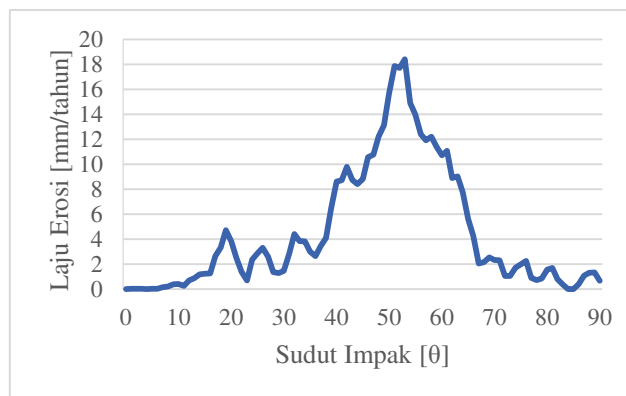
Simulasi Fluent menunjukkan kontur yang hampir sama pada setiap variabel partikel, dengan bentuk huruf V pada belokan elbow dan terdapat titik-titik erosi akibat dari tumbukan partikel pasir tersebut setelah melewati elbow. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8 terjadi fluktuasi partikel yang menyebabkan tumbukan yang tersebar pada dinding pipa setelah tumbukan utama pada belokan elbow.

D. Distribusi Erosi pada Sudut Elbow



Gambar 11. Penempatan Titik Sudut Impact pada Belokan Elbow dalam CFD-Post.

Diperlukan analisa erosi pada tiap titik elbow sepanjang garis tengah pipa untuk mengetahui pada titik mana terjadi erosi paling signifikan berdasarkan sudut impact. Dapat diteliti pada Gambar 12 yang menunjukkan distribusi prediksi erosi setelah pasir melaju menumbuk elbow, dan dimana puncak laju erosi tertinggi secara bervariasi terjadi pada sudut impact $50^{\circ} - 55^{\circ}$. Hasil ini sedikit berbeda dengan eksperimen yang dilakukan oleh Viera [13] dimana puncak erosi terjadi pada sudut 47° .



Gambar 12. Distribusi Erosi pada Sudut Impact Elbow untuk Diameter 300 μm dan Kecepatan Gas 11 m/s.

IV. KESIMPULAN

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

1. Didapatkan pola erosi yang sama untuk kedua ukuran pasir yaitu pola berbentuk 'V' pada belokan

elbow sebagai hasil dari tumbukan partikel pasir dengan dinding material.

2. Digunakan perhitungan laju erosi menggunakan persamaan Oka yang dimodifikasi menyesuaikan dengan material dinding. Untuk kedua ukuran partikel pasir, tren dari laju erosi dari simulasi CFD melebihi (*overpredict*) dengan rata-rata nilai 1.17 dengan error 14.75% untuk partikel ukuran 300 μm dan 3.71 dengan error 271.5% untuk ukuran partikel 150 μm .

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Strømme, "Simulation and Evaluation of Slurry Erosion," Trondheim, 2015.
- [2] S. Shirazi, B. McLaury, J. Shadley, and E. Rybicki, "Generalization of the API RP 14E Guideline for Erosive Service," *J. Pet. Technol.*, 1995.
- [3] M. M. Salama and Conoco Inc, "An Alternative to API RP 14E Erosional Velocity Limits for Sand Laden Fluids," in *Offshore Technology Conference*, 1998.
- [4] J. Wang, S. Shirazi, J. Shadley, and E. Rybicki, "Application of Flow Modelling and Particle Tracking to Predict Sand Erosion Rates in 90 degree Elbows," *ASME FED*, vol. 236, pp. 725–734, 1996.
- [5] J. K. Edwards, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Modelling Solid Particle Erosion in Elbows and Plugged Tees," *Energy Resour. Technol.*, vol. 123, pp. 277–284, 2001.
- [6] C. B. Solnordal, C. Y. Wong, and J. Boulanger, "An Experimental and Numerical Analysis of Erosion Caused by Sand Pneumatically Conveyed Through a Standard Pipe Elbow," *Int. J. Sci. Technol. Frict. Lubr. Wear*, p. 3, 2015.
- [7] R. E. Viera, M. Parsi, P. Zahedi, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Sand Erosion Measurement Under Multiphase Annular Flow Conditions in a Horizontal-Horizontal Elbow," *Powder Technol.*, vol. 320, pp. 625–636, 2017.
- [8] ANSYS, "Fluent Theory Guide," Orlando, 2017.
- [9] S. Leduc, C. Fredriksson, and R. Hermansson, "Particle-Tracking Option in Fluent Validated by Simulation of a Low-Pressure Impactor," *Adv. Powder Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 99–111, 2006.
- [10] Y. Oka and T. Yoshida, "Practical Estimation of Erosion Damage Caused by Solid Particle Damage Impact: Part 2: Mechanical Properties of Materials Directly Associated with Erosion Damage," *Wear*, vol. 259, pp. 102–109, 2005.
- [11] C. Solnordal and C. Wong, "Predicting Surface Profile Evolution Caused by Solid Particle Erosion," in *Ninth International Conference of CFD in the Minerals and Process Industries*, 2012, p. 8.
- [12] D. H. Hadžiahmetović, "Computational Fluid Dynamics (CFD) based Erosion Prediction Model in Elbow," *O Hrčku*, pp. 275–282, 2014.
- [13] R. E. Viera, A. Mansuori, B. S. McLaury, and S. A. Shirazi, "Experimental and Computational Study of Erosion in Elbow Due to Sand Particles in Air Flow," *Powder Technol.*, vol. 288, pp. 339–353, 2016.