

Analisis Numerik Dispersi Kebocoran Gas *Pipeline* Dalam Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan

F. Fikri* dan Fauzun

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2, Yogyakarta 55281, Indonesia
E-mail: furqanul.fikri@gmail.com

Abstrak

Dalam kegiatan penyaluran gas melalui *pipeline*, upaya untuk menjaga kesinambungan, kehandalan dan keamanan penyaluran gas menuntut strategi pencegahan melalui inspeksi dan pemeliharaan secara rutin. Identifikasi, pengetahuan, pengendalian risiko, dan proses penanganan yang cepat saat terjadi kebocoran gas menjadi upaya yang terus dioptimalkan. Penelitian dispersi kebocoran gas melalui *pipeline* di media berpori perlu dikembangkan agar jangkauan dan pola dispersi kebocoran gas pada permukaan tanah dapat diketahui. Selain itu, saat inspeksi di jalur *pipeline* ditemukan indikasi kebocoran gas, maka posisi kebocoran pada *pipeline* dapat dipredikasi melalui pola konsentrasi gas yang diukur. Model simulasi *pipeline* tiga dimensi menggunakan *software* Ansys Fluent telah dikomparasi dan divalidasi dengan penelitian serupa, sehingga layak untuk disimulasikan dalam beberapa variasi tekanan operasi penyaluran gas alam, dan permeabilitas tanah (variasi lapisan timbunan *pipeline*). Konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* dianalisis menjadi 5 (lima) area yang masing-masing area memiliki perbedaan radius 0,5 meter. Hasil penelitian ini nilai konsentrasi gas di permukaan aspal pada kisaran total 70%Vol untuk radius 2,5 meter dari titik kebocoran *pipeline*. Selanjutnya, titik kebocoran pada *pipeline* dapat diperkirakan melalui pengukuran pusat konsentrasi gas.

Kata kunci : *computational fluid dynamics (CFD), kebocoran gas alam, jaringan pipeline gas.*

Abstract

In pipelines gas distribution, some efforts to maintain the continuity, reliability, and safety of gas distribution require prevention strategies such as routine inspections and maintenance. Identification, knowledge, risk control, and fast recovery when a gas pipeline leakage occurs is an effort that continues to be optimized. Research related to the dispersion of gas pipeline leakage in porous media needs to be developed so that the range and pattern of gas leak dispersion at the ground surface can be known. Besides, when a pipeline leak survey shows an indication of gas leakage, the pipeline leak position can be predicted by measuring the gas concentration pattern. The simulation model utilized with Ansys-Fluent software has been compared and validated with similar research, so it is feasible to simulate several variations in operating pressure, and soil permeability (variations in pipeline backfill layers). The gas concentration on the surface of the pipeline backfill layer was analyzed into 5 (five) areas, each of them has a radius difference of 0.5 meters. This research obtained that the gas concentration on the asphalt surface in the total range of 70% Vol for the radius up to 2.5 meters from the pipeline leakage point. Then, the pipeline leak point position could be estimated by measuring the center of gas concentration.

Keywords : *computational fluid dynamics (CFD), natural gas leakage, gas pipeline.*

1. PENDAHULUAN

Kebocoran gas merupakan kejadian yang sangat dihindari karena berdampak langsung pada bisnis penyaluran gas dan keamanan pihak ketiga atau masyarakat. Berbagai upaya perlu dilakukan untuk meningkatkan kewaspadaan dan memberikan peringatan kepada pihak ketiga atau masyarakat terkait risiko bahaya ketika beraktivitas di sekitar *pipeline*. Penelitian ini dikhususkan pada *pipeline* polyethylene (PE) karena secara geografis *pipeline* PE menjangkau lokasi perumahan masyarakat, kawasan komersial, pinggir jalan raya dan lokasi aktivitas masyarakat lainnya. Selain itu, *Pipeline* PE rawan mengalami kebocoran di sambungan-sambungan seperti pada *tapping saddle, coupler, tee, end cap* dan *elbow* ketika mengalami beban dinamik, maupun proses penyambungan yang tidak baik pada saat konstruksi. Dari segi sifat materialnya, *pipeline* PE mudah tersayat jika terkena benda tajam dan hal ini akan sangat mempengaruhi kekuatannya.

Kontrol dan pengendalian aktivitas masyarakat sangat sulit dilakukan misalnya kepada pedagang kaki lima, penjual makanan, bengkel ban, dan aktivitas lainnya yang berpotensi menimbulkan api dan kebakaran terutama saat terjadi kebocoran gas pada *pipeline* PE tersebut. Dasar analisis keteknikan menjadi suatu acuan yang kuat untuk mensosialisasikan batasan wilayah yang harus dihindari oleh masyarakat di sekitar *pipeline* gas.

Beberapa penelitian terkait analisis kebocoran gas secara teoritis dan matematik telah dilakukan oleh Montiel dkk. (1998), Yuhu dkk. (2003), dan Huang dkk. (2012). Namun dalam penelitian ini masih terbatas pada analisis satu dimensi, dan kondisi *pipeline* tidak tertanam tanah.

Karakteristik pergerakan hidrogen di dalam tanah dan di permukaan tanah dilakukan oleh Okamoto dkk. (2014) dengan membangun suatu model eksperimen pengukuran kebocoran gas hidrogen dan pemodelan simulasi numerik. Model fisik eksperimen dan hasil penelitian Okamoto dkk. (2014) akan digunakan sebagai acuan untuk validasi model simulasi CFD dalam penelitian ini.

Moghadam dkk. (2016) melakukan investigasi kebocoran gas dari *pipeline* yang tertanam di tanah dan di atas tanah. Investigasi tersebut dilakukan melalui simulasi numerik dua dimensi dalam kondisi aliran turbulen dan *steady*. Dalam penelitian-penelitian terkait sebelumnya, panjang pipa setelah titik kebocoran tidak dijadikan sebagai pertimbangan dalam perhitungan atau analisis, hal ini diinvestigasi oleh Moghadam dkk. (2016) karena menjadi penyebab ketidakakuratan dalam perhitungan laju alir kebocoran pada *pipeline*.

Moghadam dkk. (2018) melanjutkan penelitian kebocoran gas pada *pipeline* tertanam tanah dan di atas tanah yang diinvestigasi secara numerik dalam model dua dan tiga dimensi. Simulasi dilakukan dalam beberapa kombinasi variabel yaitu diameter *pipeline*, tekanan gas dan diameter kebocoran untuk kemudian dilakukan analisis untuk memperoleh persamaan laju alir kebocoran gas. Dalam penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa analisis numerik tiga dimensi lebih baik dalam analisis kebocoran *pipeline*.

Dalam penelitian-penelitian sebelumnya belum dilakukan analisis numerik tiga dimensi untuk menganalisis pola dispersi kebocoran gas alam dari *pipeline* dalam tanah dan dikombinasikan dengan pola dispersi gas di permukaan tanah, sehingga dapat diperoleh konsentrasi dan area berbahaya dalam kombinasi beberapa parameter tekanan operasi gas alam 4 barg, 1 barg dan 100 mbarg, serta permeabilitas tanah untuk kondisi instalasi *pipeline* tertanam dalam tanah yang tertanam di lapisan tanah-*crushed stone*-aspal dan *Pipeline* tertanam di lapisan tanah.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan *software* Ansys Fluent untuk simulasi model CFD melalui serangkaian proses komparasi, dan validasi serta dilanjutkan dengan simulasi model yang sama untuk kombinasi parameter terkait kebocoran pada *pipeline* yaitu tekanan operasi gas alam, dan kondisi lapisan timbunan *pipeline*.

2.1. Landasan Teori

Computational Fluid Dynamics (CFD) mampu memprediksi seluruh hal yang berhubungan dengan fluida seperti: aliran fluida, transfer panas, reaksi kimia dan lain-lain melalui penyelesaian secara numerik persamaan matematika yang telah disusun. Pembentukan persamaan matematika aliran fluida berasal dari hukum fisika konservasi massa, momentum dan energi. Dalam pemodelan media berpori, solusi analisis numerik diperoleh melalui penurunan persamaan momentum dan penambahan istilah sumber momentum (*source*, S) ke persamaan standar aliran fluida. *Source* terdiri atas *viscous loss* (Darcy) dan *inertia loss* yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (1)$$

Untuk media berpori yang homogen dimana α merupakan *permeability*, maka persamaan (1) di atas menjadi:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_i \right) \quad (2)$$

Melalui korelasinya dengan persamaan Ergun, dapat dibentuk persamaan yang secara empirik dapat digunakan pada rentang nilai Reynolds yang lebar dan berbagai jenis media berpori sebagai berikut:

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150 \mu (1 - \epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v_\infty + \frac{1.75 \rho (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} v_\infty^2 \quad (3)$$

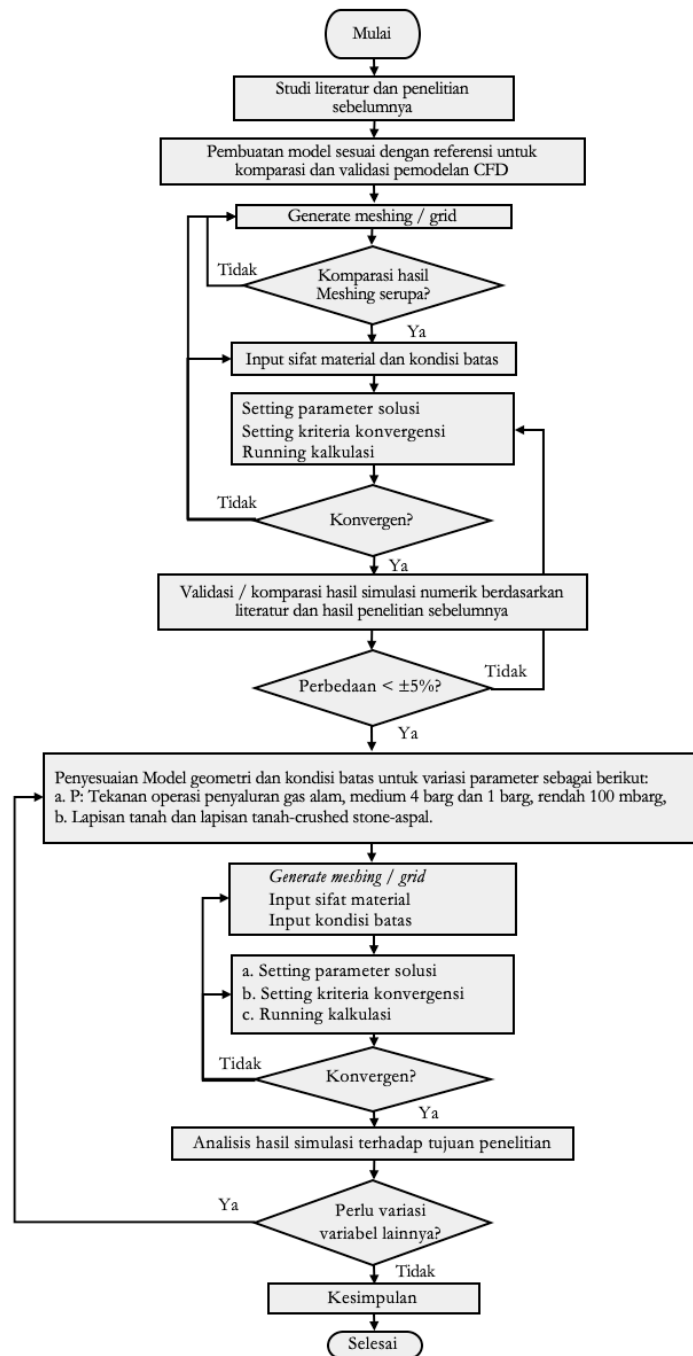
Lalu nilai *permeability* (α) dan koefisien *inertial loss* (C_2) dengan D_p diameter rata-rata partikel dan ϵ porositas ditentukan dengan persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\epsilon^3}{(1 - \epsilon)^2} \tag{4}$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} \tag{5}$$

2.2. Prosedur Penelitian dan Simulasi CFD

Pada Gambar 1 terlihat prosedur penelitian dengan proses utamanya yaitu simulasi CFD.

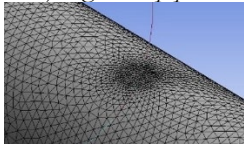


Gambar 1. *Flowchart* prosedur penelitian

2.3. Komparasi Kasus Kebocoran Gas Pada Pipeline Kondisi Tidak Tertanam Media berpori

Simulasi CFD ini bertujuan untuk melakukan Komparasi Kasus (“KK”) penelitian Moghadam dkk. (2018) dalam kasus kebocoran pipeline tidak tertanam media berpori (tanah). Tujuan dari komparasi ini yaitu membandingkan nilai laju alir massa kebocoran gas sesuai dengan variasi jumlah cells model pipeline yang mengalami kebocoran gas seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Komparasi Geometri dan Hasil Meshing

No.	Pembanding	Moghadam dkk. (2018)	Penelitian
1	Geometri	<ul style="list-style-type: none"> Diameter pipeline (D): 163,6 mm Diameter kebocoran (d): 30 mm Tekanan (P): 5 bara Posisi kebocoran: 3000 mm dari ujung inlet pipeline 	<ul style="list-style-type: none"> Diameter pipeline (D): 163,6 mm Diameter kebocoran (d): 30 mm Tekanan (P): 5 bara Posisi kebocoran: 3000 mm dari ujung inlet pipeline
2	Meshing lubang kebocoran pipeline	Tidak dijelaskan	 <p>face sizing 2 mm.</p>
3	Jumlah Cells	<ul style="list-style-type: none"> KK1: 240.642 KK2: 599.493 KK3: 1.601.839 KK4: 1.909.518 	<ul style="list-style-type: none"> KK1: 239.555 KK2: 595.350 KK3: 1.601.043 KK4: 1.907.129

Data-data simulasi penelitian yang dilakukan Moghadam dkk. (2018) akan digunakan untuk proses simulasi CFD yang sama. Untuk data-data yang tidak dijelaskan secara detail oleh Moghadam dkk. (2018), maka peneliti menentukan sendiri sesuai dengan langkah-langkah dalam proses simulasi CFD. Hasil simulasi CFD dan komparasi laju alir massa kebocoran gas dari pipeline ditampilkan dalam Tabel 2 berikut.

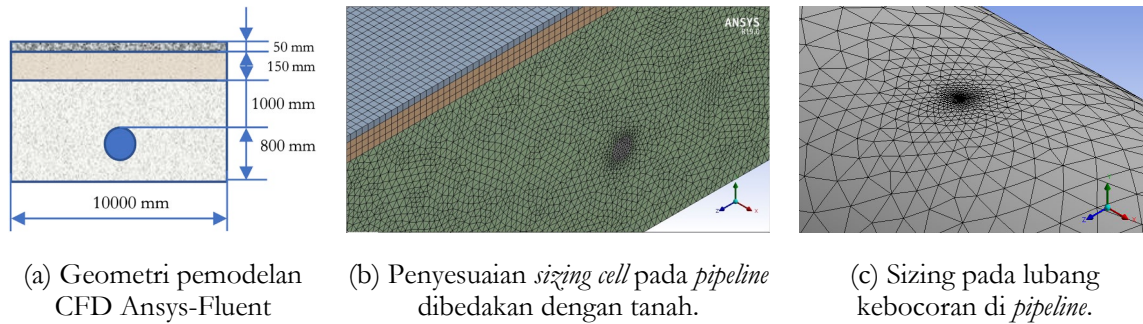
Tabel 2. Hasil Komparasi Laju Alir Massa Kebocoran Gas dari Pipeline

Pembanding	Moghadam dkk. (2018)		Penelitian		
	Mass flow ⁽¹⁾	Deviasi ⁽²⁾	Mass flow ⁽³⁾	Deviasi ⁽⁴⁾	Deviasi ⁽⁵⁾
KK1	0,6413	-	0,5822	9,21%	-
KK2	0,6041	5,80%	0,5872	2,79%	0,86%
KK3	0,585	3,16%	0,5827	0,40%	0,78%
KK4	0,5834	0,27%	0,5825	0,15%	0,02%
		Deviasi ⁽²⁾ : perbedaan relatif mass flow antara KK2 dan KKI, KK3 dan KK2, serta KK4 dan KK3		Deviasi ⁽⁴⁾ : (3)-(1) / (1)	Deviasi ⁽⁵⁾ : perbedaan relatif mass flow antara KK2 dan KKI, KK3 dan KK2, serta KK4 dan KK3

Hasil komparasi simulasi CFD menunjukkan deviasi dengan peneliti sebelumnya yang sangat rendah pada KK4 yaitu 0,15%, sehingga dalam penelitian ini tercapai sesuai target yaitu <5%.

2.4. Validasi Analisa Numerik Kebocoran Gas Pada Pipeline Tertanam Media berpori Mengacu Eksperimen Okamoto dkk. (2014)

Proses validasi simulasi CFD berdasarkan eksperimen Okamoto dkk. (2014) mengenai karakteristik distribusi dan konsentrasi yang berasal dari kebocoran gas hidrogen di dalam dan di permukaan tanah. Beberapa data utama yang digunakan dalam proses validasi ini yaitu gas Hidrogen dengan Specific gravity (SG) 0,07, laju kebocoran 1000 (cc/min), tekanan kebocoran 0,2 (kPa), posisi kebocoran 1,2 meter dari permukaan tanah. Geometri dan hasil meshing pemodelan CFD Ansys-Fluent menyesuaikan dengan kondisi eksperimen yang berukuran 10 m x 10 m seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Geometri dan Hasil Meshing Simulasi *Pipeline* Tertanam Tanah

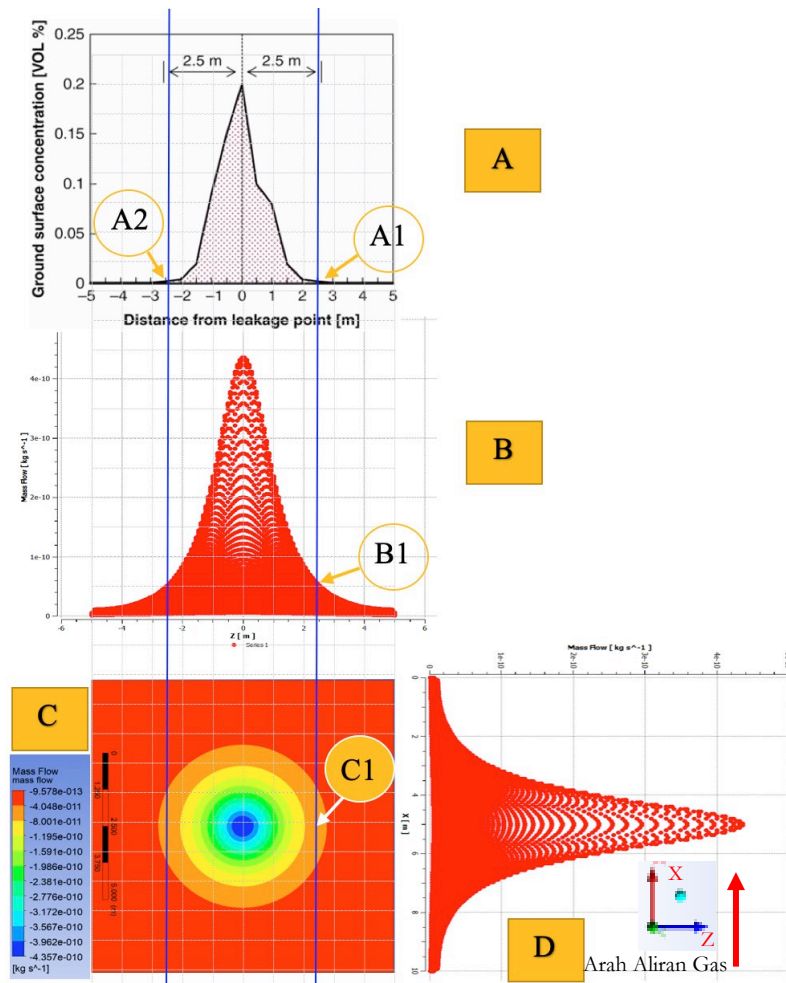
Model ini adalah simplifikasi set-up eksperimen menjadi bentuk geometri kebocoran *pipeline* dalam lapisan timbunan yang terdiri atas tanah 1800 mm, *crushed stone* 150 mm dan aspal 50 mm sebagaimana yang ditunjukkan Gambar 2 (a). Karena ukuran diameter *pipeline* (D) dan diameter kebocoran (d) sumber gas Hidrogen tidak disebutkan dalam referensi, maka dilakukan simulasi CFD variasi ukuran D dan d untuk mendapatkan nilai laju kebocoran pada sisi *inlet pipeline* yang mendekati nilai pengaturan kebocoran gas Hidrogen melalui *leak rate control* sebesar 1000 cc/min, sehingga diperoleh ukuran D = 55 mm dan d = 10 mm dengan nilai 971,42 cc/min (perbedaan relatif sebesar 2,86%).

Pengaturan zona dalam simulasi CFD kebocoran *pipeline* dalam lapisan tanah-*crushed stone*-aspal yaitu untuk *pipeline* berupa fluida dengan material hidrogen dan lapisan timbunan sebagai zona berpori (*porous media*) dengan resistansi yang sama di segala arah. Perhitungan nilai *viscous* dan *inertial resistance* ditentukan menggunakan persamaan 4 dan persamaan 5 dengan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Viscous* dan *Inertial Resistance* Lapisan Timbunan *Pipeline*

Lapisan Timbunan <i>Pipeline</i>	Porositas (%), Diameter Partikel Rata-rata	Gas Permeability (m ²)	<i>Viscous resistance</i> (1/m ²)	<i>Inertial resistance</i> (1/m)
Aspal	7,5	3,59 x 10 ⁻¹²	2,786.E ⁺¹¹	7343165,1
<i>Crushed Stone</i>	22,1, D ₅₀ = 6.2 mm	4,07 x 10 ⁻¹¹	2,457.E ⁺¹⁰	40741,498
Tanah	22,6, D ₅₀ = 0.9 mm	1,40 x 10 ⁻¹¹	7,143.E ⁺¹⁰	260760,12

Hasil simulasi model kebocoran *pipeline* hidrogen diameter D=55 mm dan diameter kebocoran d=10 mm seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Acuan proses validasi hasil simulasi CFD terhadap eksperimen Okamoto dkk. (2014)

Gambar 3 bertujuan untuk memvalidasi simulasi CFD terhadap penelitian Okamoto dkk. (2014). Keterangan notasi-notasi yang ditunjukkan dalam Gambar 3 tersebut adalah sebagai berikut:

- A: Hasil pengukuran konsentrasi hidrogen di permukaan tanah yang dapat terukur sekitar $\pm 2,5$ m dari titik pusat kebocoran sesuai dengan kemampuan peralatan gas detektor yang digunakan dalam eksperimen Okamoto dkk. (2014).
- B: Kurva laju alir massa di domain permukaan tanah dalam arah sumbu Z atau arah tegak lurus *pipeline*.
- C: Gambar kontur laju aliran massa di permukaan lapisan aspal
- D: Kurva laju alir massa di domain permukaan tanah dalam arah sumbu X atau sejajar *pipeline*.

2.5. Analisis dan Verifikasi Kebocoran Hidrogen di Permukaan Aspal

Berdasarkan hasil eksperimen Okamoto dkk. (2014) bahwa konsentrasi gas Hidrogen sekitar $\pm 2,5$ m dari titik pusat kebocoran pada nilai sebesar 0,008 vol% yaitu pada titik A1 dan A2 sesuai kemampuan identifikasi gas detektor. Titik A1 yang direfleksikan pada gambar B di titik B1 dan gambar C di titik C1, menunjukkan kesesuaian penurunan konsentrasi gas Hidrogen.

Secara khusus validasi hasil simulasi dengan membandingkan nilai konsentrasi hidrogen berdasarkan pengukuran di titik kebocoran yaitu sebesar 0,2 %vol seperti yang ditunjukkan pada kurva gambar A. Sedangkan untuk hasil simulasi CFD, pada Tabel 4 dari empat titik nilai laju alir massa terbesar dan bernilai sama digunakan sebagai referensi perhitungan konsentrasi hidrogen paling tinggi dan berada di titik kebocoran pipa dengan nilai $\%massa_{cfid} = 0,2730\%Vol$.

Tabel 4. Data Hasil Simulasi CFD Untuk Nilai Laju Alir Massa Tertinggi

Koordinat X (m)	Koordinat Z (m)	Mass Flow (kg/s)	Total Mass Flow (kg/s)	Mass Flow Lubang kebocoran (kg/s)	Konsentrasi
4,96	0,04	4,357.e ⁻¹⁰			
4,96	0,04	4,357.e ⁻¹⁰	1,743.e ⁻⁰⁹	6,38.e ⁻⁰⁷	0,2730%
5,04	-0,04	4,357.e ⁻¹⁰			
5,04	-0,04	4,357.e ⁻¹⁰			

Mengacu pada eksperimen hasil pengukuran konsentrasi hidrogen sebesar 0,2 vol%, maka konsentrasi volume hidrogen simulasi CFD yang dilakukan pada kondisi *steady state*, isothermal dan *density* hidrogen konstan sebesar %massa_{cfid} = %vol_{cfid} = 0,2730% dapat diasumsikan sama. Pelaksanaan pengukuran konsentrasi hidrogen menggunakan gas detektor diposisikan pada jarak sekitar 2 cm dari permukaan aspal dan bergerak dengan kecepatan 4 km/jam. Kondisi ini berbeda dengan hasil simulasi yang menghitung konsentrasi hidrogen tepat pada permukaan aspal.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Asumsi Penelitian dan Penentuan Basis Data Simulasi

Beberapa asumsi dan penentuan basis data yang digunakan dalam simulasi CFD yaitu aliran gas *steady state*, tidak ada transfer panas, dan jenis fluida gas *pure methane* dengan nilai *density* yang digunakan yaitu 0,6679 kg/m³ dan *viscosity* 1,087e⁻⁵ kg/m-s sesuai dengan *database* Ansys Fluent. Penurunan tekanan di segmen *pipeline inlet* sampai dengan *outlet* diabaikan. Pengaturan fisik model yaitu *Pressure-based*, *Viscous Model Standard* k-ε, dan *Properties* media berpori mengacu pada Tabel 3. *Boundary* simulasi kebocoran *pipeline* dalam tanah sesuai dengan Tabel 5.

Tabel 5. Pengaturan *Boundary* Simulasi CFD

No.	Boundary	Pengaturan
1.	Sisi inlet <i>pipeline</i>	<i>Pressure Inlet</i>
2.	Lubang kebocoran <i>pipeline</i>	<i>Interior</i>
3.	Sisi ujung <i>pipeline</i>	<i>Pressure Outlet</i>
4.	Permukaan <i>pipeline</i>	<i>Wall</i>
5.	Permukaan media berpori	<i>Pressure outlet</i>
6.	Permukaan bawah media berpori	<i>Wall</i> , sebagai permukaan lapisan air di kondisi riil lapangan

3.2. Analisis Hasil Simulasi CFD Kebocoran *Pipeline* Pada Posisi Pukul 12

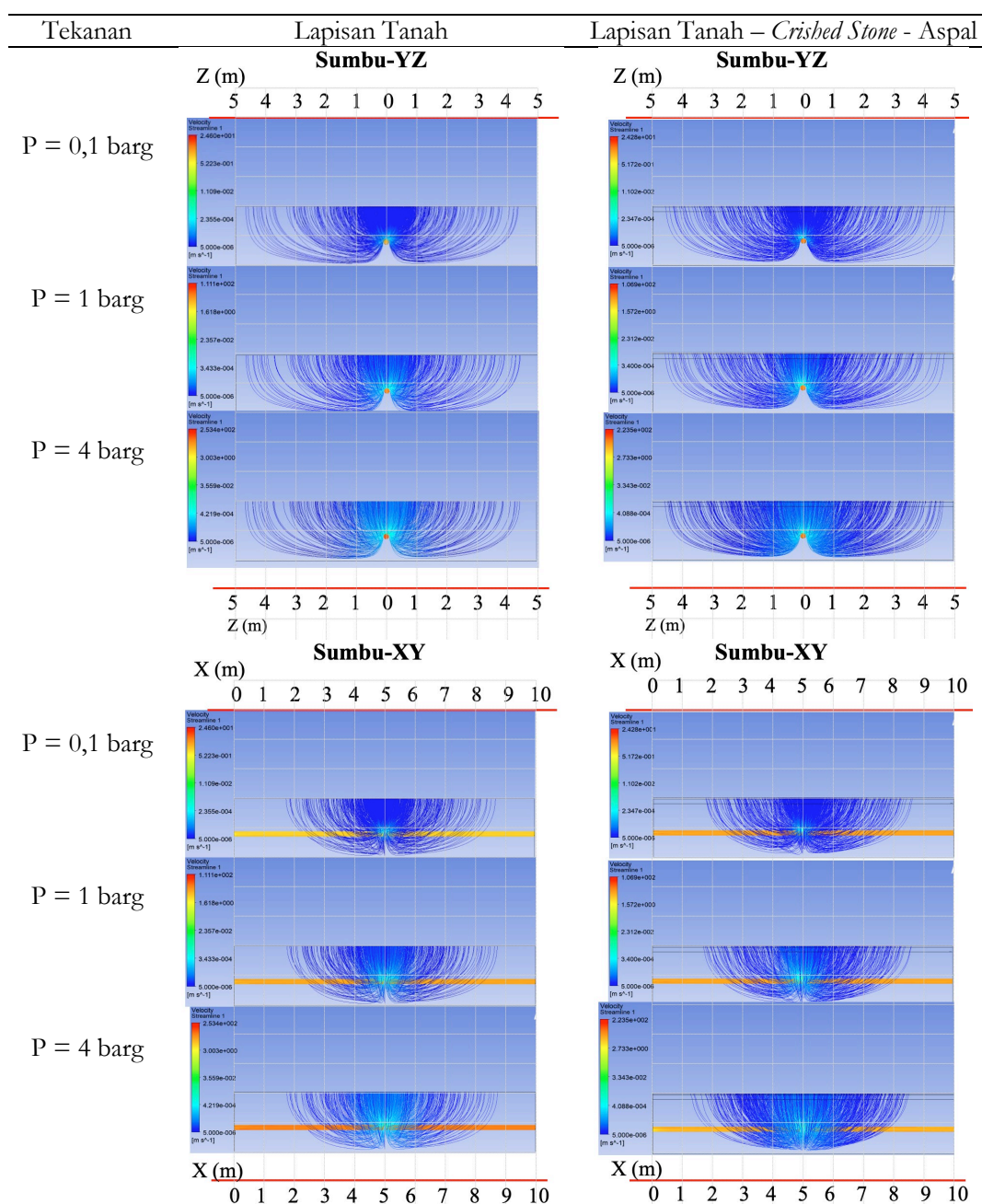
Berdasarkan data bentuk *streamline* dan kontur laju alir massa hasil simulasi CFD kebocoran gas *pipeline* dari lubang posisi pukul 12, analisis yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

- Dari kurva *streamline* Tabel 6 dan Gambar 4 melalui pandangan sumbu-YZ, sumbu-XY dan isometrik terlihat bahwa semakin besar tekanan gas dalam *pipeline* akan menyebabkan dispersi kebocoran gas (terlihat dari kerapatan *streamline*) baik untuk model tanah maupun model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal akan semakin luas.
- Dari Gambar 5, pusat konsentrasi gas di permukaan timbunan berada pada titik yang sama dengan titik lubang kebocoran *pipeline* yaitu pada koordinat (X,Z) = (5,0) meter.
- Tekanan aliran gas dalam *pipeline* yang semakin besar akan menghasilkan laju aliran massa kebocoran gas pada lubang di *pipeline* semakin besar, dimana dari hasil simulasi CFD nilainya adalah sebagai berikut:
 - Model lapisan tanah secara berurutan pada tekanan 0,1 barg; 1 barg; dan 4 barg yaitu 2.2684.e⁻⁵ kg/s; 1,0317.e⁻⁴ kg/s; dan 2,2544.e⁻⁴ kg/s.
 - Model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal secara berurutan pada tekanan 0,1 barg; 1 barg; dan 4 barg yaitu 2,2563.e⁻⁵ kg/s; 1,0257.e⁻⁴ kg/s; dan 2,2408.e⁻⁴ kg/s.
- Berdasarkan Gambar 5 kontur laju alir massa kebocoran gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* untuk setiap variasi tekanan dapat dievaluasi dan diperoleh hasil analisis antara lain:
 - Bentuk kontur dan kurva hasil simulasi lapisan tanah-*crushed stone*-aspal terlihat beraturan, sedangkan untuk lapisan tanah tidak beraturan, pembahasan akan dilanjutkan pada point 3.3.

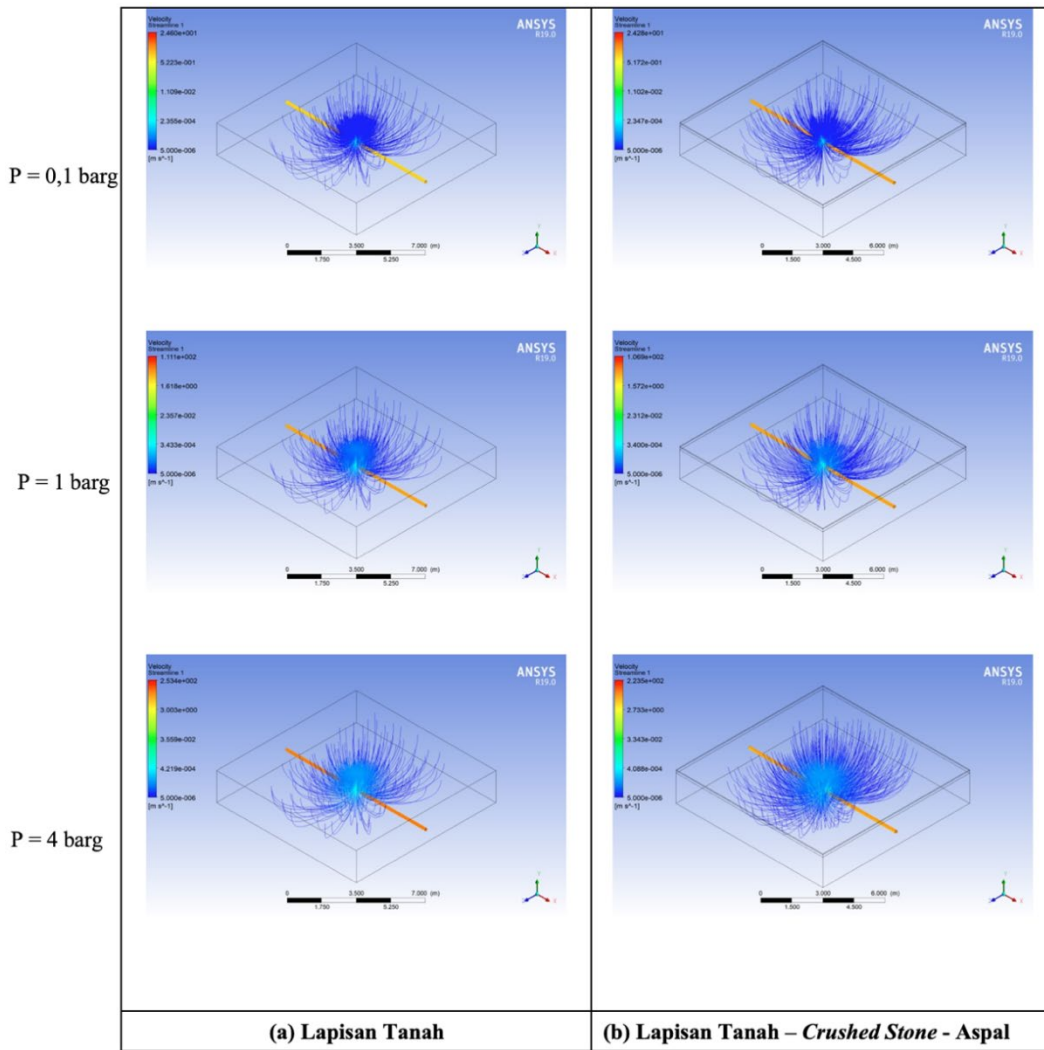
- Terdapat perbedaan laju aliran massa terbesar di permukaan timbunan antara lapisan tanah dan lapisan tanah-*crushed stone*-aspal, dimana untuk lapisan tanah memiliki nilai yang lebih kecil. Hal ini terjadi karena gas yang terdispersi tidak beraturan dalam lapisan tanah akan menyebar di media berpori. Kondisi ini ditunjukkan dengan beberapa puncak yang muncul pada kurva sumbu-X dan sumbu-Z. Perbedaan nilai laju alir maksimal di permukaan lapisan timbunan dapat terjadi karena peningkatan laju alir massa saat gas melalui *crushed stone* yang memiliki resistansi yang lebih rendah dibandingkan lapisan tanah. Meskipun di lapisan berikutnya gas akan melalui aspal yang memiliki resistansi tinggi, namun dengan ketebalan hanya 50 mm dibandingkan dengan *crushed stone* dengan ketebalan 150 mm, maka pada akhirnya berdasarkan hasil simulasi CFD nilai laju alir massa di permukaan model lapisan tanah-*crushed stone*-aspal lebih tinggi dibandingkan dengan model lapisan tanah.

Pada Tabel 6 di bawah ini dapat dilihat kurva streamline 3D pandangan tegak lurus pipeline (sumbu-YZ) dan sejajar pipeline (sumbu-XY) hasil simulasi lubang kebocoran posisi pukul 12.

Tabel 6. Kurva *Streamline* 3D Variasi Tekanan dan Tipe Lapisan Timbunan *Pipeline*

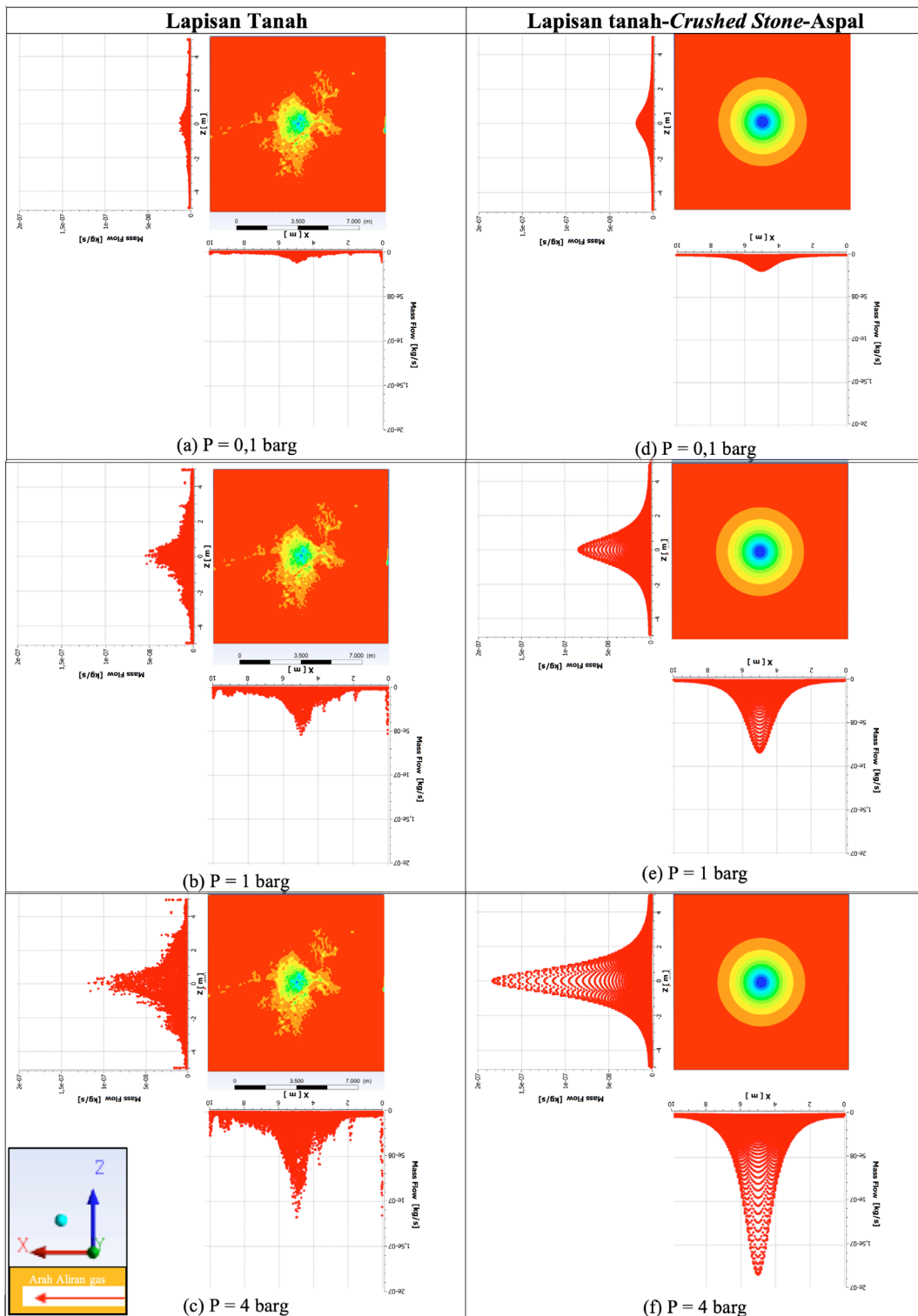


Untuk mendapatkan gambaran dispersi gas dalam tanah, tampilan 3D *streamline* pandangan secara isometrik untuk simulasi titik kebocoran pukul 12 adalah sebagai berikut.



Gambar 4. *Streamline* 3D Isometrik Kebocoran Pipeline Pukul 12

Pada Gambar 5 berikut ini terlihat kontur laju alir massa di permukaan masing-masing tipe lapisan timbunan *pipeline* pada variasi tekanan. Di sisi kiri gambar kontur adalah kurva nilai laju alir massa dalam arah sumbu-X dan di sisi bawah adalah kurva nilai laju alir massa dalam arah sumbu-Z.



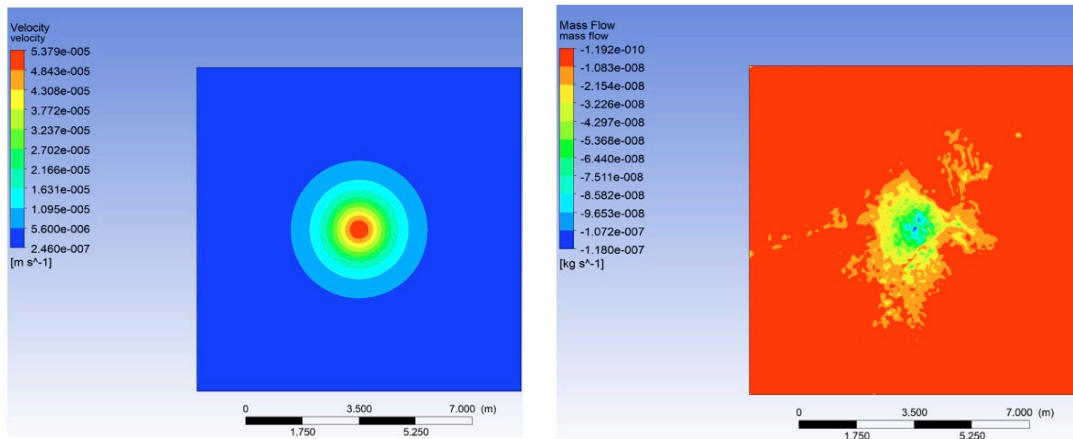
Gambar 5. Kontur Laju Alir Massa di Permukaan Timbunan *Pipeline* Untuk Setiap Variasi Tekanan dan Posisi Lubang Kebocoran Pukul 12

3.3. Analisis Dispersi Konsentrasi Kebocoran Gas di Permukaan Timbunan *Pipeline*

Dispersi gas di permukaan timbunan *pipeline* akan dianalisis pada jarak 2 – 3 meter dari posisi segaris dengan titik lubang kebocoran gas, karena pada gambar kontur laju aliran massa di permukaan tanah terlihat bahwa laju aliran massa gas yang terlepas ke udara semakin mengecil pada radius 3 meter dari titik kebocoran pada *pipeline*.

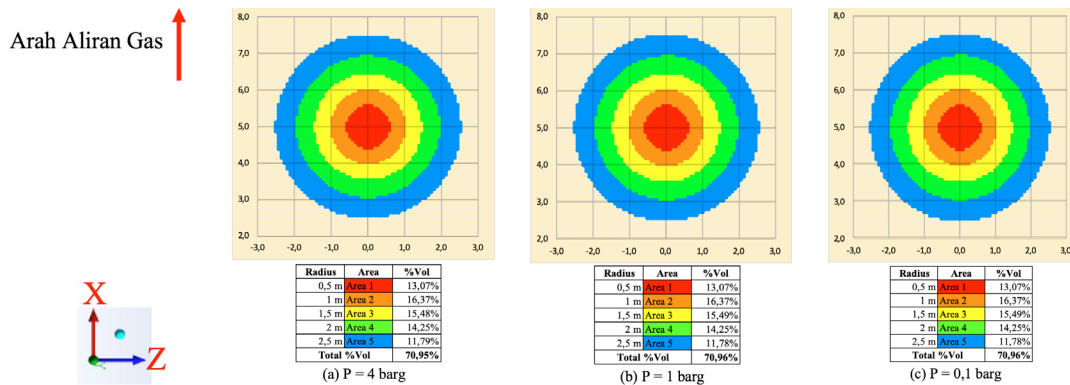
Analisis dispersi konsentrasi gas di permukaan tanah akan menggunakan data laju aliran massa pada model Lapisan Tanah–*Crushed Stone*–*Aspal*, karena berdasarkan data hasil simulasi CFD, kontur laju aliran massa gas dan nilainya pada sumbu-X dan sumbu-Z menunjukkan pola yang beraturan. Hal ini berbeda dengan data laju aliran

massa gas di permukaan untuk model lapisan tanah yang memiliki nilai yang tidak beraturan. Terkait hal ini, peneliti melakukan pengecekan dengan data kecepatan di permukaan untuk memastikan apakah kondisi ini terjadi karena bentuk grid dalam proses *meshing* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan Kontur Kecepatan (kiri) dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas (kanan) di Permukaan Timbunan *Pipeline* Lapisan Tanah pada P = 4 barg

Konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* merupakan nilai yang diperoleh dari kondisi *steady state* laju aliran massa kebocoran gas. Area yang dianalisis terbagi menjadi 5 (lima) area dalam radius setiap 0,5 meter dari pusat nilai tertinggi laju aliran massa sampai dengan radius 2,5 meter. Persentase konsentrasi gas diperoleh dari nilai perbandingan antara total laju aliran massa tiap area dibandingkan dengan nilai laju aliran massa kebocoran gas yang diperoleh dari lubang pada *pipeline*. Data nilai laju alir gas di permukaan timbunan tersebut diperoleh melalui *post processing* Ansys Fluent. Pada Gambar 7 berikut ini terlihat pola konsentrasi untuk setiap tekanan aliran gas.



Gambar 7. Konsentrasi Gas di Permukaan Timbunan *Pipeline* Lapisan Tanah–*Crushed Stone*–Aspal

Beberapa analisis yang diperoleh dari Gambar 6 dan data konsentrasi gas pada pembagian 5 (lima) area tersebut antara lain:

- Perubahan tekanan aliran gas tidak mempengaruhi konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* baik secara total sebesar 70,96% maupun pada masing-masing area yang dianalisis.
- Pusat konsentrasi gas berada pada titik yang sama dengan titik kebocoran pada *pipeline*. Pola ini akan membantu dalam menentukan titik kebocoran saat ditemukan indikasi dalam kegiatan survei kebocoran di lapangan.

4. KESIMPULAN

- Analisis jangkauan dan pola dispersi gas alam yang berasal dari kebocoran *pipeline* untuk beberapa variasi tekanan tipe lapisan timbunan adalah sebagai berikut:
 - Penelitian ini memberikan gambaran pola dispersi dalam tanah dan konsentrasi gas di permukaan tanah pada rentang tekanan 0,1 barg – 4 barg, tipe tanah porositas 22,6% dan permeabilitas gas $1,40 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ serta tipe lapisan timbunan jalan aspal.

- b. Jangkauan dispersi kebocoran gas di permukaan tanah atau aspal pada kisaran total konsentrasi 70%Vol untuk radius dari titik kebocoran *pipeline* sampai dengan 2,5 meter. Kondisi ini memberikan acuan kepada pelaksana inspeksi dan survei kebocoran *pipeline* untuk fokus dalam identifikasi awal kebocoran *pipeline* pada jarak di sisi kiri dan kanan *pipeline* sejauh 2,5 meter.
 - c. Simulasi CFD dengan parameter tekanan maksimal 4 barg diperoleh laju aliran massa sebesar $2,2544 \cdot 10^4$ kg/s. Seperti halnya dalam eksperimen Okamoto (2014), pada laju aliran massa yang tinggi simulasi tidak akan valid karena pada kenyataannya dorongan gas yang bocor dari *pipeline* akan menimbulkan perubahan porositas tanah di sekitarnya, sehingga menyebabkan perubahan resistansi tanah.
2. Pola konsentrasi gas di permukaan lapisan timbunan *pipeline* memberikan acuan pelaksanaan survei kebocoran di jalur *pipeline* dan dapat memperkirakan posisi *pipeline* maupun titik kebocoran dengan melakukan pengukuran konsentrasi gas secara tegak lurus *pipeline*. Kondisi kebocoran dengan diameter ekivalen sebesar 2 mm sudah menunjukkan karakteristik pola dispersi dan konsentrasi gas di permukaan timbunan *pipeline*, sehingga kejadian kebocoran pada *pipeline* dapat diidentifikasi secara dini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS, 2013, *Ansys Fluent User's Guide*, ANSYS Inc : Canonsburg
- ANSYS, 2013, *Ansys Fluent Theory Guide*, ANSYS Inc : Canonsburg
- Huang, X., Liu, S., Liu, J., dan Zang, Z., 2012, Theoretical Analysis of the Dispersion and Hazardous Range of Natural Gas Pipeline Leakage. *Icptt 2012*. doi:10.1061/9780784412619.041
- Moghadam, A. E., Gord, M. F., & Dashtebayaz, M. D., 2016, Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 185–196. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.062
- Moghadam, A. E., Gord, M. F., Arabkoohsar, A., & Moghadam, A. J., 2018, CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: Correlation development for leakage estimation. *Journal of Cleaner Production*, 199, 257–271. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.127
- Montiel, H., Vilchez, J. A., Casal, J., Arnaldos, J., 1998, Mathematical modelling of accidental gas releases. *Journal of Hazardous Materials* 59 (1998) 211–233.
- Okamoto, H., Gomi, Y., Akagi, H., 2014, Movement Characteristics of Hydrogen Gas Within the Ground and Its Detection at Ground Surface. *Journal of Civil Engineering and Science*. Vol. 3 Iss. 1 PP. 49-66
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 2007, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Pearson Education Limited, Edinburg Gate.
- Yuhu D., Huilin G., Jing'en Z., dan Yaorong F., 2003, Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines. *Chemical Engineering Journal* 92 (2003) 237–241.