

<b>HALAMAN JUDUL</b>	i
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	ii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b>	iv
<b>KATA PENGANTAR</b>	v
<b>DAFTAR ISI</b>	vii
<b>DAFTAR TABEL</b>	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	xiv
<b>DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN</b>	xv
<b>INTISARI</b>	xvi
<b>ABSTRACT</b>	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	4
1.3. Batasan Masalah	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	6
2.1. Penelitian Teoritis dan Matematik Kebocoran <i>Pipeline</i>	6
2.2. Eksperimen Kebocoran Gas	6
2.3. Penelitian Kebocoran Gas <i>Pipeline</i> Melalui Analisis Numerik Dua dan Tiga Dimensi	7
2.4. Penilaian Keaslian dan Penentuan Topik Penelitian	7
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b>	8
3.1. Sifat Gas Alam dan Dampak Kebocoran Gas	8
3.2. <i>Computational Fluid Dynamics</i> (CFD)	9
3.2.1. <i>Governing Equation</i> Untuk Aliran Fluida	10
3.2.2. Bentuk Integral dan Diferensial Persamaan Umum Aliran Fluida	11
3.2.3. Diskretisasi dan Penyelesaian Numerik	14
3.2.3.1 Diskretisasi Geometri (Pembuatan <i>Grid / Meshing</i> )	14
3.2.3.2 Diskretisasi Persamaan Transport	16

3.2.3.3	Skema Diskretisasi Persamaan Metode <i>Finite Volume</i>	18
3.2.4.	Pemodelan Media Berpori ( <i>Porous Media</i> )	20
3.2.5.	Solusi Persamaan Diskretisasi	22
3.2.6.	Konvergensi Solusi Numerik	24
3.3.	Visualisasi Aliran Fluida	25
3.4.	Simulasi CFD Ansys-Fluent	27
<b>BAB IV METODOLOGI PENELITIAN</b>		28
4.1.	Obyek Penelitian	28
4.2.	Prosedur Penelitian	29
4.3.	Langkah-langkah Simulasi	31
4.4.	Komparasi Kasus Kebocoran Gas Pada <i>Pipeline</i> Kondisi Tidak Tertanam Tanah	33
4.4.1.	Geometri dan Proses <i>Meshing</i>	33
4.4.2.	Pengaturan Material, Zona, dan Boundary Condition	34
4.4.3.	Pengaturan Parameter Solusi	35
4.4.4.	Hasil Komparasi Kasus Laju Alir Massa Kebocoran Gas	35
4.4.5.	Analisis Akurasi Nilai Laju Alir Massa Terkait Variasi Face Sizing <i>Meshing</i> Lubang Kebocoran Gas	36
4.5.	Komparasi Kasus Kebocoran Gas Pada <i>Pipeline</i> Tertanam Tanah	37
4.5.1.	Geometri dan Proses <i>Meshing</i>	38
4.5.2.	Pengaturan Material, Zona, dan <i>Boundary Condition</i>	39
4.5.3.	Pengaturan Parameter Solusi	41
4.5.4.	Hasil Komparasi Kasus dan Analisis Laju Alir Massa Kebocoran Gas	41
4.5.5.	Komparasi Nilai dan Kontur Tekanan, Kecepatan dan <i>Streamline</i>	45
4.6.	Validasi Analisa Numerik Kebocoran Gas Pada Pipeline Tertanam Media Berpori Mengacu Eksperimen Okamoto dkk. (2014)	48
4.6.1.	Validasi Kasus, Geometri dan Proses <i>Meshing</i>	49
4.6.2.	Pengaturan Material, Zona, <i>Boundary Condition</i> dan Parameter Solusi Validasi Eksperimen Okamoto dkk. (2014)	50
4.6.3.	Konvergensi Hasil Simulasi CFD	54
4.6.4.	Data Hasil Simulasi CFD	55
4.6.5.	Analisis dan Verifikasi Kebocoran Hidrogen di Permukaan Aspal	56

**BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN** 58

5.1. Variasi Model Simulasi Kebocoran Pipeline Tertanam di Media Berpori	58
5.1.1. Geometri <i>Pipeline</i> dan Kondisi Kedalaman <i>Pipeline</i>	58
5.1.2. Variasi Tekanan Operasi Penyaluran Gas Alam	59
5.1.3. Variasi Permeabilitas Media Berpori	59
5.1.4. Variasi Titik Kebocoran Pada <i>Pipeline</i>	59
5.2. Asumsi Penelitian dan Penentuan Basis Data Simulasi	60
5.3. Simulasi Kebocoran Gas Pada <i>Pipeline</i> Tertanam Dalam Tanah	62
5.3.1. Pembuatan Geometri Model	62
5.3.2. Proses <i>Meshing</i> Model Simulasi Kebocoran Gas Pada <i>Pipeline</i> Tertanam Dalam Tanah	63
5.3.3. Konvergensi Hasil Simulasi CFD	65
5.4. Analisis Hasil Simulasi CFD Kebocoran <i>Pipeline</i> Pada Posisi Pukul 12	67
5.5. Analisis Hasil Simulasi CFD Kebocoran <i>Pipeline</i> Pada Posisi Pukul 6	72
5.6. Analisis Hasil Simulasi CFD Kebocoran <i>Pipeline</i> Pada Posisi Pukul 3	76
5.7. Analisis Pengaruh <i>Viscous</i> dan <i>Inertial Resistance</i> Terhadap Nilai dan Pola Laju Alir Massa Gas	79
5.8. Analisis Dispersi Konsentrasi Kebocoran Gas di Permukaan Timbunan <i>Pipeline</i>	82

**BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN** 85

6.1. Kesimpulan	85
6.2. Saran	86

**DAFTAR PUSTAKA** 87

**LAMPIRAN** 88

Tabel 3.1.	Persamaan Aliran Fluida Newtonian Compressible	12
Tabel 3.2.	Klasifikasi Kelakuan Fisik Aliran Fluida	13
Tabel 3.3.	Terminologi Bagian dan Bentuk Mesh Suatu Geometri Analisis CFD	15
Tabel 4.1.	Komparasi Geometri dan Jumlah <i>Cells Meshing</i>	33
Tabel 4.2.	Pengaturan Solusi Simulasi CFD <i>Pipeline</i> Tidak Tertanam Tanah	35
Tabel 4.3.	Hasil Komparasi Laju Alir Massa Kebocoran Gas dari <i>Pipeline</i>	35
Tabel 4.4.	Hasil Simulasi Laju Alir Massa di Lubang Kebocoran <i>Pipeline</i>	37
Tabel 4.5.	Sifat-sifat Tanah Moghadam dkk. (2018)	40
Tabel 4.6.	Komparasi Pengaturan Zona, dan <i>Boundary Condition</i> Model <i>Pipeline</i> Tertanam Tanah	40
Tabel 4.7.	Pengaturan Solusi Simulasi CFD Pada <i>Pipeline</i> Tertanam Media Berpori	41
Tabel 4.8.	Hasil Komparasi Kasus Nilai Laju Alir Massa	41
Tabel 4.9.	Hasil Simulasi Variasi (SV) Nilai dp Untuk Analisis Laju Alir Massa Kebocoran Gas 0,05462 kg/s	42
Tabel 4.10.	Hasil Simulasi Regresi Linear Kedua Nilai dp	43
Tabel 4.11.	Hasil Simulasi Regresi Power Nilai dp	44
Tabel 4.12.	Data Simulasi Perbedaan Nilai <i>Permeability</i> Terhadap Pola Dispersi Kebocoran Gas	46
Tabel 4.13.	Fuida Simulasi CFD Eksperimen Okamoto dkk. (2014)	51
Tabel 4.14.	Lapisan Timbunan <i>Pipeline</i> dan Data Sifat-sifatnya, Okamoto dkk. (2014)	51
Tabel 4.15.	Hasil Simulasi CFD Variasi Nilai Diameter <i>Pipeline</i> (D) dan Diameter Kebocoran (d)	52
Tabel 4.16.	Nilai <i>Viscous</i> dan <i>Inertial Resistance</i> Lapisan Timbunan <i>Pipeline</i>	53
Tabel 4.17.	Data Hasil Simulasi CFD Untuk Nilai Laju Alir Massa Tertinggi	56
Tabel 5.1.	Variasi Parameter Untuk Pemodelan CFD	59
Tabel 5.2.	Sifat-sifat Media Berpori	60
Tabel 5.3.	Nilai <i>Viscous</i> dan <i>Inertial Resistance</i> untuk Setiap Lapisan Media Berpori	61
Tabel 5.4.	Data dan Kualitas <i>Meshing</i> Model Simulasi CFD Penelitian	65
Tabel 5.5.	Evaluasi Konvergensi Hasil Simulasi CFD	65

Gambar 3.1.	Konsekuensi Tipikal Ketika Terjadi Kebocoran Gas atau Liquid Yang Mudah Terbakar	8
Gambar 3.2.	<i>Lower Flammability Limit</i> (LFL) dan <i>Upper Flammability Limit</i> (UFL) Metana (Komposisi Utama Gas Alam)	9
Gambar 3.3.	Elemen Fluida Penentuan Persamaan Hukum Konservasi	10
Gambar 3.4.	Contoh Mesh Suatu Model Simulasi Numerik	14
Gambar 3.5.	Perbedaan Pengaturan Kerapatan Mesh	16
Gambar 3.6.	Domain Satu Dimensi Suatu Batang A-B	16
Gambar 3.7.	Pembentukan Grid Batang A-B	16
Gambar 3.8.	Skema Central Differencing	18
Gambar 3.9.	Skema First-order Upwind	19
Gambar 3.10.	Skema Second-order Upwind	19
Gambar 3.11.	Skema QUICK	20
Gambar 3.12.	<i>Pathline</i> Terbentuk Dari Jalur Aktual Partikel	25
Gambar 3.13.	<i>Streakline</i> Partikel Bahan Penanda yang Diinjeksikan Pada Suatu Aliran	26
Gambar 3.14.	<i>Streamline</i> Dalam Suatu <i>Velocity Field</i>	26
Gambar 4.1.	Model Fisik <i>Pipeline</i> Tertanam Dalam Tanah	28
Gambar 4.2.	<i>Flowchart</i> Prosedur Penelitian	30
Gambar 4.3.	<i>Flowchart</i> Simulasi CFD Penelitian	32
Gambar 4.4.	Komparasi Hasil dan Pengaturan <i>Meshing</i>	34
Gambar 4.5.	Komparasi Kontur Tekanan (atas) dan kecepatan (bawah) di Posisi Kebocoran Pada $P = 3$ bar	36
Gambar 4.6.	Geometri Kasus Kebocoran Gas Pada <i>Pipeline</i> Tertanam Tanah	38
Gambar 4.7.	Komparasi Bentuk <i>Meshing</i> Model <i>Pipeline</i> Tertanam Tanah	39
Gambar 4.8.	Kurva Regresi Linear Pertama Hubungan Antara dp Media Berpori dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas	42
Gambar 4.9.	Kurva Regresi Linear Kedua Hubungan Antara dp Media Berpori dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas	43
Gambar 4.10.	Kurva Regresi Power Pertama Hubungan Antara dp Media Berpori dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas	44

Gambar 4.11. Komparasi Nilai dan Kontur Tekanan (atas) dan Kecepatan (bawah) Untuk Variasi $D = 163,6$ mm, $d = 10$ mm, $p_1 = 5$ bara	45
Gambar 4.12. Komparasi <i>Streamline</i> Untuk Variasi $D = 163,6$ mm, $d = 30$ mm, $p_1 = 3$ bara	45
Gambar 4.13. Perbandingan Kontur Kecepatan, Tekanan dan <i>Streamline</i> Hasil Simulasi Perbedaan Nilai <i>Permeability</i> Terhadap Pola Dispersi Kebocoran Gas	47
Gambar 4.14. Perbandingan Hasil Simulasi Perbedaan Nilai Tekanan Terhadap Pola Dispersi Kebocoran Gas	48
Gambar 4.15. Geometri Pemodelan CFD Ansys-Fluent	50
Gambar 4.16. Hasil Proses <i>Meshing</i>	50
Gambar 4.17. Set-Up Peralatan Pengukuran Konsentrasi Gas Hidrogen Untuk Eksperimen Okamoto dkk. (2014)	52
Gambar 4.18. Kurva Residual Plot Iterasi 500 Model Kebocoran <i>Pipeline</i> Hidrogen $D=55$ mm dan $d=10$ mm	54
Gambar 4.19. Acuan Proses Validasi Hasil Simulasi CFD Terhadap Eksperimen Okamoto dkk. (2014)	55
Gambar 5.1. Sketsa Pemodelan Kebocoran <i>Pipeline</i>	62
Gambar 5.2. Model Fisik <i>Pipeline</i> Tertanam Dalam Tanah	63
Gambar 5.3. <i>Meshing</i> Pada <i>Pipeline</i> dan Lubang Kebocoran	63
Gambar 5.4. Hasil <i>Meshing</i> Pada Model Simulasi CFD <i>Pipeline</i> Tertanam di Lapisan Tanah – Crushed Stone – Aspal	64
Gambar 5.5. Hasil <i>Meshing</i> Polyhedra Software Fluent <i>Pipeline</i> Tertanam di Lapisan Tanah – Crushed Stone – Aspal	64
Gambar 5.6. Kurva <i>Streamline</i> 3D Hasil Simulasi Kebocoran Pukul 12	67
Gambar 5.7. <i>Streamline</i> 3D Isometrik Kebocoran <i>Pipeline</i> Pukul 12	68
Gambar 5.8. Kontur Laju Aliran Massa Di Permukaan Timbunan <i>Pipeline</i> Untuk Setiap Variasi Tekanan Kondisi Kebocoran Pukul 12	69
Gambar 5.9. Kurva <i>Streamline</i> 3D Hasil Simulasi Kebocoran Pukul 6	72
Gambar 5.10. <i>Streamline</i> 3D Isometrik Kebocoran <i>Pipeline</i> Pukul 6	73
Gambar 5.11. Kontur Laju Aliran Massa Di Permukaan Timbunan <i>Pipeline</i> Untuk Setiap Variasi Tekanan Kondisi Kebocoran Pukul 6	74
Gambar 5.12. Kurva <i>Streamline</i> 3D Hasil Simulasi Kebocoran Pukul 3	76
Gambar 5.13. <i>Streamline</i> 3D Isometrik Kebocoran <i>Pipeline</i> Pukul 3	77

Gambar 5.14. Kontur Laju Aliran Massa Di Permukaan Timbunan <i>Pipeline</i> Untuk Setiap Variasi Tekanan Kondisi Kebocoran Pukul 3	78
Gambar 5.15. Perbandingan Kontur Kecepatan (atas) dan Laju Alir Massa Kebocoran Gas (bawah) di Permukaan Lapisan Timbunan <i>Pipeline</i>	79
Gambar 5.16. Perbandingan Kontur Laju Alir Massa Lapisan Tanah dan Lapisan Crushed Stone pada Tekanan 4 barg dan Kebocoran Pukul 12	80
Gambar 5.17. Komparasi Nilai Laju Alir Massa lapisan Lapisan Tanah (kiri) dan Lapisan Tanah– <i>crushed stone</i> -aspal (kanan) pada tekanan 4 barg	81
Gambar 5.18. Konsentrasi Gas di Permukaan Timbunan <i>Pipeline</i> Untuk Lapisan Tanah– <i>Crushed Stone</i> –Aspal	83

Lampiran 1	Pemetaan Penelitian-penelitian Terkait Analisis Dispersi Kebocoran Gas Melalui Pipa	88
Lampiran 2	Persamaan Perhitungan Radius Berbahaya oleh Ledakan Awan Gas	116

$C_2$	<i>inertial resistance</i>	1/m
$d$	Diameter kebocoran pada <i>pipeline</i>	mm
$D$	Diameter <i>pipeline</i>	mm
$D_p$	Diameter partikel media purous	mm
$\dot{m}$	Laju alir massa	kg/s
$P/p$	Tekanan	bar
$SG$	<i>Specific Gravity</i>	
$T$	Temperatur	K
$\mathbf{u}$	Vektor kecepatan	
$\vec{v}$	Kecepatan Darcy	m/s
$\alpha$	<i>Permeability of Porous Media</i>	$m^2$
$1/\alpha$	<i>viscous resistance</i>	$1/m^2$
$\nabla p$	<i>Pressure drop</i>	Pa
$\epsilon$	Porositas	
$\rho$	<i>Density</i>	$kg/m^3$
$\mu$	Viskositas dinamik	Pa.s