

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSEMBAHAN	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR NOTASI	xviii
INTISARI	xxi
ABSTRACT	xxii
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Penelitian	4
1.4. Tujuan Penelitian	5
1.5. Manfaat Penelitian	6
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Karakteristik <i>Thermal</i> Pipa <i>Polyethylene</i> (PE)	7
2.2. Distribusi Tegangan Pada Pipa Bawah Tanah	8
2.3. Kegagalan (<i>Defect</i>) dan Perbaikan (<i>Patching</i>) pada pipa PE	10
2.4. Kebaruan dari Penelitian	12
BAB III	20
LANDASAN TEORI	20
3.1 Tegangan Internal dan Beban Eksternal	20



3.1.1	Tegangan Internal Pada Pipa	22
3.1.2	Beban Eksternal Pada Pipa	24
3.1.3	Beban Statis Pada Pipa	25
3.1.4	Beban Dinamis Pada Pipa	28
3.2	Kegagalan Pada Pipa Bawah Tanah	37
3.3	Analisis Kegagalan	38
3.4	Pipa <i>Polyethylene</i> (PE)	39
3.5	Tegangan pada Pipa yang Memiliki <i>Hole Defect</i>	47
3.6	<i>Finite Element Method</i>	51
BAB IV		54
METODE PENELITIAN		54
4.1	Alat dan Bahan	54
4.2	Diagram Alir Penelitian	55
4.2.1	Penentuan Asumsi dan Kondisi Batas	55
4.2.2	Pemodelan Menggunakan <i>Finite Element</i>	59
4.2.3	Validasi Pemodelan	63
4.2.4	Memperhalus <i>Mesh</i> Pada Lubang Elips dan Area Sekitarnya	64
4.2.5	Variasi Model	65
4.2.5.1	Variasi Jumlah Sirip dan Orientasi Sirip pada <i>Patch</i>	65
4.2.5.2	Variasi Ketinggian Sirip pada <i>Patch</i>	68
4.2.5.3	Variasi Diameter Panjang Pada Lubang Elips	68
4.2.6	Analisis Hasil Simulasi dan Kesimpulan	69
BAB V		71
HASIL DAN PEMBAHASAN		71
5.1	Pemodelan Awal	71
5.1.1	Pemodelan Pipa PE80 yang Memiliki Cacat Permukaan Lubang Elips	72
5.1.2	Pemodelan Pipa yang Mengalami Beban Internal dan Eksternal	74



5.1.3	Pemodelan Pipa PE80 dengan Penambahan Tambalan (<i>Patching</i>) PE100	75
5.1.4	Proses Meshing	76
5.2	Simulasi dan Validasi Pemodelan	80
5.3	Variasi Model	90
5.3.1	Variasi Jumlah Sirip (n) dan Orientasi Sirip	90
5.3.2	Variasi Ketinggian Sirip	103
5.3.3	Variasi Diameter Panjang (a) Lubang Elips pada Pipa PE80	110
5.3.4	Pembahasan	115
BAB IV		118
KESIMPULAN DAN SARAN		118
6.1.	KESIMPULAN	118
6.2.	SARAN	118
DAFTAR PUSTAKA		120



DAFTAR TABEL

Tabel 2- 1	Rangkuman Tinjauan Pustaka	13
Tabel 3- 1	Modulus Reaksi Tanah E'	26
Tabel 3- 2	Penentuan metode beban kritis yang dipilih dalam desain	30
Tabel 3- 3	Karakteristik mekanis PE80 dan PE100	40
Tabel 3- 4	Nilai MRS PE80B and PE100 dengan perkiraan usia pakai 50 tahun	42
Tabel 4- 1	Spesifikasi Sistem	55
Tabel 4- 2	Karakteristik lapisan tanah di sekitar pipa	61
Tabel 4- 3	Variasi Jumlah Sirip dan Orientasi Sudut Sirip	67
Tabel 4- 4	Variasi ketinggian sirip penguat terhadap tegangan Von Mises	68
Tabel 4- 5	Variasi diameter panjang lubang elips terhadap tegangan Von Mises	69
Tabel 5- 1	Ukuran Mesh pada permukaan Pipa PE80	78
Tabel 5- 2	Ukuran High Quality Meshing pada Sekitar Lubang Elips	82
Tabel 5- 3	Validasi Pemodelan Tegangan Maksimum Pipa PE80 dengan Tambalan PE100	83
Tabel 5- 4	Validasi Pemodelan Regangan pada Pipa PE80 dengan Tambalan PE100	86
Tabel 5- 5	Validasi Pemodelan Lubang elips dengan Ketebalan Tambalan 45 mm	89
Tabel 5- 6	Nilai Tegangan Von Mises dengan Penambahan 1 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi	92
Tabel 5- 7	Nilai Regangan Von Mises dengan Penambahan 1 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi	94
Tabel 5- 8	Nilai Maximum Tegangan Von Mises dengan Penambahan 2 dan 3 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi	96



Tabel 5- 9	Nilai Regangan dengan Penambahan 2 dan 3 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi	99
Tabel 5- 10	Nilai Tegangan Von Mises Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi Sirip	101
Tabel 5- 11	Nilai Regangan pada Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi Sirip	102
Tabel 5- 12	Nilai Tegangan Von Mises pada Variasi Ketinggian Sirip pad Patch	106
Tabel 5- 13	Nilai Regangan pada Variasi Ketinggian Sirip pad Patch	107
Tabel 5- 14	Tegangan dan Regangan Maksimum pada Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80	112
Tabel 5- 15	Nilai Tegangan Von Mises dan Regangan pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips	116



DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Hoop stress	23
Gambar 3.2	Kurva KHe	27
Gambar 3.3	Kurva Be	27
Gambar 3.4	Kurva Ee	28
Gambar 3.5	Kurva KHh	29
Gambar 3.6	Kurva impact factor Fi	31
Gambar 3.7	Ilustrasi single dan tandem/double axle	32
Gambar 3.8	Kurva GHh	32
Gambar 3.9	Kurva KLh	34
Gambar 3.10	Kurva GLh	34
Gambar 3.11	Teori Von Mises	38
Gambar 3.12	Variasi tensile strength pada PE80 terhadap test temperature	40
Gambar 3.13	Pengaruh temperatur terhadap yield stress pada material PE100	43
Gambar 3.14	Pengaruh temperatur terhadap modulus elastisitas pada material PE100	43
Gambar 3.15	Variasi yield strain dengan temperatur pada material HDPE	44
Gambar 3.16	Jenis-jenis patch berdasarkan bentuknya	45
Gambar 3.17	Socket dengan material PE100 yang digunakan untuk saddle fusion patch	46
Gambar 3.18	Saddle fusion patch pada pipa PE80	46
Gambar 3.19	(a) Silinder atau pipa di bawah pengaruh tekanan internal. (b) Distribusi tegangan hoop dan tegangan aksial silinder atau pipa pada bidang x-y	48
Gambar 3.20	Distribusi tegangan di sekitar <i>elliptical hole</i> pada suatu <i>infinite plate</i> yang dibebani tegangan tarik tegak lurus terhadap sumbu utama	49



Gambar 3.21	Stress Concentration Factor (SCF) Vs. Sudut Orientasi elliptical hole pada suatu tabung tebal berbahan SA-372 steel	50
Gambar 3.22	Meshing pada pipa	51
Gambar 4.1	Diagram Alir Penelitian	58
Gambar 4.2	(a) Model finite element pipa yang di-patch dan dikubur di dalam tanah. (b) Pipa bertekanan dengan lubang elips (tanah dihilangkan).	59
Gambar 4.3	Pemodelan pipa yang memiliki lubang elips	60
Gambar 4.4	(a) Dimensi saluran parit tanah dan pipa yang dinyatakan dalam satuan mm (b) Beban kendaraan yang melintas.	61
Gambar 4.5	Assignment material properties pada pemodelan yang dilakukan, contoh (a) pada pipa PE80 dan (b) pada lapisan tanah disekitar pipa PE80	62
Gambar 4.6	Pemodelan pipa yang sudah ditambah dengan saddle fusion patch	63
Gambar 4.7	Mesh yang telah ditingkatkan kualitasnya di sekitar lubang elips.	65
Gambar 4.8	Pemodelan pipe PE80 dengan tebal tambalan (t) konstan 45 mm dan lebar patch (w) konstan 76 mm	66
Gambar 4.9	Perubahan diameter panjang (2a) lubang elips pada pipa	69
Gambar 5.1	Bentuk Geometri Pipa PE80 dengan Lubang Elips	73
Gambar 5.2	(a) Ilustrasi kontak pada model antar lapisan tanah (b) Ilustrasi kontak antara lapisan tanah dengan material tambalan PE100 (c) Ilustrasi kontak antara pipa PE80 dengan material tambalan PE100	74
Gambar 5.3	Kondisi Pembebanan dan Parameter Pada Pemodelan	75
Gambar 5.4	Diagram benda bebas pada pipa PE80 dengan tambalan yang dikubur dalam tanah	76



Gambar 5. 5	Geometri pipa PE80 dengan tambalan (patching) PE100	77
Gambar 5. 6	Meshing pada lapisan tanah	78
Gambar 5. 7	Meshing pada permukaan pipa PE80	79
Gambar 5. 8	Meshing pada pipe PE80 dengan saddle fusion patch PE100	80
Gambar 5. 9	Nilai Skewness dari pemodelan yang dilakukan	
Gambar 5. 10	Simulasi pipa PE80 dengan pembebanan eksternal dan internal	82
Gambar 5. 11	High Quality Meshing pada area Lubang Elips	82
Gambar 5. 12	Nilai Maximum Tegangan Von Mises pada variasi Ketebalan Patch (a) 40 mm, (b) 45 mm, (c) 50 mm, (d) 55 mm	84
Gambar 5. 13	Grafik Validasi Nilai Tegangan pada Pemodelan Pipa dengan Material Tambalan	85
Gambar 5. 14	Regangan Maksimum Pipa PE80 pada Variasi Ketebalan Patch (a) 40 mm, (b) 45 mm, (c) 50 mm, dan (d) 55 mm	87
Gambar 5. 15	Grafik Validasi Nilai Regangan pada Pemodelan Pipa dengan Material Tambalan	88
Gambar 5. 16	Validasi Pemodelan Lubang Lubang elips yang Bertumbuh	90
Gambar 5. 17	Grafik Validasi Pemodelan Variasi Ukuran Diameter Panjang Lubang Elips	91
Gambar 5. 18	Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 1 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	93
Gambar 5. 19	Grafik Perubahan Tegangan Von Mises Pada Penambahan 1 Sirip	94
Gambar 5. 20	Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 1 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	95
Gambar 5. 21	Grafik Perubahan Regangan Von Mises Pada Penambahan 1 Sirip	96



Gambar 5. 22	Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 2 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	97
Gambar 5. 23	Grafik Perubahan Tegangan Von Mises Pada Penambahan 2 dan 3 Sirip	98
Gambar 5. 24	Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 2 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	99
Gambar 5. 25	Grafik Perubahan Regangan Maksimum V. Mises Pada Penambahan 2 3 Sirip	100
Gambar 5. 26	Nilai Tegangan Maksimum Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 3 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	101
Gambar 5. 27	Nilai Regangan Maksimum Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 3 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)	101
Gambar 5. 28	Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi	103
Gambar 5. 29	Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi	104
Gambar 5. 30	Tegangan Max Pada Variasi ketinggian Sirip, $h = 2t$, 90 mm Mises pada Area Lubang Elips pada Permukaan Pipa PE80	105
Gambar 5. 31	Nilai Regangan Maksimum pada Lubang Elips di permukaan Pipa PE80 dengan variasi ketinggian sirip $h = 2t$ (90 mm)	105
Gambar 5. 32	Tegangan Max Pada Variasi ketinggian Sirip, $h = 3t$, 135 mm Mises pada Area Lubang Elips pada Permukaan Pipa PE80	106
Gambar 5. 33	Nilai Regangan pada Lubang Elips di permukaan Pipa PE80 dengan variasi ketinggian sirip $h = 3t$ (135 mm)	106



Gambar 5. 34	Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Ketinggian Sirip	107
Gambar 5. 35	Nilai Regangan Pada Pipa PE80, dengan Variasi Ketinggian Sirip pada Patch	108
Gambar 5. 36	Kenaikan Nilai Tegangan Von Mises pada pangkal Sirip tambalan PE100 (ki - ka; 45 mm, 90 mm, dan 135 mm)	109
Gambar 5. 37	Grafik Kenaikan Tegangan Maksimum pada Pangkal Sirip Patching PE100	110
Gambar 5. 38	Kenaikan Nilai Regangan Von Mises pada pangkal Sirip tambalan PE100 (ki - ka; 45 mm, 90 mm, dan 135 mm)	110
Gambar 5. 39	Grafik Kenaikan Regangan Maksimum pada Pangkal Sirip Patching PE100	111
Gambar 5. 40	Tegangan Maksimum Von Mises dengan Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80	113
Gambar 5. 41	Grafik Tegangan dengan Variasi Ukuran Lubang Elips pada Pipa PE80	114
Gambar 5. 42	Regangan Maksimum Von Mises dengan Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80	114
Gambar 5. 43	Grafik Regangan dengan Variasi Ukuran Lubang Elips pada Pipa PE80	115
Gambar 5. 44	Grafik Tegangan Maksimum pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips	117
Gambar 5. 45	Grafik Regangan pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips	117

DAFTAR NOTASI

t	: Ketebalan pipa minimum untuk menahan tekanan P , mm
P	: Tekanan fluida di dalam pipa, psi
D	: Diameter luar pipa, mm
S	: <i>Yield strength</i> material, psi
E	: Faktor kualitas
W	: Koefisien joint/pengelasan
Y	: Koefisien material
σ_A	: Tegangan aksial, psi
F	: Gaya yang bekerja searah panjang pipa, Pa
A	: Luas penampang pipa, m^2
σ_{zz}	: Tegangan longitudinal, Pa
P_i	: Besar tekanan internal pipa, Pa
d_o	: Diameter luar pipa, mm
t	: Tebal pipa, mm
σ_B	: Bending stress, MPa
M	: Bending moment pada pipa
Z	: Modulus permukaan (section modulus)
$\sigma_{\theta\theta}$: Tegangan hoop, MPa
σ_{therm}	: Thermal stress
E_p	: Modulus elastisitas material
α_t	: Koefisien suhu
Δ_T	: Beda temperature
SH_e	: Tegangan circumferential akibat beban tanah, MPa
KH_e	: Faktor kekakuan tanah untuk tegangan circumferential
Be	: Faktor penimbunan untuk beban tanah
Ee	: Faktor penggalan



- γ : Berat jenis tanah, kN/m³
- W : tekanan yang diberikan pada permukaan, MPa
- P : beban dari roda kendaraan, bisa berupa nilai dari single axle ataupun tandem axle sesuai dengan desain, kN
- Ap : luasan area kontak antara roda dengan pipa atau tanah diatas pipa, m²
- W : tekanan yang diberikan pada permukaan, MPa
- KHh : faktor kekakuan dari kualitas jalan terhadap beban circumferential cyclic
- GHh : faktor bentuk kondisi jalan terhadap beban circumferential cyclic
- Fi : faktor impak
- L : faktor konfigurasi axle
- R : faktor tipe jalan
- W : tekanan yang diberikan pada permukaan, kPa
- K_{Lh} : faktor kekakuan dari kualitas jalan terhadap beban *longitudinal cyclic*
- G_{Lh} : faktor bentuk kondisi jalan terhadap beban *longitudinal cyclic*
- S₂ : maksimum tegangan *longitudinal* yang dialami pipa perlintasan jalan, kPa
- S_{He} : tegangan *circumferential* pada pipa akibat dari tanah yang melingkupi pipa, kPa
- S_{Hi} : tegangan Barlow, kPa
- ΔS_{Lh} : tegangan *longitudinal cyclic*, kPa
- E_s : modulus Young dari pipa, kPa
- α_t : koefisien ekspansi *thermal*, per °C
- T₁ : temperatur saat pipa pertama kali dipasang, °C
- T₂ : temperatur operasi maksimum atau minimum (yang dipilih), °C
- ν_s : *Poisson ratio* dari pipa



- σ_{rr} : Tekanan radial
- k : Rasio antara diameter luar terhadap diameter dalam pipa
- $\sigma_{\beta\beta(\max)}$: Tegangan tarik maksimum
- σ : Tekanan tarik

INTISARI

Instalasi pipa bawah tanah merupakan elemen penting dalam menunjang kegiatan industri. Kerusakan pada pipa-pipa ini tipikal dan sering diperbaiki menggunakan teknik penambalan. Studi sebelumnya telah menganalisis distribusi tekanan pada pipa dengan tambalan untuk mengevaluasi keefektifannya dan responsnya terhadap kerusakan pertumbuhan. Makalah ini mengkaji pengaruh penambahan fin pada patch fusi sadel, dengan variasi jumlah fin, orientasi sudut fin, dan tinggi fin, terhadap distribusi tegangan pada pipa PE 80. Penelitian dilakukan pada pipa polietilen densitas menengah (MDPE80) dengan cacat elips, yang diperbaiki menggunakan tambalan sadel fusi dengan sirip sebagai pengaku. Tambalan itu terbuat dari polietilen densitas tinggi (HDPE100). Variasi dalam penelitian ini meliputi tinggi, jumlah, dan orientasi sirip, serta dimensi cacat yang mewakili pertumbuhan retakan. Studi ini menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga ANSYS 2020. Hasil simulasi menunjukkan bahwa menambahkan sirip pada tambalan fusi sadel dan memvariasikan ketinggiannya pada permukaan pipa yang retak dapat mengurangi tegangan. Pengurangan tekanan yang dihasilkan dari penambahan lebih banyak sirip tidak hanya dipengaruhi oleh jumlahnya tetapi juga oleh orientasinya. Hasil studi memberikan gambaran tentang ketebalan tambalan yang optimal untuk permukaan pipa saat diperkuat dengan sirip. Variasi ukuran lubang dilakukan untuk mensimulasikan tingkat kerusakan yang berbeda dan mencegah terulangnya kerusakan setelah perbaikan.

Kata kunci: pipa bawah tanah, tambalan *saddle fusion*, analisis elemen hingga, pengurangan tegangan, ketebalan tambalan yang optimal.

ABSTRACT

The installation of underground pipes is an essential element in supporting industrial activities. Damage to these pipes is typical and is often repaired using patching techniques. Previous studies have analyzed the distribution of stress on pipes with patches to evaluate their effectiveness and response to damage growth. This paper examines the effects of adding fins to saddle fusion patches, with variations in the number of fins, fin angle orientation, and fin height, on the distribution of stress on PE 80 pipes. The research was conducted on a medium-density polyethylene pipe (MDPE80) with elliptical defects, which were repaired using a saddle fusion patch with a fin as a stiffener. The patch was made of high-density polyethylene (HDPE100). The variations in the research included the height, number, and orientation of the fins, as well as the dimensions of the defects as representative of crack growth. The study employed the finite element analysis software ANSYS 2020. The simulation results indicate that adding fins to the saddle fusion patch and varying their height on the surface of the cracked pipe can reduce stress. The stress reduction resulting from adding more fins is not only influenced by their number but also by their orientation. The study's results provide an overview of the optimal thickness of the patch for the surface of the pipe when reinforced with fins. The variations in the hole size were carried out to simulate different degrees of damage and prevent the recurrence of the damage after repair.

Keywords: *underground pipes, saddle fusion patches, finite element analysis, stress reduction, optimal patch thickness.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Instalasi perpipaan saat ini masih menjadi pilihan utama dalam proses distribusi fluida seperti air, gas dan minyak bumi baik yang masih berupa minyak mentah maupun produk jadi. Beberapa produk bahan kimia juga memanfaatkan jalur instalasi perpipaan sebagai fasilitas distribusi. Seiring dengan kebutuhan distribusi, jalur instalasi perpipaan tidak hanya jalur diatas tanah, namun juga jaringan instalasi bawah tanah. Instalasi perpipaan bawah tanah memiliki kelebihan dari instalasi di atas tanah. Selain memiliki resiko yang lebih rendah, instalasi perpipaan bawah tanah juga memiliki biaya konstruksi dan perawatan yang relatif lebih rendah dibanding dengan tipe instalasi perpipaan lainnya. Jenis material yang digunakan pada instalasi perpipaan juga mulai beragam, mengacu pada kebutuhan fluida yang dialirkan dan kondisi operasi yang berlaku.

Pipa yang ditanam dalam tanah dalam kurun waktu yang lama dapat mengalami kerusakan yang disebabkan oleh faktor eksternal dan faktor internal dari pipa. Kondisi lingkungan, seperti kelembaban tanah, kondisi kimia dari tanah dan temperature lingkungan merupakan kondisi eksternal yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa yang secara umum adalah korosi pada pipa. Beban tanah, beban kendaraan yang melewati merupakan faktor eksternal yang dapat mengakibatkan kegagalan structural pada pipa. Sedangkan besarnya tekanan kerja, jenis fluida yang dilewatkan pada pipa dan kegagalan atau cacat produksi adalah faktor internal yang dapat menyebabkan kegagalan pada pipa.

Untuk mengurangi kegagalan pada pipa, pemilihan material pada fase perancangan menjadi salah satu faktor yang harus diperhatikan. Pipa berbahan dasar

Polyethylene (PE) saat ini banyak digunakan disamping pipa berbahan material logam. Pipa-pipa berbahan PE memiliki karakteristik seperti mudah digulung (*coil-ability*), ringan, fleksibel, keuletan tinggi, dapat dilas (*weldability*), tahan korosi, tahan abrasi dan tahan benturan. Hal ini juga menyebabkan biaya instalasi dan perawatan pipa-pipa berbahan PE lebih rendah dibandingkan menggunakan jenis pipa berbahan logam.

Disisi lain, pipa berbahan PE rentan terhadap tekanan yang berlebih baik dari internal maupun eksternal pipa. Selain beban tanah, aspal dan kendaraan yang melewati, pergerakan tanah yang ekstrim akibat gempa bumi dapat menjadi penyebab kegagalan pada pipa-pipa berbahan material PE. Pada umumnya pipa PE bekerja pada tekanan kerja 4 MPa – 6 MPa, tekanan kerja yang terlalu tinggi dapat berakibat pada kegagalan pipa. Keretakan (*crack*) pada permukaan pipa PE merupakan jenis kerusakan yang paling banyak ditemukan pada pipe PE yang dikubur dalam tanah. Keretakan ini apabila tidak segera diantisipasi dengan perbaikan, dapat mengakibatkan kerusakan pada pipa dan kegagalan pada jaringan perpipaan sehingga mengganggu system distribusi fluida. Secara garis besara kegagalan retak pada pipe PE dikelompokkan dalam 2 kategori, yaitu pertumbuhan retak lambat - *slow crack growth* (SCG) dan penyebaran retak cepat – *rapid crack propagation* (RCP).

RCP terjadi lebih cepat dan merupakan proses kegagalan retak yang melibatkan tekanan kerja yang mendekati tekanan kerja maksimum yang diijinkan. RCP memiliki tipe retakan yang halus. SCG pada umumnya terjadi pada pipa yang bekerja pada tekanan dibawah tegangan luluhnya secara konstan dan dalam waktu yang lama. Retak pada pipa akan dimulai dari sisi dalam pipa menuju sisi luar. Pertumbuhan retak yang terjadi relatif stabil dengan diikuti deformasi plastis pada material. Sebagian besar tipe retakan yang terjadi pada pipa PE adalah tipe retakan SCG. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Khademi Zahedi dan Shishesaz pada tahun 2018, lubang yang ditimbulkan oleh retakan berbentuk elips.

Perbaikan pada lubang elips akibat retakan pada umumnya adalah melakukan penambalan atau *patching*. Dalam penelitian yang sama, Khademi – dkk, menyimpulkan bahwa tipe tambalan pipa yang paling efektif untuk material PE yang



dikubur dalam tanah adalah tipe tambahan penuh atau *saddle patch fusion*. Tipe tambalan ini dapat memberikan pengurangan pada tegangan *Von Mises* terbesar dibandingkan dengan tipe tambalan lain.

Lubang elip pada pipa dapat mempengaruhi distribusi tegangan yang bekerja pada pipa. Perbedaan besarnya lubang pada pipa akan memberikan perbedaan pada distribusi tegangan pada pipa. Distribusi tegangan yang bekerja pada pipa dapat berpengaruh pada kehandalan pipa sebagai fasilitas distribusi fluida, sehingga analisis distribusi tegangan pada pipa akibat besarnya lubang elips pada pipa dapat membantu dalam pengambilan keputusan untuk mendukung proses produksi yang handal.

Dalam penelitian ini dilakukan analisis mengenai pengaruh ketebalan tambalan pada pipa dengan menggunakan metode *saddle fusion patch* dengan tambahan sirip terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada pipa PE. Hal ini diperlukan untuk memastikan bahwa penambalan yang dilakukan sudah optimal untuk mencegah terjadinya kebocoran berulang pada pipa tersebut. Analisa ketebalan patch dan penambahan sirip pada *patch* dilakukan dengan tujuan agar proses penambalan yang dilakukan selain dapat mencegah kebocoran berulang juga membuat pekerjaan yang dilakukan menjadi lebih ekonomis.

Pada penelitian ini akan dipelajari pengaruh penggunaan sirip penguat terhadap kekuatan dari pipa. Geometri retak dan ketebalan *patch* didasarkan pada penelitian dari Sulaiman dkk. (2021).

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan Utama yang dikaji dalam penelitian ini adalah pengaruh penambahan sirip pada tambalan dengan metode *saddle fusion patch* dan variasi besarnya lubang defect terhadap distribusi tegangan pada pipa PE80. Rumusan masalah dalam penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan sirip dengan variasi jumlah sirip, orientasi sudut sirip dan ketinggian sirip pada tambalan (*patch*) terhadap distribusi tegangan pada pipa?
2. Bagaimana pengaruh variasi ukuran lubang elips pada pipa yang telah di tambal terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada pipa?

1.3. Batasan Penelitian

Pembatasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Khademi-Zahedi, dkk (2018) dan Sulaiman (2021). Secara terperinci, pembatasan masalah dan kondisi yang dipergunakan pada penelitian ini sebagai berikut,

1. Pipa berbentuk lurus diletakkan searah sumbu horizontal dan dikubur dalam tanah dengan kedalaman 125 cm.
2. Pada pemodelan, panjang pipa dimodelkan dengan dengan Panjang 500 mm dan panjang tambalan 76 mm.
3. Pipa yang digunakan adalah pipa dengan material *Medium Polyethylene (MDPE)*, PE80, dengan diameter luar pipa adalah 122.936 mm dan ketebalan pipa 21.336 mm.
4. Tambalan (*patch*) yang digunakan adalah pipa dengan maerial *High Density Polyethylene (HDPE)* PE100.
5. Pipa mengalami pembeban internal dan eksternal. Beban internal berasal dari tekanan kerja fluida yang bekerja di dalam pipa sedangkan beban eksternal berasal dari beban lapisan tanah di atas pipa dan kendaraan yang melalui di atasnya.
6. Pipa memiliki *defect* berupa lubang elips yang dianggap mewakili bentuk *defect* yang disebabkan oleh retak (*crack*). Lubang elips berada pada posisi 0° dari pipa PE80.

7. Perbaikan pada *defect* yang terjadi pada pipa dilakukan dengan metode *saddle fusion patch* dengan penambahan sirip yang di variasikan untuk ketinggian dan jumlah sirip pada *patch*. Pemilihan metode tambalan yang digunakan mengacu pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Khademi-Zahedi (2018), *Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes*.
8. Fluida yang mengalir dalam pipa adalah gas dengan tekanan yang konstan sehingga memberikan beban internal yang bersifat konstan terhadap pipa.
9. Penelitian ini akan menggunakan metode simulasi elemen hingga (*finite element method*) dengan alat bantu perangkat lunak ANSYS 20 R220 R2.

1.4. Tujuan Penelitian

Dalam penelitian pendahuluan yang dilakukan, perbaikan pada *defect* dilakukan dengan cara ditambal dengan metode *saddle fusion patch*. Variasi ketebalan yang dilakukan pada penelitian sebelumnya bertujuan untuk melihat ketebalan optimal dari material *patching* yang di aplikasikan sehingga dapat menurunkan tegangan maksimum von mises yang bekerja pada area *defect* di permukaan pipa PE80.

Pada penelitian ini, dilakukan pemodelan dengan memberikan penambahan sirip pada material *patching*. Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh pemberian sirip pada *saddle fusion patch* dengan variasi jumlah sirip, orientasi sudut sirip dan ketinggian sirip terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada pipa PE80.
2. Mengetahui pengaruh variasi ukuran *defect* pada permukaan pipa yang telah ditambal dengan *saddle fusion patch* bersirip terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada pipa PE80.



1.5. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini akan memberikan gambaran mengenai pengaruh pemberian sirip pada *saddle fusion patch* pada pipa yang mengalami kerusakan atau *defect* yang disebabkan oleh kegagalan retak (*crack*). Variasi lubang yang dilakukan bertujuan untuk melakukan simulasi agar kerusakan yang terjadi tidak berulang setelah diberikan tambalan. Informasi dari penelitian ini akan memberikan masukan bagi pemilihan material *patch* yang optimal dan efisien dan dipergunakan sebagai pertimbangan dalam menentukan langkah perbaikan yang efektif dan ekonomis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karakteristik *Thermal* Pipa *Polyethylene* (PE)

Pipa berbahan *polyethylene* memiliki karakter yang ringan, fleksibel, mudah digulung (*coil-ability*), memiliki keuletan yang tinggi, mampu di las (*weldability*), lebih tahan terhadap korosi, abrasi dan beban impact dibandingkan pipa dengan material logam. Sifat mekanik pada pipa *polyethylene* dipengaruhi oleh suhu lingkungan tempat pipa tersebut dioperasikan. Pada pipa bawah tanah, suhu tanah mempengaruhi sifat mekanis dari pipa.

Kekuatan material berbahan *polymer* diketahui sensitif terhadap perubahan temperatur dan secara umum hal ini menjadi *limiting factor* dari penggunaan pipa *polyethylene*. Sehingga pemanfaatan pipa *polyethylene* diterapkan pada temperatur operasi di bawah *glass transition temperature*, yaitu rentang temperature di mana substrat polimer berubah dari bahan bersifat mekanis kaku menjadi bahan lunak (tidak meleleh), dan biasanya diukur dalam hal kekakuan, atau modulus. Sebuah penelitian yang dilakukan oleh Merah, dkk (2006) dengan memberikan beban tarik dengan rentang beban 32 MPa – 9 MPa pada pipa *polyethylene* pada variasi rentang temperatur -10 °C – 70 °C. Dari hasil penelitian diketahui bahwa *yield stress* dan modulus elastisitas pada pipa menurun secara linier ketika temperature diturunkan, sedangkan *yield strain* mengalami peningkatan walau sedikit.

Pengaruh perubahan temperatur dan beban tarik pada pipa *polyethylene* juga terjadi pada pipa yang mempunyai defect pada permukaan pipa. Sebuah penelitian pada fenomena ini dilakukan oleh Murariu & Sajic (2016). Pada penelitiannya, Murariu dkk memberikan variasi suhu, kecepatan fluida dan pembebanan pada pipa yang memiliki defect permukaan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat

korelasi antara perubahan temperatur dengan beban tarik dan *local stress* pada specimen pipa PE80 yang disebabkan oleh *defect* permukaan pada spesimen.

2.2. Distribusi Tegangan Pada Pipa Bawah Tanah

Pipa yang digunakan dalam instalasi perpipaan distribusi dan ditanam dalam tanah akan mengalami beban eksternal dan internal seperti yang telah disampaikan pada bab sebelumnya. Penelitian mengenai distribusi tegangan yang terjadi pada pipa akibat beban eksternal dan internal telah dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Iimura pada tahun 2004 melakukan serangkaian evaluasi pada sebuah system distribusi perpipaan dan merumuskan sebuah formula defleksi dan melakukan perhitungan tegangan pada pipa yang ditanam di bawah tanah. Pada penelitian yang dilakukan, Iimura melakukan evaluasi tegangan pada jaringan perpipaan dengan mempertimbangkan kondisi yang berlainan, yaitu pipa yang ditanam dalam tanah, pipa yang keluar dari dalam tanah dan berada pada permukaan tanah dan daerah batas antara bagian pipa yang ditanam dalam tanah dengan pipa yang keluar dari dalam tanah. Pada penelitian yang dilakukan ini Iimura melakukan evaluasi terhadap tegangan yang terjadi pada pipa akibat adanya *ground settlement*. Formula defleksi yang diperoleh pada penelitian ini dengan memperhitungkan tegangan yang bekerja pada semua bagian pipa kemudian di sederhanakan dengan menggunakan asumsi batang elastis pada sebuah pondasi yang fleksibel. Proses Analisa dilakukan dengan menggunakan *finite elemen method* dan validasi dilakukan dengan cara melakukan eksperimen pengukuran defleksi pada pipa yang beri variasi beban dengan menggunakan indicator defleksi.

Evaluasi yang dilakukan oleh Iimura kemudian diperkaya oleh Merrin, dkk (2014) dengan memasukkan parameter kedalaman pipa dalam tanah, modulus tanah,



densitas tanah, dan beban kendaraan yang melewati pipa sebagai parameter beban eksternal. Ketebalan pipa dan tekanan fluida dalam pipa dimasukkan sebagai parameter beban eksternal pada penelitian yang dilakukan. Pemodelan yang dilakukan pada penelitian ini divalidasi dengan menggunakan Analisa mode elemen hingga (*finite element method*). Hasil dari penelitian ini mempunyai tingkat akurasi yang cukup tinggi mengenai gambaran distribusi tegangan yang terjadi pada pipa yang dikubur dalam tanah dengan beban kendaraan yang melintas.

Penelitian untuk melihat pengaruh distribusi tegangan pada pipa yang dikubur dalam tanah akibat beban statis, beban tanah, dan beban bergerak, beban dari kendaraan yang melintas, dilakukan oleh Alzabeebee, dkk (2018). Pada penelitian ini, pemodelan yang dilakukan memasukkan parameter berat kendaraan dan kecepatan kendaraan yang melintas. Validasi model dilakukan dengan cara membandingkan hasil Analisa numerik yang dilakukan dengan data aktual yang diperoleh dilapangan. Dari penelitian ini diketahui bahwa beban statis yang diterima oleh pipa memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap pergerakan pipa dibandingkan beban dinamisnya. Diperoleh juga bahwa rasio pergerakan pipa akibat beban statis dan dinamis menurun seiring dengan meningkatnya kekakuan pipa. Rasio ini juga berubah seiring dengan perubahan kecepatan kendaraan yang melintas.

Zha Si Xi, dkk (2019) melakukan penelitian terhadap distribusi tegangan dan pengaruhnya pada pipa PE yang dikubur. Pada penelitian ini faktor eksternal berupa beban dari tanah dan beban kendaraan yang melintas menjadi parameter evaluasi selain beban internal dari pipa yaitu *internal pressure*. Evaluasi dilakukan dengan metode *finite elements analysis* dan proses validasi dilakukan dengan metode eksperimen. Pada penelitian ini parameter tambahan yang diberikan adalah penurunan terhadap modulus elastisitas lapisan aspal sebagai penggambaran lapisan aspal yang mengalami penuaan. Hasil dari penelitian ini diperoleh bahwa selain beban dinamis dari kendaraan yang melintas, distribusi tegangan dan tegangan yang bekerja pada pipa PE berubah dengan perubahan pada modulus elastisitas dari lapisan aspal.

Penelitian terhadap distribusi tegangan dan pengaruhnya pada sifat mekanis pipa *polyethylene* dilakukan oleh Hongyuan Fang, dkk (2020). Pada penelitian ini pemodelan dilakukan pada pipa PE dengan fluida yang mengalir didalamnya. Beban dari tanah, laju aliran fluida dan kecepatan fluida yang mengalir menjadi parameter yang di perhitungkan dalam pemodelan ini. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan simulasi model 3D dari kondisi actual dengan data-data operasi yang actual. Pemodelan menggunakan 2 perangkat lunak yang berbeda sebagai bagian dari proses validasi. Dari penelitian yang dilakukan diketahui bahwa beban yang bekerja pada pipa baik beban eksternal maupun internal akan mempengaruhi deformasi yang terjadi pada pipa. Fluida yang mengalir dalam pipa dan kondisi operasi berpengaruh pada ketahanan pipa yang mengurangi masa pakai dari pipa PE.

2.3. Kegagalan (*Defect*) dan Perbaikan (*Patching*) pada pipa PE

Kemampuan pipa PE terhadap korosi yang terjadi dibanding pipa berbahan logam membuat penggunaan pipa PE semakin banyak dalam satu dekade terakhir. Pipa PE secara umum digunakan sebagai pipa distribusi untuk fluida gas alam, air domestic, air limbah hingga produk-produk kimia. Pipa PE secara terus menerus terpapar dengan beban yang berasal dari pergerakan tanah, beban tanah yang menimbunnya, beban dari kendaraan yang melintas dan beban yang berasal dari tekanan internal pipa. Perubahan temperature juga memberikan kontribusi terhadap distribusi tegangan yang bekerja pada pipa PE.

Beban yang bekerja pada pipa PE dapat menimbulkan kegagalan pada pipa PE. Secara statistik, kegagalan pada pipa PE mempunyai tipe *slow crack growth* yaitu kegagalan yang disebabkan oleh perambatan retak yang muncul pada pipa. Kegagalan ini pada umumnya dimulai dari munculnya retakan pada sisi dalam pipa PE menuju ke dinding terluar. Perbaikan pada kegagalan yang terjadi pada pipa PE pada umumnya dilakukan dengan metode *patching*. Analisa terhadap distribusi tegangan pada pipa PE