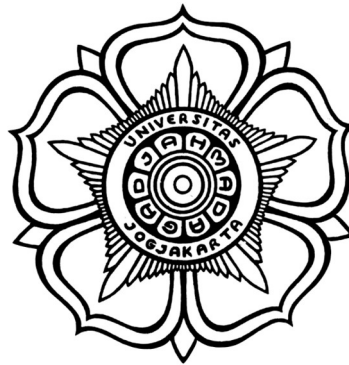


**ANALISIS ELEMEN HINGGA PIPA *POLYETHYLENE* BERLUBANG ELIPS
DIPERKUAT *SADDLE FUSION PATCH* BERSIRIP
*FINITE ELEMENT ANALYSIS OF POLYETHYLENE PIPE WITH
ELLIPTICAL HOLE SUPPORTED BY SADDLE FUSION PATCH WITH FIN***

TESIS



Diajukan oleh:

Tri Langgana Hermawan

20 / 471656 / PTK / 13847

kepada

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN DAN INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS GADJAH MADA
YOGYAKARTA**

2023



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

**ANALISIS ELEMEN HINGGA PIPA POLYETHYLENE BERLUBANG
ELIPS DIPERKUAT SADDLE FUSION PATCH BERSIRIP**

**FINITE ELEMENT ANALYSIS OF POLYETHYLENE PIPE WITH
ELLIPTICAL HOLE SUPPORTED BY SADDLE FUSION PATCH WITH FIN**

Tri Langgana Hermawan

20 / 471656 / PTK / 13847

telah disetujui oleh :

Pembimbing Utama



Dr. Eng. R. Rachmat A. Sriwijaya, S.T., M.T., IPM



**ANALISIS ELEMEN HINGGA PIPA POLYETHYLENE BERLUBANG ELIPS DIPERKUAT SADDLE FUSION
PATCH BERSIRIP**

*FINITE ELEMENT ANALYSIS OF POLYETHYLENE PIPE WITH ELLIPTICAL HOLE SUPPORTED BY SADDLE
FUSION PATCH WITH FIN*

Dipersiapkan dan disusun oleh:

Tri Langgana Hermawan
20/471656/PTK/13847

**Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal Kamis, 16 Februari 2023**

Susunan Dosen Penguji

Ketua

Dr. Ir. Teguh Pudji Purwanto, M.T., IPM

Anggota

Dr. Indraswari Kusumaningtyas, S.T., M.Sc.

Anggota

Dr. Urip Agus Salim, S.T., M.Sc.

Anggota

Dr. Eng. Ir. R. Rachmat A. Sriwijaya, S.T., M.T., IPM.

Tesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh derajat Magister

Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin

Ir. Indro Pranoto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.

Mengetahui,
Ketua Departemen Teknik Mesin dan Industri

Ir. Budi Hartono, S.T., M.Pm., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Tri Langgana Hermawan

NIM : 20/471656/PTK/13847

Tahun terdaftar : 2020

Program Studi : S2 Teknik Mesin

Fakultas/Sekolah : Teknik / Departemen Teknik Mesin dan Industri

Menyatakan bahwa dalam dokumen ilmiah Tesis ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang / lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Tesis ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Purwakarta, 23 Januari 2023



Tri Langgana Hermawan

20/471656/PTK/13847



HALAMAN PERSEMBAHAN

Tesis ini penulis persembahkan untuk,
Ibunda tercinta, Maryati, istri tersayang, Vera Yulia Putri, anak-anak terkasih,
Syahirah, Naurah, Rumaisha, Ismail dan Ishaq
Serta semua teman – teman yang telah mendukung penulis

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah serta izin-Nya kepada penulis sehingga penyusunan tesis dengan judul “Analisis Elemen Hingga Pipa Polyethylene Berlubang Elips Diperkuat Saddle Fusion Patch Bersirip” dapat diselesaikan dengan baik. Tesis ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan pada program Magister Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Budi Hartono, S.T., M.Pm., Ph.D., IPM, ASEAN Eng., selaku Kepala Departemen Teknik Mesin dan Industri UGM.
2. Bapak Ir. Indro Pranoto, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Mesin UGM
3. Bapak Dr.Eng. Ir. R. Rachmat A. Sriwijaya, S.T., M.T., IPM, ASEAN Eng., selaku Dosen Pembimbing Tesis atas segala kesabaran, bimbingan, dorongan, bantuan, ilmu dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis dalam penyusunan tesis ini.
4. Bapak Dr. Ir. Teguh Pudji Purwanto, M.T., IPM., ASEAN Eng., Bapak Dr. Urip Agus Salim, S.T., M.Sc., Ibu Indraswari Kusumaningtyas, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Penguji atas segala saran, ilmu, pengalaman, dan kebaikan yang telah diberikan kepada penulis dalam penyusunan tesis ini.
5. Dosen-dosen pengampu mata kuliah di Departemen Teknik Mesin dan Industri atas ilmu-ilmu pengetahuan yang telah diajarkan.
6. Star Energy Geothermal Darajat II, Limited yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk melanjutkan studi S2 Fakultas Teknik Mesin UGM.
7. Mas Arok, atas dukungan dan dorongan nya kepada penulis untuk terus melakukan pengembangan diri.

8. Seluruh Staf Tata Usaha di Departemen Teknik Mesin dan Industri atas bantuan dan dukungan yang telah diberikan sehingga dapat memperlancar segala proses yang telah penulis jalani.
9. Teman-Teman S1 dan S2 Program Studi Teknik Mesin yang selama ini telah memberikan bantuan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tesis ini.
10. Kepada semua pihak yang tidak dapat penulis cantumkan namanya dan telah membantu penulis dalam usaha menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan pihak-pihak yang tersebut di atas, penulisan laporan ini tidak dapat diselesaikan dengan baik dan tepat pada waktunya. Dengan ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih atas dedikasi berbagai pihak selama ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan tesis ini masih jauh dari sempurna sehingga penulis sangat menghargai kritik dan saran demi perbaikan dan penyempurnaan tulisan ini. Apabila terdapat kesalahan dalam penulisannya, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga tesis ini dapat dapat bermanfaat untuk membantu pengembangan hal-hal yang berhubungan dengan teknik mesin pada khususnya ataupun ilmu dan teknologi lainnya secara umum.

Purwakarta, 23 Januari 2023



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/m ³
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, m ²
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 <i>longitudinal cyclic</i>
G _{Lh}	: faktor bentuk kondisi jalan terhadap beban <i>longitudinal cyclic</i>
S ₂	: maksimum tegangan <i>longitudinal</i> yang dialami pipa perlintasan jalan, kPa
S _{He}	: tegangan <i>circumferential</i> pada pipa akibat dari tanah yang melingkupi pipa, kPa
S _{Hi}	: tegangan Barlow, kPa
ΔS_{Lh}	: tegangan <i>longitudinal cyclic</i> , kPa
E _s	: modulus Young dari pipa, kPa
α_t	: koefisien ekspansi <i>thermal</i> , per °C
T ₁	: temperatur saat pipa pertama kali dipasang, °C
T ₂	: temperatur operasi maksimum atau minimum (yang dipilih), °C
ν_s	: <i>Poisson ratio</i> 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

yang telah di *patching* banyak menarik perhatian para peneliti sebelumnya. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk melihat distribusi tegangan pada pipa yang telah di tambal (*patched*) dan perubahan sifat-sifat mekanis yang terjadi setelahnya. Penelitian dilakukan dengan pemodelan menggunakan *finite element methods*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat distribusi tegangan pada pipa setelah dilakukan *patching*, ketebalan material *patch* yang sesuai dan fenomena lain yang terjadi pada pipa setelah dilakukan *patching*.

Khademi-Zahedi (2018) melakukan evaluasi distribusi tegangan pada pipa *polyethylene* yang mempunyai *defect* berbentuk elips dan bulat pada permukaannya. Pada evaluasi ini, beban internal dan eksternal pada pipa menjadi parameter yang diperhitungkan. Evaluasi dilakukan dengan *finite element methods*. Pada penelitian ini, variasi dilakukan pada rasio diameter *defect*, suhu tanah dianggap homogen sepanjang pipa PE dan hasil analisa distribusi tegangan dibandingkan dengan distribusi tegangan pada pipa PE dengan perkiraan masa pakai pipa 50 tahun pada suhu operasi 35°C.

Penelitian diatas kemudian disempurnakan oleh Khademi & M.Shishesaz (2019) dengan melakukan simulasi pada beberapa jenis *patch* pada retakan di permukaan pipa PE. Parameter sebelumnya tetap dipergunakan, parameter tambahan yang diberikan adalah bentuk tambalan yang di aplikasikan pada pipa. Tujuan dari penelitian ini untuk melihat distribusi tegangan pada pipa PE dan besarnya pengaruh bentuk tambalan terhadap penurunan tegangan maksimum pada pipa PE setelah dilakukan *patching*. Dari penelitian ini, diketahui bahwa *patching* pada pipa tipe *saddle fusion patch* adalah metode paling efektif untuk menurunkan tegangan maksimum pada pipa.

Khademi, M Shishesaz & Alimouri (2019) melakukan pengayaan pada penelitian sebelumnya dengan melakukan variasi beban eksternal pada pipa PE. Evaluasi dilakukan pada 2 kondisi yang berbeda, pertama hanya menggunakan parameter beban internal dari tekanan operasi pipa dan kondisi kedua menambahkan

beban eksternal dengan mempertimbangkan beban tanah dan kendaraan yang melintas. Pada penelitian ini beban internal yang digunakan konstan. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa tipe tambalan *saddle fusion patch* memberikan pengurangan yang paling efektif pada tegangan maksimum yang bekerja pada pipa.

D. E. Belhadri, dkk (2019) melakukan analisa terhadap *stress intensity factor*, *SIF*, menggunakan *3D finite element methods* pada pipa PE yang mengalami *crack* berbentuk setengah elips dan diperbaiki dengan cara ditambal. *Stress Intensity Factor* adalah salah satu parameter terpenting dalam melakukan analisa terhadap mekanisme keretakan pada pipa PE. *SIF* memprediksi intensitas tegangan di dekat ujung retakan yang disebabkan oleh beban jarak jauh atau tegangan sisa. Pada penelitian ini pemodelan 3D yang dilakukan di validasi dengan menggunakan metode numerik pada fungsi perpindahan (*u* dan *v*) pada koordinat sistem yang diplot pada ujung retakan. Hasil dari penelitian ini untuk retak elips longitudinal, risiko pecahnya pipa lebih berbahaya di bagian depan internal daripada eksternal. Perbaikan pada sisi luar lebih baik dengan efisiensi mencapai 81%. Hal ini terutama disebabkan oleh kontak langsung antara permukaan retakan dengan material *patching*.

Sulaiman HD (2021) melakukan analisa distribusi tegangan pada pipa yang mempunyai lubang elips dengan penguatan tipe *saddle fusion patch* menggunakan *finite elemen method*. Pada penelitian ini kedalaman pipa dalam tanah, diameter pipa dan tekanan internal dianggap konstan. Suhu tanah dianggap konstan sepanjang pipa. Tujuan dari penelitian ini untuk melihat distribusi tegangan pada pipa PE dengan variasi ketebalan patch dan panjang retakan.

2.4. Kebaruan dari Penelitian

Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan sirip dan orientasi dari sirip yang ditambahkan dengan distribusi



tegangan yang bekerja pada pipa PE80. Variasi ukuran lubang baik Panjang lubang dan lebar merupakan penggambaran dari kegagalan retak yang bertumbuh. Penelitian ini akan mengacu kepada penelitian-penelitian sebelumnya yang terangkum pada tabel 2-1.

Tabel 2- 1. Rangkuman Tinjauan Pustaka

Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
S. Iimura (2004)	Penyederhanaan <i>mechanical model</i> untuk menghitung <i>stress</i> pada pipa akibat <i>ground settlement</i>		Posisi pipa: <i>buried</i> , <i>exposed</i> dan antara <i>buried</i> dan <i>exposed</i>	<i>Stress</i> , <i>deformasi</i>
Merah dkk. (2006)	Pengaruh temperatur terhadap <i>tensile properties</i> pipa berbahan material HDPE (PE-100)	Poisson's ratio pada material HDPE konstan	Temperatur dan beban tarik	<i>Yield stress</i> , <i>yield strain</i> dan <i>elastic modules</i>
Merrin dkk. (2014)	Menyempurnakan <i>stress analysis</i> pada pipa yang dikubur (simulasi)	Tanah dan pipa merupakan <i>linear elastic material</i> , interaksi antara pipa dan tanah bersifat	Diameter dan ketebalan pipa, <i>surface load</i> dan <i>lateral earth pressure</i>	<i>Prediction model Vs Proposed model</i>



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
		<i>frictionless, traffic load</i> disederhakan menjadi <i>point load</i>		
Murariu & Lozanovic-Sajic (2016)	Pengaruh temperatur dan panas terhadap perilaku <i>polyethylene</i> (PE-80) yang memiliki <i>defects</i>	Pipa memiliki <i>defects</i> : <i>bilateral V-notch, U-notch</i> dan <i>central hole</i>	Temperatur, <i>loading rate, notch type, notch depth</i> dan <i>notch's hole diameter</i>	<i>Tensile strength, IR image</i>
Alzabeebe dkk. (2018)	Perbandingan respon pipa bawah tanah terhadap beban statik dan beban dinamik (simulasi)	<i>Natural soil</i> lebih kuat dibandingkan <i>backfill soil, moving truck load</i> dianggap sebagai <i>concentrated load</i> dan ketebalan pipa yang digunakan 0.08m	Kecepatan truk dan kekakuan pipa	<i>Displacement</i> pipa



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
Khademi Zahedi (2018)	<i>Finite element analysis</i> untuk mengetahui pengaruh <i>thermo-mechanical loads</i> terhadap distribusi tegangan pada pipa <i>polyethylene</i> yang dikubur (simulasi)	Terdapat kerusakan berupa lubang dan elip pada pipa dan temperatur dianggap konstan	Diameter lubang dan rasio diameter pada <i>elliptical hole</i>	Distribusi tegangan pada pipa
Khademi Zahedi & Shishesaz (2019)	Aplikasi <i>finite element</i> untuk mengetahui distribusi tegangan pada pipa <i>polyethylene</i> yang diberi penguatan (<i>patch</i>) akibat <i>semi elliptical crack</i>	Terdapat <i>semi elliptical crack</i> pada pipa, temperatur dianggap konstan dan pipa dikubur pada kedalaman 125cm	Jenis penguatan (<i>patch</i>), diameter lubang dan rasio diameter pada <i>elliptical hole</i>	Distribusi tegangan pada pipa sebelum dan sesudah diberi penguatan (<i>patch</i>)
Zha Si Xi , Wu Ying dan Jin	Analisa kehandalan pada pipa PE yang	Pipa PE yang di kubur dalam tanah	Beban kendaraan yang melintas	Distribusi tegangan yang bekerja pada



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
Peng Wei (2019)	dikubur dalam tanah terhadap beban dinamis (beban lalu lintas) dan penurunan kualitas aspal	dengan kedalaman 125 cm. Tekanan dalam pipa dianggap konstan	dan modulus elastisitas dari aspal sebagai penggambaran penurunan kualitas aspal akibat pemakaian	pipa dan indeks kehandalan pipa akibat beban yang diterima oleh pipa dan kondisi aspal yang mengalami degradasi
D. E. Belhadri, M. Belhamiani, W. N. Bouzitouna, W. Oudad	Analisa terhadap <i>stress intensity factor</i> , <i>SIF</i> , menggunakan 3D <i>finite element methods</i> pada pipa PE yang mengalami <i>crack</i> berbentuk setengah elips dan diperbaiki dengan cara ditambal	Pipa PE dikubur dalam tanah mempunyai <i>defect</i> berbentuk <i>semi-elliptical</i> . Tekanan dalam pipa dianggap konstan	Besar <i>defect</i> pada permukaan pipa, material <i>patching</i> yang dipergunakan	Perubahan <i>stress intensity factor</i> pada variasi yang diberikan.
Khademi, M Shishesaz &	Analisa distribusi tegangan pada pipa <i>polyethylene</i> yang diberi	Terdapat <i>semi elliptical crack</i> pada	Jenis penguatan (<i>patch</i>), diameter	Distribusi tegangan pada pipa sebelum dan sesudah



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
Alimouri (2019)	penguatan (<i>patch</i>) akibat <i>semi elliptical crack</i> menggunakan <i>finite element methods</i>	pipa, temperatur dianggap konstan dan pipa dikubur pada kedalaman 125cm	lubang, rasio diameter pada <i>elliptical hole</i> , beban yang bekerja pada pipa baik beban internal yang berasal dari tekanan fluida dalam pipa dan beban eksternal yang berasal dari beban tanah dan beban lalu lintas	diberi penguatan (<i>patch</i>) untuk tiap bentuk <i>patch</i> yang dipergunakan.
Hongyuan Fang, Peiling Tan, Xueming Du, Bin Li, Kangjian Yang, Yunhui	Analisa terhadap perubahan distribusi tegangan pada pipa PE dan perubahan sifat mekanik dari pipa akibat fluida yang	Pipa PE adalah pipa dengan fluida limbah domestik dan dikubur dalam tanah.	Beban eksternal dan beban internal yang bekerja pada pipa. Ketebalan pada pipa PE sebagai penggambaran	Distribusi tegangan dan deformasi yang terjadi pada pipa PE



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
Zhang (2020)	mengalir dalam pipa		adanya pengaruh dari sifat kimia fluida yang mengalir pada pipa PE yang dipergunakan	
Sulaiman (2021)	Analisis distribusi tegangan pada pipa berlubang elips dengan penguatan <i>saddle fusion patch</i> menggunakan <i>finite element analysis</i>	Kedalaman, karakteristik tanah bersifat konstan, diameter dan tekanan di dalam pipa konstan. Terdapat lubang elips pada pipa.	Ketebalan <i>patch</i> dan diameter panjang lubang elips	Distribusi tegangan akibat variasi ketebalan <i>patch</i> dan diameter panjang lubang elips
Tri Langgana H (penelitian ini)	Analisa terhadap distribusi tegangan pada pipa <i>polyethylene</i> dengan lubang elips berpenguat <i>saddle fusion patch</i> bersirip	Pipa PE dikubur dalam tanah dengan kedalaman 125 cm, temperatur tanah	<ul style="list-style-type: none">• Variasi orientasi sirip.• Variasi jumlah sirip• Variasi tinggi sirip	Distribusi tegangan akibat variasi ketinggian sirip dan orientasi sirip.



Pengarang	Fokus Penelitian	Asumsi	Variasi	Parameter Diamati
		dianggap konstan sepanjang pipa, panjang <i>patch</i> 118 mm, beban yang diterima oleh pipa adalah beban eksternal dan beban internal, ketebalan <i>patch</i> 45 mm	<ul style="list-style-type: none">• Variasi Panjang defect yang terjadi pada permukaan pipa	

BAB III

LANDASAN TEORI

Pemanfaatan pipa sebagai penyalur fluida dari suatu lokasi ke lokasi lainnya merupakan praktik yang biasa dilakukan di dalam industri karena dinilai cukup ekonomis dibandingkan jenis transportasi lainnya sehingga pemilihan jenis pipa yang tepat akan memberikan dukungan yang efektif terhadap kegiatan industri tersebut. Pemipaan dapat dilakukan untuk mengalirkan fluida dalam jarak dekat seperti yang dilakukan di dalam pabrik atau pusat pengolahan minyak dan gas bumi yang dikenal sebagai *piping*. Pemipaan juga dilakukan untuk mengalirkan fluida dalam jarak yang cukup jauh, seperti menyalurkan bahan bakar gas dari pusat pengolahan ke pabrik-pabrik yang membutuhkannya atau transportasi bahan bakar gas antar propinsi. Jenis pemipaan yang menghubungkan jarak yang cukup jauh ini dikenal sebagai *pipeline*. Dalam penelitian ini pembahasan mengenai pemipaan akan diarahkan ke pemipaan bawah tanah dengan menggunakan pipa berbahan *polyethylene*, lubang akibat retakan, penambalan lubang tersebut dan simulasi menggunakan *finite element analysis*.

3.1 Tegangan Internal dan Beban Eksternal

Setiap jenis pipa memiliki kemampuan yang dibatasi oleh *Maximum Allowable Working Pressure* (MAWP) yang besarnya dipengaruhi oleh diameter dan ketebalan pipa (*Barlow's Formula*). Pengaturan tekanan fluida yang sesuai dan selalu di bawah MAWP sangat penting untuk mencegah kerusakan pada pipa seperti terjadi kebocoran, patah, retakan dan kegagalan mekanis lainnya. Pemilihan material pipa juga harus disesuaikan dengan fluida yang mengalir di dalamnya karena akan berpengaruh terhadap laju penipisan ketebalan pipa. Metode untuk menentukan sisa umur pipa berdasarkan laju penipisan pipa, tekanan fluida dan laju korosi tanpa



mempertimbangkan tekanan eksternal yang mungkin terjadi pada pipa dijelaskan di dalam ASME B31.G.

Perhitungan tentang ketebalan pipa yang diperlukan berdasarkan tekanan fluida yang mengalir di dalam pipa dijelaskan pada standar API 570 dengan persamaan sebagai berikut:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot ((S \cdot E \cdot W) + (P \cdot Y))} \quad (3.1)$$

di mana:

- t : Ketebalan pipa minimum untuk menahan tekanan P, inchi
- P : Tekanan fluida di dalam pipa, psi
- D : Diameter luar pipa, inchi
- S : *Yield strength* material, psi
- E : Faktor kualitas
- W : Koefisien joint/pengelasan
- Y : Koefisien material

Dari persamaan di atas diketahui bahwa ketebalan pipa dipengaruhi oleh material pipa dan tekanan fluida yang mengalir di dalam pipa.

Pipa-pipa yang diletakkan di dalam tanah dalam waktu yang cukup lama dapat mengalami kerusakan yang disebabkan oleh beban yang diterimanya, baik berupa tegangan internal maupun pembebanan dari luar pipa. Tegangan internal biasanya berasal dari tekanan fluida yang ada di dalam pipa sedangkan beban eksternal berasal dari berat tanah, aspal dan kendaraan yang melewatinya. Kondisi lainnya seperti kelembaban, perubahan temperatur, sifat kimia tanah dan cacat produksi juga dapat menyebabkan kerusakan pada pipa-pipa tersebut.

3.1.1 Tegangan Internal Pada Pipa

Dalam analisis tegangan, tegangan internal yang terjadi pada suatu pipa diantaranya meliputi (Moser & Folkman, 2008):

1. Tegangan aksial terjadi akibat adanya gaya yang bekerja searah dengan panjang pipa. Tegangan ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.2)$$

di mana:

- σ : Tegangan aksial, psi
- F : Gaya yang bekerja searah panjang pipa, lb
- A : Luas penampang pipa, inchi²

2. Tegangan longitudinal merupakan suatu tegangan yang bekerja searah panjang pipa akibat adanya tekanan fluida di dalam pipa terhadap dinding pipa yang dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{P_i * d_o}{4 * t} \quad (3.3)$$

di mana:

- σ : Tegangan longitudinal, psi
- P_i : Besar tekanan internal pipa, psi
- d_o : Diameter luar pipa, inchi
- t : Tebal pipa, inchi

3. Bending stress yang diakibatkan adanya bending moment yang terjadi pada kedua ujung pipa. Bending stress dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (3.4)$$

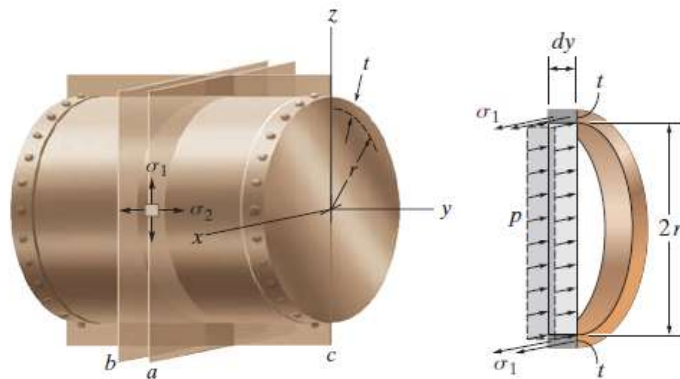
di mana:

σ : Bending stress, psi

M : Bending moment pada pipa

Z : Modulus permukaan (section modulus)

4. Tegangan circumferential disebut juga hoop stress bekerja searah garis singgung penampang pipa. Tegangan ini dapat digambarkan seakan-akan merupakan usaha untuk memecah pipa menjadi dua bagian yang diakibatkan oleh fluida yang mengalir di dalam pipa sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1. Hoop stress (Hibbeler, 2010)

Tegangan circumferential atau hoop stress dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{P_i * (d_o - t)}{2 * t} \quad (3.5)$$

di mana dari persamaan tersebut diketahui:



- σ : Tegangan hoop, kPa
- P_i : Tekanan internal pipa, kPa
- d_o : Diameter luar pipa, m
- t : Tebal pipa, m

5. Thermal stress, timbul karena adanya perbedaan temperatur yang disebabkan perubahan temperatur pada fluida di dalam pipa atau tanah di sekitar pipa tersebut. Penggunaan patch atau sleeve sebagai pelindung pada pipa dapat menyebabkan thermal stress karena adanya beda temperatur pada pipa dan patch atau sleeve. Thermal stress yang terjadi pada pipa dinyatakan dalam persamaan berikut (Singer, 1987):

$$\sigma = E_p * \alpha_t * \Delta T \quad (3.6)$$

di mana:

- σ : Thermal stress
- E_p : Modulus elastisitas material
- α_t : Koefisien suhu
- ΔT : Beda temperature

3.1.2 Beban Eksternal Pada Pipa

Beban eksternal pada pipa disebabkan oleh beban statis dan beban dinamis. Beban statis berasal dari berat tanah yang melingkupi pipa sedangkan beban dinamis berasal dari berat kendaraan yang melintas di atas pipa selebar tapak roda kendaraan tersebut dengan asumsi bahwa beban tersebut tegak lurus 90 derajat terhadap pipa.

Beban eksternal pada pipa dapat menyebabkan adanya tegangan longitudinal dan tegangan circumferential pada pipa. Tegangan akibat gaya eksternal ini akan

dihubungkan dengan tegangan internal sehingga diperoleh suatu nilai tegangan operasional pada pipa.

3.1.3 Beban Statis Pada Pipa

Beban statis yang diterima pipa dari pembebanan tanah meliputi berat tanah yang melingkupi pipa dan jalan / aspal yang ada di atasnya. Perhitungan beban tanah ini dapat diperoleh melalui pendekatan teori saluran parit yang dijabarkan oleh A. Marston (1930). Secara teori, semakin dalam pipa dikubur di dalam tanah, maka pengaruh beban eksternal terhadap pipa tersebut semakin kecil. Pembebanan pada tanah dijelaskan di dalam API RP 1102 sebagaimana ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$S_{He} = K_{he} * B_e * E_e * D * \gamma \quad (3.7)$$

di mana:

- S_{He} : Tegangan circumferential akibat beban tanah, kPa
- K_{He} : Faktor kekakuan tanah untuk tegangan circumferential
- B_e : Faktor penimbunan untuk beban tanah
- E_e : Faktor penggalan
- D : Diameter luar dari pipa, m
- γ : Berat jenis tanah, kN/m³

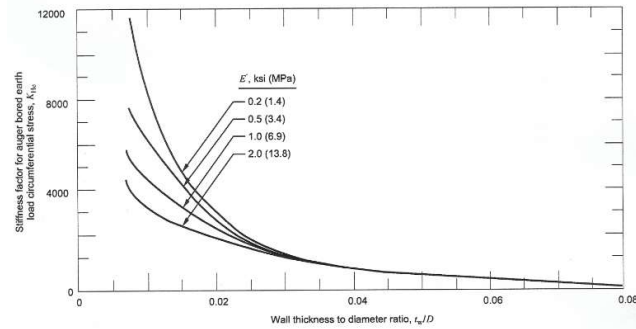
Faktor kekakuan tanah K_{He} menentukan perhitungan interaksi antara tanah dan pipa yang tergantung kepada perbandingan antara ketebalan dan diameter pipa, serta modulus reaksi tanah (E') seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1.



Tabel 3- 1. Modulus Reaksi Tanah E' (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)

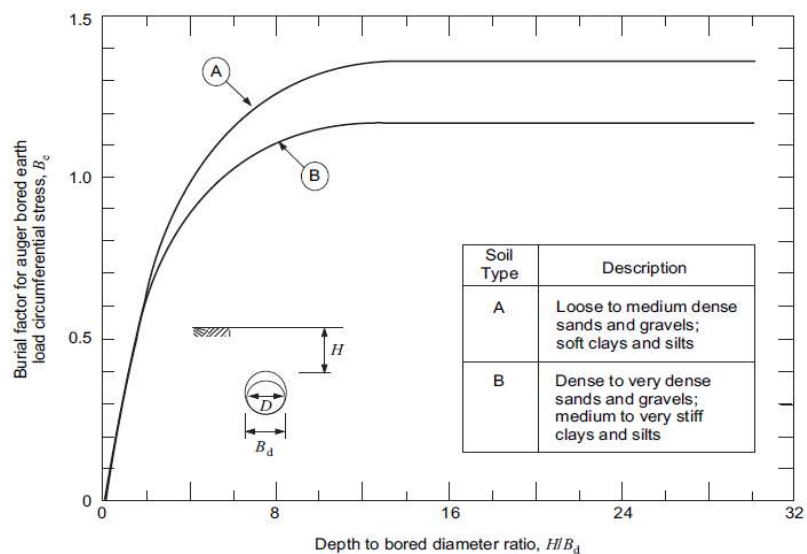
Soil Description	E', ksi (MPa)
Soft to medium clays and silts with high plasticities	0.2 (1.4)
Soft to medium clays and silts with low to medium plasticities; loose sands and gravels	0.5 (3.4)
Stiff to very stiff clays and silts; medium dense sands and gravels	1.0 (6.9)
Dense to very dense sands and gravels	2.0 (13.8)
Soil Description	E', ksi (MPa)
Soft to medium clays and silts with high plasticities	0.2 (1.4)
Soft to medium clays and silts with low to medium plasticities; loose sands and gravels	0.5 (3.4)
Stiff to very stiff clays and silts; medium dense sands and gravels	1.0 (6.9)
Dense to very dense sands and gravels	2.0 (13.8)

Berdasarkan Gambar 3.2, nilai K_{He} pada sumbu Y diperoleh dengan memilih kurva yang sesuai dengan nilai E' kemudian dicari nilai ketebalan dan diameter pipa pada sumbu X.

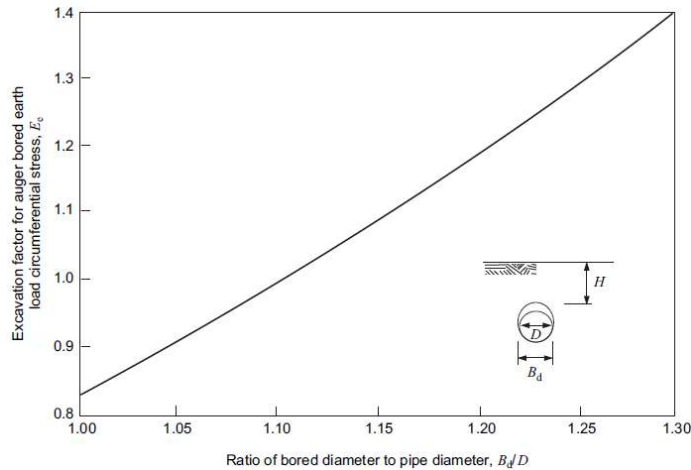


Gambar 3. 2 Kurva K_e (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)

Faktor pengaruh penimbunan (B_e) dan faktor penggalian (E_e) dipengaruhi oleh besaran lubang yang terbentuk di tanah sebagai jalan masuk pipa (*bore diameter*). Pada kasus tanah timbunan sangat padat melingkupi pipa, nilai B_e disamakan dengan nilai diameter luar pipa (D). Nilai B_e dan E_e dapat diperoleh dari kurva API RP 1102 pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4.



Gambar 3. 3 Kurva B_e (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)

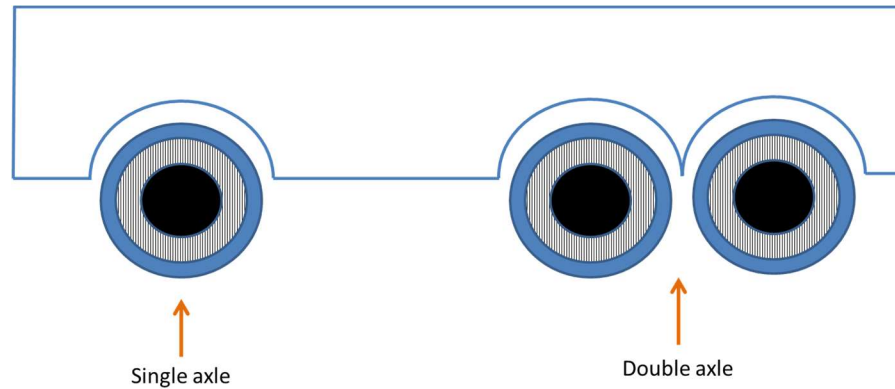


Gambar 3. 4 Kurva E_e (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)

3.1.4 Beban Dinamis Pada Pipa

Beban dinamis biasanya berasal dari kendaraan-kendaraan yang melewati jalan di atas pipa yang dinyatakan sebagai bidang kontak antara tapak roda dengan jalan tersebut. Beban dinamis dapat disimulasikan sebagai beban terkonsentrasi dan memberikan hasil perhitungan yang sesuai dengan hasil percobaan di lapangan (Alzabeebee dkk., 2018).

Beban dari suatu kendaraan secara umum terdistribusi menjadi dua bagian yaitu bagian depan kendaraan yang menumpu pada roda depan dan bagian belakang kendaraan yang menumpu pada roda belakang. Susunan roda pada kendaraan akan mempengaruhi distribusi beban yang diberikan oleh masing-masing roda dan diterima oleh pipa maupun lapisan tanah di atas pipa sepanjang jalur roda kendaraan tersebut. Jika susunan roda terdiri dari hanya 1 lapis maka disebut single axle. Namun jika roda tersusun lebih dari satu lapis, maka disebut tandem/double axle.



Gambar 3. 5 Ilustrasi single dan tandem/double axle

Besaran nilai tegangan karena pembebanan eksternal terhadap pipa dijabarkan dalam persamaan 3.8:

$$W = \frac{P}{A_p} \quad (3.8)$$

di mana:

- W : tekanan yang diberikan pada permukaan, kPa
- P : beban dari roda kendaraan, bisa berupa nilai dari single axle ataupun tandem axle sesuai dengan desain, kN
- A_p : luasan area kontak antara roda dengan pipa atau tanah diatas pipa, m²

Cara penentuan nilai beban roda kendaraan yang digunakan dalam perhitungan dijelaskan di dalam API RP 1102, dimana nilai beban roda kendaraan yang paling kritikal akan diambil sebagai nilai yang digunakan pada tahap desain. Cara menentukan nilai beban kritis ditunjukkan pada Tabel 3.2.



Tabel 3- 2. Penentuan metode beban kritis yang dipilih dalam desain (Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993)

Depth of burial, H , < 4 ft (1.2 m) and diameter, D , ≤ 12 in. (305 mm)	
Pavement Type	Critical Axle Configuration
Flexible pavement	Tandem axles
No pavement	Single axle
Rigid pavement	Tandem axles
Depth, H , < 4 ft (1.2 m) and diameter, D , > 12 in. (305 mm) Depth, H , ≥ 4 ft (1.2m) for all diameters	
Pavement Type	Critical Axle Configuration
Flexible pavement	Tandem axles
No pavement	Tandem axles
Rigid pavement	Tandem axles

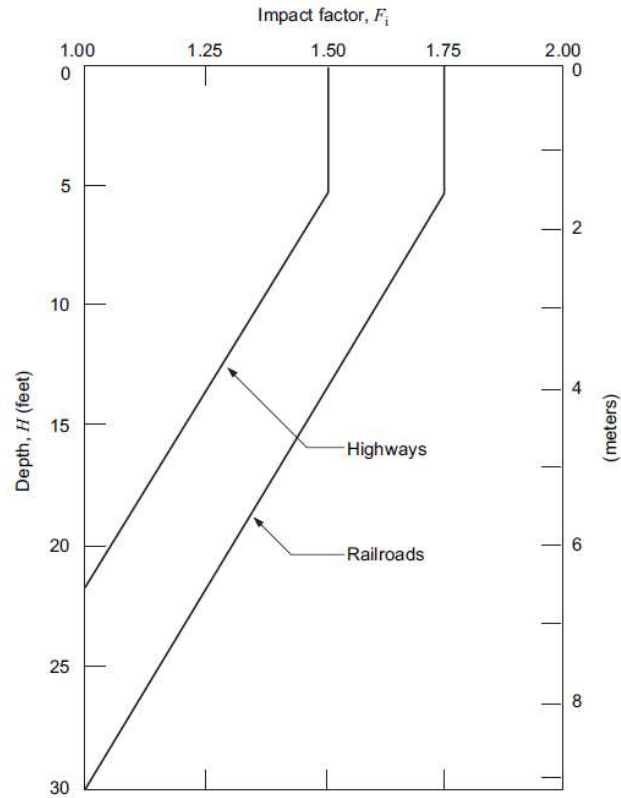
Faktor lain yang harus diperhitungkan di dalam perencanaan pipa pada perlintasan jalan ialah besar tegangan circumferential cyclic dari lalu lintas kendaraan yang melewati pipa tersebut. Besar tegangan circumferential cyclic dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta S_{Hh} = K_{Hh} * G_{Hh} * F_i * R * L * W \quad (3.9)$$

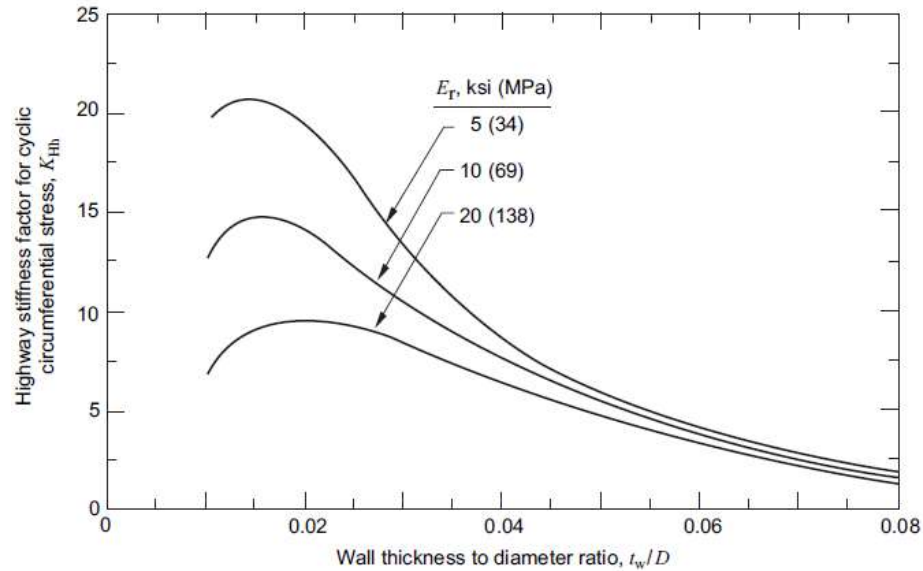
di mana:

- W : tekanan yang diberikan pada permukaan, kPa
- KHh : faktor kekakuan dari kualitas jalan terhadap beban circumferential cyclic
- GHh : faktor bentuk kondisi jalan terhadap beban circumferential cyclic
- Fi : faktor dampak
- L : faktor konfigurasi axle
- R : faktor tipe jalan

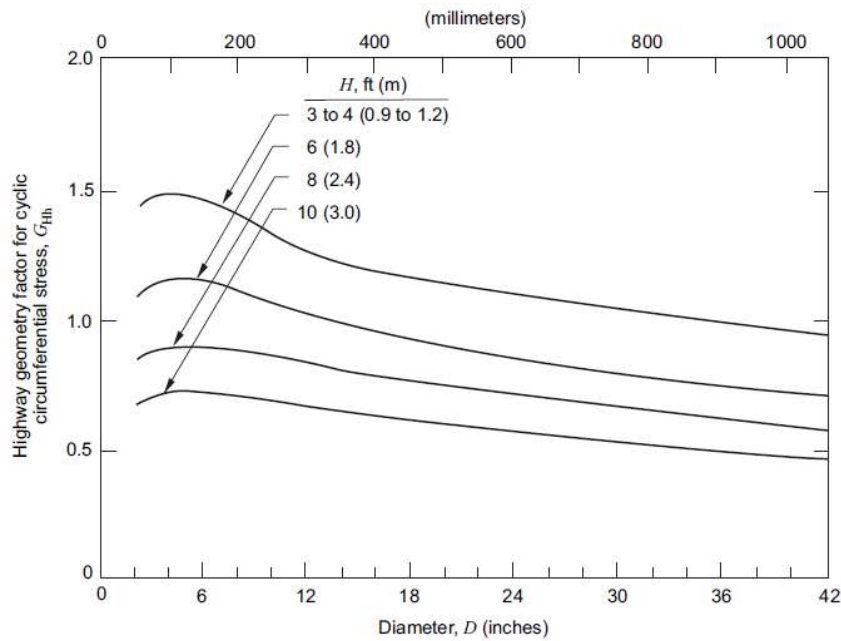
Nilai faktor dampak didapat dari kurva pada Gambar 3.6, sedangkan nilai KHh dan GHh bisa didapatkan dari kurva pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



Gambar 3. 6 Kurva impact factor F_i (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)



Gambar 3. 7 Kurva K_{Hh} (Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993)



Gambar 3. 8 Kurva G_{Hh} (Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993)



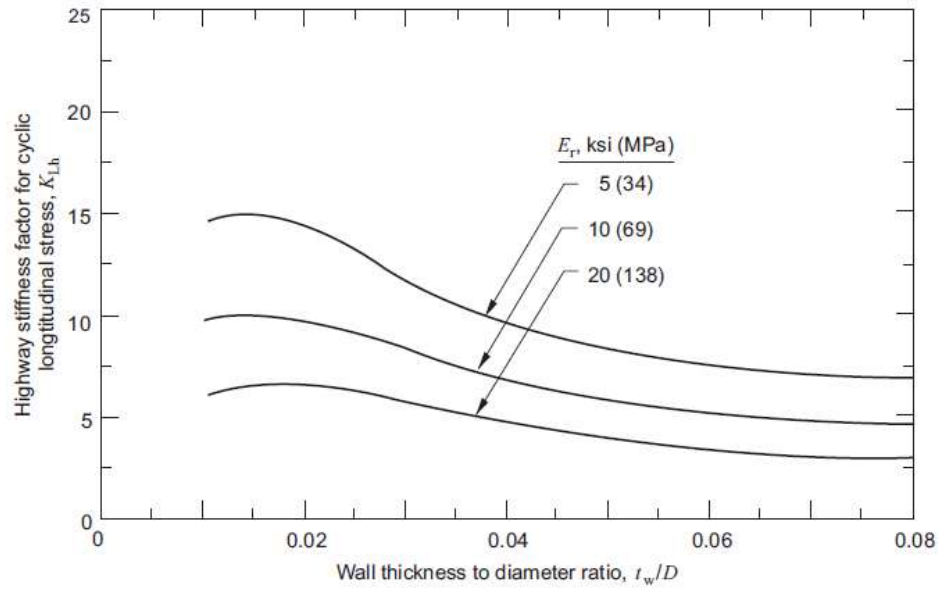
Faktor tegangan yang juga penting untuk dipertimbangkan adalah nilai tegangan *cyclic longitudinal* yang dinyatakan pada persamaan berikut:

$$\Delta S_{Lh} = K_{Lh} * G_{Lh} * F_i * R * L * W \quad (3.10)$$

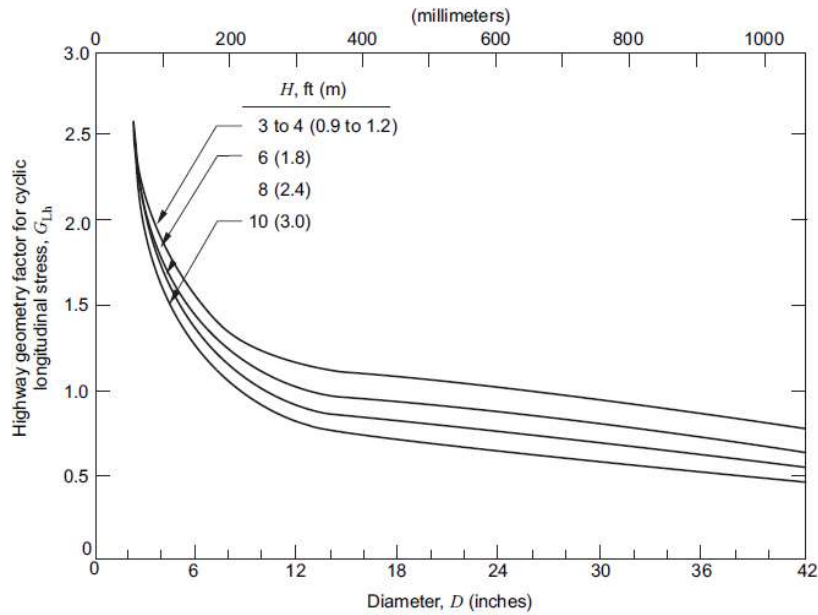
di mana:

- 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*
- F_i : faktor dampak
- L : faktor konfigurasi *axle*
- R : faktor tipe jalan

Berdasarkan fungsi dari rasio ketebalan dan diameter pipa serta nilai *resilient modulus* dari tanah yang melingkupi pipa, nilai K_{Lh} dan G_{Lh} bisa diperoleh dari kurva pada Gambar 3.9 dan 3.10.



Gambar 3. 9 Kurva K_{Lh} (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)



Gambar 3. 10 Kurva G_{Lh} (*Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102, 1993*)



Total tegangan *longitudinal* pada pipa dipengaruhi juga oleh perubahan temperatur, walaupun pada sebagian besar kasus dianggap tidak signifikan karena tidak ada perubahan temperatur yang drastis di alam sehingga hal ini dapat diabaikan. Nilai total tegangan *longitudinal* yang terjadi pada pipa dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$S_2 = \Delta S_{Lh} - E_s * \alpha_T * (T_2 - T_1) + v_s * (S_{He} + S_{Hi}) \quad (3.11)$$

di mana:

- S_2 : 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
- T_1 : temperatur saat pipa pertama kali dipasang, °C
- T_2 : temperatur operasi maksimum atau minimum (yang dipilih), °C
- v_s : *Poisson ratio* dari pipa

Selain persamaan di atas, perhitungan besar tegangan pada pipa yang dikubur di dalam tanah dan dipengaruhi oleh beban eksternal dapat menggunakan persamaan yang disusun oleh Warman dkk. (2009). Persamaan ini menggabungkan persamaan Spangler dengan persamaan Iowa untuk mendapatkan kombinasi beban pipa tidak hanya dari pengaruh tanah timbun dan beban eksternal namun juga mendapatkan pengaruh dari tanah penyangga yang berada di bagian bawah pipa. Persamaan tersebut dijabarkan sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{6 * E * t * r * K_b * W}{E * t^3 + 24 * p * K_z * r^3 + 0,732 * E' * r^3} \quad (3.12)$$

di mana nilai:

K_b : koefisien *bending moment*

K_z : koefisien defleksi

D : diameter pipa, m

T : tebal pipa, m

W : beban vertikal dari pengaruh tanah timbun dan beban eksternal, kPa

P : tekanan dalam pipa, kPa

E : modulus Young dari pipa, kPa.

E' : modulus tahanan tanah terhadap, kPa

r : jari-jari pipa, m

Selanjutnya menurut teori Spangler (1941), deformasi pipa searah sumbu Y (vertikal) dinyatakan dalam persamaan umum sebagai berikut:

$$\Delta y = \frac{r^2}{E * I} \int_0^\pi M * \sin\theta * d \theta \quad (3.13)$$

di mana nilai dari:

Δy : deformasi arah sumbu Y vertical, m

r : jari-jari pipa, m

E : modulus Young pipa, kPa

I : momen inersia pipa

M : besar momen yang terjadi pada pipa

Untuk mencari besar nilai momen inersia pada pipa, maka dilakukan pendekatan bahwa pipa merupakan suatu bentuk silinder berongga yang memiliki ketebalan tertentu sehingga ada nilai jari-jari dalam (r) dan jari-jari luar (R_2). Persamaan momen inersia untuk silinder berongga ialah

$$I = \frac{1}{2} * m * (r^2 + R_2^2) \quad (3.14)$$

di mana nilai dari:

I : momen inersia silinder berongga

r : jari-jari dalam pipa, m

R_2 : jari-jari luar pipa, m

m : massa

3.2 Kegagalan Pada Pipa Bawah Tanah

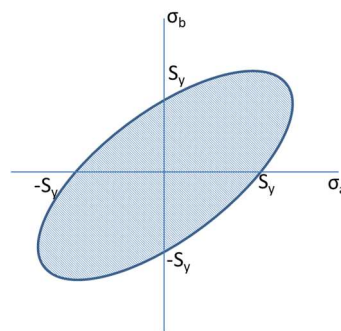
Pipa yang ditanamkan di bawah tanah dalam jangka waktu yang lama dapat mengalami kegagalan yang akan mengganggu transportasi fluida yang ada didalamnya. Berikut adalah jenis-jenis kegagalan yang mungkin terjadi pada pipa bawah tanah:

1. Buckling, terjadi pada pipa yang mengalami beban tekan atau beban tarik yang melebihi batas kritikal pipa tersebut sehingga menyebabkan deformasi yang bersifat permanen. Buckling yang terjadi tergantung kepada panjang dan jenis support.
2. Fatigue, terjadi karena adanya beban berulang yang terjadi dalam waktu lama walaupun beban tersebut masih di bawah yield strength pipa.

3. Crack atau rupture disebabkan adanya tekanan dari dalam dan luar pipa. Jika tekanan-tekanan ini melebihi yield strength dari material pipa maka pipa akan memasuki kondisi plastis dan crack atau rusak.
4. Korosi terjadi akibat adanya interaksi antara atom positif dan negatif pada material penyusun pipa dengan lingkungan atau fluida yang mengalir didalam pipa. Korosi yang terjadi dapat menyebabkan penipisan tebal pipa dan mempengaruhi MAWP dari pipa tersebut sehingga mempengaruhi sisa umur pipa.

3.3 Analisis Kegagalan

Dalam penelitian ini digunakan analisis kegagalan berdasarkan teori distorsi energi atau Von Mises. Teori ini mengacu pada perubahan atau distorsi energi pada suatu material karena adanya penambahan energi yang menyebabkan perubahan bentuk material tersebut. Teori Von Mises menyebutkan bahwa suatu material akan berada pada kondisi aman jika nilai maksimum distorsi energi per satuan volume material lebih kecil daripada nilai distorsi energi per satuan volume material untuk menjadikan material tersebut mengalami kondisi yield. Gambar 3.11 menunjukkan grafik teori Von Mises. Daerah aman untuk suatu tegangan yang diberikan kepada material berada di dalam area oval.



Gambar 3. 11 Teori Von Mises (Beer, 2009)

Tegangan Von Mises ini dituliskan dalam bentuk lain sebagai ekivalen tegangan tarik σ sehingga bisa dijabarkan sebagaimana persamaan dibawah ini :

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (3.15)$$

di mana nilai σ_1 , σ_2 , dan σ_3 ialah nilai principal stress yang bekerja pada setiap sumbu. Persamaan Von Mises ini apabila diterapkan pada tegangan-tegangan yang terjadi pada pipa maka dapat dianalogikan sebagai berikut:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_h - \sigma_l)^2 + (\sigma_l - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_h)^2}{2}} \quad (3.16)$$

Pada persamaan 3.16, nilai σ_h ialah nilai tegangan Hoop yang bekerja dari dalam pipa menuju keluar, sedangkan nilai σ_l ialah tegangan longitudinal yang terjadi sepanjang pipa. Nilai σ_r ialah nilai tegangan radial yang terjadi sepanjang diameter pipa.

3.4 Pipa Polyethylene (PE)

Pipa yang digunakan dalam penelitian ini adalah pipa dengan material polyethylene (PE). Pipa ini memiliki sifat mudah digulung (coil-ability), ringan, fleksibel, keuletan tinggi, dapat dilas (weldability), tahan korosi, tahan abrasi dan tahan benturan (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2019).

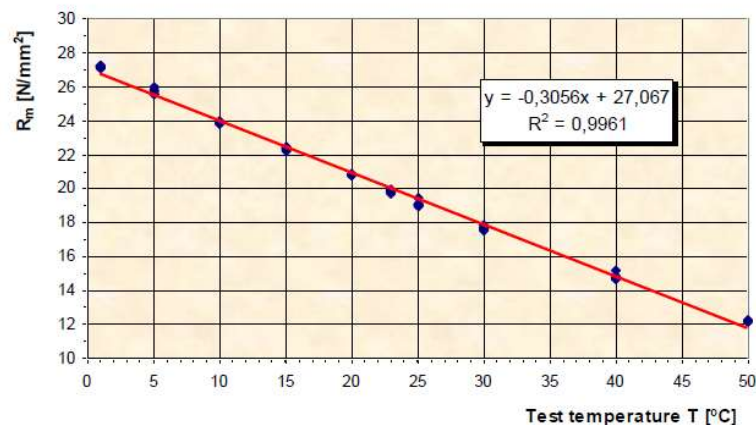
Polyethylene (PE) adalah polimer thermoplastic yang terbentuk dari rantai panjang monomer ethylene. Saat ini sudah cukup banyak varian dari polyethylene yang digunakan sebagai material pipa di antaranya PE80, PE80B, PE80C dan PE100. PE80, PE80B dan PE80C merupakan medium density polyethylene (MDPE) yang memiliki

long term performance yang sangat baik dan banyak digunakan untuk pipa bertekanan sedangkan PE100 merupakan high density polyethylene (HDPE) yang digunakan untuk penambalan (patch) karena sifatnya yang fleksibel dan mudah digulung (Khademi-Zahedi, 2018). Karakteristik dari PE80 dan PE100 diperlihatkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3- 3. Karakteristik mekanis PE80 dan PE100 (Khademi-Zahedi & Alimouri, 2018)

Material	Mechanical Properties			
	Elasticity Module (MPa)	Yield Stress (MPa)	Poisson Ratio	Thermal Expansion Coefficient ($\frac{1}{^{\circ}\text{C}}$)
PE80	427	19.3	0.35	0.0002
PE100	1034	24.8	0.4	0.0002

Walaupun memiliki beberapa kelebihan dibandingkan pipa metal, karakteristik mekanik pipa berbahan *polyethylene* sangat dipengaruhi oleh temperatur. Pada material berbahan PE80, *tensile strength* bersifat linier terhadap perubahan temperatur di mana semakin tinggi temperatur menyebabkan *tensile strength* menjadi semakin rendah (Murariu & Lozanovic-Sajic, 2016) seperti diperlihatkan pada Gambar 3.12.



Gambar 3. 12 Variasi tensile strength pada PE80 terhadap test temperature (Murariu & Lozanovic-Sajic, 2016)

Ada beberapa metode yang dipergunakan dalam tahap perancangan untuk menentukan besarnya tegangan yang diperbolehkan pada pipa *polyethylene* yang bersifat viskoelastis. Salah satu metode yang umum dilakukan dan dipergunakan pada referensi yang dirujuk dalam penelitian ini adalah memperlakukan pipa PE sebagai material yang bersifat elastis linier dan membandingkan dengan kekuatan minimum yang dibutuhkan, *Minimum Required Stress (MRS)* yang memperhitungkan pengurangan kekuatan pipa *polyethylene* karena sifat viscoelastis yang dimilikinya dengan usia pakai peralatan yang diharapkan dan suhu lingkungan dari pipa *polyethylene*.

Seperti yang telah disampaikan pada penelitian yang dilakukan oleh Merah (2006), yang kemudian dikonfirmasi oleh Murariu & Sajic (2016), bahwa *tensile properties* pada pipa *polyethylene* dipengaruhi oleh temperature Mengacu pada standar ISO 12162 (2009) atau standar EN 1555-1 (1996) mengenai pipa berbahan dasar material *thermoplastic*, nilai tegangan design atau tegangan maksimum yang diijinkan pada pipa dengan temperature lingkungan 20° dan perkiraan usia pakai peralatan 50 tahun dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\sigma_s = \frac{F_{MRS}}{C} \quad (3.17)$$

dimana, σ_s adalah tegangan design (MPa), F_{MRS} adalah kekuatan luluh minimum dari material (MPa) dan C adalah koefisien design dengan nilai minimum 1.25 untuk semua jenis pipa *polyethylene*.

Besarnya tekanan operasi yang diijinkan pada pipa *polyethylene* dinyatakan dengan persamaan,

$$P_{max} = \frac{20 \times F_{MRS}}{C(D_{SDR} - 1)} \quad (3.18)$$



dimana D_{SDR} adalah standard rasio dimensi ($\frac{D}{h}$), yaitu rasio diameter luar dengan ketebalan dinding pipa. Defleksi yang terjadi pada pipa bermaterial plastis, mengikuti persamaan yang di tentukan pada *Sprangler's Iowa Formula* dan dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{\Delta x}{D_i} = \frac{P_T}{144} \left(\frac{K_b L_b}{\frac{2E_p}{3} \left(\frac{1}{D_{SDR} - 1} \right)^3 + 0.016E'} \right) \quad (3.19)$$

dimana Δx adalah defleksi pipa arah sumbu horizontal (mm), K_b adalah *bedding factor* dari pipa PE (pada umumnya 0.1), L_d adalah *deflection lag factor* dari pipa, E_p adalah diameter pipa (mm), D_i adalah diameter dalam dari pipa (mm), dan E' adalah modulus tanah (MPa). Dari persamaan diatas dapat diperoleh formula persentase lendutan pipa adalah sebesar,

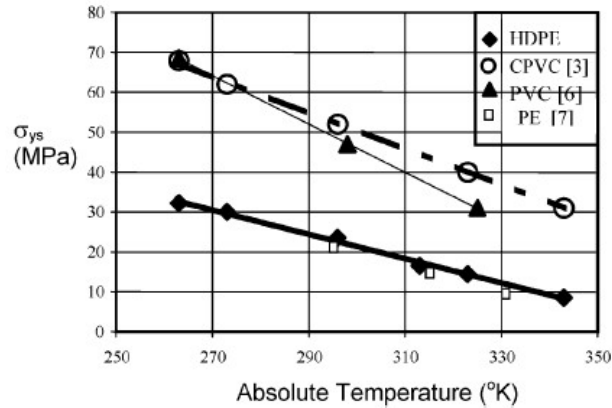
$$Defleksi = \frac{\Delta x}{D_i} \times 100\% \quad (3.20)$$

Merujuk pada Persamaan 3.17 dan material pipa *polyethylene* yang bersifat *termoplastis*, maka besarnya tegangan maksimum yang diijinkan pada pipa PE80 dan PE100 pada berbagai macam temperatur lingkungan dengan memperkirakan masa usia pakai peralatan selama 50 tahun dapat dilihat pada Tabel 3-4.

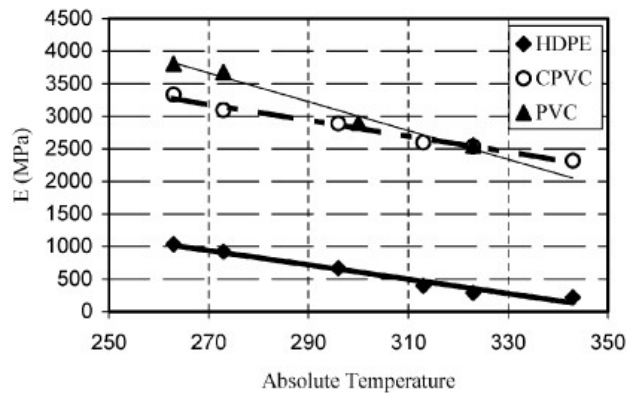
Tabel 3- 4. Nilai MRS PE80B and PE100 dengan perkiraan usia pakai 50 tahun
(Shishesaz, 2008)

PE80B (MPa)	PE100 (MPa)	Working period (years)	Working temperature (°C)
8.0	10.0	50	20
7.5	9.4	50	25
7.0	8.7	50	30
6.4	8.0	50	35
6.0	7.3	50	40

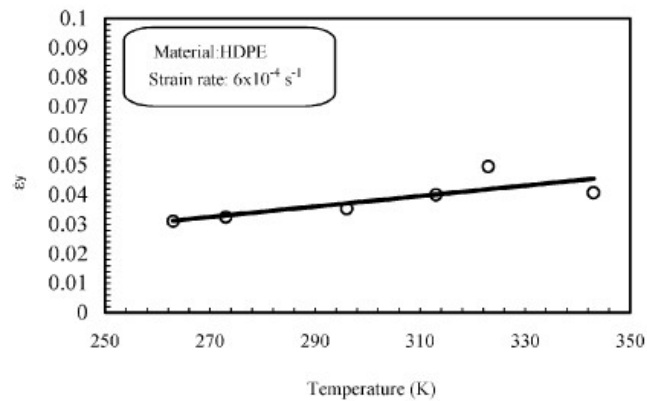
Pada material polyethylene lainnya seperti PE100 (HDPE) naiknya temperatur akan menyebabkan turunnya yield stress dan modulus elastis (Gambar 3.13 dan Gambar 3.14), tetapi variasi temperatur memiliki pengaruh yang terbatas terhadap material HDPE (Gambar 3.15). Hal ini menyebabkan aplikasi pipa-pipa berbahan polyethylene harus sangat hati-hati dan selalu mempertimbangkan perubahan temperatur lingkungan.



Gambar 3. 13 Pengaruh temperatur terhadap yield stress pada material PE100 (Merah dkk., 2006)

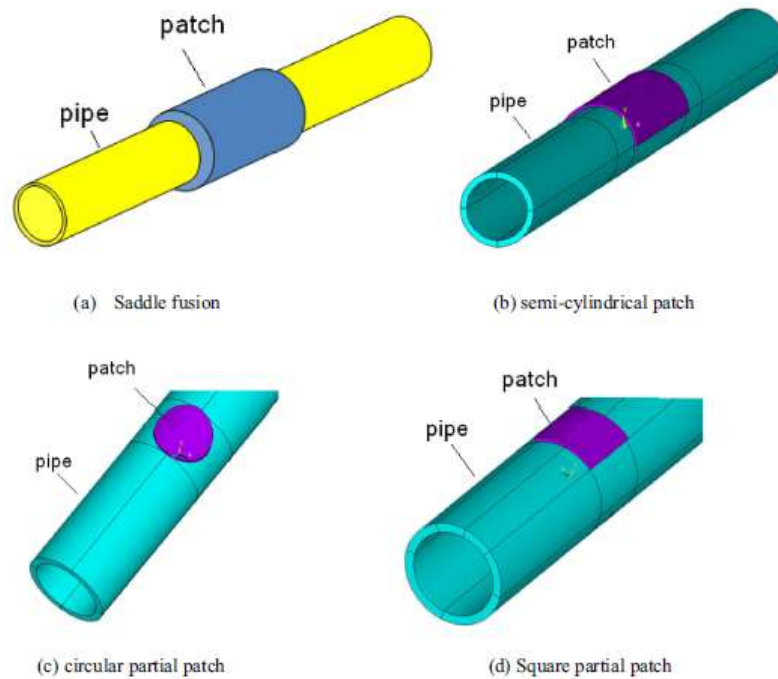


Gambar 3. 14 Pengaruh temperatur terhadap modulus elastisitas pada material PE100 (Merah dkk., 2006)



Gambar 3. 15 Variasi yield strain dengan temperatur pada material HDPE (Merah dkk., 2006)

Seperti pipa lainnya yang berbahan metal maupun bukan metal, pipa PE juga dapat mengalami kegagalan seperti *crack* atau *leak*. Kegagalan yang terjadi harus segera diperbaiki untuk mencegah kerusakan atau kerugian yang lebih besar pada transportasi fluida yang ada di dalam pipa. Pada umumnya perbaikan yang dilakukan adalah dengan melakukan penambalan pada pipa untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan pipa terhadap beban internal dan beban eksternal. Khademi-Zahedi & Shishesaz (2019) menjelaskan jenis-jenis penambalan pada pipa berdasarkan bentuknya seperti diperlihatkan pada Gambar 3.16.



Gambar 3. 16 Jenis-jenis patch berdasarkan bentuknya (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2019)

Pada penelitian ini jenis tambalan *saddle fusion patch* digunakan untuk memperkuat pipa PE80 yang memiliki *hole defect*. Langkah-langkah untuk melakukan penambalan ini adalah sebagai berikut (The Plastics Pipe Institute, 2008):

1. Bersihkan permukaan pipa yang akan dipasang saddle patch (socket). Bentuk socket untuk patch diperlihatkan pada Gambar 3.17.
2. Pasang adapter pemanas saddle dengan ukuran yang sesuai.
3. Pasang mesin saddle fusion di atas pipa.
4. Persiapkan permukaan pipa dan permukaan saddle patch sesuai dengan prosedur yang direkomendasikan oleh manufaktur.
5. Atur posisi saddle patch (socket) dan pipa sedemikian rupa untuk memudahkan pekerjaan.

6. Panaskan pipa dan saddle patch (socket) menggunakan pemanas.
7. Tekan dan tahan saddle patch (socket) dan pipa secara bersamaan.
8. Dinginkan bagian sambungan tersebut dan jauhkan mesin saddle fusion. Saddle patch (socket) yang sudah terpasang pada pipa diperlihatkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3. 17 Socket dengan material PE100 yang digunakan untuk saddle fusion patch (MTDTrifusion Electrofusion Repair Saddles, 2021)



Gambar 3. 18 Saddle fusion patch pada pipa PE80 (Khademi-Zahedi dkk., 2019)

3.5 Tegangan pada Pipa yang Memiliki *Hole Defect*

Tegangan pada pipa yang memiliki hole defect akan berbeda dibandingkan dengan pipa yang tidak memiliki kerusakan tersebut. Berikut ini adalah beberapa persamaan yang berhubungan dengan perhitungan distribusi pada pipa yang memiliki hole defect:

1. *Circular hole*.

Pipa yang memiliki *circular hole* kecil dan mendapatkan tekanan internal saja diperlihatkan pada Gambar 3.17. Nilai maksimum tegangan hoop, radial dan longitudinal pada pipa tersebut dinyatakan pada persamaan berikut (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2019):

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{P_i * (4 * k^2 + 2 - 2 * \nu)}{(k^2 - 1)} \quad (3.21)$$

$$\sigma_{rr} = -P_i \quad (3.22)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2 * \nu * P_i *}{(k^2 - 1)} \quad (3.23)$$

di mana:

$\sigma_{\theta\theta}$: Tegangan hoop

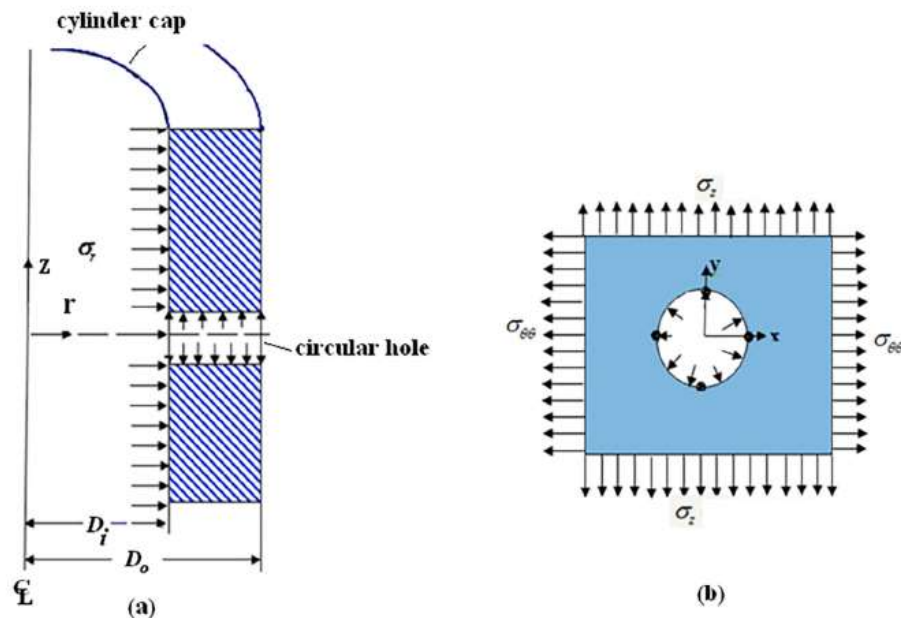
σ_{rr} : Tekanan radial

σ_{zz} : Tegangan longitudinal

P_i : Tekanan internal pipa

k : Rasio antara diameter luar terhadap diameter dalam pipa

ν : Poisson ratio



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. (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2019)

Dengan menggunakan perhitungan tegangan Von Mises sebagai nilai tegangan maksimum yang diijinkan (σ_e) sebelum pipa mengalami kegagalan, persamaan pada pipa MDPE (PE80) dengan nilai $\nu = 0.35$ dapat dituliskan sebagai berikut (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2019):

$$\sigma_e = \frac{Pi * (21 * k^4 + 3.6 * k^2 + 0.27)^{1/2}}{(k^2 - 1)} \quad (3.24)$$

2. *Elliptical hole.*

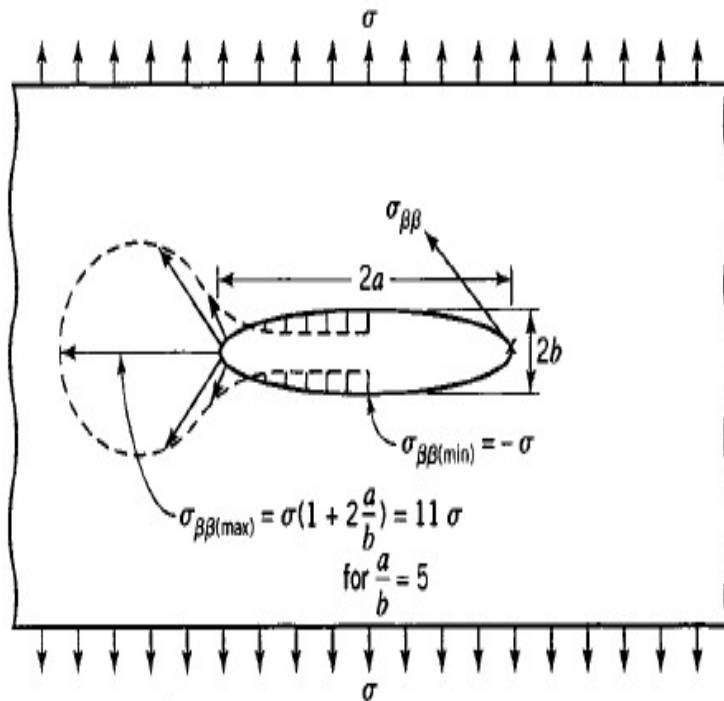
Persamaan tegangan pada *plate* yang memiliki *elliptical hole/defect* pertama kali disusun oleh English (1913):

$$\sigma_m = \sigma \left(1 + \frac{2a}{b} \right) \quad (3.25)$$

di mana:

- $\sigma_{\beta\beta(\max)}$: Tegangan tarik maksimum
 σ : Tekanan tarik

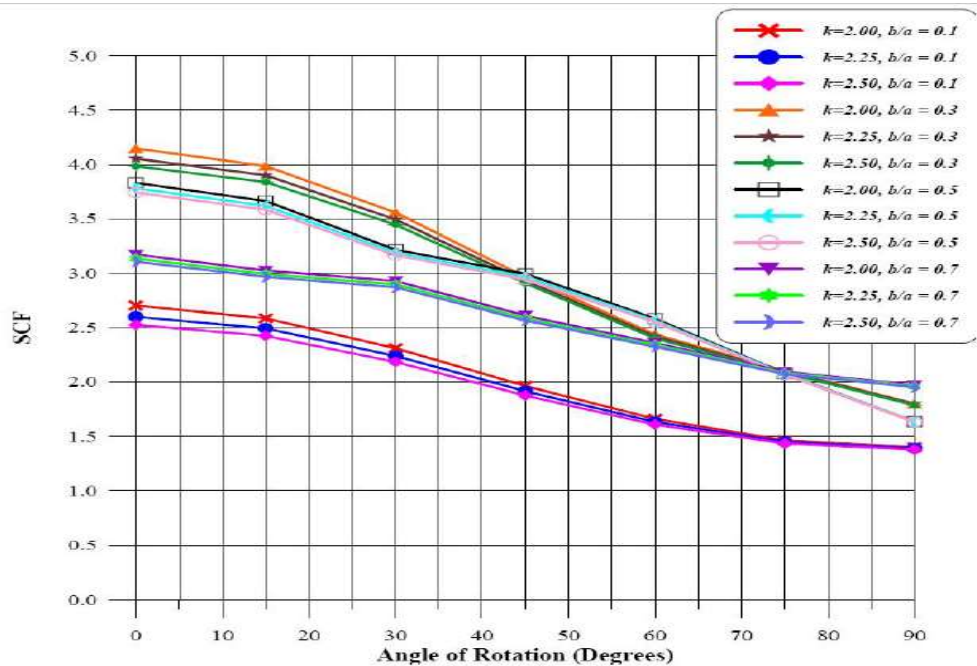
Persamaan 3.21 sesuai dengan kondisi plate yang ditunjukkan pada Gambar 3.18



Gambar 3. 20 Distribusi tegangan di sekitar *elliptical hole* pada suatu *infinite plate* yang dibebani tegangan tarik tegak lurus terhadap sumbu utama (Boresi & Schmidt, 2003)

Walaupun Persamaan 3.21 disusun untuk *elliptical hole* pada suatu bidang data, namun persamaan tersebut dapat digunakan untuk pendekatan perhitungan pada suatu silinder sebagaimana dilakukan oleh Adenya & Kihui (2010). Dalam

penelitiannya Adenya & Kihui (2010) juga menemukan pengaruh perubahan sudut orientasi terhadap *stress concentration factor* (SCF) pada suatu *elliptical hole* yang terdapat suatu silinder sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.21.



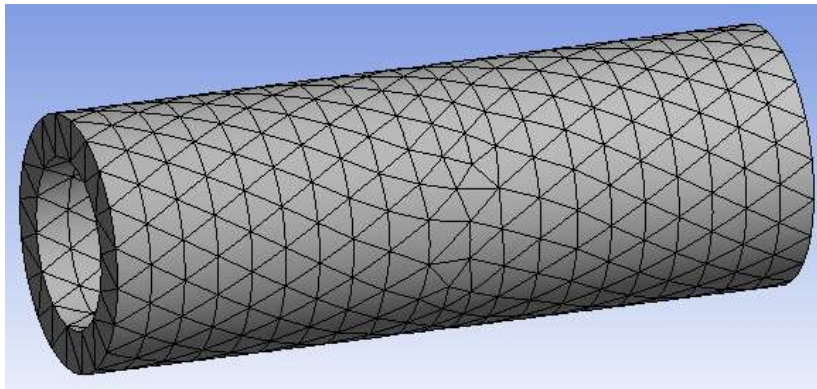
Gambar 3. 21 Stress Concentration Factor (SCF) Vs. Sudut Orientasi elliptical hole pada suatu tabung tebal berbahan SA-372 steel (Adenya & Kihui, 2010)

Dari Gambar 3.19 dapat diketahui bahwa *elliptical hole* yang sejajar/paralel dengan sumbu aksis (panjang pipa) suatu silinder (sudut orientasi 0°) memiliki SCF yang paling tinggi. Jika *elliptical hole* tersebut diputar maka SCF akan mengecil dan SCF terkecil dicapai pada saat *elliptical hole* tersebut tegak lurus dengan sumbu aksis silinder (sudut orientasi 90°)

3.6 *Finite Element Method*

Finite Element Method (FEM) adalah metode numerik tertentu untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial dalam di bidang dua dimensi atau tiga dimensi. Dalam prosesnya, FEM membagi sistem besar menjadi bagian-bagian yang lebih kecil atau sederhana yang disebut *finite element*. Hal ini dicapai dengan diskritisasi ruang tertentu dalam dimensi ruang, yang diimplementasikan dengan melakukan *meshing* pada suatu objek. Rumusan FEM dari suatu masalah akan menghasilkan sistem persamaan aljabar. Penggunaan FEM untuk keperluan analisis selanjutnya disebut *finite element analysis*.

Meshing pada suatu objek bertujuan membagi objek tersebut menjadi bagian-bagian yang lebih kecil. Bagian-bagian ini disebut elemen dan setiap elemen terhubung dengan yang lainnya melalui nodal. Selanjutnya dibuat persamaan matematika yang mewakili objek tersebut. Gambar 3.19 menunjukkan contoh *meshing* yang dilakukan pada suatu pipa.



Gambar 3. 22 Meshing pada pipa

Jenis-jenis meshing yang umum digunakan pada *solid mechanics* adalah sebagai berikut (ANSYS *Academic Online Training: Introduction to Computational Solid Mechanics*, 2020):

1. Hexahedral dengan karakteristik sebagai berikut:
 - Jumlah elemen/sel relatif lebih sedikit pada volume geometri yang sama
 - Akurasi lebih tinggi
 - Sulit dibentuk pada geometri kompleks
2. Tetrahedral dengan karakteristik sebagai berikut:
 - Jumlah elemen/sel relatif lebih banyak pada volume geometri yang sama
 - Akurasi kurang baik
 - Sangat mudah dibentuk pada geometri kompleks

Dikarenakan kompleksnya bentuk geometri pipa yang diperbaiki dan interaksi antara tanah dan pipa tersebut, di dalam penelitian ini digunakan *finite element analysis tool*, ANSYS 20 R2 R2, untuk membantu melakukan analisis pengaruh perubahan orientasi *defective hole* dan ketebalan *patch* terhadap distribusi tegangan pada pipa. Parameter yang diamati adalah tegangan Von Mises yang merupakan tegangan yang mewakili tiga tegangan *principal*. Tegangan Von Mises ini diperlukan untuk melihat batas aman dari tegangan yang mungkin dialami oleh pipa tersebut.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam simulasi menggunakan *finite element analysis tool*, ANSYS 20 R2 meliputi (ANSYS *Academic Online Training: Introduction to Computational Solid Mechanics*, 2020):

1. Membangun geometri objek yang akan disimulasikan. Hal ini dapat dilakukan dengan melalui *tool* ini sendiri atau menggunakan *tool* lain yang outputnya dapat dibaca oleh ANSYS 20 R2. Geometri mendeskripsikan bentuk masalah yang akan dianalisis. Geometri tersusun dari volume, *surface*, *curve*, dan *point*. Di dalam analisis teknik, geometri terbagi menjadi dua: geometri *solid* dan geometri *fluid*. Pada analisis *solid mechanics*, variabel-variabel *stress* dan *displacement* tersimpan di dalam part itu sendiri sehingga, untuk analisis *solid mechanics*, geometri harus dibuat menyesuaikan bentuk *part*-nya.

2. *Meshing* merupakan proses mencacah suatu domain menjadi subdomain yang lebih kecil yang dinamakan elemen. Elemen berfungsi menyimpan variabel-variabel *solid mechanics*. Sel dapat diibaratkan seperti *dot pixel* pada televisi dimana satu buah dot menyimpan satu warna, semakin padat dot pixelnya, maka gradasi warna akan semakin tajam. Semakin banyak sel pada suatu domain, maka gradasi variabel akan semakin tinggi/akurat.
3. *Physics setup*. Dalam proses ini akan ditentukan:
 - Jenis dan properti material (densitas, modulus, poisson's *ratio* dan sebagainya)
 - *Support* pada struktur
 - Pembebanan (gaya, *moment*, tekanan dan sebagainya)
 - *Joint* (*fixed*, *revolute*, *cylindrical*, *slot* dan sebagainya)
 - Kontak antar bagian (*bonded*, *frictional*, *frictionless*, *no separation*)
 - *Load step*
4. *Results*. Pada tahap ini dilakukan perhitungan untuk memperoleh hasil analisis yang diperlukan berdasarkan parameter-parameter yang ditentukan pada langkah-langkah sebelumnya seperti *equivalent stress* (Von Mises), deformasi dan lain-lain

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Alat dan Bahan

Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi pengaruh perubahan ketebalan tambalan (*patch*) dan diameter panjang lubang elips pada pipa yang dialiri gas bertekanan. Peralatan yang digunakan untuk menunjang kegiatan penelitian meliputi:

1. ANSYS 20 R2.2, *software* aplikasi dari *finite element analysis* untuk mensimulasikan distribusi tegangan pada pipa berdasarkan variasi-variasi yang ditentukan dalam penelitian.
2. Komputer *desktop* dengan processor i9, memori 32GB dan hard-disk 1TB untuk melakukan simulasi *software*.
3. Komputer laptop standar, digunakan untuk penulisan laporan penelitian dan melihat hasil simulasi *finite element analysis* dalam bentuk tabel numerik dan grafik.

Bahan atau materi yang menjadi referensi dalam penelitian ini berasal dari penelitian sebelumnya, yaitu *Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes* (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2018). Dalam penelitian tersebut dibahas pengaruh perubahan rasio diameter pada *circular defect* dan lebar *patch* terhadap distribusi tegangan pada pipa. Referensi penelitian lainnya Analisis Distribusi Tegangan Pada Pipa Berlubang Elips Dengan Penguatan Saddle Fusion Patch Menggunakan Finite Element Analysis (Sulaiman, 2021). Dalam penelitiannya, Sulaiman melakukan simulasi untuk mengetahui ketebalan optimal dari *patch* yang digunakan dalam perbaikan pipa PE80 dan melihat keefektifan dari ketebalan *patch* dengan melakukan variasi ukuran pada

lubang *crack*. Penelitian-penelitian lainnya yang juga menjadi referensi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 2-1.

4.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1 di mana langkah-langkah di dalam penelitian meliputi, penentuan asumsi dan kondisi batas, pemodelan menggunakan *finite element*, validasi model, pengecilan *mesh* dan penggunaan *inflation mesh*, variasi dari model awal, dan diakhiri dengan analisis hasil simulasi dan kesimpulan. Tahapan studi literatur tidak dimasukkan dalam diagram alur penelitian karena tahapan ini adalah tahapan yang dilakukan penulis sebelum melakukan penelitian. Studi literatur dilakukan dengan melakukan kajian pada beberapa referensi terkait dengan penelitian yang dilakukan yang rangkumannya dapat dilihat pada Tabel 2-1.

4.2.1 Penentuan Asumsi dan Kondisi Batas

Asumsi dan kondisi batas yang digunakan dalam penelitian ini mengacu kepada penelitian yang dilakukan oleh Khademi-Zahedi & Shishesaz (2018) seperti ditunjukkan pada Tabel 4-1.

Tabel 4- 1. Spesifikasi Sistem

	Pipa	
1	Material pipa	PE80 /MDPE (Tabel 3-3 dan Tabel 3-4)
2	Panjang pipa (l)	0,5 m
3	Diameter luar pipa (D_o)	122,936 mm

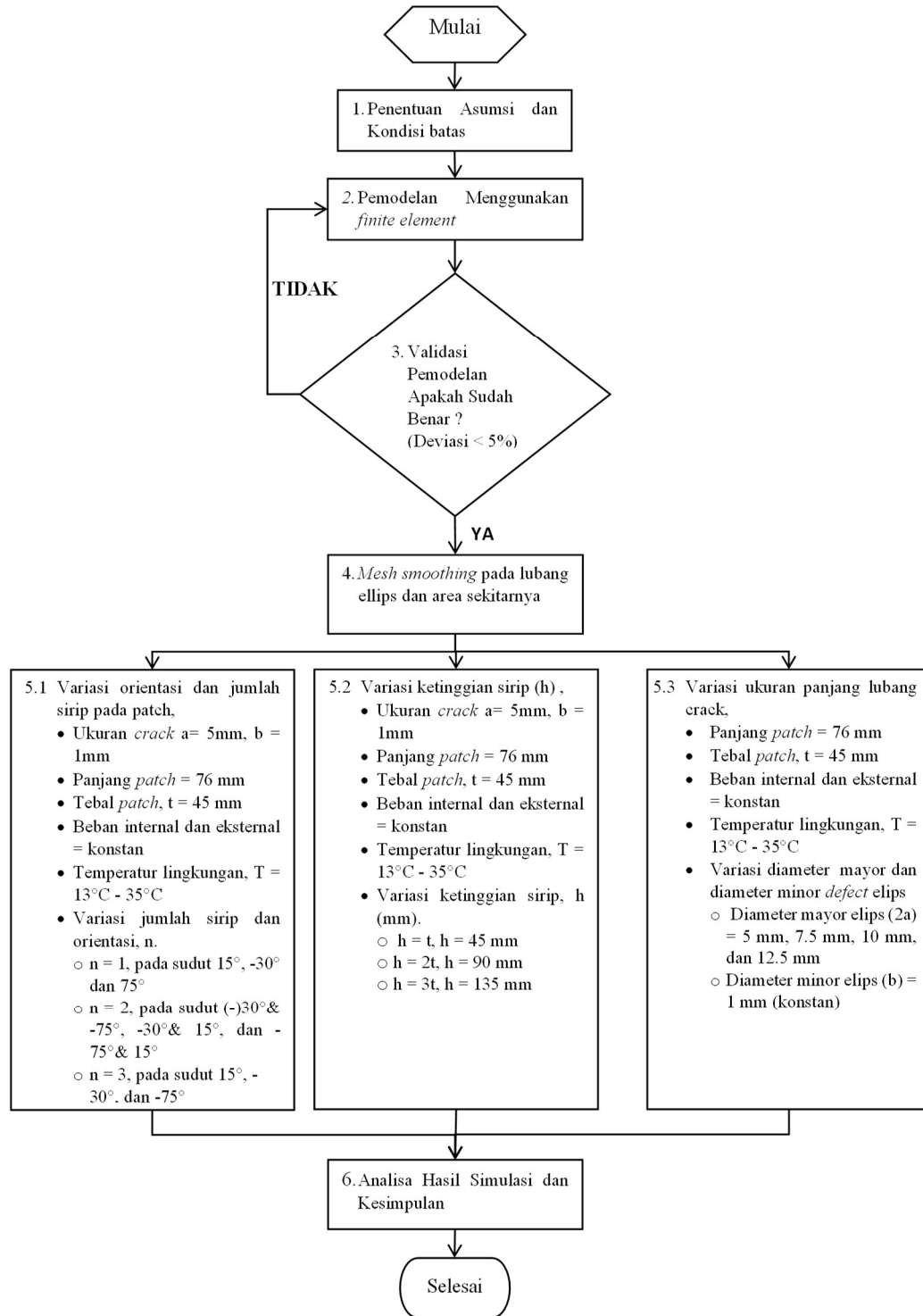


	Pipa	
4	Diameter dalam pipa (D_i)	101,6 mm
5	Tebal pipa (t)	21,336 mm
6	Rasio diameter luar terhadap diameter dalam pipa, $k = D_o / D_i$	1,21
7	Tekanan internal	4 Bar (405.300 Pa)
	Beban	
8	Beban statis (kolom tanah)	
8.1	<i>Asphalt</i>	Sesuai Tabel 4-2
8.2	<i>GW soil with 90% Proctor density</i>	Sesuai Tabel 4-2
8.3	<i>SM soil with 90% Proctor density</i>	Sesuai Tabel 4-2
8.4	<i>GW soil with 95% Proctor density</i>	Sesuai Tabel 4-2
8.5	<i>GW soil with 85% Proctor density</i>	Sesuai Tabel 4-2
8.6	Kedalaman penguburan pipa	125 cm
8.7	Perubahan siklus temperatur tanah	22°C (13°C - 35°C)
9	Beban konstan (kendaraan)	544.780 Pa
	Defect	
10	Bentuk	<i>Elliptical hole</i>
11	Diameter panjang (a)	5 mm
12	Diameter pendek (b)	Sesuai rasio diameter
13	Rasio diameter (b/a)	0,2,



	Pipa	
	<i>Patch</i>	
14	Jenis <i>patch</i>	<i>Saddle fusion</i>
15	Material <i>patch</i>	PE100 / HDPE (Tabel 3-3 dan Tabel 3-4)
16	Lebar <i>patch</i>	76 mm
17	Temperatur pemanasan	310°C

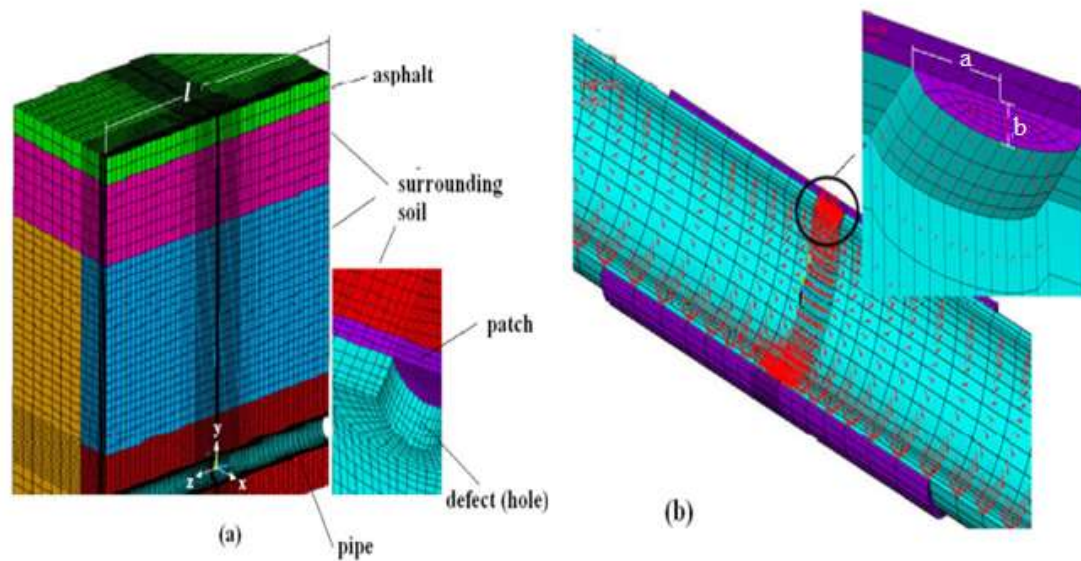
Pada penelitian yang dilakukan ini, sifat mekanis pipa PE80 mengacu pada Tabel 3.3, namun tegangan maksimum yang diijinkan mengacu pada Tabel 3.4. Nilai tegangan maksimum yang dipakai mempertimbangkan bahawa pipa PE80 adalah material *viscoelastis* yang bersifat *thermoplastic*, seperti yang uraian pada subbab 3.4, sehingga tegangan maksimum yang diijinkan pada pipa PE80 dengan temperatur lingkungan 35°C dan harapan masa pakai peralatan 50 tahun adalah sebesar 6.4 MPa.



Gambar 4. 1 Diagram Alir Penelitian

4.2.2 `Pemodelan Menggunakan *Finite Element*

Dalam penelitian ini, pemodelan menggunakan *finite element analysis tool* dengan langkah-langkah yang dijelaskan pada subbab 3.6. Adapun ilustrasi model yang akan dibangun oleh *tool* tersebut diperlihatkan pada Gambar 4.2.

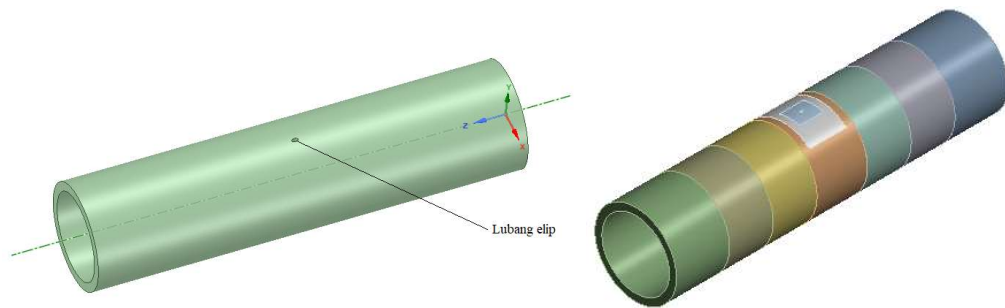


Gambar 4. 2 (a) Model finite element pipa yang di-patch dan dikubur di dalam tanah.
(b) Pipa bertekanan dengan lubang elips (tanah dihilangkan). (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2018)

Pemodelan geometri dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak AUTODESK INVENTOR. Pemodelan geometri dilakukan dalam 3 tahap. Tahapan pertama adalah membuat pemodelan pipa PE 80 dengan defect pada permukaan pipa dan memberikan tambalan (patching) PE100 pada area crack sesuai dengan variasi yang akan diberikan. Pemodelan berikutnya adalah membuat pemodelan dari lapisan tanah yang mengubur pipa PE80. Pemodelan geometri pada pipa dan tanah dilakukan dengan melakukan partisi pada pipa PE80, patching PE100 dan lapisan tanah dengan tujuan untuk mempermudah pada saat proses meshing.

a. Pemodelan pipa yang memiliki lubang elips

Pipa yang digunakan dalam penelitian ini berbahan PE80 dengan diameter luar, $D_o = 122,936$ mm dan diameter dalam $D_i = 101,6$ mm. Pipa memiliki lubang elips dengan diameter panjang (a) 5 mm dan diameter pendek (b) sesuai rasio diameter elips tersebut sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.17.



Gambar 4. 3 Pemodelan pipa yang memiliki lubang elips

b. Pemodelan pipa yang mengalami beban internal dan eksternal

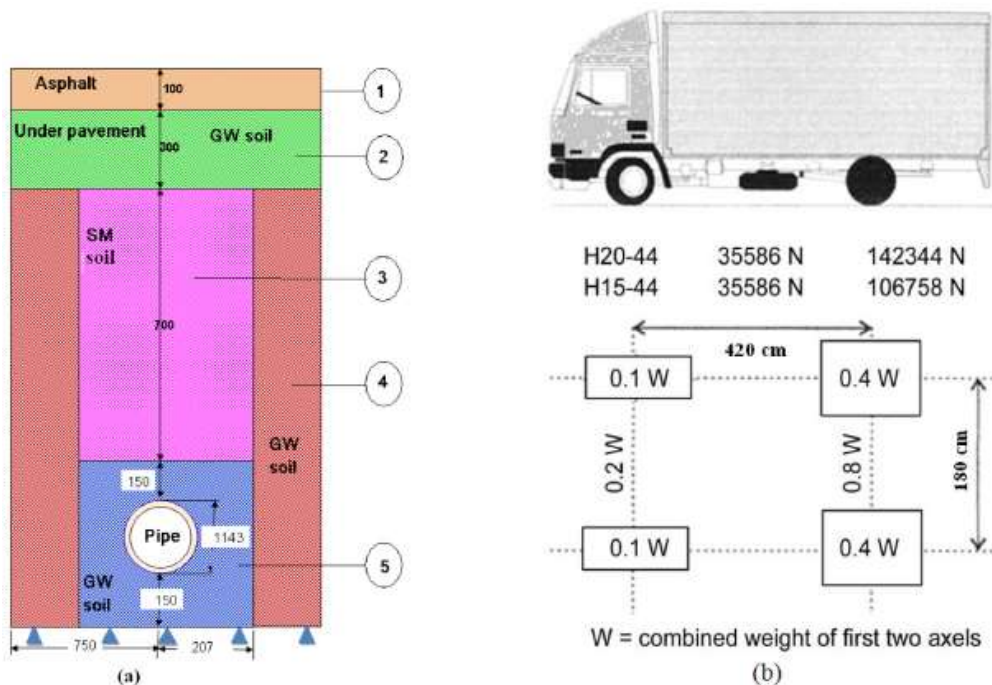
Pipa selanjutnya dikubur di dalam tanah sedalam 125 cm. Pada kedalaman ini, perubahan cuaca di permukaan tanah tidak akan mempengaruhi temperatur pipa (Shishesaz, 2003).

Ilustrasi lapisan tanah yang melingkupi pipa sesuai dengan teori saluran parit diperlihatkan pada Gambar 4.4 (a) dan karakteristik masing-masing lapisan tanah dinyatakan pada Tabel 4-2.

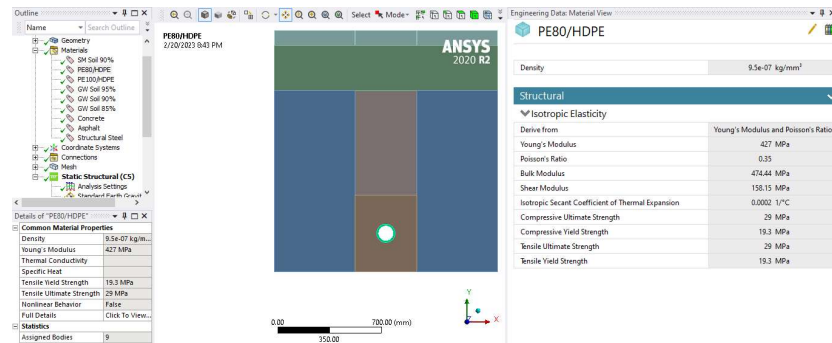
Ilustrasi penerapan parameter *material properties* dari lapisan tanah pada pemodelan ini data dilihat pada Gambar 4.5.

Tabel 4- 2 Karakteristik lapisan tanah di sekitar pipa pada Gambar 4.2 (a).
(Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2018)

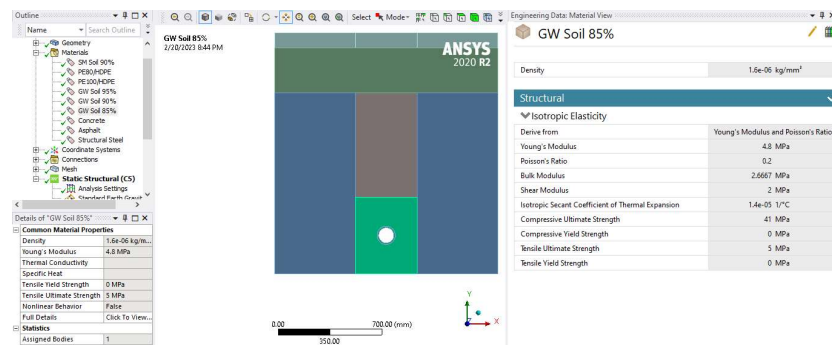
No. Lapisan	Jenis tanah	Modulus elastisitas (MPa)	Density (kg/m ³)	Poisson's ratio
1	<i>Asphalt</i>	173.0	2 200	0.35
2	<i>GW soil with 90% Proctor density</i>	6.9	1 700	0.20
3	<i>SM soil with 90% Proctor density</i>	6.9	1 900	0.35
4	<i>GW soil with 95% Proctor density</i>	15.0	2 000	0.35
5	<i>GW soil with 85% Proctor density</i>	4.8	1 600	0.20



Gambar 4. 4 (a) Dimensi saluran parit tanah dan pipa yang dinyatakan dalam satuan mm (karakteristik setiap lapisan tanah dinyatakan pada Tabel 4.2). (b) Beban kendaraan yang melintas. (Khademi-Zahedi & Shishesaz, 2018)



(a)



(b)

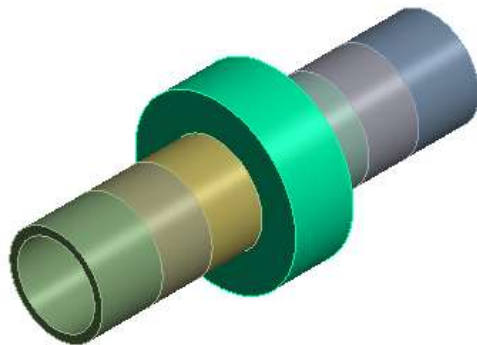
Gambar 4. 5 Assignment material properties pada pemodelan yang dilakukan, contoh (a) pada pipa PE80 dan (b) pada lapisan tanah disekitar pipa PE80

Di samping beban akibat kolom tanah yang ada di atasnya, pipa mendapat beban dari kendaraan yang melewatinya. Dalam penelitian ini beban kendaraan dianggap sebagai truk H20 berdasarkan standar American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Cara menghitung beban truk H20 mengacu kepada Gambar 4.4(b). Besar beban akibat truk H20 dianggap sebesar 544,780 Pa. Dari pemodelan ini selanjutnya akan dihitung nilai *maximum Von Mises stress* pada pipa tersebut untuk rasio diameter *defect* yang disebutkan pada Tabel 4-1 nomor 13.

c. Pemodelan pipa yang sudah ditambal (*patch*)

Bagian pipa yang memiliki lubang elips ditambal dengan *saddle fusion patch* menggunakan material PE100. Walaupun pipa dikubur di dalam tanah pada kedalaman 125 cm dan memiliki temperatur harian yang konstan, tetapi adanya perubahan musim dalam setiap tahunnya menyebabkan terjadinya siklus temperatur tahunan di dalam tanah sebesar -22°C . Hal ini menyebabkan perlunya dilakukan analisis *thermal stress* pada pipa yang sudah diberi tambalan untuk memastikan efektivitasnya.

Seperti pada pemodelan sebelumnya (pipa sebelum diberi *patch*), nilai *maximum Von Mises* pada pipa akan dihitung untuk rasio lubang elips yang disebutkan pada Tabel 4-1 nomor 13.



Gambar 4. 6 Pemodelan pipa yang sudah ditambal dengan saddle fusion patch

4.2.3 Validasi Pemodelan

Validasi model yang dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman, dkk (2021). Parameter yang diamati meliputi:

- a. *Maximum Von Mises stress* pada pipa PE80 yang mendapatkan beban internal dan eksternal dan telah mendapatkan tambalan (*patch*) dengan material PE100

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5. Pada validasi pemodelan yang dilakukan, ketebalan *patch* yang digunakan adalah 45 mm. Nilai ini dipilih mengacu pada hasil penelitian Sulaiman (2021) bahwa titik optimal ketebalan *patch* diperoleh Ketika menggunakan ketebalan 45 mm.

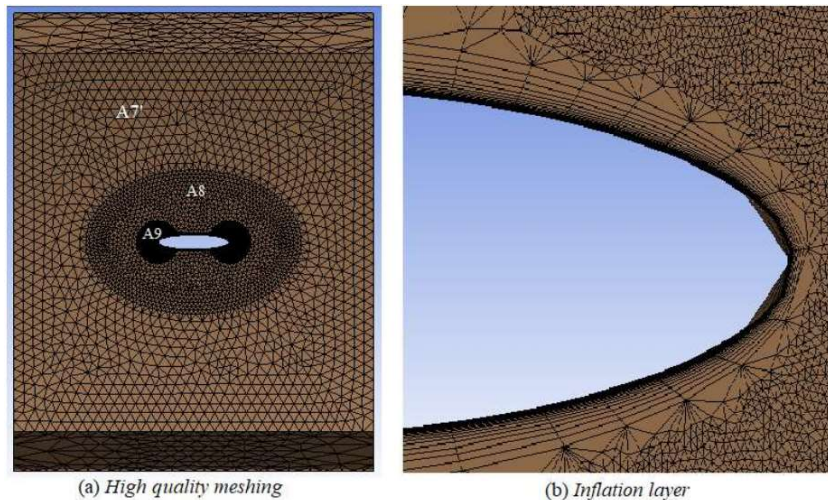
- b. *Maximum Von Mises stress* pada pipa PE80 yang mendapatkan beban internal dan eksternal serta telah diberi tambalan (*patch*) dengan material PE100 dengan diameter panjang lubang elips. Variasi ukuran lubang dipergunakan dalam pemodelan adalah variasi pada diameter Panjang (2a) yaitu 5 mm, 7.5 mm, 10 mm, dan 12.5 mm. Sedangkan untuk diameter pendek (b) konstan pada ukuran 1 mm untuk tiap variasi ukuran 2a.

Jika hasil simulasi memiliki perbedaan kurang dari 5% dibandingkan dengan model sebelumnya maka model dianggap valid. Dengan menggunakan model yang sudah valid, variasi pada model yang meliputi perubahan ketebalan tambalan (*patch*) dan diameter panjang lubang elips dapat dilakukan.

4.2.4 Memperhalus *Mesh* (*Mesh Smoothing*) Pada Lubang Elips dan Area Sekitarnya

Penelitian yang dilakukan oleh Khademi-Zahedi & Shishesaz (2018) bertujuan untuk menentukan tegangan Von Mises maksimum pada pipa yang memiliki lubang elips sehingga *mesh* yang digunakan kurang rapat dan menyebabkan distribusi tegangan yang diperoleh masih belum akurat. Untuk menghasikan distribusi tegangan yang lebih teliti maka *mesh* di sekitar lubang elips perlu diperkecil sehingga *finite element* menjadi jauh lebih kecil dan dapat menganalisis secara lebih teliti dan dapat menjangkau bagian-bagian sempit pada kedua ujung elips yang tadinya tidak dapat dianalisis oleh *meshing* awal. Di samping itu dilakukan *refining mesh layer* (ANSYS

Meshing User's Guide, 2010) pada pertemuan antara pinggirannya dan lubang elips supaya bentuk geometri lubang elips sesuai dengan kondisi yang terjadi di lapangan.



Gambar 4. 7 Mesh yang telah ditingkatkan kualitasnya di sekitar lubang elips.

4.2.5 Variasi Model

Dalam pemodelan ini digunakan variasi sebagai berikut:

1. Variasi jumlah sirip yang dipasang dan orientasi dari sirip
2. Variasi ketinggian dari sirip yang dipasang
3. Variasi diameter dan panjang *defect* elips pada permukaan pipa PE80

4.2.5.1 Variasi Jumlah Sirip dan Orientasi Sirip pada *Patch*

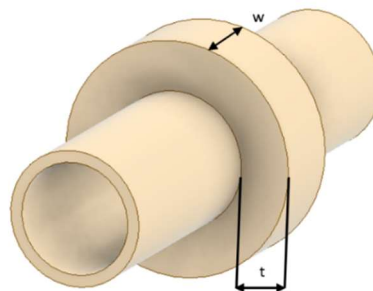
Pada penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman (2021), ketebalan material tambalan (*patch*) mencapai titik optimal pada ketebalan 45 mm. Ketebalan optimal diperoleh ketika material *patch* yang ditambahkan dengan tujuan memperbaiki kerusakan pada pipa PE80 dapat menurunkan tegangan maksimum yang bekerja pada

pipa PE80 mencapai nilai tegangan kerja maksimum yang diijinkan untuk pipa PE80 yaitu 6.4 MPa.

Seperti yang telah disampaikan pada Bab I, subbab 1.3, lubang elips pada permukaan pipa terletak pada bagian atas dari pipa, sudut 0° dan metode tambalan yang digunakan adalah *saddle fusion patch*. Karena keterbatasan referensi dalam penentuan sudut orientasi pada sirip yang ditambahkan, maka penentuan orientasi sirip pada tambalan menggunakan pendekatan,

1. Sirip pertama yang ditambahkan berada sedekat mungkin dengan lokasi *defect*, yaitu 0° , sehingga sirip pertama ditambahkan pada sudut 15° .
2. Sirip kedua yang ditambahkan berada tegak lurus dengan sirip pertama, sehingga diperoleh sirip kedua pada posisi -75° dari posisi *defect*.
3. Sirip ketiga yang ditambahkan berada pada titik tengah antara sirip pertama dan kedua, sehingga diperoleh posisi sirip kedua adalah -30° dari posisi *defect*.

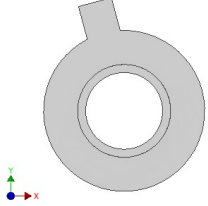
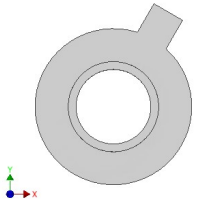
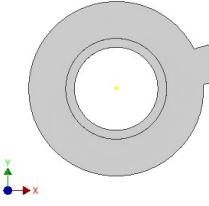
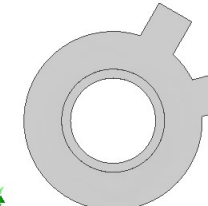
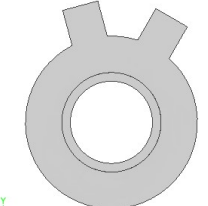
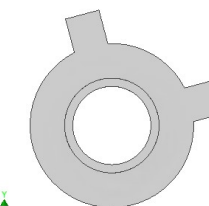
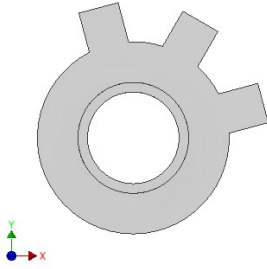
Penambahan sirip pada *patch* dilakukan dengan memberikan variasi pada jumlah sirip yang ditambahkan dan orientasi dari sirip. Jumlah simulasi yang dilakukan pada variasi inii ditunjukkan pada Tabel 4-3. Total variasi yang dilakukan pada simulasi tahap pertama ini sebanyak 7 variasi.



Gambar 4. 8 Pemodelan pipe PE80 dengan tebal tambalan (t) konstan 45 mm dan lebar patch (w) konstan 76 mm



Tabel 4- 3 Variasi Jumlah Sirip dan Orientasi Sudut Sirip

Jumlah Sirip	Jumlah dan Orientasi Sirip		
1	 <p data-bbox="475 804 735 892">Orientasi Sirip pada Sudut $+15^\circ$</p>	 <p data-bbox="790 804 1050 892">Orientasi Sirip pada Sudut -30°</p>	 <p data-bbox="1094 804 1354 892">Orientasi Sirip pada Sudut -75°</p>
2	 <p data-bbox="475 1209 735 1297">Orientasi Sirip pada Sudut -30° & -75°</p>	 <p data-bbox="790 1209 1050 1297">Orientasi Sirip pada Sudut $+15^\circ$ & -30°</p>	 <p data-bbox="1094 1209 1354 1297">Orientasi Sirip pada Sudut $+15^\circ$ & -75°</p>
3	 <p data-bbox="618 1640 1221 1675">Orientasi Sirip pada Sudut $+15^\circ$, -30°, dan -75°</p>		

4.2.5.2 Variasi Ketinggian Sirip pada *Patch*

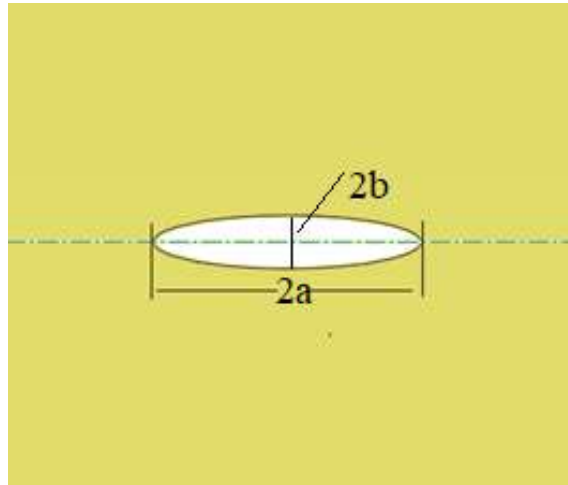
Ketinggian sirip divariasikan dengan nilai t mm, $2t$ mm dan $3t$ mm di mana nilai t adalah ketebalan sirip. Dimana nilai t adalah 45 mm. Sehingga variasi ketinggian sirip adalah $t = 45$ mm, $2t = 90$ mm, dan $3t = 135$ mm. Variasi ketebalan sirip dilakukan pada variasi dengan nilai paling optimal yang diperoleh pada simulasi tahap pertama. Tujuan dari variasi ketinggian sirip ini untuk melihat pengaruh penambahan ketinggian sirip dengan perubahan tegangan Von Mises yang bekerja pada area *crack* dipermukaan pipa PE80. Tabel simulasi dengan variasi ketinggian sirip dapat di lihat pada Tabel 4-4. Total variasi yang dilakukan pada simulasi tahap kedua ini sebanyak 3 variasi.

Tabel 4- 4 Variasi ketinggian sirip penguat terhadap tegangan Von Mises

Variasi Ke -	Tinggi Sirip (h) (mm)
1	45
2	90
3	135

4.2.5.3 Variasi Diameter Panjang Pada Lubang Elips

Diameter panjang pada lubang elips ($2a$) akan divariasikan sebesar 5 mm, 7,5 mm, 10 mm dan 12,5 mm seperti diperlihatkan pada Gambar 4.9. Tujuan dari variasi diameter panjang pada *crack* untuk mengetahui perubahan distribusi tegangan pipa yang telah diberi tambalan (*patch*) pada area *crack*. Simulasi yang dilakukan berjumlah empat simulasi dan akan dicatat pada Tabel 4.5. Simulasi ini juga bertujuan untuk melihat batas efektifitas dari tambalan yang diberikan. Jumlah variasi yang dilakukan pada tahap ketiga ini sebanyak 4 variasi.



Gambar 4. 9 Perubahan diameter panjang ($2a$) lubang elips pada pipa

Tabel 4- 5 Variasi diameter panjang lubang elips terhadap tegangan Von Mises

Simulasi ke-	Variasi diameter panjang (mm)
1	5
2	7.5
3	10
4	12.5

4.2.6 Analisis Hasil Simulasi dan Kesimpulan

Pada bagian ini akan dilakukan analisis terhadap hasil simulasi yang meliputi parameter-parameter sebagai berikut:

- Perubahan nilai tegangan Von Mises maksimum terhadap penambahan sirip pada variasi jumlah dan orientasi sirip pada area *crack* dan distribusi tegangannya.



5. Perubahan nilai tegangan Von Mises maksimum terhadap perubahan ketinggian sirip pada area *crack* dan distribusi tegangannya.
6. Efektifitas pada ketebalan *patch*, jumlah sirip dan orientasinya, dan ketinggian sirip yang diberikan pada area *crack* dengan melihat perubahan nilai tegangan Von Mises maksimum dan distribusi tegangan yang bekerja pada area *crack* di permukaan pipa PE80.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Pemodelan Awal

Pemodelan awal mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Khademi Zahedi & Shish haz (2018) dan Sulaiman (2021). Pemodelan ini akan dilakukan dalam tiga tahap yang berurutan:

1. Pemodelan pipa PE80 yang memiliki cacat permukaan berupa lubang berbentuk elips.
2. Pemodelan pipa PE80 yang mengalami beban internal dan eksternal
3. Pemodelan pipa PE80 yang telah diberi tambalan (*patch*) pipa PE100.
4. Pemodelan pipa PE80 yang telah diberi tambalan (*patch*) pipa PE100 dengan tambahan sirip dengan variasi sebagai berikut:
 - a. Variasi jumlah sirip yang dipasang dan orientasi dari sirip
 - b. Variasi ketinggian dari sirip yang dipasang
 - c. Variasi diameter dan panjang defect elips pada permukaan pipa PE80

Pemodelan tahap pertama dan kedua akan menggunakan parameter – parameter yang disebutkan pada tabel berikut:

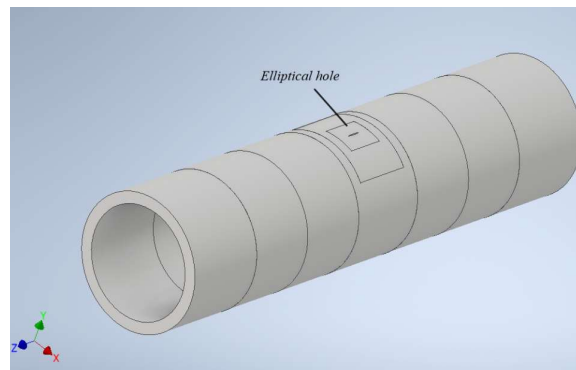
- Tabel 4-1, Spesifikasi Sistem
- Tabel 4-2, Karakteristik lapisan tanah di sekitar pipa yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 (a)

Pada pemodelan tahap ketiga, penambahan tambalan (*patch*) pada bagian pipa PE80 yang berlubang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.1 akan menggunakan tipe tambalan *saddle fusion patch* dengan material tambalan PE100.

Tahap validasi pemodelan akan dilakukan pada pemodelan tahap ketiga dengan membandingkan hasil simulasi pemodelan yang dilakukan dengan hasil simulasi pemodelan yang dilakukan oleh Sulaiman (2021) sebagai referensi dari penelitian ini.

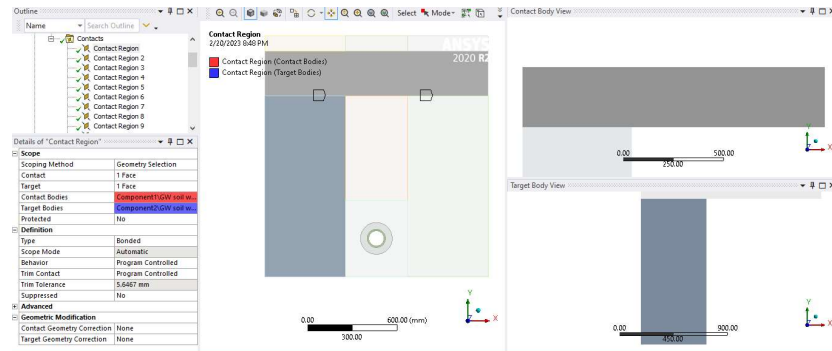
5.1.1 Pemodelan Pipa PE80 yang Memiliki Cacat Permukaan Lubang Elips

Pipa memiliki Panjang 500 mm dengan diameter luar 122,936 mm serta diameter dalam 101,6 mm. Diameter panjang (a) pada *defect* adalah 5 mm dan diameter pendek (b) sebesar 1 mm. Pada pemodelan awal tahap pertama ini, lubang elips pada pipa memiliki rasio diameter (b/a) sebesar 0.2.

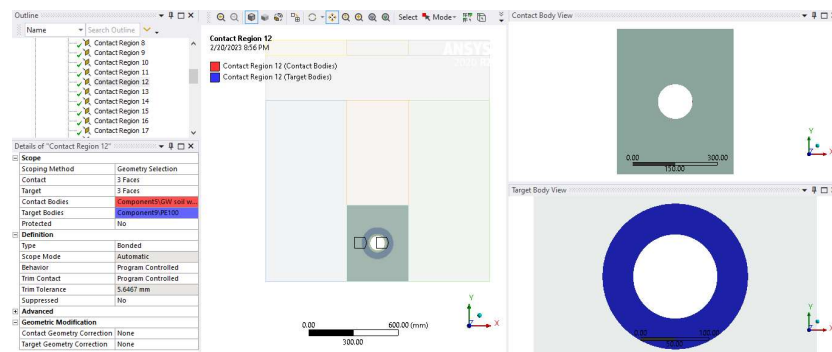


Gambar 5. 1 Bentuk Geometri Pipa PE80 dengan Lubang Elips

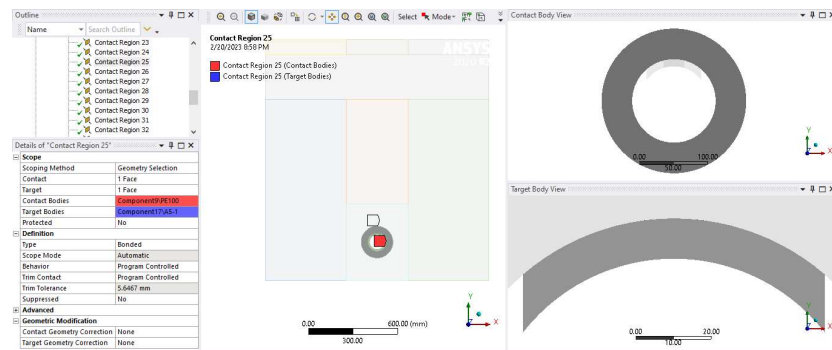
Seperti yang telah disampaikan pada subbab 4.2.2 diatas, pemodelan geometri baik pada pipa dan lapisan tanah dilakukan dengan melakukan partisi pada tiap-tiap bagian. Dalam pemodelan ini, tiap bagian dari model yang dibuat disatukan dengan fitur *contact*. Tipe *contact* yang dipilih dalam pemodelan ini adalah *bonded* dengan pertimbangan interaksi antar permukaan kontak adalah saling menyatu dan tidak terdapat celah yang memisahkan.



(a)



(b)



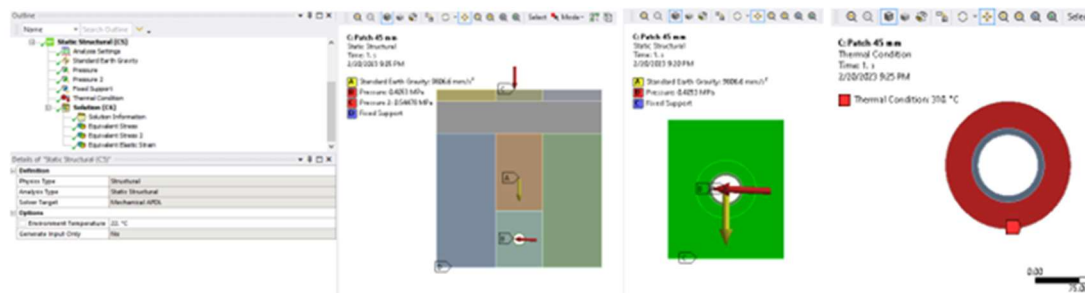
(c)

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

5.1.2 Pemodelan Pipa yang Mengalami Beban Internal dan Eksternal

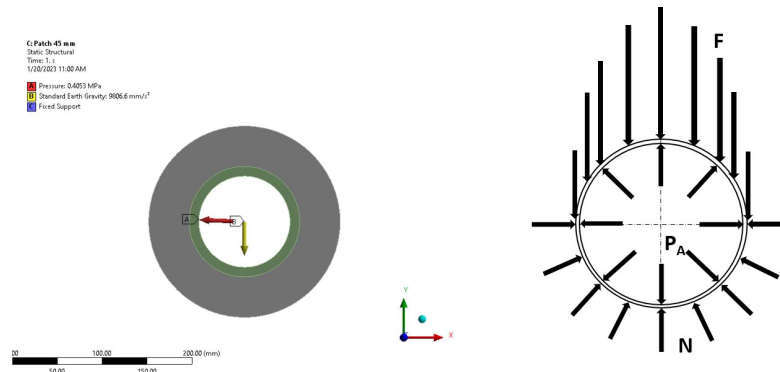
Pembebanan yang diberikan pada pemodelan adalah gaya gravitasi untuk semua bagian dari pemodelan, tekanan internal yang bekerja pada pipa PE 80 akibat tekanan fluida (gas) yang mengalir dalam pipa PE80, dan tekanan dari kendaraan yang melintas pada permukaan tanah. Pipa dengan lubang elips yang telah dimodelkan pada tahap pertama kemudian diberi beban internal dan eksternal. Beban internal pada pipa berasal dari tekanan operasi fluida sebesar $P_A = 405.300 \text{ Pa}$. Beban eksternal pada pipa berasal dari beban statis dan beban dinamis. Beban statis berasal dari beban lapisan tanah disekitar pipa dan beban dinamis berasal dari beban kendaraan yang melintas diatas pipa. Konfigurasi beban eksternal dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Gambar 5.3 menunjukkan pemodelan sistem secara menyeluruh kondisi batas yang berlaku pada pemodelan dan diagram benda bebas dari pipa PE80 yang dikubur dalam tanah. F adalah gaya yang bekerja pada pipa PE80 akibat adanya beban *settlement* tanah yang mengubur pipa. Pembagian dalam pemodelan lapisan tanah bertujuan untuk memudahkan dalam proses pemodelan dan simulasi. Beban kendaraan berupa tapak ban seluas 0.2 m^2 pada lapisan tanah bagian B2 sebesar $P_B = 544.780 \text{ Pa}$.



Gambar 5. 3 Kondisi Pembebanan dan Parameter Pada Pemodelan

Selain kondisi pembebanan diatas, pada sisi bawah pemodelan diberikan tumpuan tetap (*fixed support*). *Thermal condition* juga diberikan pada material PE100 untuk menggambarkan proses *saddle fusion patch* yang dilakukan pada suhu 310°C . Diagram benda bebas dari pemodelan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 5.4.



Gambar 5. 4 Diagram benda bebas pada pipa PE80 dengan tambalan yang dikubur dalam tanah

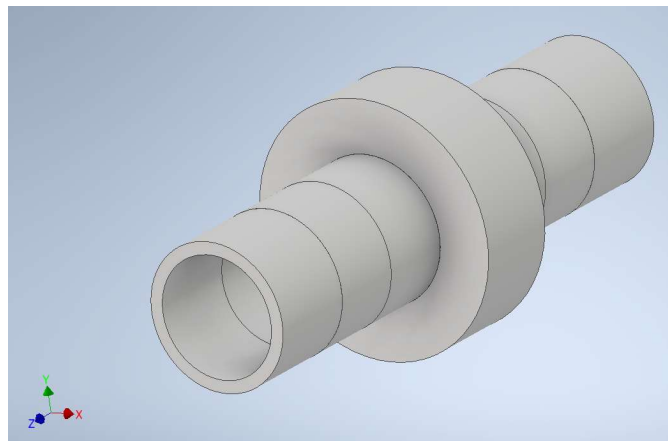
P_A menggambarkan distribusi gaya yang bekerja pada sepanjang bagian dalam pipa akibat adanya tekanan internal pada pipa yang berasal dari tekanan fluida kerja dalam pipa. F menggambarkan gaya yang terdistribusi pada sisi luar pipa PE80 akibat beban tanah dan beban kendaraan, dan N adalah gaya yang bekerja pada sisi bawah pipa PE80 akibat beban pipa dengan fluida ditambah dengan beban dari tanah yang mengubur pipa PE80.

5.1.3 Pemodelan Pipa PE80 dengan Penambahan Tambalan (*Patching*) PE100

Pemodelan tahap selanjutnya adalah melakukan pemodelan pada pipa PE80 yang telah diberi tambalan (*patching*) pada bagian lubang elips dengan menggunakan metode *saddle fusion patch*. Pada proses penambalan ini, bagian dalam material tambalan (PE100) dan bagian luar pipa PE80 yang mempunyai lubang elips disatukan dengan cara dipanaskan hingga mencapai temperature 310°C. Setelah kondisi permukaan telah memenuhi parameter penambalan, maka kedua permukaan tersebut disatukan dengan menggunakan *bonded contact connection* dengan *trim tolerance* 0. Detail proses penambalan telah diuraikan pada subbab 3.4. Setelah proses penambalan selesai dilakukan, bagian yang dilakukan penambalan diberi perlakuan *thermal* dengan tujuan untuk menurunkan temperatur pada area tambalan dari temperatur 310°C

sampai pada temperatur lingkungan. Perlakuan *thermal* yang diberikan juga bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terdapat pada area tambalan.

Pada pemodelan ini, ketebalan tambalan yang dipergunakan adalah 45 mm dan panjang dari tambalan adalah 76 mm. Nilai ketebalan dan panjang mengacu pada hasil penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman (2021). Geometri dari pipa PE80 yang diberi tambalan pipa PE100 diperlihatkan pada Gambar 5.5.



Gambar 5. 5 Geometri pipa PE80 dengan tambalan (patching) PE100

5.1.4 Proses Meshing

Proses *meshing* adalah proses mengubah bentuk tidak beraturan menjadi volume yang lebih dikenal yang disebut "elemen." Tahapan *meshing* adalah salah satu langkah terpenting dalam melakukan simulasi yang akurat menggunakan analisa metode elemen hingga. Sebuah *mesh* terdiri dari elemen-elemen yang mengandung node (lokasi koordinat dalam ruang yang dapat bervariasi menurut jenis elemen) yang mewakili bentuk geometri.

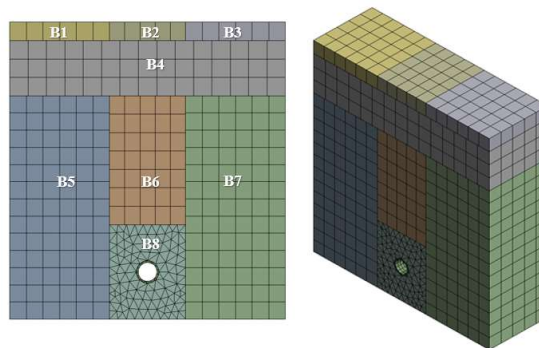
Secara umum, ada dua jenis metode *meshing* yang dikenal pada pemodelan struktural seperti yang dilakukan pada penelitian ini, yaitu:

- *Tetrahedral element meshing* atau *tet*
- *Hexahedral element meshing* atau *hex*

Elemen *hex* atau *brick* umumnya menghasilkan hasil yang lebih akurat pada jumlah elemen yang lebih rendah daripada elemen *tet*. Jika itu adalah geometri yang kompleks, elemen *tet* merupakan pilihan terbaik. Kualitas *mesh* yang baik akan memberikan hasil analisa yang lebih presisi. Kualitas *mesh* yang tidak baik dapat mengakibatkan kesulitan dalam proses konvergensi, yang dapat menyebabkan hasil yang salah dan kesimpulan yang salah.

Pada pemodelan yang dilakukan, proses *meshing* dilakukan pada lapisan tanah, pipa PE80 dengan cacat permukaan berupa lubang elips dan lapisan tambalan PE100.

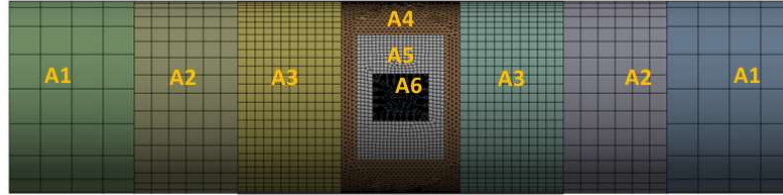
1. Proses *meshing* pada lapisan tanah



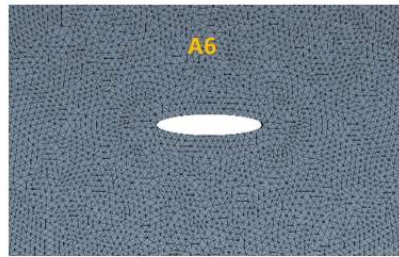
Gambar 5. 6 *Meshing* pada lapisan tanah

Ukuran *mesh* pada lapisan tanah adalah sebagai berikut, $B1 = B2 = B3 = B4 = B5 = B6 = B7 = 100$ mm dan $B8 = 50$ mm. Ukuran *mesh* pada bagian B8 lebih kecil dibanding dengan bagian yang lain dengan tujuan untuk meningkatkan akurasi dari simulasi yang dilakukan pada area yang paling dekat dengan pipa HDPE sebagai objek dari studi yang dilakukan.

2. Proses *meshing* pada pipa PE80



(a) *Meshing* di seluruh permukaan pipa PE80



(b) *Meshing* pada bagian pipe PE80 yang berlubang elips

Gambar 5. 7 *Meshing* pada permukaan pipa PE80

Ukuran mesh pada permukaan pipa PE80 dapat dilihat pada Tabel 5.1. Ukuran *mesh* menggunakan ukuran yang bervariasi dengan urutan dari ukuran yang lebih besar pada sisi ujung specimen simulasi dan semakin kecil mendekati titik tengah pipa PE80 yang memiliki lubang elips.

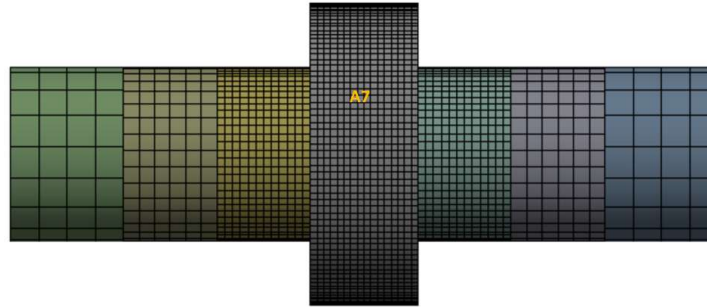
Tabel 5- 1 Ukuran Mesh pada permukaan Pipa PE80

Area Pada Pipa	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	25	12	6	3	2.5	0.75

3. Proses *meshing* pada tambalan (*patching*) PE100.

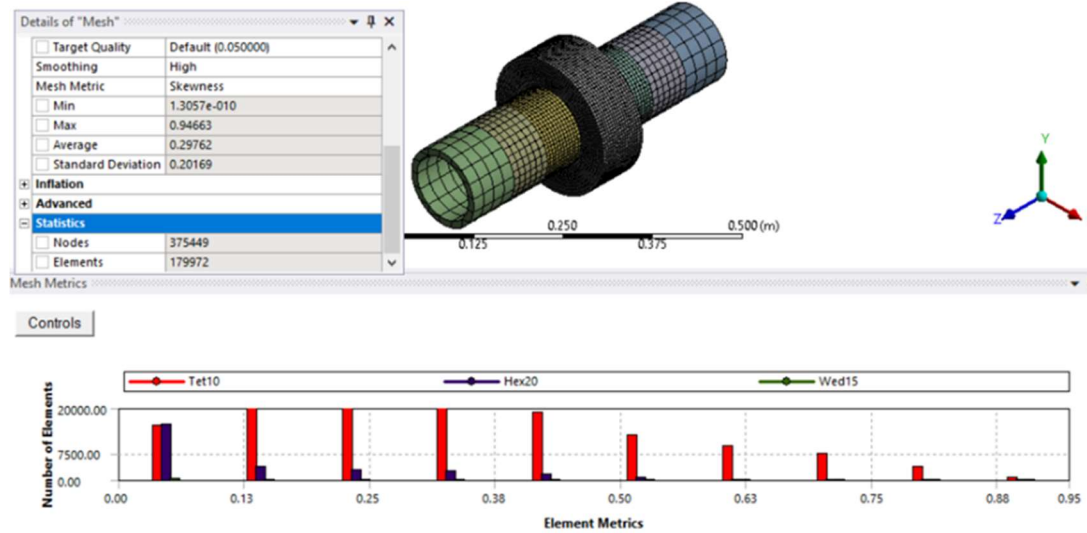
Pada penelitian ini, salah satu rujukan utama yang dipergunakan adalah penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman (2021). Dalam penelitiannya, Sulaiman melakukan variasi ketebalan *patch* 40 mm, 45 mm, 50 mm, dan 55

mm. Mengacu pada penelitian tersebut, pemodelan tahap ketiga menggunakan variasi nilai ketebalan *patch* dalam proses validasi pemodelan yang dilakukan. Ukuran *mesh* pada area tambalan (*patch*), A7, adalah 5mm.



Gambar 5. 8 *Meshing* pada pipe PE80 dengan *saddle fusion patch* PE100

Pada proses pemodelan awal ini, diperoleh nilai *skewness* rata-rata dari model adalah 0.29. *Skewness* didefinisikan sebagai perbedaan antara bentuk sel dan bentuk sel sama sisi dengan volume yang setara. Nilai *skewness* yang tinggi dapat menurunkan akurasi dan memberikan hasil simulasi yang tidak akurat. Aturan umum adalah bahwa nilai *skewness* maksimum untuk jaring segitiga/tetrahedral harus dijaga di bawah 0,95, dengan nilai rata-rata kurang dari 0,33. Nilai maksimum di atas 0,95 dapat menyebabkan kesulitan konvergensi. Dengan nilai *skewness* rata-rata sebesar 0.29, maka pemodelan yang dilakukan sudah memiliki kualitas *meshing* yang bagus dan proses pemodelan dapat dilanjutkan.

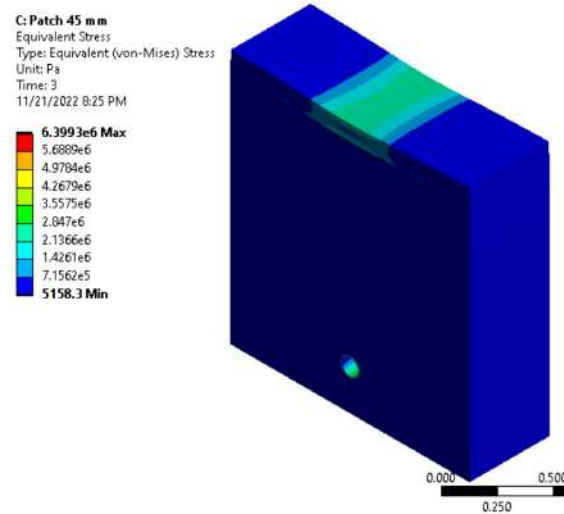


Gambar 5. 9 Nilai *Skewness* dari pemodelan yang dilakukan

5.2 Simulasi dan Validasi Pemodelan

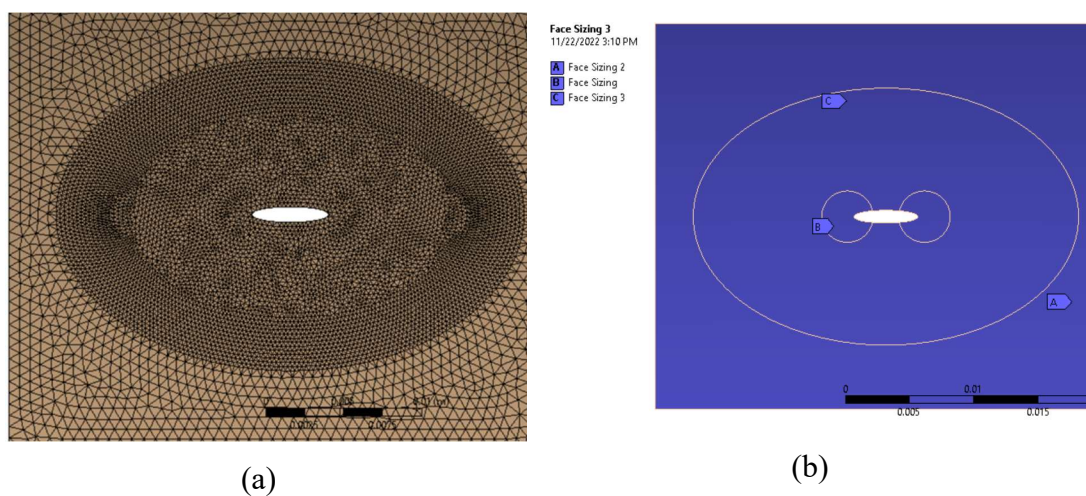
Seperti yang telah disampaikan pada subbab 5.1, bahwa penelitian yang dilakukan ini menggunakan acuan utama penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman (2021), maka dalam melakukan pemodelan dan validasi pemodelan mengacu pada hasil simulasi yang dilakukan oleh Sulaiman pada penelitian sebelumnya.

Pada Gambar 5.2, ditunjukkan pemodelan lapisan tanah yang mengubur pipa HDPE yang memiliki lubang *defect* berbentuk elips. Proses *meshing* pada model lapisan tanah ditunjukkan pada Gambar 5.6. Gambar 5.10 akan menunjukkan proses simulasi pada model lapisan tanah. Pada simulasi yang dilakukan, pipa mendapatkan beban eksternal yang berasal dari beban kendaraan yang melintas di atasnya, P_1 , sebesar 544.780 Pa. Pada saat yang bersamaan, pipa juga menerima beban internal dari aliran fluida didalamnya, P_2 , sebesar 405.300 Pa.



Gambar 5. 10 Simulasi pipa PE80 dengan pembebanan eksternal dan internal

Pada pemodelan yang dilakukan, untuk meningkatkan keakuratan dari simulasi yang dilakukan, dilakukan proses *refining* pada *meshing* yang dilakukan. Proses penghalusan (*refining*) dilakukan pada area ujung dari defect pada permukaan pipa. *Refining* pada *mesh* dilakukan dengan *high quality mesh*. Hasil *meshing* pada area lubang elips yang telah di *refining* dapat dilihat pada Gambar 5.11. Ukuran dari *meshing* pada area sekitar lubang elips dapat dilihat pada Tabel 5.2.

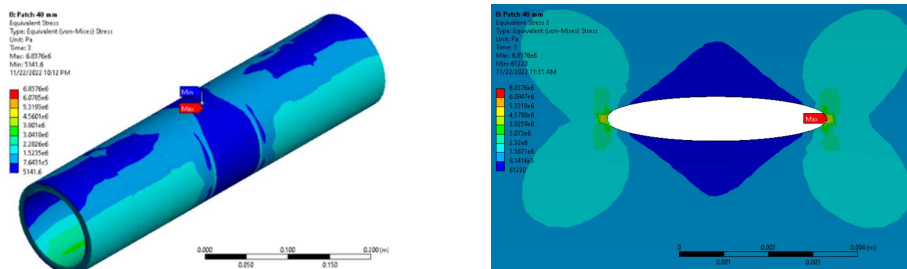


Gambar 5. 11 *High Quality Meshing* pada area Lubang Elips

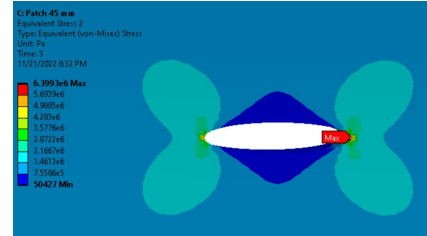
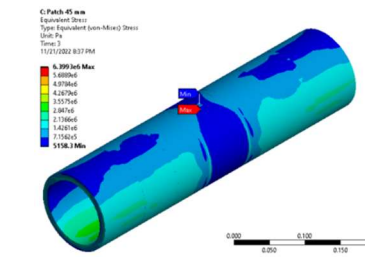
Tabel 5- 2 Ukuran High Quality Meshing pada Sekitar Lubang Elips

Area Pada Lubang Elips	A	B	C
Ukuran <i>Mesh</i> (mm)	0.75	0.3	0.3

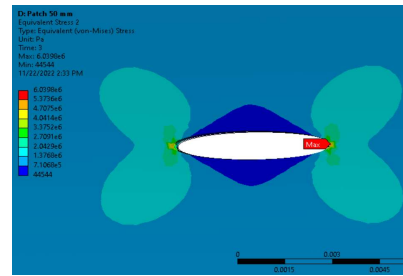
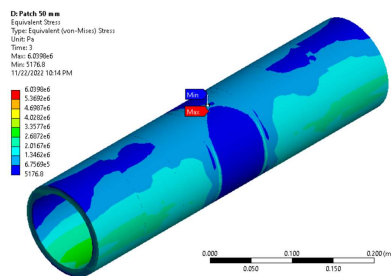
Simulasi dimulai dengan memvalidasi pemodelan pipa dengan lubang elips yang telah ditambah. Validasi model dilakukan dengan menggunakan hasil penelitian yang dilakukan Sulaiman (2021) dengan variasi ketebalan material *patch* 40 mm, 45 mm, 50 mm dan 55 mm. Hasil simulasi untuk nilai tegangan maksimum Von Mises dapat dilihat pada Tabel 5-3, dan grafiknya dapat dilihat pada Gambar 5.13. Hasil validasi pemodelan untuk nilai regangan pada lubang elips dengan variasi ketebalan tambalan dapat dilihat pada Tabel 5-4 dan Gambar 5.14 untuk grafiknya. Ketebalan *patch* yang optimal diperoleh saat tegangan von mises maksimum berkurang menjadi tegangan maksimum yang diijinkan PE80, 6,4 MPa. Penyimpangan maksimum antara hasil sebelumnya dan penelitian ini adalah 1.532% untuk tegangan maksimum dan 0.107% untuk nilai regangan. Karena hasilnya di bawah 5%, maka model tersebut dinyatakan memenuhi syarat validasi dapat digunakan untuk pemodelan selanjutnya.



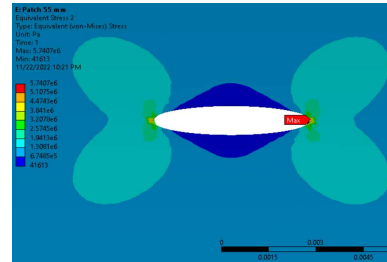
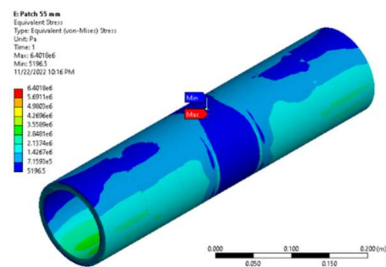
(a)



(b)



(c)

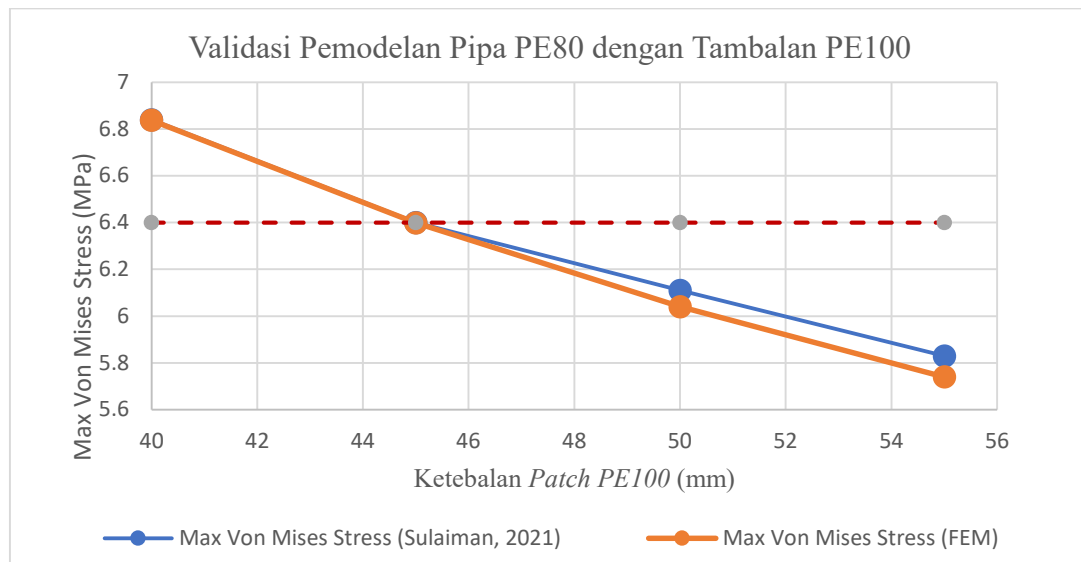


(d)

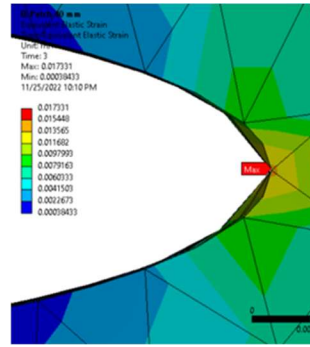
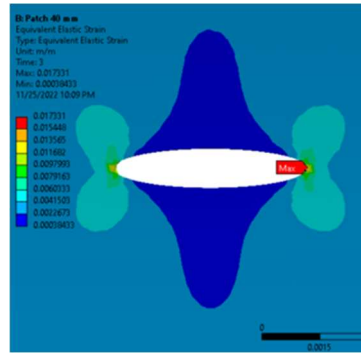
Gambar 5. 12 Nilai *Maximum* Tegangan Von Mises pada variasi Ketebalan *Patch* (a) 40 mm, (b) 45 mm, (c) 50 mm, (d) 55 mm

Tabel 5- 3 Validasi Pemodelan Tegangan Maksimum Pipa PE80 dengan Tambalan PE100

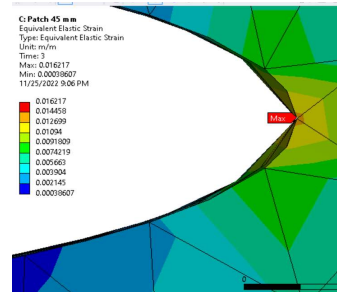
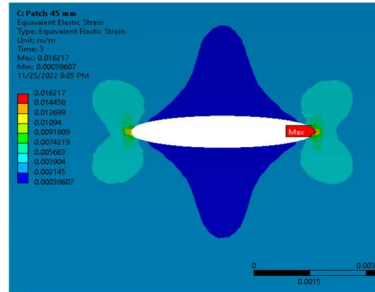
Ketebalan Tambalan (mm)	Max Von Mises Stress (Sulaiman, 2021)	Max Von Mises Stress (FEM)	Deviasi (%)
40	6.84	6.8376	0.035%
45	6.4	6.3993	0.011%
50	6.11	6.0398	1.149%
55	5.83	5.7407	1.532%



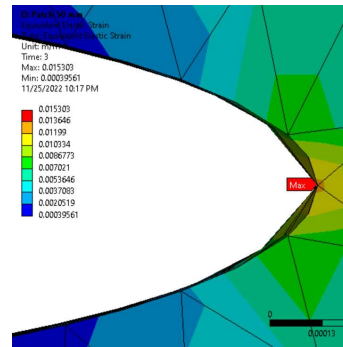
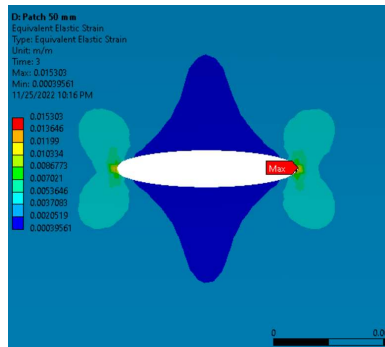
Gambar 5. 13 Grafik Validasi Nilai Tegangan pada Pemodelan Pipa dengan Material Tambalan



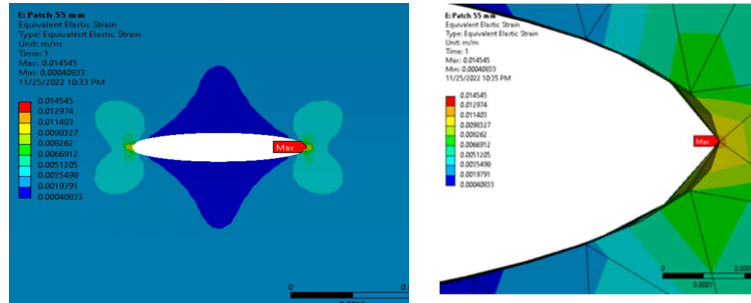
(a)



(b)



(c)

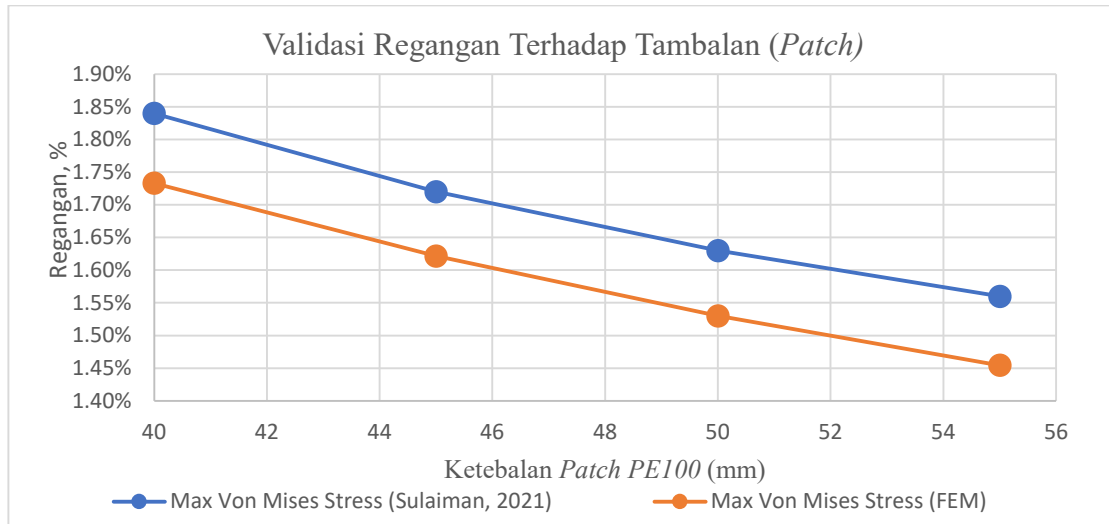


(d)

Gambar 5. 14 Regangan Maksimum Pipa PE80 pada Variasi Ketebalan Patch (a) 40 mm, (b) 45 mm, (c) 50 mm, dan (d) 55 mm

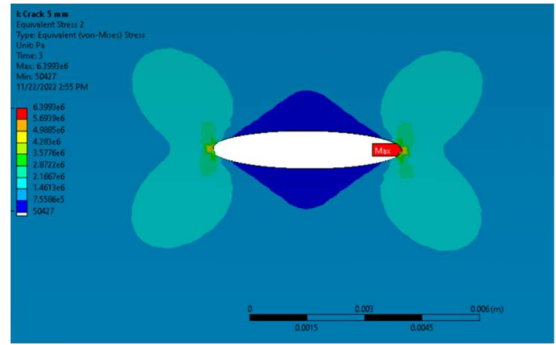
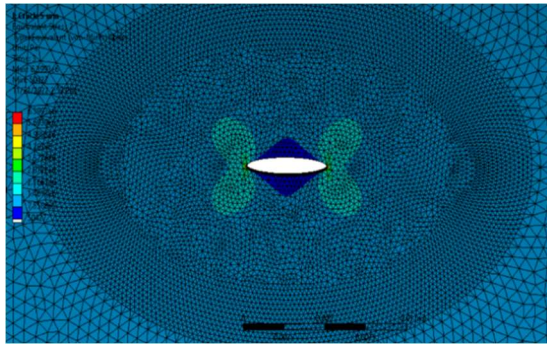
Tabel 5- 4 Validasi Pemodelan Regangan pada Pipa PE80 dengan Tambalan PE100

Ketebalan Tambalan (mm)	Max Von Mises Stress (Sulaiman, 2021)	Max Von Mises Stress (FEM)	Deviasi (%)
40	1.84%	1.73%	0.107%
45	1.72%	1.62%	0.098%
50	1.63%	1.53%	0.100%
55	1.56%	1.45%	0.105%

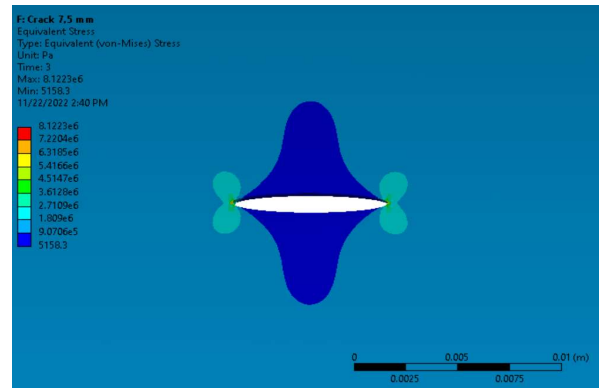
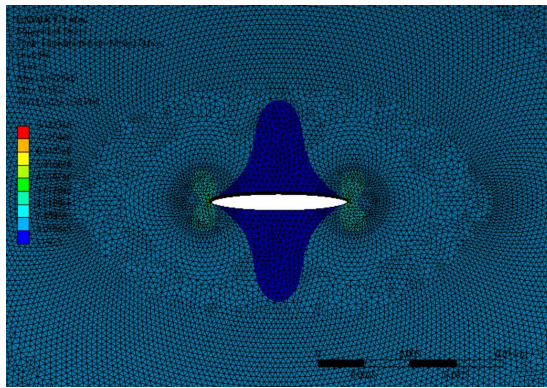


Gambar 5. 15 Grafik Validasi Nilai Regangan pada Pemodelan Pipa dengan Material Tambalan

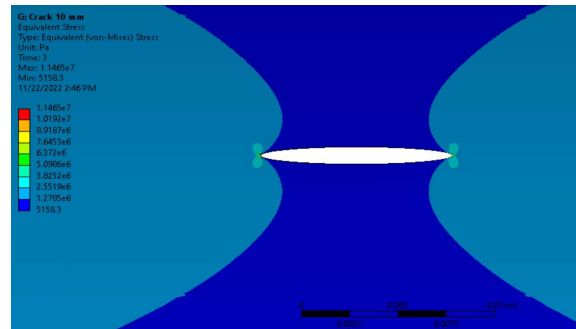
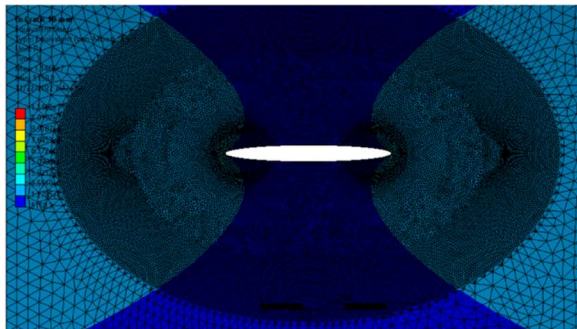
Validasi berikutnya adalah untuk pemodelan variasi diameter panjang lubang elips. Simulasi ini dilakukan bertujuan untuk melihat kualitas efektifitas dari tambalan yang diberikan pada pipa PE80. Validasi dilakukan dengan variasi ukuran lubang retak 5 mm, 7.5 mm, 10 mm dan 12.5 mm dengan ketebalan *patch* 45 mm. Hasil dari validasi pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.16, dan Tabel 5-5. Grafik validasi pemodelan dapat dilihat pada Gambar 5.17. Penyimpangan maksimum antara hasil sebelumnya dan penelitian ini adalah 4.662 %. Karena hasilnya di bawah 5%, maka model tersebut dinyatakan memenuhi syarat validasi dapat digunakan untuk pemodelan selanjutnya.



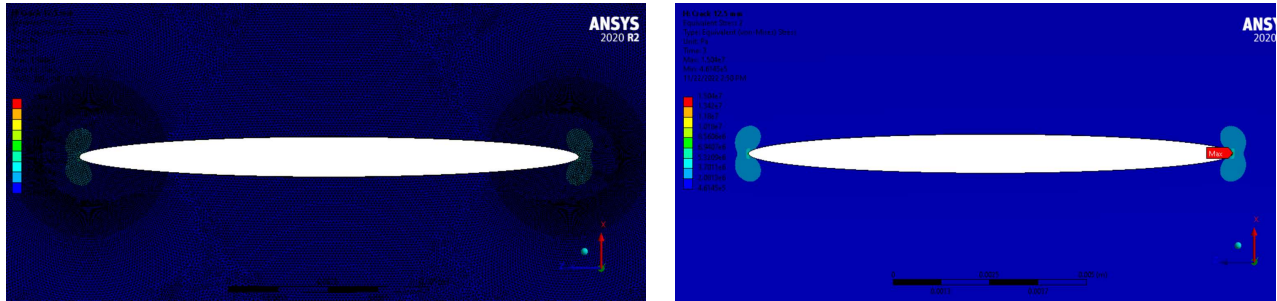
(a)



(b)



(c)

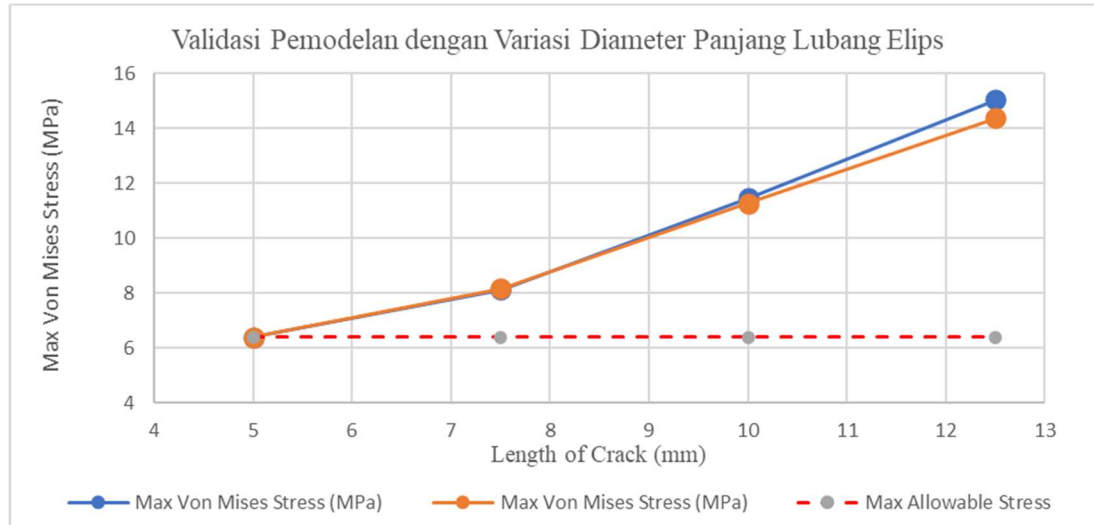


(d)

Gambar 5. 16 Validasi Pemodelan Lubang *Lubang elips* yang Bertumbuh

Tabel 5- 5 Validasi Pemodelan Lubang elips dengan Ketebalan Tambalan 45 mm

Simulasi Ke	Lebar Lubang elips (mm)	Max Von Mises Stress (Sulaiman, 2021) (MPa)	Max Von Mises Stress (MPa)	Deviasi
1	5	6.4	6.399	-0.100%
2	7.5	8.17	8.122	0.588%
3	10	11.27	11.465	1.730%
4	12.5	14.37	15.04	4.662%



Gambar 5. 17 Grafik Validasi Pemodelan Variasi Ukuran Diameter Panjang Lubang Elips

5.3 Variasi Model

Variasi pemodelan yang dilakukan sesuai dengan yang telah disampaikan pada subbab 4.2.5. Variasi pemodelan dilakukan dalam 3 tahap dengan merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh Sulaiman (2021) sebagai rujukan utama dari penelitian ini.

5.3.1 Variasi Jumlah Sirip (n) dan Orientasi Sirip

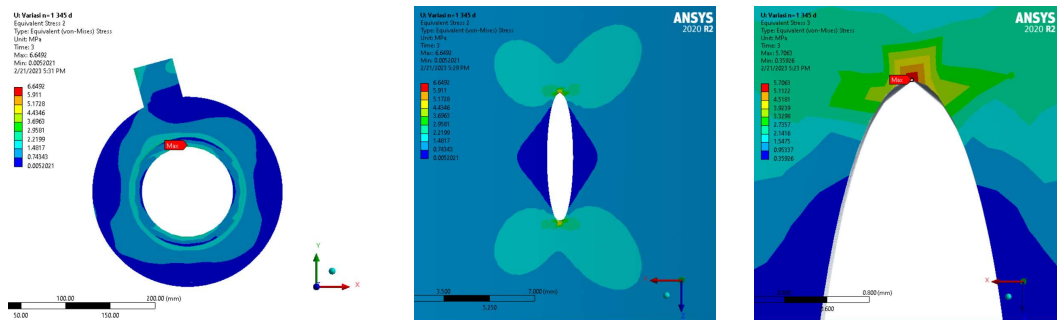
Variasi pada pemodelan tahap ini dilakukan dengan cara memberikan tambahan sirip secara bertahap dari jumlah sirip (n)=1 sampai dengan n=3 dan melakukan variasi orientasi sudut pada sirip yang ditambahkan. Parameter konstan yang dipergunakan pada pemodelan tahap ini telah disampaikan pada subbab 4.2.5.1 dan Gambar 4.8. Pada simulasi ini, ketinggian sirip, h, adalah 45 mm.

Variasi penambahan jumlah sirip dan orientasi yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 4-3. Tujuan dari variasi pertama ini bertujuan untuk melihat perubahan

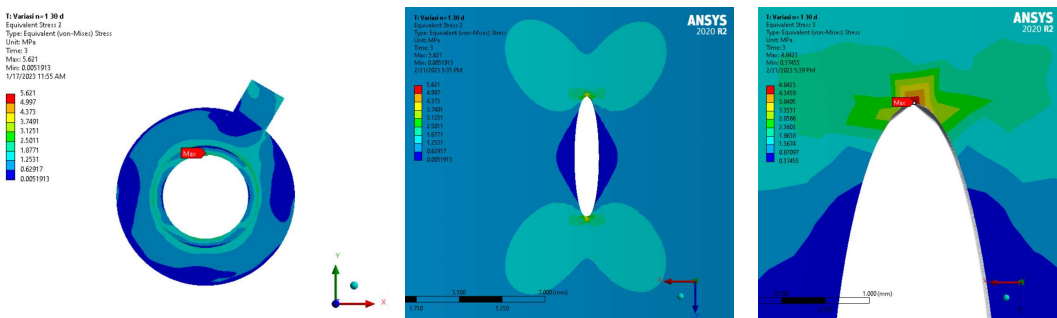
tegangan dan regangan Von Mises maksimum yang bekerja pada lubang elips pada pipa PE80.

5.3.1.1 Penambahan 1 Sirip dengan Variasi Orientasi Sudut Sirip

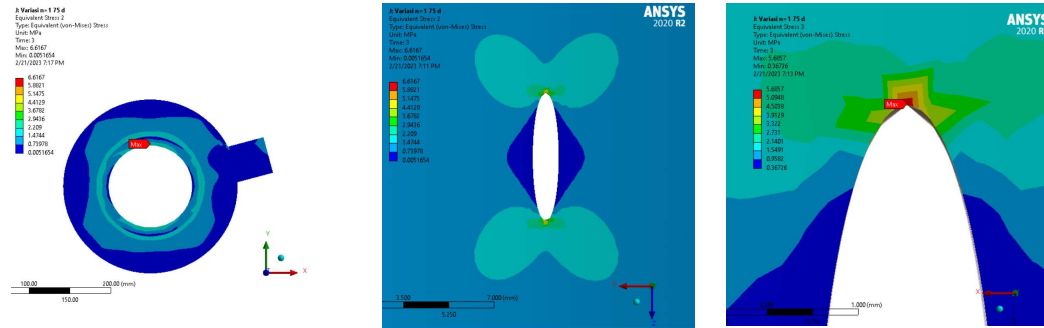
Hasil simulasi dengan penambahan 1 sirip pada tambalan (*patch*) dengan orientasi sudut pemasangan menunjukkan bahwa penambahan sirip pada *patching* yang dilakukan dapat merubah besarnya tegangan maksimum yang bekerja pada pipa PE80 yang memiliki lubang elips. Penambahan sirip dengan sudut sirip yang berbeda, akan memberikan hasil yang berbeda pada nilai tegangan maksimum yang bekerja pada pipa PE80.



(a) Orientasi Sirip Sudut 15°



(b) Orientasi Sirip Sudut -30°

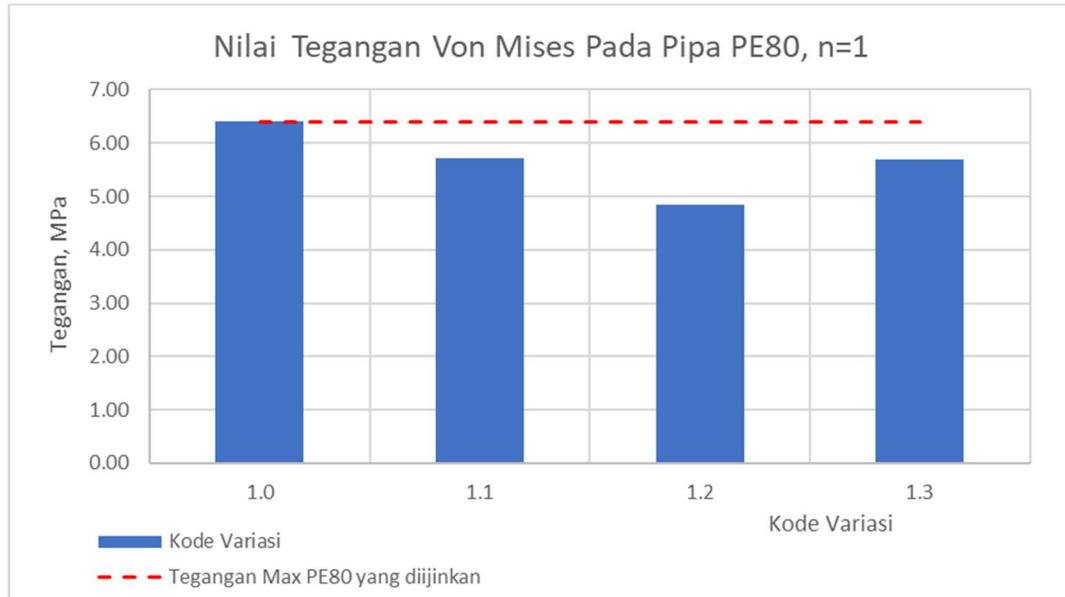


(c) Orientasi Sirip Sudut -75°

Gambar 5. 18 Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 1 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)

Tabel 5- 6 Nilai Tegangan Von Mises dengan Penambahan 1 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi

Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Tegangan Von Mises	Perubahan Tegangan. Von Mises	
		MPa	MPa	%
Tanpa tambahan Sirip	1.0	6.399	0	0
1 sirip pada 15°	1.1	5.706	-0.693	-10.829
1 sirip pada -30°	1.2	4.842	-1.557	-24.331
1 sirip pada -75°	1.3	5.686	-0.714	-11.151

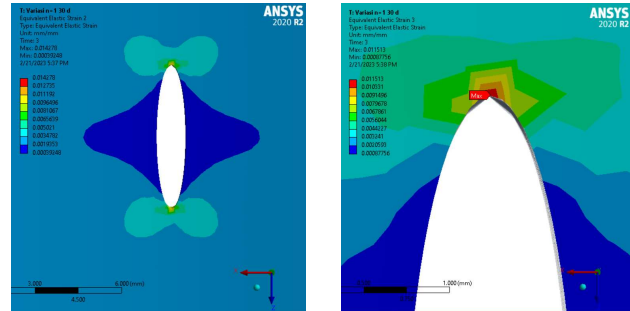


Gambar 5. 19 Grafik Perubahan Tegangan Von Mises Pada Penambahan 1 Sirip

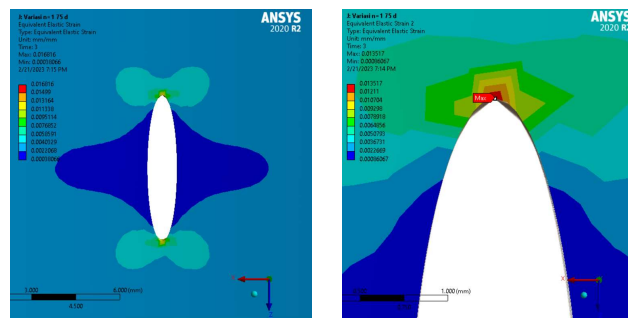
Perubahan nilai regangan juga terlihat pada pada pipa PE80 dengan lubang elips. Pada penambahan 1 sirip pada sudut orientasi -30° , nilai regangan maksimum pada pipa PE80 dengan lubang elips menurun sebesar 0.47%, namun pada sudut pemasangan yang lain, 15° dan -75° , besar dari penurunan regangan dari tiap sudut orientasi adalah 0.26% dan 0.27%. Nilai regangan yang merupakan hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.20, Tabel 5-7 dan Gambar 5.21 untuk grafik regangan.



(a) Orientasi Sirip Sudut 15°



(b) Orientasi Sirip Sudut -30°

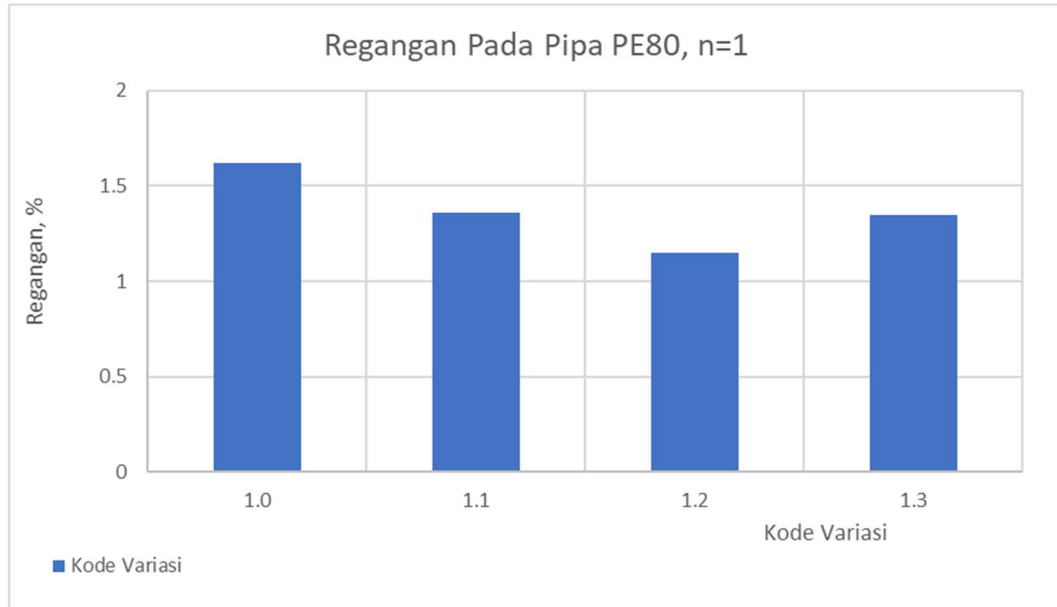


(c) Orientasi Sirip Sudut -75°

Gambar 5. 20 Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 1 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)

Tabel 5- 7 Nilai Regangan Von Mises dengan Penambahan 1 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi

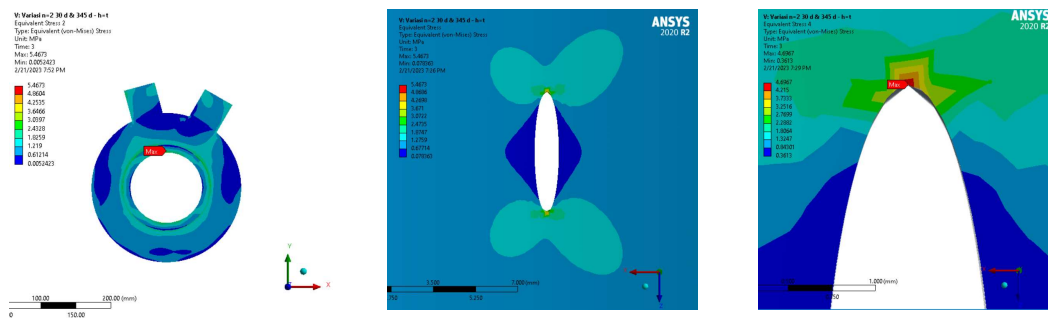
Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Regangan Von Mises	Perubahan Regangan	
		m/m	m	%
Tanpa tambahan Sirip	1.0	0.01622	0.005081	1.62
1 sirip pada 15°	1.1	0.01356	0.005068	1.36
1 sirip pada -30°	1.2	0.01151	0.005058	1.15
1 sirip pada -75°	1.3	0.01352	0.005068	1.35



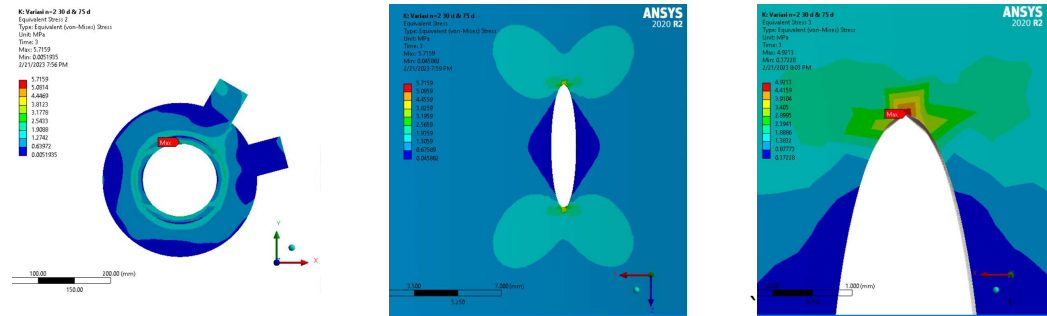
Gambar 5. 21 Grafik Perubahan Regangan Von Mises Pada Penambahan 1 Sirip

5.3.1.2 Penambahan 2 Sirip dengan Variasi Orientasi Sudut Sirip

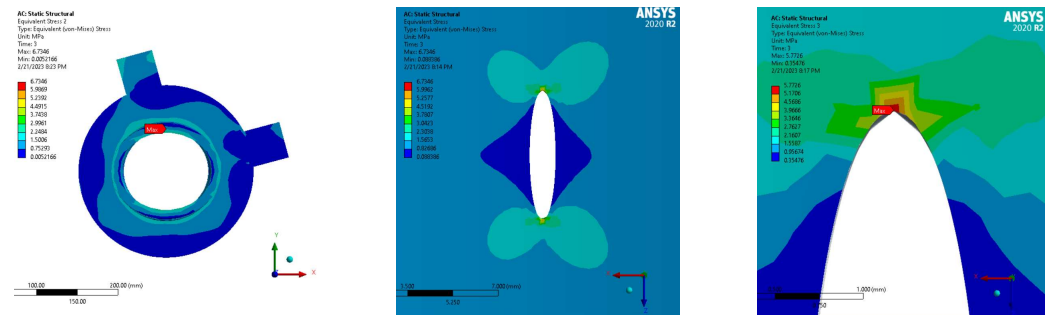
Pada simulasi penambahan 2 sirip ini, variasi penambahan sirip dan orientasi sudut pemasangan masih mengacu pada Tabel 4.3 dan tinggi sirip pada *patch* adalah 45 mm. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 5.22, Tabel 5.8 dan Gambar 5.23 untuk grafik perubahan tegangan Von Mises-nya.



(a) Orientasi Sirip Sudut 15° dan -30°



(b) Orientasi Sirip Sudut -30° dan -75°

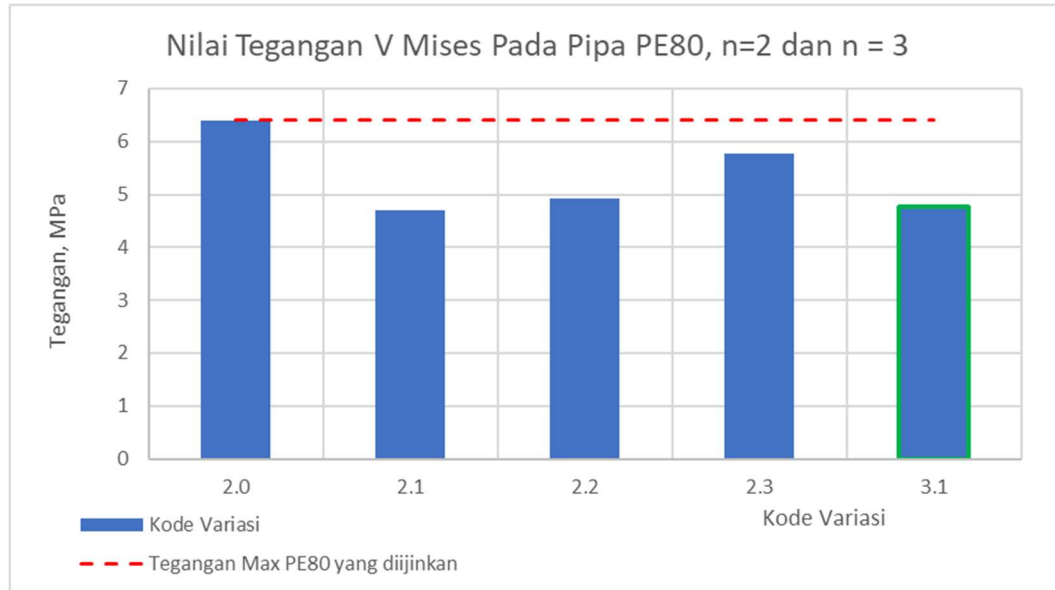


(c) Orientasi Sirip Sudut 15° dan -75°

Gambar 5. 22 Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 2 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)

Tabel 5- 8 Nilai Maximum Tegangan Von Mises dengan Penambahan 2 dan 3 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi

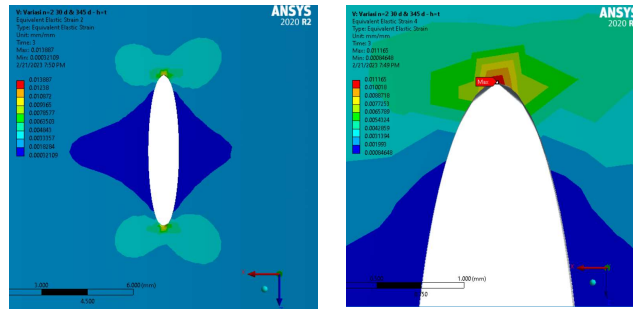
Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Tegangan Von Mises	Perubahan Tegangan Von Mises	
		MPa	MPa	%
Tanpa tambahan Sirip	2.0	6.3993	0	0
2 sirip pada 15° & -30°	2.1	4.695	-1.705	-26.637
2 sirip pada -30° & -75°	2.2	4.921	-1.478	-23.096
2 sirip pada 15° & -75°	2.3	5.773	-0.627	-9.793
3 sirip pada 15° , -30° & -75°	3.1	4.772	-1.628	-25.432



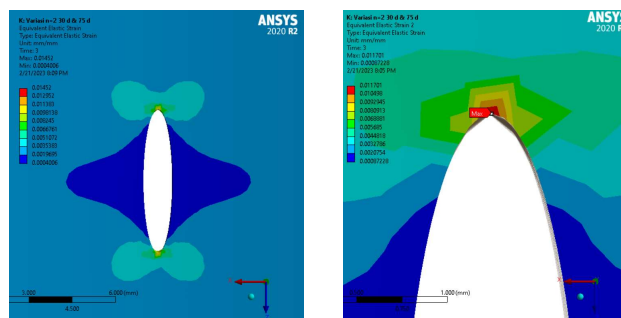
Gambar 5. 23 Grafik Perubahan Tegangan Von Mises Pada Penambahan 2 dan 3 Sirip

Dari hasil simulasi diperoleh bahwa, penambahan 2 sirip pada tambalan PE100 pada sudut penambahan 15° & -30° (posisi 2.1) memberikan penurunan tegangan maksimum terbesar apabila dibandingkan dengan variasi yang lainnya, yaitu sebesar 1.705 MPa atau 26.637% pada pipa PE80 berlubang elips dibandingkan tambalan tanpa penambahan sirip.

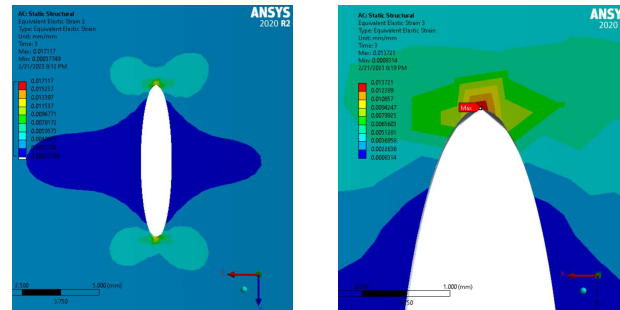
Perubahan nilai regangan maksimum juga terlihat pada pipa PE80 berlubang elips. Penambahan 2 sirip dengan variasi orientasi sudut sirip. Penurunan regangan terbesar terjadi pada orientasi sudut 15° & -30° (posisi 2.1). Pada posisi ini, penurunan regangan yang terjadi sebesar 0.46%, merupakan penurunan regangan terbesar apabila dibandingkan dengan penurunan regangan pada variasi lainnya. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.24, Tabel 5-9 dan Gambar 5.25 untuk grafik perubahan nilai regangan pada pipa PE80.



(a) Orientasi Sirip Sudut 15° dan -30°



(b) Orientasi Sirip Sudut -30° dan -75°



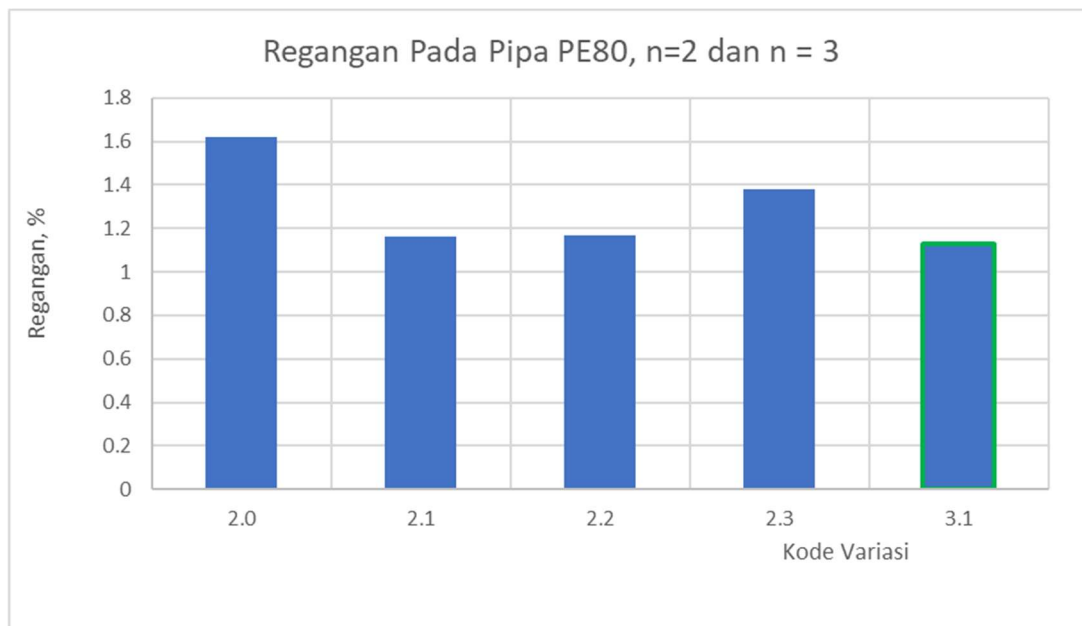
(c) Orientasi Sirip Sudut 15° dan -75°

Gambar 5. 24 Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80 dengan penambahan 2 sirip pada tambalan PE100 dengan ketinggian sirip $h = t$ (45 mm)



Tabel 5- 9 Nilai Regangan dengan Penambahan 2 dan 3 Sirip dan Variasi Sudut Orientasi

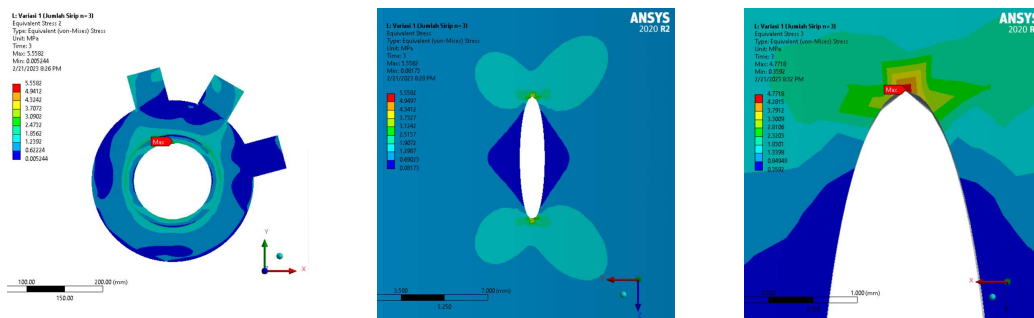
Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Regangan Max V.Mises	Perubahan Regangan. Max V. Mises	
		m/m	m	%
Tanpa tambahan Sirip	2.0	0.01622	0.005081	1.62
2 sirip pada 15° & -30°	2.1	0.01165	0.005058	1.16
2 sirip pada -30° & -75°	2.2	0.01170	0.005059	1.17
2 sirip pada 15° & -75°	2.3	0.01372	0.005069	1.38
3 sirip pada 15°, -30° & -75°	3.1	0.00113	0.005006	1.13



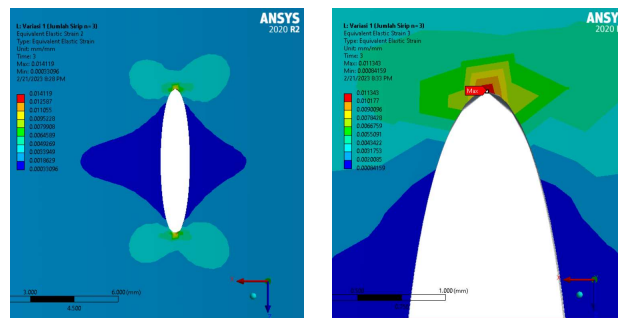
Gambar 5. 25 Grafik Perubahan Regangan Maksimum V. Mises Pada Penambahan 2 3 Sirip

5.3.1.3 Penambahan 3 Sirip pada Orientasi Sudut 30°, 75° & 15°

Pada variasi ini, tambalan PE100 diberikan 3 sirip tambahan dengan ketinggian sirip 45 mm. Nilai tegangan maksimum dari penambahan 3 sirip dapat di lihat pada Tabel 5.9, grafik pada Gambar 5.25 dan Gambar 5. 26, sedangkan besarnya regangan maksimum dapat dilihat pada Gambar 5.27. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa penambahan 3 sirip pada tambalan PE100 dapat menurunkan nilai tegangan maksimum pada pipa PE80 berlubang elips sebesar 0.8411 MPa (13.144%) dan regangan sebesar 0.21% dibandingkan dengan tambalan PE100 tanpa penambahan sirip pada tambalan PE100.



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)



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)

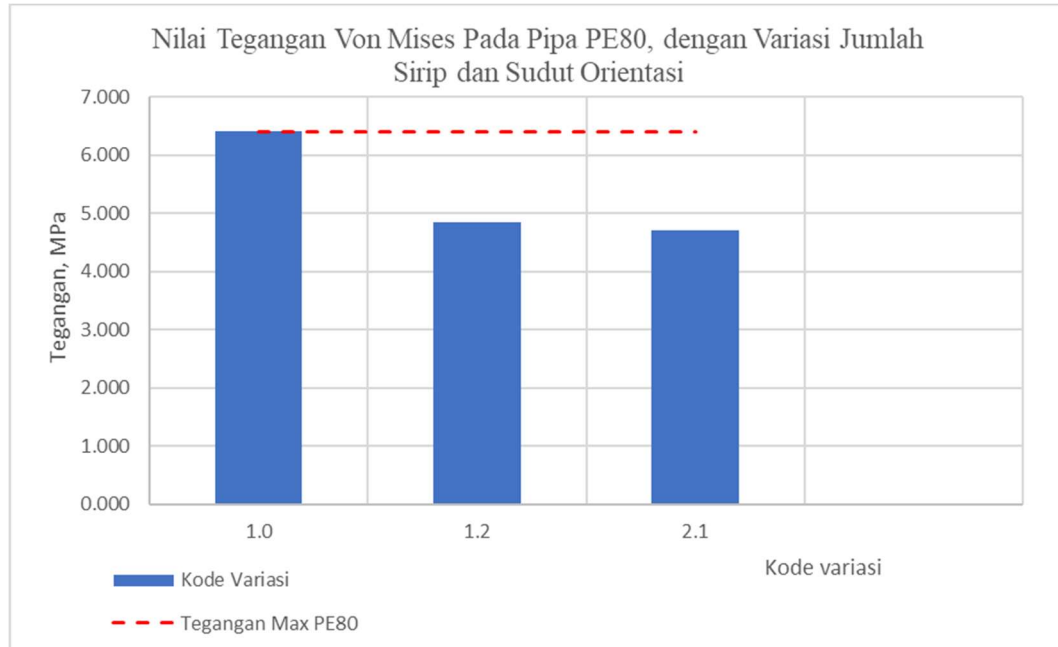


5.3.1.4 Kesimpulan Variasi Jumlah Sirip dan Orientasi Sudut Sirip

Pada simulasi tahap pertama ini, diperoleh hasil bahwa penambahan sirip dan orientasi dari sirip pada tambalan (*patching*) PE100 dapat merubah besarnya tegangan maksimum dan regangan yang bekerja pada pipa PE80 berlubang elips. Titik optimal pertama dari penambahan sirip diperoleh pada posisi 1.2 (penambahan 1 sirip pada orientasi sirip -30°) dan titik optimal kedua diperoleh pada posisi 2.1 (penambahan 2 sirip pada 15° & -30°). Ringkasan dari simulasi tahap pertama disajikan pada Tabel 5.10 dan Gambar 5.28 untuk penurunan tegangan maksimum yang bekerja. Untuk penurunan nilai regangan pada pipa PE80 berlubang elips dapat dilihat pada Tabel 5.11 dan Gambar 5.29.

Tabel 5- 10 Nilai Tegangan Von Mises Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi Sirip

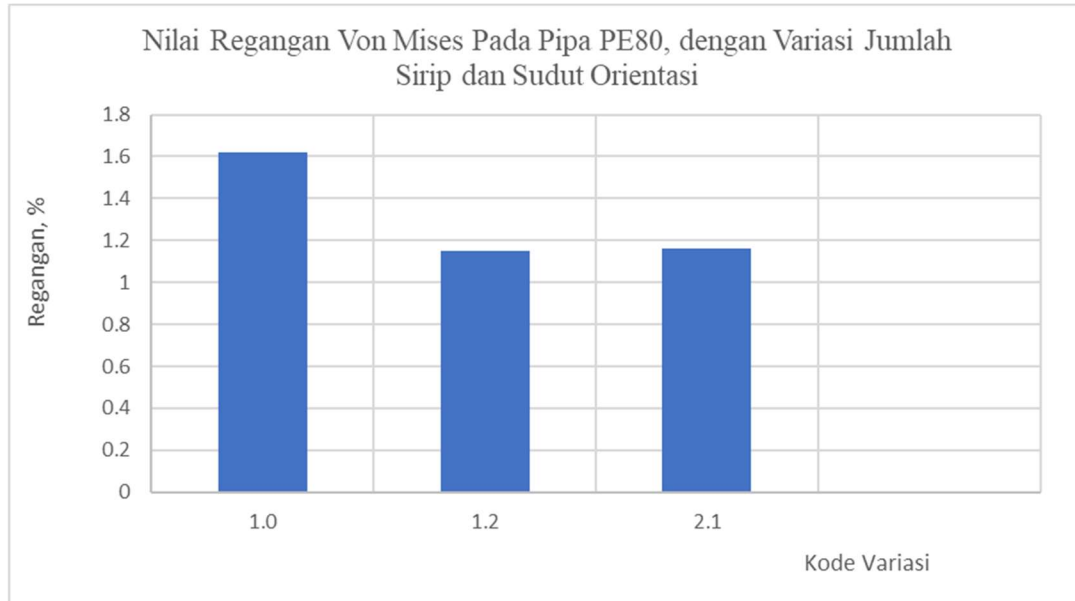
Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Tegangan Von Mises	Perubahan Tegangan. Von Mises	
		MPa	MPa	%
Tanpa tambahan Sirip	1.0	6.399	0	0
1 sirip pada -30°	1.2	4.842	-1.557	-24.331
2 sirip pada 15° & -30°	2.1	4.695	-1.705	-26.637



Gambar 5. 28 Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi

Tabel 5- 11 Nilai Regangan pada Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi Sirip

Jumlah Sirip & Orientasi	Kode Variasi	Regangan Von Mises	Perubahan Regangan. Von Mises	
		m/m	m	%
Tanpa tambahan Sirip	1.0	0.016217	0.005081085	1.62
1 sirip pada -30°	1.2	0.011513	0.005057565	1.15
2 sirip pada 15° & -30°	2.1	0.01165	0.00505825	1.16

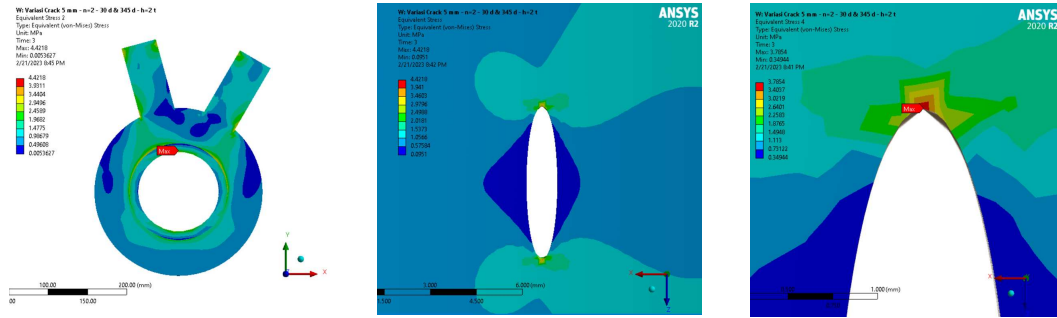


Gambar 5. 29 Nilai Regangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Jumlah Sirip dan Sudut Orientasi

5.3.2 Variasi Ketinggian Sirip

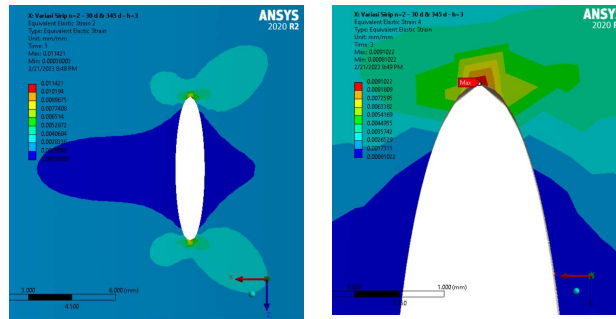
Variasi pada tahap kedua dari simulasi ini adalah variasi ketinggian sirip. Pada variasi tahap pertama, ketinggian sirip, h , sama dengan ketebalan material *patch* yaitu 45 mm. Variasi yang dilakukan adalah merubah ketinggian sirip menjadi $h = 2t$ atau 90 mm dan $h = 3t$ atau 135 mm. Pada simulasi tahap kedua ini akan menggunakan pemodelan dengan nilai paling optimal pada simulasi tahap pertama, yaitu penambahan 2 sirip pada orientasi sudut 30° & 15° , hasil dari simulasinya dapat dilihat pada Gambar 5.22 (a).

Simulasi dengan variasi ketinggian bertujuan untuk melihat pengaruh penambahan ketinggian sirip dengan perubahan tegangan Von Mises yang bekerja pada area *lubang elips* dipermukaan pipa PE80



Gambar 5. 30 Tegangan Max Pada Variasi ketinggian Sirip, $h = 2t$, 90 mm Mises pada Area Lubang Elips pada Permukaan Pipa PE80

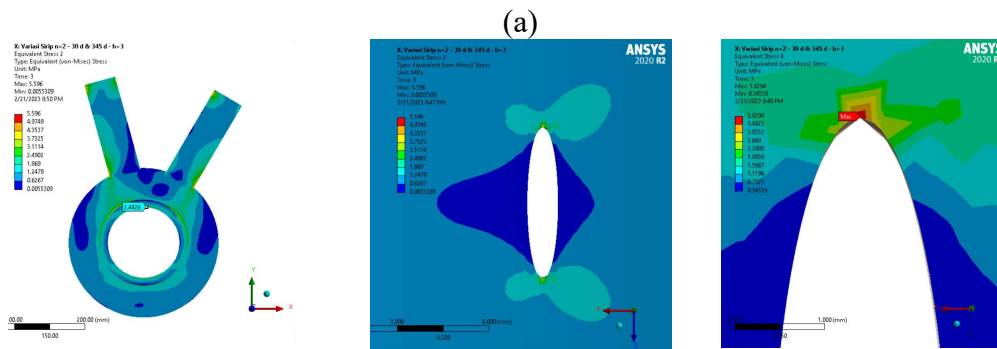
Dari hasil simulasi dengan variasi $h = 2t$ (90 mm), diperoleh bahwa besar tegangan Von Mises maksimum yang bekerja pada area ujung lubang elips adalah sebesar 3.7854 MPa dan terletak pada area ujung pada lubang elips. Fenomena lain yang diamati adalah terjadi peningkatan nilai tegangan pada pangkal sirip. Peningkatan tegangan terjadi pada sisi luar dari pangkal sirip.



Gambar 5. 31 Nilai Regangan Maksimum pada Lubang Elips di permukaan Pipa PE80 dengan variasi ketinggian sirip $h = 2t$ (90 mm)

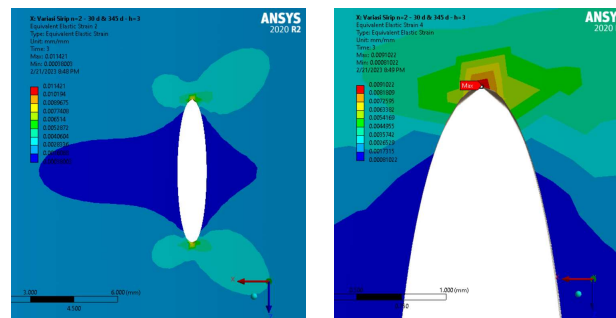
Nilai regangan pada area lubang elips sebesar 0.0089972 atau 0.90%, terjadi penurunan nilai maksimum regangan dibandingkan dengan simulasi sebelumnya dengan variasi ketinggian sirip $h = t = 45$ mm sebesar 0.26% atau 0.0132 mm.

Fenomena kenaikan tegangan maksimum Von Mises pada pangkal sirip juga terlihat pada hasil simulasi dengan variasi ketinggian sirip, h , pada *patch* sebesar $3t$ atau 135 mm.



Gambar 5. 32 Tegangan Max Pada Variasi ketinggian Sirip, $h = 3t$, 135 mm Mises pada Area Lubang Elips pada Permukaan Pipa PE80

Dari hasil simulasi pada variasi $h = 3t$, diperoleh bahwa kenaikan tegangan Von Mises maksimum yang bekerja pada bagian ujung lubang elips mencapai 3.8294 MPa, dan nilai regangan pada area lubang elips sebesar 0.0091022 atau sebesar 0.81%. Hasil simulasi nilai tegangan dan regangan dari variasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.32 dan Gambar 5.33.



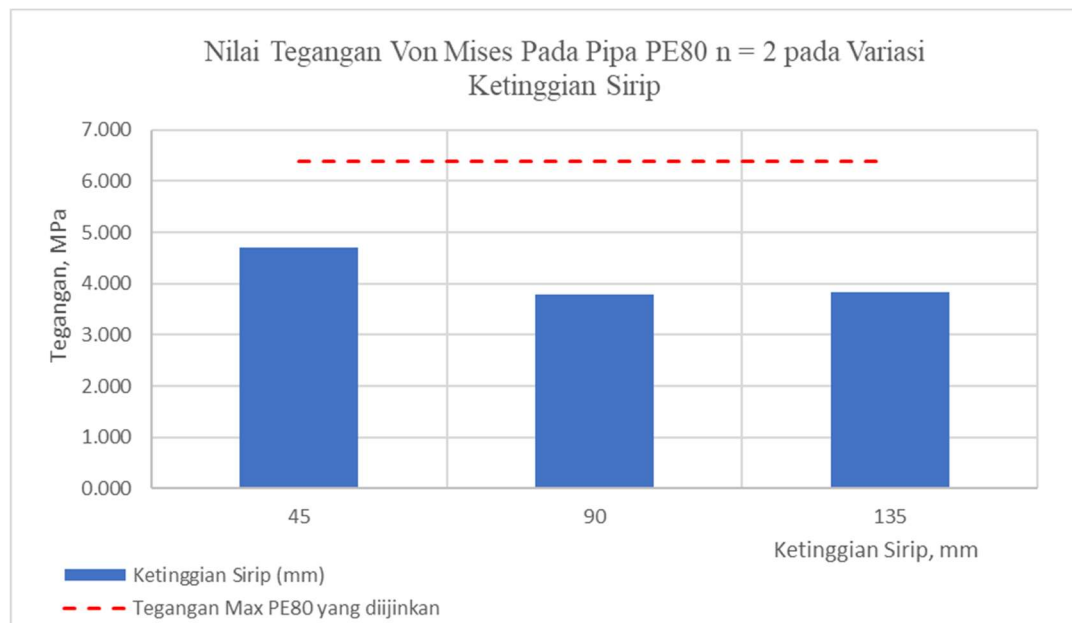
Gambar 5. 33 Nilai Regangan pada Lubang Elips di permukaan Pipa PE80 dengan variasi ketinggian sirip $h = 3t$ (135 mm)

5.3.2.1 Kesimpulan Variasi Ketinggian Sirip

Pada variasi ketinggian sirip, diperoleh bahwa *saddle fusion patch* dengan ketinggian sirip $h = 2t$ (90 mm) mempunyai penurunan nilai tegangan maksimum paling besar dibandingkan dengan 2 variasi ketinggian lainnya. Penurunan nilai tegangan maksimum pada area lubang elips di permukaan pipa PE80 dapat dilihat pada Tabel 5-12 dan Gambar 5.34 untuk grafik penurunannya.

Tabel 5- 12 Nilai Tegangan Von Mises pada Variasi Ketinggian Sirip pad Patch

Ketinggian Sirip (mm)	Tegangan Von Mises	Perubahan Tegangan Von Mises		Keterangan
	MPa	MPa	%	
45	4.695	0	0	Tinggi sirip $h = t$
90	3.7854	-0.9093	-19.369	Tinggi sirip $h = 2t$
135	3.829	-0.8653	-18.431	Tinggi sirip $h = 3t$

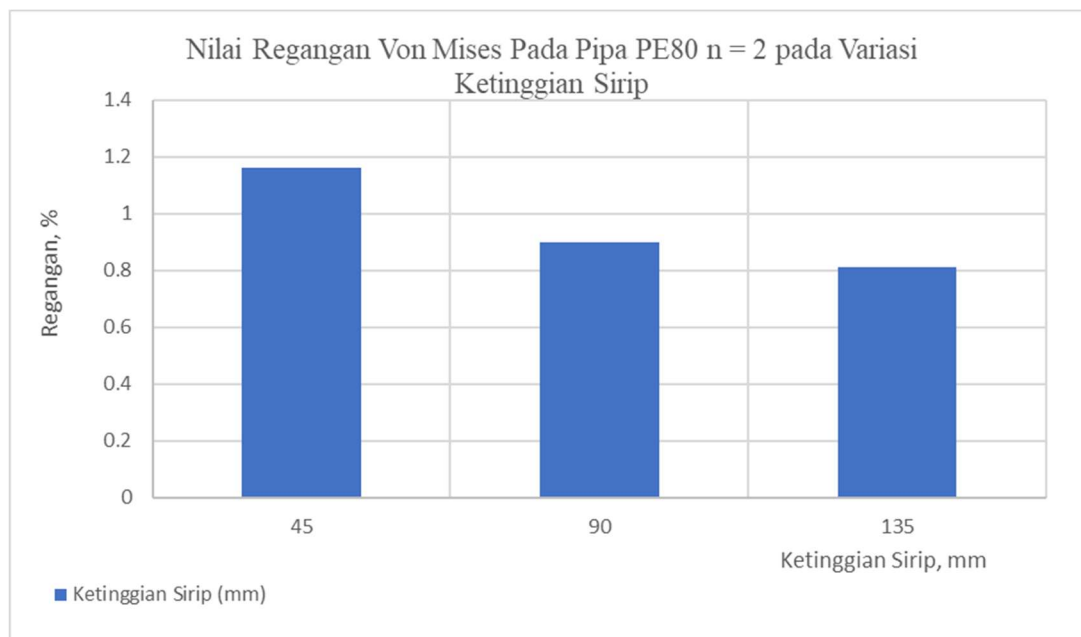


Gambar 5. 34 Nilai Tegangan Von Mises Pada Pipa PE80, dengan Variasi Ketinggian Sirip

Pola penurunan tegangan maksimum pada area lubang elips di permukaan pipa PE80 sejalan dengan pola penurunan regangan maksimum yang diperoleh dai hasil simulasi. Hasil simulasi regangan maksimum pada lubang elips dapat di lihat pada Tabel 5-13 dan Gambar 5.35.

Tabel 5- 13 Nilai Regangan pada Variasi Ketinggian Sirip pad Patch

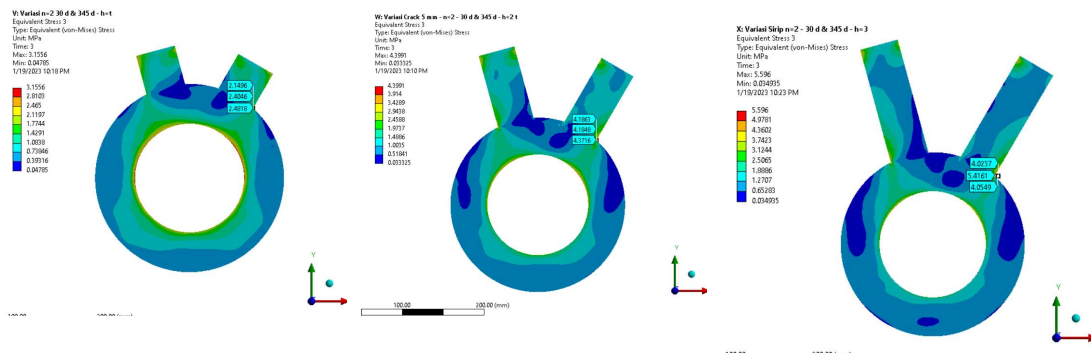
Ketinggian Sirip (mm)	Regangan	Perubahan Regangan.		Keterangan
	mm/mm	mm	%	
45	0.01165	0.005059	1.16	Tinggi sirip $h = t$
90	0.00898	0.005045	0.9	Tinggi sirip $h = 2t$
135	0.00910	0.005046	0.81	Tinggi sirip $h = 3t$



Gambar 5. 35 Nilai Regangan Pada Pipa PE80, dengan Variasi Ketinggian Sirip pada Patch

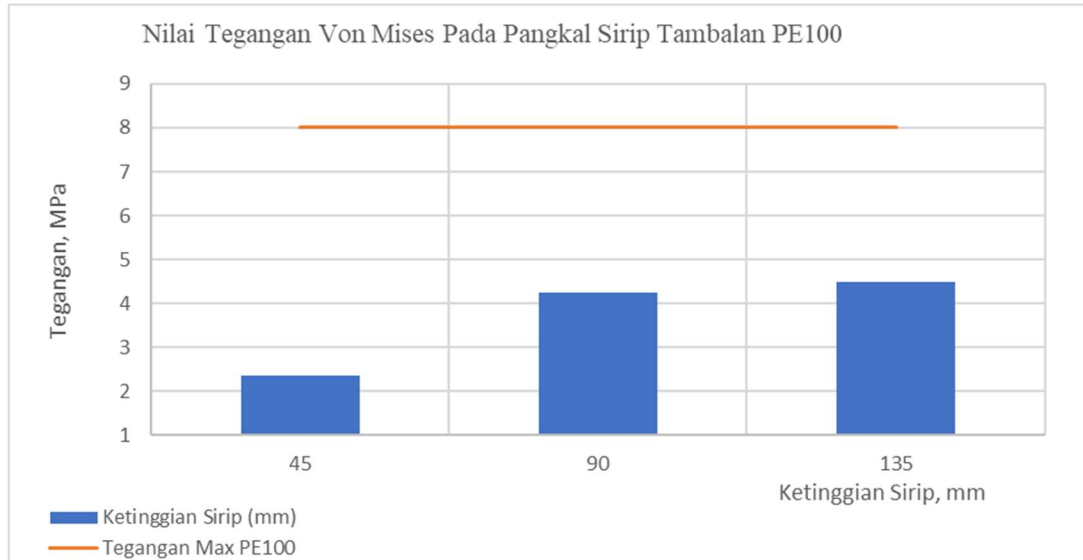
Pada simulasi tahap ini dapat disimpulkan bahwa, variasi paling optimum untuk mendapatkan nilai penurunan tegangan dan regangan pada pipa PE80 terbesar adalah dengan ketinggian sirip pada tambalan sebesar $2t$ atau 90 mm. Variasi ketinggian sirip sebesar 90 mm akan digunakan pada simulasi tahap selanjutnya, yaitu simulasi dengan variasi diameter panjang dari lubang elips dengan tujuan untuk melihat efektifitas dari penambahan sirip dan ketinggian sirip yang diberikan pada material *patching* PE100.

Fenomena lain yang terlihat pada variasi ini adalah adanya peningkatan tegangan yang bekerja pada pangkal dari sirip yang ditambahkan pada *saddle fusion patch*.

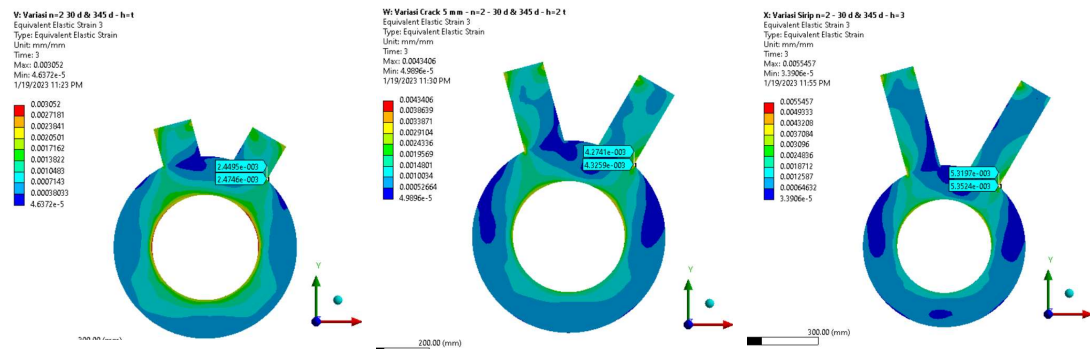


Gambar 5. 36 Kenaikan Nilai Tegangan Von Mises pada pangkal Sirip tambalan PE100 (ki - ka; 45 mm, 90 mm, dan 135 mm)

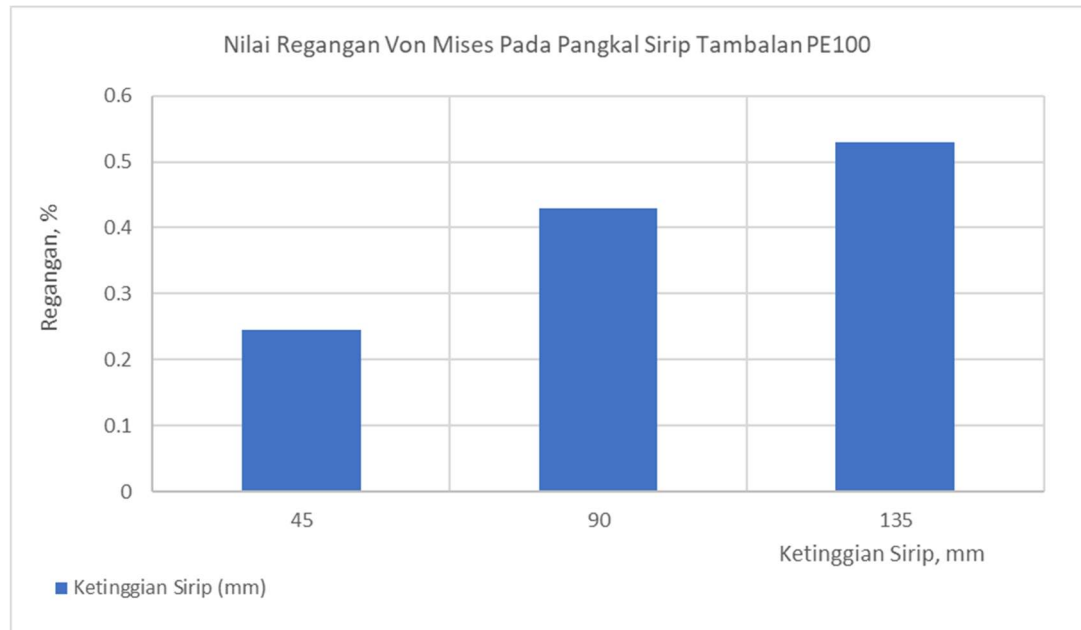
Pada Gambar 5.36 terlihat bahwa besarnya tegangan yang terjadi pada area pangkal sirip mengalami kenaikan. Pada ketinggian sirip $h = t$ atau 45 mm, tegangan pada pangkal sirip terbaca 2.347 MPa, pada penambahan ketinggian sirip $h = 2t$ (90 mm) tegangan pada area pangkal sirip pada *patch* adalah 4.248 MPa dan 4.498 MPa untuk $h = 3t$. Fenomena kenaikan nilai regangan juga terjadi pada pangkal sirip *patching* material PE100.



Gambar 5. 37 Grafik Kenaikan Tegangan Maksimum pada Pangkal Sirip Patching PE100



Gambar 5. 38 Kenaikan Nilai Regangan Von Mises pada pangkal Sirip tambalan PE100 (ki - ka; 45 mm, 90 mm, dan 135 mm)



Gambar 5. 39 Grafik Kenaikan Regangan Maksimum pada Pangkal Sirip Patching PE100

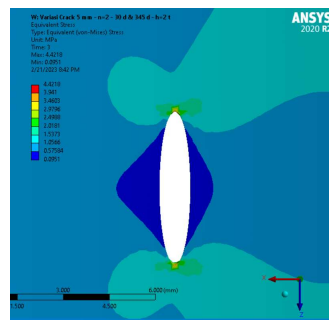
Kenaikan nilai tegangan dan regangan pada pangkal sirip menunjukkan bahwa semakin tinggi sirip yang dipergunakan, maka konsentrasi beban pada area pangkal sirip akan meningkat. Peningkatan konsentrasi beban pada area pangkal sirip dalam waktu jangka panjang akan berpengaruh pada penurunan usia pakai peralatan dan dapat memunculkan kegagalan kelelahan pada sirip yang dipasang.

5.3.3 Variasi Diameter Panjang (a) Lubang Elips pada Pipa PE80

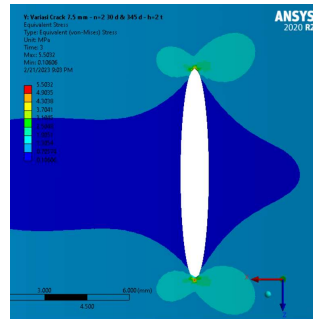
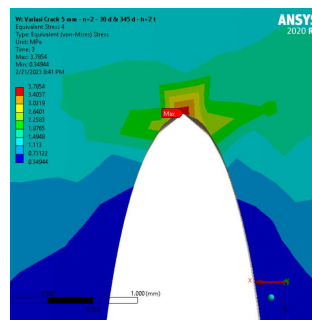
Variasi diameter panjang lubang elips dilakukan dengan cara mempertahankan diameter pendek sebesar 1mm dan melakukan variasi pada diameter panjang dengan nilai 5 mm, 7.5mm, 10 mm dan 12.5 mm. Pada simulasi ini, menggunakan variasi dengan hasil tegangan maksimum paling optimal dari simulasi sebelumnya, yaitu ketebalan tambalan (*patching*) 45 mm dengan penambahan 2 (dua) buah sirip pada sudut 15° dan -30° dengan ketinggian sirip 90 mm. Sirip yang ditambahkan mempunyai

panjang 76 mm, sepanjang material tambalan (*patching*) PE100 dan ketebalan sirip 45 mm.

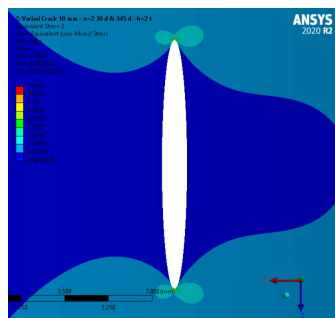
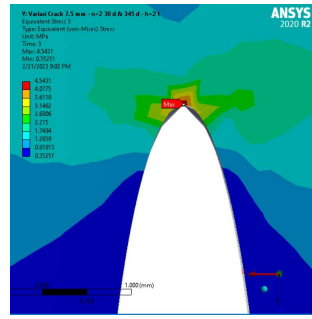
Simulasi ini juga bertujuan untuk melihat batas efektifitas dari tambalan yang diberikan. Hasil dari simulasi pada variasi ini dapat dilihat pada Gambar 5.38, besarnya tegangan Von Mises maksimum yang terjadi pada pipa PE80 pada setiap variasi yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 5-14 dan Gambar 5.40.



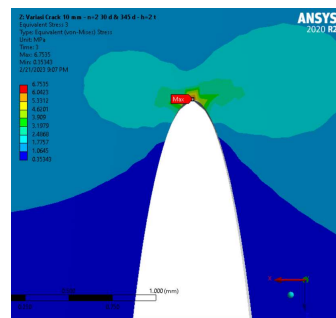
(a) Diameter major 5 mm, diameter minor 1 mm

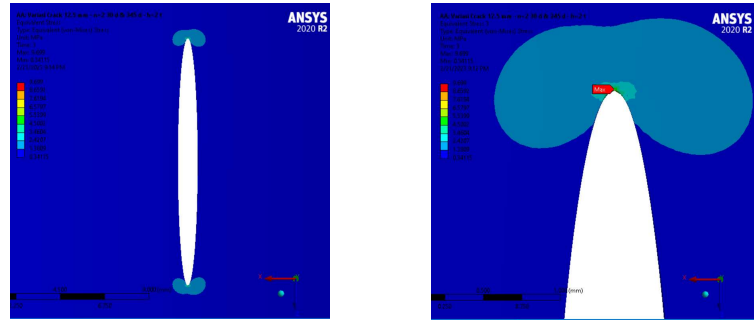


(b) Diameter major 7.5 mm, diameter minor 1 mm



(c) Diameter major 10 mm, diameter minor 1 mm





(d) Diameter mayor 12.5 mm, diameter minor 1 mm

Gambar 5. 40 Tegangan Maksimum Von Mises dengan Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80

Tabel 5- 14 Tegangan dan Regangan Maksimum pada Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80

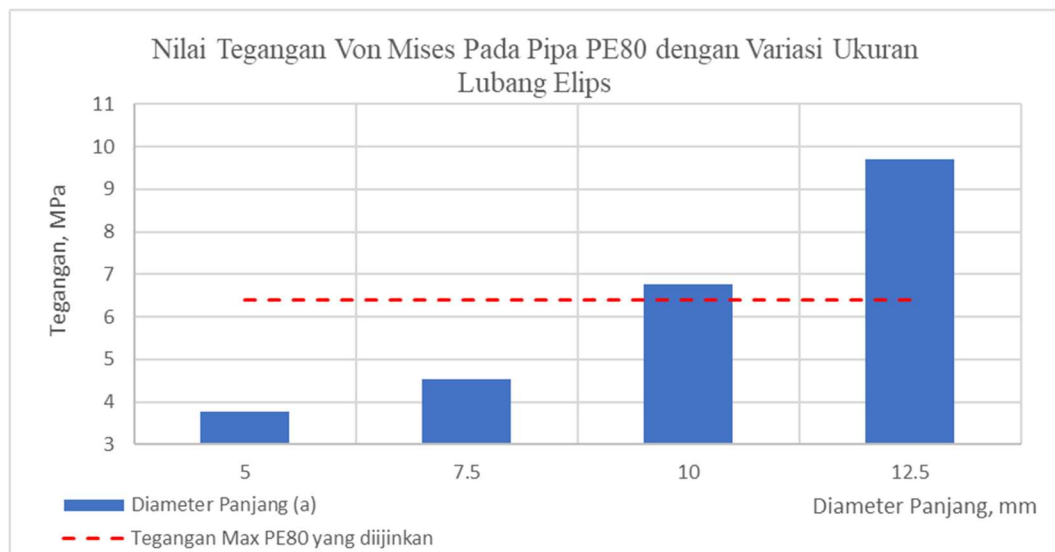
Simulasi Ke	Diameter Panjang (a)	Tegangan Von Mises	Regangan Von Mises
	mm	MPa	%
1	5	3.7854	0.900
2	7.5	4.5431	1.093
3	10	6.7535	1.591
4	12.5	9.699	2.280

Pada Gambar 5.40 dan Tabel 5-14 diketahui bahwa pada saat diameter mayor lubang elips divariasikan, pada saat diameter mayor mencapai 10 mm, tegangan maksimum Von Mises yang terjadi pada ujung lubang elips melebihi batas tegangan maksimum yang diijinkan pada pipa PE80 dengan suhu lingkungan 35°C sebesar 6.4 MPa. Bentuk kerusakan (*defect shape*) pada lubang elips mengalami perubahan dengan penambahan diameter panjang dari lubang elips.

Pada diameter mayor 7.5 mm, bentuk kerusakan pada lubang (*defect shape*) menjadi lebih menyudut apabila dibandingkan dengan *defect shape* pada diameter

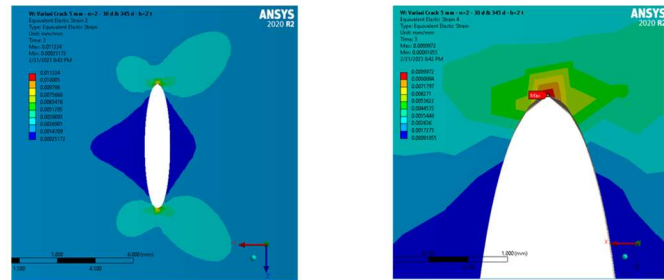


mayor 5 mm. Perubahan *defect shape* pada lubang elips, dapat merubah ujung dari lubang elips menjadi sebuah *crack* (retakan). Penambahan diameter mayor dapat meningkatkan konsentrasi tegangan pada ujung lubang elips yang berpengaruh pada kenaikan tegangan maksimum pada area lubang elips. Hal ini terkonfirmasi dari hasil simulasi yang dapat di lihat pada Gambar 5.40 dan Tabel 5-14. Semakin besar diameter mayor lubang elips, maka tegangan maksimum pada ujung elips akan semakin besar dan *defect shape* lubang elips menjadi lebih lancip.

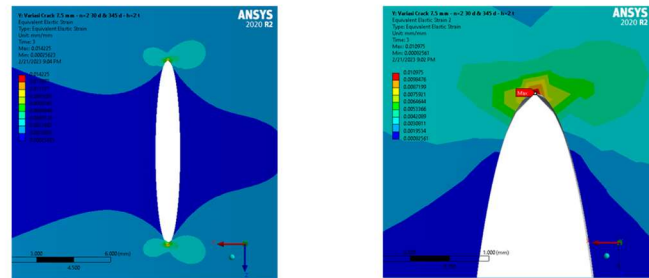


Gambar 5. 41 Grafik Tegangan dengan Variasi Ukuran Lubang Elips pada Pipa PE80

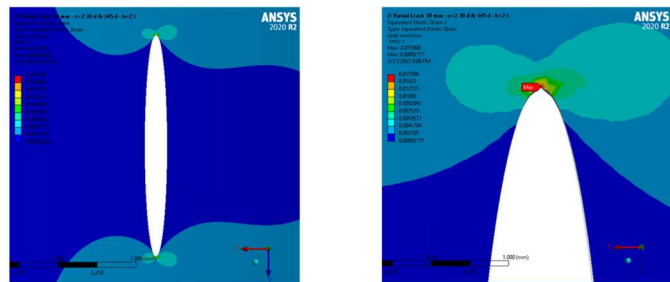
Besarnya regangan (*strain*) pada penambahan diameter panjang lubang elips juga mengalami peningkatan. Namun, besar regangan masih dalam batas regangan maksimum yang diijinkan, 3%. Besar regangan tertinggi terjadi saat diameter mayor dari lubang elips berukuran 12.5 mm, yaitu sebesar 2.28%. Hasil simulasi regangan pada variasi diameter mayor pada lubang elips dapat dilihat pada Gambar 5.42 dan Gambar 5.43 untuk grafik perubahan regangan yang terjadi.



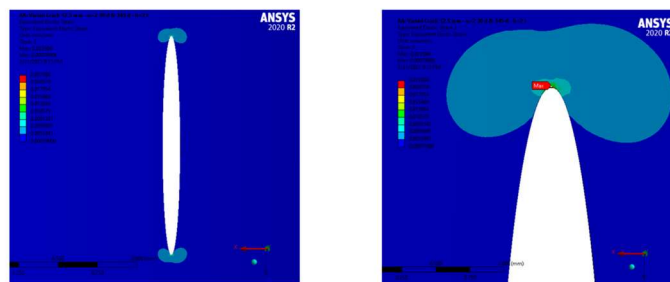
(a) Diameter major 5 mm, diameter minor 1 mm



(b) Diameter major 7.5 mm, diameter minor 1 mm

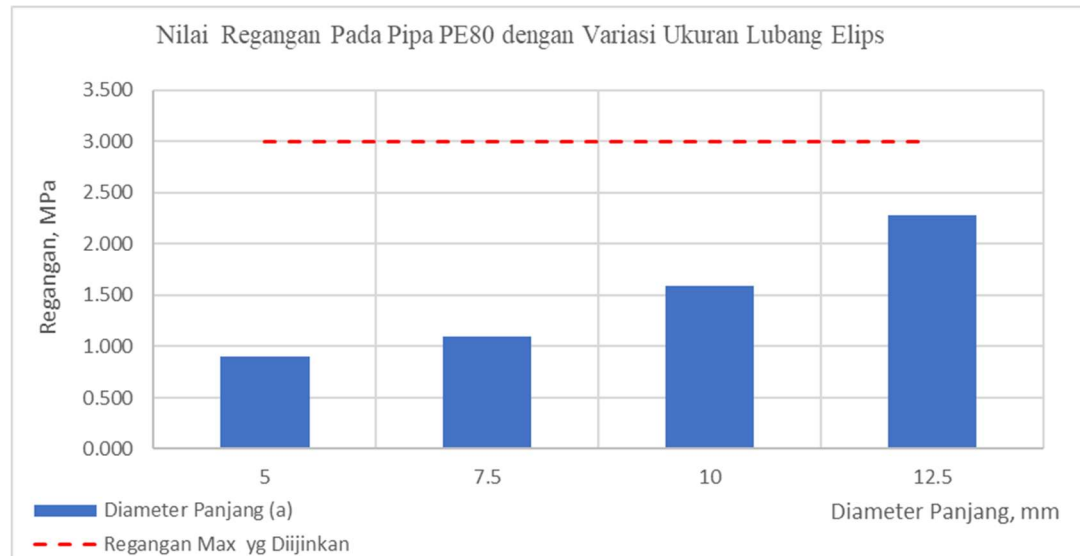


(c) Diameter major 10 mm, diameter minor 1 mm



(d) Diameter major 12.5 mm, diameter minor 1 mm

Gambar 5. 42 Regangan Maksimum Von Mises dengan Variasi Diameter Panjang pada Lubang Elips pada Pipa PE80



Gambar 5. 43 Grafik Regangan dengan Variasi Ukuran Lubang Elips pada Pipa PE80

5.3.4 Pembahasan

Pemasangan tambalan (*patch*) pada lubang elips dan menambah ketebalan pipa sehingga *pipe strength* meningkat dan tegangan pada pipa menurun. Sulaiman (2021) dalam penelitiannya menjelaskan bahwa penambahan ketebalan pipa akan menurunkan tegangan pada pipa secara kuadratik, di mana hal ini juga dirumuskan oleh Warman dkk (2009) melalui Persamaan 3.12. Hal ini juga didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Khademi-Zahedi & Shishesaz (2018) yang menjelaskan bahwa semakin besar rasio diameter luar terhadap diameter dalam suatu pipa (semakin tebal pipa) maka tegangan yang bekerja pada suatu pipa akan menurun sebagaimana dijabarkan dalam Persamaan 3.24.

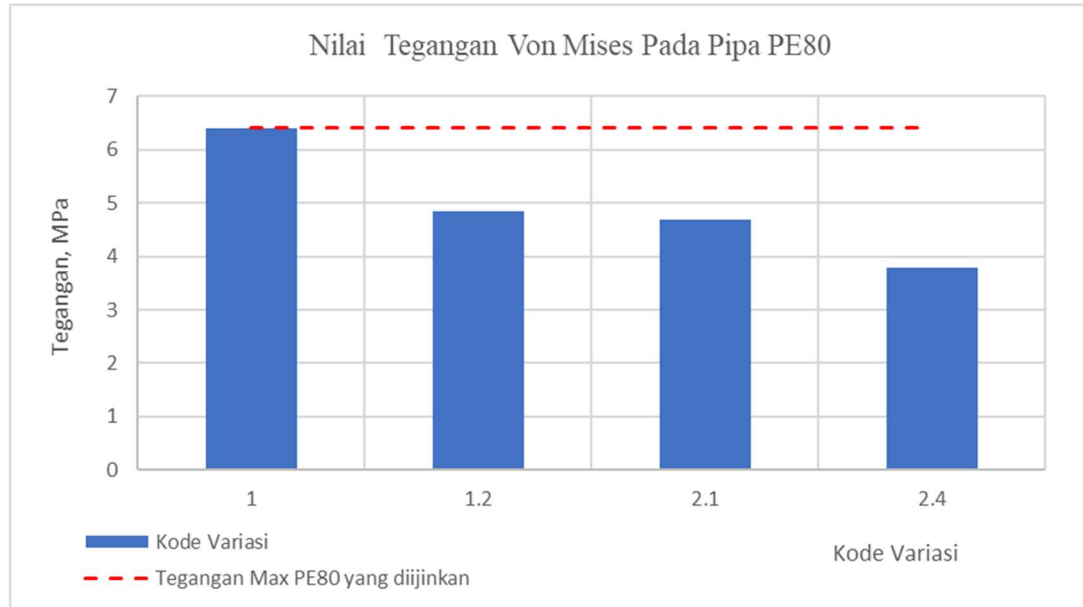


Pemberian tambahan sirip memberikan tambahan ketebalan dari tambalan (*patching*) secara partial. Penambahan sirip dapat meningkatkan kekuatan pipa dan tegangan yang bekerja pada pipa menurun. Dari simulasi yang telah dilakukan, diketahui bahwa jumlah sirip yang ditambahkan, orientasi sirip dan ketinggian sirip berpengaruh pada penurunan tegangan pada pipa PE80. Dari hasil simulasi dapat diketahui bahwa titik paling optimal dari penambahan sirip adalah penambahan 2 sirip pada orientasi 15° & -30° dengan ketinggian sirip sebesar 90 mm. Semakin tinggi sirip yang dipergunakan, maka konsentrasi beban pada area pangkal sirip akan meningkat. Peningkatan konsentrasi beban pada area pangkal sirip dalam waktu jangka panjang akan berpengaruh pada penurunan usia pakai peralatan dan dapat memunculkan kegagalan kelelahan pada sirip yang dipasang.

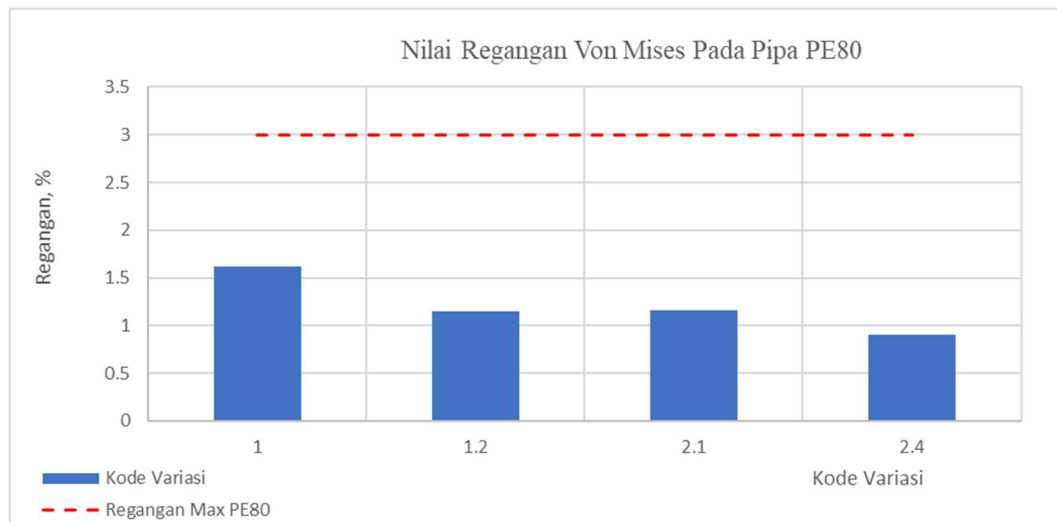
Penambahan diameter panjang dapat meningkatkan konsentrasi tegangan pada ujung lubang elips yang berpengaruh pada kenaikan tegangan maksimum pada area lubang elips. Semakin besar diameter panjang lubang elips, maka tegangan maksimum pada ujung elips akan semakin besar dan *defect shape* lubang elips menjadi lebih lancip.

Tabel 5- 15 Nilai Tegangan Von Mises dan Regangan pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips

Kode Variasi	Tegangan Von Mises	Regangan Von Mises	Keterangan Variasi
	MPa	%	
1.0	6.399	1.62	Tanpa tambahan Sirip
1.2	4.794	1.31	1 sirip pada -30°
2.1	4.616	1.24	2 sirip pada 15° & -30°
2.4	4.4218	0.43	2 sirip pada 30° & 345° , Tinggi sirip $h = 2t$



Gambar 5. 44 Grafik Tegangan Maksimum pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips



Gambar 5. 45 Grafik Regangan pada Pipa PE80 dengan Lubang Elips

BAB IV

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Dari simulasi penambahan sirip dengan variasi sudut orientasi pada tambalan (*patching*) PE100 pada pipa PE80 berlubang elips menggunakan *finite element analysis tools* ANSYS 20 R220 R2 yang telah dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut,

1. Dari simulasi yang dilakukan, penurunan tegangan maksimum pada pipa PE80 dengan lubang elips pada permukaannya selain dipengaruhi oleh ketebalan tambalan (*patching*) yang diberikan juga dipengaruhi oleh jumlah dan orientasi dari sirip yang ditambahkan.
2. Dari simulasi yang dilakukan, penambahan sirip dengan jumlah dan orientasi sirip serta ketinggian dari sirip dapat meningkatkan keoptimalan dari tambalan yang diberikan dengan ketebalan tambalan yang sama.

6.2. SARAN

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, terdapat beberapa hal yang dapat dilakukan untuk mengembangkan hasil penelitian yang telah dilakukan dan memperkaya hasil penelitian. Hal- hal tersebut antara lain:

1. Melakukan penelitian lanjutan dengan melakukan variasi terhadap temperatur yang digunakan untuk melakukan proses *patching*. Tujuan dari variasi temperatur pemanasan ini untuk mendapatkan temperatur pemanasan yang optimal dalam melakukan penambalan.



2. Melakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui perubahan sisa usia pakai peralatan, PE80, setelah tambalan diberikan pada permukaan pipa.
3. Melakukan penelitian lanjutan dengan variabel tekanan internal dan fluida yang berbeda dari penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adenya, C. A., & Kihui, J. M. (2010). *Stress Concentration Factors in Thick Walled Cylinders with Elliptical Cross-Bores*. JKUAT Scientific, Technological and Industrialization Conference
- Alzabeebee, S., Chapman, D. N., & Famarzi, A. (2018). *A comparative study of the response of buried pipes under static and moving loads*. *Transportation Geotechnics*, 15, 39-46. doi:10.1016/j.trgeo.2018.03.001
- Ayhan, A. O. (2011). *Three-dimensional fracture analysis using tetrahedral enriched elements and fully unstructured mesh*. *International Journal of Solids and Structures*, 48(3-4), 492-505. doi:10.1016/j.ijsolstr.2010.10.012
- ANSYS *Academic Online Training: Introduction to Computational Solid Mechanics*. (2020). Optimaxx
- Beer, F. P., DeWolf, J. T., Johnston, E. R., & Mazurek, D. F. (2009). *Mechanics of materials* (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Gas Transmission and Distribution Piping System*, B31.8 (2014). New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Mechanics of materials* (8th ed.). Boston: Pearson.
- Imura, S. (2004). *Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement*. *Construction and Building Materials*, 18(6), 469-479. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.01.002
- Inglis, C. E. (1913). *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*, The Institution of Naval Architech
- Khademi-Zahedi, R. (2018). *Application of the finite element method for evaluating the stress distribution in buried damaged polyethylene gas pipes*. *Underground Space*, 4(1), 59-71. doi:10.1016/j.undsp.2018.05.002
- Khademi-Zahedi, R., & Alimouri, P. (2018). *Finite element analysis to the effect of Thermo-Mechanical loads on stress distribution in buried polyethylene gas*

- pipes jointed by electrofusion sockets, repaired by pe patches. energies*, 11(10), 2818. <https://doi.org/10.3390/en11102818>
- Khademi Zahedi, R., Alimouri, P., Khademi Zahedi, H., & Shishesaz, M. (2019). *Investigating peak stresses in fitting and repair patches of buried polyethylene gas pipes. Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(1), 147–168. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0587-6>
- Khademi-Zahedi, R., & Shishesaz, M. (2019). *Application of a finite element method to stress distribution in buried patch repaired polyethylene gas pipes. Underground Space*, 4(1), 48-58. doi:10.1016/j.undsp.2019.05.001
- Manual for determining the remaining strength of corroded pipelines: Supplement to ASME B31.G code for pressure piping.* (1991). New York: American Society of Mechanical Engineers.
- Mehrabi, H. A., & Bowman, J. (1997). Electrofusion welding of crosslinked polyethylene pipes. *Iranian Polymer Journal*, 6(7), 195–203.
- Merah, N., Saghir, F., Khan, Z., & Bazoune, A. (2006). *Effect of temperature on tensile properties of HDPE pipe material. Plastics, Rubber and Composites*, 35(5), 226-230. doi:10.1179/174328906x103178
- Merrin, J., Hung, H. P., Rajeev, P., Robert, D. J., & Kodikara, J. (2014). *Stress Analysis of Buried Pipes*.
- Moser, A. P., & Folkman, S. (2008). *Buried Pipe Design* (3rd ed.). Logan, Utah: Mc Graw Hill.
- Murariu, A., & Lozanovic-Sajic, J. (2016). *Temperature and heat effects on polyethylene behaviour in the presence of imperfections. Thermal Science*, 20(5), 1703-1712. doi:10.2298/tsci151110220m
- Shishesaz, M. R. (2003). *Determination of Design Parameters in Large Size Reinforced Polyethylene Pipes*, *Iranian Polymer Journal*.
- Singer, F., Pytel, A. (1987). *Strength of material* (4th ed.). New York: Harper & Row.
- Steel pipelines crossing railroads and highways: API recommended practice 1102.*

(1993). Wash., D.C.: American Petroleum Institute.

The Plastics Pipe Institute. (2008). *The plastics Pipe Institute Handbook of polyethylene pipe*.

Thermoplastic piping systems: ASME Standards for Nonmetallic Pressure Piping Systems. (2018). New York, NY: American Society of Mechanical Engineers.

Warman, D. J., Hard, D.J., Francini, R.B. (2009). *Development of a pipeline surface loading screening process and assessment on surface load dispersing methods*, Canadian Energy Pipeline Association, Final Report No 05-44R1.

Wei, R. P. (2010). *Fracture Mechanics: Integration of Mechanics, Materials Science, and Chemistry*. Cambridge University Press.

Sulaiman. (2021), Analisis Distribusi Tegangan Pada Pipa Berlubang Elips Dengan Penguatan *Saddle Fusion Patch* Menggunakan *Finite Element Analysis*