

7. Seluruh Staf Tata Usaha di Departemen Teknik Mesin dan Industri atas dukungan yang telah diberikan, sehingga dapat memperlancar dan mempermudah segala proses yang telah penulis jalani.
8. Teman-teman Magister Teknik Mesin Angkatan 2018-2019 yang selama ini telah memberikan bantuan sehingga penulis selama menjalani masa perkuliahan dengan menyenangkan dan dapat menyelesaikan tesis ini dengan baik.
9. Kepada semua pihak yang tidak dapat penulis cantumkan namanya yang telah sangat membantu penulis dalam usaha menyelesaikan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan pihak-pihak yang tersebut di atas, penulisan laporan ini tidak akan terselesaikan dengan baik. Dengan ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih atas dedikasi berbagai pihak selama ini.

Penulis dengan senang hati menerima saran dan kritik dari segenap pembaca demi perbaikan dan penyempurnaan tesis ini. Apabila terdapat kesalahan dalam penulisan tesis ini, penulis memohon maaf yang sebesar-besarnya. Semoga tesis ini dapat memberikan sumbangan ilmu yang berguna bagi kita semua, khususnya dalam dunia ilmu pengetahuan, keteknikan, industri serta pembaca pada umumnya.

Yogyakarta, 25 Desember 2021

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL BAHASA INDONESIA</b>	
<b>HALAMAN JUDUL BAHASA INGGRIS</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI</b>	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>xi</b>
<b>INTISARI</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB 1</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian terkait Analisa Tegangan pada Pipa <i>Elbow</i>	5
2.2 Penelitian terkait Analisa Retakan pada Pipa <i>Elbow</i>	7
2.3 <i>Novelty</i> Penelitian	13
<b>BAB 3</b>	<b>15</b>
3.1 Pipa	15
3.2 Pipa <i>Elbow</i>	15
3.2.1 Jenis-Jenis Pipa <i>Elbow</i>	16
3.2.2 Proses Fabrikasi Pipa <i>Elbow</i>	17
3.3.1 Tegangan Normal Maksimum ( <i>Maximum Normal Stress</i> )	19
3.3.2 <i>Maximum Shear Stress</i> (Teori Tresca)	20
3.3.3 <i>Maximum Distortional Energy</i> (Teori Von Mises)	20
3.4 Mekanika Perpatahan	22
3.5 <i>Crack</i> (Retak)	23



3.6 <i>Fracture Toughness</i>	24
3.7 <i>Stress Intensity Factor (SIF)</i> atau Faktor Intensitas Tegangan	24
<b>BAB 4 METODE PENELITIAN</b>	31
4.1 Diagram Alir Penelitian	31
4.2 Alat & Bahan Penelitian	32
4.3 Properti Material Penelitian	32
4.4 Desain Penelitian	33
4.4.1 Pemodelan Geometri Pipa <i>Elbow</i>	33
4.4.2 Pemodelan Retak pada Pipa <i>Elbow</i>	34
4.4.3 Validasi Model	37
4.4.4 Variasi Penelitian	38
4.5 Analisa Hasil Simulasi	42
<b>BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	43
<b>BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	66
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	<b>68</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Prediksi tekanan letus untuk spesimen uji	6
Tabel 2.2 Rangkuman penelitian analisa tegangan dan retakan pada pipa <i>Elbow</i>	13
Tabel 4.1 Properti material dari Z2CND18.12N <i>austenitic stainless steel</i>	32
Tabel 4.2 Komposisi kimia dari Z2CND18.12N (in wt %)	32
Tabel 4.3 Rangkuman variasi simulasi parameter panjang dan kedalam retak	41
Tabel 5.1 Validasi nilai tegangan	49
Tabel 5.2 Nilai K1 secara teoritis ( <i>Intrados</i> )	52
Tabel 5.3 K1 dari hasil simulasi Ansys ( <i>Intrados</i> )	53
Tabel 5.4 Faktor bentuk geometri <i>Intrados</i>	54
Tabel 5.5 Laju Pertumbuhan Retak pada Posisi <i>Intrados</i>	55
Tabel 5.6 Nilai K1 secara teoritis ( <i>Crown</i> )	59
Tabel 5.7 K1 hasil simulasi Ansys ( <i>Crown</i> )	60
Tabel 5.8 Faktor bentuk geometri <i>Crown</i>	61
Tabel 5.9 Laju Pertumbuhan Retak da/dN dan Faktor Intensitas Tegangan	62
Tabel 5.10 Hasil lengkap penelitian	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Bentuk geometri pipa <i>Elbow</i>	1
Gambar 2.1 Distribusi tegangan pada pipa <i>Elbow</i>	7
Gambar 2.2 Efek radius pipa <i>Elbow</i> terhadap tegangan maksimum Von-Mises	8
Gambar 2.3 Eksperimen pengujian proses perambatan retak pada pipa <i>Elbow</i>	9
Gambar 2.4 Tahap akhir pengujian retak pada spesimen pipa <i>Elbow</i>	9
Gambar 2.5 Permukaan retak yang terbentuk pada pipa <i>Elbow</i>	10
Gambar 2.6 Perubahan ukuran retak berdasarkan eksperimen	11
Gambar 2.7 Laju pertumbuhan retak berdasarkan eksperimen	11
Gambar 2.8 Hubungan laju pertumbuhan kedalaman retak dengan <i>J-Integral</i>	12
Gambar 3.1 Pipa <i>Elbow</i> dengan orientasi $45^0$ , $90^0$ , $180^0$	16
Gambar 3.2 Perbandingan <i>Elbow</i> $90^0$ dengan $45^0$	16
Gambar 3.3 Perbandingan radius <i>Elbow</i> antara 1,5x dan 1x	17
Gambar 3.4 Maksimum Normal <i>Stress</i>	19
Gambar 3.5 <i>Maximum Shear Stress</i>	20
Gambar 3.6 Teori <i>Von Mises</i>	21
Gambar 3.7 Kurva S-N dengan mekanika perpatahan	22
Gambar 3.8 Tahapan pembentukan retak	23
Gambar 3.9 Tiga jenis mode deformasi	25
Gambar 3.10 Kontur <i>J-Integral</i>	27
Gambar 3.11 Bentuk-bentuk elemen dalam <i>FEA</i>	28
Gambar 4.1 <i>Flow Chart</i> Penelitian	31
Gambar 4.2 Bentuk geometri 3-D model pipa <i>Elbow</i> beserta dimensi	33
Gambar 4.3 Bentuk geometri 3-D model pipa <i>Elbow</i> dengan retakan	34
Gambar 4.4 Fitur penambahan model retak pada Ansys	35
Gambar 4.5 Contoh detil spesifikasi model retak	36
Gambar 4.6 Rangkuman proses penambahan model retak dan analisa <i>J-Integral</i>	37
Gambar 4.7 Hubungan nilai perubahan <i>J-Integral</i> terhadap laju pertumbuhan retak	42
Gambar 5.1 Bentuk geometri 3-D model pipa <i>Elbow</i> beserta konfigurasi <i>mesh</i>	44
Gambar 5.2 Detil konfigurasi <i>mesh</i> pada bagian <i>Elbow</i> dari pipa	45
Gambar 5.3 Posisi <i>global coordinate</i> pada bagian tengah dari pipa <i>Elbow</i>	46

Gambar 5.4 Konfigurasi <i>support</i> pada ujung bawah pipa	46
Gambar 5.5 Konfigurasi <i>support</i> pada ujung atas pipa	47
Gambar 5.6 Referensi simulasi tegangan pada <i>Intradors</i>	47
Gambar 5.7 Hasil simulasi tegangan pada <i>Intradors</i> menggunakan Ansys	48
Gambar 5.8 Simulasi tegangan <i>circumferential</i> dengan beban tarik 10 kN	49
Gambar 5.9 Simulasi tegangan <i>circumferential</i> dengan beban tarik 20 kN	50
Gambar 5.10 Konfigurasi <i>meshing</i> di sekitar posisi retak <i>Intradors</i>	51
Gambar 5.11 Rekapitulasi nilai K1 teoritis dan simulasi retak pada <i>Intradors</i>	53
Gambar 5.12 Grafik perubahan faktor bentuk terhadap panjang retak	54
Gambar 5.13 Grafik laju pertumbuhan retak terhadap K1 hasil simulasi Ansys	55
Gambar 5.14 Grafik laju pertumbuhan retak terhadap K1 dalam skala logaritmik	56
Gambar 5.15 Simulasi tegangan <i>circumferential</i> dengan beban tekan 10 kN	57
Gambar 5.16 Simulasi tegangan <i>circumferential</i> dengan beban tekan 20 kN	57
Gambar 5.17 Konfigurasi <i>meshing</i> di sekitar posisi retak <i>Crown</i>	58
Gambar 5.18 Rekapitulasi nilai K1 teoritis dan simulasi retak pada <i>Crown</i>	60
Gambar 5.19 Faktor bentuk untuk retakan pada posisi <i>Crown</i>	61
Gambar 5.20 Grafik laju pertumbuhan retak terhadap K1 simulasi	62
Gambar 5.21 Grafik K1 teoritis terhadap panjang retak	63
Gambar 5.22 Grafik K1 simulasi terhadap panjang retak	63
Gambar 5.23 Faktor bentuk untuk retakan pada posisi <i>Intradors</i> dan <i>Crown</i>	64