

Analisis kekuatan baut pada *bolted patch plate repair* untuk memperbaiki kebocoran pada pipa minyak diameter 10-24 inch

Bolt strength analysis on bolted patch plate repair to repair leaks in oil pipes with a diameter of 10-24 inches

SKRIPSI

Oleh:
Nama: Ramdan Sidiq
NPM: 223030049



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2026**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Ramdan Sidiq

Nomor Pokok Mahasiswa : 223030049

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Dalam skripsi yang saya kerjakan ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan/ditulis oleh orang lain untuk memperoleh gelar dari suatu perguruan tinggi,
2. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis dan diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu/dikutip/disitasi dalam naskah ini dan disebutkan dalam referensi,
3. Naskah laporan skripsi yang ditulis bukan dilakukan secara *copy paste* dari karya orang lain dan mengganti beberapa kata yang tidak perlu.
4. Naskah laporan skripsi bukan hasil plagiarisme.

Apabila dikemudian hari terbukti bahwa pernyataan ini tidak benar maka saya sanggup menerima hukuman/sanksi apapun sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,



Ramdan Sidiq

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini, sebagai sivitas akademik Universitas Pasundan, saya:

N a m a: Ramdan Sidiq

NPM: 223030049

Program Studi: Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya: Skripsi

Menyatakan bahwa sebagai pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, saya menyetujui memberikan kepada Universitas Pasundan Hak Bebas Royalti Noneksklusif atas karya ilmiah saya yang berjudul:

“Analisis kekuatan baut pada *boltd patch plate repair* untuk perbaiki kebocoran pada pipa minyak diameter 10-24 inch”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Bandung, 24 Juni 2026

Yang menyatakan,



Ramdan Sidiq

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Analisis kekuatan baut pada *bolted patch plate repair* untuk memperbaiki kebocoran pada pipa minyak diameter 10-24 inch



Nama: Ramdan Sidiq
NPM : 223030049

Pembimbing Utama



Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Analisis kekuatan baut pada *bolted patch plate repair* untuk memperbaiki kebocoran pada pipa minyak diameter 10-24 inch



Nama: Ramdan Sidiq
NPM : 223030049

Tanggal sidang skripsi: 29 Juni 2026

Ketua : Dr. Ir. Sugiharto, M.T.

Sekretaris : Dr. Ir. Muki Satya Permana, M.T.

Anggota : Prof. Dr. Ir. Hery Sonawan, M.T.

Anggota : Dr. Ir. Agus Sentana, M.T.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

“Analisis kekuatan baut pada *bolted patch plate repair* untuk memperbaiki kebocoran pada pipa minyak diameter 10–24 inch”

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan.

Penyusunan skripsi ini dilatar belakangi oleh pentingnya sistem perpipaan dalam berbagai sektor industri, khususnya pada sistem transportasi minyak yang menggunakan material baja karbon rendah. Material tersebut banyak diaplikasikan karena memiliki sifat mekanik yang baik, mudah difabrikasi, serta memiliki biaya yang relatif ekonomis. Namun demikian, kerusakan seperti kebocoran, retak, maupun korosi sering terjadi akibat tekanan operasi, pengaruh lingkungan, dan usia pemakaian. Oleh karena itu, diperlukan metode perbaikan yang sederhana, efektif, aman, dan mudah diterapkan untuk menangani berbagai ukuran pipa tanpa memerlukan proses yang kompleks.

Melalui penelitian ini, penulis menganalisis kekuatan baut pada sistem *bolted patch plate repair* sebagai salah satu alternatif perbaikan kebocoran pada pipa minyak berdiameter 10-24 inch. Analisis dilakukan untuk mengetahui kemampuan baut dalam menahan beban tarik yang terjadi pada sambungan, sehingga dapat menjamin keandalan dan keamanan struktur perbaikan. Penelitian ini juga mempertimbangkan pengaruh torsi pengencangan baut terhadap kekuatan sambungan serta efektivitas metode perbaikan yang diterapkan.

Skripsi ini disusun atas beberapa bagian utama, yaitu pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, hasil dan pembahasan, serta kesimpulan dan saran. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen melalui pengujian tarik pada spesimen sambungan baut yang merepresentasikan kondisi kerja *bolted patch plate repair*. Data yang diperoleh digunakan untuk mengevaluasi kekuatan baut, beban tarik maksimum dan nilai *displacement* hasil simulasi menggunakan SolidWorks *Simulation*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode perbaikan sistem perpipaan yang praktis dan aplikatif, khususnya terkait analisis kekuatan sambungan baut pada metode *bolted patch plate repair*.

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis memperoleh dukungan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak/Ibu Dosen pembimbing skripsi atas arahan, masukan, dan motivasi yang diberikan selama proses penyusunan hingga penyelesaian skripsi ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Ketua Program Studi Teknik Mesin serta seluruh dosen dan Staf Fakultas Teknik Universitas Pasundan atas ilmu, bimbingan, dan fasilitas yang telah diberikan selama masa studi.

Penulis juga menyampaikan ucapan terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa 2022 terutama Rodiana, Herry Rohana, Akbar Daya Utama, Muhammad Athfal, Rianki Febrianta, khususnya di lingkungan laboratorium, atas bantuan yang diberikan baik dalam bentuk diskusi teknis maupun persiapan peralatan penelitian. Rasa terima kasih yang mendalam juga penulis sampaikan kepada kedua orang tua dan keluarga tercinta atas doa, kasih sayang, serta dukungan moral yang tiada henti sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan penelitian di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik mesin, khususnya dalam kajian kekuatan baut pada sistem *bolted patch plate repair* untuk perbaikan kebocoran pipa minyak, serta dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya maupun penerapannya di lingkungan industri.

Bandung, 24 Juni 2026

Penulis,



Ramdan Sidiq

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	X
DAFTAR TABEL	XII
ABSTRAK	XIII
<i>ABSTRACT</i>	XIV
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	2
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	2
5. Batasan masalah	2
6. Sistematika penulisan	2
BAB II STUDI LITERATUR	4
1. Kajian pustaka	4
A. Penelitian Desi Hardianti, Bernardinus Herbudiman, Nessa Valiantine Diredja (2018).....	4
B. Penelitian Wiryanto Dewobroto dan Hendrik Wijaya (2009).....	4
C. Penelitian Agus Sentana (2004).....	6

2. Pipa minyak dan gas	6
3. Korosi pada pipa minyak	7
4. Baut.....	9
A. Tipe-tipe baut	9
B. Material baut	10
5. Ring per	11
6. Ring pelat.....	12
7. Baja karbon rendah.....	12
8. <i>Stainless steel</i> AISI 304.....	13
9. <i>Bolted patch plate repair</i>	14
BAB III METODOLOGI	15
1. Tahapan penelitian.....	15
2. Tempat Penelitian.....	15
A. Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Pasundan	15
B. Laboratorium Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung (ITB)	16
3. Perancangan eksperimen	16
A. Pembuatan spesimen	16
B. <i>Set-Up</i> pengujian.....	18
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	20
1. Pengujian uji tarik.....	20
A. Percobaan menggunakan ring pelat (<i>flat washer</i>) dan ring per (<i>spring washer</i>)	21
B. Percobaan menggunakan ring pelat (<i>flat washer</i>)	22
2. Grafik hasil pengujian tarik	23
3. Hasil analisis <i>displacement</i> pada pelat menggunakan SolidWorks <i>simulation</i> ...	24
4. Perhitungan lubang kebocoran yang diizinkan.....	25
5. Perhitungan persentase keliling pipa	26

6.	Perhitungan dimensi <i>bolted patch plate</i>	27
7.	Hasil analisis <i>hoop stress</i> pada pipa	28
8.	Hasil analisis <i>longitudinal stress</i> pada pipa	30
9.	Hasil perbandingan analisis <i>hoop stress</i> pada kebocoran pipa sebelum dan sesudah penambalan <i>patch plate</i>	31
10.	Hasil perbandingan analisis <i>longitudinal stress</i> pada kebocoran pipa sebelum dan sesudah penambalan <i>patch plate</i>	33
11.	Hasil analisis <i>displacement</i> sumbu X pada pipa menggunakan SolidWorks	35
12.	Hasil analisis pada baut	36
13.	Skematik dari hasil penelitian <i>bolted patch plate repair</i>	38
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		39
1.	Kesimpulan	39
2.	Saran	39
DAFTAR PUSTAKA		41
LAMPIRAN		43
1.	Jadwal kegiatan	43
2.	Anggaran biaya	43
3.	Proses pemotongan pelat	43
4.	Proses <i>drilling</i> pada pelat	44
5.	Proses <i>tapping</i> pada pelat	44
6.	Bentuk spesimen sudah perakitan untuk uji tarik	44

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Baut, ring (<i>washer</i>) dan mur tipe standar	5
Gambar 2. Ring khusus beralur (utuh dan terpotong).....	5
Gambar 3. Perpipaian minyak dan gas.....	7
Gambar 4. Korosi pada pipa	8
Gambar 5. Skema pengencangan baut	9
Gambar 6. Ring per (<i>spring washer</i>)	12
Gambar 7. Ring pelat (<i>flat washer</i>).....	12
Gambar 8. Baut <i>stainless steel</i> AISI 304	13
Gambar 9. Skema <i>bolted patch plate repair</i>	14
Gambar 10. Alur diagram penelitian.....	15
Gambar 11. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan	15
Gambar 12. Laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung (ITB)	16
Gambar 13. Proses pemotongan pelat.....	16
Gambar 14. Proses <i>drilling</i> pada pelat	17
Gambar 15. Proses <i>tapping</i> pada pelat.....	17
Gambar 16. Pemasangan baut <i>stainless steel</i> AISI 304	18
Gambar 17. Penambahan pelat.....	18
Gambar 18. Set up eksperimen	19
Gambar 19. Skematik pengujian uji tarik	20
Gambar 20. Skematik pengujian geser <i>bolted patch plate repair</i>	21
Gambar 21. Percobaan dengan menggunakan ring pelat (<i>flat washer</i>) dan ring per (<i>spring washer</i>).....	21
Gambar 22. Percobaan dengan menggunakan ring pelat (<i>flat washer</i>).....	22
Gambar 23. Grafik hasil pengujian uji tarik spesimen.....	23
Gambar 24. Hasil <i>displacement</i> pada pelat.....	24
Gambar 25. Hasil <i>hoop stress</i> pada pipa.....	29
Gambar 26. Hasil <i>longitudinal stress</i> pada pipa	31
Gambar 27. Hasil analisis <i>hoop stress</i> pada kebocoran pipa dengan lubang diameter 60 mm	32
Gambar 28. Hasil analisis <i>hoop stress</i> pada kebocoran pipa setelah penambalan <i>patch plate</i>	32

Gambar 29. Hasil analisis <i>longitudinal stress</i> pada kebocoran pipa dengan lubang diameter 60 mm	34
Gambar 30. Hasil analisis <i>longitudinal stress</i> pada kebocoran pipa setelah penambalan <i>patch plate</i>	34
Gambar 31. Hasil <i>displacement</i> sumbu UX pada pipa	36
Gambar 32. Hasil analisis pada baut.....	37
Gambar 33. Skematik dari hasil penelitian <i>bolted patch plate repair</i>	38

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persentasi unsur baja karbon.....	12
Tabel 2. Komposisi kimia AISI 304	13

ABSTRAK

Kebocoran pada pipa minyak merupakan salah satu permasalahan yang dapat mengganggu operasional, menimbulkan risiko keselamatan, serta menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan. Salah satu metode perbaikan yang dapat diterapkan tanpa proses pengelasan adalah *bolted patch plate repair*, yaitu metode perbaikan menggunakan pelat tambalan yang dipasang dengan sambungan baut pada area kebocoran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi tegangan, perpindahan (*displacement*), serta kekuatan sambungan baut pada metode *bolted patch plate repair* sebagai alternatif perbaikan kebocoran pada pipa minyak. Material pipa yang digunakan adalah ASTM A36, sedangkan *patch plate* dan baut menggunakan material *stainless steel* AISI 304 dengan ukuran baut M8. Penelitian dilakukan melalui perhitungan teoritis berdasarkan teori bejana tekan tipis (*thin-walled pressure vessel*), pengujian tarik untuk menentukan kapasitas baut, serta simulasi numerik menggunakan SolidWorks *Simulation*. Hasil perhitungan teoritis menunjukkan bahwa nilai *hoop stress* pada pipa utuh sebesar 195 MPa dan *longitudinal stress* sebesar 98 MPa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *hoop stress* meningkat menjadi 822 MPa pada pipa dengan kebocoran berdiameter 60 mm, kemudian menurun menjadi 795 MPa setelah dilakukan penambalan menggunakan *patch plate*. Sementara itu, nilai *longitudinal stress* meningkat dari 98 MPa menjadi 117 MPa pada kondisi pipa berlubang dan menurun menjadi 111 MPa setelah penambalan. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa baut M8 berbahan *Stainless Steel* AISI 304 mampu menahan beban maksimum sebesar 23.524,34 N sehingga memenuhi kebutuhan kekuatan sambungan pada metode perbaikan yang digunakan. Selain itu, hasil simulasi *displacement* menunjukkan bahwa deformasi maksimum yang terjadi setelah penambalan masih berada dalam batas yang diizinkan sehingga struktur pipa tetap mampu menahan tekanan internal sebesar 8 MPa. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa metode *bolted patch plate repair* mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kebocoran, meningkatkan integritas struktur pipa, serta layak diterapkan sebagai metode alternatif perbaikan kebocoran pipa minyak tanpa proses pengelasan.

Kata kunci: *Bolted patch plate repair*, kebocoran pipa minyak, *hoop stress*, *longitudinal stress*, SolidWorks *Simulation*, *displacement*.

ABSTRACT

Oil pipeline leakage is one of the major problems that can disrupt operations, create safety hazards, and cause significant economic losses. One repair method that can be applied without welding is the bolted patch plate repair, which uses a bolted steel patch plate to seal the leakage area. This study aims to analyze the stress distribution, displacement, and bolt joint strength of the bolted patch plate repair method as an alternative solution for repairing oil pipeline leakage. The pipeline material used in this study was ASTM A36 carbon steel, while the patch plate and bolts were made of AISI 304 stainless steel with M8 bolts. The research was conducted through theoretical calculations based on thin-walled pressure vessel theory, tensile testing to determine the bolt capacity, and numerical simulations using SolidWorks Simulation. The theoretical analysis showed that the hoop stress and longitudinal stress of the intact pipe were 195 MPa and 98 MPa, respectively. The simulation results indicated that the hoop stress increased to 822 MPa in the pipe with a 60 mm leakage hole and decreased to 795 MPa after repair using a bolted patch plate. Meanwhile, the longitudinal stress increased from 98 MPa to 117 MPa in the damaged pipe and decreased to 111 MPa after repair. Tensile test results demonstrated that the AISI 304 stainless steel M8 bolts were capable of withstanding a maximum load of 23,524.34 N, indicating that the bolted joint satisfied the required strength for the repair method. In addition, the displacement analysis showed that the maximum deformation after repair remained within the allowable limit, indicating that the repaired pipeline was capable of withstanding an internal pressure of 8 MPa. The results demonstrate that the bolted patch plate repair method is capable of reducing stress concentration around the leakage area, improving the structural integrity of the pipeline, and providing a feasible alternative for repairing oil pipeline leakage without welding.

Keywords: Bolted patch plate repair, oil pipeline leakage, hoop stress, longitudinal stress, SolidWorks Simulation, displacement.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Sistem perpipaan pada industri minyak dan gas bumi dipandang sebagai metode yang efektif dan efisien dalam mendistribusikan produk minyak dan gas, khususnya untuk pengiriman jarak jauh melalui jalur darat maupun laut. Variasi kondisi geografis dan lingkungan sepanjang jalur perpipaan menimbulkan berbagai potensi risiko keselamatan, seperti kebocoran, tumpahan, ledakan, serta pencemaran lingkungan. Permasalahan pada sistem perpipaan dapat disebabkan oleh faktor internal, misalnya korosi material pipa, maupun faktor eksternal yang meliputi pengaruh kondisi lingkungan dan aktivitas masyarakat di sekitar jalur pipa.

Dalam kurun waktu lima tahun terakhir, sejumlah insiden pada pipa transmisi minyak mentah di Indonesia telah tercatat. Salah satu kejadian terjadi pada akhir Maret 2018 berupa kebocoran pada pipa penyalur minyak mentah berdiameter 20 inch dengan ketebalan 12 mm yang menghubungkan Lawe-lawe dan Kilang PT Pertamina RU V di Balikpapan. Kegagalan pipa tersebut diduga dipengaruhi oleh faktor eksternal, antara lain pelaksanaan perawatan dan inspeksi yang kurang memadai, belum optimalnya sistem pemantauan pipa secara otomatis, serta tidak tersedianya sistem peringatan dini. Akibat kebocoran tersebut, dilaporkan lima orang nelayan meninggal dunia dan terjadi pencemaran lingkungan yang signifikan di Teluk Balikpapan. Luas wilayah yang terdampak tumpahan minyak diperkirakan mencapai sekitar 7.000 hektar, dengan panjang garis pantai yang tercemar di wilayah Kota Balikpapan dan Kabupaten Penajam Paser Utara mencapai kurang lebih 60 kilometer [1].

Untuk mendukung proses perbaikan kebocoran perpipaan secara cepat tanpa memerlukan persiapan area yang kompleks, diperlukan metode perbaikan yang aman dan tidak menimbulkan percikan api. Salah satu pendekatan yang dapat diterapkan adalah bolted patch plate repair perancangan alat sederhana perbaikan kebocoran pada pipa minyak material baja karbon rendah, yaitu suatu rancangan alat yang memungkinkan proses penanganan kebocoran dilakukan secara mekanis tanpa melibatkan sumber panas. Konsep ini dirancang agar dapat dilakukan secara lebih praktis, efisien dan aman. Dengan tidak digunakannya proses pengelasan yang menghasilkan panas maupun percikan api, risiko kebakaran atau ledakan pada sistem perpipaan yang mengalir atau pernah terpapar fluida mudah terbakar dapat diminimalkan.

2. Rumusan masalah

- a. Bagaimana kekuatan tarik baut pada sambungan *bolted patch plate repair* yang digunakan untuk perbaikan kebocoran pipa minyak berdiameter 10–24 inch?
- b. Bagaimana distribusi *displacement* pada *bolted patch plate repair* berdasarkan hasil simulasi menggunakan SolidWorks *simulation*?

3. Tujuan

Menganalisis kemampuan metode *bolted patch plate repair* dalam menahan tekanan internal pada pipa minyak berdiameter 10–24 inch.

4. Manfaat

Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan metode perbaikan kebocoran pipa minyak melalui analisis kekuatan baut pada sistem *bolted patch plate repair* untuk pipa berdiameter 10–24 inch. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam perancangan sambungan baut yang aman, andal, dan efektif, serta mendukung penerapan metode perbaikan yang praktis dan efisien pada industri migas.

5. Batasan masalah

Untuk menjaga supaya penelitian terarah dan fokus, maka penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

- a. Material yang digunakan terdiri dari baja karbon rendah sebagai pelat penambal dan *stainless steel* AISI 304 sebagai material baut,
- b. Hasil penelitian ini ditujukan untuk aplikasi perbaikan kebocoran pada pipa minyak berdiameter 10–24 inch,
- c. Penelitian ini hanya membahas distribusi tegangan berupa *hoop stress* dan *longitudinal stress* pada pipa sebelum dan sesudah penerapan metode *bolted patch plate repair*, dan
- d. Evaluasi kinerja sambungan dilakukan melalui pengujian tarik untuk mengetahui kemampuan sambungan baut dalam menahan beban yang bekerja.

6. Sistematika penulisan

Sistematika penulisan penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran mengenai isi dan pembahasan pada setiap bab. Adapun sistematika penulisan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab pertama menjelaskan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, manfaat, dan batasan masalah.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab kedua membahas penjelasan mengenai teori-teori yang relevan, meliputi topik.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan tentang tahapan penelitian dan tempat penelitian. Tahapan penelitian dapat berupa diagram alir atau yang sejenisnya.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA HASIL

Pada bab ini dijelaskan tentang hasil pengujian tarik pada spesimen yang menggunakan metode *bolted patch plate repair*, meliputi data hasil pengujian, analisis kekuatan sambungan, pembahasan mengenai perilaku mekanis, karakteristik kegagalan yang terjadi selama pengujian serta melakukan analisis *hoop stress* dan *longitudinal stress* dengan perhitungan tangan dan SolidWorks *Simulation* .

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran yang diperoleh dari hasil penelitian tentang analisis kekuatan baut pada *bolted patch plate repair* untuk perbaikan kebocoran pada pipa minyak berdiameter 10–24 inch. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian tarik dan analisis data yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan sambungan baut, sedangkan saran diberikan sebagai bahan pertimbangan dan pengembangan penelitian selanjutnya terkait peningkatan kinerja dan keandalan metode *bolted patch plate repair*.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan tentang sumber-sumber acuan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian. Daftar pustaka memuat referensi berupa buku, jurnal ilmiah, artikel, maupun sumber daring.

LAMPIRAN

Pada bab ini dijelaskan tentang dokumen pendukung yang berkaitan dengan hasil penelitian namun tidak dimuat secara rinci dalam isi utama laporan. Lampiran berfungsi sebagai pelengkap agar pembaca dapat melihat bukti teknis, data, atau informasi tambahan pada penelitian.

BAB II STUDI LITERATUR

1. Kajian pustaka

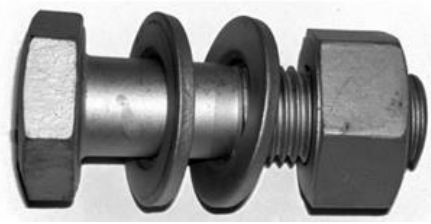
Penelitian ini dilakukan berlandaskan pada penelitian terdahulu, baik dari jenis penelitian maupun teori yang diterapkan pada penelitian ini. Beberapa penelitian terdahulu yang digunakan sebagai sumber referensi meliputi penelitian yang dilakukan oleh Desi Hardianti, Bernardinus Herbudiman, Nessa Valiantine Diredja (2018), Wiryanto Dewobroto dan Hendrik Wijaya (2009) dan Agus Sentana (2004).

A. Penelitian Desi Hardianti, Bernardinus Herbudiman, Nessa Valiantine Diredja (2018)

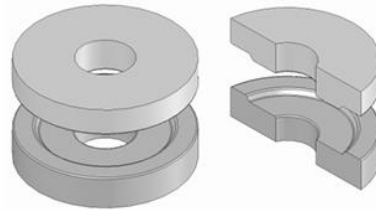
Penelitian yang dilakukan oleh Hardianti, Herbudiman, dan Diredja berjudul “Studi Eksperimental Batang Tarik Sambungan Baut pada Pelat Baja” melakukan analisis dan pengujian eksperimental terhadap sambungan baut pada batang tarik baja. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas sambungan serta jenis kegagalan yang terjadi pada sambungan baut. Spesimen yang digunakan berupa pelat baja berukuran 70 mm × 300 mm × 3 mm yang disambung menggunakan baut diameter 8 mm mutu A449. Hasil analisis teoritis menunjukkan bahwa kapasitas sambungan sebesar 44,04 kN dengan tipe kegagalan berupa geser (*shear failure*). Selanjutnya dilakukan pengujian tarik di laboratorium dan diperoleh kapasitas ultimit sebesar 52,23 kN. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai kapasitas dari pengujian eksperimental lebih tinggi dibandingkan hasil analitis dengan selisih sekitar 15,69%, namun keduanya memperlihatkan kecenderungan (*trend*) yang sama sehingga metode analitis dinilai cukup representatif dalam memprediksi perilaku sambungan baut pada batang tarik baja [2].

B. Penelitian Wiryanto Dewobroto dan Hendrik Wijaya (2009)

Penelitian yang dilakukan oleh Wiryanto Dewobroto dan Hendrik Wijaya berjudul “Pengaruh Pemakaian Baut Mutu Tinggi dan Baut Biasa terhadap Kinerja Sistem Sambungan dengan Ring-Khusus-Beralur”. Tujuan penelitian ini adalah pengaruh penggunaan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt/HTB*) dan baut biasa terhadap kinerja sambungan pelat baja tipis yang menggunakan ring khusus beralur. Penelitian dilakukan secara eksperimental dengan membandingkan dua jenis sambungan yang memiliki konfigurasi dan dimensi yang sama, namun menggunakan jenis baut yang berbeda, yaitu baut mutu tinggi ASTM A325 dan baut biasa ASTM A307.



Gambar 1. Baut, ring (*washer*) dan mur tipe standar



Gambar 2. Ring khusus beralur (utuh dan terpotong)

Berdasarkan penelitian Dewobroto dan Wijaya (2009), penggunaan baut mutu tinggi (*High Strength Bolt/HTB*) pada sistem sambungan dengan ring-khusus-beralur terbukti mampu meningkatkan kekuatan dan kekakuan sambungan dibandingkan penggunaan baut biasa. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya *pretension* yang lebih besar sehingga sambungan memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan beban sebelum terjadinya slip. Selain itu, penggunaan ring-khusus-beralur menghasilkan perilaku sambungan yang relatif kaku dan mampu meningkatkan kapasitas sambungan secara signifikan.

Meskipun demikian, penelitian tersebut masih memiliki beberapa keterbatasan. Pengujian dilakukan pada pelat baja tipis dengan ketebalan 1,5 mm sehingga hasil penelitian belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi sambungan pada struktur dengan ketebalan yang lebih besar, seperti pipa minyak di industri migas. Selain itu, penelitian hanya berfokus pada pengaruh jenis baut dan gaya *pretension* terhadap kinerja sambungan, tanpa mempertimbangkan pengaruh tekanan fluida, kondisi korosi, maupun kebocoran yang umumnya terjadi pada sistem perpipaan. Penelitian juga menggunakan konfigurasi ring-khusus-beralur yang memerlukan komponen tambahan dan biaya yang relatif lebih tinggi dibandingkan sistem sambungan baut konvensional.

Di sisi lain, hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kualitas sambungan sangat dipengaruhi oleh kemampuan baut dalam menghasilkan gaya penjepitan (*clamping force*) yang memadai. Oleh karena itu, penelitian ini dapat dijadikan dasar dalam pengembangan metode *bolted patch plate repair* untuk perbaikan kebocoran pipa minyak, khususnya dalam menentukan jenis baut, sistem pengencangan, serta besarnya gaya penjepitan yang

diperlukan agar sambungan perbaikan mampu menahan beban dan mencegah terjadinya kebocoran secara efektif [3].

C. Penelitian Agus Sentana (2004)

Penelitian yang dilakukan oleh Agus Sentana (2004) yang berjudul "Pengujian Mekanik Sambungan Las pada Pelat SA 240 GR 304L dengan Menggunakan Standar Uji ASME Section IX". Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan kekuatan sambungan las pada pelat SA 240 Grade 304L berdasarkan standar ASME Section IX. Pengujian yang dilakukan meliputi uji tarik dan uji lengkung (bend test) di Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T) Bandung.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sambungan las memiliki kekuatan tarik sebesar 606,77 MPa dan 611,04 MPa, lebih tinggi dibandingkan nilai minimum yang dipersyaratkan oleh ASME Section IX, yaitu 485 MPa untuk material SA 240 Grade 304L. Selain itu, hasil uji lengkung menunjukkan retak maksimum sebesar 0,5 mm, yang masih berada di bawah batas maksimum yang diizinkan oleh standar ASME, yaitu 3,2 mm pada sisi lengkung luar. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa sambungan las pada pelat SA 240 Grade 304L telah memenuhi persyaratan mekanik sesuai standar ASME Section IX.

Penelitian ini menjadi salah satu referensi dalam penelitian yang dilakukan karena sama-sama menggunakan material *stainless steel* 304L dan mengevaluasi kemampuan material dalam menahan pembebanan mekanik. Perbedaanannya, penelitian Agus Sentana (2004) berfokus pada karakteristik mekanik sambungan las melalui pengujian tarik dan uji lengkung, sedangkan penelitian ini membahas analisis distribusi tegangan (*hoop stress* dan *longitudinal stress*), *displacement*, serta efektivitas metode *bolted patch plate repair* pada pipa bertekanan menggunakan SolidWorks *Simulation*. Dengan demikian, penelitian ini melengkapi penelitian sebelumnya melalui pendekatan analisis numerik terhadap metode perbaikan kebocoran pipa [4].

2. Pipa minyak dan gas

Pipa merupakan komponen penting yang banyak diterapkan dalam industri perminyakan dan produksi bahan kimia. Fungsi utama pipa adalah sebagai media penyalur fluida, baik cairan maupun zat kimia lainnya, dari satu titik ke titik lain dalam suatu sistem proses. Dalam industri perminyakan, pipa digunakan dalam berbagai jenis dan material, seperti baja karbon, besi, dan baja paduan. Pemilihan material tersebut disesuaikan dengan kondisi

operasi, meliputi tekanan kerja, temperatur, serta karakteristik fluida yang dialirkan dalam sistem perpipaan.

Suatu sistem perpipaan tidak hanya terdiri atas pipa, tetapi juga dilengkapi komponen pendukung, seperti *valve* dan *flange*. *Flange* berfungsi sebagai elemen penghubung antara pipa dengan pipa lainnya, maupun antara pipa dengan peralatan proses (*vessel*) dalam jaringan perpipaan. Penggunaan *flange* mempermudah proses instalasi, perawatan, dan pembongkaran sistem. Beberapa jenis *flange* yang umum digunakan antara lain *slip-on*, *weld neck*, *blind*, *socket weld*, *lap joint*, dan *threaded flange*, yang masing-masing memiliki karakteristik dan fungsi sesuai kebutuhan operasional [5].



Gambar 3. Perpipaan minyak dan gas

Sistem jaringan pipa memiliki peranan yang sangat penting dalam industri minyak dan gas bumi. Jaringan pipa masih menjadi sarana utama distribusi minyak mentah dan gas dalam jumlah besar karena lebih ekonomis dibandingkan moda transportasi lain, seperti kereta api, truk, maupun kapal tanker. Namun demikian, jaringan pipa memiliki kelemahan berupa kerentanan terhadap korosi internal. Oleh karena itu, korosi internal pada jaringan perpipaan menjadi isu yang sangat penting untuk diperhatikan [6].

3. Korosi pada pipa minyak

Korosi pada pipa minyak merupakan proses degradasi logam akibat reaksi elektrokimia antara material pipa dengan lingkungan sekitarnya. Pada jaringan pipa minyak, korosi tidak hanya menyebabkan penurunan ketebalan dinding pipa, tetapi juga berpotensi menimbulkan kebocoran, kerusakan struktural, bahkan kecelakaan yang menimbulkan keselamatan manusia serta mencemari lingkungan. Oleh karena itu, pengendalian korosi menjadi aspek penting dalam menjaga integritas dan keandalan sistem perpipaan [6].



Gambar 4. Korosi pada pipa

Material yang digunakan dalam proses pembuatan pipa umumnya berupa baja karbon, material baja karbon tergolong sebagai tingkat kerentanan tinggi terhadap korosi. Korosi pada pipa dipahami sebagai proses degradasi logam yang terjadi akibat reaksi kimia maupun elektrokimia antara material logam dan lingkungan sekitarnya. Percepatan laju korosi dapat dipengaruhi oleh faktor eksternal, termasuk interaksi antara komponen perpipaan yang saling terhubung serta paparan terhadap lingkungan yang bersifat korosif. Dengan demikian, apabila sistem perpipaan dioperasikan secara simultan dan berkelanjutan tanpa pengendalian yang memadai, maka korosi yang tidak terkendali berpotensi menurunkan kekuatan material hingga menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada komponen pipa.

Terdapat dua jenis korosi yang umum terjadi pada pipa minyak, yaitu korosi internal dan korosi eksternal:

a. Korosi Internal

Korosi internal terjadi pada permukaan bagian dalam material pipa akibat keberadaan gas CO_2 dan H_2S dalam minyak bumi. Apabila gas-gas tersebut berinteraksi dengan air, akan terbentuk senyawa asam yang bersifat korosif terhadap material pipa.

b. Korosi eksternal

Korosi eksternal merupakan korosi yang terjadi pada permukaan luar pipa akibat kontak dengan lingkungan sekitarnya, seperti udara, tanah, air, maupun media lingkungan lainnya [7].

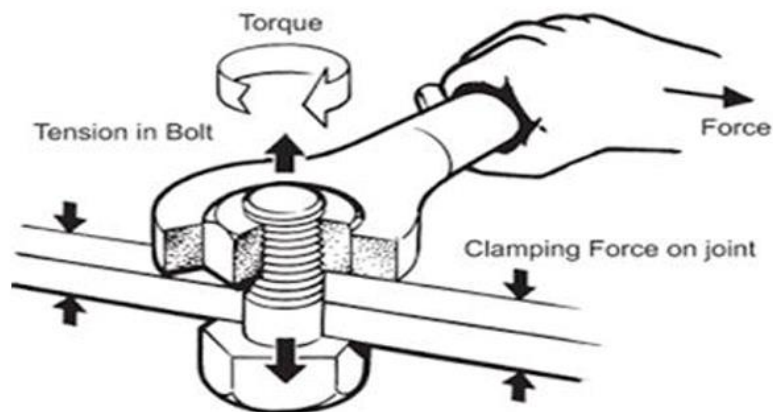
Jika sebuah pipa telah terjadi kebocoran akibat korosi, maka perlu dilakukan perbaikan dengan cara menambalnya. Perbaikan sebuah pipa memerlukan metode khusus, karena perbaikan pipa memiliki risiko yang tinggi untuk terbakar bahkan dapat

menimbulkan ledakan jika dilakukan perbaikan tidak sesuai dengan standar perbaikan pipa tersebut.

4. Baut

Baut merupakan komponen penyambung berbentuk batang silinder yang memiliki ulir, dengan salah satu ujung dilengkapi kepala baut (umumnya berbentuk segi enam), sedangkan ujung lainnya dipasangkan dengan mur atau elemen pengunci. Dalam aplikasinya di lapangan, baut digunakan untuk membentuk sambungan konstruksi yang dapat bersifat permanen, semi-permanen, maupun sementara, sehingga memungkinkan proses perakitan dan pembongkaran kembali.

Konstruksi baut terdiri dari batang berbentuk silinder pada salah satu ujungnya dilengkapi kepala baut, serta memiliki alur ulir yang dapat berbentuk sepanjang batang atau hanya sebagian ujung tertentu. Baut umumnya dibuat dari material baja lunak, baja paduan, baja tahan karat, maupun kuningan. Selain itu, untuk aplikasi khusus, baut juga dapat diproduksi dari material logam lain atau paduan logam tertentu sesuai dengan kebutuhan penggunaannya [8].



Gambar 5. Skema pengencangan baut

Baut digunakan untuk mengencangkan berbagai komponen pada beragam bagian pipa. Terdapat berbagai jenis baut dan mur yang dipilih sesuai dengan kebutuhan aplikasinya.

A. Tipe-tipe baut

a. Baut kepala heksagonal

Baut heksagonal merupakan jenis baut yang paling umum digunakan. Beberapa varian dilengkapi dengan *flange* dan *washer* pada bagian bawah kepala baut untuk meningkatkan kestabilan dan distribusi beban.

b. Baut U

Baut U digunakan untuk menjepit atau menyambungkan komponen berbentuk silinder, seperti pengikat pegas daun pada *axle*.

c. Baut tanam

Baut ini digunakan untuk mencari part pada part lain atau memudahkan perakitannya [9].

B. Material baut

Material baut berperan penting dalam menentukan kinerja serta tingkat keandalan suatu sambungan mekanik. Setiap jenis material memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda, sehingga pemilihannya harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi. Material baut yang umumnya digunakan sebagai berikut:

a. *Baja/alloy steel*

Baja merupakan material yang memiliki tingkat kepadatan relatif tinggi dibandingkan dengan material lain yang digunakan sebagai bahan baku baut. Material baja tersedia dalam beberapa tingkat kekuatan yang diklasifikasikan berdasarkan kode angka tertentu, seperti 4.6, 8.8, 10.9, dan 12.9, yang menunjukkan karakteristik sifat mekanik dan kapasitas kekuatan tariknya.

b. *Hot-dipped galvanized steel*

Material tersebut dilapisi dengan seng (*zinc*) yang memiliki ketebalan relatif tinggi sehingga perlindungan terhadap baut dapat ditingkatkan secara signifikan. Ketebalan lapisan seng tersebut berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan baut terhadap korosi, sehingga kualitas dan kinerjanya tetap terjaga meskipun digunakan pada lingkungan luar ruangan dalam jangka waktu yang panjang.

c. *Zinc-plated steel*

Zinc-plated steel dikategorikan sebagai material baut yang berbasis baja karbon rendah (*low carbon steel*) dan dilapisi dengan seng melalui proses pelapisan tertentu. Tingkat ketebalan lapisan seng pada material ini berada di bawah ketebalan lapisan yang terdapat pada *hot-dipped galvanized steel*, sehingga tingkat perlindungan terhadap korosi yang diberikan relatif lebih rendah dibandingkan dengan metode galvanisasi celup panas.

e. Tembaga

Tembaga memiliki sifat konduktivitas listrik yang tinggi sehingga material ini dinilai sesuai untuk digunakan sebagai bahan baku baut pada aplikasi tertentu, khususnya pada instalasi atau perakitan mesin yang memerlukan kemampuan penghantaran arus listrik.

f. *Stainless steel*

Stainless steel dinilai memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi dan pengaruh lingkungan. Penggunaan material ini pada baut memungkinkan aplikasi pada berbagai jenis permukaan, termasuk untuk penggunaan di luar ruangan, tanpa menimbulkan kekhawatiran terhadap penurunan kualitas maupun kinerja baut dalam jangka waktu tertentu [10].

Prosedur pengujian pada baut umumnya dilakukan menggunakan metode uji tarik. Uji tarik merupakan salah satu metode pengujian yang digunakan untuk menentukan sifat mekanik dan kualitas material. Pengujian dilakukan dengan menjepit spesimen pada mesin uji tarik, kemudian diberikan beban statis yang meningkat secara bertahap hingga spesimen mengalami deformasi dan akhirnya patah. Melalui pengujian ini diperoleh karakteristik mekanik material yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai data pendukung dalam penentuan spesifikasi bahan. Uji tarik digunakan untuk mengidentifikasi berbagai sifat mekanik penting dalam perancangan, antara lain kekuatan tarik (*tensile strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), ketangguhan (*toughness*), dan keuletan (*ductility*) [11].

5. Ring per

Ring per (*spring washer*) merupakan komponen tambahan pada sambungan baut yang berfungsi untuk mempertahankan gaya jepit baut serta mencegah terjadinya pengenduran akibat getaran, beban dinamis, maupun perubahan temperatur. Ring per memiliki bentuk cincin yang terbelah dan sedikit melengkung sehingga ketika baut dikencangkan, ring akan memberikan gaya elastis yang membantu menjaga tegangan pada sambungan. Dengan demikian, risiko baut berputar atau mengendur selama operasi dapat diminimalkan.

Spring washer bekerja dengan memberikan gaya pegas tambahan pada sambungan baut sehingga dapat membantu mempertahankan gaya prategang (*preload*) pada kondisi tertentu. Namun, efektivitasnya sangat bergantung pada desain sambungan dan besarnya gaya pengencangan baut yang diterapkan. Oleh karena itu, penggunaan ring per umumnya dikombinasikan dengan prosedur pengencangan baut yang tepat untuk memperoleh sambungan yang aman dan andal.



Gambar 6. Ring per (*spring washer*)

6. Ring pelat

Ring pelat (*flat washer*) merupakan komponen berbentuk cakram tipis berlubang yang dipasang di antara kepala baut atau mur dengan permukaan benda kerja. Fungsi utama ring pelat adalah memperluas area kontak sehingga beban penjepitan dari baut dapat terdistribusi lebih merata pada permukaan material yang disambung. Selain itu, penggunaan ring pelat dapat mengurangi risiko kerusakan permukaan material akibat tekanan lokal yang tinggi dari kepala baut atau mur.



Gambar 7. Ring pelat (*flat washer*)

Flat washer digunakan untuk mendistribusikan gaya penjepitan baut pada area yang lebih luas sehingga mengurangi konsentrasi tegangan pada permukaan sambungan. Penggunaan washer juga dapat membantu melindungi permukaan material dari deformasi atau kerusakan selama proses pengencangan baut. Oleh karena itu, *flat washer* banyak digunakan pada sambungan baut yang memerlukan distribusi beban yang merata dan kestabilan sambungan yang baik [12].

7. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah merupakan jenis baja yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,25%. Klasifikasi dan komposisi yang lebih rinci mengenai baja karbon rendah disajikan pada tabel berikut.

Tabel 1. Persentasi unsur baja karbon

Jenis baja karbon		Persentasi unsur karbon
1	Baja karbon rendah	$\leq 0,25 \%$
2	Baja karbon sedang	$0,25 \% \div 0,55 \%$
3	Baja karbon tinggi	$\geq 0,55 \%$

Unsur paduan lain, seperti mangan (Mn), dibatasi hingga maksimum 0,8%, silikon (Si) maksimum 0,5%, dan tembaga (Cu) maksimum 0,6%. Berdasarkan kandungan karbonnya, baja karbon diklasifikasikan menurut persentase komposisi unsur karbon sebagaimana ditunjukkan pada diagram fasa Fe–C [13].

8. *Stainless steel* AISI 304

Stainless steel adalah baja paduan yang mengandung sedikitnya sekitar 12% kromium (Cr) yang memberikan ketahanan terhadap korosi melalui terbentuknya lapisan pasif berupa kromium oksida (Cr_2O_3) pada permukaannya. Ketahanan terhadap korosi dan oksidasi pada *stainless steel* juga dipengaruhi oleh penambahan unsur paduan lain seperti nikel (Ni), mangan (Mn), molibdenum (Mo), nitrogen (N), dan unsur-unsur lainnya yang berperan dalam meningkatkan sifat mekanik maupun ketahanan lingkungan material. Berdasarkan kandungan kromium dan nikelnya, *stainless steel* secara umum dikelompokkan menjadi beberapa jenis, yaitu *austenitik*, *martensitik*, *feritik*, dan *dupleks*.



Gambar 8. Baut *stainless steel* AISI 304

Salah satu jenis *stainless steel* yang paling banyak digunakan adalah AISI 304, yang termasuk dalam kelompok *stainless steel austenitik*. Material ini bersifat *non magnetik* pada kondisi anil (*annealed*), dapat mengalami peningkatan kekerasan melalui proses pengerjaan dingin (*cold working*), namun tidak dapat dikeraskan melalui perlakuan panas (*heat treatment*). Pada kondisi anil, AISI 304 memiliki kemampuan pembentukan (*formability*) yang sangat baik sehingga mudah diproses menjadi berbagai bentuk produk. Komposisi utamanya terdiri dari sekitar 18% kromium dan 8% nikel, yang memberikan kombinasi sifat ketahanan korosi dan keuletan yang baik.

Tabel 2. Komposisi kimia AISI 304

Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
Weight%	0.08	2.00	1.00	18.0-20.0	8.0-10.5	0.045	0.03

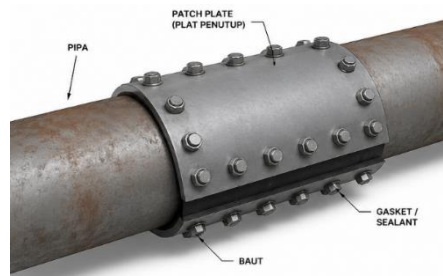
Kandungan kromium berfungsi meningkatkan ketahanan korosi dan oksidasi, sedangkan nikel berperan dalam meningkatkan keuletan (*ductility*) dan ketangguhan (*toughness*) material. Unsur mangan berkontribusi terhadap peningkatan sifat ulet,

sementara silikon membantu meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi pada berbagai kondisi temperatur.

Karena memiliki sifat mekanik dan ketahanan korosi yang baik, AISI 304 banyak digunakan pada berbagai sektor industri, seperti industri kimia, petrokimia, pengolahan makanan dan minuman, farmasi, sistem kriogenik, serta peralatan penukar panas (*heat exchanger*) [14].

9. *Bolted patch plate repair*

Bolted patch plate repair merupakan metode perbaikan kebocoran pada pipa atau tangki dengan memasang pelat penambal pada bagian yang mengalami kerusakan, lalu mengencangkan menggunakan sistem baut dilengkapi *washer* untuk memperoleh distribusi gaya penjepitan yang seragam tanpa melalui proses pengelasan. Metode perbaikan dengan merekatkan pelat penambal (*patch plate debonding*) telah diterapkan pada struktur baja yang mengalami kerusakan akibat korosi [15] .

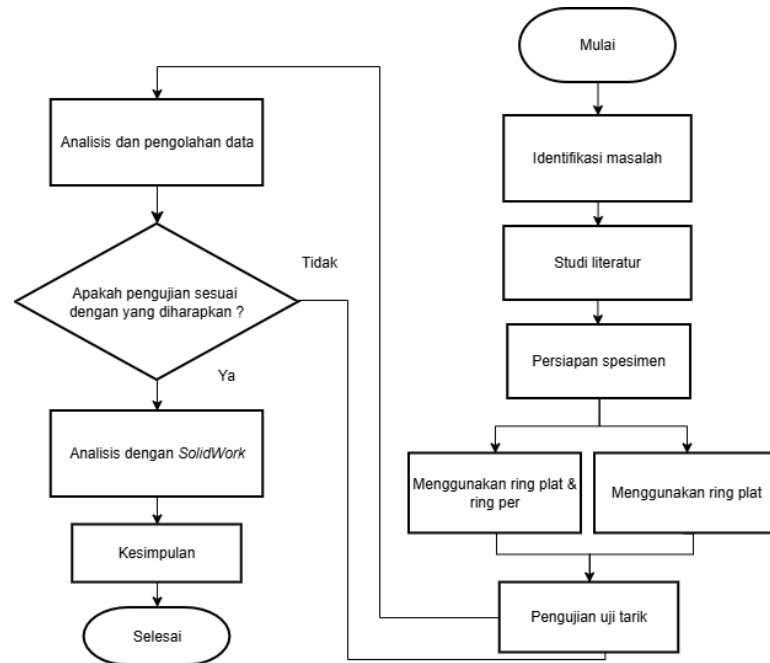


Gambar 9. Skema *bolted patch plate repair*

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Rincian alur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.



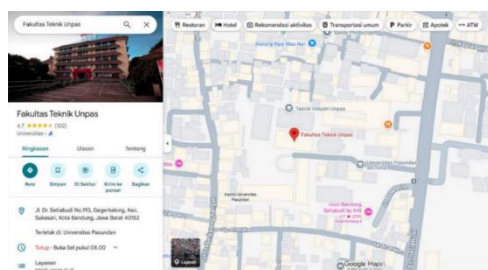
Gambar 10. Alur diagram penelitian

2. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan:

A. Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Pasundan

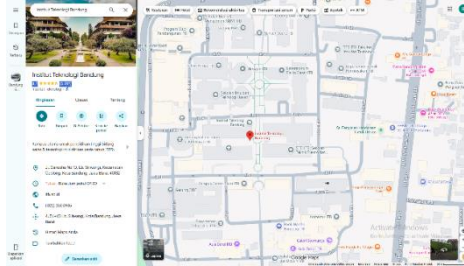
Alamat di Jalan Dr. Setiabudi No. 193, Bandung.



Gambar 11. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Pasundan

B. Laboratorium Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung (ITB)

Alamat di Jalan Jl. Ganesa No.10, Lebak Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat.



Gambar 12. Laboratorium Teknik Mesin Institut Teknologi Bandung (ITB)

3. Perancangan eksperimen

Perancangan eksperimen dilakukan melalui beberapa tahapan. Tahap tersebut mencakup pembuatan spesimen, pengujian uji tarik untuk mengetahui kekuatan geser.

A. Pembuatan spesimen

a. Pemotongan spesimen

Tahap pembuatan spesimen diawali dengan pemotongan material baja karbon rendah berbentuk pelat persegi panjang dengan ketebalan 6 mm dan 12 mm. Pelat tebal 12 mm digunakan sebagai spesimen utama yang mensimulasikan dinding pipa, sedangkan pelat tebal 6 mm digunakan sebagai patch plate.



Gambar 13. Proses pemotongan pelat

b. Drilling

Pada spesimen utama dilakukan proses *drilling* menggunakan mata bor Ø7 mm (M8) dengan kedalaman pengeboran 9 mm (3/4 dari ketebalan pelat) untuk mensimulasikan

cacat atau kebocoran. Setelah proses pengeboran selesai, permukaan spesimen dibersihkan dari geram dan kotoran.



Gambar 14. Proses *drilling* pada pelat

c. *Tapping*

Setelah proses pengeboran selesai, dilakukan proses tapping M8 pada lubang baut yang telah dibuat untuk membentuk ulir dalam sebagai tempat pemasangan baut. Proses *tapping* dilakukan secara hati-hati untuk memastikan ulir yang terbentuk sesuai standar dan mampu menahan gaya penjepitan yang diberikan. Setelah itu, permukaan spesimen dibersihkan dari geram dan kotoran hasil proses permesinan.



Gambar 15. Proses *tapping* pada pelat

d. Pemasangan baut

Pemasangan *patch plate* pada spesimen utama menggunakan baut *stainless steel* AISI 304 ukuran M8 yang dilengkapi dengan ring pelat (*flat washer*) dan ring per (*spring washer*). Pemilihan baut *stainless steel* AISI 304 didasarkan pada sifatnya yang memiliki ketahanan korosi yang baik, kekuatan mekanik yang memadai, serta mampu mempertahankan performa sambungan pada lingkungan yang berpotensi mengalami kelembapan dan

paparan fluida. Ring pelat berfungsi untuk mendistribusikan gaya jepit baut secara merata pada permukaan pelat, sedangkan ring per berfungsi untuk mencegah baut mengendur akibat getaran atau perubahan beban selama pengujian. Seluruh baut kemudian dikencangkan sesuai torsi yang telah ditentukan sehingga diperoleh gaya penjepitan yang seragam pada sambungan *bolted patch plate repair*.



Gambar 16. Pemasangan baut *stainless steel* AISI 304

e. Modifikasi pada spesimen yang akan dilakukan pengujian

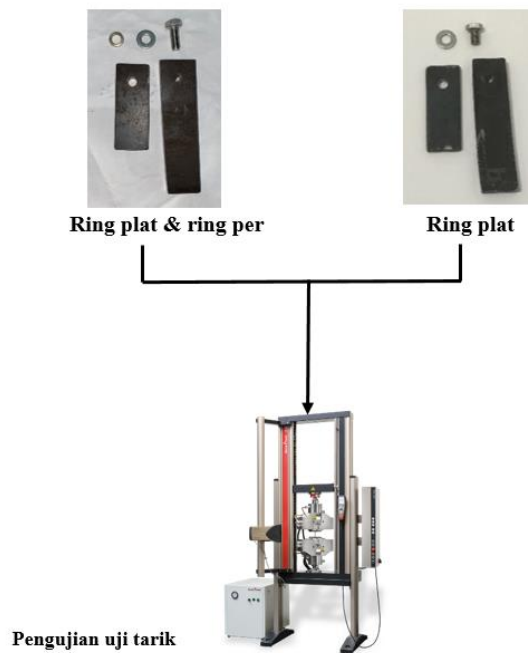
Sebelum dilakukan pengujian uji tarik, spesimen dimodifikasi dengan melakukan penambahan pelat. Pada pelat tebal 12 mm dilakukan penambahan pelat dengan tebal 6 mm, pada pelat tebal 6 mm dilakukan penambahan pelat dengan tebal 12 mm. Penambahan pelat dilakukan menggunakan proses pengelasan SMAW.



Gambar 17. Penambahan pelat

B. Set-Up pengujian

Pengujian ini dilakukan dengan prinsip uji tarik untuk menghasilkan kekuatan tarik, kekuatan luluh, ketangguhan serta keuletan pada baut *stainless steel* AISI 304 (M8) dan pelat baja karbon rendah (tebal pelat 6 mm & 12 mm). Setelah proses perakitan selesai, spesimen dipasang pada mesin *Universal Testing Machine (UTM)* dengan posisi sejajar terhadap arah pembebanan agar gaya tarik yang diberikan bekerja secara aksial pada sambungan baut.



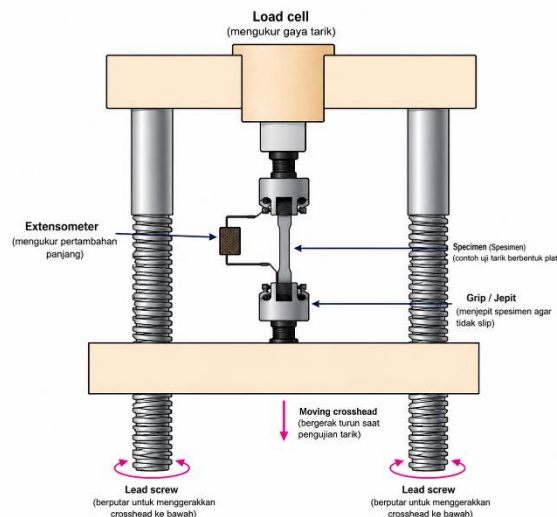
Gambar 18. Set up eksperimen

Selanjutnya, pengujian dilakukan dengan memberikan beban tarik secara bertahap hingga spesimen mengalami kegagalan. Selama proses pengujian, mesin UTM merekam hubungan antara gaya tarik dan perpindahan (*displacement*) secara otomatis. Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik mekanik sambungan, seperti kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), kekuatan luluh (*yield strength*), ketangguhan (*toughness*), dan keuletan (*ductility*). Perbandingan hasil pengujian antara spesimen yang menggunakan ring per dan yang hanya menggunakan ring pelat dilakukan untuk mengetahui pengaruh penggunaan ring per terhadap performa sambungan baut pada pelat baja karbon rendah.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

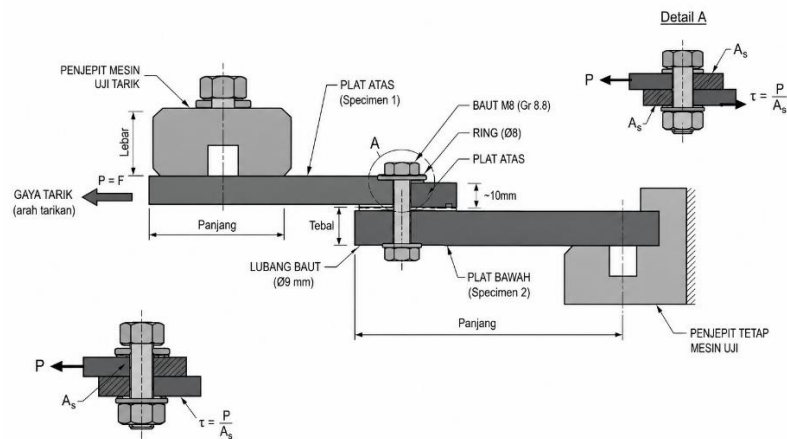
1. Pengujian uji tarik

Uji tarik merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang paling umum digunakan untuk mengetahui karakteristik dan perilaku suatu material ketika dikenai beban tarik. Pengujian dilakukan dengan memberikan gaya tarik secara bertahap dan kontinu pada spesimen yang telah dibuat sesuai standar pengujian hingga material mengalami deformasi atau mencapai kondisi patah. Selama proses pengujian, mesin uji tarik (*Universal Testing Machine/UTM*) akan merekam besarnya gaya yang diberikan dan perubahan panjang spesimen, sehingga dapat diperoleh hubungan antara tegangan dan regangan material. Data yang dihasilkan kemudian digunakan untuk mengevaluasi respons material terhadap pembebanan tarik serta menentukan batas kemampuan material dalam menahan gaya yang bekerja.



Gambar 19. Skematik pengujian uji tarik

Pengujian tarik pada penelitian ini tidak hanya digunakan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan beban tarik, tetapi juga sebagai dasar untuk memperkirakan kemampuan material dalam menahan tegangan geser (*shear stress*). Hal ini karena terdapat hubungan antara sifat mekanik yang diperoleh dari hasil uji tarik, seperti tegangan luluh (*yield strength*) dan kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*), dengan kekuatan geser material. Oleh sebab itu, data hasil pengujian tarik dapat digunakan sebagai parameter dalam analisis kekuatan sambungan pada sistem *bolted patch plate repair*.



Gambar 20. Skematik pengujian geser *bolted patch plate repair*

Pada metode *bolted patch plate repair*, tekanan internal fluida di dalam pipa menghasilkan gaya yang cenderung mendorong atau melepaskan pelat penambal (*patch plate*) dari permukaan pipa. Gaya tersebut ditahan oleh baut-baut pengikat yang menghubungkan pelat penambal dengan struktur perbaikan, sehingga baut mengalami pembebanan berupa tegangan geser. Oleh karena itu, karakteristik mekanik material yang diperoleh melalui pengujian tarik menjadi dasar dalam menentukan kemampuan baut dan pelat penambal dalam menahan beban yang bekerja. Analisis ini diperlukan untuk memastikan bahwa desain sambungan memiliki kekuatan yang memadai dan mampu beroperasi dengan aman pada kondisi tekanan kerja pipa yang direncanakan.

A. Percobaan menggunakan ring pelat (*flat washer*) dan ring per (*spring washer*)



Gambar 21. Percobaan dengan menggunakan ring pelat (*flat washer*) dan ring per (*spring washer*) Benda uji yang digunakan pada pengujian tarik berupa sambungan *bolted patch plate* yang terdiri dari pelat utama baja karbon dengan ketebalan 12 mm dan pelat penambal (*patch plate*) dengan ketebalan 6 mm. Pelat utama berfungsi sebagai simulasi dinding pipa atau struktur yang mengalami kerusakan, sedangkan pelat 6 mm digunakan sebagai pelat penambal yang dipasang pada permukaan pelat utama untuk merepresentasikan metode

perbaikan kebocoran menggunakan sistem baut. Pemilihan ketebalan 12 mm dan 6 mm didasarkan pada pertimbangan kekuatan struktur serta kemudahan fabrikasi sehingga dapat menggambarkan kondisi aplikasi perbaikan pada industri migas.

Penyambungan kedua pelat dilakukan menggunakan baut M8 berbahan *stainless steel* AISI 304 yang memiliki ketahanan korosi yang baik serta kekuatan mekanik yang memadai untuk aplikasi perbaikan kebocoran. Pada setiap sambungan dipasang ring pelat (*flat washer*) untuk mendistribusikan beban penjepitan baut secara merata pada permukaan pelat sehingga mengurangi konsentrasi tegangan di sekitar lubang baut. Selain itu, digunakan ring per (*spring washer*) yang berfungsi mencegah terjadinya pengenduran baut akibat getaran atau perubahan beban selama pengujian.

Untuk memperoleh gaya penjepitan yang seragam pada seluruh sambungan, setiap baut dikencangkan menggunakan torsi sebesar 20 N.m. Pemberian torsi ini bertujuan menghasilkan gaya pretension pada baut sehingga kontak antara pelat utama dan *patch plate* menjadi lebih rapat, meningkatkan kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik, serta meminimalkan kemungkinan terjadinya pergeseran antarpelat selama pengujian berlangsung.

B. Percobaan menggunakan ring pelat (*flat washer*)



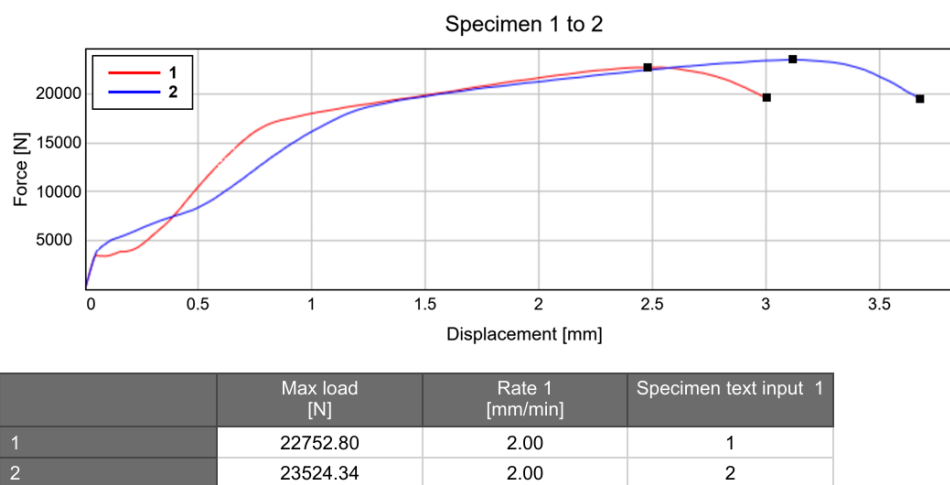
Gambar 22. Percobaan dengan menggunakan ring pelat (*flat washer*)

Pada percobaan kedua, benda uji yang digunakan tetap berupa sambungan *bolted patch plate* yang terdiri dari pelat utama baja karbon tebal 12 mm dan *patch plate* tebal 6 mm. Kedua pelat disambungkan menggunakan baut M8 *stainless steel* AISI 304 dengan tujuan mengevaluasi karakteristik sambungan ketika hanya menggunakan ring pelat (*flat washer*) sebagai komponen pendukung baut.

Ring pelat dipasang di bawah kepala baut untuk memperluas area kontak antara baut dengan permukaan pelat. Penggunaan ring pelat bertujuan mendistribusikan gaya penjepitan secara lebih merata sehingga dapat mengurangi konsentrasi tegangan di sekitar lubang baut dan mencegah kerusakan lokal pada permukaan pelat akibat tekanan baut.

Berbeda dengan percobaan pertama yang menggunakan kombinasi ring pelat dan ring per, pada percobaan ini ring per tidak digunakan. Dengan demikian, gaya penjepitan yang dihasilkan hanya bergantung pada pretension baut akibat pengencangan awal. Seluruh baut dikencangkan menggunakan torsi 20 N.m untuk memperoleh kondisi pemasangan yang seragam pada setiap titik sambungan. Hasil pengujian tarik pada konfigurasi ini kemudian dibandingkan dengan konfigurasi yang menggunakan ring per untuk mengetahui pengaruh penggunaan ring per terhadap kekuatan dan kestabilan sambungan *bolted patch plate*.

2. Grafik hasil pengujian tarik



Gambar 23. Grafik hasil pengujian uji tarik spesimen

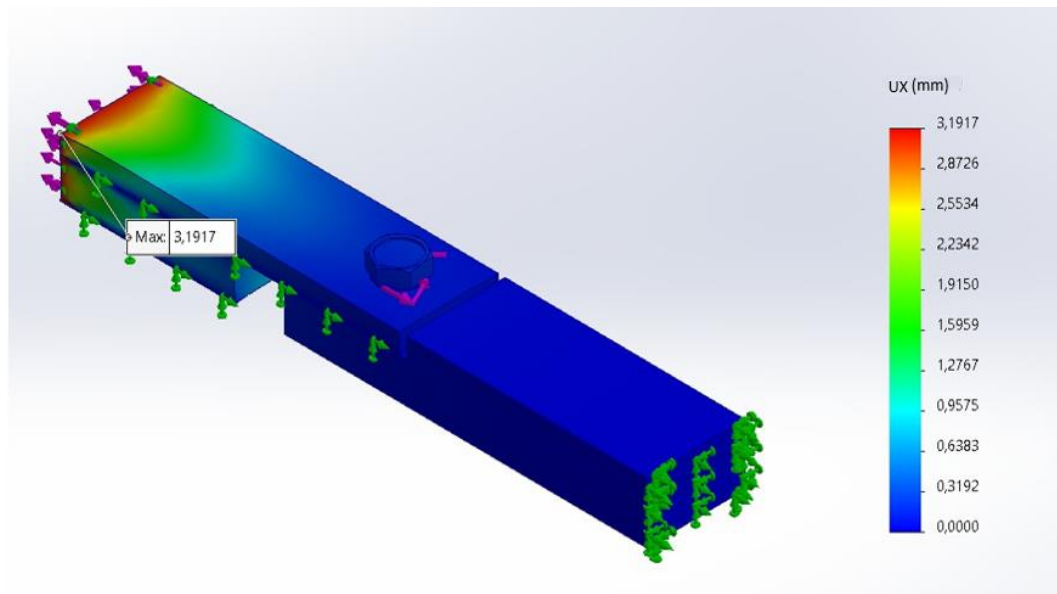
Berdasarkan hasil pengujian tarik yang ditunjukkan pada gambar 23, hubungan antara gaya (*force*) dan perpindahan (*displacement*) pada spesimen 1 dan spesimen 2 menunjukkan karakteristik yang relatif serupa. Pada kedua spesimen, nilai gaya meningkat seiring bertambahnya perpindahan hingga mencapai beban maksimum, kemudian mengalami penurunan yang mengindikasikan terjadinya kerusakan pada sambungan atau kegagalan spesimen.

Spesimen 1 mampu menahan beban maksimum sebesar 22.752,80 N pada perpindahan sekitar 2,5 mm. Setelah mencapai beban maksimum, terjadi penurunan gaya hingga 19.741,10 N pada perpindahan sekitar 3,0 mm. Sementara itu, spesimen 2 menunjukkan nilai beban maksimum yang lebih tinggi, yaitu sebesar 23.524,34 N, yang dicapai pada perpindahan sekitar 3,1 mm. Setelah melewati titik maksimum, gaya yang ditahan spesimen menurun hingga 19.513,57 N pada perpindahan sekitar 3,678 mm.

Perbandingan hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen 2 memiliki kapasitas beban maksimum sekitar 3,39% lebih tinggi dibandingkan spesimen 1. Selain itu, spesimen 2 mampu mengalami perpindahan yang lebih besar sebelum terjadi kegagalan, yang menunjukkan kemampuan deformasi plastis atau tingkat keuletan (*ductility*) yang lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa spesimen 2 memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menyerap energi akibat pembebanan tarik sebelum mengalami kerusakan.

3. Hasil analisis *displacement* pada pelat menggunakan SolidWorks *simulation*

Analisis perpindahan (*displacement*) dilakukan menggunakan SolidWorks *Simulation* untuk mengetahui besarnya deformasi yang terjadi pada struktur akibat pembebanan tarik yang diberikan. Parameter yang dianalisis adalah perpindahan pada sumbu X (UX), karena arah pembebanan bekerja searah dengan sumbu tersebut. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi respons struktur terhadap beban tarik, mengidentifikasi daerah yang mengalami perpindahan maksimum dan minimum, serta menilai kekakuan dan kemampuan struktur dalam menahan deformasi akibat pembebanan.



Gambar 24. Hasil *displacement* pada pelat

Berdasarkan hasil simulasi *displacement* pada sumbu X (UX) menggunakan SolidWorks *Simulation* dengan pembebanan maksimum sebesar 24 kN, diperoleh nilai perpindahan maksimum sebesar 3,1917 mm, sedangkan nilai perpindahan minimum sebesar 0 mm pada area yang mengalami pengekangan (*fixed support*). Distribusi perpindahan divisualisasikan menggunakan kontur warna, di mana warna merah

menunjukkan daerah dengan perpindahan terbesar pada arah sumbu X, sedangkan warna biru menunjukkan daerah dengan perpindahan terkecil. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada bagian spesimen yang menerima beban tarik, sementara daerah yang mengalami pengekangan tidak mengalami perpindahan. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi searah dengan pembebanan tarik masih berada dalam batas yang dapat diterima dan struktur memiliki kekakuan yang baik dalam menahan beban yang diberikan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada bagian ujung spesimen yang menerima beban tarik sebesar 23.524,34 N, sementara perpindahan minimum terjadi pada daerah yang ditahan oleh *fixture*. Pola distribusi perpindahan yang terbentuk menunjukkan peningkatan deformasi secara bertahap dari daerah tumpuan menuju daerah pembebanan, yang menandakan bahwa struktur mengalami deformasi elastis akibat beban yang diberikan.

Nilai perpindahan maksimum sebesar 3,1917 mm pada beban 24 kN menunjukkan bahwa spesimen masih mampu menahan pembebanan tanpa mengalami deformasi yang berlebihan. Selain itu, distribusi perpindahan yang relatif seragam mengindikasikan bahwa struktur memiliki kekakuan yang cukup baik dalam mendistribusikan beban sepanjang spesimen. Hasil ini dapat digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi kinerja struktur serta efektivitas desain dalam menahan beban kerja maksimum yang diberikan.

4. Perhitungan lubang kebocoran yang diizinkan

Berdasarkan referensi yang dikemukakan oleh Yuqi Ding, Pengchao Xu, Ye Lu, Ming Yang, Jiahe Zhang and Kai Liu et al. (2023), diameter lubang kebocoran yang akan diperbaiki perlu memenuhi rasio $d_0/D \leq 0,2$. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan perhitungan diameter maksimum kebocoran yang diizinkan sebagai dasar dalam menentukan apakah kerusakan pada pipa masih dapat diperbaiki menggunakan metode *bolted patch plate repair*.

Pipa yang digunakan dalam penelitian memiliki diameter nominal 24 inch. Dengan konversi 1 inch = 25,4 mm, maka diameter luar pipa diperoleh sebesar:

$$D = 24 \times 25,4 = 609,6$$

Berdasarkan batas rasio diameter kebocoran yang diizinkan, yaitu sebesar 20% dari diameter pipa, maka diameter maksimum lubang kebocoran dihitung sebagai berikut:

$$d_0 = 20\% \times 609,6 = 0,20 \times 609,6 = 121,92 \text{ mm}$$

Sebelum dilakukan perancangan *patch plate* dan penentuan jumlah baut, terlebih dahulu dilakukan perhitungan persentase diameter kebocoran terhadap diameter pipa. Perhitungan ini bertujuan untuk memastikan bahwa diameter kebocoran yang digunakan dalam penelitian, yaitu 60 mm pada pipa berdiameter 24 inch (609,6 mm), masih memenuhi batas yang diizinkan sehingga dapat dijadikan acuan dalam menentukan dimensi *patch plate* dan konfigurasi baut pada metode *bolted patch plate repair*.

Berdasarkan persamaan rasio diameter lubang kebocoran terhadap diameter pipa, diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\frac{d_0}{D} \times 100\% = \frac{60}{609,6} \times 100\% = 9,84\%$$

dimana:

f. d_0 = diameter lubang kebocoran = 60 mm

g. D = diameter luar pipa = 609,6 mm (24 inch)

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa persentase diameter kebocoran sebesar 9,84% dari diameter pipa. Nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum 20% ($d_0/D \leq 0,2$). Oleh karena itu, ukuran kerusakan yang terjadi masih memenuhi kriteria untuk dilakukan perbaikan menggunakan metode *bolted patch plate repair*, sehingga metode tersebut dinilai layak diterapkan pada kondisi kebocoran yang ditinjau dalam penelitian ini.

5. Perhitungan persentase keliling pipa

Keliling luar pipa merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan *bolted patch plate repair*. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan keliling pipa untuk memperoleh dimensi acuan yang digunakan dalam menentukan persentase area kerusakan, ukuran *patch plate*, serta penempatan baut pada proses perancangan.

Pada penelitian ini digunakan pipa berdiameter 24 inch dengan diameter luar 609,6 mm. Berdasarkan dimensi tersebut, dilakukan perhitungan keliling luar pipa sebagai parameter dasar dalam proses perancangan *bolted patch plate repair*. Hasil perhitungan keliling pipa digunakan sebagai acuan dalam menentukan dimensi *patch plate* agar dapat menutupi area kebocoran secara efektif.

Perhitungan keliling luar pipa menggunakan persamaan:

$$C = \pi \times D \tag{1}$$

Dimana:

C = keliling luar pipa (mm)

π = konstanta pi (3,14)

D = diameter luar pipa (mm)

Pipa yang digunakan pada penelitian ini memiliki diameter luar sebesar 609,6 mm (24 inch), sehingga diperoleh:

$$C = 3,14 \times 609,6 = 1.914,14 \text{ mm} \approx 1.915 \text{ mm}$$

6. Perhitungan dimensi *bolted patch plate*

Pada tahap perancangan metode perbaikan menggunakan *bolted patch plate repair*, diperlukan penentuan dimensi *patch plate* dan konfigurasi baut yang sesuai. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan terhadap lebar dan panjang *patch plate*, jumlah baut, serta jarak antar baut untuk memastikan sambungan perbaikan mampu menahan beban kerja secara aman dan memenuhi kriteria desain.

a. Perhitungan lebar *patch plate*

Lebar *patch plate* dihitung menggunakan persamaan:

$$b = 9,84\% \times C \quad (2)$$

$$b = 0,0984 \times 1915 = 188,44 \text{ mm}$$

Nilai tersebut kemudian dibulatkan menjadi 190 mm.

b. Perhitungan panjang *patch plate*

Panjang *patch plate* ditentukan berdasarkan diameter lubang kebocoran dan jarak tepi baut (*edge distance*), dengan persamaan:

$$L = d + e_1 + e_2 \quad (3)$$

Dengan diameter lubang kebocoran sebesar 60 mm dan jarak tepi masing-masing 80 mm, maka diperoleh:

$$L = 60 + 80 + 80 = 220 \text{ mm}$$

Sehingga panjang *patch plate* yang digunakan adalah 220 mm.

d. Perhitungan jumlah baut

Jumlah baut yang dibutuhkan dihitung berdasarkan gaya yang bekerja dan kapasitas satu baut dengan mempertimbangkan faktor keamanan (*safety factor*):

$$n = \frac{SF \times F}{F_b} \quad (4)$$

$$n = \frac{3 \times 23.524}{6029} = 11,71$$

Karena jumlah baut harus berupa bilangan bulat, maka nilai tersebut dibulatkan ke atas menjadi 12 baut.

e. Perhitungan jarak antar baut

Jarak antar baut dihitung untuk memperoleh distribusi beban yang merata pada setiap baut. Persamaan yang digunakan adalah:

$$Pitch = \frac{L - 2e}{n_s - 1} \quad (5)$$

$$Pitch = \frac{220 - 40}{4 - 1}$$

$$Pitch = \frac{180}{3} = 60 \text{ mm}$$

Dengan demikian, jarak antar baut yang digunakan adalah 60 mm.

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh dimensi *patch plate* dengan lebar sebesar 192 mm dan panjang sebesar 220 mm. Selain itu, sambungan memerlukan 12 buah baut dengan jarak antar baut (*pitch*) sebesar 60 mm. Dimensi dan konfigurasi tersebut dipilih agar sambungan perbaikan mampu mendistribusikan beban secara merata serta memberikan tingkat keamanan yang memadai pada metode *bolted patch plate repair*.

7. Hasil analisis *hoop stress* pada pipa

Pada penelitian ini analisis tegangan dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu perhitungan teoritis dan simulasi numerik menggunakan SolidWorks *Simulation*. Perbandingan kedua metode tersebut dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi serta memastikan bahwa model simulasi mampu merepresentasikan kondisi aktual pada pipa yang menerima tekanan internal.

Berdasarkan perhitungan secara teoritis menggunakan persamaan tegangan lingkaran (*hoop stress*):

$$\sigma_h = \sigma_h = \frac{P \times D}{2t} \quad (6)$$

Dimana:

σ_h = tegangan lingkar (*hoop stress*) (MPa)

P = tekanan internal pipa (MPa atau N/mm²)

D = diameter dalam pipa (mm)

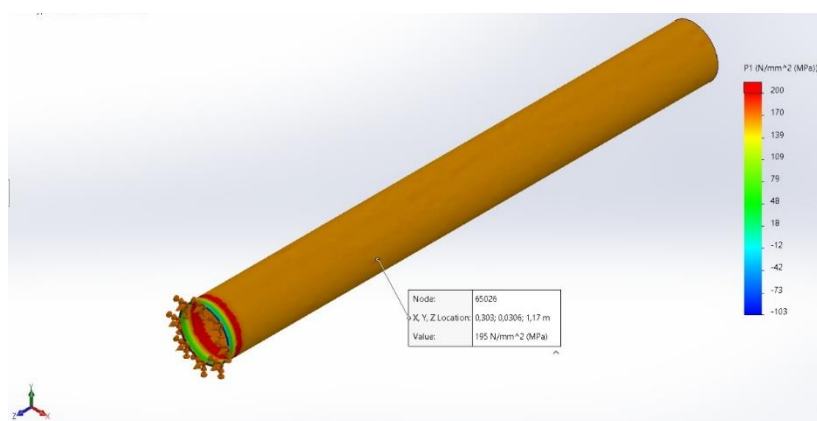
t = ketebalan dinding pipa (mm)

Dengan tekanan internal sebesar 8 MPa, diameter pipa sebesar 585,6 mm, dan ketebalan pipa sebesar 12 mm, diperoleh nilai tegangan lingkar maksimum sebesar:

$$\sigma_h = \frac{8 \times 585,6}{2 \times 12}$$

$$\sigma_h = 195 \text{ MPa}$$

Hasil perhitungan tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*. Berdasarkan hasil simulasi *princhpal stress*, diperoleh distribusi tegangan yang relatif merata pada sebagian besar badan pipa dengan konsentrasi tegangan tertinggi berada pada daerah ujung pipa yang mengalami pengaruh kondisi batas (*boundary condition*). Nilai tegangan maksimum yang diperoleh dari simulasi adalah sebesar 195 MPa, yang ditunjukkan oleh daerah berwarna merah hingga oranye pada model simulasi.



Gambar 25. Hasil *hoop stress* pada pipa

Perbandingan antara hasil perhitungan teoritis dan simulasi menunjukkan bahwa kedua metode menghasilkan nilai tegangan maksimum yang sama, yaitu sebesar 195 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi yang digunakan telah mampu

merepresentasikan kondisi pembebanan dan geometri pipa dengan baik. Selain itu, distribusi tegangan pada bagian tengah pipa yang relatif seragam juga sesuai dengan teori tegangan lingkaran pada bejana tekan tipis, di mana tegangan akibat tekanan internal cenderung terdistribusi merata sepanjang badan pipa.

Dengan demikian, hasil simulasi *SolidWorks* dapat memvalidasi hasil perhitungan manual yang telah dilakukan. Kesesuaian nilai tegangan maksimum antara kedua metode menunjukkan bahwa pendekatan analitis yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang baik dan dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis keamanan struktur pipa. Selanjutnya, nilai tegangan maksimum sebesar 195 MPa dapat digunakan untuk mengevaluasi apakah tegangan yang terjadi masih berada di bawah batas luluh (*yield strength*) material pipa, sehingga tingkat keamanan struktur terhadap tekanan internal dapat ditentukan.

8. Hasil analisis *longitudinal stress* pada pipa

Berdasarkan teori bejana tekan tipis, tekanan internal pada pipa tidak hanya menghasilkan tegangan lingkaran, tetapi juga menghasilkan tegangan longitudinal yang bekerja sepanjang sumbu pipa. Oleh karena itu, dilakukan analisis perbandingan antara hasil perhitungan teoritis dan hasil simulasi *SolidWorks* untuk mengetahui tingkat kesesuaian keduanya.

Berikut analisis tegangan *longitudinal stress* berdasarkan hasil perhitungan teoritis dan hasil simulasi *SolidWorks* pada pipa tekanan internal dihitung menggunakan persamaan:

$$\sigma_l = \frac{P \times D}{4t} \quad (7)$$

Dimana:

σ_l = tegangan longitudinal (*longitudinal stress*) (MPa)

P = tekanan internal pipa (MPa atau N/mm²)

D = diameter dalam pipa (mm)

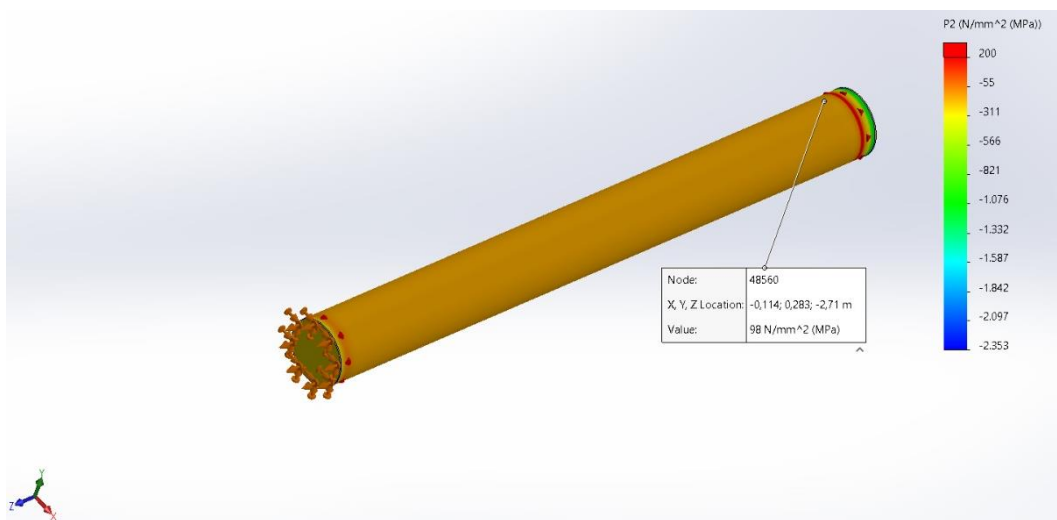
t = ketebalan dinding pipa (mm)

Dengan tekanan internal sebesar 8 MPa, diameter pipa sebesar 585,6 mm, dan ketebalan pipa sebesar 12 mm, diperoleh nilai tegangan lingkaran maksimum sebesar:

$$\sigma_h = \frac{8 \times 585,6}{4 \times 12}$$

$$\sigma_h = 97,6 \text{ MPa}$$

Berdasarkan perhitungan teoritis menggunakan persamaan tegangan longitudinal, diperoleh nilai tegangan aksial sebesar 97,6 MPa atau dibulatkan menjadi 98 MPa. Hasil simulasi SolidWorks menunjukkan nilai tegangan utama kedua (*Princhpal Stress P2*) maksimum sebesar 98 MPa. Distribusi tegangan pada badan pipa terlihat relatif merata dengan konsentrasi tegangan yang lebih tinggi berada di daerah ujung pipa akibat pengaruh kondisi batas (*boundary condition*).



Gambar 26. Hasil *longitudinal stress* pada pipa

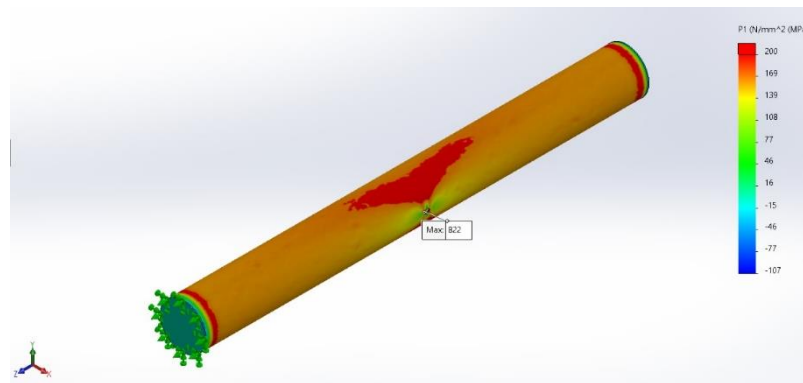
Perbandingan antara hasil perhitungan manual dan simulasi menunjukkan kesesuaian yang sangat baik, dengan perbedaan yang sangat kecil atau mendekati nol. Hal ini menunjukkan bahwa model simulasi yang digunakan telah mampu merepresentasikan kondisi pembebanan secara akurat.

9. Hasil perbandingan analisis *hoop stress* pada kebocoran pipa sebelum dan sesudah penambalan *patch plate*

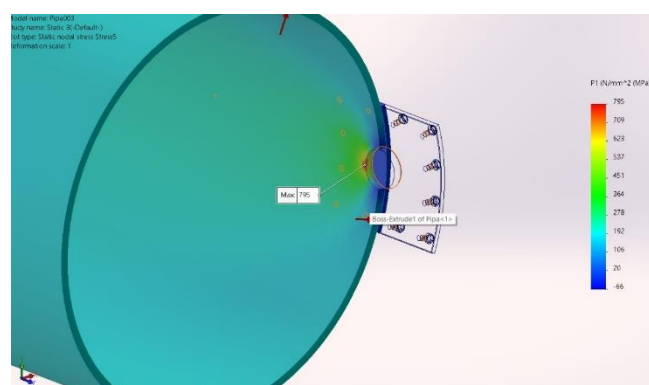
Berdasarkan hasil simulasi *hoop stress* menggunakan SolidWorks *Simulation*, diperoleh perbedaan distribusi dan nilai tegangan antara kondisi pipa yang mengalami kebocoran dengan diameter lubang 60 mm dan kondisi pipa setelah dilakukan penambalan menggunakan metode *bolted patch plate repair*. Tegangan lingkar (*hoop stress*) yang terjadi pada pipa akibat tekanan internal dihitung menggunakan Persamaan $\sigma_h = \frac{P \times D}{2t}$. Dengan tekanan internal sebesar 8 MPa, diameter luar pipa sebesar 585,6 mm, dan

ketebalan dinding pipa sebesar 12 mm, diperoleh nilai hoop stress teoritis sebesar 195 MPa. Nilai tersebut menunjukkan kondisi tegangan pada pipa sebelum mengalami kerusakan, dimana distribusi tegangan masih relatif merata di sepanjang badan pipa karena tidak terdapat cacat maupun diskontinuitas pada dinding pipa.

Pada hasil simulasi, pipa yang mengalami kebocoran dengan diameter lubang 60 mm menghasilkan nilai *hoop stress* maksimum sebesar 822 MPa. Dibandingkan dengan kondisi pipa utuh, terjadi peningkatan tegangan sebesar 321,54%. Peningkatan ini disebabkan oleh adanya lubang kebocoran yang mengurangi luas penampang efektif pipa sehingga distribusi tegangan menjadi tidak merata. Akibatnya, terjadi konsentrasi tegangan (*stress concentration*) pada daerah sekitar tepi lubang, yang menyebabkan nilai tegangan maksimum meningkat secara signifikan dibandingkan kondisi pipa tanpa cacat dapat dilihat pada gambar 27.



Gambar 27. Hasil analisis *hoop stress* pada kebocoran pipa dengan lubang diameter 60 mm



Gambar 28. Hasil analisis *hoop stress* pada kebocoran pipa setelah penambahan *patch plate*

Selanjutnya, setelah dilakukan perbaikan menggunakan metode *bolted patch plate repair*, nilai *hoop stress* maksimum menurun menjadi 795 MPa. Jika dibandingkan dengan kondisi pipa berlubang, terjadi penurunan tegangan sebesar 3,28%, yang menunjukkan

bahwa pemasangan *patch plate* mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada area kebocoran melalui redistribusi beban ke pelat penambal dan baut pengikat.

Setelah dilakukan perbaikan menggunakan metode *patch plate*, hasil simulasi menunjukkan nilai *hoop stress* maksimum sebesar 795 MPa.

Tegangan mengalami penurunan dari:

$$822 \rightarrow 795 \text{ MPa}$$

atau sebesar:

$$\frac{822 - 795}{822} \times 100\% = 3,28\%$$

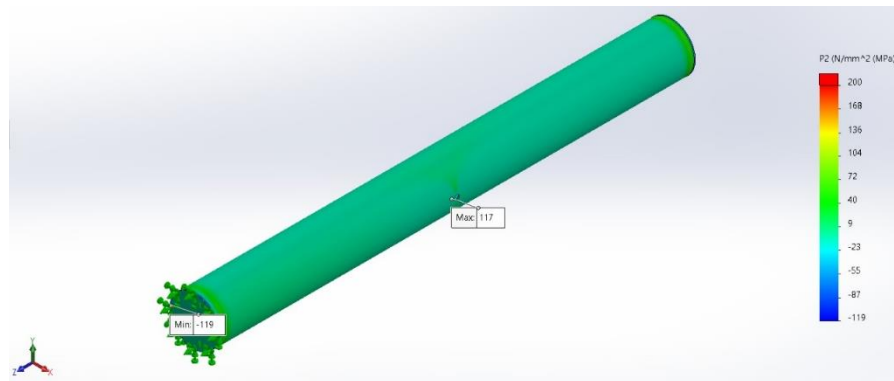
Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *bolted patch plate repair* mampu menurunkan nilai *hoop stress* maksimum pada daerah kebocoran, namun efektivitasnya masih terbatas karena penurunan yang diperoleh relatif kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa dimensi *patch plate*, ketebalan pelat, jumlah baut, dan konfigurasi pemasangan masih memiliki pengaruh yang signifikan terhadap distribusi tegangan pada daerah perbaikan. Oleh karena itu, optimasi desain *patch plate* diperlukan agar distribusi tegangan menjadi lebih merata dan nilai *hoop stress* yang terjadi dapat lebih mendekati kondisi pipa utuh.

10. Hasil perbandingan analisis *longitudinal stress* pada kebocoran pipa sebelum dan sesudah penambalan *patch plate*

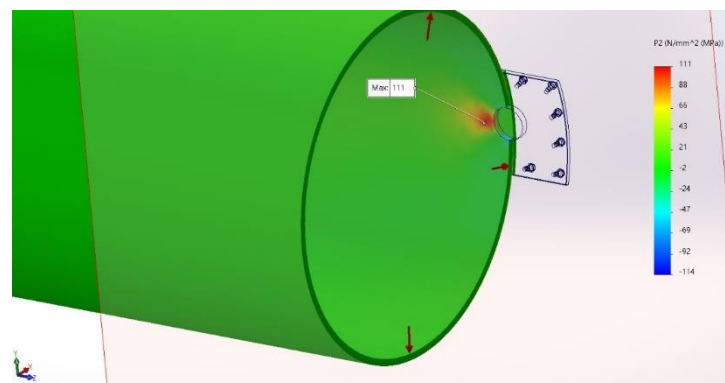
Berdasarkan hasil simulasi *longitudinal stress* (P2) menggunakan SolidWorks Simulation, diperoleh perbedaan distribusi dan nilai tegangan antara kondisi pipa yang mengalami kebocoran dengan diameter lubang 60 mm dan kondisi pipa setelah dilakukan penambalan menggunakan metode *bolted patch plate repair*, tegangan longitudinal yang terjadi pada pipa akibat tekanan internal dapat dihitung menggunakan Persamaan $\sigma_l = \frac{P \times D}{4t}$. Dengan tekanan internal sebesar 8 MPa, diameter luar pipa sebesar 585,6 mm, dan ketebalan dinding pipa sebesar 12 mm, diperoleh nilai tegangan longitudinal teoritis sebesar 97,6 MPa atau dibulatkan menjadi 98 MPa. Nilai ini menunjukkan kondisi tegangan pada pipa sebelum mengalami kerusakan, dimana distribusi tegangan masih relatif seragam di sepanjang badan pipa.

Pada kondisi setelah pipa mengalami kebocoran dengan diameter lubang sebesar 60 mm, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *longitudinal stress* maksimum meningkat menjadi 117 MPa. Peningkatan tegangan ini disebabkan oleh berkurangnya luas

penampang efektif akibat adanya lubang kebocoran sehingga terjadi redistribusi tegangan pada daerah sekitar cacat. Selain itu, muncul konsentrasi tegangan (*stress concentration*) di sekitar tepi lubang yang menyebabkan kenaikan tegangan lokal. Meskipun demikian, peningkatan tegangan longitudinal tidak sebesar peningkatan tegangan lingkaran (*hoop stress*), karena secara teoritis tegangan longitudinal hanya bernilai sekitar setengah dari tegangan lingkaran pada bejana tekan tipis dapat dilihat pada gambar 29.



Gambar 29. Hasil analisis *longitudinal stress* pada kebocoran pipa dengan lubang diameter 60 mm



Gambar 30. Hasil analisis *longitudinal stress* pada kebocoran pipa setelah penambalan *patch plate*

Selanjutnya, setelah dilakukan perbaikan menggunakan metode *patch plate*, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai longitudinal stress maksimum menurun menjadi 111 MPa. Penurunan nilai tegangan ini menunjukkan bahwa *patch plate* telah mampu mendistribusikan sebagian beban yang sebelumnya terpusat pada daerah kebocoran, sehingga konsentrasi tegangan disekitar lubang dapat dikurangi. Akan tetapi, nilai tegangan setelah penambalan masih lebih tinggi dibandingkan kondisi pipa utuh, yaitu sebesar 98 MPa. Hal ini disebabkan oleh adanya diskontinuitas geometri akibat pemasangan *patch plate* dan sambungan baut, yang masih menimbulkan konsentrasi tegangan lokal pada area sekitar perbaikan.

Setelah dilakukan perbaikan menggunakan metode *patch plate*, hasil simulasi menunjukkan nilai *longitudinal stress* maksimum sebesar 111 MPa.

Tegangan mengalami penurunan dari:

$$117 \rightarrow 111 \text{ MPa}$$

atau sebesar:

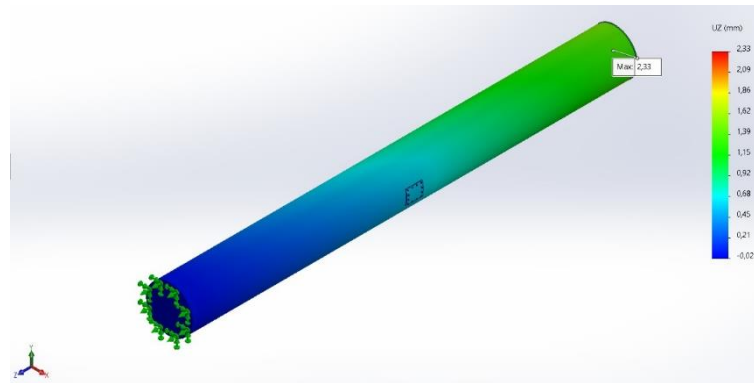
$$\frac{117 - 111}{117} \times 100\% = 5,13\%$$

Secara keseluruhan, hasil perhitungan teoritis dan simulasi menunjukkan bahwa metode *patch plate repair* mampu mengurangi nilai longitudinal stress pada daerah kebocoran, hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai *longitudinal stress* maksimum menurun dari 117 MPa pada kondisi pipa berlubang menjadi 111 MPa. Penurunan tegangan ini setara dengan sebesar 5,13%, yang menunjukkan bahwa pemasangan *patch plate* mampu mengurangi konsentrasi tegangan yang terjadi di sekitar area kebocoran.

11. Hasil analisis *displacement* sumbu X pada pipa menggunakan SolidWorks

Analisis perpindahan (*displacement analysis*) dilakukan menggunakan SolidWorks *Simulation* untuk mengevaluasi besarnya deformasi yang terjadi pada pipa akibat pembebanan dan kondisi batas yang diberikan. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik deformasi pada struktur pipa, mengidentifikasi lokasi perpindahan maksimum dan minimum, serta mengevaluasi pengaruh penambalan *patch plate* terhadap kekakuan dan respons mekanis pipa. Model yang dianalisis memiliki spesifikasi berupa pipa dengan panjang 6000 mm, diameter luar 24 inch, ketebalan pipa 12 mm, ketebalan pelat tambalan 6 mm, jumlah baut 8 buah, serta jarak antar baut 60 mm. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi distribusi perpindahan yang terjadi pada pipa dan efektivitas sistem sambungan baut dalam menahan deformasi akibat pembebanan.

Berdasarkan hasil simulasi *displacement* pada sumbu X (UX) menggunakan SolidWorks *Simulation*, diperoleh distribusi perpindahan yang menunjukkan perubahan posisi pipa akibat pembebanan tekanan internal sebesar 8 MPa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perpindahan maksimum terjadi pada ujung pipa yang tidak diberikan *fixed support*, sedangkan perpindahan minimum berada pada ujung pipa yang diberikan kondisi batas (*fixed support*). Distribusi perpindahan ditunjukkan oleh gradasi warna dari biru hingga hijau, di mana warna biru menunjukkan perpindahan yang sangat kecil, sedangkan warna hijau menunjukkan perpindahan yang lebih besar dapat dilihat pada gambar 31.



Gambar 31. Hasil *displacement* sumbu UX pada pipa

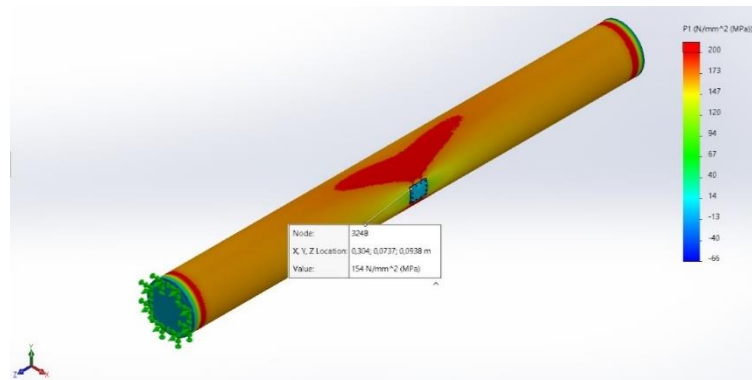
Nilai *displacement* maksimum pada sumbu X (UX) yang diperoleh dari hasil simulasi adalah sebesar 2,33 mm, sebagaimana ditunjukkan pada ujung bebas pipa. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan internal menyebabkan pipa mengalami perpindahan ke arah sumbu X, namun deformasi yang terjadi masih relatif kecil dibandingkan dengan panjang keseluruhan pipa. Perubahan perpindahan berlangsung secara bertahap dari daerah tumpuan menuju ujung bebas, sehingga menunjukkan bahwa model memiliki distribusi deformasi yang kontinu tanpa terjadi perubahan bentuk yang bersifat lokal secara berlebihan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi *displacement* sumbu X (UX) menunjukkan bahwa perpindahan yang terjadi masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk kondisi pembebanan tekanan internal sebesar 8 MPa. Distribusi perpindahan yang berlangsung secara bertahap dari daerah yang diberikan *fixed support* menuju ujung bebas menunjukkan bahwa model simulasi mampu merepresentasikan perilaku deformasi pipa secara realistis. Nilai perpindahan maksimum sebesar 2,33 mm yang terjadi pada ujung bebas mengindikasikan bahwa deformasi struktur masih relatif kecil dan tidak menyebabkan perubahan bentuk yang signifikan. Nilai perpindahan tersebut selanjutnya dapat digunakan sebagai parameter dalam mengevaluasi kekakuan (*stiffness*) struktur pipa serta sebagai acuan untuk menilai efektivitas metode *bolted patch plate repair* dalam mempertahankan stabilitas struktur pipa yang mengalami kebocoran akibat tekanan internal.

12. Hasil analisis pada baut

Berdasarkan hasil simulasi SolidWorks *Simulation*, distribusi tegangan pada baut menunjukkan bahwa beban akibat tekanan internal pipa ditransfer dari dinding pipa menuju *patch plate* melalui sambungan baut. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa tegangan pada baut tidak terdistribusi secara merata, melainkan terkonsentrasi pada baut yang berada di

sekitar daerah kebocoran. Hal ini disebabkan oleh baut tersebut menerima beban yang lebih besar sebagai akibat adanya konsentrasi tegangan pada area cacat.

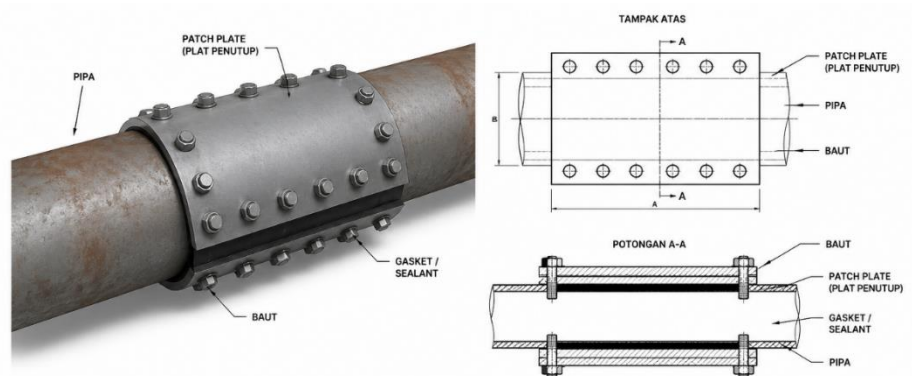


Gambar 32. Hasil analisis pada baut

Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada baut dan *patch plate* berlangsung relatif merata, sedangkan konsentrasi tegangan cenderung terlokalisasi pada daerah kontak antara *patch plate* dan permukaan pipa di sekitar lubang kebocoran. Kondisi ini mengindikasikan bahwa beban akibat tekanan internal tidak diterima secara langsung oleh baut, melainkan terlebih dahulu disebarkan melalui *patch plate* sebelum diteruskan ke baut sebagai elemen pengikat. Mekanisme distribusi beban tersebut menyebabkan *patch plate* berfungsi sebagai komponen utama dalam menahan tekanan internal dan mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kerusakan, sedangkan baut berperan mempertahankan gaya jepit (*clamping force*) agar *patch plate* tetap melekat dengan baik pada permukaan pipa. Dengan gaya jepit yang memadai, tekanan kontak antara *patch plate* dan pipa dapat dipertahankan sehingga potensi terjadinya kebocoran kembali dapat diminimalkan dan integritas sambungan perbaikan tetap terjaga selama kondisi pembebanan.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa baut mampu menahan beban yang ditransfer dari pipa menuju *patch plate* tanpa mengalami konsentrasi tegangan yang melebihi kemampuan material. Dengan material baut *Stainless steel* AISI 304, yang memiliki tegangan luluh (*yield strength*) sekitar 215 MPa, nilai tegangan maksimum hasil simulasi sebesar 154 MPa masih berada di bawah batas luluh material. Hal ini menunjukkan bahwa baut masih bekerja pada daerah elastis sehingga tidak mengalami deformasi permanen dan masih mampu mempertahankan fungsi sambungan selama kondisi pembebanan yang diberikan.

13. Skematik dari hasil penelitian *bolted patch plate repair*



Gambar 33. Skematik dari hasil penelitian *bolted patch plate repair*

Gambar 33 menunjukkan skematik penerapan metode *bolted patch plate repair* pada pipa yang mengalami kebocoran. Metode ini dilakukan dengan memasang *patch plate* atau pelat penutup pada bagian luar pipa yang mengalami kebocoran. Pelat penutup dirancang mengikuti bentuk permukaan pipa sehingga dapat menutup area kebocoran secara efektif.

Pada sistem ini, *patch plate* dikencangkan menggunakan sejumlah baut yang dipasang secara simetris di sepanjang sisi pelat. Di antara permukaan pipa dan *patch plate* dipasang lapisan gasket atau *sealant* yang berfungsi sebagai media penyekat untuk mencegah fluida keluar melalui celah sambungan. Ketika baut dikencangkan, gaya penjepit (*clamping force*) yang dihasilkan akan menekan *patch plate* dan gasket ke permukaan pipa sehingga terbentuk sambungan yang rapat dan kedap terhadap kebocoran.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan teoritis, pengujian tarik baut, dan simulasi menggunakan SolidWorks *Simulation*, dapat disimpulkan bahwa perhitungan teoritis pada kondisi pipa utuh menghasilkan nilai *hoop stress* sebesar 195 MPa dan *longitudinal stress* sebesar 98 MPa. Nilai tersebut menunjukkan kesesuaian dengan hasil simulasi sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis struktur pipa. Pada kondisi pipa mengalami kebocoran dengan diameter lubang 60 mm, terjadi peningkatan tegangan yang signifikan, yaitu *hoop stress* meningkat menjadi 822 MPa dan *longitudinal stress* menjadi 117 MPa akibat adanya konsentrasi tegangan di sekitar area kebocoran. Penerapan metode *bolting patch plate repair* mampu memperbaiki distribusi tegangan dengan menurunkan nilai *hoop stress* dari 822 MPa menjadi 795 MPa serta *longitudinal stress* dari 117 MPa menjadi 111 MPa, sehingga menunjukkan efektivitas metode tersebut dalam mengurangi konsentrasi tegangan pada daerah kebocoran.

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa baut M8 *stainless steel* AISI 304 memiliki kapasitas beban maksimum sebesar 24 kN, sehingga memenuhi kebutuhan kekuatan sambungan pada metode *bolting patch plate repair*. Selain itu, hasil analisis pada sambungan baut menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi pada baut adalah sebesar 154 MPa, yang masih berada di bawah tegangan luluh (*yield strength*) material sekitar 215 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa baut masih bekerja pada daerah elastis dan mampu mempertahankan gaya jepit (*clamping force*) untuk menjaga *patch plate* tetap menempel pada permukaan pipa selama kondisi pembebanan. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa deformasi (*displacement*) setelah penambalan masih berada dalam batas yang diizinkan, sehingga metode *bolting patch plate repair* dapat meningkatkan integritas struktur pipa dan layak diterapkan sebagai alternatif perbaikan kebocoran pipa minyak tanpa memerlukan proses pengelasan.

2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

- a. Melakukan analisis dengan variasi ukuran lubang kebocoran, ketebalan *patch plate*, dan jumlah serta diameter baut untuk memperoleh desain perbaikan yang lebih optimal,

- b. Menggunakan material *patch plate* dan baut yang berbeda untuk membandingkan pengaruh sifat mekanik terhadap distribusi tegangan dan umur sambungan,
- c. Melakukan simulasi dengan mempertimbangkan beban dinamis, temperatur, dan tekanan yang bervariasi agar mendekati kondisi operasi sebenarnya,
- d. Melakukan pengujian eksperimental sebagai validasi terhadap hasil simulasi numerik sehingga diperoleh tingkat akurasi yang lebih tinggi,
- e. Melakukan analisis *fatigue* (kelelahan) dan umur pakai sambungan untuk mengetahui kinerja *bolted patch plate repair* dalam penggunaan jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. M. dan H. D. Ariesyady, “Identifikasi bahaya dan analisis risiko pada jaringan pipa transmisi *crude oil* di perusahaan migas,” *J. Tek. Lingkung. Vol. 24 Nomor 2*, vol. 24, pp. 1–14, 2018, [Online]. Available: <https://www.envengjournal.com/index.php/jtl/article/view/216/143>
- [2] N. V. D. Desi Hardianti, Bernardinus Herbudiman, “Studi eksperimental batang tarik sambungan baut pada pelat baja,” 2018, [Online]. Available: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/2451>
- [3] W. Dewobroto and H. Wijaya, “Pengaruh pemakaian baut mutu tinggi dan baut biasa terhadap kinerja sistem sambungan dengan ring khusus beralur,” *J. Tek. Sipil*, vol. 19, no. 2, p. 123, 2009, doi: 10.5614/jts.2012.19.2.4, [Online]. Available: <https://www.neliti.com/id/publications/143741/pengaruh-pemakaian-baut-mutu-tinggi-dan-baut-biasa-terhadap-kinerja-sistem-sambu>
- [4] A. Sentana, “Pengujian mekanik sambungan las pada pelat sa 240 gr 304l dengan menggunakan standar uji *asme section IX*,” *Universitas Pasundan, Bandung. J. Infomatek*, vol. 6, no. 2, 2004, [Online]. Available: <https://repository.unpas.ac.id/29174/>
- [5] D. S. Sulendra, “Konfigurasi seri paralel *flange* pipa menggunakan *reliability* blok diagram pada PT. Pertamina (Persero) Tbbm Pontianak,” *Jur. Tek. Mesin, Fakultas Tek. Univ. Tanjungpura*, pp. 65–69, 2019, [Online]. Available: <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/jtinUNTAN/article/viewFile/36166/75676583221>
- [6] B. P. W. Suparman and A. A. Patty, “Analisa laju korosi pada sambungan elbow pipa minyak di PT. PLN (Persero) ulpltd poka,” *J. Mech. Eng. (JME). Vol . 2 No . 1 April 2024 J. Mech. Eng. (JME).*, vol. 2, no. 1, pp. 73–78, 2024, [Online]. Available: <https://www.ejournal-polnam.ac.id/index.php/JME/article/view/2921>
- [7] A. R. and P. A. Alfven, “Penentuan waktu pemakaian *storage tank* melalui analisa data hasil pengukuran *ultrasonic thickness* pada tangki tep-028 di stasiun pengumpul jemenang PT Pertamina *ep asset 2 field* limau,” *J. Tek. Patra Akad.*, vol. 11, no. 02, pp. 26–33, 2020, [Online]. Available:

<https://scholar.archive.org/work/5h5is3zoz5gq3px2ft5oiuqbyy/access/wayback/https://jurnal.pap.ac.id/index.php/JTPA/article/download/111/88>

- [8] Paisal, “Analisis kekuatan sambungan baut yang searah dan melintang gaya batang,” *J. Mech. Eng. (JME). VOL 01, NO. 01, April 2023*, vol. 01, no. 01, pp. 42–47, 2023, [Online]. Available: <https://www.ejournal-polnam.ac.id/index.php/JME/article/view/1626>
- [9] Andika Syahrial Lazuardi, “Perencanaan sambungan mur dan baut pada gerobak sampah motor,” *Tek. Mesin ITN Malang*, vol. 01, no. 01, pp. 21–26, 2018, [Online]. Available: <https://ejournal.itn.ac.id/spark/article/view/702>
- [10] D. Anggraini, “Mengenal jenis dan material baut dan sekrup,” Monotaro. [Online]. Available: <https://www.monotaro.id/blog/artikel/mengenal-jenis-dan-material-baut-dan-sekrup>
- [11] J. Suryono, A. Putrawirawan, and R. R. Allo, “Studi eksperimental dan analitis kekuatan tarik pada sambungan pelat baja,” *J. Inersia*, vol. 14, no. 1, pp. 33–42, 2022, doi: 10.46964/inersia.v14i1.372, [Online]. Available: <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/119344328/306-libre.pdf>.
- [12] J. H. Bickford, “*Introduction to the design and behavior of bolted joints*,” 2008, [Online]. Available: https://dl.ojocv.gov.et/admin_/book/Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints Fourth Edition By Non Gasketed Joints.pdf
- [13] J. T. Wardoyo, “Metode peningkatan tegangan tarik dan kekerasan pada baja karbon rendah melalui baja fasa ganda,” *Teknoin*, vol. 10, no. 3, pp. 237–248, doi: 10.20885/teknoin.vol10.iss3.art6, [Online]. Available:
- [14] M. Fawaid, R. Ismail, Jamari, and S. Nugroho, “Karakteristik AISI 304 sebagai material *friction welding*,” *Jur. Tek. Mesin Univ. Diponegoro Email*, vol. 3, pp. 29–33, 2012[online]. Available: <https://www.neliti.com/publications/176556/karakteristik-aisi-304-sebagai-material-friction-welding>.
- [15] T. ishikaw. T.iked a &, “*Patch plate repair method for steel structures combining adhesives and stud bolts*,” *Int. J. steel Struct.*, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13296-018-0149-0>

LAMPIRAN

1. Jadwal kegiatan

No	Kegiatan	WAKTU KEGIATAN																			
		2026																			
		Januari				Februari				Maret				April				Mei			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1.	Pengajuan Judul																				
2.	Identifikasi Masalah																				
3.	Studi Literatur																				
4.	Seminar Usulan Proposal																				
5.	Pembuatan alat																				
6.	Pengujian uji tarik																				
7.	Pengolahan Data																				
8.	Penulisan Skripsi																				
9.	Seminar Tugas Akhir																				
10.	Sidang Tugas Akhir																				

2. Anggaran biaya

No	Alat dan bahan	Volume	Satuan	Unit cost (Rp)	Jumlah
1	Material baja karbon	1	Meter	Rp30.000,00	Rp30.000,00
2	Material pelat baja karbon	2	Buah	Rp42.500,00	Rp85.000,00
3	Baut stainless steel AISI 304	2	Buah	Rp2.000,00	Rp4.000,00
4	Snai M8	1	Buah	Rp60.000,00	Rp60.000,00
5	Tap M8	1	Buah	Rp60.000,00	Rp60.000,00
6	Mata bor M8	1	Buah	Rp20.000,00	Rp20.000,00
7	Mur dan ring	4	Buah	Rp1.500,00	Rp6.000,00
8	Pengujian kekuatan tarik	2	Buah	Rp250.000	Rp500.000
Total biaya					Rp765.000,00

3. Proses pemotongan pelat



4. Proses *drilling* pada pelat



5. Proses *tapping* pada pelat



6. Bentuk spesimen sudah perakitan untuk uji tarik

