

TUGAS AKHIR

Studi Perbandingan *Holding Time* 1 Jam Dan 3 Jam Dengan Proses *Stress Relieving* Terhadap Nilai Kekerasan Pada *Dissimilar Weld* Material API 5L X65 dan ASTM A36

Disusun untuk memenuhi persyaratan mencapai gelar Sarjana Terapan

**Dosen Pembimbing :
Adhe Arysawan, S.Pd., M.Si.
NIK. 119225**



**Disusun oleh:
MUHAMMAD RAHMAT MUHARRAM
4422201018**

**TEKNOLOGI REKAYASA PENGELASAN DAN FABRIKASI
JURUSAN TEKNIK MESIN
POLITEKNIK NEGERI BATAM**

2026

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**STUDI PERBANDINGAN *HOLDING TIME* 1 JAM DAN 3 JAM
DENGAN PROSES *STRESS RELIEVING* TERHADAP NILAI
KEKERASAN PADA *DISSIMILAR WELD* MATERIAL API 5L X65 DAN
ASTM A36**

TUGAS AKHIR

Disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Terapan
pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Batam

Disusun oleh :

**MUHAMMAD RAHMAT MUHARRAM
4422201018**

Telah diterima dan disetujui pada 20 Juli 2026

Penguji I



Hendra Butar Butar, S.Pd., M.T.
NIK. 122254

Penguji II



Tian Hawwini, S.Si., M.A.
NIK. 119231

Dosen Pembimbing I



Adhe Arysyan, S.Pd., M.Si.
NIK. 119225

Mengetahui,

Koordinator Program Studi
Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi



Nurul Laili Arifin, S.S.T., M.T.
NIK. 115139

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama	: Muhammad Rahmat Muharram
NIM	: 4422201018
Tahun terdaftar	: 2026
Program Studi	: Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi
Jurusan	: Teknik Mesin

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

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

Batam, 23 Juni 2026



Muhammad Rahmat Muharram
4422201018

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis haturkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan penelitian ini dapat diselesaikan sebagaimana mestinya. Kiranya tanpa pertolongan-Nya, perjalanan penyusunan tugas akhir ini tidak akan dapat terlaksana dengan baik.

Laporan penelitian ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan kelulusan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Pengelasan dan Fabrikasi. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk mengkaji pengaruh dari PWHT dengan jenis proses *stress relieving* pada material API 5L X65 dan ASTM A36 terhadap penurunan nilai kekerasan dengan metode pengujian *hardness vickers*.

Dalam proses penyusunannya, penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan ini tidak akan terwujud tanpa keterlibatan berbagai pihak yang telah memberikan bantuan, arahan, maupun dukungan moral. Atas segala kebaikan tersebut, penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua dan seluruh keluarga, atas doa yang tak pernah putus serta dukungan yang senantiasa mengiringi setiap langkah penulis.
2. Dosen pembimbing, atas kesabarannya dalam memberikan arahan, koreksi, dan bimbingan yang berarti selama proses penyusunan skripsi ini berlangsung.
3. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan di lingkungan Politeknik Negeri Batam, atas dedikasi dalam mentransfer ilmu dan mendukung proses akademik penulis.
4. Pihak perusahaan beserta seluruh responden, atas keterbukaan dan kesediaan dalam membantu proses pengumpulan data di lapangan.
5. Rekan-rekan seperjuangan serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, atas segala bentuk bantuan dan semangat yang diberikan kepada penulis.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki keterbatasan dan jauh dari kata sempurna. Oleh sebab itu, kritik dan saran yang bersifat edukatif sangat penulis harapkan sebagai bahan perbaikan ke depan. Penulis juga berharap agar karya ini dapat memberikan manfaat yang berarti, memperluas ilmu pengetahuan, serta menjadi salah satu referensi yang berguna bagi para pembaca, khususnya dalam kajian keselamatan kerja pada industri pengelasan dan fabrikasi.

Batam, 19 Juni 2026

Penulis



Muhammad Rahmat Muharram
NIM. 4422201018

ABSTRAK

Pengelasan logam berbeda (*dissimilar welding*) antara API 5L X65 dan ASTM A36 berisiko menimbulkan tegangan sisa yang tinggi dan pengerasan lokal di area *Heat Affected Zone* (HAZ). Jika tidak ditangani, nilai kekerasannya dapat melampaui batas aman standar kualifikasi NACE MR0175 (250 HV). Penelitian kuantitatif eksperimental di PT. P ini bertujuan mengevaluasi pengaruh *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) jenis *stress relieving* pada suhu 600°C - 620°C dengan variasi *holding time* 1 jam dan 3 jam terhadap nilai kekerasan Vickers sambungan las *fillet joint*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa perlakuan panas (Non-PWHT), area HAZ API 5L X65 memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 253 HV (puncak 260 HV), sehingga tidak memenuhi standar keberterimaan. Setelah diterapkan PWHT dengan *holding time* 1 jam, kekerasan HAZ API 5L X65 berhasil diturunkan menjadi 245 HV, namun nilainya masih dianggap kritis karena mendekati batas maksimal standar. Sementara itu, perpanjangan durasi *holding time* menjadi 3 jam memberikan hasil yang jauh lebih optimal, di mana kekerasan HAZ API 5L X65 mereduksi secara optimal hingga mencapai 228 HV. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa *holding time* selama 3 jam merupakan parameter perlakuan panas yang paling efektif dalam menurunkan nilai kekerasan dan menghasilkan distribusi tegangan yang lebih homogen dan memenuhi standar pada pengujian ini.

Kata kunci: *Dissimilar Weld*, API 5L X65, ASTM A36, PWHT, *Stress Relieving*, *Holding Time*, Kekerasan Vickers.

ABSTRACT

Dissimilar metal welding between API 5L X65 and ASTM A36 carries the risk of high residual stresses and local hardening in the Heat-Affected Zone (HAZ). If left unaddressed, the hardness values may exceed the safety limit specified in the NACE MR0175 qualification standard (250 HV). This experimental quantitative study at PT. P aims to evaluate the effect of stress-relief Post-Weld Heat Treatment (PWHT) at 600°C - 620°C, with holding times of 1 hour and 3 hours, on the Vickers hardness values of fillet welds. Test results show that under conditions without heat treatment (Non-PWHT), the HAZ of API 5L X65 had the highest hardness value of 253 HV (peak 260 HV), thus failing to meet the acceptance standard. After applying PWHT with a holding time of 1 hour, the hardness of the API 5L X65 HAZ was successfully reduced to 245 HV; however, this value is still considered critical as it approaches the standard's maximum limit. Meanwhile, extending the holding time to 3 hours yielded far more optimal results, with the hardness of the API 5L X65 HAZ optimally reduced to 228 HV. Thus, it can be concluded that a holding time of 3 hours is the most effective heat treatment parameter for reducing the hardness value and producing a more homogeneous stress distribution that meets the standards in this test.

Keywords: Dissimilar Weld, API 5L X65, ASTM A36, PWHT, Stress Relieving, Holding Time, Hardness Vickers.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	ii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	6
DAFTAR ISI.....	7
DAFTAR TABEL.....	9
DAFTAR GAMBAR.....	10
BAB I PENDAHULUAN	11
1.1. Latar Berlakang.....	11
1.2. Rumusan Masalah	15
1.3. Batasan Masalah/Ruang Lingkup	15
1.4. Tujuan Penelitian.....	16
1.5. Manfaat Penelitian.....	16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	17
2.1. Hasil Penelitian / Perancangan Terdahulu.....	17
2.2. Teori/Konsep dasar	19
2.2.1. Karakteristik Material	19
2.2.2. Pengelasan Logam Berbeda (<i>Dissimilar Weld</i>).....	21
2.2.3. Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>) <i>Stress Relieving</i>	22
2.2.4. Pengujian Kekerasan Metode <i>Vickers</i>	23
BAB III METODOLOGI	24
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	24
3.2 Metode Pengujian	24
3.3 Bahan dan Alat	24
3.4 Prosedur Penelitian	24
3.4.1 Pembuatan Spesimen Uji	24
3.4.2 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	25
3.4.3 <i>Stress Relieving</i>	25
3.4.4 Preparasi Spesimen Uji.....	25
3.4.5 Pengujian Kekerasan (<i>Hardness Vickers</i>).....	26
3.5 Urutan Pelaksanaan Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1 Hasil.....	28
4.1.1 Hasil Nilai Kekerasan Material non PWHT.....	28
4.1.2 Hasil Nilai Kekerasan PWHT <i>Holding Time 1 Jam</i>	29

4.1.3 Hasil Nilai Kerasan PWHT <i>Holding Time</i> 3 Jam	31
4.2 Pembahasan	32
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	35
5.1. Kesimpulan.....	35
5.2. Saran	35
DAFTAR PUSTAKA	37
LAMPIRAN.....	39

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Chemical Composition API 5L X65	20
Tabel 2.2	Tensile Test Properties API 5L X65	20
Tabel 4.1	Hasil Vickers Spesimen Non-PWHT	28
Tabel 4.2	Hasil Vickers Setelah PWHT Holding Time 1 Jam	29
Tabel 4.3	Hasil Vickers Setelah PWHT Holding Time 3 Jam	31
Tabel 4.4	Presentasi penurunan nilai kekerasan secara rata-rata.....	34

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Indentator Berlian Piramida Vickers.....	23
Gambar 3.2 Lokasi Indentasi Hardness.....	26
Gambar 3.3 Diagram Alir (Flowchart).....	27
Gambar 4.1 Titik Lokasi Indentasi Uji Hardness	28
Gambar 4.2 Grafik Nilai Kekerasan Non-PWHT	28
Gambar 4.3 Grafik Nilai Kekerasan PWHT Holding Time 1 Jam	29
Gambar 4.4 Grafik Nilai Kekerasan PWHT Holding Time 3 Jam	31
Gambar 4.5 Gambar grafik dari 3 variasi material uji.....	32
Gambar 4 6 Rumus dalam menghitung persen penurunan nilai kekerasan.....	33

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Industri minyak dan gas bumi atau biasa yang disebut dengan Migas merupakan salah satu sektor dalam bidang industri yang memiliki peran penting dalam perekonomian dunia. Salah satu komponen pendukung dalam industri migas ini adalah sistem infrastruktur perpipaan yang memiliki peran penting sebagai media distribusi fluida bertekanan tinggi. Dalam proses fabrikasi perpipaan ini salah satu metode yang paling sering digunakan dalam penyambungan adalah pengelasan. Proses pengelasan ini tidak hanya menjadi sebuah metode penyambungan saja, tetapi juga sebagai prosedur kritis yang menentukan integritas struktural, keamanan operasional, dan umur layan komponen yang disambung. Standar (ASME B31.3 Process Piping, 2018) menegaskan bahwa sambungan las pada sistem perpipaan proses harus memenuhi persyaratan mekanik dan metalurgi yang ketat, termasuk kontrol atas nilai kekerasan dan tegangan sisa pasca pengelasan. Keberhasilan suatu sambungan las tidak semata diukur dari kekuatan tarik, melainkan juga dari keseragaman distribusi nilai kekerasan, ketahanan terhadap retak, serta kebebasan dari tegangan sisa berlebihan, ketiga parameter yang menjadi jauh lebih kompleks ketika dua material berbeda disatukan dalam satu sambungan.

Baja pipa API 5L grade X65 salah satu material pilihan utama pada jalur pipa bertekanan tinggi karena memiliki kombinasi optimal antara kekuatan luluh dengan nilai minimum 450MPa, ketangguhan fraktur tinggi, dan *weldability* yang memadai untuk kondisi operasi bervariasi. (API-5L-46th, 2018) mengklasifikasikan material ini sebagai baja karbon-mangan dengan pengendalian ketat pada *carbon equivalent* (CE), yang mensyaratkan prosedur pengelasan dan perlakuan pasca las yang presisi agar sifat mekaniknya tidak terdegradasi selama fabrikasi. (Rohmat dkk., 2023) dalam kajiannya terhadap sambungan las pipa API 5L X65 mengonfirmasi bahwa zona terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*) pada material ini sangat rentan terhadap pembentukan martensit yang tidak tertemper apabila laju pendinginan pasca las berlangsung

terlalu cepat, yang berdampak langsung pada lonjakan kekerasan lokal hingga melampaui batas yang dipersyaratkan standar.

Di sisi lain, baja struktural ASTM A36 merupakan material cukup banyak digunakan pada konstruksi *platform* lepas pantai, *support structure*, dan komponen struktural fasilitas migas. Dengan kandungan karbon maksimum 0,26% dan kekuatan luluh minimum 250MPa, baja A36 tergolong baja karbon rendah yang relatif mudah difabrikasi namun memiliki respons termal berbeda dibanding API 5L X65. Hal ini menjadikan kombinasi kedua material dalam satu sambungan las yang dikenal sebagai *dissimilar welding* sebagai tantangan dalam mengontrol kualitas terutama pada struktural penghubung jalur pipa dengan struktur penyangga. (Sasha Aline Gomes dkk., 2026) mengidentifikasi bahwa perbedaan *carbon equivalent* pada API 5L X65 pada saat proses pengelasan menciptakan perilaku termal tidak simetris selama siklus pengelasan, menghasilkan gradasi kekerasan yang cukup jauh perbedaannya di zona antarmuka lapisan yang dapat menjadi titik inisiasi retak.

Pada sambungan *dissimilar*, perbedaan konduktivitas termal, koefisien ekspansi termal, dan komposisi kimia antara kedua material mengakibatkan distribusi panas yang tidak merata selama siklus pengelasan. Transformasi fasa di sisi API 5L X65 dan sisi ASTM A36 tidak berlangsung secara sinkron, sehingga berpotensi membentuk struktur martensit yang tidak merata di HAZ material dengan *carbon equivalent* yang lebih tinggi. (Sasha Aline Gomes dkk., 2026) mendokumentasikan fenomena ini pada sambungan las *dissimilar* yang melibatkan API 5L X65, di mana fluktuasi nilai kekerasan di zona HAZ terbukti menjadi titik lemah struktural yang memicu *cold cracking* maupun kegagalan prematur di bawah beban dinamis. Kondisi ini diperparah oleh terbentuknya tegangan sisa (*residual stress*) yang lebih tinggi dan tidak merata dibandingkan pengelasan material sejenis, yang pada sistem perpipaan migas beroperasi di bawah tekanan internal tinggi dan lingkungan korosif dapat berujung pada *stress corrosion cracking* (SCC) maupun kegagalan fatigue prematur.

Oleh karena itu, penerapan perlakuan panas pasca las atau *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) dalam bentuk *stress relieving* menjadi prosedur yang tidak dapat diabaikan karena telah di atur dalam sebuah standar fabrikasi perpipaan.

ASME B31.3 Process Piping, (2018) mempersyaratkan PWHT untuk sambungan pipa yang melampaui ketebalan dinding tertentu dan pada kondisi layanan tertentu. Proses *stress relieving* pada temperatur 600°C - 620°C mampu mereduksi tegangan sisa secara efisien melalui mekanisme pemulihan dislokasi dan relaksasi plastis, sekaligus menginduksi perubahan mikrostruktur dari martensit keras menuju bainite atau pearlite yang lebih lunak dan ulet. (Yao Ren dkk., 2017) membuktikan bahwa kontrol termal pasca las pada sambungan *dissimilar* pipa API 5L X65 dengan material paduan nikel sangat menentukan kestabilan mikrostruktur zona sambungan dan distribusi kekerasan akhir. (Amri dkk., 2024) lebih lanjut mengonfirmasi bahwa proses *stress relieving* tidak hanya mereduksi tegangan sisa tetapi juga secara simultan memodifikasi distribusi kekerasan di seluruh zona sambungan las.

Holding time dalam proses *stress relieving* memainkan peran penting karena menentukan seberapa lama energi termal dapat mengubah tegangan sisa. Penelitian menunjukkan bahwa waktu penahanan yang lebih lama dapat memberikan waktu cukup bagi proses relaksasi tegangan, serta pertumbuhan butir yang lebih stabil, meskipun juga membawa risiko perubahan sifat mekanik seperti penurunan kekerasan atau kekuatan tarik jika proses ini dilakukan terlalu berlebihan. Sebaliknya, waktu penahanan yang terlalu singkat dapat menyebabkan proses relaksasi tidak maksimal, yang berdampak pada ketidaktercapaian sifat mekanik yang diharapkan (Byeong Choon Goo, 2021). Oleh karena itu, pemilihan waktu penahanan yang optimal menjadi penting, terlebih dalam konteks pengelasan *dissimilar* material seperti yang terjadi pada sambungan antara API 5L X65 dan ASTM A36. Oleh karena itu dalam pengujian ini diperlukan standar yang mengatur dalam penggunaan *holding time* yang sebagaimana tercantum dalam (ASME B31.3 Process Piping, 2018).

Salah satu parameter yang dapat digunakan untuk mengetahui tegangan sisa pada material adalah dengan pengujian kekerasan (*Hardness Vickers*). Nilai kekerasan juga merupakan salah satu parameter mekanik penting dalam menilai kualitas hasil las dan efek dari perlakuan panas pasca las. Kekerasan berhubungan langsung dengan ketahanan material terhadap deformasi plastis, ketangguhan, dan potensi retak akibat beban dinamis. Dalam konteks pengelasan *dissimilar*

material, distribusi kekerasan dapat menunjukkan adanya perubahan fasa mikrostruktur, ketidakmerataan pendinginan, atau bahkan terbentuknya struktur martensit yang rapuh di HAZ. Berdasarkan pengujian kekerasan Vickers pada hasil las *dissimilar*, diketahui bahwa nilai kekerasan cukup jelas antara material logam induk, logam las, dan HAZ (Defi Pramesti & Winarto, 2023). Oleh karena itu, variasi waktu holding dalam proses stress relieving memengaruhi nilai kekerasan menjadi kunci untuk meningkatkan kualitas dan keandalan sambungan.

Variabel utama dalam penelitian ini terdiri dari dua jenis, yaitu variabel bebas berupa waktu holding stress relieving (1 jam dan 3 jam), serta variabel terikat yaitu nilai kekerasan pada hasil pengelasan dissimilar antara API 5L X65 dan ASTM A36. Keduanya berkaitan erat dalam konteks fenomena pengaruh perlakuan panas terhadap struktur mikro logam las, yang selanjutnya berdampak pada sifat mekanik seperti kekerasan. Dalam literatur disebutkan bahwa perubahan waktu holding berbanding lurus dengan proses homogenisasi dan relaksasi tegangan sisa, namun efek terhadap kekerasan tidak selalu linier karena adanya potensi *Grain Growth* atau pertumbuhan struktur butir yang berlebihan (Huda Fathu Rohman dkk., 2014). Maka dari itu, pemilihan holding time yang tepat harus mempertimbangkan keseimbangan antara pengurangan tegangan sisa dan kestabilan sifat mekanik.

Permasalahan utama yang melatar belakangi penelitian ini adalah tingginya risiko cacat struktural pada sambungan las *dissimilar* sebagai contoh pada pengujian antara API 5L X65 dan ASTM A36, terutama jika tidak dilakukan proses stress relieving yang tepat. Berdasarkan data dari pengujian tegangan sisa sebelum dan sesudah PWHT menunjukkan penurunan tegangan sisa pada material sebesar 20-40% tergantung pada holding time. Namun, sebagian besar studi hanya membahas efek suhu PWHT, bukan variasi holding time secara spesifik, terutama pada kombinasi *dissimilar weld* yang berbeda kekuatan tariknya. Tren dari jurnal nasional juga menunjukkan peningkatan minat terhadap optimalisasi PWHT pada material migas, namun data spesifik mengenai efek holding time terhadap kekerasan masih sangat terbatas di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi sangat relevan dan dibutuhkan untuk mengisi kekosongan tersebut.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang maka rumusan masalah yang terdapat pada penelitian ini adalah :

1. Bagaimana nilai kekerasan (*Vickers*) pada sambungan *dissimilar weld* API 5L X65 dan ASTM A36 sebelum dilakukan proses *stress relieving* ?
2. Apakah terdapat pengaruh yang efektif dari variasi *holding time* proses *stress relieving* antara 1 jam dengan 3 jam terhadap nilai kekerasan (*vickers*) pada *dissimilar weld* API 5L X65 dan ASTM A36?
3. Dari ketiga kondisi PWHT yang diterapkan, yaitu non PWHT, PWHT *holding* 1 jam, dan PWHT *holding* 3 jam, kondisi manakah yang lebih efektif dalam menurunkan nilai kekerasan *vickers* ?

1.3. Batasan Masalah/Ruang Lingkup

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak menyimpang dari tujuan yang telah ditetapkan, maka ruang lingkup penelitian dibatasi pada beberapa hal berikut:

1. Ruang lingkup pada pengujian ini berfokus pada pengujian kekerasan material pada API 5L x65 dan ASTM A36 sebelum dan pasca dilakukan PWHT *stress relieving*, dan tidak berfokus pada variabel pengelasan.
2. Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) jenis *stress relieving* dengan temperatur yang sama antara (600°C - 620°C), dengan variasi *holding time* 1 jam & 3 jam.
3. Pendinginan setelah proses PWHT dilakukan secara pendinginan di dalam furnace dan tidak dilakukan variasi metode pendinginan.
4. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini terbatas pada:
 - Pengujian kekerasan *Vickers* (HV).
 - Analisa perbandingan antara nilai kekerasan sebelum dan sesudah PWHT (1 jam dan 3 jam).
5. Penelitian ini tidak membahas:
 - Analisis mikrostruktur secara detail seperti *ferrite count*.
 - *Tensile test*, *impact test*, atau *fatigue test*.
 - Analisis komposisi kimia lanjutan.

1.4. Tujuan Penelitian

Berikut beberapa tujuan yang dilakukan pada pengujian ini antara lain adalah:

1. Mengetahui nilai kekerasan (*Vickers*) pada sambungan *dissimilar weld* API 5L X65 dan ASTM A36 sebelum dilakukan proses *stress relieving*.
2. Mengetahui pengaruh dari variasi *holding time* proses *stress relieving* antara 1 jam dengan 3 jam terhadap nilai kekerasan (*vickers*) pada *dissimilar weld* API 5L X65 dan ASTM A36.
3. Mengetahui kondisi manakah yang lebih efektif dalam menurunkan nilai kekerasan *vickers* dari ketiga kondisi PWHT yang diterapkan, yaitu non PWHT, PWHT *holding* 1 jam, dan PWHT *holding* 3 jam.

1.5. Manfaat Penelitian

1. Memberikan informasi studi mengenai pengaruh dari nilai kekerasan *vickers* pada material API 5L X65 dan ASTM A36 sebelum dilakukan PWHT dan sesudah dilakukan PWHT.
2. Memberikan informasi studi mengenai pengaruh dari variasi PWHT 1 jam dengan 3 Jam terhadap nilai kekerasan *vickers* pada material API 5L X65 dan ASTM A36.
3. Bagi peneliti, semoga dengan penelitian ini dapat diharapkan bisa menambah wawasan tentang PWHT *stress relieving* yang dapat diimplementasi pada dunia industri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Hasil Penelitian / Perancangan Terdahulu

Pengembangan dalam industri fabrikasi dan kontruksi migas, khususnya pada pengaplikasian pengelasan logam dissimilar, tidak dapat dilepaskan dari kajian penelitian-penelitian terdahulu yang menjadi dasar penelitian. Pada hal penelitian ini aspek tertuju pada studi pengaruh variasi *holding time* dalam proses *stress relieving* terhadap nilai kekerasan sambungan las antara dua jenis baja yang berbeda, yakni API 5L X65 dan ASTM A36. Oleh karena itu, untuk membangun argumen yang kokoh, perlu dilakukan peninjauan secara mendalam terhadap literatur yang telah ada, terutama yang membahas aspek perlakuan panas pasca las, dan perubahan sifat mekanik akibat pengelasan pada material dissimilar. Tinjauan ini bukan sekadar menyajikan ringkasan objektif, melainkan juga menganalisis kontribusi, keterbatasan, serta relevansi masing-masing studi terhadap arah dan ruang lingkup penelitian yang dilakukan saat ini.

Penelitian yang dilakukan oleh (Pangesti, 2017) dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember merupakan salah satu referensi paling relevan yang mengkaji efek perlakuan panas pasca pengelasan pada baja API 5L X65. Fokus utamanya adalah menganalisis reduksi tegangan sisa menggunakan pendekatan metode elemen hingga (*finite element method*) pada struktur tubular tipe-T. Hasilnya menunjukkan bahwa proses PWHT mampu menurunkan tegangan sisa sebesar 20-30% bergantung pada kondisi termal yang diterapkan. Meskipun demikian, penelitian ini tidak memberikan perhatian khusus terhadap variabel *holding time* maupun pengaruhnya terhadap kekerasan, padahal kekerasan merupakan parameter penting dalam menentukan ketahanan aus dan potensi retak material pada aplikasi struktural. Dengan demikian, penelitian Pangesti memberikan dasar penting bahwa PWHT berdampak efektif terhadap penurunan nilai kekerasan, namun belum secara holistik mengeksplorasi dimensi kekerasan dan waktu penahanan sebagai variabel kritis.

Dalam konteks dissimilar welding yang melibatkan API 5L X65, studi oleh (Defi Pramesti & Winarto, 2023) dari Jurnal Mesin Nusantara memberikan

kontribusi berarti melalui kajian terhadap perubahan sifat mekanik akibat proses *welding repair* pada sambungan antara API 5L X65 dan material clad UNS N08825. Mereka menemukan bahwa ketidakseragaman dalam siklus termal selama pengelasan menyebabkan fluktuasi nilai kekerasan yang tinggi di zona HAZ, yang berpotensi menjadi titik lemah struktural. Studi ini memberikan gambaran jelas bahwa kekerasan dipengaruhi oleh perubahan mikrostruktur akibat panas las, namun belum mengaitkan fenomena tersebut dengan perlakuan *stress relieving*. Penelitian ini memperkuat argumen bahwa pemahaman terhadap interaksi antara thermal cycle dan sifat mekanik masih perlu didalami, khususnya dalam konteks variasi waktu holding pada proses *post weld heat treatment*.

Referensi paling fundamental untuk mendalami karakteristik material baja karbon, terutama ASTM A36, adalah Carbon Steel Handbook yang diterbitkan oleh *Electric Power Research Institute* karya (Gandy, 2007). Laporan ini menyajikan tinjauan komprehensif mengenai pengaruh kandungan karbon terhadap kekerasan, kekuatan tarik, dan sifat keuletan (*ductility*) baja karbon. Disebutkan bahwa variasi sekecil apapun dalam kadar karbon dapat menghasilkan perubahan yang cukup berpengaruh dalam kekerasan dan kekuatan, terutama jika dikombinasikan dengan perlakuan panas seperti *stress relieving* dan pendinginan terkendali. Handbook ini juga menegaskan bahwa perlakuan panas memengaruhi formasi struktur mikro seperti *pearlite*, *bainite*, atau bahkan *martensite*, yang secara langsung menentukan nilai kekerasan pada material. Informasi ini menjadi sangat krusial dalam konteks penelitian ini, karena membangun argumen bahwa proses *stress relieving* bukan hanya mereduksi tegangan sisa, tetapi juga memiliki implikasi metalurgi yang mendalam terhadap sifat kekerasan lokal material.

Selain itu, (Amri dkk., 2024) mengembangkan metode pengelasan girth pipe dissimilar menggunakan pipa API 5L X65 berlapis Alloy 625. Penelitian mereka membahas pentingnya pemilihan kombinasi filler dan perlakuan panas lanjut untuk menghasilkan struktur mikro yang stabil dan tahan terhadap korosi internal pada tekanan tinggi. Meski konteks aplikasinya berbeda, temuan ini menekankan bahwa keberhasilan sambungan dissimilar sangat bergantung pada kontrol panas dan rekayasa struktur mikro, tema utama yang juga diangkat dalam penelitian ini. Namun, studi ini tidak mendalami parameter waktu penahanan

secara kuantitatif, sehingga kontribusi penelitian ini menjadi pelengkap penting dalam memahami hubungan antara holding time dan kekerasan.

Terakhir, (Darmayanti dan Rizal, 2020) melakukan penelitian terhadap efek PWHT terhadap kekerasan baja karbon hasil pengelasan SMAW. Mereka menemukan bahwa peningkatan holding time dari 30 menit ke 2 jam menyebabkan penurunan kekerasan di zona HAZ, akibat pelunakan struktur mikro karena pertumbuhan butir yang berlebihan. Penelitian ini memperlihatkan hubungan linier antara holding time dan kekerasan, meskipun hanya dilakukan pada material homogen. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan teoritis yang kuat tentang pengaruh holding time, tetapi tetap menyisakan ruang eksplorasi dalam konteks pengelasan *dissimilar material* seperti yang diangkat dalam studi ini.

Secara keseluruhan, telaah terhadap literatur yang telah ada menunjukkan bahwa meskipun berbagai aspek dari PWHT telah banyak diteliti baik dari sisi suhu, jenis material, maupun mekanisme mikrostruktur belum terdapat penelitian yang secara eksplisit menguji pengaruh variasi waktu penahanan (1 jam dan 3 jam) terhadap nilai kekerasan pada sambungan las dissimilar antara API 5L X65 dan ASTM A36. Celah inilah yang ingin diisi oleh penelitian ini. Dengan pendekatan eksperimen dan pengujian kekerasan secara langsung, penelitian ini tidak hanya memberikan data baru yang empiris, tetapi juga menyumbangkan perspektif teoritis dalam menyusun parameter optimal PWHT pada sambungan dissimilar baja dalam industri rekayasa.

2.2. Teori/Konsep dasar

2.2.1. Karakteristik Material

Karakteristik material memegang peranan penting dalam keberhasilan proses pengelasan dan perlakuan panas. Perbedaan unsur kimia maupun struktur mikro akan membuat setiap material merespon siklus panas dengan cara berbeda. Studi ini menjadikan spesifikasi API 5L X65 dan ASTM A36 sebagai acuan untuk memahami ketidak seragaman yang muncul pada sambungan las *dissimilar*. Pemahaman detail mengenai kedua material tersebut sangat diperlukan untuk menjawab fenomena perubahan kekerasan yang terjadi akibat proses *stress relieving* dengan durasi *holding time* yang berbeda.

API Specification 5L dikembangkan oleh *American Petroleum Institute* sebagai standar utama untuk pipa baja karbon dan baja paduan rendah yang digunakan pada industri minyak dan gas. Tujuan utama standar ini adalah menjamin bahwa pipa memiliki kombinasi kekuatan tinggi, ketangguhan, dan kemampuan dalam pengelasan yang memadai untuk aplikasi tekanan tinggi dan lingkungan operasi yang menuntut. API 5L X65 termasuk dalam kategori *High Strength Low Alloy* (HSLA) steel, yang dirancang untuk mencapai kekuatan luluh tinggi dengan kandungan karbon relatif rendah API-5L-46th, (2018).

Tabel 2.1: Chemical Composition API 5L X65

No.	Unsur / Elemen	Simbol	Kadar Maks. (wt%)
A. ELEMEN DASAR			
1	Karbon	C	0.16
2	Mangan	Mn	1.65
3	Silikon	Si	0.45
4	Fosfor	P	0.025
5	Sulfur	S	0.015
6	Tembaga	Cu	0.35
B. ELEMEN MICRO-ALLOYING (Khas HSLA)			
7	Niobium	Nb	0.10
8	Vanadium	V	0.10
9	Titanium	Ti	0.06
10	Molibdenum	Mo	0.15
11	Nikel	Ni	0.30
12	Kromium	Cr	0.30
13	Boron	B	0.0005

Tabel 2.2: Tensile test API 5L X65

No.	Parameter	Simbol	Satuan	Nilai Minimum Standar	Catatan
1	Minimum Yield Strength	Ys	MPa	448	API 5L Ed.46 (2018), Table 7, PSL 2
2	Minimum Ultimate Tensile Strength	UTS	MPa	531	API 5L Ed.46 (2018), Table 7, PSL 2
3	Minimum Elongation at Fracture	EI	%	18	Gauge length 200 mm; API 5L Ed.46 Table 7
4	Reduction Area	RA	%	N/A*	Tidak dipersyaratkan dalam standar; diperoleh dari uji aktual
5	Modulus Elastisitas	E	GPa	207	Nilai tipikal baja karbon; bukan persyaratan minimum standar

ASTM A36 merupakan baja karbon struktural yang banyak digunakan pada konstruksi umum, seperti rangka bangunan, jembatan, dan komponen struktural lainnya. Tujuan utama standar ASTM A36 adalah menyediakan

material dengan kekuatan sedang, keuletan tinggi, serta kemudahan fabrikasi dan pengelasan. Berbeda dengan API 5L X65, ASTM A36 tidak dirancang untuk aplikasi tekanan tinggi, melainkan lebih menekankan pada kemudahan proses manufaktur dan fleksibilitas penggunaan ASTM-A36 (1997).

Table 2.3: Chemical Composition ASTM A36

No.	Unsur / Elemen	Simbol	Kadar Maks. (wt%)
1	Karbon	C	0.26
2	Mangan	Mn	1.20
3	Silikon	Si	0.40
4	Fosfor	P	0.040
5	Sulfur	S	0.050
6	Tembaga	Cu	0.20

Table 2.4: Tensile test ASTM A36

No.	Parameter	Simbol	Satuan	Nilai Minimum Standar	Catatan
1	Minimum Yield Strength	Ys	MPa	250	ASTM A36/A36M; untuk pelat $t \leq 200$ mm
2	Minimum Ultimate Tensile Strength	UTS	MPa	400	ASTM A36/A36M; rentang 400–550 MPa
3	Minimum Elongation at Fracture	El	%	20	Gauge length 200 mm (8 in); ASTM A36/A36M
4	Reduction Area	RA	%	N/A*	Tidak dipersyaratkan dalam standar; diperoleh dari uji aktual
5	Modulus Elastisitas	E	GPa	200	Nilai tipikal baja struktural; bukan persyaratan minimum standar

2.2.2. Pengelasan Logam Berbeda (*Dissimilar Weld*)

Pengelasan *dissimilar* didefinisikan sebagai proses penyambungan dua material yang memiliki perbedaan pada sistem paduan, jenis material, maupun komposisi kimia dalam satu kelompok material yang sama. Perbedaan tersebut dapat mencakup penyambungan antara dua sistem paduan yang berbeda seperti baja karbon dan baja tahan karat, penyambungan antar jenis material yang berbeda seperti logam, keramik, polimer, atau komposit, termasuk penyambungan logam ferrous dengan non-ferrous, serta penyambungan material dalam kelompok yang sama namun berbeda mikrostruktur, seperti baja tahan karat austenitik, feritik, dan duplex (Jhon C. Lippold, 2015).

Pada penelitian ini, pengelasan dissimilar dilakukan antara API 5L X65 sebagai material pipa baja karbon tinggi yang diproduksi melalui proses *Thermo-Mechanically Controlled Processing* (TMCP), dengan ASTM A36 sebagai baja karbon struktural konvensional hasil proses *hot rolling*. Kedua material ini

tergolong dissimilar karena memiliki perbedaan mendasar pada komposisi kimia, sifat mekanis, maupun proses manufakturnya. API 5L X65 memiliki kekuatan luluh minimum sebesar 448 MPa dengan kandungan karbon ekuivalen yang lebih tinggi, sedangkan ASTM A36 memiliki kekuatan luluh sekitar 250MPa dengan karbon ekuivalen yang lebih rendah. Perbedaan ini menyebabkan keduanya termasuk dalam klasifikasi P-Number yang berbeda berdasarkan ASME BPVC Section IX, yaitu A36 pada P-No.1 Group 1 dan X65 pada P-No.1 Group 2, sehingga sambungan las antara keduanya dikategorikan sebagai pengelasan dissimilar.

2.2.3. Perlakuan Panas (*Heat Treatment*) *Stress Relieving*

Holding time atau waktu tahan adalah parameter penting dalam proses pemanasan setelah pengelasan (PWHT) dan *stress relieving*. Fungsinya adalah memastikan suhu merata di seluruh bagian material. Pada sambungan las, terutama untuk baja karbon dan baja paduan rendah, *holding time* sangat berpengaruh terhadap perubahan struktur mikro, pengurangan tegangan sisa, dan kestabilan sifat mekanis seperti tingkat kekerasan dan keuletan material.

Pada penelitian ini pemilihan holding time 3 jam merujuk pada studi (Byeong Choon Goo, 2021) yang menerapkan PWHT pada baja karbon SM355A (setara S355JR) dengan suhu subkritis 590°C dan holding time 3 jam khusus untuk evaluasi distribusi hardness pada spesimen las serta pengujian fatigue pada spesimen dan komponen skala penuh. Pemilihan durasi tersebut oleh (Byeong Choon Goo, 2021) didasarkan pada kebutuhan untuk memperoleh kondisi stress relief yang lebih sempurna dan stabil secara metalurgis.

Kesamaan rentang suhu inilah yang membuat pemilihan holding time 3 jam pada penelitian Goo relevan untuk dijadikan acuan. Sebab, pada suhu subkritis (600°C - 620°C), proses pelepasan tegangan sisa dan penurunan kekerasan material berlangsung lebih lambat dan bertahap dibandingkan jika menggunakan suhu yang lebih tinggi (superkritis). Oleh karena itu, durasi 3 jam dipilih agar panas memiliki waktu yang cukup untuk meresap dan melunakkan struktur HAZ secara maksimal.

Standar ASME B31.3-2018 Process Piping (2018), pada table 331.1.1 untuk pipa proses mengatur waktu tahan minimum berdasarkan tebal material

untuk menjaga kualitas sambungan las. Standar ini menetapkan bahwa untuk material dengan ketebalan sampai 50 mm, waktu tahan minimum adalah 1 jam. Sementara untuk ketebalan lebih dari 50 mm, dibutuhkan waktu minimum 2 jam plus 15 menit. Aturan ini menunjukkan bahwa waktu tahan tidak ditentukan sembarangan, tetapi berdasarkan kebutuhan penyebaran panas hingga ke bagian dalam material supaya perubahan mikrostruktur terjadi secara merata.

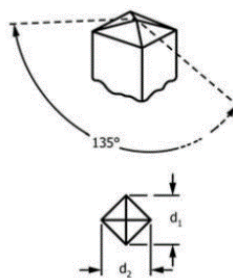
2.2.4. Pengujian Kekerasan Metode *Vickers*

Pengujian kekerasan merupakan metode pengujian mekanis untuk mengukur ketahanan material terhadap deformasi plastis lokal akibat penetrasi indentor. Dalam penelitian metalurgi pengelasan, metode *Vickers* (HV) lebih disukai karena kemampuannya mengukur area spesifik yang sempit, seperti daerah HAZ dan logam las (*weld metal*).

Prinsip pengujian *Vickers* menggunakan indentor intan berbentuk piramida dengan sudut 135°. Nilai kekerasan dihitung berdasarkan beban yang diberikan dibagi dengan luas permukaan jejak indentasi, sesuai persamaan berikut:

$$\text{Dimana: } HV = \frac{1.854 \times P}{d^2}$$

- HV = Angka Kekerasan Vickers d^2
- P = Beban (kgf)
- d = Rata-rata diagonal jejak (μm)



Gambar 2.1: Indentator Berlian Piramida

BAB III

METODOLOGI

3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT. P selama 3 bulan mulai dari periode bulan Agustus – Oktober 2025.

3.2 Metode Pengujian

Pada pengujian ini menggunakan metodologi pengujian kuantitatif dengan menggunakan pengumpulan data numerik dan analisis grafik yang berdasarkan standar spesifikasi.

3.3 Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan pada pengujian ini adalah material pipa API 5L X65 dengan *outer diameter* 219mm dan *thickness* 22.23mm yang disambungkan pada material ASTM A36 dengan *thickness* 6mm dengan model *fillet joint (T-Joint)* yang kemudian dilakukan pemotongan dengan bentuk L. Adapun bahan lain seperti kertas pasir karbit silikon (amplas) dari grit 80, 240, 400, dan 600 , kapas, dan cairan nital (HNO₃ dan CH₃OH dengan perbandingan 1 : 4).

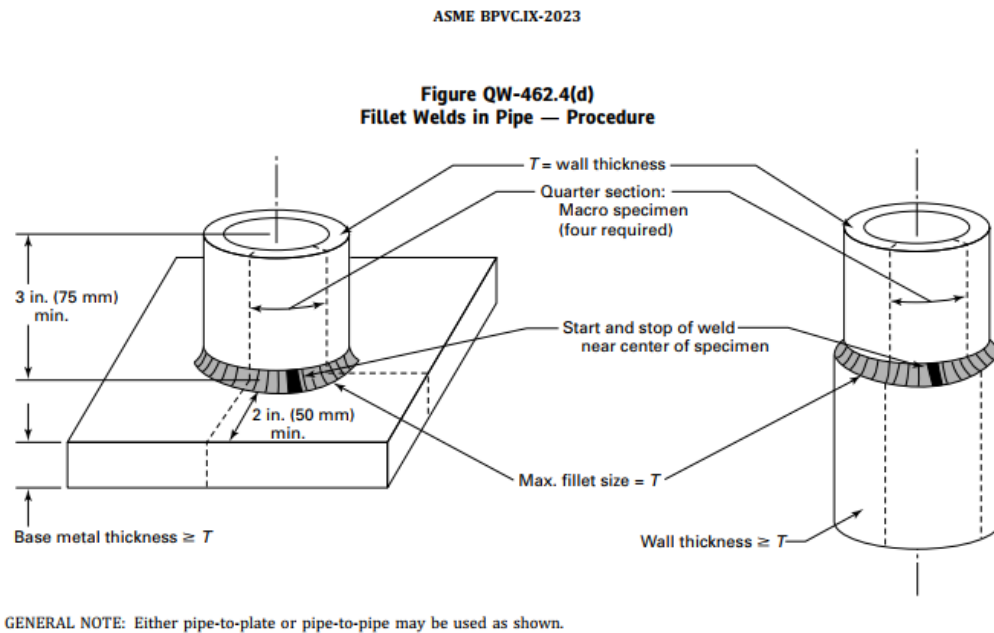
Selanjutnya untuk alat-alat yang digunakan dalam pengujian ini adalah mesin polish duduk, tungku oven atau *furnace Carbolite Gero 3000*, mesin *Vickers Hardness Tester* (Mitutoyo-HV) Serial No. 880405.

3.4 Prosedur Penelitian

3.4.1 Pembuatan Spesimen Uji

Dalam proses preparasi spesimen uji juga terdapat proses *machining* dilakukan untuk membentuk material sesuai dengan kebutuhan untuk pengujian, dimana pada pengujian ini dilakukan pemotongan menggunakan alat kerja *band saw* dengan tujuan karena, dimensi ruang pada mesin oven (*furnace*) dan meja ragam pada *hardness Vickers* yang terbatas. Untuk itu material dilakukan pemotongan dengan ukuran $\pm$ panjang 90mm dan tinggi 50mm dengan membentuk huruf L. Pemotongan dilakukan kuantiti sebanyak 3 sampel karena sesuai dengan kebutuhan uji yaitu untuk sebelum *heat treatment*, *holding* 1 jam dan *holding* 3 jam yang akan menjadi dasar variabel perbandingan. Pemotongan material ini juga diatur pada ASME BPVC SEC IX (2023), Figure QW-462.4(d) yang digambarkan untuk lokasi pengambilan berada pada posisi *start and stop*

proses pengelasan seperti yang dijelaskan pada gambar berikut.



Gambar 3.1: lokasi pengambilan spesimen uji

3.4.2 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Proses perlakuan panas dimulai dengan memasukkan sampel ke dalam tungku/ *furnace* hingga mencapai suhu 620°C, pemilihan suhu ini sesuai prosedur yang sudah di atur pada standar *code* ASME B31.3 (2018) Process Piping, pada table **331.1.1** dan pada ASME BPVC SEC IX (2023) pada table QW/QB-422 yang dimana untuk material dengan ketebalan kurang dari 50mm selanjutnya penahan waktu *holding time* selama 1 jam dan 3 jam.

3.4.3 *Stress Relieving*

Pada proses ini, material yang telah menjalani perlakuan panas pada suhu 600°C - 620°C dan ditahan selama 2 variasi suhu, yaitu 1 jam dan 3 jam kemudian didinginkan secara perlahan-lahan di dalam tungku *furnace* hingga mencapai suhu ruangan. Kecepatan pendinginan ini mempengaruhi sifat mekanik dari baja semakin lambat pendinginannya, maka baja akan memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih rendah, sedangkan jika pendinginannya lebih cepat, maka akan terjadi sebaliknya.

3.4.4 Preparasi Spesimen Uji

Pada tahap ini spesimen yang telah dilakukan pemotongan dilanjutkan proses pemolesan (*Polishing*) yang bertujuan untuk menghaluskan permukaan material sebelum dilanjutkan ke proses *etching* menggunakan cairan nital. Pada proses ini

dilakukan dengan pemolesan bertahap, mulai dari grit-80, grit-240, grit-400, dan grit-600 sampai material uji sudah halus merata agar pada saat masuk proses *etching* dapat sempurna.

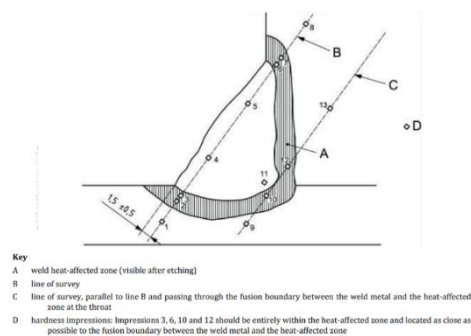
Setelah proses pemolesan selesai tahap selanjutnya yaitu masuk pada proses *etching* yang bertujuan untuk membuka profil hasil las antara *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*. Pada proses *etching* ini menggunakan cairan *nital* yang berisi campuran HNO_3 dan CH_3OH dengan perbandingan 1:4.

3.4.5 Pengujian Kekerasan (*Hardness Vickers*)

Uji kekerasan ini menggunakan metode *Vickers* yang pada penggunaannya menggunakan indentator yang berbentuk piramida dan berbahan intan dengan sudut piramid 135° yang sudah disertifikasi kalibrasi oleh Balai Besar Bahan Barang Teknik (B4T) dan Komite Akreditasi Nasional (KAN).

Pada pengujian kekerasan ini, dilakukan dengan menggunakan metode *vickers* sesuai dengan standar metode uji pengetesan (*ASTM E92 2017, 2017*) yang dimana metode ini tercantum dalam standar material API-5L-46th, (2018) pada paragraf H.7.3.3 dengan pembebanan yang diberikan terhadap material sebesar 10kgf (*kilogram force*).

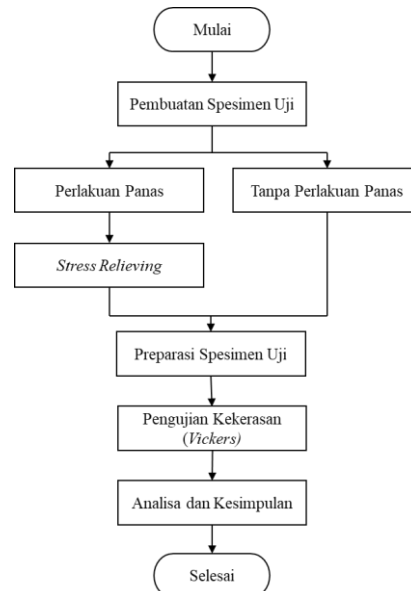
Untuk nilai kekerasan dari material memiliki batas maksimum (*acceptance criteria*) yang di atur dalam sebuah standar NACE MR0175, (2015) pada sub bab A.2.1.4, yang dijelaskan untuk material baja karbon yang telah dilakukan pengelasan dan dilanjutkan proses PWHT harus memiliki nilai kekerasan yang tidak lebih dari **250HV**.



Gambar 3.2 Lokasi indentasi hardness pada Nace MR0175

3.5 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Agar penelitian ini berjalan dengan terarah dan sistematis, tahapan pelaksanaannya telah disusun mulai dari persiapan awal hingga penyusunan laporan akhir. Berikut adalah gambar diagram alir (*flowchart*) yang menggambarkan urutan langkah-langkah penelitian:



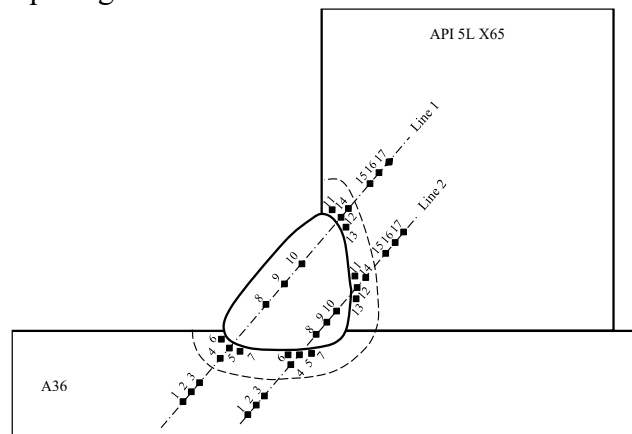
Gambar 3.3 *flowchart*

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Berdasarkan pengujian kekerasan *vickers* yang telah dilakukan dengan 3 jenis variasi proses PWHT yaitu non PWHT, PWHT *holding* 1jam, dan PWHT *holding* 3 jam didapatkan hasil nilai kekerasan *vickers* berdasarkan titik lokasi indentasi seperti pada gambar berikut ini.



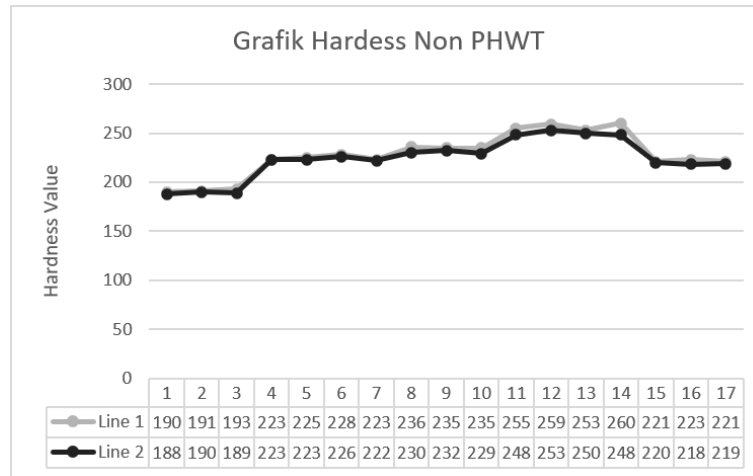
Gambar 4.1 Gambar lokasi indentasi uji *hardness*

4.1.1 Hasil Nilai Kekerasan Material non PWHT

Sebelum dilakukan proses *post weld heat treatment* (PWHT) dengan jenis *stress relieving*, spesimen dilakukan pengujian kekerasan *vickers*, pengujian ini bertujuan untuk memperoleh data awal dari nilai kekerasan yang akan dijadikan acuan sebagai data pembandingan sebelum dan sesudah dilakukan PWHT.

Tabel 4.1 Tabel hasil nilai kekerasan non PWHT

Material	Test Location	Vickers Hardness (HV)		
		No	Line 1	Line 2
ASTM A36	Base metal	1	190	188
		2	191	190
		3	193	189
	Heat Affected Zone (HAZ)	4	223	223
		5	225	223
		6	228	226
		7	223	222
API 5L X65	Weld Metal	8	236	230
		9	235	232
		10	235	229
	Heat Affected Zone (HAZ)	11	255	248
		12	259	253
		13	253	250
		14	260	248
	Base metal	15	221	220
		16	223	218
		17	221	219



Gambar 4.2 Gambar grafik kekerasan non PWHT

Dari gambar grafik tersebut dapat terlihat bahwa rata-rata nilai kekerasan yang dimiliki pada material untuk pada lokasi *base metal* ASTM A36 berkisar **190HV**, dan untuk pada *base metal* API 5L X65 terdapat nilai kekerasan yang berkisar pada **220HV**. Sedangkan pada lokasi HAZ (*Heat Affected Zone*) untuk nilai kekerasan yang dimiliki pada material ASTM A36 berkisar rata-rata pada **224HV** dan untuk pada material API 5L X65 nilai kekerasan yang dimiliki sekitar **253HV**. Dan untuk pada lokasi *weld metal* sendiri nilai konsentrasi kekerasan yang dimiliki sekitar **232HV**.

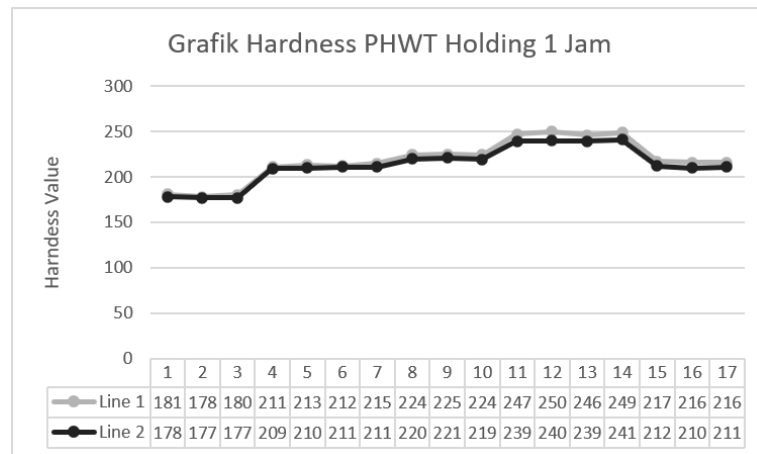
Dari pengujian kekerasan pada material sebelum dilakukan PWHT ini, dapat dilihat bahawasannya untuk nilai konsentrasi kekernan pada material ini masih cenderung tinggi, terutama untuk pada lokasi HAZ API 5L X65 yang memiliki *high value* pada **260HV**, sedangkan untuk *acceptance criteria* pada pengujian ini adalah **250HV** seperti yang dijelaskan pada NACE MR0175 / ISO 15156-1, (2015), pada bab A.2.1.4. Maka dari hal ini nilai kekerasan yang dimiliki pada material uji sudah melampaui batas maksimum yang diperbolehkan sesuai dalam standar spesifikasi yang mengatur.

4.1.2 Hasil Nilai Kekerasan PWHT *Holding Time* 1 Jam

Tahap kedua ini adalah dilakukan PWHT dengan *holding time* 1 jam. Tujuan dari PWHT tahap kedua ini untuk mengetahui apakah terdapat hasil perubahan nilai kekerasan yang terjadi pada material. Untuk mengetahuinya pada pengujian ini terdapat perubahan nilai kekerasan pada material uji yang terjadi atau tidak, dapat dilihat pada grafik pada tabel berikut.

Tabel 4.2 Tabel hasil nilai kekerasan *vickers* setelah PWHT 1 jam

Material	Test Location	Vickers Hardness (HV)		
		No	Line 1	Line 2
ASTM A36	Base metal	1	181	178
		2	178	177
		3	180	177
	Heat Affected Zone (HAZ)	4	211	209
		5	213	210
		6	212	211
		7	215	211
Weld Metal	Weld Metal	8	224	220
		9	225	221
		10	224	219
API 5L X65	Heat Affected Zone (HAZ)	11	247	239
		12	250	240
		13	246	239
		14	249	241
	Base metal	15	217	212
		16	216	210
		17	216	211



Gambar 4.3 Gambar grafik kekerasan setelah PWHT 1 jam

Dari gambar grafik tersebut dapat terlihat bahwa konsentrasi kekerasan terdapat penurunan dengan nilai untuk pada lokasi *base metal* ASTM A36 berkisar **178HV**, dan untuk pada *base metal* API 5L X65 terdapat nilai kekerasan yang berkisar pada **214HV**. Sedangkan pada lokasi HAZ (*Heat Affected Zone*) untuk nilai kekerasan yang dimiliki pada material ASTM A36 berkisar pada **211HV** dan untuk pada material API 5L X65 nilai kekerasan yang dimiliki sekitar **243HV**. Dan untuk pada lokasi *weld metal* sendiri nilai konsentrasi kekerasan yang dimiliki sekitar **222HV**.

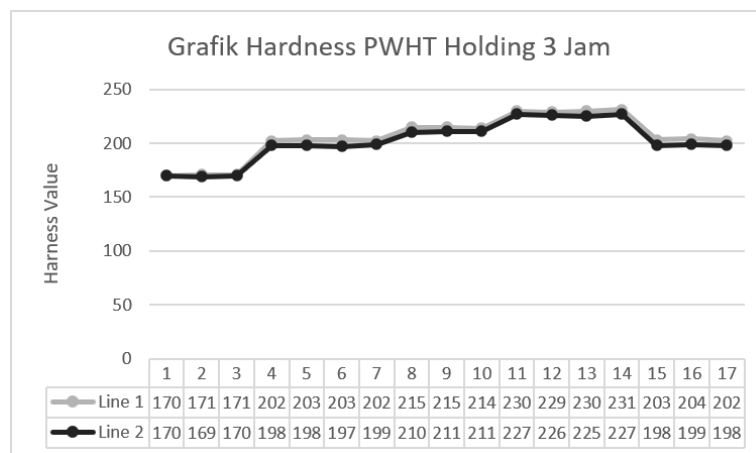
Pada proses PWHT untuk *holding time* 1 Jam ini masih belum dianggap cukup karena belum memenuhi batas maksimum pada NACE MR0175, (2015), yaitu karena pada bagian HAZ API 5L X65 line 1 no.12 nilai hardness yang terdapat masih sebesar **250HV**.

4.1.3 Hasil Nilai Kerasan PWHT *Holding Time* 3 Jam

Pada proses ketiga ini material dilakukan PWHT dengan *holding time* 3 jam, yang bertujuan untuk mengetahui apakah ada penurunan nilai kekerasan yang lebih efektif dari PWHT 1 jam. Untuk mengetahui hal tersebut dapat dilihat dari tabel nilai hasil pengujian kekerasan vickers dan grafik sebagai proyeksi dari pergerakan nilai kekerasan.

Tabel 4.3 Tabel hasil nilai kekerasan *vickers* setelah PWHT 3 jam

Material	Test Location	Vickers Hardness (HV)		
		No	Line 1	Line 2
ASTM A36	Base metal	1	170	170
		2	171	169
		3	171	170
	Heat Affected Zone (HAZ)	4	202	198
		5	203	198
		6	203	197
		7	202	199
Weld Metal		8	215	210
		9	215	211
		10	214	211
API 5L X65	Heat Affected Zone (HAZ)	11	230	227
		12	229	226
		13	230	225
		14	231	227
	Base metal	15	203	198
		16	204	199
		17	202	198



Gambar 4.4 Gambar grafik kekerasan setelah PWHT 3 jam

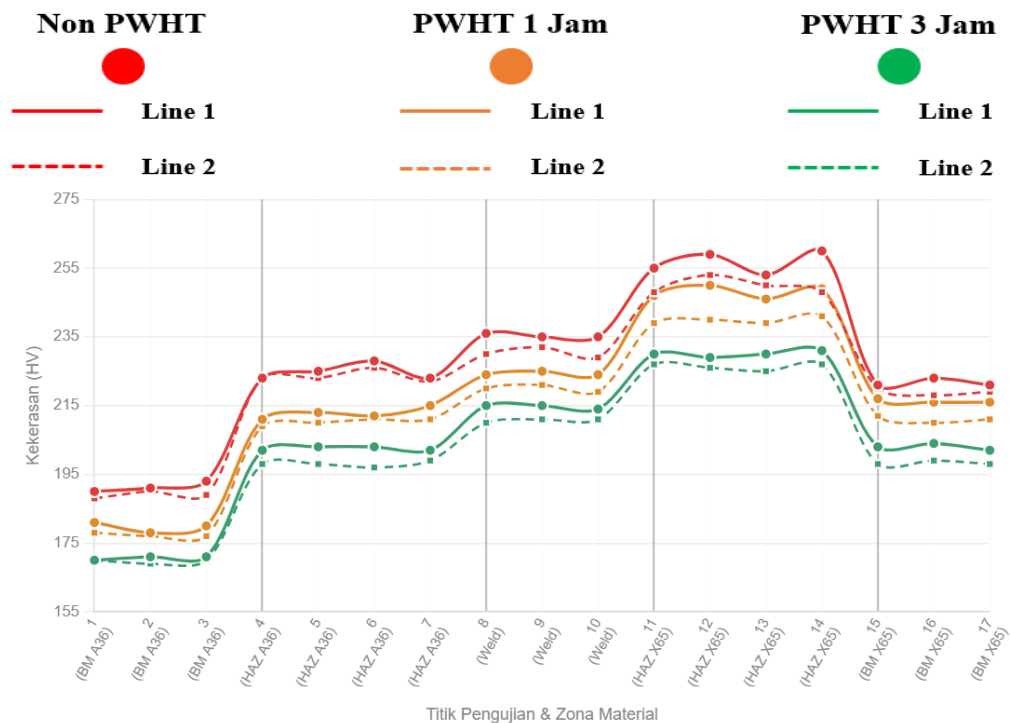
Setelah dilakukan PWHT dengan *holding time* 3 jam mendapatkan hasil yang dijelaskan pada tabel dan grafik hasil nilai kekerasan *vickers* berikut, dimana untuk nilai kekerasan mengalami penurunan yang sangat efektif pada pengujian ini karena hampir seluruh lokasi.

Hasil nilai kekerasan pada tabel hasil dan grafik tersebut dapat terlihat bahwa konsentrasi kekerasan terdapat penurunan dengan nilai rata-rata untuk pada lokasi *base metal* ASTM A36 berkisar **170HV**, dan untuk pada *base metal* API 5L X65 terdapat nilai kekerasan yang berkisar pada **200HV**. Sedangkan pada

lokasi HAZ (*Heat Affected Zone*) untuk nilai kekerasan rata-rata yang dimiliki pada material ASTM A36 berkisar pada **200HV** dan untuk pada material API 5L X65 nilai kekerasan yang dimiliki sekitar **228HV**. Dan untuk pada lokasi *weld metal* sendiri nilai konsentrasi kekerasan yang dimiliki sekitar **212HV**.

4.2 Pembahasan

Berdasarkan dari keseluruhan peroses pengujian yang meliputi 3 proses perlakuan panas mulai dari non PWHT, 1 jam PWHT, dan 3 jam PWHT yang dilanjutkan dengan pengujian kekerasan *vickers* yang dilakukan, mendapatkan hasil yang pembahasan berikut yang akan dijelaskan melalui gambar grafik perbandingan dari ketiga proses tersebut.



Gambar 4.5 Gambar grafik perbandingan nilai kekerasan dari 3 variasi material uji

Pada kondisi tanpa perlakuan panas (*Non PWHT*), distribusi kekerasan mengikuti pola yang khas pada sambungan las *dissimilar metal* antara ASTM A36 dan API 5L X65. Nilai kekerasan tertinggi ditemukan pada zona HAZ API 5L X65 dengan rata-rata **253HV**, diikuti zona Weld Metal sebesar **234HV**, zona HAZ ASTM A36 sebesar **224HV**, Base Metal API 5L X65 sebesar **220HV**, dan nilai terendah pada Base Metal ASTM A36 sebesar **190HV**. Nilai kekerasan puncak tertinggi secara individual tercatat pada titik ke-14 zona HAZ API 5L X65 Line 1 sebesar **260HV**. Tingginya kekerasan pada zona HAZ API 5L X65 disebabkan

oleh kandungan karbon ekuivalen (CE) yang lebih tinggi pada baja API 5L X65 dibandingkan ASTM A36. Selama proses pengelasan SMAW, siklus termal yang terjadi menyebabkan daerah HAZ mengalami transformasi mikrostruktur yang cepat, terutama pembentukan fasa martensit dan bainit akibat laju pendinginan yang tinggi, fasa-fasa yang bersifat keras dan getas sehingga nilai kekerasan pada HAZ jauh melampaui *base metal*-nya seperti pengujian yang dilakukan oleh (Rohmat dkk., 2023) dengan hal ini yang dikenal sebagai *hardening effect* akibat pengelasan. Gradien kekerasan antara zona HAZ X65 tertinggi dan Base Metal A36 terendah pada kondisi ini mencapai **63,1 HV**, mencerminkan distribusi tegangan sisa yang tidak merata dan berpotensi menimbulkan risiko *hydrogen induced cracking* (HIC) apabila sambungan las tidak diberi perlakuan panas.

Setelah dilakukan PWHT *stress relieving* dengan *holding time* 1 jam, seluruh zona mengalami penurunan nilai kekerasan. Agar dapat mengetahui penurunan nilai kekerasan pada material maka dilakukan perhitungan menggunakan rumus berikut.

$$\text{Penurunan(\%)} = \frac{HV_{\text{non PWHT}} - HV_{\text{setelah PWHT}}}{HV_{\text{non PWHT}}} \times 100\%$$

- HV non PWHT : nilai kekerasan sebelum dilakukan PWHT
- HV setelah PWHT : nilai kekerasan sesudah dilakukan PWHT

Maka setelah dilakukan perhitungan, terdapat penurunan terbesar terjadi pada zona Base Metal A36 sebesar 6,1%, dari rata-rata 190HV menjadi 178HV, diikuti zona HAZ ASTM A36 sebesar 5,6%, dari 224HV menjadi 211HV. Zona Weld Metal mengalami penurunan 4,6%, dari 234HV menjadi 222HV. Zona HAZ API 5L X65 menunjukkan penurunan yang lebih kecil sebesar 3,7%, dari 253HV menjadi 245HV, sedangkan Base Metal API 5L X65 turun 3,0% menjadi 214HV. Mekanisme penurunan pada tahap ini terjadi karena energi panas yang diberikan selama 1 jam cukup untuk memulai proses pemulihan (*recovery*) dislokasi dan *tempering* martensit, di mana atom karbon yang terjebak dalam kisi BCT martensit mulai berdifusi dan berpresipitasi membentuk karbida halus. Proses ini mereduksi distorsi kisi kristal dan merelaksasi sebagian tegangan sisa hasil pengelasan. Namun pada durasi 1 jam, proses ini belum berlangsung secara menyeluruh, terutama pada zona HAZ API 5L X65, sehingga persentase penurunannya lebih kecil dibandingkan zona lain.

Perpanjangan *holding time* menjadi 3 jam menghasilkan penurunan kekerasan yang lebih besar dan lebih merata di seluruh zona. Zona HAZ ASTM A36 mengalami penurunan terbesar sebesar **10,6%**, dari **224HV** menjadi **200HV**, disusul Base Metal A36 sebesar **10,5%** menjadi **170HV**. Zona HAZ API 5L X65 mengalami penurunan yang cukup optimal sebesar **9,9%**, dari **253HV** menjadi **228HV** nilai ini berada di bawah ambang batas maksimum 250HV yang dipersyaratkan standar (NACE MR0175, 2015) untuk material yang beroperasi di lingkungan mengandung H₂S. Untuk penurunan nilai kekerasan pada zona *weld metal* dan *base metal* API 5L X65 masing-masing mengalami penurunan **8,6%** dan **8,9%**. Menurut penelitian yang dilakukan (Wahyu Restu dkk., 2025) penurunan kekerasan yang lebih besar pada waktu tahan yang lebih lama disebabkan oleh rekristalisasi yang lebih sempurna, difusi atom karbon dan elemen paduan yang lebih merata menghasilkan presipitasi karbida yang lebih homogen, serta berkurangnya dislokasi secara lebih menyeluruh. Gradien kekerasan antar zona menyempit menjadi **58HV** pada PWHT 3 jam, lebih kecil dibandingkan non PWHT **63HV**, menunjukkan distribusi kekerasan yang semakin homogen.

Zona	Non PWHT (HV)	PWHT 1 Jam (HV)	Turun (%)	PWHT 3 Jam (HV)	Turun (%)
Base Metal A36	190,2	178,5	6,1%	170,2	10,5%
HAZ ASTM A36	224,1	211,5	5,6%	200,3	10,6%
Weld Metal	232,8	222,2	4,6%	212,7	8,6%
HAZ API 5L X65	253,3	243,9	3,7%	228,1	9,9%
Base Metal API 5L X65	220,3	213,7	3,0%	200,7	8,9%

Tabel 4.4 Presentasi penurunan nilai kekerasan secara rata-rata

Perbandingan antara kedua variasi *holding time* menunjukkan bahwa penambahan waktu tahan dari 1 jam ke 3 jam memberikan efek pelunakan tambahan rata-rata sebesar 5-7% di seluruh zona, dengan penurunan yang konsisten dan merata. PWHT 3 jam terbukti lebih efektif dalam mereduksi tegangan sisa, menurunkan nilai kekerasan, dan menghomogenkan distribusi kekerasan di seluruh zona sambungan las pada pengujian ini *dissimilar* API 5L X65 dan ASTM A36.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan Vickers pada sambungan *dissimilar weld* API 5L X65 dan ASTM A36, dapat disimpulkan bahwa pada kondisi awal tanpa perlakuan panas (Non-PWHT), nilai kekerasan tertinggi berada di zona HAZ API 5L X65 dengan rata-rata sebesar 253 HV dan nilai puncak individual mencapai 260 HV, di mana nilai tersebut tidak memenuhi kriteria keberterimaan standar NACE MR0175 karena telah melampaui batas maksimum 250 HV. Selanjutnya, penerapan proses *stress relieving* dengan *holding time* 1 jam berhasil menurunkan kekerasan rata-rata HAZ API 5L X65 menjadi 245 HV, namun durasi penahanan ini dinilai belum maksimal karena angka kekerasan yang dihasilkan masih kritis dan sangat dekat dengan ambang batas maksimal standar. Sementara itu, perpanjangan *holding time* menjadi 3 jam memberikan hasil yang jauh lebih optimal dengan penurunan kekerasan yang efektif dan merata di seluruh zona material, di mana nilai kekerasan HAZ API 5L X65 mereduksi secara aman hingga mencapai rata-rata 228 HV, sehingga durasi 3 jam terbukti sebagai parameter perlakuan panas yang lebih efektif untuk menghasilkan distribusi kekerasan yang homogen pada sambungan las pada pengujian ini.

5.2. Saran

Berdasarkan keterbatasan ruang lingkup dan temuan yang didapatkan sepanjang pelaksanaan penelitian ini, penulis menyarankan beberapa hal berikut untuk pengembangan penelitian selanjutnya:

1. Disarankan bagi peneliti selanjutnya untuk menambahkan pengujian karakterisasi mikrostruktur secara detail, seperti perhitungan kadar ferit (*ferrite count*) menggunakan metalografi kuantitatif. Hal ini diperlukan untuk membuktikan secara metalurgi fasa-fasa baru atau perubahan ukuran butir (*grain growth*) yang terjadi pasca-proses *stress relieving* 1 jam dan 3 jam.
2. Pengujian mekanis destruktif lainnya seperti uji tarik (*tensile test*), uji ketangguhan dampak (*impact test*), maupun uji kelelahan (*fatigue test*)

pada spesimen hasil PWHT. Pengujian ini penting dilakukan guna memastikan bahwa penurunan nilai kekerasan setelah penahanan suhu selama 3 jam tidak menurunkan kekuatan tarik dan ketangguhan material secara keseluruhan di bawah batas minimum spesifikasi teknis industri.

3. Penelitian serupa dengan menambahkan variasi *holding time* yang lebih rapat di antara rentang waktu yang diuji (misalnya durasi 1,5 jam, 2 jam, atau 2,5 jam) guna memperoleh kurva tren penurunan nilai kekerasan yang lebih linier.

DAFTAR PUSTAKA

- Amri, Moh. S., Mukhlis, Bachtiar, Ari, M., Hamzah, F., & Wibowo, A. T. (2024). Analisis Kuat Arus Dissimilar Welding Terhadap Metalografi, Nilai Kekerasan dan Uji Torsi Proses Arc Stud Welding Pada Produk Hopper. *Jurnal Teknologi Maritim*, 7(2), 54–65. <https://doi.org/10.35991/jtm.v7i2.35>
- API-5L-46th. (2018). *API-5L-46th*.
- ASME B31.3-2018 Process Piping. (2018). *Process Piping ASME Code for Pressure Piping, B31*. <http://go.asme.org/B31committee>.
- ASME BPVC SEC IX 2023. (2023). *Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators SECTION IX Welding, Brazing, and Fusing Qualifications 2023 ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code*. www.asme.org/cer
- ASTM E92 2017. (2017). *Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0092-17>
- ASTM-A36 1997. (1997). *By Authority Of THE UNITED STATES OF AMERICA Legally Binding Document*.
- Byeong Choon Goo. (2021). Effect of post-weld heat treatment on the fatigue behavior of medium-strength carbon steel weldments. *Metals*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/met11111700>
- Defi Pramesti, & Winarto, W. (2023a). Mechanical Properties Of Welding API 5L X-65 Cladded UNS N08825 Material Due To The Effect of Welding Repair. *Jurnal Mesin Nusantara*, 6(1). <https://doi.org/10.29407/jmn.v6i1.18233>
- Defi Pramesti, & Winarto, W. (2023b). Mechanical Properties Of Welding API 5L X-65 Cladded UNS N08825 Material Due To The Effect of Welding Repair. *Jurnal Mesin Nusantara*, 6(1). <https://doi.org/10.29407/jmn.v6i1.18233>
- Gandy, D. (2007). *Carbon Steel Handbook*. Electrical Power Research Institute. www.epri.com
- Huda Fathu Rohman, Gunawan D.H, Yusuf Umardani, & Agus Tri Hardjuno. (2014). PENGARUH PROSES HEAT TREATMENT ANNEALING TERHADAP STRUKTUR MIKRO DAN NILAI KEKERASAN PADA SAMBUNGAN LAS THERMITE BAJA NP-42. Dalam *Jurnal Teknik Mesin S-1* (Vol. 2, Nomor 3).
- Jhon C. Lippold. (2015). *Welding Metallurgy and Weldability*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey Published simultaneously in Canada.
- NACE MR0175 / ISO 15156-1: 2015. (2015). *Petroleum, petrochemical, and natural gas industries — Materials for use in H2S-containing environments in oil and Gas production*.
- Rohmat, I. K., Amri, Moh. S., Munir, M. M., Kurniyanto, H. B., & Muzzakki, M. H. (2023). ANALISIS HOLDING TIME POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) PADA PENGELASAN MATERIAL SA-213 GRADE T91 DENGAN SA-213 GRADE T22 UNTUK APLIKASI BOILER. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 14(1), 317–329. <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i1.1304>
- Sasha Aline Gomes, Silvio Gonçalves Mendes, Elias Rocha Gonçalves Júnior, Felipe Perissé Duarte Lopes, Sergio Neves Monteiro, & Noan Tonini Simonassi. (2026). Effects of post-weld heat treatments on dissimilar joints of rigid pipes made of API X65 steel and Inconel 625 for offshore applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 40, 3956–3967. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.01.056>
- Wahyu Restu, E., Wahyudi, M. T., Karim, M., Anggara, D., Farrasy, A. P., Luluk Kusminah, I., & Toto Wibowo, A. (2025). Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Post Weld Heat Treatment pada Kekerasan Material A335 Grade P92 untuk Aplikasi Pembangkit Listrik. *Jurnal Teknologi Maritim*, 8(1), 42–48. <https://doi.org/10.35991/jtm.v8i1.50>

Yao Ren, Anna Paradowska, Bin Wang, Elvin Eren, & Yin Jin Janin. (2017). Residual Stress State of X65 Pipeline Girth Welds before and after Local and Furnace Post Weld Heat Treatment. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 139(4). <https://doi.org/10.1115/1.4035884>

LAMPIRAN

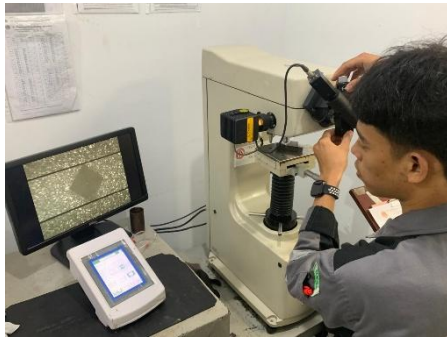
Lampiran 1. Gambar-gambar Penelitian



1. Proses PWHT material uji



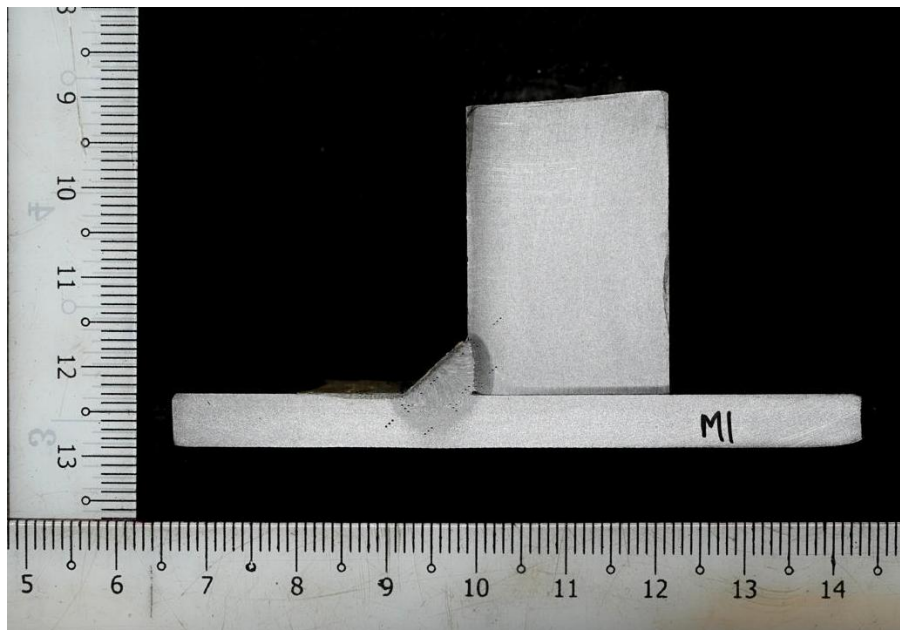
2. Proses *Hardness Vickers testing* (non PWHT)



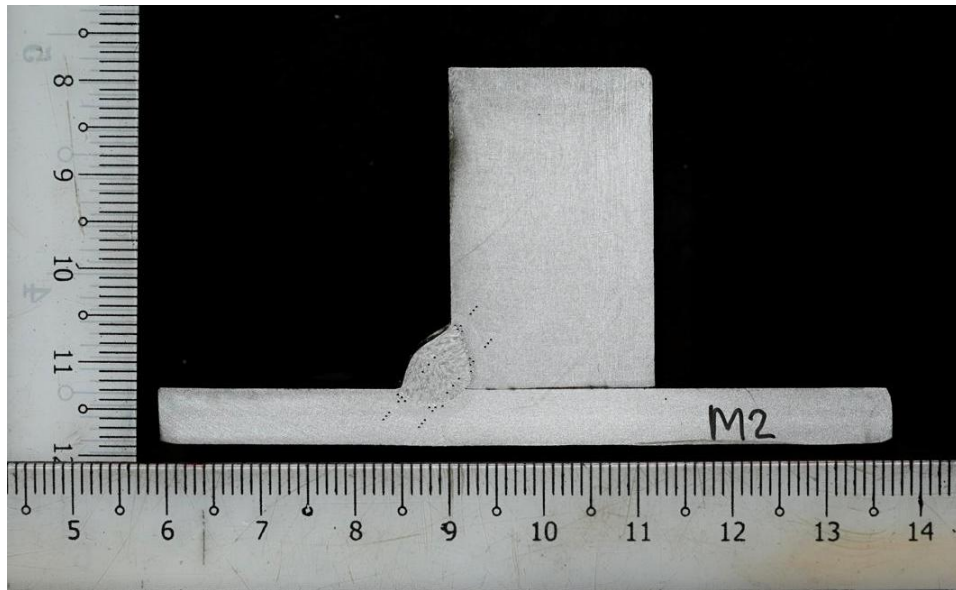
3. Proses *Hardness Vickers testing* (PWHT 1 jam)



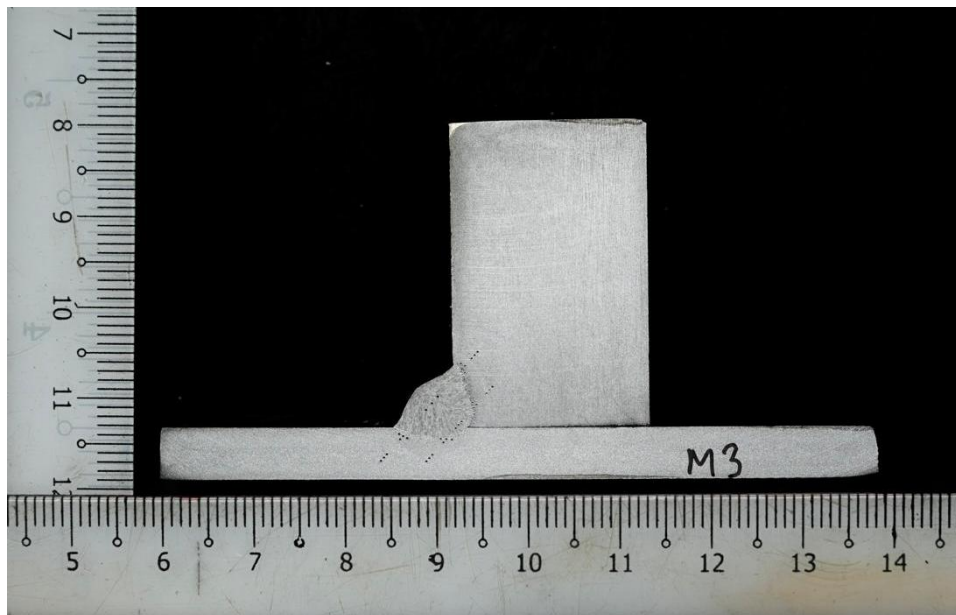
4. Proses *Hardness Vickers testing* (PWHT 3 jam)



5. Hasil *Hardness Vickers testing* (non PWHT)



6. Hasil *Hardness Vickers* testing
(PWHT 1 jam)



7. Hasil *Hardness Vickers* testing
(PWHT 3 jam)

Muhammad Rahmat Muharram

Studi Perbandingan Stress Relieving Dengan Holding Time 1 Jam dan 3 Jam Terhadap Nilai Kekerasan Pada Dissimilar We...

 Politeknik Negeri Batam

Document Details

Submission ID
trn:oid::3618:143976027

Submission Date
Jun 23, 2026, 2:52 PM GMT+7

Download Date
Jun 23, 2026, 2:53 PM GMT+7

File Name
Tugas Akhir M.Rahmat .pdf

File Size
1.5 MB

40 Pages
8,212 Words
51,156 Characters

 iThenticate Page 2 of 47 - Integrity Overview

Submission ID trn:oid::3618:143976027

18% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

17%  Internet sources
8%  Publications
0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

 **Hidden Text**
100 suspect characters on 2 pages
Text is altered to blend into the white background of the document.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

17%  Internet sources
8%  Publications
0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	s1math.fmipa.ugm.ac.id	2%
2	Internet	jtm.ppns.ac.id	2%
3	Internet	repository.its.ac.id	1%
4	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
5	Internet	repository.untag-sby.ac.id	<1%
6	Internet	ojs.unpkediri.ac.id	<1%
7	Publication	Sasha Aline Gomes Haddad, Silvio Gonçalves Mendes, Elias Rocha Gonçalves Júnio...	<1%
8	Internet	kc.umn.ac.id	<1%
9	Internet	eprints.utdi.ac.id	<1%
10	Internet	repository.pnj.ac.id	<1%
11	Internet	dibimbing.id	<1%

12	Internet	docplayer.info	<1%
13	Internet	repositori.usu.ac.id	<1%
14	Internet	semaphore.uqar.ca	<1%
15	Internet	ejournal2.pnp.ac.id	<1%
16	Internet	research.amanote.com	<1%
17	Internet	repositoryperpus.poltekkesjayapura.ac.id	<1%
18	Internet	www.scielo.br	<1%
19	Internet	repositori.uma.ac.id	<1%
20	Internet	repository.itpln.ac.id	<1%
21	Internet	www.sciencegate.app	<1%
22	Internet	fr.scribd.com	<1%
23	Internet	repository.um-surabaya.ac.id	<1%
24	Internet	dspace.uui.ac.id	<1%
25	Internet	text-id.123dok.com	<1%

26	Internet	eprints.umg.ac.id	<1%
27	Internet	repository.uncen.ac.id	<1%
28	Internet	infosolda.com.br	<1%
29	Internet	kaisnet.files.wordpress.com	<1%
30	Internet	digilib.its.ac.id	<1%
31	Internet	repository.unhas.ac.id	<1%
32	Internet	jurnal.polibatam.ac.id	<1%
33	Publication	Azzam Hibatulloh, Rusnoto, Mustaqim. "pengaruh holding time pada sifat meka...	<1%
34	Publication	P.Y.M. Wibowo Ndaruhadi. "PERBANDINGAN PERUBAHAN SIFAT MEKANIK ALUMI...	<1%
35	Internet	plumerundream.web.app	<1%
36	Internet	123dok.com	<1%
37	Internet	es.scribd.com	<1%
38	Internet	ojs.unm.ac.id	<1%
39	Internet	repository.stik-sintcarolus.ac.id	<1%

40	Internet	www.slideshare.net	<1%
41	Internet	e-jurnal.pnl.ac.id	<1%
42	Internet	eprints.ust.ac.id	<1%
43	Internet	research.buaa.edu.cn	<1%
44	Internet	appliedmechanics.asmedigitalcollection.asme.org	<1%
45	Internet	ar.scribd.com	<1%
46	Internet	jurnal.ciptamediaharmoni.id	<1%
47	Internet	jurnalstikesborneolestari.ac.id	<1%
48	Internet	library.polmed.ac.id	<1%
49	Internet	ojs.ukipaulus.ac.id	<1%
50	Internet	pt.scribd.com	<1%
51	Internet	repository.ipb.ac.id:8080	<1%
52	Internet	repository.uinbanten.ac.id	<1%
53	Internet	repository.unugiri.ac.id	<1%

54	Publication	Okta Rianda, Zulhanif Zulhanif, Harnowo Supriadi. "Pengaruh Variasi Temperatur...	<1%
55	Internet	core.ac.uk	<1%
56	Internet	digilib.uin-suka.ac.id	<1%
57	Internet	ejournal.unesa.ac.id	<1%
58	Internet	eprints.itn.ac.id	<1%
59	Internet	eprints.pktj.ac.id	<1%
60	Internet	html.pdfcookie.com	<1%
61	Internet	journal.trunojoyo.ac.id	<1%
62	Internet	jurnalmetal.or.id	<1%
63	Internet	www.scribd.com	<1%
64	Publication	Mohammad Parham Dabir, Abbas Bahrami, Morteza Shamanian, Hamed Saffari. "...	<1%
65	Publication	Nitha Nitha, Anis Tandara, Fikran Fikran, Yafet Bontong, Nofrianto Pasae, Petrus...	<1%
66	Publication	Suherman Suherman, Herbanu Dwi Kuncoro, Ilmi Abdullah, Susri Mizhar. "Analisis...	<1%
67	Internet	eprints.undip.ac.id	<1%