

**Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106
Grade B Diameter Pipa 4 Inch 5 Inch dan 6 Inch dengan
Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan
Longitudinal dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness*
*Vickers***

***Evaluation of overlay welding on ASTM 106 Grade B Carbon Steel
Pipes with Diameters of 4 Inch 5 Inch 6 Inch Using SMAW with 2
and 4 Layers and Welding Directions of Longitudinal and
Cirumferential through Vickers Hardness Testing***

SKRIPSI

**Disusun Oleh:
Nama: Astra Permana
NPM: 183030012**



**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS PASUNDAN
BANDUNG
2025**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Astra Permana

Nomor Pokok Mahasiswa : 183030012

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 *plagiarism*.

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

Bandung, 25 juli 2025

Penulis,



Astra Permana

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

N a m a : Astra Permana

NPM : 183030012

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:

“Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106 Grade B Diameter Pipa 4 Inch 5 Inch dan 6 Inch dengan Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan *Longitudinal* dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness Vickers*”

Beserta perangkat yang ada (jika ada). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Pasundan berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pakalan 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, 25 juli 2025

Yang menyatakan,

Astra Permana

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106
Grade B Diameter Pipa 4 Inch 5 Inch dan 6 Inch dengan
Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan
Longitudinal dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness*
*Vickers***



**Nama : Astra Permana
NPM : 183030012**

Pembimbing Utama

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

Pembimbing Pendamping

Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

**Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106
Grade B Diameter Pipa 4 Inch 5 Inch dan 6 Inch dengan
Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan
Longitudinal dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness*
*Vickers***



Nama : Astra Permana
NPM : 183030012

Tanggal sidang skripsi: 25 juli 2025

Ketua : Prof. Ir. Hery Sonawan, M.T.

Sekretaris : Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T.

Anggota : Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA.

Anggota : Dr. Ir. Gatot Santoso, M.T.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT, atas rahmat-nya, kepada kedua orang tua, sehingga mampu menyelesaikan Laporan Usulan Penelitian yang berjudul “Asesmen kekerasan produk las arah longitudinal dan circumfrential” dapat diselesaikan untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Laporan Usulan Penelitian ini.

Dalam penyusunan dan penulisan tidak lepas dari bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak. Kesempatan kali ini penulis menyampaikan terimakasih kepada:

1. Kedua orang tua, atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan kepada saya.
2. Kepada Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan.
3. Kepada Bapak Prof. Ir. Hery Sonawan, M.T. selaku pembimbing I yang selalu memberikan ilmu, arahan, kesempatan, semangat dan motivasi, serta fasilitas kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu.
4. Kepada Bapak Mohammad Reza Hermawan, S.T., M.T. selaku pembimbing II yang selalu memberikan ilmu, arahan, kesempatan, semangat dan motivasi, serta fasilitas kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu.
5. Kepada rekan satu perjuangan Teknik Mesin angkatan 2018 Universitas Pasundan.
6. Sahabat serta seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu oleh penulis atas keterlibatan dan dukungannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Pada Laporan Usulan Penelitian ini masih banyak kekurangan, penulis sudah memaksimalkan sebaik mungkin. Semua bentuk saran dan kritik diterima dengan senang hati. Semoga Laporan Usulan Penelitian ini berfmanfaat bagi pembaca.

Bandung, 25 juli 2025

Penulis,



Astra Permana

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI	VI
DAFTAR GAMBAR.....	IX
DAFTAR TABEL	X
ABSTRAK	XI
ABSTRACT	XII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang	1
2. Rumusan masalah	2
3. Tujuan.....	2
4. Manfaat.....	2
5. Batasan masalah	3
6. Sistematika penulisan	3
BAB II STUDI LITERATUR	5
1. Pengelasan	5
2. Shielded Metal Arc Welding (SMAW)	6
3. Parameter Pengelasan	7
4. Posisi pengelasan	8
5. <i>Carbon Steel</i>	9
6. <i>Welding Overlay Cladding</i>	11

7. Metalografi Mounting.....	11
8. <i>Pemolesan (Polishing)</i>	13
9. <i>Etcing (Etsa)</i>	14
10. Uji <i>Hardness Vickers</i>	15
BAB III METODOLOGI	16
1. Tahapan Penelitian	16
2. Tempat Penelitian.....	17
3. Variabel Penelitian	17
4. Standar Uji <i>Vickers</i>	17
5. Rancang Uji <i>Vickers</i>	19
6. Peralatan Dan Bahan	20
7. Proses Pembuatan Spesimen Uji	20
9. Proses Uji <i>Vickers</i>	23
10. Foto Makro Spesimen Hasil Uji.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	27
1. Pengolahan Data Pengujian <i>Hardness Vickers</i>	27
2. Data Hasil Pengujian	28
a. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 4 Inch	28
b. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 5 Inch	30
c. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 6 Inch	32
3. Hasil Pengolahan Data Uji Kekerasan.....	34
4. Pengolahan Data Menggunakan Desain Faktorial.....	41
5. Interpretasi Data	49
BAB V KESIMPULAN	51
1. Kesimpulan.....	51
2. Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	53

LAMPIRAN.....	56
1. Foto Kegiatan	56
2. Foto Makro Spesimen Hasil Uji	57
3. Sertifikat Dan Data Hasil Pengujian B4T	59
4. Saran	Kesalahan! Bookmark tidak ditentukan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pengelasan [3].	5
Gambar 2. Shielded Metal Arc Welding (SMAW) [7].	6
Gambar 3. Posisi Pengelasan [12].	8
Gambar 4. Diagram Fasa <i>Carbon Steel</i> [14].	9
Gambar 5. Welding Overlay Cladding [18].	11
Gambar 6. Metalografi Mounting [19].	12
Gambar 7. Mesin <i>Polishing</i> [20].	13
Gambar 8. Etcing (Etsa) [21].	14
Gambar 9. Mesin Hardness Vickers [23].	15
Gambar 10. Tahapan Penelitian	
Gambar 11. Lokasi Pengujian	
Gambar 12. Standar Uji Vickers	
Gambar 13. Bahan Spesimen Uji	20
Gambar 14. Pemotongan Spesimen	21
Gambar 15. Spesimen Hasil Pemotongan	21
Gambar 16. Proses Mounting	22
Gambar 17. Proses Pemolesan	22
Gambar 18. Proses Etsa	23
Gambar 19. Spesimen Hasil Etsa	23
Gambar 20. Pengujian Hardness Vickers	23
Gambar 21. Spesifikasi Mesin <i>Hardness Vickers</i>	24
Gambar 22. Titik Piramida Segi Empat	24
Gambar 23. Foto Makro Spesimen Hasil Uji	26
Gambar 24. Diagram 4" C/L 2L/4L	35
Gambar 25. Diagram 5" C/L 2L/4L	37
Gambar 26. Diagram 6" C/L 2L/4L	38
Gambar 27. 5 inch longitudinal 4 layer	39

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Alat Dan Bahan.....	20
Tabel 2. 4" <i>Longitudinal</i> 2 Layer.....	28
Tabel 3. 4" <i>Circumferential</i> 2 Layer	28
Tabel 4. 4" <i>Longitudinal</i> 4 Layer	
Tabel 5. 4" <i>Circumferential</i> 4 Layer	
Tabel 6. 5" <i>Longitudinal</i> 2 Layer.....	30
Tabel 7. 5" <i>Circumferential</i> 2 Layer	30
Tabel 8. 5" <i>Longitudinal</i> 4 Layer.....	31
Tabel 9. 5" <i>Circumferential</i> 4 Layer	31
Tabel 10. 6" <i>Longitudinal</i> 2 Layer.....	32
Tabel 11. 6" <i>Circumferential</i> 2 Layer	32
Tabel 12. 6" <i>Longitudinal</i> 4 Layer.....	33
Tabel 13. 6" <i>Circumferential</i> 4 Layer	33
Tabel 14. Perhitungan Ketidakpastian 4" Long/Circum 2L/4L	35
Tabel 15. Perhitungan Ketidakpastian 5" Long/Circum 2L/4L	36
Tabel 16. Perhitungan Ketidakpastian 6" Long/Circum 2L/4L	38
Tabel 17. Desain Faktorial Area <i>Weld</i>	41
Tabel 18. Desain Faktorial Area HAZ	44
Tabel 19. Desain Faktorial Area Base	47

ABSTRAK

Poros merupakan komponen mekanik yang memiliki peran krusial dalam berbagai aplikasi industri, namun sangat rentan mengalami keausan akibat beban kerja dan kondisi operasional. Proses pengelasan sering diterapkan sebagai metode reparatif untuk mengembalikan fungsi poros, namun perlu dilakukan evaluasi terhadap sifat mekanik hasil pengelasan, khususnya kekerasan material. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh arah pengelasan (longitudinal dan circumferential) serta jumlah lapisan las (2 dan 4 layer) terhadap distribusi kekerasan pada pipa baja karbon ASTM A106 Grade B. Proses pengelasan dilakukan menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dengan elektroda AWS E7018, sedangkan pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode Vickers sesuai standar ASTM E92.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengelasan dengan orientasi longitudinal cenderung menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengelasan circumferential. Nilai kekerasan maksimum sebesar 311,67 HV diperoleh pada spesimen dengan pengelasan longitudinal 4 lapisan, meskipun disertai deviasi yang tinggi, mengindikasikan ketidakhomogenan struktur mikro. Sebaliknya, spesimen dengan pengelasan longitudinal 2 lapisan menunjukkan kekerasan tinggi yang stabil, yaitu 255,33 HV, dengan deviasi yang rendah. Penambahan jumlah lapisan tidak secara konsisten meningkatkan kekerasan, khususnya pada pengelasan circumferential, yang justru mengalami penurunan kekerasan akibat akumulasi panas yang berlebihan.

Berdasarkan temuan tersebut, kombinasi parameter pengelasan yang paling optimal untuk aplikasi perbaikan poros aus adalah pengelasan longitudinal dengan dua lapisan, karena mampu memberikan kekerasan tinggi yang stabil serta efisiensi secara teknis dan ekonomis.

Kata Kunci: pengelasan, kekerasan Vickers, longitudinal, circumferential, baja karbon

ABSTRACT

Shafts are critical mechanical components in various industrial applications but are highly susceptible to wear due to operational loads and conditions. Welding is commonly employed as a repair method to restore shaft functionality; however, a thorough evaluation of the welded material's mechanical properties, particularly hardness, is essential. This study aims to analyze the influence of welding direction (longitudinal and circumferential) and the number of weld layers (2 and 4 layers) on the hardness distribution of ASTM A106 Grade B carbon steel pipes. The welding process was conducted using the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) method with AWS E7018 electrodes, while hardness testing was performed using the Vickers method in accordance with ASTM E92 standards.

The results indicate that longitudinal welding produces higher hardness values compared to circumferential welding. The highest hardness value of 311.67 HV was recorded in specimens welded longitudinally with 4 layers, although this was accompanied by a high standard deviation, suggesting microstructural inhomogeneity. Conversely, the longitudinal 2-layer specimens exhibited a more stable and consistently high hardness of 255.33 HV with a low deviation. Increasing the number of layers did not consistently enhance hardness, particularly in circumferential welding, where excessive heat accumulation led to a reduction in hardness.

Based on these findings, the most optimal welding parameter combination for repairing worn shafts is longitudinal welding with two layers, as it provides high, stable hardness and is technically and economically efficient.

Keywords: welding, Vickers hardness, longitudinal, circumferential, carbon steel

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Dalam dunia industri, poros merupakan salah satu komponen mekanik yang memiliki peran sangat penting, yaitu sebagai media transmisi daya dan putaran pada berbagai jenis mesin dan peralatan. Namun, seiring waktu, poros dapat mengalami degradasi kinerja akibat keausan yang disebabkan oleh gesekan, beban berlebih, maupun korosi. Kondisi ini dapat menurunkan efisiensi serta keandalan sistem secara keseluruhan. Salah satu metode yang umum diterapkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah melalui proses perbaikan dengan teknik pengelasan, yang bertujuan untuk memulihkan dimensi serta sifat mekanik poros agar mendekati kondisi semula.

Dalam proses perbaikan tersebut, evaluasi sifat mekanik hasil pengelasan, khususnya sifat kekerasan, menjadi hal yang sangat krusial, mengingat kekerasan merupakan indikator penting dalam menentukan ketahanan aus suatu material. Oleh karena itu, pengujian kekerasan Vickers digunakan dalam penelitian ini karena mampu memberikan informasi yang akurat pada skala mikro, termasuk pada area yang sempit seperti logam induk (base metal), zona pengaruh panas (heat affected zone), dan logam las (weld metal).

Penelitian ini dilakukan pada spesimen pipa baja karbon sebagai representasi dari material poros yang umum digunakan di industri. Proses pengelasan diterapkan dalam dua arah berbeda, yaitu longitudinal dan circumferential, guna mensimulasikan variasi kondisi aktual perbaikan poros di lapangan. Metode pengelasan yang digunakan adalah Shielded Metal Arc Welding (SMAW) karena metode ini bersifat praktis, fleksibel, dan banyak diaplikasikan dalam berbagai sektor industri. Selain itu, variasi jumlah lapisan pengelasan, yakni dua lapis (2L) dan empat lapis (4L), digunakan untuk mengetahui pengaruh ketebalan serta jumlah lapisan terhadap distribusi kekerasan pada hasil pengelasan.

Melalui pengujian kekerasan Vickers terhadap spesimen hasil pengelasan, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kombinasi arah pengelasan dan jumlah lapisan yang menghasilkan sifat kekerasan optimal. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang efektif dan ekonomis dalam perbaikan poros aus, serta memberikan kontribusi terhadap peningkatan kualitas perbaikan komponen mesin melalui pendekatan teknik pengelasan yang tepat dan terukur.

2. Rumusan masalah

1. Bagaimana pengaruh arah pengelasan (*Longitudinal* dan *Circumferential*) terhadap distribusi nilai kekerasan pada pipa baja karbon hasil pengelasan?
2. Bagaimana pengaruh jumlah lapisan las (2 layer dan 4 layer) terhadap nilai kekerasan pada area *Weld*, *HAZ*, *Base Metal* ?
3. Bagaimana pengaruh variasi ukuran 4 Inch, 5 Inch, dan 6 Inch terhadap nilai kekerasan pada area *Weld*, *HAZ*, *Base Metal* ?
4. Kombinasi arah pengelasan dan jumlah lapisan seperti apa yang menghasilkan distribusi kekerasan paling optimal untuk perbaikan poros aus?

3. Tujuan

1. Menganalisis pengaruh arah pengelasan (*Longitudinal* dan *Circumferential*) terhadap distribusi kekerasan pada pipa baja karbon ASTM A106 Grade B.
2. Menganalisis pengaruh jumlah lapisan las (2 layer dan 4 layer) terhadap nilai kekerasan pada area *Weld*, *HAZ*, *Base Metal*.
3. Mengidentifikasi kombinasi arah pengelasan, jumlah lapisan, dan variasi ketebalan spesimen yang menghasilkan kekerasan optimal sebagai acuan metode perbaikan poros aus secara efektif dan ekonomis.
4. Mendapatkan nilai kekerasan dan memberikan rekomendasi teknis terhadap metode pengelasan yang paling sesuai untuk perbaikan poros berdasarkan hasil uji kekerasan *Vickers*.

4. Manfaat

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini diharapkan dapat memperluas pemahaman mengenai pengaruh arah pengelasan, variasi ukuran pipa, dan jumlah lapisan pengelasan terhadap kekerasan material, khususnya pada pipa baja karbon yang sering digunakan dalam aplikasi industri.
2. Hasil penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai panduan praktis dalam proses perbaikan poros mesin yang mengalami keausan, sehingga perbaikan dapat dilakukan dengan metode pengelasan yang lebih tepat, efisien, dan tahan lama.

3. Penelitian ini juga dapat menjadi bahan referensi bagi pengembangan riset selanjutnya di bidang teknik pengelasan dan rekayasa material, terutama dalam hal peningkatan performa komponen hasil perbaikan.

5. Batasan masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Material pipa yang digunakan adalah pipa *Carbon Steel* ASTM Grade B.
2. Pengelasan yang dilakukan adalah pengelasan *Shielding Metal Arc Welding* (SMAW).
3. Arah pengelasan yaitu *Longitudinal* dan *Circumferential*.
4. Posisi pengelasan adalah 1G.
5. Elektroda yang digunakan adalah AWS E7018.
6. Diameter pipa 4 inch, 5 inch dan 6 inch SCH 40.
7. Jumlah *welding* pass adalah 5 pass.
8. Jumlah *welding layer* adalah 2 dan 4 layer.
9. Pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan dengan metode *Hardness Vickers*.

6. Sistematika penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, lingkup penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II STUDI LITERATUR

Bab ini berisi tentang kumpulan penilitian dari penelitian-penelitian yang ada di jurnal-jurnal terverifikasi dan berisi tentang informasi-informasi yang berkaitan tentang *welding overlay cladding*.

BAB II METODOLOGI

Pada bab ini berisi tentang tahapan penelitian, tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, setup, metode pengukuran/pengujian, dan metode pengolahan data.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisikan tentang data hasil pengujian yang telah dilakukan. Pada bab ini juga ditambahkan tabel dan gambar hasil pengujian pada variabel eksperimen yang telah ditetapkan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini dibahas tentang kesimpulan dan saran mengenai hal-hal penting yang diperoleh dari hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Pada bab ini disebutkan buku, artikel, dan sumber lain yang menjadi acuan skripsi ini.

LAMPIRAN

BAB II STUDI LITERATUR

1. Pengelasan

Pengelasan adalah teknik penyambungan logam dengan mencairkan sebagian material induk dan logam pengisi, baik dengan tambahan maupun tanpa tambahan material, untuk menciptakan sambungan logam yang terus menerus [1]. Proses ini membutuhkan energi panas yang cukup untuk melelehkan bagian logam di area sambungan dan menghasilkan endapan las. Energi panas dalam pengelasan biasanya terkonsentrasi pada satu titik dan bergerak sepanjang sumbu memanjang, memungkinkan logam dasar untuk mengalami pemanasan dan pendinginan, yang berpotensi memengaruhi sifat-sifatnya [2]. Pengelasan merupakan metode yang sangat umum digunakan dalam industri, terutama untuk perbaikan dan pemeliharaan berbagai komponen alat yang berbahan logam.

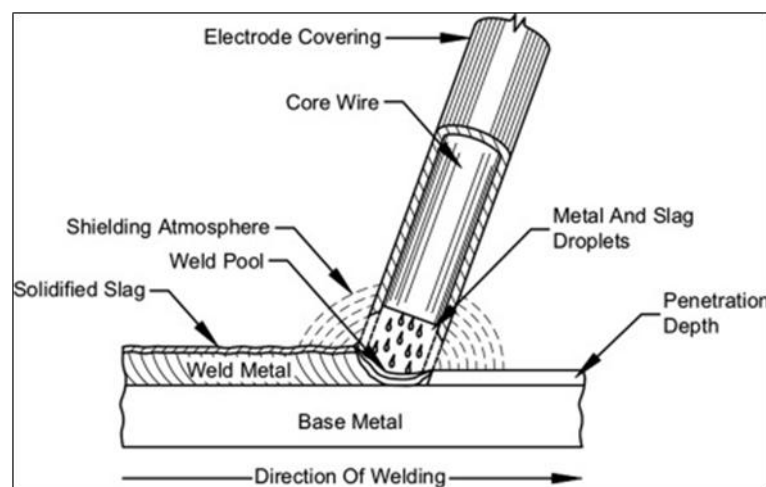


Gambar 1. Pengelasan [3].

berdasarkan klasifikasi cara kerja dapat dibagi dalam tiga kelompok yaitu pengelasan cair, pengelasan tekan dan pematrian. Pengelasan cair adalah suatu cara pengelasan dimana benda yang akan disambung dipanaskan sampai mencair dengan sumber energi panas. Cara pengelasan yang paling banyak digunakan adalah pengelasan cair dengan busur (las busur listrik) dan gas [4]. Jenis dari las busur listrik ada 4 yaitu las busur dengan elektroda terbungkus, las busur gas (TIG, MIG, las busur CO₂), las busur tanpa gas, las busur rendam. Jenis dari las busur elektroda terbungkus salah satunya adalah las SMAW (*Shielding Metal Arc Welding*).

2. Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding adalah sebuah proses penyambungan logam yang menggunakan energi panas untuk mencairkan benda kerja dan elektroda (bahan pengisi) [5]. Energi panas pada proses SMAW dihasilkan karena adanya lonjakan ion (katoda dan anoda) listrik yang terjadi pada ujung elektroda dan permukaan material. Pada proses pengelasan SMAW jenis pelindung yang digunakan adalah selaput fluks yang terdapat pada elektroda. Fluks pada elektroda SMAW berfungsi untuk melindungi logam las yang mencair saat proses pengelasan berlangsung. Fluks ini akan menjadi slag ketika sudah padat [6].



Gambar 2. Shielded Metal Arc Welding (SMAW) [7].

Elektroda ini selama pengelasan akan mengalami pencairan bersama dengan logam induk dan membeku bersama, menjadi bagian kampuh las [8]. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa arus busur listrik yang terjadi. Ketika ujung elektroda didekatkan pada logam induk akan terjadi busur api listrik yang akan menghasilkan panas. Panas inilah yang mencairkan ujung elektroda (kawat las) dan benda kerja secara setempat [9]. Dengan adanya pencairan ini maka kampuh las akan terisi oleh logam cair yang berasal dari elektroda dan logam induk, terbentuklah kawah cair, lalu membeku maka terjadilah logam lasan (*weldment*) dan terak (*slag*).

Pada proses pengelasan SMAW, parameter yang berpengaruh pada kualitas hasil pengelasan adalah arus dan waktu pengelasan atau kecepatan pengelasan. Kemudian besar arus dan waktu pengelasan tersebut akan menentukan *heat input* pada daerah lasan [10].

3. Parameter Pengelasan

Dalam pengelasan terdapat beberapa parameter, yaitu :

- Jenis dan diameter elektroda

Diameter elektroda untuk las SMAW, yang dipakai dalam pengelasan sangat mempengaruhi besar kecilnya amper yang dipakai. Hal tersebut berhubungan dengan laju peleburan atau laju penimbunan dan kedalaman penetrasi. Biasanya pada elektroda yang akan dipakai sudah direkomendasikan batasan besarnya amper, posisi pengelasan dan polaritas yang dipakai.

- Tegangan busur las

Tingginya tegangan busur tergantung pada jenis elektroda yang digunakan dan panjang busur yang diinginkan. Tegangan busur yang diperlukan berbanding lurus dengan panjang busur.

- Besar arus las

Besarnya arus listrik yang diperlukan tergantung dari bahan dan ukuran dari sambungan las, geometri sambungan, posisi pengelasan, jenis elektroda dan diameter inti elektroda. Besarnya arus listrik yang akan digunakan dapat pada spesifikasi elektroda yang sudah direkomendasikan oleh pabrik pembuat elektroda. Hal ini harus dipenuhi karena penggunaan arus listrik yang tidak tepat (terlalu besar) dapat mengakibatkan hasil lasan yang tidak sempurna.

- Kecepatan pengelasan (*welding speed*)

Kecepatan pengelasan adalah laju dari elektroda pada waktu proses pengelasan. Kecepatan maksimum mengelas sangat bergantung pada keterampilan juru las (*welder*), jenis elektroda, dimensi ukuran elektroda, material yang dilas, geometri kampuh las dan prosedur dan kualifikasi las. Kecepatan pengelasan berbanding lurus dengan besar arus. Kecepatan pengelasan memerlukan arus yang besar. Semakin cepat langkah dalam pengelasan semakin kecil panas yang ditimbulkan sehingga perubahan bentuk material dapat dihindari pada area HAZ. Hasil pengelasan terbaik akan didapatkan dengan cara mengatur panjang busur nyala, mengatur kecepatan pengelasan dan pemakanan elektroda (*feeding*) secara konstan sesuai dengan kecepatan lebur elektroda.

- Polaritas listrik

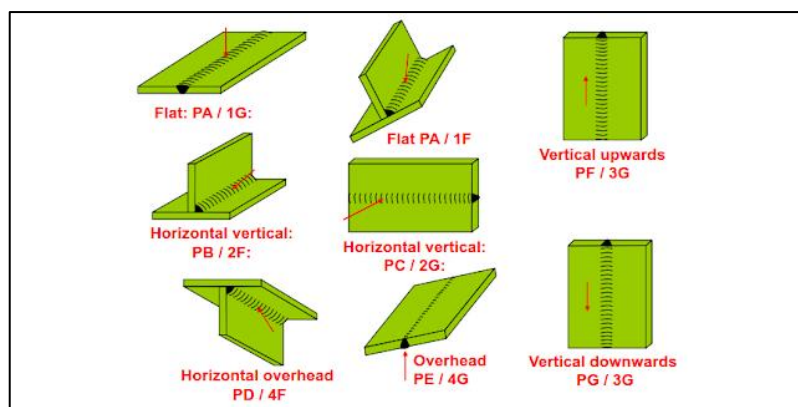
Pemilihan polaritas tergantung pada jenis bahan pembungkus elektroda, kapasitas panas sambungan. Bila titik cair bahan induk tinggi dan kapasitas panas besar sebaiknya digunakan polaritas lurus (elektrodanya dihubungkan dengan kutub negatif), sedangkan bila kapasitas panas kecil seperti pada plat tipis maka dianjurkan menggunakan polaritas balik (elektrodanya dihubungkan dengan kutub positif).

- Penembusan (Penetrasi)

Penembusan atau penetrasi dalam pengelasan adalah untuk menghasilkan kualitas sambungan yang baik. Kedalam penembusan atau penetrasi yang baik dipengaruhi, jenis elektroda, polaritas arus yang dipakai, besar kecilnya arus las, kecepatan dalam mengelas dan posisi pengelasan. Semakin besar arus listrik maka akan semakin kuat daya tembusnya.

4. Posisi pengelasan

Posisi pengelasan adalah faktor penentu dari keberhasilan pengerjaan pengelasan itu sendiri, sehingga posisi pengelasan mempunyai tingkat kesulitan yang harus dicapai, yang tidak sama satu sama lain [8]. Karakter pengelasan secara umum terbagi dalam dua kategori utama yaitu pengelasan satu *layer* (*single pass*) atau dikenal dengan sebutan *Fillet Welding*, dengan simbol F. yang kedua adalah pengelasan untuk beberapa *layer* (*multi-pass*) atau dikenal dengan sebutan *Groove Welding*, dengan simbol G [11].



Gambar 3. Posisi Pengelasan [12].

Aturan penomoran untuk sambungan las *fillet* pada setiap posisi pengelasan adalah sebagai berikut:

1F = Posisi pengelasan datar (*Plat Position*)

2F = Posisi pengelasan horizontal (*Horizontal Position*)

3F = Posisi pengelasan vertical (*Vertical Position*)

4F = Posisi pengelasan diatas kepala (*Over head Position*)

Aturan penomoran untuk sambungan las *Groove* pada setiap posisi pengelasan adalah sebagai berikut:

1G = Posisi pengelasan datar (*Plat Position*)

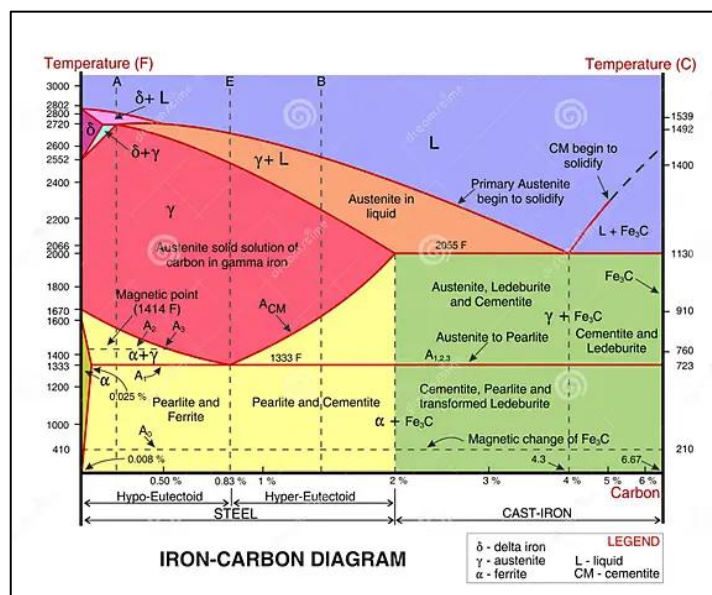
2G = Posisi pengelasan horizontal (*Horizontal Position*)

3G = Posisi pengelasan vertical (*Vertical Position*)

4G = Posisi pengelasan diatas kepala (*Over head Position*)

5. Carbon Steel

Carbon Steel atau baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe) dan karbon (C) [13]. Dimana besi merupakan unsur dasar dan karbon sebagai unsur paduan utamanya. Dalam proses pembuatan baja akan ditemukan pula penambahan kandungan unsur kimia lain seperti sulfur (S), fosfor (P), silikon (Si), mangan (Mn) dan unsur kimia lainnya sesuai dengan sifat baja yang diinginkan. Baja karbon memiliki kandungan unsur karbon dalam besi sebesar 0,2% hingga 2,14%, dimana kandungan karbon tersebut berfungsi sebagai unsur penguat dalam struktur baja.



Gambar 4. Diagram Fasa *Carbon Steel* [14].

Dalam pengaplikasiannya baja karbon sering digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan alat-alat perkakas, komponen mesin, struktur bangunan, dan lain sebagainya. Menurut pendefinisian ASM handbook vol. 1:148 (1993), baja karbon dapat diklasifikasikan berdasarkan jumlah presentase komposisi kimia karbon dalam baja yakni sebagai berikut:

- Baja karbon rendah (*Low carbon steel*)

Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan unsur karbon dalam struktur baja kurang dari 0,3% C. Baja karbon rendah ini memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi akan tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah [15]. Pada umumnya baja jenis ini digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan komponen struktur bangunan, pipa gedung, jembatan, bodi mobil, dan lain-lainya.

- Baja karbon sedang (*Medium carbon steel*)

Baja karbon sedang merupakan baja karbon dengan persentase kandungan karbon pada besi sebesar 0,3% C – 0,59% C. Baja karbon ini memiliki kelebihan bila dibandingkan dengan baja karbon rendah, baja karbon sedang memiliki sifat mekanis yang lebih kuat dengan tingkat kekerasan yang lebih tinggi dari pada baja karbon rendah. Besarnya kandungan karbon yang terdapat dalam besi memungkinkan baja untuk dapat dikeraskan dengan 11 memberikan perlakuan panas (*heat treatment*) yang sesuai. Baja karbon sedang biasanya digunakan untuk pembuatan poros, rel kereta api, roda gigi, baut, pegas, dan komponen mesin lainnya.

- Baja karbon tinggi (*High carbon steel*)

Baja karbon tinggi adalah baja karbon yang memiliki kandungan karbon sebesar 0,6% C – 1,4% C. Baja karbon tinggi memiliki sifat tahan panas, kekerasan serta kekuatan tarik yang sangat tinggi akan tetapi memiliki keuletan yang lebih rendah sehingga baja karbon ini menjadi lebih getas [16]. Baja karbon tinggi ini sulit diberi perlakuan panas untuk meningkatkan sifat kekerasannya, hal ini dikarenakan baja karbon tinggi memiliki jumlah martensit yang cukup tinggi sehingga tidak akan memberikan hasil yang optimal pada saat dilakukan proses pengerasan permukaan. Dalam pengaplikasiannya baja karbon tinggi banyak digunakan dalam pembuatan alat-alat perkakas seperti palu, gergaji, pembuatan kikir, pisau cukur, dan sebagainya.

6. *Welding Overlay Cladding*

Weld overlay cladding adalah suatu proses pengelasan dengan cara penambahan lapisan logam atau memadukan material induk dengan logam pelapis. Proses *Weld Overlay Cladding* dapat digunakan untuk menghambat laju korosi dengan menambahkan lapisan logam yang bersifat tahan karat pada permukaan baja karbon dan menambah kekuatan pada baja [17].

Salah satu cara untuk menghambat laju korosi pada baja karbon adalah dengan penambahan lapisan pada permukaan baja yang dikenal dengan proses cladding. Proses cladding dapat dilakukan dengan cara pengelasan atau yang lebih dikenal dengan proses *Weld Overlay Cladding*, yaitu melapisi kembali suatu material dengan proses pengelasan yang menggunakan elektroda yang memiliki ketahanan terhadap korosi, salah satunya yaitu elektroda stainless steel E 316.



Gambar 5. Welding Overlay Cladding [18].

7. **Metalografi Mounting**

Metalografi mounting adalah salah satu tahap kritis dalam proses preparasi sampel untuk analisis metalografi, yang melibatkan pengaturan dan pemasangan spesimen logam dalam bahan transparan atau epoksi [19].

Pemilihan Sampel: Langkah pertama dalam metalografi mounting adalah pemilihan sampel logam yang akan dianalisis. Sampel harus diambil secara representatif dari bagian yang diinginkan untuk memastikan bahwa struktur mikroskopis yang diamati mewakili keseluruhan material.

1. **Pemilihan Sampel:** Langkah pertama dalam metalografi mounting adalah pemilihan sampel logam yang akan dianalisis. Sampel harus diambil secara

representatif dari bagian yang diinginkan untuk memastikan bahwa struktur mikroskopis yang diamati mewakili keseluruhan material.

2. **Pembersihan dan Preparasi:** Sebelum mounting, sampel harus dibersihkan secara menyeluruh untuk menghilangkan kontaminasi dan partikel yang dapat mengganggu analisis. Proses ini biasanya melibatkan pencucian dengan pelarut organik dan pembersihan mekanis dengan sikat atau alat lainnya.
3. **Mounting:** Setelah sampel bersih, langkah berikutnya adalah mounting. Ini melibatkan penempatan sampel dalam bahan mounting, yang dapat berupa resin epoksi, akrilik, atau bahan transparan lainnya. Sampel ditempatkan dalam cetakan mounting dan bahan mounting dicurahkan di sekitarnya. Proses ini memastikan bahwa sampel terjepit secara stabil dan merata di dalam bahan mounting.
4. **Pengerasan:** Setelah mounting, bahan mounting harus diinkubasi atau diizinkan untuk mengeras sesuai dengan instruksi produsen. Proses pengerasan ini penting untuk memastikan kekokohan dan stabilitas sampel selama proses penggilingan dan polishing berikutnya.
5. **Penggilingan dan Polishing:** Setelah bahan mounting mengeras, langkah berikutnya adalah penggilingan dan *polishing*. Ini dilakukan untuk menghasilkan permukaan yang halus dan datar, yang diperlukan untuk pengamatan struktur mikroskopis dengan jelas di bawah mikroskop.
6. **Etching:** Pada tahap ini, sampel dapat *dietching* menggunakan larutan kimia tertentu untuk mengungkapkan struktur mikroskopis yang diinginkan dengan lebih jelas. *Etching* membantu dalam membedakan antara fase yang berbeda, mengungkapkan batas butir, dan menyediakan informasi penting tentang mikrostruktur bahan.



Gambar 6. Metalografi Mounting [19].

8. Pemolesan (*Polishing*)

Proses *polishing* yang bertujuan untuk memperoleh permukaan spesimen yang rata, bersih, dan bebas dari goresan atau cacat permukaan. Proses ini sangat penting karena kualitas permukaan spesimen akan sangat mempengaruhi keakuratan hasil pengujian kekerasan, khususnya pada metode uji mikro seperti *Vickers*, yang membutuhkan permukaan halus untuk menghasilkan indentasi yang jelas dan dapat diukur secara presisi.



Gambar 7. Mesin *Polishing* [20].

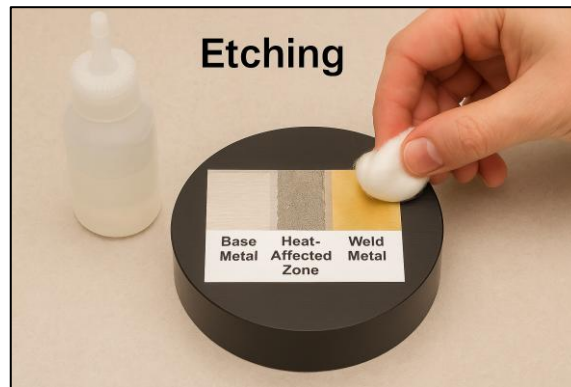
Polishing dilakukan secara bertahap, dimulai dengan penggunaan abrasive kasar hingga halus. Biasanya, proses ini diawali dengan amplas grit kasar seperti P240 atau P320, lalu dilanjutkan dengan grit yang lebih halus seperti P600, P800, hingga P1200. Setiap tahapan polishing dilakukan secara menyilang (*cross direction*) dari tahap sebelumnya untuk memastikan seluruh goresan dari tahap sebelumnya terhapus sempurna.

Setelah tahap amplas kering, proses dilanjutkan dengan *polishing* basah menggunakan kain poles (*polishing cloth*) dan larutan abrasif seperti alumina atau diamond paste dengan ukuran partikel mikron. Tahapan ini menghasilkan permukaan yang benar-benar halus dan reflektif (*mirror finish*), yang memungkinkan indentasi *Vickers* terlihat jelas di bawah mikroskop.

Proses *polishing* harus dilakukan dengan tekanan dan waktu yang tepat untuk menghindari terjadinya *over-polishing*, yaitu kondisi di mana struktur mikro spesimen bisa berubah akibat panas berlebih. Oleh karena itu, pendinginan dan kontrol tekanan menjadi aspek penting selama proses ini. Hasil akhir dari polishing yang baik akan sangat menentukan kualitas dan keandalan data hasil uji kekerasan yang diperoleh.

9. Etching (Etsa)

Etching merupakan langkah penting yang bertujuan untuk memperjelas struktur mikro material dengan cara mereaksikan permukaan logam terhadap larutan kimia tertentu. Proses ini memungkinkan pengamatan lebih detail terhadap batas-batas butir, fasa logam, serta zona-zona yang terbentuk akibat proses pengelasan, seperti logam induk, zona pengaruh panas (HAZ), dan logam las.



Gambar 8. Etching (Etsa) [21].

Larutan etchant yang digunakan disesuaikan dengan jenis material spesimen. Pada penelitian ini, karena material yang digunakan adalah baja karbon, maka larutan etchant yang umum dipakai adalah Nital, yaitu campuran antara asam nitrat (HNO_3) dan alkohol (biasanya etanol) dengan konsentrasi 2–5%. Etching dilakukan dengan cara mengoleskan atau mencelupkan permukaan spesimen ke dalam larutan selama beberapa detik hingga muncul perubahan warna yang menandakan bahwa struktur mikro mulai tampak.

Waktu dan konsentrasi etching harus dikontrol dengan baik. *Etching* yang terlalu singkat dapat menyebabkan struktur mikro tidak terlihat dengan jelas, sementara etching yang terlalu lama dapat merusak detail mikrostruktur atau menimbulkan korosi berlebih. Oleh karena itu, proses ini biasanya dilakukan sambil diamati secara berkala di bawah mikroskop.

Setelah *etching*, spesimen kemudian dicuci dengan air bersih dan dikeringkan menggunakan kain bebas serat atau udara bertekanan untuk menghindari terbentuknya noda atau korosi lanjutan. Spesimen yang telah melalui proses *etching* ini selanjutnya siap untuk dianalisis menggunakan mikroskop optik atau untuk proses pengujian kekerasan, seperti uji *Vickers*, guna melihat distribusi kekerasan pada tiap zona las dengan lebih akurat.

10. Uji *Hardness Vickers*

Kekerasan (*Hardness*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa penetrasi dan kekuatan (*Strength*) yaitu kemampuan material logam dalam menerima gaya berupa tegangan tanpa mengalami patah [22]. Kedua sifat mekanik logam tersebut diatas merupakan sifat mekanik yang menyatakan kemampuan suatu logam atau material dalam menerima suatu beban atau gaya tanpa mengalami kerusakan pada logam tersebut. Untuk mengetahui konsep-konsep sifat mekanik diatas dilakukan uji-uji mekanik yang terdiri dari uji kekerasan (*Hardness Test*) yang berupa uji kekerasan *micro vickers* dimana dalam pengujian kekerasan mikro itu digunakan indentor *Vickers* dan dilaksanakan berdasarkan standar ASTM E384. Hasil dari pengukuran bekas indentasi dapat diketahui.



Gambar 9. Mesin Hardness Vickers [23].

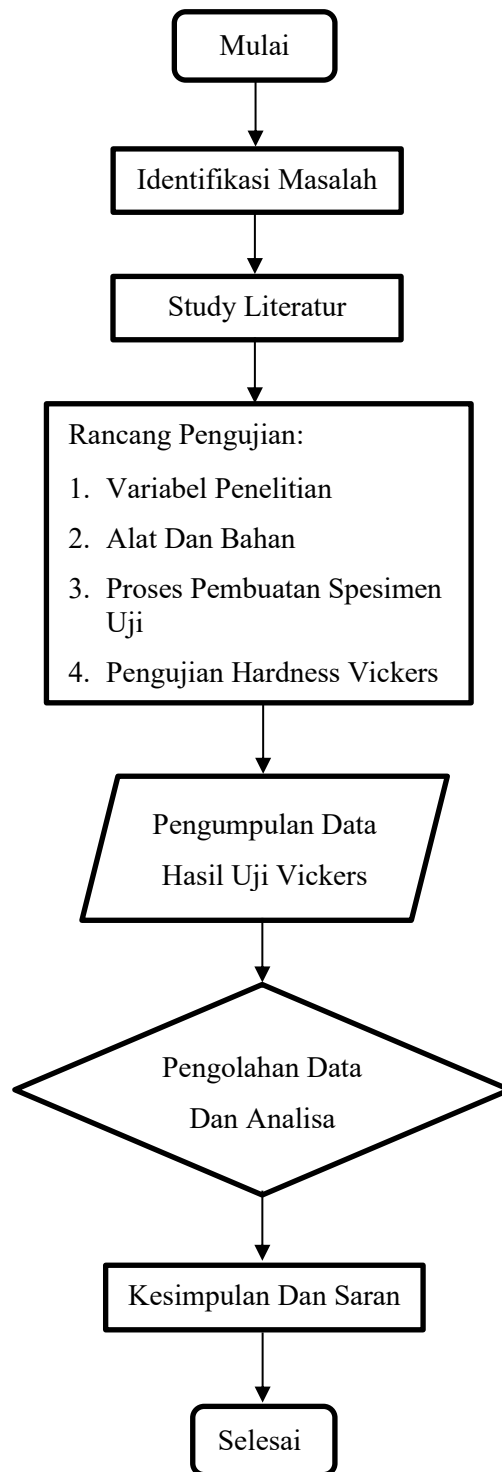
Metode pengujian yang di tunjukan adalah pengujian kekerasan dengan cara pengujian sebagai berikut:

1. Mengukur dimensi spesimen uji yaitu lebar, tebal dan panjang [24].
2. Menghitung diameter (d_1 dan d_2).
3. Meletakkan spesimen uji pada dudukan alat uji.
4. Mengoperasikan alat uji micro hardness *Vickers*.

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan Penelitian

Untuk melakukan pengujian dengan benar, metode yang harus diterapkan sebagaimana yang diperlihatkan di dalam diagram alur berikut:

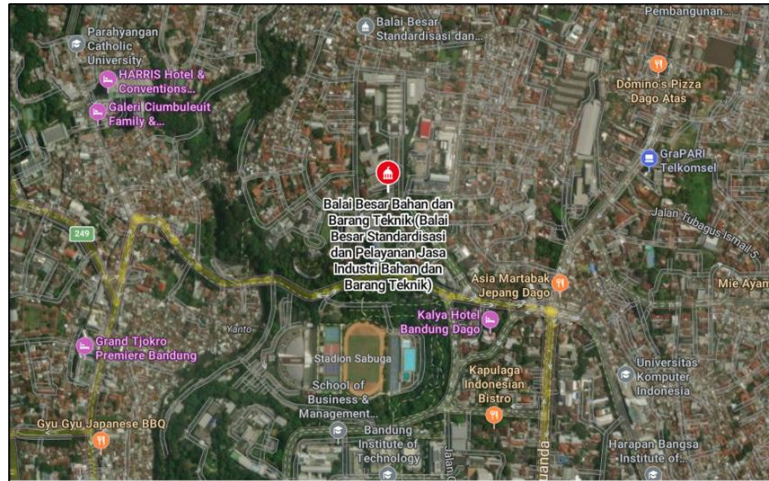


Gambar 10. Tahapan Penelitian

2. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan di lakukan di **Balai Besar Bahan dan Barang Teknik (B4T)**

Alamat: Jl. Sangkuriang No. 14 Dago. Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40135.



Gambar 11. Lokasi Pengujian

3. Variabel Penelitian

Variabel Penelitian:

Input

- Material : *Carbon Steel Pipe* ASTM 106 Grade B
- Pengelasan : *Shielding Metal Arc Welding*
- Arah Pengelasan : *Longitudinal* dan *Circumferential*
- Diameter Pipa : 4 Inch, 5 Inch, dan 6 Inch SCH 40
- Welding Layer : 2 dan 4 Layer

Output

- Mengetahui nilai kekerasan HV.
- Mengetahui pengaruh arah pengelasan, diameter pipa, dan jumlah layer.

4. Standar Uji *Vickers*

ASTM E92 adalah standar pengujian untuk *Hardness Vickers* pada logam, baik untuk mikro maupun makro, tergantung pada besar beban uji yang digunakan.

Ringkasan ASTM E92

1. Indentor:

- Berlian bentuk piramida segi empat, sudut 136° antar bidang.

2. Kisaran Beban:

- Dari 1 gf hingga 100 kgf, tergantung skala mikro atau makro.
- Contoh umum: 100 gf, 500 gf, 1 kgf, 10 kgf, dst.

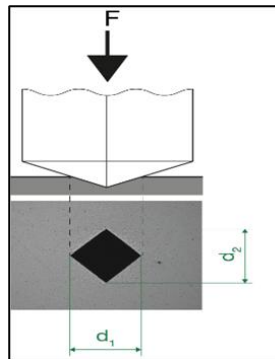
3. Durasi Gaya Uji:

- Umumnya antara 10 hingga 15 detik.

4. Perhitungan Kekerasan:

$$HV = \frac{1.854 \times F}{d^2}$$

- HV: Nilai kekerasan *Vickers*
- F: Beban dalam kgf
- d: Panjang rata-rata diagonal bekas indentasi (mm)



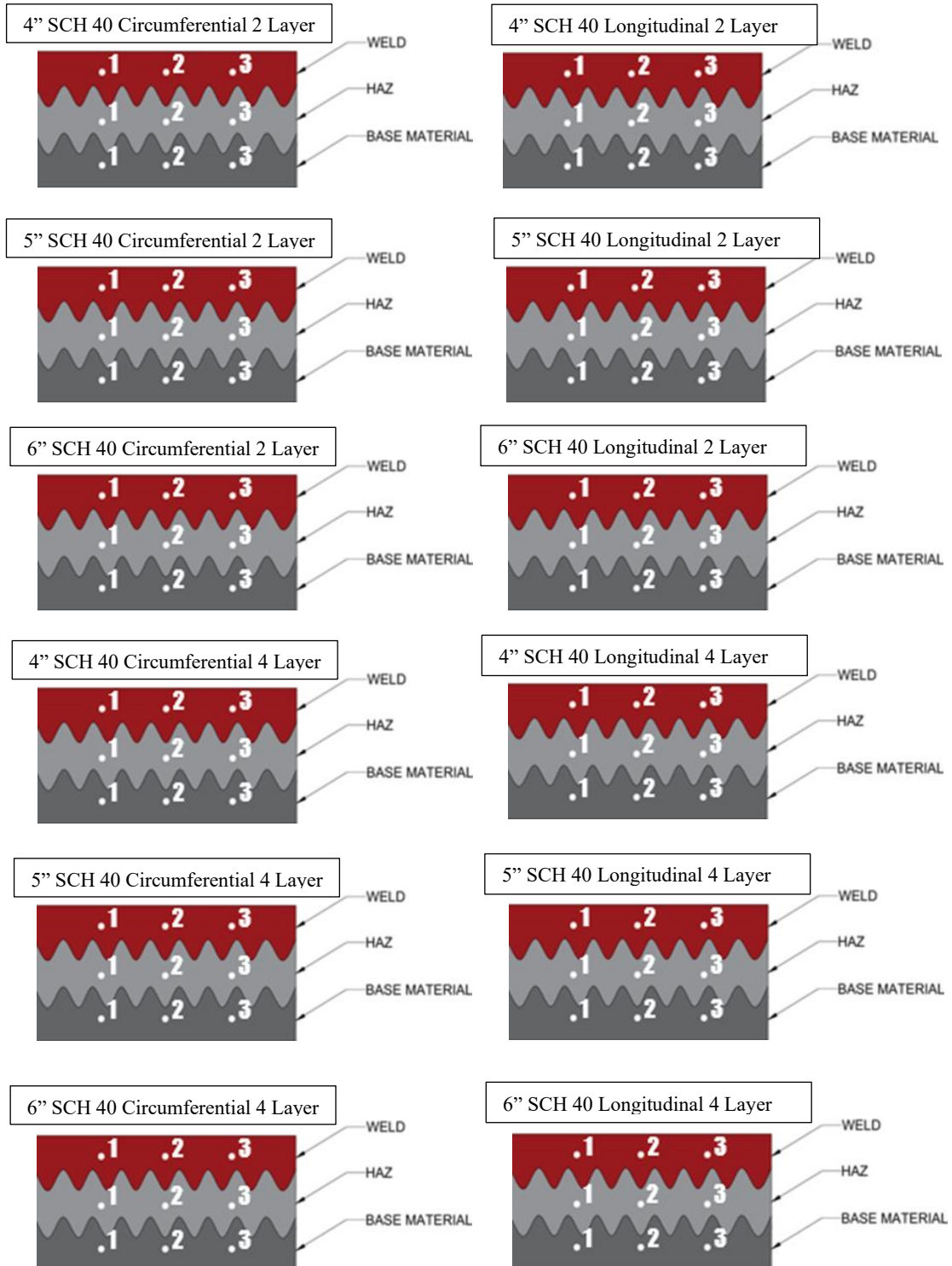
Gambar 12. Standar Uji Vickers

5. Persyaratan Permukaan:

- Permukaan harus cukup halus untuk menghasilkan bekas indentasi yang jelas.
- Tidak boleh ada lapisan oksida, kontaminasi, atau goresan.

5. Rancang Uji *Vickers*

Pada penelitian ini terdapat 12 spesimen yang akan di uji, terdiri dari tiga daerah yaitu *Weld*, *HAZ*, dan *Base Material*. Di setiap spesimen terdiri dari 9 titik uji, masing-masing 3 titik setiap daerah.



6. Peralatan Dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini anatara lain:

Tabel 1. Alat Dan Bahan

No.	Alat Dan Bahan	Jumlah	Satuan
1	Carbon Steel Pipe ASTM 106 Grade B 4" SCH 40	4	Buah
2	Carbon Steel Pipe ASTM 106 Grade B 5" SCH 40	4	Buah
3	Carbon Steel Pipe ASTM 106 Grade B 6" SCH 40	4	Buah
4	Sarung Tangan Karet	1	Pasang
5	Lilin/Malam	12	Buah
6	Pipa PVC	1	Meter
7	Resin	1	Buah
8	Katalis	1	Buah
9	Amplas grid 800 dan 1000	4	Buah
10	Mesin Polishing	1	Buah
11	Nital (NHO3)	1	Buah
12	Alkohol (etanol)	1	Buah
13	Mesin Vickers Hardness	1	Buah

7. Proses Pembuatan Spesimen Uji

a. Persiapan Bahan

Bahan yang akan di uji berasal dari spesimen yang telah di lakukan uji Tarik.

Potongan spesimen diambil dari bagian yang masih utuh dan tidak mengalami deformasi permanen akibat uji tarik, sehingga tetap bisa mewakili kondisi material asli.



Gambar 13. Bahan Spesimen Uji

b. Proses pemotongan

Pemotongan spesimen uji dilakukan secara manual menggunakan gergaji tangan untuk menghindari timbulnya panas berlebih yang dapat mempengaruhi nilai kekerasan pada area pengujian.



Gambar 14. Pemotongan Spesimen

Potongan spesimen menggunakan gergaji manual sebagai persiapan awal sebelum proses mounting dan uji kekerasan. Gambar berikut adalah spesimen yang telah di potong dan siap untuk proses selanjutnya.



Gambar 15. Spesimen Hasil Pemotongan

- c. Proses *mounting* dilakukan dengan metode *cold mounting* menggunakan bahan resin bening dan katalis sebagai pengeras dengan campuran 10 banding 1. Campuran resin dan katalis dituangkan ke dalam cetakan hingga seluruh permukaan spesimen terendam, kemudian dibiarkan mengeras selama satu atau dua hari hingga membentuk blok padat yang memudahkan proses pemolesan dan pengujian kekerasan.



Gambar 16. Proses Mounting

- d. Proses pemolesan (*polishing*) dilakukan dengan menggunakan kertas amplas secara bertahap, dimulai dari grit 800 hingga 1000, untuk menghilangkan goresan dan menghasilkan permukaan spesimen yang halus dan rata agar memudahkan dalam pengambilan data kekerasan secara akurat.



Gambar 17. Proses Pemolesan

- e. Proses etsa (*etching*) untuk memperjelas batas antar area logam las, logam induk, dan zona pengaruh panas (HAZ). Proses etsa dilakukan dengan cara menggosokkan larutan Nital 2% ke permukaan spesimen. Larutan Nital ini dibuat dari campuran 2% asam nitrat (HNO_3) dengan 98% alkohol (etanol).



Gambar 18. Proses Etsa

- f. Gambar berikut menunjukkan hasil etsa pada spesimen setelah proses pengelasan *overlay*. Struktur mikro yang terlihat memperlihatkan batas antara logam las, area *Weld*, HAZ, dan *Base*, yang menjadi acuan dalam menentukan titik uji kekerasan.



Gambar 19. Spesimen Hasil Etsa

9. Proses Uji *Vickers*

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode *Hardness Vickers* dengan beban sebesar 10 kgf dan waktu penekanan selama 10 hingga 15 detik. Beban ini digunakan untuk mengukur kekerasan pada area logam induk, zona pengaruh panas (HAZ), dan logam las secara makro. Titik pengujian ditentukan secara berurutan dari logam induk ke arah logam las, dengan jarak antar titik yang cukup agar hasil pengujian tidak saling memengaruhi.



Gambar 20. Pengujian Hardness Vickers

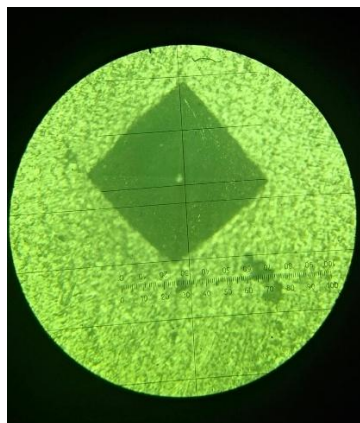
Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji *Hardness Vickers* manual, yang belum dilengkapi sistem pembacaan digital otomatis. Berikut spesifikasi mesin yang di gunakan:



Gambar 21. Spesifikasi Mesin *Hardness Vickers*

Oleh karena itu, setelah indentasi dilakukan oleh indenter berbentuk piramida segi empat dengan sudut 136° , bekas tekan yang terbentuk diukur secara manual menggunakan mikroskop optik yang tersedia pada mesin. Panjang diagonal indentasi dibaca menggunakan skala mikrometer pada lensa okuler. Nilai HV yang diperoleh digunakan untuk membandingkan kekerasan antar zona dan menganalisis pengaruh arah serta jumlah layer pengelasan terhadap sifat mekanik material hasil las.

Dibawah ini adalah gambar yang terlihat dari lensa okuler yang ada pada mesin *Hardness Vickers* saat proses pengujian, terlihat jelas titik yang telah di lakukan penekanan pada spesimen yang berbentuk piramida segi empat dan terlihat garis ukur yang berfungsi untuk menentukan diagonal 1 dan 2:



Gambar 22. Titik Piramida Segi Empat

10. Foto Makro Spesimen Hasil Uji



4" Longitudinal 2 Layer



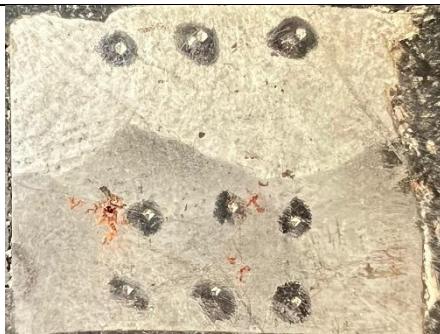
4" Longitudinal 4 Layer



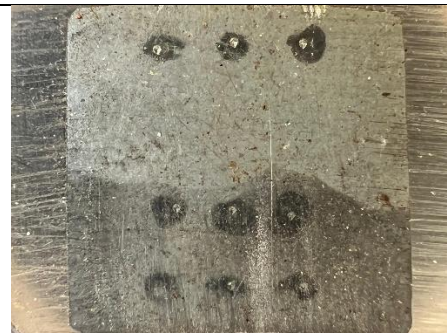
4" Circumferential 2 Layer



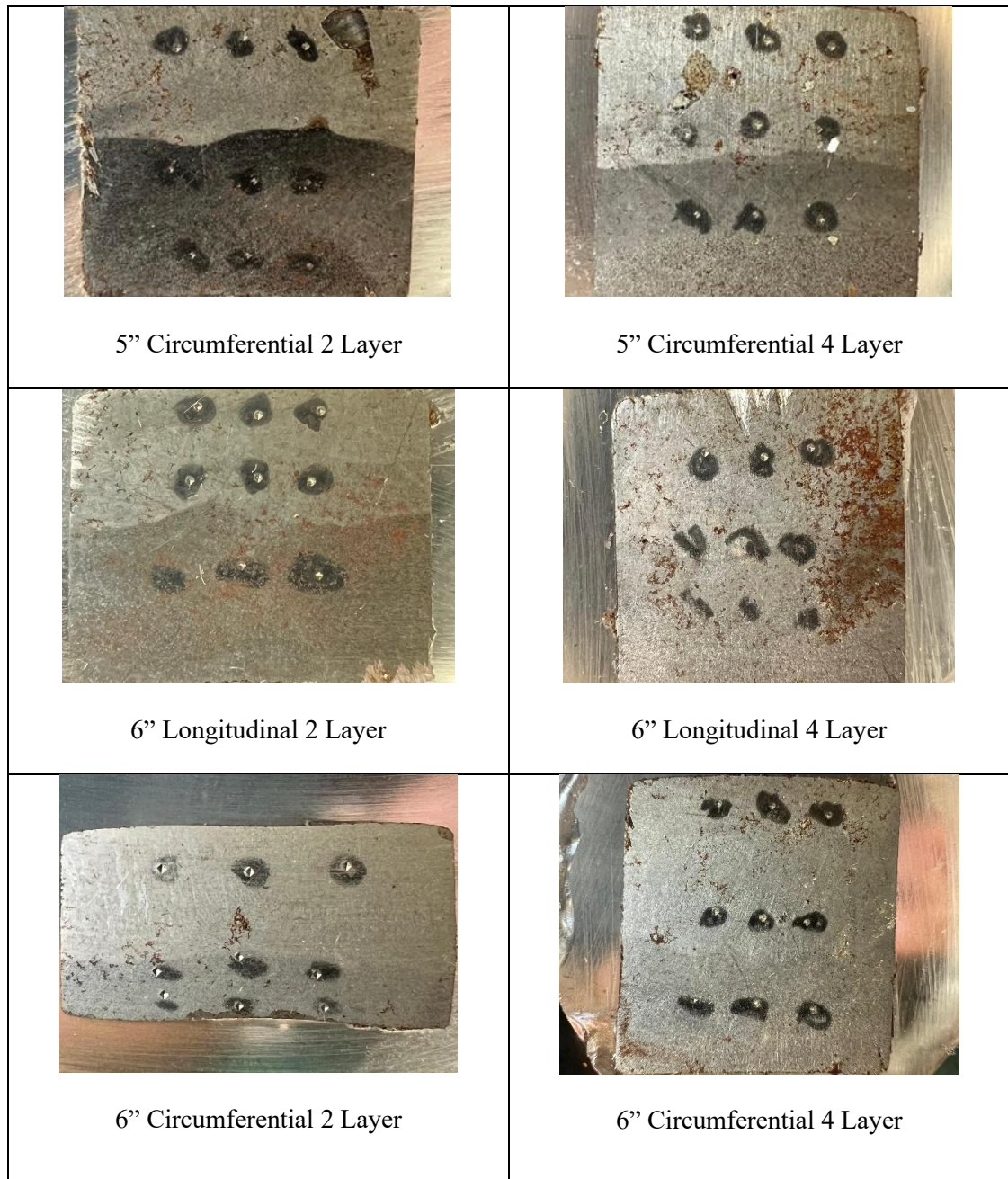
4" Circumferential 4 Layer



5" Longitudinal 2 Layer



5 " Longitudinal 4 Layer



Gambar 23. Foto Makro Spesimen Hasil Uji

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengolahan Data Pengujian *Hardness Vickers*

Dasarnya peneliti mengacu pada standart ASTM E92, pengujian Kekerasan dilakukan pada benda hasil pengelasan baja 106 Grade B yang telah di potong dengan variasi diameter pipa, jumlah layer, dan arah pengelasan yang berbeda.

Langkah – langkah perhitungan sebagai berikut:

Nilai kekerasan *Hardness Vickers* kemudian dihitung secara manual rumusnya:

$$HV = \frac{1.854 \times F}{d^2}$$

- HV = nilai kekerasan *Hardness Vickers* (kgf/mm²)
- F = beban uji (10 kgf)
- d = panjang rata-rata diagonal hasil indentasi (mm)

➤ Persiapan Permukaan

- Permukaan harus halus, rata, dan bebas dari goresan atau oksidasi agar hasil pengujian akurat.

➤ Jumlah dan Distribusi Titik Uji

- Penentuan jumlah titik uji tergantung pada kebutuhan data statistik. Biasanya 3–5 titik untuk perbandingan rata-rata.

➤ Ketelitian

- ASTM E92 mengatur deviasi pengukuran dan keharusan melaporkan rata-rata, standar deviasi, serta koefisien variasi jika diperlukan.

➤ Laporan Uji Harus Memuat

- Nilai HV
- Beban uji yang digunakan
- Lama waktu pembebanan (10–15 detik)
- Ukuran indentasi
- Kondisi permukaan
- Lokasi uji (weld, HAZ, base metal, dll.)

2. Data Hasil Pengujian

a. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 4 Inch

Tabel 2. 4" *Longitudinal* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	4" Longitudinal	2	Weld	233
2	4" Longitudinal	2	Weld	228
3	4" Longitudinal	2	Weld	228
Rata-rata				230
Deviasi				2,89
Ketidakpastian				1,26%
1	4" Longitudinal	2	HAZ	212
2	4" Longitudinal	2	HAZ	199
3	4" Longitudinal	2	HAZ	198
Rata-rata				203
Deviasi				7,81
Ketidakpastian				3,85%
1	4" Longitudinal	2	Base Material	181
2	4" Longitudinal	2	Base Material	181
3	4" Longitudinal	2	Base Material	177
Rata-rata				180
Deviasi				2,31
Ketidakpastian				1,29%

Tabel 3. 4" *Circumferential* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	4" Circumferential	2	Weld	165
2	4" Circumferential	2	Weld	168
3	4" Circumferential	2	Weld	172
Rata-rata				168
Deviasi				3,51
Ketidakpastian				2,09%
1	4" Circumferential	2	HAZ	139
2	4" Circumferential	2	HAZ	146
3	4" circumferential	2	HAZ	149
Rata-rata				145
Deviasi				5,13
Ketidakpastian				3,55%
1	4" Circumferential	2	Base Material	120
2	4" Circumferential	2	Base Material	120
3	4" Circumferential	2	Base Material	119
Rata-rata				120
Deviasi				0,58
Ketidakpastian				0,48%

Tabel 4. 4" Longitudinal 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	4" Longitudinal	4	Weld	245
2	4" Longitudinal	4	Weld	247
3	4" Longitudinal	4	Weld	245
Rata-rata				246
Deviasi				1,15
Ketidakpastian				0,47%
1	4" Longitudinal	4	HAZ	203
2	4" Longitudinal	4	HAZ	203
3	4" Longitudinal	4	HAZ	206
Rata-rata				204
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,85%
1	4" Longitudinal	4	Base Material	170
2	4" Longitudinal	4	Base Material	172
3	4" Longitudinal	4	Base Material	172
Rata-rata				171
Deviasi				1,15
Ketidakpastian				0,67%

Tabel 5. 4" Circumferential 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	4" Circumferential	4	Weld	164
2	4" Circumferential	4	Weld	160
3	4" Circumferential	4	Weld	160
Rata-rata				161
Deviasi				2,31
Ketidakpastian				1,43%
1	4" Circumferential	4	HAZ	127
2	4" Circumferential	4	HAZ	125
3	4" circumferential	4	HAZ	125
Rata-rata				126
Deviasi				1,15
Ketidakpastian				0,92%
1	4" Circumferential	4	Base Material	128
2	4" Circumferential	4	Base Material	127
3	4" Circumferential	4	Base Material	126
Rata-rata				127
Deviasi				1
Ketidakpastian				0,79%

b. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 5 Inch

Tabel 6. 5" *Longitudinal* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	5" Longitudinal	2	Weld	258
2	5" Longitudinal	2	Weld	254
3	5" Longitudinal	2	Weld	251
Rata-rata				254
Deviasi				3,51
Ketidakpastian				1,38%
1	5" Longitudinal	2	HAZ	254
2	5" Longitudinal	2	HAZ	258
3	5" Longitudinal	2	HAZ	258
Rata-rata				257
Deviasi				2,31
Ketidakpastian				0,90%
1	5" Longitudinal	2	Base Material	236
2	5" Longitudinal	2	Base Material	233
3	5" Longitudinal	2	Base Material	233
Rata-rata				234
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,74%

Tabel 7. 5" *Circumferential* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	5" Circumferential	2	Weld	206
2	5" Circumferential	2	Weld	191
3	5" Circumferential	2	Weld	191
Rata-rata				196
Deviasi				8,66
Ketidakpastian				4,42%
1	5" Circumferential	2	HAZ	251
2	5" Circumferential	2	HAZ	251
3	5" circumferential	2	HAZ	233
Rata-rata				245
Deviasi				10,39
Ketidakpastian				4,24%
1	5" Circumferential	2	Base Material	233
2	5" Circumferential	2	Base Material	233
3	5" Circumferential	2	Base Material	228
Rata-rata				231
Deviasi				2,89
Ketidakpastian				1,25%

Tabel 8. 5" Longitudinal 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	5" Longitudinal	4	Weld	357
2	5" Longitudinal	4	Weld	357
3	5" Longitudinal	4	Weld	221
Rata-rata				312
Deviasi				78,52
Ketidakpastian				25,19%
1	5" Longitudinal	4	HAZ	233
2	5" Longitudinal	4	HAZ	233
3	5" Longitudinal	4	HAZ	228
Rata-rata				231
Deviasi				2,89
Ketidakpastian				1,25%
1	5" Longitudinal	4	Base Material	203
2	5" Longitudinal	4	Base Material	203
3	5" Longitudinal	4	Base Material	201
Rata-rata				202
Deviasi				1,15
Ketidakpastian				0,57%

Tabel 9. 5" Circumferential 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	5" Circumferential	4	Weld	179
2	5" Circumferential	4	Weld	176
3	5" Circumferential	4	Weld	176
Rata-rata				177
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,98%
1	5" Circumferential	4	HAZ	181
2	5" Circumferential	4	HAZ	180
3	5" circumferential	4	HAZ	182
Rata-rata				181
Deviasi				1
Ketidakpastian				0,55%
1	5" Circumferential	4	Base Material	221
2	5" Circumferential	4	Base Material	221
3	5" Circumferential	4	Base Material	225
Rata-rata				222
Deviasi				2,31
Ketidakpastian				1,04%

c. Hasil Pengujian Dan Pengolahan Data Spesimen 6 Inch

Tabel 10. 6" *Longitudinal* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	6" Longitudinal	2	Weld	254
2	6" Longitudinal	2	Weld	258
3	6" Longitudinal	2	Weld	254
Rata-rata				255
Deviasi				2,31
Ketidakpastian				0,90%
1	6" Longitudinal	2	HAZ	127
2	6" Longitudinal	2	HAZ	127
3	6" Longitudinal	2	HAZ	126
Rata-rata				127
Deviasi				0,58
Ketidakpastian				0,46%
1	6" Longitudinal	2	Base Material	206
2	6" Longitudinal	2	Base Material	203
3	6" Longitudinal	2	Base Material	206
Rata-rata				205
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,84%

Tabel 11. 6" *Circumferential* 2 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	6" Circumferential	2	Weld	196
2	6" Circumferential	2	Weld	199
3	6" Circumferential	2	Weld	199
Rata-rata				198
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,87%
1	6" Circumferential	2	HAZ	236
2	6" Circumferential	2	HAZ	230
3	6" circumferential	2	HAZ	230
Rata-rata				232
Deviasi				3,46
Ketidakpastian				1,49%
1	6" Circumferential	2	Base Material	215
2	6" Circumferential	2	Base Material	212
3	6" Circumferential	2	Base Material	212
Rata-rata				213
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,81%

Tabel 12. 6" Longitudinal 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	6" Longitudinal	4	Weld	225
2	6" Longitudinal	4	Weld	225
3	6" Longitudinal	4	Weld	236
Rata-rata				229
Deviasi				6,35
Ketidakpastian				2,78%
1	6" Longitudinal	4	HAZ	221
2	6" Longitudinal	4	HAZ	218
3	6" Longitudinal	4	HAZ	218
Rata-rata				219
Deviasi				1,73
Ketidakpastian				0,79%
1	6" Longitudinal	4	Base Material	208
2	6" Longitudinal	4	Base Material	208
3	6" Longitudinal	4	Base Material	206
Rata-rata				207
Deviasi				1,15
Ketidakpastian				0,56%

Tabel 13. 6" Circumferential 4 Layer

No.	Spesimen	Layer	Area	Harga (HV)
1	6" Circumferential	4	Weld	165
2	6" Circumferential	4	Weld	160
3	6" Circumferential	4	Weld	165
Rata-rata				163
Deviasi				2,89
Koefisien Variasi				1,77%
1	6" Circumferential	4	HAZ	170
2	6" Circumferential	4	HAZ	168
3	6" circumferential	4	HAZ	168
Rata-rata				169
Deviasi				1,15
Koefisien Variasi				0,68%
1	6" Circumferential	4	Base Material	165
2	6" Circumferential	4	Base Material	160
3	6" Circumferential	4	Base Material	161
Rata-rata				162
Deviasi				2,65
Koefisien Variasi				1,63%

3. Hasil Pengolahan Data Uji Kekerasan

Pengujian dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengelasan pada pipa baja karbon SCH 40 yang di las *overlay welding* dengan variasi diameter, arah pengelasan, dan jumlah layer karena nilai kekerasan menunjukkan sifat mekanik dan kualitas material hasil pengelasan. Perbedaan nilai kekerasan pada masing-masing zona bisa menunjukkan adanya ketidakhomogenan akibat proses pengelasan.

➤ Perhitungan ketidakpastian

Untuk mengetahui seberapa tingkat kepercayaan maka diperlukan nilai ketidakpastian pada setiap eksperimen, berikut contoh perhitungan analisis ketidakpastian dalam pengujian yang menggunakan variabel diameter pipa, arah pengelasan dan jumlah layer.

Perhitungan nilai ketidakpastian (UNC) menggunakan nilai kepercayaan 95% dimana toleransi berada diantara nilai rata-rata standar deviasi. Dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

Presentase ketidakpastian dihitung dengan membagi nilai UNC terhadap nilai rata-rata, lalu dikalikan 100%, sebagai berikut:

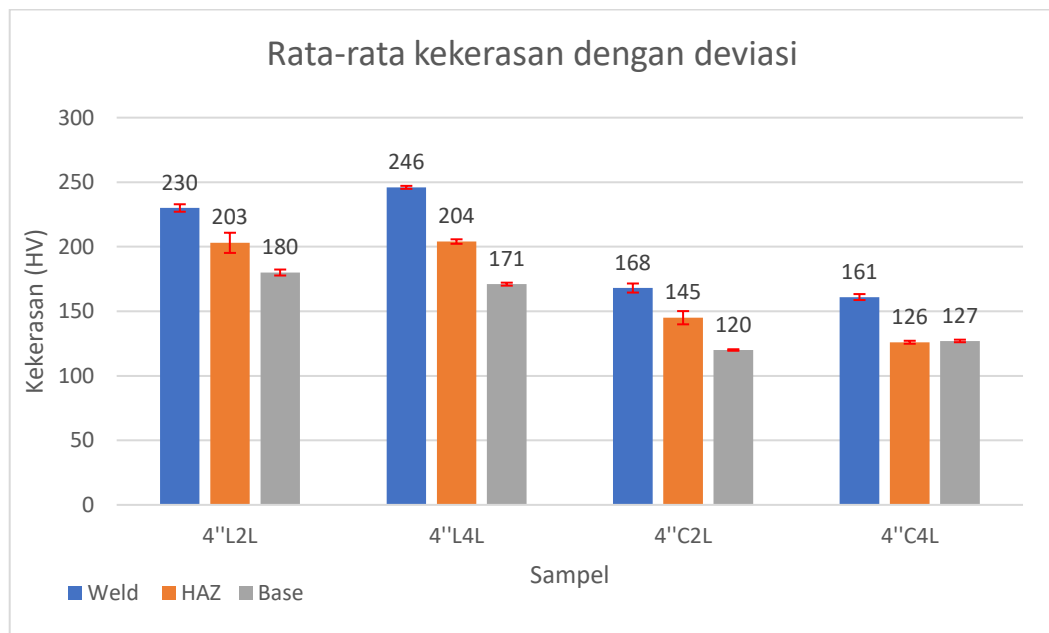
$$UNC = \frac{\text{Deviasi}}{\text{Rata - rata}} \times 100$$

Perhitungan ini dapat digunakan untuk mengetahui seberapa tinggi sebaran data terhadap nilai rata-rata. Nilai ketidakpastian yang tinggi menunjukkan adanya variasi besar dalam pengukuran sedangkan nilai ketidakpastian yang rendah menunjukkan konsistensi nilai pengukuran.

Dengan adanya perhitungan ketidakpastian ini, diharapkan hasil pengujian kekerasan dapat dijadikan acuan yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah. Selain itu, perhitungan ketidakpastian juga dapat mempermudah dalam melakukan evaluasi mutu hasil pengelasan, karena dapat menunjukkan rentang kemungkinan deviasi nilai kekerasan pada setiap variasi parameter yang digunakan. Hal ini penting sebagai dasar pengendalian kualitas pada proses pengelasan, agar dapat meminimalisir cacat las dan ketidakhomogenan sifat mekanik di seluruh bagian pipa baja karbon yang digunakan dalam aplikasi industri.

Tabel 14. Perhitungan Ketidakpastian 4" Long/Circum 2L/4L

Nilai ketidakpastian						
No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	Deviasi	%UNC
1	4" L	2	Weld	230	2,89	1,26%
2	4" L	2	HAZ	203	7,81	3,85%
3	4" L	2	Base	180	2,31	1,29%
4	4" L	4	Weld	246	1,15	0,47%
5	4" L	4	HAZ	204	1,73	0,85%
6	4" L	4	Base	171	1,15	0,67%
7	4" C	2	Weld	168	3,51	2,09%
8	4" C	2	HAZ	145	5,13	3,55%
9	4" C	2	Base	120	0,58	0,48%
10	4" C	4	Weld	161	2,31	1,43%
11	4" C	4	HAZ	126	1,15	0,92%
12	4" C	4	Base	127	1	0,79%



Gambar 24. Diagram 4" C/L 2L/4L

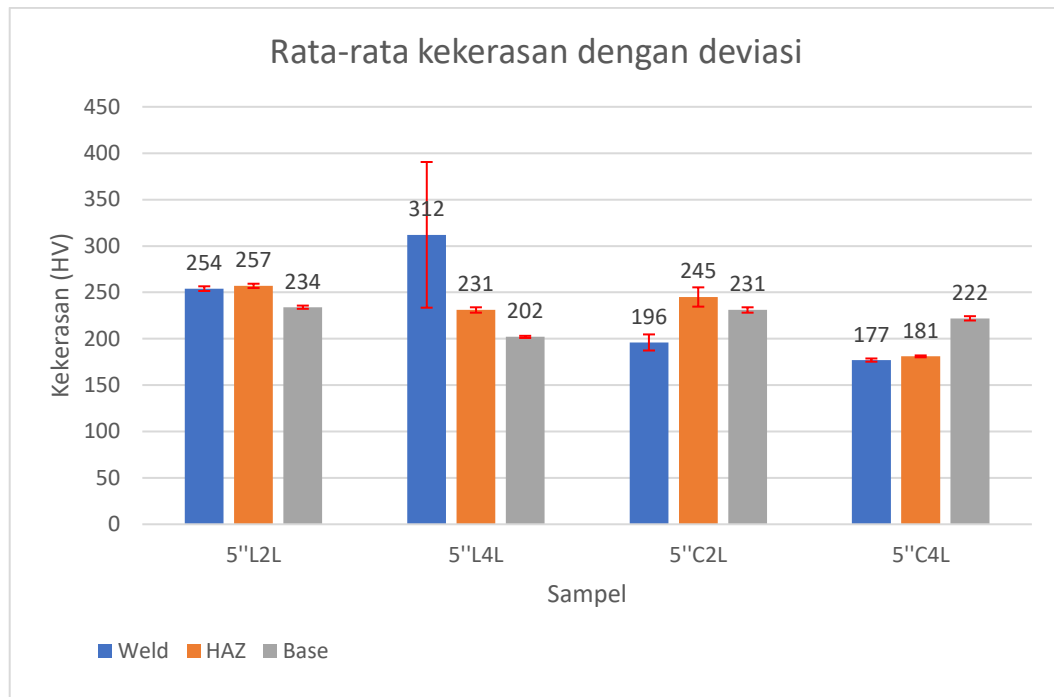
Grafik rata-rata kekerasan HV pada pipa berdiameter 4 inci dengan variasi jumlah layer dan arah pengelasan, dapat diamati bahwa nilai kekerasan tertinggi umumnya terletak pada area *weld metal*, khususnya pada pengelasan dengan arah longitudinal. Pada spesimen 4 inch longitudinal 2 layer, kekerasan tertinggi tercapai di area *weld* sebesar 230 HV, disusul oleh HAZ sebesar 203 HV dan *base metal* sebesar 180 HV. Penambahan jumlah layer menjadi empat pada arah *longitudinal* (4 inci *longitudinal* 4 layer) mengakibatkan kenaikan

nilai kekerasan *weld* menjadi 246 HV, sementara area HAZ meningkat tipis menjadi 204 HV, dan *base metal* justru sedikit menurun menjadi 171 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengelasan *longitudinal*, penambahan layer cenderung meningkatkan kekerasan di daerah logam las dengan sebaran nilai yang masih cukup seragam.

Sebaliknya, tren yang berbeda terlihat pada arah pengelasan *circumferential*. Pada spesimen 4 inch *circumferential* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi juga terdapat pada area *weld* dengan nilai 168 HV, diikuti oleh HAZ 145 HV dan *base metal* 120 HV. Namun, ketika jumlah layer ditingkatkan menjadi empat (4 inci *circumferential* 4 layer), nilai kekerasan justru mengalami penurunan di seluruh area, yakni *weld* turun menjadi 161 HV, HAZ menjadi 126 HV, dan *base metal* hanya 127 HV. Keadaan ini mengindikasikan bahwa pada arah pengelasan *circumferential*, penambahan layer tidak efektif dalam meningkatkan kekerasan, bahkan cenderung menghasilkan distribusi kekerasan yang lebih rendah dan tidak merata.

Tabel 15. Perhitungan Ketidakpastian 5" Long/Circum 2L/4L

Nilai ketidakpastian						
No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	Deviasi	%UNC
1	5" L	2	Weld	256	3,51	1,38%
2	5" L	2	HAZ	257	2,31	0,90%
3	5" L	2	Base	234	1,73	0,74%
4	5" L	4	Weld	312	78,52	25,19%
5	5" L	4	HAZ	231	2,89	1,25%
6	5" L	4	Base	202	1,15	0,57%
7	5" C	2	Weld	196	8,66	4,42%
8	5" C	2	HAZ	245	10,39	4,24%
9	5" C	2	Base	231	2,89	1,25%
10	5" C	4	Weld	177	1,73	0,98%
11	5" C	4	HAZ	181	1	0,55%
12	5" C	4	Base	222	2,31	1,04%



Gambar 25. Diagram 5" C/L 2L/4L

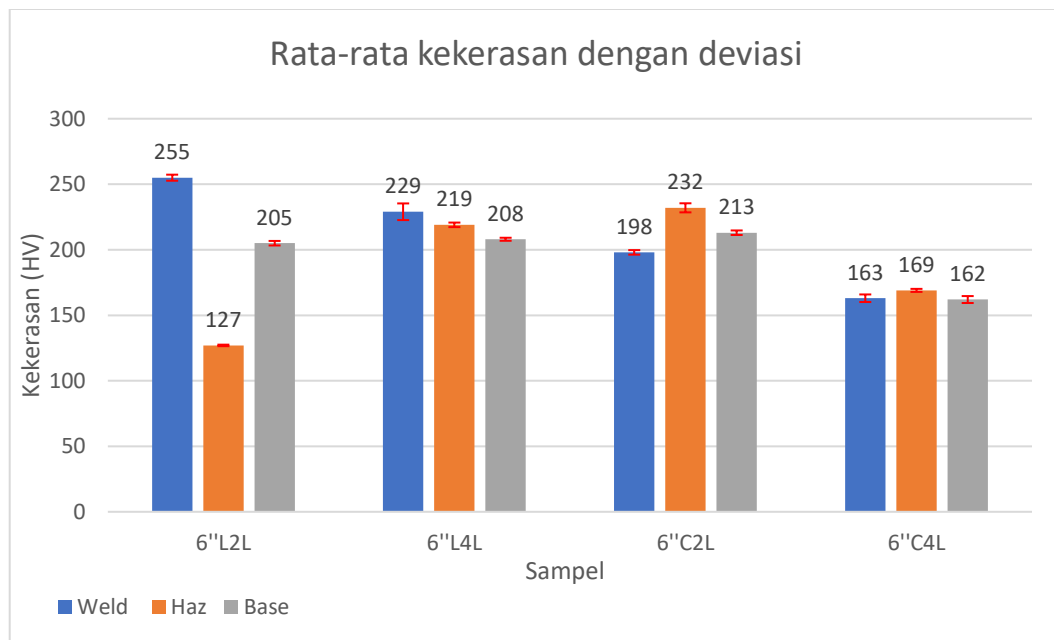
Grafik rata-rata kekerasan HV pada pipa berdiameter 5 inci dengan variasi jumlah layer dan arah pengelasan, terlihat bahwa nilai kekerasan tertinggi pengelasan *longitudinal* secara umum terdapat pada area weld metal untuk spesimen dengan arah. Pada spesimen 5 inch *longitudinal* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi tercatat pada area HAZ sebesar 257 HV, diikuti *weld metal* 254 HV, dan *base metal* 234 HV. Penambahan jumlah layer pada arah *longitudinal* (5 inch *longitudinal* 4 layer) menghasilkan kenaikan signifikan pada area *weld* menjadi 312 HV, sementara nilai kekerasan HAZ turun menjadi 231 HV dan *base metal* turun menjadi 202 HV. Hal ini mengindikasikan bahwa pada pengelasan *longitudinal*, penambahan lapisan mampu meningkatkan kekerasan logam las, meskipun sebaran kekerasan pada HAZ dan *base metal* menurun.

Berbeda halnya pada arah pengelasan *circumferential*. Pada spesimen 5 inch *circumferential* 2 layer, area HAZ memiliki kekerasan tertinggi yaitu 245 HV, diikuti *base metal* 231 HV, dan *weld metal* 196 HV. Sementara pada spesimen 5 inch *circumferential* 4 layer, nilai kekerasan di seluruh area cenderung lebih rendah dibanding spesimen 2 layer, dengan *weld metal* sebesar 177 HV, HAZ 181 HV, dan *base metal* 222 HV. Keadaan ini menunjukkan bahwa pada pengelasan *circumferential*, penambahan jumlah layer justru tidak mampu menaikkan kekerasan, bahkan terjadi penurunan pada area *weld* dan HAZ, meskipun *base metal* sedikit lebih tinggi.

Hasil ini menegaskan bahwa pada pipa berdiameter 5 inch, arah pengelasan *longitudinal* lebih efektif meningkatkan kekerasan, terutama pada area logam las, sedangkan arah *circumferential* memperlihatkan tren penurunan kekerasan dengan bertambahnya jumlah layer.

Tabel 16. Perhitungan Ketidakpastian 6" Long/Circum 2L/4L

Nilai ketidakpastian						
No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	Deviasi	%UNC
1	6" L	2	Weld	255	2,31	0,90%
2	6" L	2	HAZ	127	0,58	0,46%
3	6" L	2	Base	205	1,73	0,84%
4	6" L	4	Weld	229	6,35	2,78%
5	6" L	4	HAZ	219	1,73	0,79%
6	6" L	4	Base	207	1,15	0,56%
7	6" C	2	Weld	198	1,73	0,87%
8	6" C	2	HAZ	232	3,46	1,49%
9	6" C	2	Base	213	1,73	0,81%
10	6" C	4	Weld	163	1,89	1,77%
11	6" C	4	HAZ	169	1,15	0,68%
12	6" C	4	Base	162	2,65	1,63%



Gambar 26. Diagram 6" C/L 2L/4L

Grafik rata-rata kekerasan HV pada pipa berdiameter 6 inch dengan variasi jumlah layer dan arah pengelasan, terlihat bahwa nilai kekerasan tertinggi umumnya terletak pada area

weld metal, khususnya pada arah pengelasan *longitudinal*. Pada spesimen 6 inci *longitudinal* 2 layer, kekerasan tertinggi tercatat pada area *weld* sebesar 255 HV, diikuti *base metal* 205 HV, dan area HAZ yang relatif rendah sebesar 127 HV. Penambahan jumlah layer pada arah *longitudinal* (6 inci *longitudinal* 4 layer) justru menurunkan kekerasan *weld* menjadi 229 HV, sedangkan area HAZ dan *base metal* masing-masing menunjukkan kenaikan menjadi 219 HV dan 208 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pada pengelasan longitudinal, penambahan layer tidak selalu meningkatkan kekerasan logam las, melainkan lebih menyeimbangkan distribusi kekerasan pada area HAZ dan *base metal*.

Berbeda dengan pola *longitudinal*, pada pengelasan *circumferential*, area HAZ justru mendominasi nilai kekerasan tertinggi. Pada spesimen 6 inci *circumferential* 2 layer, area HAZ memiliki nilai kekerasan tertinggi sebesar 232 HV, diikuti base metal 213 HV, dan *weld metal* 198 HV. Sementara pada spesimen 6 inci *circumferential* 4 layer, nilai kekerasan di seluruh area mengalami penurunan, dengan *weld metal* 163 HV, HAZ 169 HV, dan base metal 162 HV. Kondisi ini menegaskan bahwa pada arah *circumferential*, penambahan layer cenderung menurunkan kekerasan rata-rata di semua area pengujian.

Secara keseluruhan, hasil pada pipa diameter 6 inci ini memperlihatkan bahwa arah pengelasan *longitudinal* masih mendukung peningkatan kekerasan pada *weld metal*, meskipun distribusinya tidak selalu stabil pada HAZ. Sebaliknya, arah *circumferential* menghasilkan pola penurunan kekerasan dengan bertambahnya jumlah layer, serta distribusi kekerasan yang cenderung mendekati nilai yang seragam pada ketiga area.

➤ Analisis Ketidakpastian:

Pada area logam las *Weld*, terdapat variasi ketidakpastian yang lebih signifikan, terutama pada pipa diameter 5 inch dengan arah pengelasan longitudinal dan 4 layer. Pada sampel ini, ketidakpastian pengukuran mencapai sekitar 25%, jauh lebih tinggi dibandingkan sampel lainnya yang umumnya hanya berkisar di bawah 5%. Ada ketidakseragaman pada saat pengujian, titik ke 1 = 357, 2 = 357, dan 3 = 221 di area weld titik 3 cenderung rendah.



Gambar 27. 5 inch longitudinal 4 layer

Ada dua faktor yang menyebabkan nilai kekerasan tidak seragam pada area weld tersebut yaitu sebagai berikut:

➤ Faktor dari Proses Pengelasan

Ketidakpastian tinggi dapat terjadi karena input panas yang berlebih atau tidak merata, variasi kecepatan pengelasan, jumlah layer yang menumpuk, dan distribusi panas yang tidak seragam. Hal ini menyebabkan struktur mikro logam las menjadi tidak homogen sehingga nilai kekerasan bervariasi.

➤ Faktor dari Proses Pengujian Kekerasan

Ketidakpastian juga bisa dipengaruhi oleh permukaan spesimen yang kurang rata, kesalahan pembacaan panjang diagonal indentasi, atau kondisi mesin uji yang kurang stabil. Namun, pengaruh dari pengujian biasanya lebih kecil dibandingkan pengaruh proses pengelasan.

4. Pengolahan Data Menggunakan Desain Faktorial

Berikut adalah tabel desain faktorial diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer.

Tabel 17. Desain Faktorial Area *Weld*

Nilai Kekerasan Area Weld								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	484	848	1744	8	218	Rata-rata
5	L	2	364	896	-134	4	-33,5	Pengaruh DP
4	C	2	558	-52	340	4	85	Pengaruh AP
5	C	2	338	-82	-46	4	-11,5	DP-AP
4	L	4	-24	120	-48	4	-12	Pengaruh jumlah layer
5	L	4	-28	220	30	4	7,5	DP-JL
4	C	4	-66	4	-100	4	-25	AP-JL
5	C	4	-16	-50	54	4	13,5	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area Weld								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	485	851	1650	8	206,25	Rata-rata
6	L	2	366	799	-40	4	-10	Pengaruh DP
4	C	2	475	-55	270	4	67,5	Pengaruh AP
6	C	2	324	15	24	4	6	DP-AP
4	L	4	-25	119	52	4	13	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	-30	151	-70	4	-17,5	DP-JL
4	C	4	17	5	-32	4	-8	AP-JL
6	C	4	-2	19	-14	4	-3,5	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area Weld								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
5	L	2	509	903	1784	8	223	Rata-rata
6	L	2	394	881	94	4	23,5	Pengaruh DP
5	C	2	541	-3	316	4	79	Pengaruh AP
6	C	2	340	97	70	4	17,5	DP-AP
5	L	4	-1	115	22	4	5,5	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	-2	201	-100	4	-25	DP-JL
5	C	4	83	1	-86	4	-21,5	AP-JL
6	C	4	14	69	-68	4	-17	DP-AP-JL

Dari pengolahan data pada tabel di atas, dapat dilihat interaksi antara variabel diameter pipa (DP), arah pengelasan (AP), dan jumlah layer (JL) pada area *Weld*, yang dibuktikan dengan pengaruh perubahan variabel dari level kecil ke level besar terhadap nilai kekerasan. Hasil tersebut dapat dirangkum sebagai berikut:

➤ Tabel pertama

Berdasarkan hasil pengolahan data pada tabel pertama, diperoleh rata-rata nilai kekerasan area *Weld* sebesar 218 HV. Dari data tersebut dapat dijelaskan bahwa pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -33,5 HV, yang berarti jika diameter pipa diubah dari 4 inch ke 5 inch maka nilai kekerasan akan mengalami penurunan sebesar 33,5 HV. Selanjutnya, pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 85 HV, artinya jika arah pengelasan diubah dari *longitudinal* ke *circumferential* maka nilai kekerasan justru akan meningkat sebesar 85 HV. Variabel arah pengelasan ini menjadi faktor yang paling dominan memberikan kenaikan pada kekerasan di area *Weld*.

Sementara itu, pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah -12 HV, yang menunjukkan bahwa jika jumlah layer ditingkatkan dari 2 layer ke 4 layer maka nilai kekerasan akan menurun sebesar 12 HV. Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah -11,5 HV, menunjukkan bahwa perubahan kedua variabel ini secara bersamaan mengakibatkan penurunan nilai kekerasan. Adapun interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh 7,5 HV, sehingga kombinasi perubahan DP dan JL akan menaikkan kekerasan. Interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -25 HV, artinya kombinasi perubahan AP dan JL menurunkan nilai kekerasan. Terakhir, interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) memberikan pengaruh 13,5 HV, sehingga jika ketiganya diubah bersamaan akan menaikkan nilai kekerasan di area *Weld*.

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa pada tabel pertama, variabel arah pengelasan memberikan pengaruh paling besar dalam menaikkan nilai kekerasan area *Weld*, sedangkan diameter pipa dan jumlah layer cenderung memberikan pengaruh penurunan kekerasan bila levelnya dinaikkan.

➤ Tabel Kedua

Pada tabel kedua, diperoleh rata-rata nilai kekerasan area *Weld* sebesar 206,25 HV. Pengaruh variabel diameter pipa (DP) pada tabel ini adalah -10 HV, yang berarti jika diameter pipa diubah dari 4 inch ke 6 inch maka nilai kekerasan akan menurun sebesar 10 HV. Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 67,5 HV, menunjukkan bahwa perubahan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* menaikkan nilai kekerasan sebesar 67,5 HV. Hal ini menunjukkan bahwa arah pengelasan masih menjadi variabel yang dominan menaikkan kekerasan di area *Weld*.

Pengaruh variabel jumlah layer (JL) pada tabel ini adalah 13 HV, artinya penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer akan menaikkan kekerasan sebesar 13 HV. Interaksi antara diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memberikan pengaruh 6 HV, yang berarti perubahan kedua variabel ini secara bersamaan meningkatkan kekerasan. Sebaliknya, interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -17,5 HV, artinya jika kedua variabel ini diubah bersamaan maka nilai kekerasan akan menurun. Interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -8 HV, yang juga menurunkan kekerasan. Sementara itu, interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) memberikan pengaruh -3,5 HV, yang berarti perubahan ketiganya secara bersamaan cenderung menurunkan nilai kekerasan.

Secara keseluruhan, pada tabel kedua ini dapat disimpulkan bahwa arah pengelasan tetap menjadi faktor dominan untuk menaikkan nilai kekerasan area *Weld*, sedangkan diameter pipa dan interaksi antar variabel lebih cenderung menurunkan kekerasan bila levelnya ditingkatkan.

➤ Tabel Ketiga

Berdasarkan tabel ketiga, diperoleh rata-rata nilai kekerasan area *Weld* sebesar 223 HV. Dari hasil pengolahan data tersebut diketahui bahwa pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 23,5 HV, yang berarti jika diameter pipa diubah dari 5 inch ke 6 inch maka nilai kekerasan akan meningkat sebesar 23,5 HV. Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 79 HV, menunjukkan bahwa perubahan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* menaikkan kekerasan sebesar 79 HV, sehingga tetap menjadi faktor dominan pada variasi ini.

Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 5,5 HV, artinya penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer juga akan menaikkan kekerasan meskipun dengan pengaruh yang lebih kecil. Interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memberikan pengaruh 17,5 HV, yang berarti perubahan kedua variabel ini secara bersamaan menaikkan nilai kekerasan. Sebaliknya, interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -25 HV, yang artinya jika diameter pipa dan jumlah layer diubah bersamaan maka akan menurunkan kekerasan. Interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -21,5 HV, menunjukkan pengaruh penurunan nilai kekerasan. Terakhir, interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) memberikan pengaruh -17 HV, yang berarti perubahan ketiga variabel secara serentak juga menurunkan nilai kekerasan.

Dari penjelasan ini dapat disimpulkan bahwa pada tabel ketiga, arah pengelasan masih menjadi variabel dengan pengaruh paling signifikan dalam menaikkan nilai kekerasan,

diikuti oleh diameter pipa yang pada variasi ini juga memberikan pengaruh positif. Sementara itu, penambahan jumlah layer memiliki pengaruh menaikkan kekerasan tetapi relatif kecil, sedangkan sebagian besar interaksi antar variabel cenderung menurunkan nilai kekerasan.

Tabel 18. Desain Faktorial Area HAZ

Nilai Kekerasan Area HAZ								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	460	850	1592	8	199	Rata-rata
5	L	2	390	742	-236	4	-59	Pengaruh DP
4	C	2	435	-154	198	4	49,5	Pengaruh AP
5	C	2	307	-82	74	4	18,5	DP-AP
4	L	4	-54	70	108	4	27	Pengaruh jumlah layer
5	L	4	-100	128	-72	4	-18	DP-JL
4	C	4	-27	46	-58	4	-14,5	AP-JL
5	C	4	-55	28	18	4	4,5	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area HAZ								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	330	707	1425	8	178,125	Rata-rata
6	L	2	377	718	-69	4	-17,25	Pengaruh DP
4	C	2	423	-11	81	4	20,25	Pengaruh AP
6	C	2	295	-58	191	4	47,75	DP-AP
4	L	4	76	-47	-11	4	-2,75	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	-87	128	47	4	11,75	DP-JL
4	C	4	-15	163	-175	4	-43,75	AP-JL
6	C	4	-43	28	135	4	33,75	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area HAZ								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
5	L	2	384	861	1661	8	207,625	Rata-rata
6	L	2	477	800	167	4	41,75	Pengaruh DP
5	C	2	450	143	7	4	1,75	Pengaruh AP
6	C	2	350	24	117	4	29,25	DP-AP
5	L	4	130	-93	61	4	15,25	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	13	100	119	4	29,75	DP-JL
5	C	4	12	117	-193	4	-48,25	AP-JL
6	C	4	12	0	117	4	29,25	DP-AP-JL

➤ Tabel pertama

Berdasarkan hasil pengolahan data pada tabel pertama, diperoleh rata-rata nilai kekerasan pada area HAZ sebesar 199 HV. Dari data tersebut dapat dijelaskan bahwa pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -59 HV, yang berarti jika diameter pipa diubah dari 4 inch ke 5 inch maka nilai kekerasan akan menurun sebesar 59 HV. Pengaruh variabel arah

pengelasan (AP) adalah 49,5 HV, menunjukkan bahwa jika arah pengelasan diubah dari *longitudinal* ke *circumferential* maka nilai kekerasan justru meningkat sebesar 49,5 HV. Dengan demikian, arah pengelasan menjadi faktor dominan yang berkontribusi menaikkan nilai kekerasan pada area HAZ di tabel ini.

Selain itu, pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 27 HV, artinya penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer akan menaikkan kekerasan sebesar 27 HV. Interaksi antara diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) menghasilkan pengaruh sebesar 18,5 HV, yang berarti perubahan kedua variabel ini secara bersamaan juga menaikkan kekerasan. Sebaliknya, interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -18 HV, yang berarti kombinasi perubahan DP dan JL akan menurunkan nilai kekerasan. Interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -14,5 HV, yang juga menurunkan kekerasan. Sementara interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) memberikan pengaruh 4,5 HV, yang menunjukkan bahwa ketiga variabel jika diubah bersamaan akan sedikit menaikkan kekerasan di area HAZ.

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa pada tabel pertama area HAZ, arah pengelasan dan jumlah layer memiliki pengaruh menaikkan kekerasan, sedangkan diameter pipa cenderung menurunkan kekerasan saat diameternya diperbesar.

➤ Tabel Kedua

Pada tabel kedua, rata-rata nilai kekerasan area HAZ diperoleh sebesar 178,125 HV. Berdasarkan data, pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -17,25 HV, artinya jika diameter pipa diubah dari 4 inch ke 6 inch maka nilai kekerasan akan berkurang sebesar 17,25 HV. Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 20,25 HV, menunjukkan bahwa perubahan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* akan menaikkan kekerasan sebesar 20,25 HV.

Pengaruh jumlah layer (JL) pada tabel ini adalah -2,75 HV, yang berarti penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer cenderung menurunkan nilai kekerasan meskipun dengan pengaruh yang kecil. Interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) menunjukkan pengaruh sebesar 47,75 HV, yang berarti kombinasi perubahan kedua variabel ini akan menaikkan kekerasan secara signifikan. Interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh 11,75 HV, yang juga menaikkan kekerasan. Sebaliknya, interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memiliki pengaruh -43,75 HV, yang berarti kombinasi perubahan AP dan JL akan menurunkan kekerasan dengan pengaruh yang cukup besar. Interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) memberikan pengaruh 33,75 HV, sehingga perubahan ketiga variabel secara serentak akan menaikkan kekerasan.

Dari tabel kedua area HAZ ini dapat disimpulkan bahwa arah pengelasan dan interaksi DP-AP serta DP-AP-JL menjadi faktor dominan yang menaikkan nilai kekerasan, sedangkan interaksi AP-JL justru menurunkan kekerasan cukup signifikan.

➤ Tabel Ketiga

Pada tabel ketiga, rata-rata nilai kekerasan area HAZ diperoleh sebesar 207,625 HV. Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 41,75 HV, artinya jika diameter pipa diubah dari 5 inch ke 6 inch maka nilai kekerasan akan meningkat sebesar 41,75 HV. Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 1,75 HV, yang berarti perubahan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* hanya menaikkan kekerasan sebesar 1,75 HV sehingga pengaruhnya relatif kecil dibandingkan variabel lainnya.

Pengaruh jumlah layer (JL) pada tabel ini adalah 15,25 HV, artinya penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer akan menaikkan kekerasan sebesar 15,25 HV. Interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memberikan pengaruh 29,25 HV, yang berarti perubahan kedua variabel ini secara bersamaan juga menaikkan kekerasan. Interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh 29,75 HV, yang juga menaikkan kekerasan. Sementara itu, interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -48,25 HV, yang berarti kombinasi perubahan AP dan JL justru menurunkan kekerasan dengan pengaruh yang cukup besar. Interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) memiliki pengaruh 29,25 HV, yang berarti perubahan ketiga variabel ini secara serentak menaikkan nilai kekerasan di area HAZ.

Secara umum, dapat disimpulkan bahwa pada tabel ketiga area HAZ, diameter pipa, jumlah layer, dan interaksi DP-JL menjadi faktor yang dominan menaikkan kekerasan, sedangkan pengaruh arah pengelasan relatif kecil dan interaksi AP-JL justru menurunkan kekerasan secara signifikan.

Tabel 19. Desain Faktorial Area Base

Nilai Kekerasan Area Base								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	414	765	1487	8	185,875	Rata-rata
5	L	2	351	722	-291	4	-72,75	Pengaruh DP
4	C	2	373	-165	87	4	21,75	Pengaruh AP
5	C	2	349	-126	121	4	30,25	DP-AP
4	L	4	-54	63	43	4	10,75	Pengaruh jumlah layer
5	L	4	-111	24	-39	4	-9,75	DP-JL
4	C	4	-31	57	39	4	9,75	AP-JL
5	C	4	-95	64	-7	4	-1,75	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area Base								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
4	L	2	385	718	1385	8	173,125	Rata-rata
6	L	2	333	667	-189	4	-47,25	Pengaruh DP
4	C	2	378	-118	141	4	35,25	Pengaruh AP
6	C	2	289	-71	67	4	16,75	DP-AP
4	L	4	-25	52	51	4	12,75	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	-93	89	-47	4	-11,75	DP-JL
4	C	4	-36	68	-37	4	-9,25	AP-JL
6	C	4	-35	-1	69	4	17,25	DP-AP-JL
Nilai Kekerasan Area Base								
DP	AP	JL	1ST	2ND	RD	DIVIDER	RESULT	
5	L	2	439	883	1676	8	209,5	Rata-rata
6	L	2	444	793	102	4	25,5	Pengaruh DP
5	C	2	409	47	20	4	5	Pengaruh AP
6	C	2	384	55	-54	4	-13,5	DP-AP
5	L	4	29	-5	90	4	22,5	Pengaruh jumlah layer
6	L	4	18	25	-8	4	-2	DP-JL
5	C	4	-5	11	-30	4	-7,5	AP-JL
6	C	4	60	-65	76	4	19	DP-AP-JL

➤ Tabel pertama

Berdasarkan hasil pengolahan data pada tabel pertama, diperoleh rata-rata nilai kekerasan area *Base* sebesar 185,875 HV. Dari data tersebut terlihat bahwa pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -72,75 HV, yang berarti jika diameter pipa diubah dari 4 inch ke 5 inch maka nilai kekerasan akan menurun sebesar 72,75 HV. Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah 21,75 HV, artinya jika arah pengelasan diubah dari *longitudinal* ke *circumferential* maka nilai kekerasan akan naik sebesar 21,75 HV.

Selain itu, pengaruh jumlah layer (JL) adalah 10,75 HV, menunjukkan bahwa penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 10,75 HV. Interaksi

diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memberikan pengaruh 30,25 HV, yang berarti kombinasi perubahan kedua variabel ini akan menaikkan nilai kekerasan. Sementara itu, interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -9,75 HV, yang berarti kombinasi keduanya menurunkan kekerasan. Interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh 9,75 HV, sedangkan interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) hanya memberikan pengaruh -1,75 HV.

Secara umum, pada tabel pertama area *Base* dapat disimpulkan bahwa perubahan arah pengelasan dan penambahan jumlah layer cenderung menaikkan nilai kekerasan, sedangkan peningkatan diameter pipa justru menurunkan kekerasan dengan pengaruh yang paling besar.

➤ Tabel Kedua

Pada tabel kedua, diperoleh rata-rata nilai kekerasan area Base sebesar 173,125 HV. Dari data tersebut, pengaruh diameter pipa (DP) adalah -47,25 HV, artinya perubahan diameter pipa dari 4 inch ke 6 inch akan menurunkan kekerasan sebesar 47,25 HV. Pengaruh arah pengelasan (AP) adalah 35,25 HV, yang berarti perubahan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* menaikkan kekerasan sebesar 35,25 HV.

Pengaruh jumlah layer (JL) pada tabel ini adalah 12,75 HV, menunjukkan bahwa penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer juga meningkatkan kekerasan. Interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memberikan pengaruh 16,75 HV, interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -11,75 HV, sedangkan interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -9,25 HV. Interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) menunjukkan pengaruh 17,25 HV, artinya perubahan ketiganya secara serentak akan menaikkan kekerasan.

Kesimpulannya, pada tabel kedua area *Base*, arah pengelasan dan interaksi beberapa variabel cenderung meningkatkan nilai kekerasan, sedangkan variabel diameter pipa tetap dominan menurunkan kekerasan.

➤ Tabel Ketiga

Pada tabel ketiga, rata-rata nilai kekerasan area Base adalah 209,5 HV. Dari hasil pengolahan data, pengaruh diameter pipa (DP) adalah 25,5 HV, yang berarti peningkatan diameter pipa dari 5 inch ke 6 inch akan menaikkan kekerasan sebesar 25,5 HV. Pengaruh arah pengelasan (AP) hanya 5 HV, sehingga pengaruh perubahan arah pengelasan relatif kecil terhadap kenaikan kekerasan.

Pengaruh jumlah layer (JL) adalah 22,5 HV, artinya penambahan jumlah layer dari 2 ke 4 layer akan menaikkan nilai kekerasan secara cukup signifikan. Interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) memiliki pengaruh -13,5 HV, artinya kombinasi perubahan keduanya justru menurunkan kekerasan. Interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) memberikan pengaruh -2 HV, sedangkan interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) memberikan pengaruh -7,5 HV, yang sama-sama menurunkan kekerasan. Sementara interaksi ketiga variabel (DP-AP-JL) menunjukkan pengaruh 19 HV, yang berarti perubahan ketiga variabel secara bersamaan menaikkan kekerasan.

Secara keseluruhan, pada tabel ketiga area Base dapat disimpulkan bahwa diameter pipa dan jumlah layer berkontribusi menaikkan kekerasan, sedangkan pengaruh arah pengelasan relatif kecil dan beberapa interaksi justru menurunkan kekerasan.

5. Interpretasi Data

Interpretasi data dilakukan untuk memahami pengaruh masing-masing variabel terhadap kekerasan logam setelah proses pengelasan *overlay*. Adapun variabel yang diteliti meliputi diameter pipa 4", 5", 6", jumlah layer 2 dan 4, serta arah pengelasan *longitudinal* dan *circumferential*. Analisis dilakukan secara terpisah berdasarkan tiga area uji, yaitu *Weld*, *HAZ*, dan *Base Metal*.

➤ Pengaruh Arah Pengelasan (Longitudinal vs Circumferential):

Pada seluruh diameter pipa (4", 5", dan 6"), pengelasan arah longitudinal umumnya menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi di area Weld, dibandingkan arah circumferential. Contoh pada pipa 6":

- Longitudinal 2L: Weld = 255,33 HV
- Circumferential 2L: Weld = 198,00 HV

Hal ini disebabkan oleh pendinginan yang lebih cepat pada arah longitudinal, yang mendorong pembentukan mikrostruktur lebih keras seperti martensit.

➤ Pengaruh Jumlah Lapisan (2 vs 4 Layer):

Penambahan layer tidak selalu meningkatkan kekerasan.

Pada arah longitudinal:

- Pipa 5" Longitudinal:
2L: Weld = 254,00 HV

4L: Weld = 311,67 HV (meningkat drastis)

Namun, deviasi juga meningkat tajam ($\pm 63,69$), menandakan ketidakhomogenan mikrostruktur.

Pada arah circumferential:

- Pipa 5" Circumferential:

2L: Weld = 196,67 HV

4L: Weld = 177,00 HV (justru menurun)

➤ Pengaruh Diameter Pipa (4", 5", dan 6"):

Diameter tidak berpengaruh secara langsung terhadap peningkatan atau penurunan kekerasan, namun distribusi panas dan respon termal pada ukuran pipa yang lebih besar (6") dapat memengaruhi hasil uji, terutama di area HAZ:

- 6" Longitudinal 2L: HAZ = 126,67 HV (rendah signifikan)
- Penurunan ini mengindikasikan area HAZ mengalami overheating lokal akibat konsentrasi panas lebih besar pada diameter pipa besar.

➤ Area Kekerasan (Weld, HAZ, Base Metal):

- Weld selalu memiliki kekerasan tertinggi di hampir seluruh kombinasi.
- HAZ menunjukkan variabilitas tinggi, tergantung arah dan jumlah layer.
- Base metal relatif stabil dan paling rendah, mendekati nilai kekerasan material asli (sekitar 180–220 HV).
- Kesimpulan Interpretasi
- Arah pengelasan longitudinal memberikan performa kekerasan terbaik dan lebih stabil untuk aplikasi perbaikan poros.
- 2 layer pengelasan pada longitudinal umumnya memberikan hasil paling seimbang antara kekerasan tinggi dan deviasi rendah.
- Kombinasi pipa 6", Longitudinal, 2L menghasilkan salah satu nilai paling optimal: Weld = 255,33 HV, deviasi = $\pm 2,31$, CV = 0,90%.

BAB V KESIMPULAN

1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan *Vickers* pada pipa baja karbon ASTM A106 Grade B yang telah di-*overlay* dengan variasi arah pengelasan *Longitudinal* dan *Circumferential*, jumlah 2 dan 4 Layer, serta ukuran pipa 4", 5", dan 6", maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Pengaruh Arah Pengelasan:
 - Pengelasan dengan arah *Longitudinal* menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan arah *Circumferential* pada semua ukuran dan jumlah lapisan.
 - Hal ini disebabkan distribusi panas pada arah *Longitudinal* menghasilkan pendinginan yang lebih cepat dan membentuk struktur mikro yang lebih keras.
- Pengaruh Jumlah Lapisan (Layer):
 - Penambahan lapisan dari 2 menjadi 4 Layer tidak selalu meningkatkan kekerasan. Pada beberapa kondisi terutama *Circumferential*, kekerasan justru menurun akibat pengumpulan panas yang menyebabkan pelunakan mikrostruktur.
 - Pada arah *Longitudinal*, peningkatan lapisan bisa meningkatkan kekerasan, tetapi deviasinya cenderung lebih tinggi, menunjukkan hasil yang kurang homogen.
- Pengaruh Ukuran Pipa:
 - Ukuran pipa tidak terlalu signifikan dalam mempengaruhi tren kekerasan, tetapi pada pipa 6", terjadi perbedaan signifikan pada area HAZ (contoh: *Longitudinal* 2L = 126,67 HV) akibat efek panas yang terlalu tinggi pada daerah sempit.
- Kombinasi Optimal:
 - Kombinasi arah pengelasan *Longitudinal* dengan 2 Layer *overlay* terbukti menghasilkan nilai kekerasan tertinggi yang stabil dan konsisten, khususnya pada area *Weld*.
 - Contoh terbaik: 6" *Longitudinal* 2 Layer, nilai kekerasan *Weld* sebesar 255,33 HV, deviasi hanya 2,31, dan koefisien variasi 0,90%.

2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kesimpulan yang telah diperoleh, berikut ini disampaikan beberapa saran yang diharapkan dapat menjadi masukan bagi penerapan di lapangan serta pengembangan penelitian selanjutnya. Saran-saran ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas proses perbaikan komponen menggunakan metode pengelasan, serta memperluas pemahaman terhadap pengaruh variabel pengelasan terhadap sifat mekanik material.

➤ Rekomendasi Teknik Perbaikan Poros:

- Untuk keperluan perbaikan poros aus pada baja karbon ASTM A106 Grade B, disarankan menggunakan metode pengelasan *Longitudinal* 2 Layer karena memberikan kekerasan tinggi, stabil, dan efisien secara teknis dan ekonomis.

➤ Kontrol Proses Pengelasan:

- Selama proses pengelasan, perlu dilakukan pengendalian suhu dan kecepatan las secara ketat untuk menghindari pengumpulan panas yang berlebihan, terutama pada proses dengan lapisan ganda 4 Layer dan arah *Circumferential*.

➤ Pemeriksaan Tambahan:

- Disarankan dilakukan pengujian metalografi untuk menganalisis struktur mikro dan memahami penyebab deviasi tinggi atau ketidakhomogenan, khususnya pada spesimen dengan nilai kekerasan ekstrem atau deviasi besar.
- Uji impak (toughness) juga penting dilakukan sebagai pelengkap, mengingat kekerasan tinggi tidak selalu menjamin ketangguhan material.

➤ Pengembangan Penelitian Selanjutnya:

- Penelitian selanjutnya disarankan mengeksplorasi pengaruh variasi arus listrik, kecepatan pengelasan, dan jenis elektroda, untuk mendapatkan parameter optimal sesuai dengan kondisi industri nyata.
- Selain itu, perlu dilakukan simulasi termal (heat distribution) untuk memahami lebih dalam efek siklus panas pada kekerasan dan ketahanan material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Jokosisworo, “Pengaruh Besar Arus Listrik Dengan Menggunakan Elektroda Smaw Terhadap Kekuatan Sambungan Las *Butt Joint Pada Plat Mild Steel*,” *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 6, no. 2, hal. 118–122, 2012, doi: 10.14710/kpl.v6i2.2725.
- [2] T. Pipit Mulyah, Dyah Aminatun, Sukma Septian Nasution, Tommy Hastomo, Setiana Sri Wahyuni Sitepu, “濟無No Title No Title No Title,” *J. GEEJ*, vol. 7, no. 2, hal. 6–28, 2020.
- [3] S. Muddin, “Pengaruh Hasil Pengelasan Terhadap Kekuatan Dan Kekerasan,” *ILTEK J. Teknol.*, vol. 11, no. 02, hal. 1658–1663, 2016, doi: 10.47398/iltek.v11i02.433.
- [4] W. A. Almuzikri, Usman, dan Bukhari, “Analisis pengaruh variasi arus terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada pengelasan material SM 400 B *Analysis of the effect of current variations on tensile strength and hardness in welding SM 400 B material*,” *J. Weld. Technol.*, vol. 3, no. 2, hal. 34–40, 2021.
- [5] H. D. A. Purbonugroho, A. Suprihanto, dan G. D. Haryadi, “Analisis Metode Pengelasan SMAW Terhadap Laju Korosi dan Nilai Kekerasan Pada Baja Karbon Rendah AISI 1020,” *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 4, hal. 227–234, 2023.
- [6] M. S. Azdkar, H. Pratikno, dan H. S. Titah, “Analisis Pengelasan SMAW pada Baja ASTM A36 dengan Variasi Elektroda Terhadap Sifat Mekanik dan Ketahanan Biokorosi di Lingkungan Laut,” *J. Tek. ITS*, vol. 7, no. 2, 2019, doi: 10.12962/j23373539.v7i2.32118.
- [7] A. Fazadima, H. Pratikno, dan H. Ikhwan, “Analisis Pengaruh Variasi Heat Input terhadap Uji Impact, Uji Metalografi, dan Laju Korosi pada Pengelasan SMAW Sambungan Pelat Baja A36 dengan Baja Structural Steel 400 (SS400),” *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 3, hal. 38–43, 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i3.88068.
- [8] A. N. Akhmadi dan M. T. Qurohman, “Analisa Hasil Pengelasan 2g Dan 3g Dengan Bahan Plat Besi St 40 Ketebalan 10 mm Dan Voltase 20 - 35 Menggunakan Mesin Las Mig,” *Nozzle J. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 2, hal. 25–30, 2020, doi: 10.30591/nozzle.v9i2.2259.
- [9] A. Saputra Ismy, R. Nanda, P. Negeri Lhokseumawe, dan P. Pupuk Iskandar Muda

- JlBanda Aceh-Medan Km, “Pengaruh arus pengelasan SMAW terhadap kekuatan sambungan las double lap joint pada material AISI 1050,” *J. Weld. Technol.*, vol. 2, no. 1, hal. 1–7, 2020.
- [10] F. J. Tulung, “Modul praktek pengelasan smaw,” *Politek. Negeri Manad.*, hal. 1–74, 2019.
- [11] K. N. Syahputra dan A. W. Nugroho, “Analisa Kegagalan Sambungan Las Pada Tiang Penyangga Dermaga,” *Semesta Tek.*, vol. 18, no. 1, hal. 1–9, 2016, doi: 10.18196/st.v18i1.700.
- [12] H. Rarindo, “Menguji Spesifikasi Posisi Pengelasan Ergonomi,” *LONTAR J. Tek. Mesin Undana*, vol. 1, no. 1, hal. 1–5, 2014.
- [13] M. Nofri dan A. Fardiansyah, “Analisis Sifat Mekanik Pipa Carbon Steel Grade a a106 Dan Grade B a53 Untuk Proses Produksi Pada Kilang Lng,” *Bina Tek.*, vol. 14, no. 2, hal. 119, 2018, doi: 10.54378/bt.v14i2.335.
- [14] D. Juliaptini, “Analisis Sifat Mekanik dan Metalografi Baja Karbon Rendah untuk Aplikasi Tabung Gas 3 Kg,” *UIN Syarif Hidayatullah*, hal. 1–90, 2010.
- [15] S. Syamsuir, A. Lubi, dan F. B. Susetyo, “Karakteristik Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Paska Perlakuan Panas Tempering,” ... *Kaji. Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, hal. 1–7, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <http://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jktm/article/view/5941%0Ahttp://journal.uta45jakarta.ac.id/index.php/jktm/article/viewFile/5941/2147>
- [16] B. Permana, M. Badaruddin, dan Z. Zulhanif, “Karakterisasi Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Baja Carbon Rendah Untuk *Cane Cutter Blade* Pada Pt Gunung Madu Plantation,” *J. Ilm. Tek. Mesin FEMA*, vol. 1, no. 3, hal. 98891, 2013.
- [17] Y. Irwan, “Pengaruh Sifat Mekanik Hasil *Weld Overlay Cladding* Baja Karbon 0.35%C Dengan Elektroda E 309-16 Dan E 316-16,” *Tek. Mesin*, hal. 9, 2012.
- [18] Y. Irwan, “Analisis Korosi Proses *Cladding* Dengan Elektroda *Stainless Steel* Pada Baja Karbon,” hal. 1–10, 2014.
- [19] V. Manurung, Y. Tri, dan S. Yudi, *Panduan metalografi*. 2020.
- [20] M. S. Jamaluddin dan B. Putri, “Pembuatan Alat Hot Mounting untuk Spesimen Metalografi,” 2019, [Daring]. Tersedia pada: [http://repository.poliupg.ac.id/id/eprint/1522/1/Pembuatan Alat Hot Mounting Untuk Spesimen Metalografi.pdf](http://repository.poliupg.ac.id/id/eprint/1522/1/Pembuatan%20Alat%20Hot%20Mounting%20Untuk%20Spesimen%20Metalografi.pdf)

- [21] Budiman dan Riyanto, “Disusun Oleh : Disusun Oleh :,” *Pengetah. dan Sikap Dalam Penelit. Kesehat.*, no. 11150331000034, hal. 1–147, 2013.
- [22] M. F. Kumayasari dan A. I. Sultoni, “Studi Uji Kekerasan *Rockwell Superficial VS Micro Vickers Comparison Study Of Hardness Testing By Using Rockwell Superficial VS Microvickers*,” *J. Teknol. Proses dan Inov. Ind.*, vol. 2, no. 2, hal. 85–89, 2017.
- [23] G. V. Kozlov dan Y. G. Yanovskii, “- *Microhardness*,” *Fractal Mech. Polym.*, vol. 5, hal. 256–265, 2014, doi: 10.1201/b17730-17.
- [24] Nizar, “Pengaruh Variasi Beban Indentor *Vickers Hardness Tester* Terhadap Hasil Uji Kekerasan Material Aluminium Dan Besi Cor,” *Mer-C*, vol. 1, no. 10, hal. 1–5, 2018.

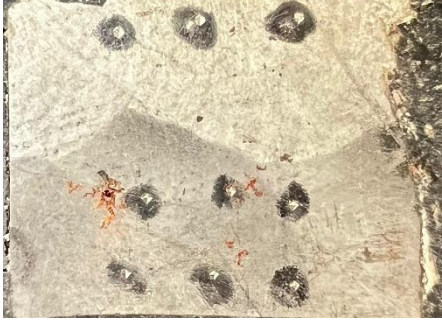
LAMPIRAN

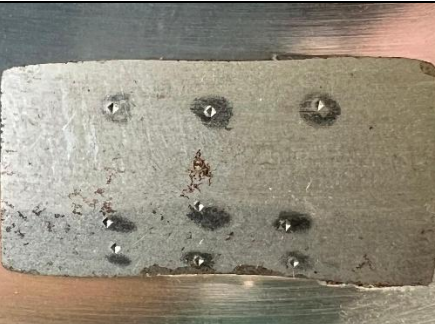
1. Foto Kegiatan

No	Gambar	Keterangan
1		Pemotongan spesimen pengujian dengan gergaji tangan.
2		Proses Mounting berfungsi untuk memudahkan pengujian.
3		Proses Pemolesan, untuk menghaluskan permukaan spesimen agar menunjang pengujian yang optimal.
4		Proses Etsa, untuk memunculkan struktur mikro pada spesimen agar titik uji berada pada posisi yang presisi.

5		Proses Pengujian kekerasan Vickers, untuk menghasilkan nilai kekerasan pada spesimen yang di uji.
---	---	--

2. Foto Makro Spesimen Hasil Uji

 4" Longitudinal 2 Layer	 4" Longitudinal 4 Layer
 4" Circumferential 2 Layer	 4" Circumferential 4 Layer
	

5" Longitudinal 2 Layer	5 " Longitudinal 4 Layer
	
5" Circumferential 2 Layer	5" Circumferential 4 Layer
	
6" Longitudinal 2 Layer	6" Longitudinal 4 Layer
	
6" Circumferential 2 Layer	6" Circumferential 4 Layer

3. Sertifikat Dan Data Hasil Pengujian B4T



**Kementerian
Perindustrian**
REPUBLIK INDONESIA

BADAN STANDARDISASI DAN KEBIJAKAN JASA INDUSTRI
BALAI BESAR STANDARDISASI DAN PELAYANAN JASA INDUSTRI
BAHAN DAN BARANG TEKNIK
Jl. Sangkutang No. 14 Bandung 40133 JAWA BARAT – INDONESIA
Telp. 022 – 2504088, 2510682, 2504828 Fax. 022 – 2502027
Website : www.b4t.go.id E-mail : b4t@b4t.go.id




LAPORAN PENGUJIAN
Test Report

<u>NO. LAPORAN</u> <i>Report No.</i>	: 2-01-25-00023
<u>KOMODITI</u> <i>Commodity</i>	: Material Logam (Baja Karbon)
<u>DIBUAT UNTUK</u> <i>Executed for</i>	: TUGAS AKHIR, UNIVERSITAS PASUNDAN Jl. Dr. Setiabudi No.193, Gegerkalong, Sukasari, KOTA BANDUNG JAWABARAT 40153
<u>TANGGAL DITERIMA</u> <i>Received on</i>	: 24 April 2025
<u>TANGGAL DIUJI</u> <i>Tested on</i>	: 25 April 2025
<u>ALAT UJI</u> <i>Testing equipment</i>	: Vickers Hardness Zwick NS : 61029
<u>SUHU</u> <i>Temperature</i>	: 24°C
<u>STANDAR ACUAN</u> <i>Test Standar</i>	: ASTM E92-2017 (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials)
<u>KRITERIA STANDAR</u> <i>Standar Criteria</i>	: -
<u>URAIAN CONTOH</u> <i>Detail of Sample</i>	: 12 Buah Sampel Uji Keras Vickers pada Baja Karbon, dengan kode: - 4" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer) - 4" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer) - 4" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer) - 4" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer) - 5" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer) - 5" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer) - 5" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer) - 5" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer) - 6" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer) - 6" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer) - 6" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer) - 6" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)
<u>HASIL PENGUJIAN</u> <i>Test Result</i>	: Terlampir (Attached)
<u>DITERBITKAN TANGGAL</u> <i>Issued Date</i>	: 30 April 2025



Ditandatangani secara digital oleh
Kekua Tim Rappat Inspeksi Teknik
Ariyadli Basuki

Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan.
This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.
2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan.
This report shall not be reproduced except in full.

- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
- Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat hukum yang sah.
- Dokumen dapat diverifikasi menggunakan aplikasi VeryDS yang tersedia di Playstore atau dengan mengakses <https://bsre.bssn.go.id/verifikasi>.

F14/10/Rev.01/17012022

Hal 1 dari 6
Page of

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00023			Material Logam (Baja Karbon)			
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
1.	4" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	233	228	228	229.67
		HAZ	212	199	198	203
		Base Metal	181	181	177	179.67
2.	4" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	165	168	172	168.33
		HAZ	139	146	149	144.67
		Base Metal	120	120	119	119.67
3.	5" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	258	254	251	254.33
		HAZ	254	258	258	256.67
		Base Metal	236	233	233	234

Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan.
This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.
2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan.
This report shall not be reproduced except in full.

- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
- Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat hukum yang sah.
- Dokumen dapat diverifikasi menggunakan aplikasi VeryDS yang tersedia di *Playstore* atau dengan mengakses <https://bsre.bssn.go.id/verifikasi>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00023		Material Logam (Baja Karbon)				
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
4.	5" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	206	191	191	196
		HAZ	251	251	233	245
		Base Metal	233	233	228	231.33
5.	6" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	254	258	254	255.33
		HAZ	127	127	126	126.67
		Base Metal	206	203	206	205
6.	6" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	196	199	199	198
		HAZ	236	230	230	232
		Base Metal	215	212	212	213

Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan.
This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.
2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan.
This report shall not be reproduced except in full.

- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
- Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat hukum yang sah.
- Dokumen dapat diverifikasi menggunakan aplikasi VeryDS yang tersedia di *Playstore* atau dengan mengakses <https://bsrc.bssn.go.id/verifikasi>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00023		Material Logam (Baja Karbon)				
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
7.	4" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	245	247	245	245.67
		HAZ	203	203	206	204
		Base Metal	170	172	172	171.33
8.	4" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	164	160	160	161.33
		HAZ	127	125	125	125.67
		Base Metal	128	127	126	127
9.	5" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	357	357	221	311.67
		HAZ	233	233	228	231.33
		Base Metal	203	203	201	202.33

Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan.
This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.
2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan.
This report shall not be reproduced except in full.

- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
 - Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat hukum yang sah.
 - Dokumen dapat diverifikasi menggunakan aplikasi VeryDS yang tersedia di *Playstore* atau dengan mengakses <https://bsrc.bssn.go.id/verifikasi>.

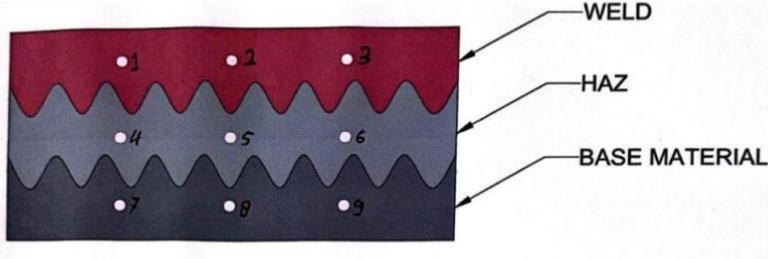
F14/10/Rev.01/17012022

Hal 4 dari 6
Page of

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00023		Material Logam (Baja Karbon)				
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
10.	5" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	179	176	176	177
		HAZ	181	180	182	181
		Base Metal	221	221	225	222.33
11.	6" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	225	225	236	228.67
		HAZ	221	218	218	219
		Base Metal	208	208	206	207.33
12.	6" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	165	160	165	163.33
		HAZ	170	168	168	168.67
		Base Metal	165	160	161	162

Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan.
This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.
2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan.
This report shall not be reproduced except in full.

- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
- Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat hukum yang sah.
- Dokumen dapat diverifikasi menggunakan aplikasi VeryDS yang tersedia di [Playstore](https://bsti.go.id/verifikasi) atau dengan mengakses <https://bsti.go.id/verifikasi>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS	
No Laporan: 2-01-25-00023	Material Logam (Baja Karbon)
Lokasi Pengujian: 	
Keterangan : 1. Hasil pengujian ini tidak untuk diumumkan dan hanya berlaku untuk contoh yang bersangkutan. <i>This report not for publication and the result here in are for the submitted sample only.</i> 2. Laporan ini tidak boleh diperbanyak kecuali secara keseluruhan. <i>This report shall not be reproduced except in full.</i>	