

**Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106
Grade B Diameter Pipa 2 Inch 2.5 Inch dan 3 inch dengan
Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan
Longitudinal dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness*
*Vickers***

***Evaluation of Overlay Welding on ASTM A106 Grade B Carbon Steel
Pipes with Diameters of 2 Inch 2.5 Inch and 3 Inch Using SMAW
with 2 and 4 Layers and Welding Directions of Longitudinal and
Circumferential through Vickers Hardness Testing***

SKRIPSI

Oleh:

Nama: Anggrei Muhammad Januar

NPM: 183030025



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

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

N a m a : Anggrei Muhammad Januar

Nomor Pokok Mahasiswa : 183030025

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Dengan ini menyatakan bahwa:

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

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

Bandung, 25 Juli 2025

Penulis,



Anggrei Muhammad Januar

SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

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

N a m a : Anggrei Muhammad Januar

NPM : 183030025

Program Studi : Teknik Mesin FT UNPAS

Jenis Karya : Skripsi, makalah, laporan magang kerja, karya profesi

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 2 Inch 2.5 Inch dan 3 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,



Anggrei Muhammad Januar

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

**Evaluasi *Overlay Welding* Pada Pipa Baja Karbon ASTM A106
Grade B Diameter Pipa 2 Inch 2.5 Inch dan 3 Inch dengan
Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan
Longitudinal dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness*
*Vickers***



**Nama : Anggrei Muhammad Januar
NPM : 183030025**

Pembimbing Utama

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

Pembimbing Pendamping

Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA.

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106 Grade B Diameter Pipa 2 Inch 2.5 Inch dan 3 Inch dengan Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan *Longitudinal* dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness Vickers*



Nama : Anggrei Muhammad Januar
NPM : 183030025

Tanggal sidang skripsi: 25 Juli 2025

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

Sekretaris : Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA.

Anggota : M. Reza Hermawan, S.T., M.T.

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

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih Lagi Maha Penyayang, segala puji serta syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia dan nikmat-Nya. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan skripsi yang berjudul **Evaluasi *Overlay Welding* pada Pipa Baja Karbon ASTM A106 Grade B Diameter Pipa 2 Inch 2.5 Inch dan 3 Inch dengan Pengelasan SMAW 2 dan 4 Layer Serta Arah Pengelasan *Longitudinal* dan *Circumferential* Melalui Pengujian *Hardness Vickers***. Skripsi ini merupakan syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pasundan Bandung.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penghargaan dan terimakasih penulis ucapkan kepada:

1. Kedua orang tua, Bapak Sobrin dan Ibu Atin Suhartini, atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan,
2. Bapak Dr. Ir. Sugiharto, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Universitas Pasundan,
3. Bapak Prof. Ir. Hery Sonawan, M.T. selaku pembimbing utama yang selalu memberikan ilmu, arahan, kesempatan, semangat dan motivasi, serta fasilitas kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu,
4. Bapak Dr. Ir. Dedi Lazuardi, DEA. selaku pembimbing pendamping yang selalu memberikan ilmu, arahan, kesempatan, semangat dan motivasi, serta fasilitas kepada penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu,
5. Terimakasih yang tidak terhingga untuk ayah utama saya yang tercinta disana Alm. Agus Afiatna. Doa dan kenangan ayah selalu menjadi kekuatan dalam setiap langkah penulis,
6. Kepada Nida Fadhilah, S.Pd. yang selalu memberikan dukungan dari jauh, semangat, motivasi, dan doa yang tulus kepada penulis,
7. Kepada rekan satu perjuangan Teknik Mesin angkatan 2018 Universitas Pasundan,
8. Sahabat serta seluruh pihak yang belum disebutkan satu persatu oleh penulis atas keterlibatan dan dukungannya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang melimpah atas segala kebaikan yang telah diberikan kepada penulis. Penulis berharap bahwa laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada penulis khususnya dan kepada pembaca umumnya.

Wassalamu 'alaikum Wr.Wb

Bandung, 25 Juli 2025

Penulis,

A handwritten signature in dark ink, appearing to be 'Anggrei Muhammad Januar', written in a cursive style.

Anggrei Muhammad Januar

DAFTAR ISI

SURAT PERNYATAAN	I
SURAT PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	II
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	III
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI.....	IV
KATA PENGANTAR.....	V
DAFTAR ISI.....	VII
DAFTAR GAMBAR.....	IX
DAFTAR TABEL	X
ABSTRAK	XI
ABSTRACT	XII
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1. Latar belakang.....	1
2. Rumusan masalah	3
3. Tujuan	3
4. Manfaat	3
5. Batasan masalah.....	4
6. Sistematika penulisan.....	4
BAB II STUDI LITERATUR	6
1. <i>Weld overlay cladding</i>	6
2. <i>Shielding metal arc welding</i>	6
3. Parameter pengelasan.....	7
4. Daerah pengaruh panas (<i>Heat-affected zone</i>).....	9
5. Carbon steel.....	10

6. Tegangan sisa (<i>Residual stress</i>)	11
7. Deformasi dalam pengelasan	12
8. Posisi pengelasan	12
9. Sifat mekanik baja karbon.....	13
10. Korosi.....	15
11. Uji kekerasan.....	16
BAB III METODOLOGI	20
1. Tahapan penelitian	20
2. Tempat penelitian.....	21
3. Variabel penelitian	21
4. Perancangan spesimen uji kekerasan	22
5. Perancangan titik uji spesimen.....	23
6. Peralatan dan bahan yang digunakan	26
7. Proses pembuatan spesimen.....	26
8. Foto makro hasil pengujian kekerasan <i>vickers</i>	30
9. Metode pengolahan data	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	32
1. Pengolahan Data Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	32
2. Data Hasil Pengujian.....	33
3. Hasil Pengolahan Data Pengujian kekerasan	37
4. Pengolahan data menggunakan desain faktorial	44
5. Interpretasi data.....	56
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	58
1. Kesimpulan	58
2. Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>Weld overlay cladding</i> [5]	6
Gambar 2. <i>Shielding metal arc welding</i> [7]	7
Gambar 3. Daerah pengaruh panas [12].....	9
Gambar 4. Diagram fasa baja karbon [13]	10
Gambar 5. Tegangan sisa [14]	11
Gambar 6. Posisi pengelasan [18].....	13
Gambar 7. Penekanan oleh hardened steel ball [25]	17
Gambar 8. Indentasi berupa jejak dengan ukuran diameter dalam skala mm [26]	17
Gambar 9. Skematis prinsip indentasi dengan metode vickers [27]	18
Gambar 10. Diagram Tahapan Penelitian	20
Gambar 11. Lokasi pengujian	21
Gambar 12. Standar Uji kekerasan vickers.....	22
Gambar 13. Titik pengujian kekerasan <i>vickers</i>	25
Gambar 14. Spesimen	26
Gambar 15. Proses pemotongan.....	27
Gambar 16. Proses mounting	27
Gambar 17. Proses pemolesan	28
Gambar 18. Proses etsa (<i>etching</i>).....	28
Gambar 19. Spesimen uji keras	29
Gambar 20. Proses pengujian kekerasan <i>vickers</i>	29
Gambar 21. Hasil foto makro pengujian kekerasan vickers	31
Gambar 22. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi	38
Gambar 23. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi	39
Gambar 24. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi	40
Gambar 25. Titik uji spesimen.....	42
Gambar 26. Titik uji spesimen.....	43

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Alat dan Bahan.....	26
Tabel 2. Data hasil pengujian pipa 2 inch <i>longitudinal</i> 2 layer	33
Tabel 3. Data hasil pengujian pipa 2 inch <i>longitudinal</i> 4 layer	33
Tabel 4. Data hasil pengujian pipa 2 inch <i>circumferential</i> 2 layer	33
Tabel 5. Data hasil pengujian pipa 2 inch <i>circumferential</i> 4 layer	34
Tabel 6. Data hasil pengujian pipa 2.5 inch <i>longitudinal</i> 2 layer.....	34
Tabel 7. Data hasil pengujian 2.5 inch <i>longitudinal</i> 4 layer	34
Tabel 8. Data hasil pengujian pipa 2.5 inch <i>circumferential</i> 2 layer	35
Tabel 9. Data hasil pengujian pipa 2.5 <i>circumferential</i> 4 layer	35
Tabel 10. Data hasil pengujian pipa 3 inch <i>longitudinal</i> 2 layer	35
Tabel 11. Data hasil pengujian pipa 3 inch <i>longitudinal</i> 4 layer	36
Tabel 12. Data hasil pengujian pipa 3 inch <i>circumferential</i> 2 layer	36
Tabel 13. Data hasil pengujian pipa 3 inch <i>circumferential</i> 4 layer	36
Tabel 14. Perhitungan ketidakpastian 2" <i>longitudinal</i> 2 layer	37
Tabel 21. Perhitungan ketidakpastian 2.5" <i>circumferential</i> 4 layer.....	39
Tabel 22. Perhitungan ketidakpastian 3" <i>longitudinal</i> 2 layer	40
Tabel 26. Desain faktorial diarea <i>weld</i>	44
Tabel 27. Desain faktorial diarea HAZ.....	48
Tabel 28. Desain faktorial diarea <i>base</i>	52

ABSTRAK

Pengelasan merupakan proses penting dalam industri manufaktur, terutama dalam penguatan struktur pipa baja karbon. Salah satu metode yang digunakan untuk meningkatkan ketahanan permukaan pipa adalah *overlay welding*, yaitu proses penambahan lapisan logam untuk memperkuat atau memperbaiki permukaan material. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh arah pengelasan *longitudinal* dan *circumferential* serta jumlah layer 2 dan 4-layer terhadap nilai kekerasan pada pipa baja karbon ASTM 106 grade B *schedule* 40 dengan diameter 2 inch, 2.5 inch, dan 3 inch. Pengujian dilakukan dengan metode uji kekerasan *vickers* pada area *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base material*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arah pengelasan *longitudinal* menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dan kekerasan yang lebih homogen dibandingkan *circumferential*, dengan koefisiensi variasi umumnya $< 4\%$. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada pipa 2 inch *longitudinal* 2 layer di area HAZ sebesar 236 HV, sedangkan nilai terendah terdapat pada area *base material* pada pipa 2 inch *circumferential* 2 layer sebesar 122.33 HV. Pipa 4-layer pada arah *circumferential* menunjukkan peningkatan signifikan pada area *weld metal* dan HAZ, terutama pada pipa diameter 2.5 inch dan 3 inc. penambahan layer lebih dari dua cenderung menurunkan kekerasan pada pengelasan *longitudinal*, namun meningkatkan kekerasan pada *circumferential*. Kesimpulannya, pengelasan *longitudinal* 2-layer lebih efektif untuk pipa diameter kecil, sementara pengelasan *circumferential* 4-layer memberikan penguatan kekerasan yang lebih signifikan pada pipa berdiameter lebih besar.

Kata kunci: *overlay welding*, kekerasan, *circumferential*, *longitudinal*, pipa baja karbon, jumlah layer, HAZ, *weld metal*

ABSTRACT

Welding is an important process in the manufacturing industry, especially in reinforcing carbon steel pipe structures. One of the methods used to enhance the surface durability of pipes is overlay welding, which is the process of adding a layer of metal to strengthen or repair the surface of the material. This study aims to determine the effect of longitudinal and circumferential welding directions, as well as the number of layers 2 and 4 layers, on the hardness values of ASTM 106 grade B schedule 40 carbon steel pipes with diameters of 2 inches, 2.5 inches, and 3 inches. The testing was conducted using the Vickers hardness test method on the weld metal area, heat-affected zone, and base material. The research results show that the longitudinal welding direction produces higher hardness values and more homogeneous hardness compared to the circumferential direction, with a variation coefficient generally $< 4\%$. The highest hardness value was obtained in the 2-inch longitudinal 2-layer pipe in the HAZ area at 236 HV, while the lowest value was found in the base material area of the 2-inch circumferential 2-layer pipe at 122.33 HV. The 4-layer pipe in the circumferential direction shows a significant increase in the weld metal and HAZ areas, especially in the 2.5-inch and 3-inch diameter pipes. the addition of more than two layers tends to decrease hardness in longitudinal welding, but increase hardness in circumferential welding. In conclusion, 2-layer longitudinal welding is more effective for small diameter pipes, while 4-layer circumferential welding provides a more significant hardness reinforcement for larger diameter pipes.

Keywords: *overlay welding, hardness, circumferential welding, longitudinal welding, carbon steel pipe, number of layers, HAZ, weld metal*

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Pipa baja karbon adalah salah satu komponen yang umum digunakan dalam sistem perpipaan untuk berbagai aplikasi industri, seperti disektor minyak dan gas, petrokimia, dan pembangkit listrik. Pipa-pipa ini sering mengalami keausan, korosi, dan kerusakan akibat beban kerja yang berat [1].

Overlay welding merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pada proses pengelasan pipa baja karbon. *Overlay welding* melibatkan penambahan lapisan logam tambahan pada permukaan pipa untuk meningkatkan sifat-sifat tertentu, seperti ketahanan terhadap korosi, erosi, atau keausan. Teknik ini juga dapat digunakan untuk memperbaiki atau memperkuat struktur pipa yang mengalami kerusakan atau keausan. Dalam konteks ini, salah satu aspek dari proses *overlay welding* yang mempengaruhi struktur material adalah keberadaan tegangan sisa disekitar area las. Tegangan sisa merupakan tegangan internal yang terbentuk akibat perubahan termal dan mekanis selama proses pengelasan yang tertinggal setelah proses pemanasan dan pendinginan akibat pengelasan. Keberadaan tegangan sisa ini sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi kekuatan tarik, ketahanan terhadap kelelahan (*fatigue*), bahkan menyebabkan patah dini pada komponen apabila tidak dikendalikan dengan baik.

Berdasarkan hasil dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Andika Pratama Candra, Rizki Asnil Ashar Nasihin, dan M. Robby Apriansyah, *overlay welding* pada pipa baja karbon dengan arah *longitudinal* dan *circumferential* telah dianalisis melalui pengujian tarik. Hasil dari analisis Andika Pratama Candra, yang berjudul “Studi pengaruh *overlay welding* pada pipa baja karbon dalam arah *longitudinal* dan *circumferential* terhadap tegangan sisa”, menunjukkan bahwa pengelasan *circumferential* menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan *longitudinal*. Nilai tertinggi sebesar 1033 MPa diperoleh pada pipa 5inch dengan 2layer pengelasan *circumferential*. Rata-rata kekuatan tarik semua spesimen adalah 658 MPa. Faktor yang paling mempengaruhi kekuatan tarik adalah jumlah layer, dimana penambahan lebih dari 2layer tidak meningkatkan kekuatan secara signifikan, bahkan bisa menurunkannya. Secara keseluruhan, pengelasan *circumferential* dengan 2layer paling efektif, terutama pada pipa berdiameter besar, dan tetap lebih unggul dibanding *longitudinal* untuk pipa berdiameter kecil [2]. Dan hasil dari analisis Rizki Asnil Ashar Nasihin, yang berjudul “Analisis

pengaruh arah pengelasan *longitudinal* serta *circumferential* terhadap tegangan sisa pada pipa baja karbon 2inch dan 4inch dengan proses *overlay welding*”, menunjukkan bahwa diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer berpengaruh signifikan terhadap tegangan sisa. Pipa berdiameter 4inch menurunkan tegangan sisa rata-rata sebesar 60,8 MPa, sementara pengelasan *circumferential* menurunkan tegangan sisa rata-rata sebesar 126,8 MPa dibanding *longitudinal*. penambahan jumlah layer dari 2 ke 4layer juga menurunkan tegangan sisa sebesar 59,3 MPa. Secara keseluruhan, pipa berdiameter besar dengan pengelasan *longitudinal* memiliki tegangan sisa lebih kecil, sedangkan pengelasan *circumferential* memberikan kekuatan tarik lebih tinggi karena distribusi lasan [3]. Hasil dari analisis M. Robby Apriansyah, yang berjudul “Analisis pengaruh arah pengelasan *longitudinal* dan *circumferential* terhadap tegangan sisa pada pipa baja karbon dengan proses *overlay welding*”, menunjukkan bahwa pengelasan *circumferential* menghasilkan kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan *longitudinal*. jumlah layer pengelasan lebih dari dua tidak menunjukkan peningkatan signifikan [4].

Penelitian sebelumnya sebagian besar hanya berfokus pada pengukuran tegangan sisa dan kekuatan tarik menggunakan uji tarik. Tegangan sisa memberikan gambaran mengenai kondisi internal material, namun belum memberikan informasi terhadap perubahan sifat mekanis. Khususnya pada daerah *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base metal*. Dalam kenyataannya, ketahanan aus, kekuatan permukaan, serta umur kelelahan suatu pipa sangat dipengaruhi oleh sifat kekerasan material di area tersebut.

Oleh karena itu untuk memperoleh informasi lebih lanjut mengenai efek *overlay welding* terhadap sifat mekanik material, maka diperlukan penelitian lebih lanjut menggunakan metode uji kekerasan *vickers* (*vickers hardness test*) untuk melengkapi penelitian sebelumnya. Metode ini akan memberikan data kekerasan yang akurat, sehingga dapat mengidentifikasi perubahan sifat mekanik antar *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base metal*. Dengan menggabungkan data nilai kekerasan, hubungan antara parameter pengelasan dan perubahan sifat mekanik dapat dipahami secara mendalam.

Berdasarkan hal tersebut oleh karena itu, makalah ini bertujuan untuk menyelidiki efek *overlay welding* pada pipa baja karbon dengan arah *longitudinal* dan *circumferential*, serta untuk memahami bagaimana pengaruhnya perubahan tegangan sisa dan kekerasan material. diharapkan bahwa penelitian ini akan memberikan wawasan yang berharga bagi industri dalam meningkatkan kualitas dan keandalan sistem perpipaan serta struktur lainnya.

2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka didapatlah perumusan masalah yaitu:

- Bagaimana pengaruh arah pengelasan longitudinal dan circumferential terhadap nilai kekerasan pada area weld, HAZ, dan base material
- Bagaimana pengaruh jumlah layer terhadap nilai kekerasan pada area weld, HAZ, dan base material
- Bagaimana pengaruh diameter pipa terhadap nilai kekerasan pada area weld, HAZ, dan base material
- Parameter manakah yang menghasilkan nilai kekerasan tertinggi dan terendah pada masing-masing area

3. Tujuan

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Mendapatkan nilai kekerasan pada pipa baja karbon yang telah di overlay baik arah longitudinal maupun circumferential dengan ukuran diameter pipa 2inch, 2.5inch, dan 3inch SCH 40, dengan masing-masing jumlah layer 2 dan 4 layer.
- Mengetahui bagaimana arah pengelasan mempengaruhi tingkat kekerasan di daerah lasan, seperti *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base metal*.
- Mengetahui seberapa besar nilai kekesaran pada pipa baja karbon setelah dilakukan proses *overlay welding* dengan arah *longitudinal* dan *circumferential*, sehingga bisa dilihat arah mana yang memberikan hasil lebih baik.

4. Manfaat

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini adalah:

- Memberikan informasi mengenai perubahan sifat mekanik (kekerasan) akibat proses *overlay welding*
- Dapat dijadikan acuan bagi peneliti sejenis, khususnya dalam *Shielding Metal Arc Welding* (SMAW) terhadap pengujian tarik dan pengujian kekerasan.
- Memberikan pengetahuan dan wawasan kepada pendidikan teknik mesin, serta masyarakat dalam bidang *Shielding Metal Arc Welding* (SMAW) agar dapat meningkatkan hasil pengelasan.

- Sebagaimana informasi penting bagi peneliti dan pembaca guna meningkatkan pengetahuan dalam bidang pengelasan *Shielding Metal Arc Welding* (SMAW) terhadap pengujian tarik dan pengujian kekerasan.
- Mengetahui pengaruh arah pengelasan *longitudinal* dan *circumferential* terhadap tegangan sisa dan nilai kekerasan pada pipa baja karbon yang dilakukan proses *overlay welding* melalui pengujian tarik dan pengujian kekerasan.

5. Batasan masalah

Batasan masalah pada penelitian ini:

- Material pipa yang digunakan adalah pipa *Carbon Steel* ASTM Grade B dengan diameter pipa 2inch, 2.5inch, dan 3inch SCH 40
- Pengelasan yang dilakukan adalah pengelasan *Shielding Metal Arc Welding*
- Arah pengelasan yaitu *Longitudinal* dan *Circumferential*
- Jumlah welding pass adalah 5 pass
- Jumlah welding layer adalah 2 dan 4 layer
- Pengujian yang dilakukan adalah uji kekerasan dengan metode vickers.
- Titik pengujian dibatasi pada tiga area *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base metal*.

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

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang tahapan penelitian, tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, setup, rancangan pengujian, metode pengolahan data, dan proses pembentukan spesimen.

BAB IV ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi 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. *Weld 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 [5].



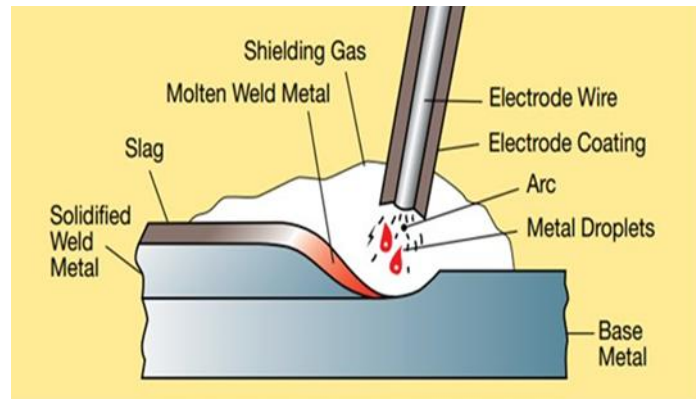
Gambar 1. *Weld overlay cladding* [5]

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* [6].

2. *Shielding metal arc welding*

Shielding metal arc welding adalah sebuah proses penyambungan logam yang menggunakan energi panas untuk mencairkan benda kerja dan elektroda (bahan pengisi) [7]. Energi panas pada proses SMAW dihasilkan karena adanya lompatan 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 [8]. Fluks pada elektroda SMAW berfungsi untuk melindungi logam las yang mencair saat proses pengelasan berlangsung. Fluks ini akan menjadi slag ketika sudah padat [9]. Elektroda ini selama pengelasan akan mengalami pencairan bersama dengan logam induk dan membeku bersama, menjadi bagian kampuh las. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang

terbawa arus busur listrik yang terjadi [10]. 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. 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*).



Gambar 2. *Shielding metal arc welding* [7]

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 [11].

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

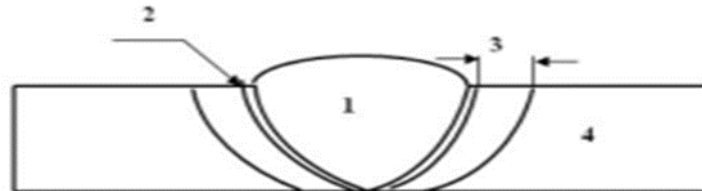
Pemilihan polaritas tergantung pada jenis bahan pembungkus elektroda, kapasitas panas sambungan. Bila titik cair bahan induk tinggi dan kapasitas panas besar sebaiknya digunakan polaritas lurus (elektrodanya dihubungkan dengan kutub negatif), sedangkan bila kapasitas panas kecil seperti pada plat tipis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

- Penembusan (penetrasi)

Penembusan atau penetrasi dalam pengelasan adalah untuk menghasilkan kualitas sambungan yang baik. Kedalaman 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. Daerah pengaruh panas (*Heat-affected zone*)

Daerah pengaruh panas dalam proses pengelasan merupakan bagian yang sangat penting dalam proses pengelasan. Karena daerah ini akan berpengaruh pada kekuatan sambungan las. Struktur logam pada daerah HAZ (*heat-affected zone*) berubah secara berangsur dari struktur logam induk ke struktur logam las. Pada daerah HAZ yang dekat dengan garis lebur kristalnya tumbuh dengan cepat dan membentuk butir-butir kasar. Daerah ini dinamakan batas las [12].



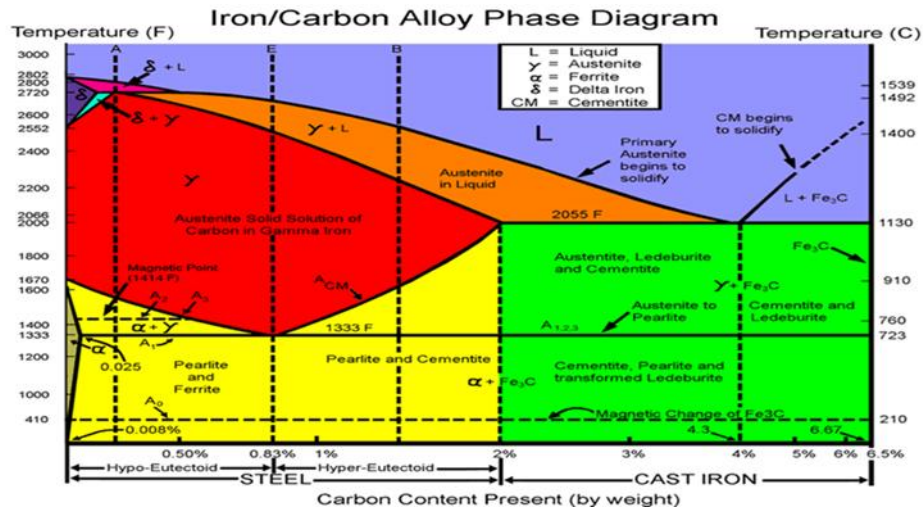
Gambar 3. Daerah pengaruh panas [12]

Keterangan:

- a. Logam las (*weld metal*) adalah daerah dimana terjadi pencairan logam dengan cepat kemudian membeku. *Fusion line* merupakan daerah perbatasan antara daerah yang mengalami peleburan dan yang tidak melebur. Daerah ini sangat tipis sekali sehingga dinamakan garis gabungan antara weld metal dan HAZ.
- b. HAZ merupakan daerah yang di pengaruhi panas dan juga logam dasar yang bersebelahan dengan logam las selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat, sehingga terjadi perubahan struktur akibat pemanasan.
- c. Logam induk (*Parent metal*) merupakan logam dasar dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat.
- d. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material. Distribusi yang tidak merata ini terjadi baik dalam hal tempatnya pada material maupun bila ditinjau dari segi waktu terjadinya. Ketidak merataan distribusi temperatur inilah yang menjadi penyebab timbulnya deformasi pada struktur las. Sehingga untuk dapat menyelesaikan berbagai persoalan dari tegangan dan deformasi hasil pengelasan harus diketahui dahulu bagaimana distribusi dari temperatur yang dihasilkan terhadap material.

5. Carbon steel

Carbon Steel atau baja karbon merupakan salah satu jenis baja paduan yang terdiri atas unsur besi (Fe) dan karbon (C). 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 [13].



Gambar 4. Diagram fasa baja karbon [13]

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 persentase komposisi kimia karbon dalam baja yakni sebagai berikut:

- Baja karbon rendah (*Low carbon steel*)

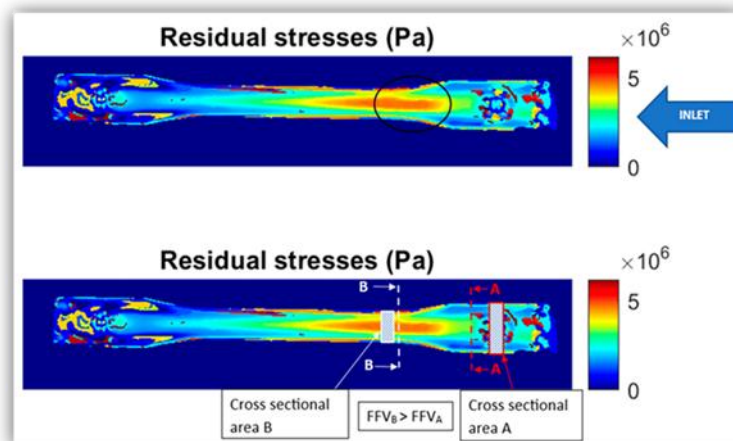
Baja karbon rendah merupakan baja dengan kandungan unsur karbon dalam struktur baja kurang dari 0,3% C. Baja karbon rendah ini memiliki ketangguhan dan keuletan tinggi akan tetapi memiliki sifat kekerasan dan ketahanan aus yang rendah. Pada umumnya baja jenis ini digunakan sebagai bahan baku untuk pembuatan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

Tegangan yang muncul pada material selama proses pengerjaan disebut tegangan dalam, tegangan sisa atau tegangan yang terjebak dalam material, proses pengerjaan ini bisa berupa proses pemotongan, bending maupun pengelasan. Tegangan dalam atau tegangan sisa adalah tegangan yang bekerja pada material meskipun tidak ada gaya luar yang bekerja pada benda tersebut dan tegangan ini bersifat tetap selama tidak ada proses *stress relieving*. Tegangan sisa yang terjadi dalam suatu benda yang diakibatkan oleh distribusi temperatur yang tidak merata, seperti ketika pengelasan, sering disebut juga tegangan termal [14].



Gambar 5. Tegangan sisa [14]

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tegangan sisa seperti proses penyusutan, proses pendinginan yang cepat, dan transformasi fasa. Volume yang dipanaskan akan

mengalami penyusutan selama proses pendinginan berdasarkan koefisien ekspansi termal material dan perbedaan temperatur yang ada. Volume yang mengalami peleburan tidak memberikan gaya kepada volume sekitar, sehingga sambungan las dan volume logam yang tidak meleleh selama proses pengelasan memiliki suhu berbeda dan tegangan sisa terjadi [15].

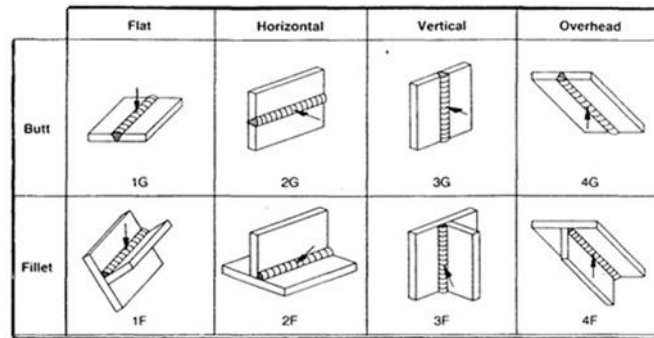
7. Deformasi dalam pengelasan

Deformasi adalah perubahan bentuk akibat adanya tegangan dalam logam yaitu tegangan memanjang dan tegangan melintang, yang disebabkan ekspansi (pengembangan) yang tidak merata dari logam las selama periode pemanasan dan pendinginan ini dibiarkan membeku secara bebas maka volume dari logam cair tersebut akan mengalami penyusutan secara bebas. Bila sebuah logam dipanasi secara merata maka akan terjadi ekspansi ke segala arah dan setelah terjadi pendinginan maka akan terjadi kontraksi secara merata sampai dimensi semula. Bila suatu batang mendapat tahanan selama dipanaskan maka ekspansi ke arah lateral tidak akan terjadi namun volume ekspansi harus terjadi sehingga batang akan mengalami ekspansi ke arah vertikal. Bila batang tersebut kembali ke temperature kamar maka kontraksi tetap terjadi ke segala arah secara merata sehingga batang sekarang menjadi berubah bentuk dari bentuk semula. Kecepatan pengelasan juga akan mempengaruhi terhadap terjadinya distorsi/deformasi, karena lama tidaknya panas diterima oleh logam las [16].

Dalam proses terjadinya perubahan bentuk (deformasi) disebabkan karena adanya pencairan, pembekuan, pengembangan termal, perpendekan dan penyusutan maka pada kontruksi las selalu terjadi perubahan bentuk yang sangat rumit [17].

8. 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. 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 [18].



Gambar 6. Posisi pengelasan [18]

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

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

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

3F = Posisi pengelasan vertikal (*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 (*Flat Position*)

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

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

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

9. Sifat mekanik baja karbon

Kemampuan suatu material dalam menerima beban atau energi atau gaya dengan tidak menyebabkan kerusakan pada komponen suatu material disebut dengan sifat mekanik. Pada umumnya, suatu material memiliki sifat mekanik yang baik, namun terdapat pula sifat mekanik yang kurang baik pada sifat yang lain. Maka dari itu perlu dilakukan suatu tindakan untuk memperbaiki kekurangan sifat mekanik tersebut dengan berbagai cara [19]. Berikut merupakan sifat-sifat mekanik pada baja karbon adalah sebagai berikut:

a. Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan adalah kemampuan suatu material dalam menerima tegangan tanpa membuat material tersebut menjadi patah. Terdapat beberapa macam kekuatan

tergantung dari jenis material bekerja, yakni kekuatan tarik, kekuatan tekan, kekuatan geser, kekuatan lengkung, kemudian kekuatan korosi.

b. Kekerasan (*Hardness*)

Kekerasan merupakan kemampuan suatu material untuk tahan terhadap penggoresan, indentasi, atau penetrasai, pengikisan (abrasi). Sifat mekanik tersebut memiliki hubungan dengan sifat ketahanan terhadap aus (*wear resistance*). Sifat mekanik kekerasan ini juga memiliki hubungan dengan sifat kekuatan.

c. Elastisitas (*Elasticity*)

Elastisitas merupakan kemampuan yang dimiliki suatu material dalam menerima beban tanpa menyebabkan terjadinya perubahan terhadap bentuk yang permanen setelah tegangannya dihilangkan. Apabila besarnya nilai tegangan tidak melampaui batas tertentu maka perubahan bentuk hanya bersifat sementara, perubahan bentuk tersebut akan hilang bersamaan dengan menghilangnya tegangan. Namun apabila nilai tegangan sudah melewati batas, maka sebagian perubahan bentuk tersebut akan tetap ada walaupun tegangannya sudah dihilangkan. Sifat elastisitas juga menunjukkan kemampuan dari suatu material untuk bisa kembali pada bentuk dan ukuran awal setelah menerima beban yang menyebabkan deformasi.

d. Kekakuan (*Stiffness*)

Kekakuan merupakan kemampuan suatu material dalam menerima beban atau tegangan dengan tidak menyebabkan terjadinya defleksi atau perubahan bentuk (deformasi).

e. Plastisitas (*Plasticity*)

Plastisitas merupakan kemampuan suatu material untuk mengalami deformasi plastis yang permanen dengan tidak menyebabkan material tersebut patah. Sifat mekanik ini sangat dibutuhkan untuk material yang melalui proses pembentukan seperti *forging*, *extruding*, *rolling*, sifat mekanik ini dapat diartikan dengan keuletan (*ductility*). Apabila semakin sering material mampu mengalami deformasi plastis maka material akan memiliki keuletan yang tinggi. Begitu sebaliknya semakin sedikit material menunjukkan terjadinya deformasi plastis maka material tersebut memiliki sifat keuletan yang rendah atau getas.

f. Ketangguhan (*Toughness*)

Ketangguhan merupakan sifat mekanik yang menyatakan kemampuan suatu material dalam menyerap energi dengan tidak menyebabkan patah pada material. Hal ini diartikan dengan banyaknya besar energi yang dibutuhkan agar dapat mematahkan suatu material pada kondisi tertentu.

g. Kelelahan (*Fatigue*)

Kerusakan pada komponen-komponen mesin sebagian besar terjadi karena adanya kelelahan. Kelelahan memiliki sifat yang sangat penting dan sulit untuk diukur karena banyaknya faktor yang mempengaruhi. Kelelahan merupakan kecenderungan pada suatu logam yang akan mengalami patah saat menerima tegangan yang kuat dan berulang-ulang.

h. Keretakan (*Creep*)

Pada saat suatu material mendapatkan beban yang besar dengan jumlah yang relatif tetap, logam akan mengalami deformasi plastis yang besarnya adalah fungsi waktu. Hal ini disebut juga dengan keretakan atau *creep*.

10. Korosi

Korosi merupakan bentuk kerusakan atau penurunan kualitas logam yang terjadi akibat reaksi antara logam dengan lingkungan yang bersifat korosif. Proses ini dapat berlangsung melalui reaksi kimia atau elektrokimia, yang menyebabkan logam mengalami degradasi. Umumnya korosi ini sering disebut sebagai pengkaratan, yaitu proses kimia yang terjadi pada logam dalam berbagai kondisi lingkungan. Penelitian di bidang elektrokimia telah banyak membantu dalam memahami korosi, yang pada dasarnya merupakan interaksi kimia antara logam dengan zat-zat di sekitarnya atau dengan partikel dalam struktur logam. Dari sudut pandang kimia, korosi adalah proses dimana logam teroksidasi menjadi ion saat bersentuhan dengan air dan oksigen. Secara elektrokimia, korosi melibatkan perpindahan elektron dari logam (yang berperan sebagai anoda) ke lingkungannya (yang berfungsi sebagai katoda). Proses ini berbeda dengan penurunan mutu akibat interaksi fisik, seperti erosi dan keausan, yang tidak tergolong sebagai korosi. Melalui reaksi ini, sebagian logam akan berubah menjadi senyawa yang lebih stabil, yang secara alami memang merupakan bentuk umum logam di alam. Oleh karena itu, korosi juga dapat dipandang sebagai proses kembalinya logam ke bentuk asalnya di alam, kebalikan dari proses metalurgi yang ekstraktif yang bertujuan memurnikan logam dari senyawa [20].

11. Uji kekerasan

Kekerasan suatu material dapat didefinisikan sebagai ketahanan material tersebut terhadap gaya penekan dari material lain yang lebih keras. Penekanan tersebut dapat berupa mekanisme penggoresan (*seratching*), pantulan ataupun indentasi dari material keras terhadap suatu permukaan benda uji [21]. Berdasarkan mekanisme penekanan tersebut, dikenal 3 metode uji kekerasan:

a. Metode gores

Metode ini tidak banyak lagi digunakan dalam dunia metalurgi dan material lanjut, tetapi masih sering dipakai dalam dunia mineralogi. Metode ini dikenalkan oleh Frenich Mohs yang membagi kekerasan material di dunia ini berdasarkan skala (yang kemudian dikenal sebagai skala *Mohs*). Skala ini bervariasi dari nilai 1 untuk kekerasan tertinggi, sebagaimana dimiliki oleh intan [22].

b. Metode elastik/pantul (*rebound*)

Dengan metode ini, kekerasan suatu material ditentukan oleh alat *scleroscope* yang mengukur tinggi pantulan suatu pemukul (*hammer*) dengan berat tertentu yang dijatuhkan dari suatu ketinggian terhadap permukaan benda uji. Tinggi pantulan (*rebound*) yang dihasilkan mewakili kekerasan benda uji. Semakin tinggi pantulan tersebut, yang ditunjukkan oleh dial pada alat pengukur, maka kekerasan benda uji dinilai semakin tinggi [23].

c. Metode indentasi

Pengujian dengan metode ini dilakukan dengan penekanan benda uji dengan indenter dengan gaya tekan dan waktu indentasi yang ditentukan. Kekerasan suatu material ditentukan oleh dalam ataupun luas area indentasi yang dihasilkan (tergantung jenis indenter dan jenis pengujian) [24]. Berdasarkan prinsip bekerjanya metode uji kekerasan dengan cara indentasi dapat diklasifikasikan sebagai berikut:

1) Pengujian *Brinell*

Metode ini diperkenalkan pertama kali oleh J.A. Brinell pada tahun 1900. Pengujian kekerasan dilakukan dengan memakai bola baja yang diperkeras (*hardened steel ball*) dengan beban dan waktu indentasi tertentu. Hasil penekanan adalah jejak berbentuk lingkaran bulat yang harus dihitung diameternya di bawah mikroskop

khusus pengukur jejak [25]. Pengukuran nilai kekerasan suatu material diberikan oleh rumus:

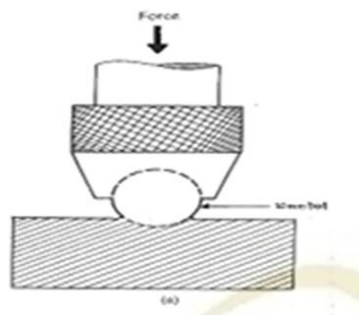
$$BHN = \frac{2P}{(\pi D)(D^2 - \sqrt{d^2})} \quad (1)$$

Keterangan:

P : beban (kg)

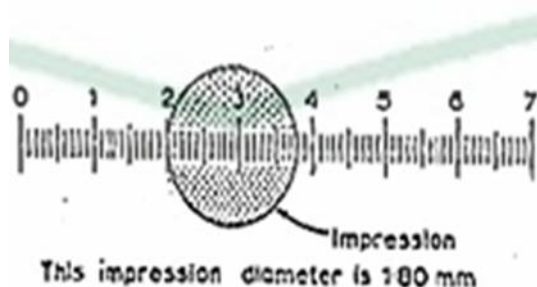
D : diameter indentor (mm)

d : diameter jejak (mm)



Gambar 7. Penekanan oleh hardened steel ball [25]

Penekanan oleh hardened steel ball prosedur standar pengujian mensyaratkan bola baja dengan diameter 10 mm dan beban 3000 kg untuk pengujian logam-logam *ferrous*, atau 500 kg untuk logam-logam *non-ferrous*, waktu indentasi biasanya sekitar 10 detik sementara untuk logam-logam *non-ferrous* 30 detik. Walaupun demikian pengaturan beban dan waktu indentasi untuk setiap material dapat pula ditentukan oleh karakteristik alat penguji. Nilai kekerarasan suatu material yang dinotasikan dengan “HB” tanpa tambahan angka dibelakangnya menyatakan kondisi pengujian standar dengan indentor bola baja 10 mm, beban 3000 kg selama waktu 1-15 detik. Untuk kondisi yang lain, nilai kekerasan HB diikuti angka-angka yang menyatakan kondisi pengujian. Contoh: 75 HB 10/500/30 menyatakan nilai kekerasan *Brinell* sebesar 75 dihasilkan oleh suatu pengujian dengan indentor 10 mm, pembebanan 500 kg selama 30 detik [26].



Gambar 8. Indentasi berupa jejak dengan ukuran diameter dalam skala mm [26]

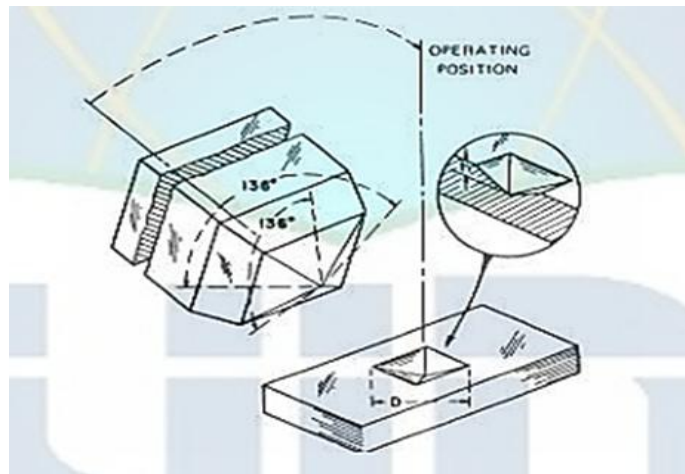
2) Pengujian *vickers*

Pada metode ini digunakan indentor intan berbentuk piramida dengan 136° , prinsip pengujian adalah sama dengan metode *brinell*, walaupun jejak yang dihasilkan berbentuk bujur sangkar berdiagonal. Panjang diagonal diukur dengan skala pada mikroskop pengukur jejak [27]. Nilai kekerasan material di berikan oleh:

$$VHN = \frac{1.854 P}{D^2} \quad (2)$$

Keterangan:

d : Panjang diagonal rata-rata dari jejak berbentuk bujur sangkar



Gambar 9. Skematis prinsip indentasi dengan metode vickers [27]

3) Pengujian *rockwell*

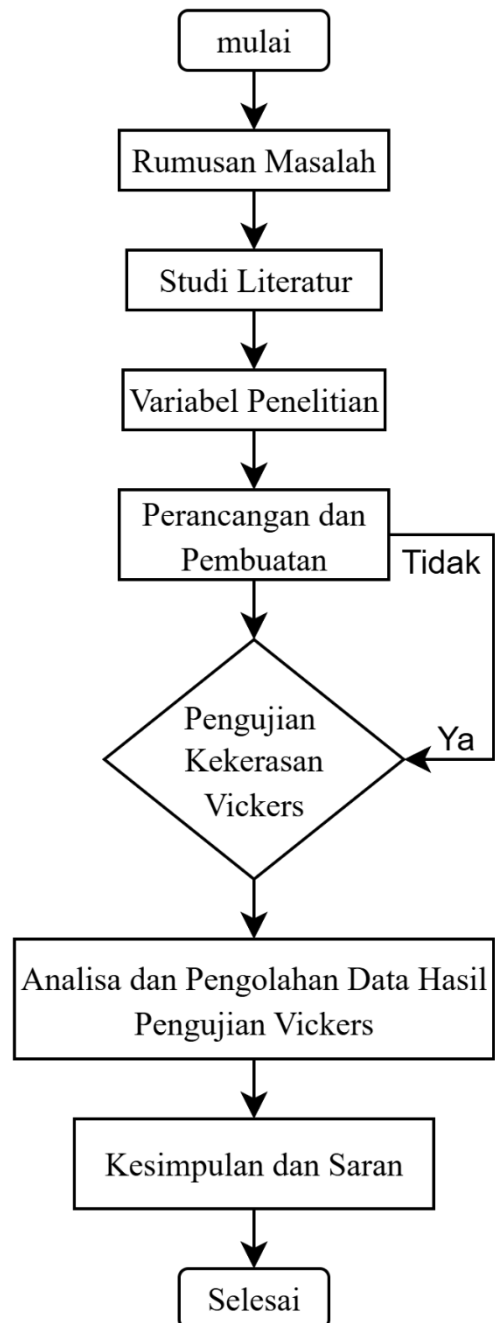
Berbeda dengan metode *brinell* dan *vickers* dimana kekerasan suatu bahan dinilai dari diameter atau diagonal jejak yang dihasilkan maka metode *rockwell* merupakan uji kekerasan dengan pembacaan langsung (*direct-reading*). Metode ini banyak dipakai dalam industri karena pertimbangan praktis. Berikut ini diberikan gambar yang memperlihatkan perbedaan skala dan range uji skala *rockwell*. Variasi dalam beban dan indentor yang digunakan membuat metode ini memiliki banyak macamnya. Metode yang paling umum dipakai adalah *rockwell* B (dengan indentor bola baja berdiameter 1/6 inch dan beban 100 kg) dan *rockwell* C (dengan indentor intan dengan beban 150 kg). walaupun demikian metode *rockwell* lainnya juga biasa dipakai. Oleh karenanya skala kekerasan *rockwell* suatu material harus dispesifikasikan dengan jelas. Contohnya 82 HRB, yang

menyatakan material diukur dengan skala B: indenter 1/6 inch dan beban 100 kg. berikut ini diberikan gambar yang memperlihatkan perbedaan skala dan *range* uji skala *rockwell* [28].

BAB III METODOLOGI

1. Tahapan penelitian

Tahapan pengujian agar didapat data dengan baik maka dilakukan pengujian dengan menggunakan diagram alir sebagai berikut:



Gambar 10. Diagram Tahapan Penelitian

2. Tempat penelitian

Pengujian kekerasan pada penelitian ini akan dilakukan 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

Pada penelitian ini terdapat 12 spesimen yang akan di uji, pada setiap spesimen di batasi pada tiga area *weld metal*, *heat-affected zone*, dan *base material*, dengan setiap daerah nya masing-masing 3 titik pengujian.

a. Variabel *input*

- Diameter : Pipa Baja Karbon SCH 40 ukuran 2 inch, 2.5 inch, dan 3 inch Seri 106 Grade B
- Arah pengelasan : *Longitudinal* dan *Circumferential*
- Jumlah layer : 2 dan 4 layer

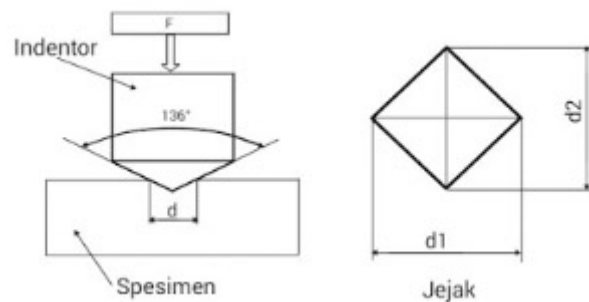
b. Variabel *output*

- Nilai kekerasan

4. Perancangan spesimen uji kekerasan

a. Spesimen uji kekerasan *vickers*

Pembuatan spesimen uji kekerasan yang sesuai dengan standar. Standar yang digunakan untuk pengujian kekerasan ini ASTM E92. ASTM E92 adalah pengujian untuk *vickers* hardness pada logam, baik mikro maupun makro, tergantung besar beban uji yang digunakan. Pada gambar 12 ditunjukkan dimensi dari spesimen uji kekerasan.



Gambar 12. Standar Uji kekerasan vickers

- Indentor : Berlian bentuk piramida segi empat 136°
- Kisaran beban : Dari 1 gf hingga 100 kgf
- Durasi Beban : 10-15 detik
- Perhitungan Kekerasan:

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

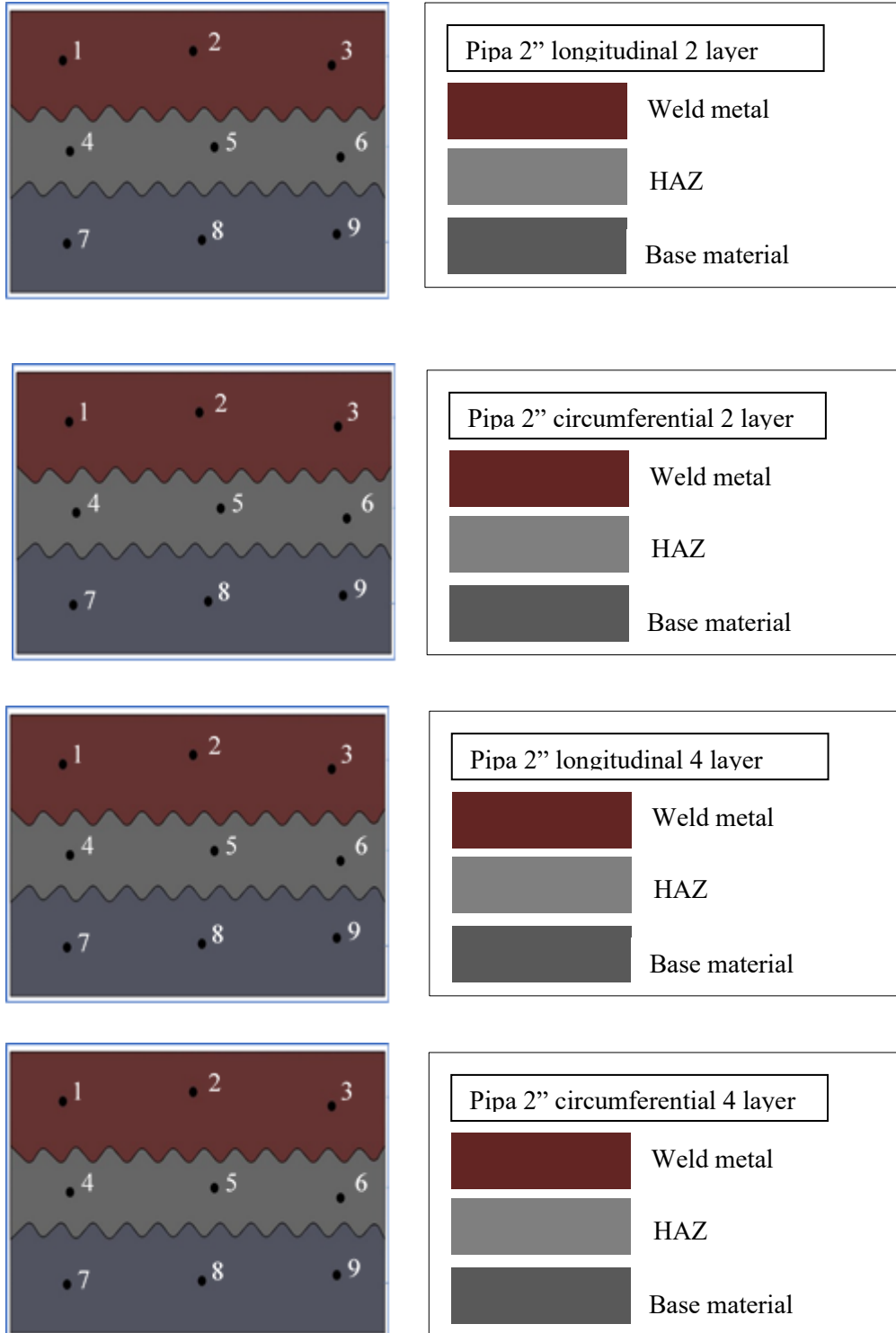
HV : Nilai Kekerasan

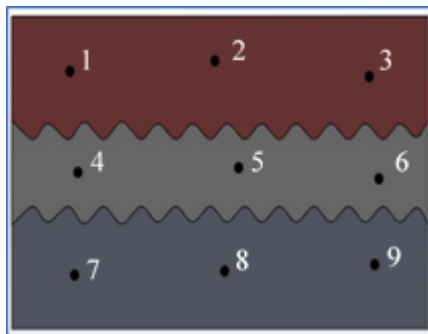
F : Beban

D² : Diagonal rata-rata (mm)

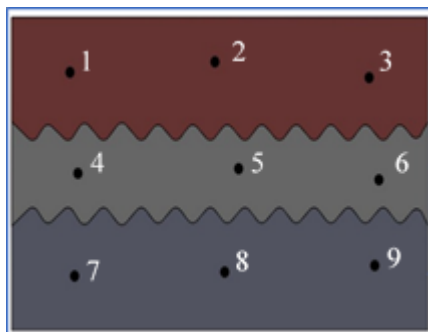
5. Perancangan titik uji spesimen

pemilihan titik pengujian kekerasan disesuaikan agar mencapai perbandingan antara weld metal metal, heat-affected zone, dan base material. Seperti pada gambar 13 berikut.

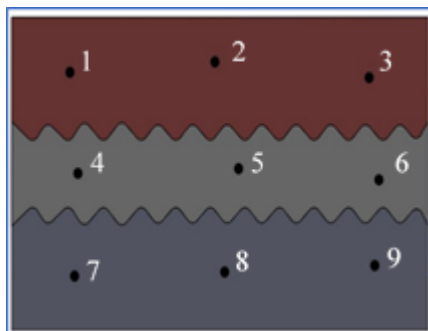




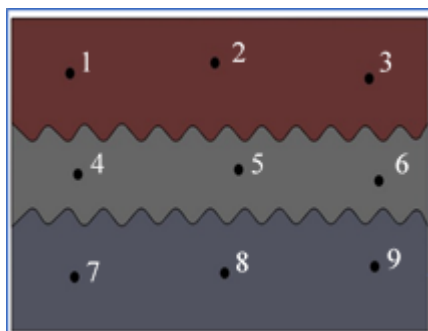
Pipa 2.5" longitudinal 2 layer



Pipa 2.5" circumferential 2 layer

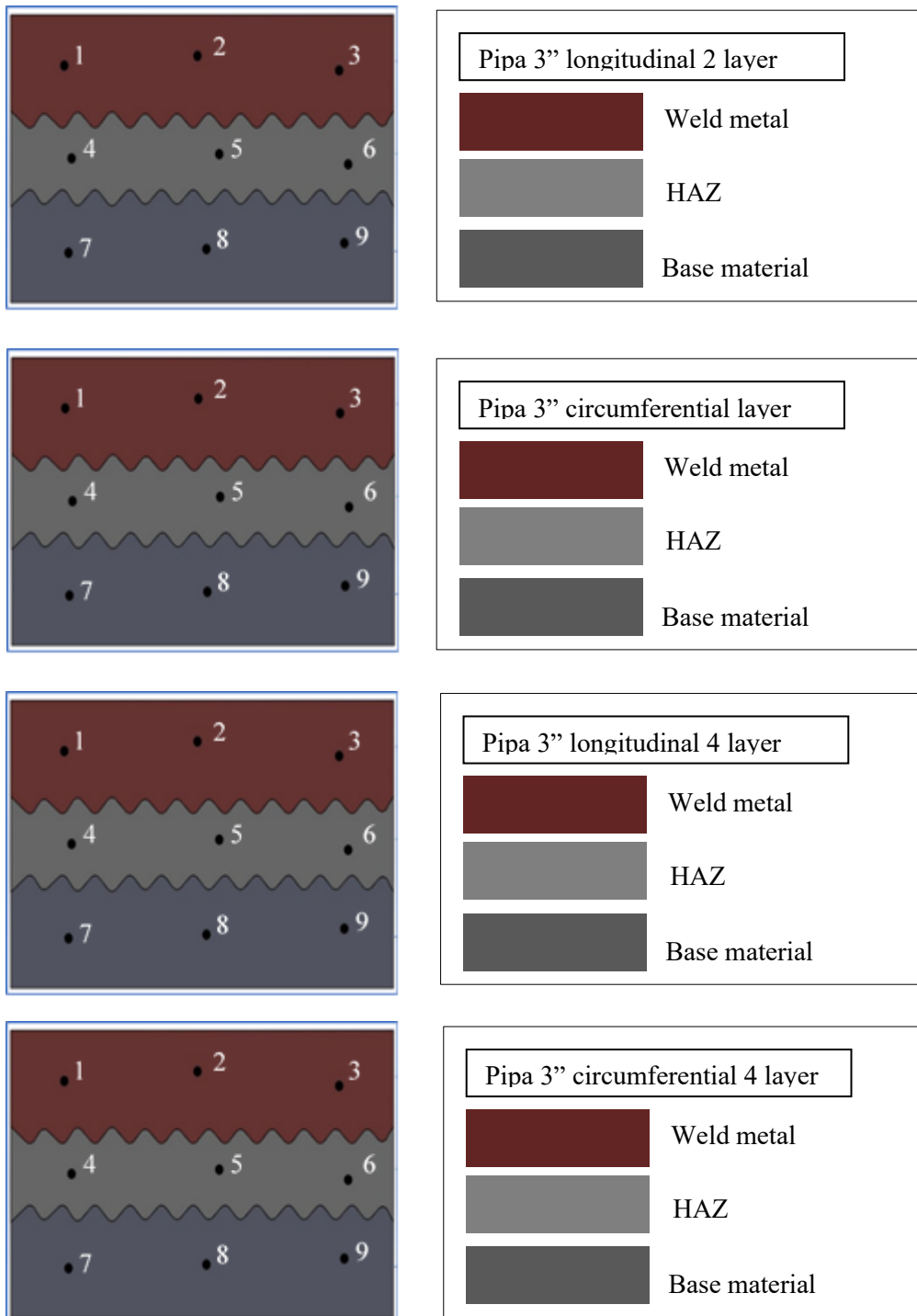


Pipa 2.5" longitudinal 4 layer



Pipa 2.5" circumferential 4 layer





Gambar 13. Titik pengujian kekerasan *vickers*

6. Peralatan dan bahan yang digunakan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini seperti tabel 1 dibawah ini:

Tabel 1. Alat dan Bahan

No	Alat dan Bahan	Jumlah
1	Pipa Baja Karbon 2 Inch SCH 40	4
2	Pipa Baja Karbon 2.5 Inch SCH 40	4
3	Pipa Baja Karbon 3 Inch SCH 40	4
4	Sarung Tangan Karet	1
5	Lilin Malam	5
6	Resin	1
7	Katalis	1
8	Amplas 1000	5
9	Pipa PVC	1
10	Mesin Hardness Vickers	1

7. Proses pembuatan spesimen

a. Persiapan bahan

Bahan uji yang digunakan untuk pengujian kekerasan berasal dari sisa spesimen yang telah melalui proses 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. Seperti tampak pada gambar 14



Gambar 14. Spesimen

b. Proses pemotongan

Dalam proses ini spesimen diambil dari hasil pengujian tarik, selanjutnya dilakukan dengan cara memotong mekanis, sampel dipotong arah dengan memanjang. Seperti tampak pada gambar 15



Gambar 15. Proses pemotongan

c. Proses mounting

Pada proses mounting dilakukan didalam suatu cetakan pipa yang kemudian dituangkan cairan katalis dan resin. Tujuannya untuk menjamin permukaan spesimen rata, dan mudah pegang selama proses preparasi (grinding dan polishing). Seperti tampak pada gambar 16



Gambar 16. Proses mounting

d. Proses *polishing*

Proses pemolesan dilakukan menggunakan mesin grinding dengan kertas amplas bertingkat 800-1000, untuk menghasilkan permukaan yang rata dan halus. Tahap ini bertujuan agar bekas indentasi uji kekerasan vickers dapat terlihat dengan jelas saat diamati. Seperti tampak pada gambar 17



Gambar 17. Proses pemolesan

e. Proses etsa

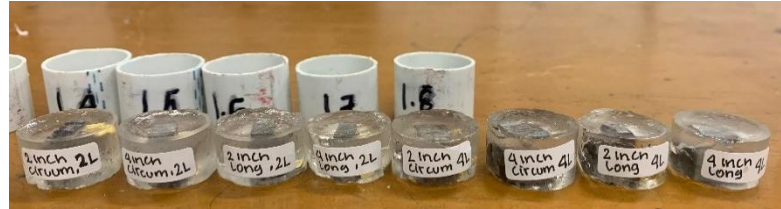
Setelah proses pemolesan selesai, dilanjutkan dengan proses etsa menggunakan natal 2% (campuran 2% asam nitrat dan alkohol) selama 10 detik. Tujuannya adalah untuk menampakkan batas antar zona weld metal, heat-affected zone, dan base material. seperti tampak pada gambar 16



Gambar 18. Proses etsa (*etching*)

f. Hasil akhir spesimen uji kekerasan

Berikut merupakan spesimen uji kekerasan yang akan dilakukan pengujian kekerasan metode vickers dan hasil akhir spesimen uji kekerasan yang telah diproses seperti pada gambar 19



Gambar 19. Spesimen uji keras

g. Metode dan proses pengujian kekerasan

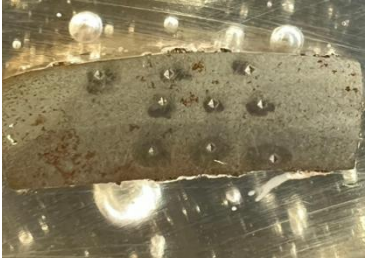
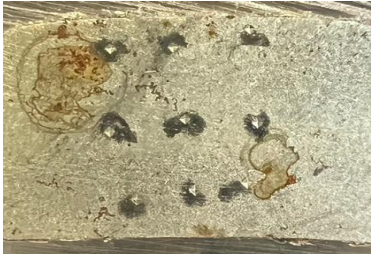
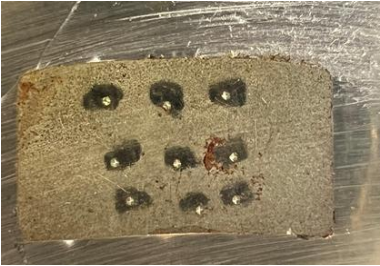
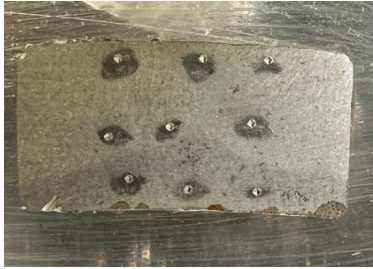
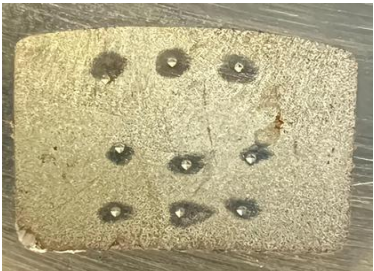
Pengujian kekerasan pada spesimen dilakukan menggunakan alat uji *Vickers Hardness Zwick NS 61029*, dengan mengacu pada standar ASTM E92. Seperti tampak pada gambar 20

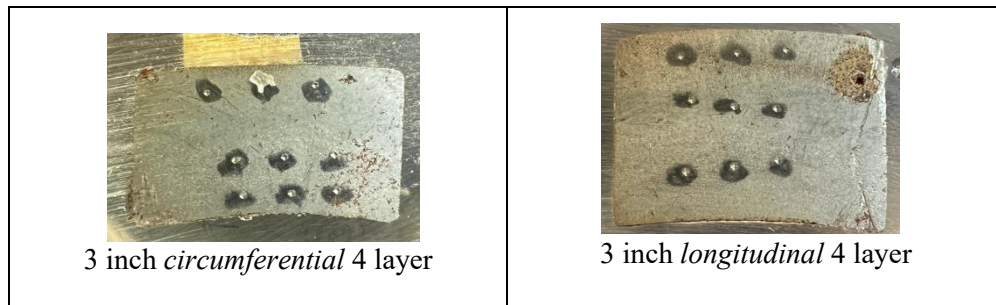


Gambar 20. Proses pengujian kekerasan *vickers*

Uji kekerasan dilakukan dengan menekan indenter berbentuk piramida intan ke permukaan spesimen menggunakan beban 10 kgf (HV10) selama 15 detik. Setelah itu, dua diagonal lekukan diukur melalui mikroskop optik bawaan alat untuk memperoleh nilai kekerasan pada masing-masing zona.

8. Foto makro hasil pengujian kekerasan *vickers*

 2 inch <i>circumferential</i> 2 layer	 2 inch <i>longitudinal</i> 2 layer
 2 inch <i>circumferential</i> 4 layer	 2 inch <i>longitudinal</i> 4 layer
 2.5 inch <i>circumferential</i> 2 layer	 2.5 inch <i>longitudinal</i> 2 layer
 2.5 inch <i>circumferential</i> 4 layer	 2.5 inch <i>longitudinal</i> 4 layer
 3 inch <i>circumferential</i> 2 layer	 3 inch <i>longitudinal</i> 2 layer



Gambar 21. Hasil foto makro pengujian kekerasan vickers

9. Metode pengolahan data

- Pengumpulan data dari pengujian kekerasan yang diperoleh dari B4T.
- Menghitung nilai kekerasan dari setiap titik uji pada area *weld metal*, *Heat-affected zone*, dan *base material*.
- Data tersebut kemudian dihitung rata-ratanya untuk masing-masing bagian.
- Data ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik agar lebih mudah dipahami dan terlihat pola perubahannya.
- Dilanjutkan interpretasi data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pengolahan Data Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pada dasarnya peneliti mengacu pada standar ASTM E92, pengujian kekerasan dilakukan pada benda hasil pengelasan baja 106 Grade B dengan variasi diameter pipa, jumlah layer, dan arah pengelasan yang berbeda. Setelah dilakukan pengujian kekerasan didapatkan hasil data nilai kekerasan. Dari data tersebut dapat menghitung nilai rata-rata kekerasan dari setiap benda uji.

Langkah-langkah perhitungan sebagai berikut:

- Beban uji kekerasan mengacu pada hasil uji keras yang telah dilakukan dengan standar ASTM E92.
- Indentor : Diagonal berbentk intan segi empat, 136° antar bidang
- Kisaran beban : Dari 1 gf hingga 100 kgf
- Durasi tekan : 10-15 detik

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

HV : Nilai kekerasan vickers

F : Beban dalam kgf

d : Panjang rata-rata diagonal bekas indentasi (mm)

2. Data Hasil Pengujian

Tabel dibawah ini merupakan data hasil pengujian kekerasan dengan metode vickers.

Tabel 2. Data hasil pengujian pipa 2 inch *longitudinal* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2" Longitudinal	2	Weld	228
2	2" Longitudinal	2	Weld	233
3	2" Longitudinal	2	Weld	230
Rata-rata				230
4	2" Longitudinal	2	HAZ	236
5	2" Longitudinal	2	HAZ	236
6	2" Longitudinal	2	HAZ	236
Rata-rata				236
7	2" Longitudinal	2	Base Material	230
8	2" Longitudinal	2	Base Material	230
9	2" Longitudinal	2	Base Material	228
Rata-rata				229

Tabel 3. Data hasil pengujian pipa 2 inch *longitudinal* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2" Longitudinal	4	Weld	213
2	2" Longitudinal	4	Weld	213
3	2" Longitudinal	4	Weld	216
Rata-rata				214
1	2" Longitudinal	4	HAZ	212
2	2" Longitudinal	4	HAZ	209
3	2" Longitudinal	4	HAZ	209
Rata-rata				210
7	2" Longitudinal	4	Base Material	193
8	2" Longitudinal	4	Base Material	191
9	2" Longitudinal	4	Base Material	191
Rata-rata				192

Tabel 4. Data hasil pengujian pipa 2 inch *circumferential* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2" Circumferetial	2	Weld	160
2	2" Circumferetial	2	Weld	181
3	2" Circumferetial	2	Weld	162
Rata-rata				168
4	2" Circumferetial	2	HAZ	181
5	2" Circumferetial	2	HAZ	179
6	2" Circumferetial	2	HAZ	181
Rata-rata				180
7	2" Circumferetial	2	Base Material	170
8	2" Circumferetial	2	Base Material	170
9	2" Circumferetial	2	Base Material	168
Rata-rata				169

Tabel 5. Data hasil pengujian pipa 2 inch *circumferential* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2" Circumferential	4	Weld	165
2	2" Circumferential	4	Weld	162
3	2" Circumferential	4	Weld	162
Rata-rata				163
4	2" Circumferential	4	HAZ	121
5	2" Circumferential	4	HAZ	121
6	2" Circumferential	4	HAZ	134
Rata-rata				125
7	2" Circumferential	4	Base Material	134
8	2" Circumferential	4	Base Material	132
9	2" Circumferential	4	Base Material	134
Rata-rata				133

Tabel 6. Data hasil pengujian pipa 2.5 inch *longitudinal* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2.5" Longitudinal	2	Weld	225
2	2.5" Longitudinal	2	Weld	221
3	2.5" Longitudinal	2	Weld	221
Rata-rata				222
4	2.5" Longitudinal	2	HAZ	178
5	2.5" Longitudinal	2	HAZ	175
6	2.5" Longitudinal	2	HAZ	175
Rata-rata				176
7	2.5" Longitudinal	2	Base Material	170
8	2.5" Longitudinal	2	Base Material	170
9	2.5" Longitudinal	2	Base Material	171
Rata-rata				170

Tabel 7. Data hasil pengujian 2.5 inch *longitudinal* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2.5" Longitudinal	4	Weld	236
2	2.5" Longitudinal	4	Weld	221
3	2.5" Longitudinal	4	Weld	222
Rata-rata				226
4	2.5" Longitudinal	4	HAZ	218
5	2.5" Longitudinal	4	HAZ	221
6	2.5" Longitudinal	4	HAZ	221
Rata-rata				220
7	2.5" Longitudinal	4	Base Material	206
8	2.5" Longitudinal	4	Base Material	208
9	2.5" Longitudinal	4	Base Material	206
Rata-rata				207

Tabel 8. Data hasil pengujian pipa 2.5 inch *circumferential* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2.5" Circumferential	2	Weld	159
2	2.5" Circumferential	2	Weld	156
3	2.5" Circumferential	2	Weld	165
Rata-rata				160
4	2.5" Circumferential	2	HAZ	156
5	2.5" Circumferential	2	HAZ	156
6	2.5" Circumferential	2	HAZ	155
Rata-rata				156
7	2.5" Circumferential	2	Base Material	123
8	2.5" Circumferential	2	Base Material	122
9	2.5" Circumferential	2	Base Material	122
Rata-rata				122

Tabel 9. Data hasil pengujian pipa 2.5 *circumferential* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	2.5" Circumferential	4	Weld	117
2	2.5" Circumferential	4	Weld	117
3	2.5" Circumferential	4	Weld	119
Rata-rata				118
4	2.5" Circumferential	4	HAZ	199
5	2.5" Circumferential	4	HAZ	199
6	2.5" Circumferential	4	HAZ	196
Rata-rata				198
7	2.5" Circumferential	4	Base Material	187
8	2.5" Circumferential	4	Base Material	191
9	2.5" Circumferential	4	Base Material	191
Rata-rata				190

Tabel 10. Data hasil pengujian pipa 3 inch *longitudinal* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	3" Longitudinal	2	Weld	209
2	3" Longitudinal	2	Weld	206
3	3" Longitudinal	2	Weld	209
Rata-rata				208
4	3" Longitudinal	2	HAZ	210
5	3" Longitudinal	2	HAZ	215
6	3" Longitudinal	2	HAZ	222
Rata-rata				216
7	3" Longitudinal	2	Base Material	247
8	3" Longitudinal	2	Base Material	236
9	3" Longitudinal	2	Base Material	230
Rata-rata				238

Tabel 11. Data hasil pengujian pipa 3 inch *longitudinal* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	3" Longitudinal	4	Weld	224
2	3" Longitudinal	4	Weld	228
3	3" Longitudinal	4	Weld	227
Rata-rata				226
4	3" Longitudinal	4	HAZ	188
5	3" Longitudinal	4	HAZ	181
6	3" Longitudinal	4	HAZ	183
Rata-rata				184
7	3" Longitudinal	4	Base Material	177
8	3" Longitudinal	4	Base Material	175
9	3" Longitudinal	4	Base Material	175
Rata-rata				176

Tabel 12. Data hasil pengujian pipa 3 inch *circumferential* 2 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	3" Circumferential	2	Weld	151
2	3" Circumferential	2	Weld	151
3	3" Circumferential	2	Weld	155
Rata-rata				152
4	3" Circumferential	2	HAZ	159
5	3" Circumferential	2	HAZ	160
6	3" Circumferential	2	HAZ	159
Rata-rata				159
7	3" Circumferential	2	Base Material	122
8	3" Circumferential	2	Base Material	123
9	3" Circumferential	2	Base Material	122
Rata-rata				122

Tabel 13. Data hasil pengujian pipa 3 inch *circumferential* 4 layer

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Harga (HV)
1	3" Circumferential	4	Weld	183
2	3" Circumferential	4	Weld	181
3	3" Circumferential	4	Weld	181
Rata-rata				182
4	3" Circumferential	4	HAZ	172
5	3" Circumferential	4	HAZ	168
6	3" Circumferential	4	HAZ	168
Rata-rata				169
7	3" Circumferential	4	Base Material	130
8	3" Circumferential	4	Base Material	130
9	3" Circumferential	4	Base Material	128
Rata-rata				129

3. Hasil Pengolahan Data Pengujian 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.

A. 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:

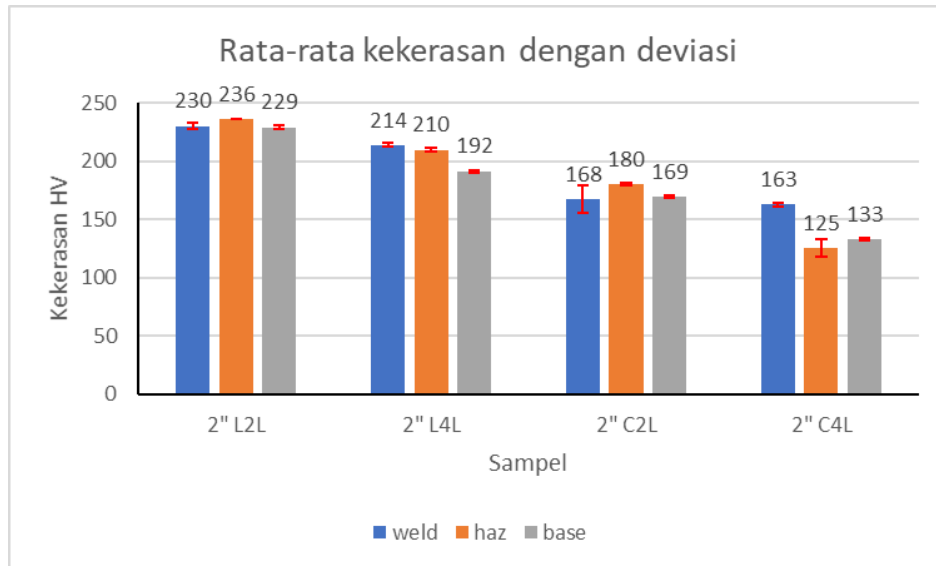
Presentase ketidakpastian dihitung dengan membagi nilai UNC terhadap nilai rata-rata, lalu dikalikan 100%, sebagai berikut:

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

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

Tabel 14. Perhitungan ketidakpastian 2" *longitudinal* 2 layer

Nilai ketidakpastian						
No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	Deviasi	%UNC
1	2" L	2	Weld	230	2.52	1%
2	2" L	2	HAZ	236	0	0%
3	2" L	2	Base	229	1.15	1%
4	2" L	4	Weld	214	1.73	1%
5	2" L	4	HAZ	210	1.73	1%
6	2" L	4	Base	192	1.15	1%
7	2" C	2	Weld	168	11.59	7%
8	2" C	2	HAZ	180	1.15	1%
9	2" C	2	Base	169	1.15	1%
10	2" C	4	Weld	163	1.73	1%
11	2" C	4	HAZ	125	7.51	6%
12	2" C	4	Base	133	1.15	1%



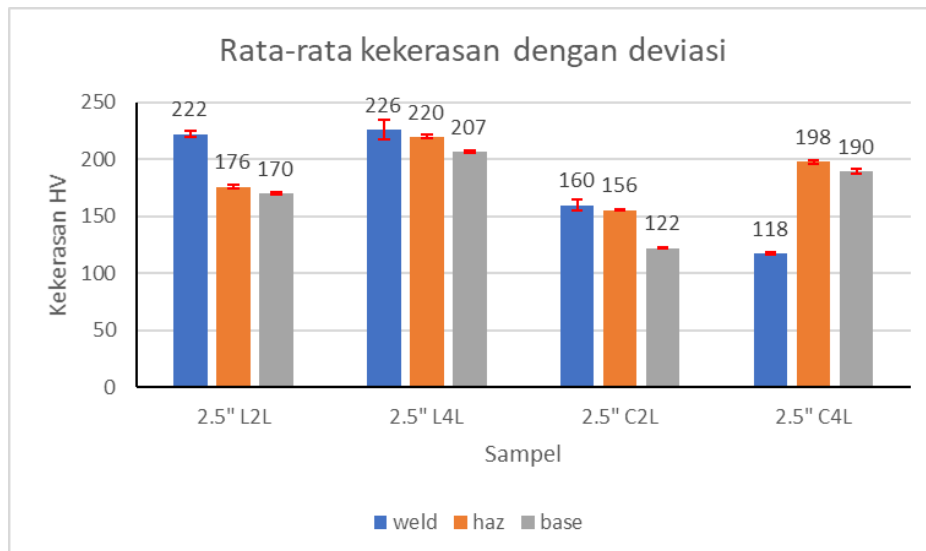
Gambar 22. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi

Berdasarkan grafik rata-rata kekerasan HV pada pipa berdiameter 2 inch dengan variasi jumlah layer dan arah pengelasan, terlihat bahwa nilai kekerasan tertinggi keseluruhan terdapat pada area HAZ (*Heat Affected Zone*) untuk beberapa spesimen. Pada spesimen 2 inch *longitudinal* 2 layer, kekerasan tertinggi terdapat diarea HAZ sebesar 236 HV, diikuti oleh area *weld* 230 HV dan *base* 229 HV. Pada spesimen 2 inch *longitudinal* 4 layer, dengan kekerasan *weld* 214 HV, HAZ sebesar 210 HV, dan *base* sebesar 192 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pada kedua spesimen *longitudinal* tersebut, nilai kekerasan masih terdistribusi merata dan tidak menunjukkan penyimpangan signifikan.

Namun, kondisi berbeda terlihat pada pengelasan *circumferential*. Pada spesimen 2 inch *circumferential* 2 layer, area HAZ memiliki nilai kekerasan tertinggi yaitu 180 HV, diikuti area *base* 169 HV dan area *weld* 168 HV, sementara pada pipa 2 inch *circumferential*, terjadi penurunan kekerasan yang cukup signifikan diarea HAZ 125 HV, lebih rendah dibandingkan area *base* 133 HV dan area *weld* 163 HV. Dimana nilai kekerasan diarea *base* lebih tinggi dibandingkan HAZ seperti pada pipa 2 inch *circumferential* 4 layer dapat menjadi indikasi adanya ketidakhomogenan.

Tabel 15. Perhitungan ketidakpastian 2.5" *circumferential* 4 layer
nilai ketidakpastian

No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	deviasi	%UNC
1	2.5" L	2	Weld	222	2.31	1%
2	2.5" L	2	HAZ	176	1.73	1%
3	2.5" L	2	Base	170	0.58	0%
4	2.5" L	4	Weld	226	8.39	4%
5	2.5" L	4	HAZ	220	1.73	1%
6	2.5" L	4	Base	207	1.15	1%
7	2.5" C	2	Weld	160	4.58	3%
8	2.5" C	2	HAZ	156	0.58	0%
9	2.5" C	2	Base	122	0.58	0%
10	2.5" C	4	Weld	118	1.15	1%
11	2.5" C	4	HAZ	198	1.73	1%
12	2.5" C	4	Base	190	2.31	1%



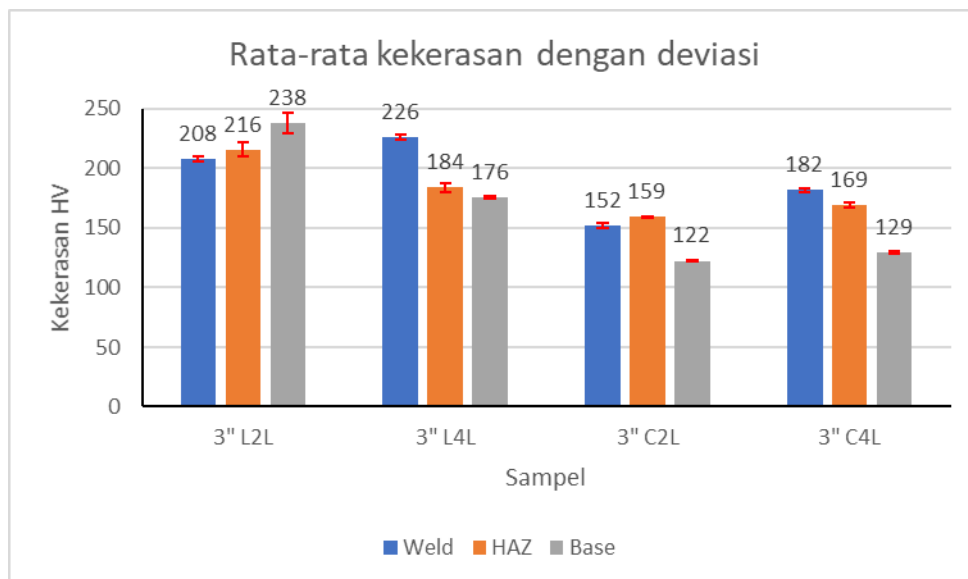
Gambar 23. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi

Pada spesimen dengan arah pengelasan *longitudinal*, yaitu pipa 2.5 inch *longitudinal* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi berada pada area *weld* sebesar 222 HV, diikuti area HAZ 176 HV dan base material 170 HV. Sedangkan pada spesimen 2.5 inch *longitudinal* 4 layer, kekerasan tertinggi juga terdapat pada area *weld* yaitu 226 HV, kemudian HAZ 220 HV, dan *base* material 207 HV. Distribusi nilai kekerasan ini menunjukkan bahwa proses pengelasan *longitudinal*, baik dengan dengan 2 atau 4 layer, menghasilkan kekerasan yang tinggi dan merata sesuai hasil las, dengan penurunan nilai yang normal dari area *weld* menuju *base* material.

Pada arah pengelasan *circumferential*, kekerasan cenderung tidak stabil. Pada spesimen 2.5 inch *circumferential* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi tetap terdapat di area weld 160 HV, diikuti oleh area HAZ 156 HV dan *base* material 122 HV. Namun, perbedaan antar area cukup besar, terutama penurunan dari HAZ ke *base*, yang menunjukkan adanya penurunan homogenitas di area tersebut. Kondisi sangat tinggi pada spesimen 2.5 inch *circumferential* 4 layer, dimana kekerasan tertinggi justru berada pada area HAZ 198 HV, kemudian *base* material 190 HV, dan nilai terendah justru pada area *weld* sebesar 118 HV. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengelasan *circumferential* dengan 4 layer berpotensi menurunkan kekerasan secara signifikan.

Tabel 16. Perhitungan ketidakpastian 3" *longitudinal* 2 layer

Nilai ketidakpastian						
No.	Spesimen	Layer	Lokasi	Rata-rata HV	Deviasi	%UNC
1	3" L	2	Weld	208	1.73	1%
2	3" L	2	HAZ	216	6.03	3%
3	3" L	2	Base	238	8.62	4%
4	3" L	4	Weld	226	2.08	1%
5	3" L	4	HAZ	184	3.61	2%
6	3" L	4	Base	176	1.15	1%
7	3" C	2	Weld	152	2.31	2%
8	3" C	2	HAZ	159	0.58	0%
9	3" C	2	Base	122	0.58	0%
10	3" C	4	Weld	182	1.15	1%
11	3" C	4	HAZ	169	2.31	1%
12	3" C	4	Base	129	1.15	1%



Gambar 24. Grafik rata-rata kekerasan dengan deviasi

Pada spesimen 3 inch *longitudinal* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi justru terdapat pada area *base* material yaitu 238 HV, diikuti oleh HAZ 216 HV dan *weld* 208 HV. Kondisi yang sama juga terjadi pada spesimen 3 inch *longitudinal* 4 layer, dimana kekerasan tertinggi berada pada area *weld* 226 HV, kemudian HAZ 184 HV dan *base* material 176 HV. Nilai kekerasan yang tinggi diarea *base* seperti pada spesimen 3 inch *longitudinal* 2 layer dapat dikategorikan anomali karena secara keseluruhan, nilai kekerasan pada area *base* seharusnya lebih rendah dibanding area *weld* dan HAZ akibat tidak mengalami perubahan mikrostruktur akibat proses pengelasan. Ketidakteraturan ini dapat menunjukkan ketidakhomogenan struktur logam hasil pengelasan, yang dapat disebabkan oleh perbedaan kondisi material awal, proses pengelasan yang tidak optimal, atau kesalahan operator dalam pembacaan indentasi.

Pada arah pengelasan *circumferential*, terlihat nilai kekerasan yang berbeda. Pada spesimen 3 inch *circumferential* 2 layer, nilai kekerasan tertinggi berada diarea HAZ 159 HV, diikuti oleh area *weld* 152 HV dan *base* material 122 HV. Sedangkan pada 3 inch *circumferential* 4 layer, nilai kekerasan tertinggi ditemukan diarea *weld* sebesar 182 HV, kemudian HAZ 169 HV dan *base* material 129 HV. Hal ini menunjukkan bahwa pengelasan dengan arah *circumferential* dan penambahan jumlah layer menyebabkan penurunan kekerasan.

B. Analisis ketidakpastian

Dari hasil perhitungan ketidakpastian, terdapat nilai yang cukup tinggi pada area *weld* dan HAZ pada pipa 2 inch dengan arah pengelasan *circumferential*. Pada area *weld* dengan jumlah 2 layer, diperoleh nilai ketidakpastian sebesar 7%, sedangkan pada area HAZ dengan jumlah 4 layer diperoleh nilai ketidakpastian sebesar 6%. Kedua nilai tersebut melebihi batas toleransi 5%.

Nilai kekerasan rata-rata area *weld* adalah 168 HV, yang diperoleh dari tiga titik uji, yaitu:

Titik 1: 160 HV

Titik 2: 181 HV

Titik 3: 162 HV

Nilai kekerasan rata-rata area HAZ adalah 125 HV, yang diperoleh dari tiga titik uji, yaitu:

Titik 4: 121 HV

Titik 5: 121 HV

Titik 6: 134 HV



2 inch *circumferential* 2 layer



2 inch *circumferential* 4 layer

Gambar 25. Titik uji spesimen

Nilai ketidakpastian sebesar 6-7% ini menjadi indikator bahwa hasil perhitungan kekerasan pada area *weld* dan HAZ memiliki nilai kekerasan yang beragam dan tidak konsisten. Hal ini dapat terjadi karena beberapa faktor yang dapat dipengaruhi oleh kondisi pengelasan, ketelitian dalam penempatan titik uji, kesalahan operator dalam pembacaan indentasi, karakteristik termal HAZ yang berubah-ubah, penempatan titik uji yang terlalu dekat dengan batas fusi, dan pembacaan diagonal yang terlalu pendek (kesalahan kecil ini dapat menyebabkan nilai HV tampak lebih tinggi dari seharusnya, berpengaruh pada naiknya nilai ketidakpastian).

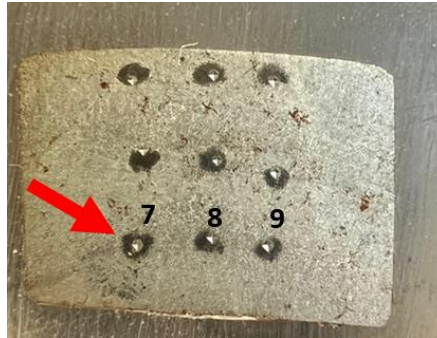
Dari hasil pengujian kekerasan *vickers* terhadap spesimen 3 inch *longitudinal* 2 layer, ditemukan fenomena yang tidak sesuai dengan karakteristik material hasil pengelasan, nilai kekerasan diarea *base* material justru menunjukkan nilai kekerasan tertinggi, yaitu:

Titik 7 : 247 HV

Titik 8 : 236 HV

Titik 9 : 230 HV

Rata-rata HV: 238 HV



Gambar 26. Titik uji spesimen

Nilai ketidakpastian sebesar 4% ini menjadi indikator bahwa hasil perhitungan kekerasan pada area *base* memiliki nilai kekerasan yang beragam dan konsisten, dimana area *base* material seharusnya memiliki nilai kekerasan paling rendah dibandingkan area *weld* dan HAZ. Hal ini dapat terjadi karena faktor yang dapat dipengaruhi oleh, kesalahan operator dalam pembacaan diagonal yang terlalu pendek (kesalahan kecil ini dapat menyebabkan nilai HV tampak lebih tinggi dari seharusnya, berpengaruh pada naiknya ketidakpastian).

- Faktor operator

Selama proses pengujian, mendapati adanya kendala dalam pembacaan jejak indentasi, terutama pada permukaan yang tidak rata atau jejak yang kurang jelas. Hal ini menyebabkan potensi kesalahan operator, seperti ketidaktepatan dalam menentukan ujung indentasi atau fokus mikroskop yang kurang maksimal. Kondisi tersebut mempengaruhi hasil pengukuran dan menjadi salah satu faktor penyebab tingginya nilai ketidakpastian pada beberapa titik uji.

- Faktor lingkungan

Seperti pencahayaan yang kurang saat pengamatan mikroskop dan kondisi permukaan spesimen yang kotor atau teroksidasi, juga dapat mempengaruhi akurasi pembacaan dan hasil pengukuran.

4. Pengolahan data menggunakan desain faktorial

Untuk mempermudah dalam menganalisis pengaruh interaksi setiap variabel dalam penelitian ini, penggunaan metode desain faktorial adalah pilihan yang tepat. Berikut tabel desain faktorial diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer.

Tabel 17. Desain faktorial diarea *weld*

KEKERASAN DIAREA <i>WELD</i>								
DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	453	780	1501	8	187.67	Rata-rata
2.5	L	2	328	721	-49	4	-12.17	Pengaruh DP
2	C	2	440	-16	-285	4	-71.16	Pengaruh AP
2.5	C	2	281	-33	-57	4	-14.33	DP-AP
2	L	4	-8	-125	-59	4	-14.83	Pengaruh Jumlah Layer
2.5	L	4	-8	-160	-17	4	-4.33	DP-JL
2	C	4	12	0	-35	4	-8.67	AP-JL
2.5	C	4	-45	-58	-58	4	-14.50	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	438	758	1543	8	192.92	Rata-rata
3	L	2	320	785	-7	4	-1.67	Pengaruh DP
2	C	2	440	-38	-214	4	-53.50	Pengaruh AP
3	C	2	345	31	13	4	3.33	DP-AP
2	L	4	-22	-118	27	4	6.67	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	-15	-96	69	4	17.17	DP-JL
2	C	4	12	7	23	4	5.67	AP-JL
3	C	4	19	6	-1	4	-0.16	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2.5	L	2	430	743	1495	8	186.83	Rata-rata
3	L	2	312	752	42	4	10.50	Pengaruh DP
2.5	C	2	453	-22	-271	4	-67.83	Pengaruh AP
3	C	2	299	64	71	4	17.67	DP-AP
2.5	L	4	-14	-118	9	4	2.33	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	-8	-153	86	4	21.50	DP-JL
2.5	C	4	0	7	-35	4	-8.83	AP-JL
3	C	4	64	64	57	4	14.34	DP-AP-JL

Dari pengolahan data tabel diatas merupakan interaksi diameter pipa (DP) 2 inch, 2.5 inch, 3 inch, arah pengelasan (AP) *longitudinal* dan *circumferential*, lalu jumlah (JL) 2 dan 4 layer, dan pembuktian bahwa interaksi variabel memiliki hasil serupa bila diubah dari level

kecil ke besar terhadap variabel output penurunan nilai kekerasan dimana dapat disimpulkan menjadi beberapa poin berikut. Nilai rata-rata kekerasan di area *weld* tersebut sebesar 187.67 HV – 192.92 HV.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -12.17 HV dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 2.5 inch) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -12.17 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -71.16 HV dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -71.16 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah -14.83 HV dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -14.83 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah -14.33 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -14.33 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah -4.33 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -4.33 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -8.67 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -8.67 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -14.50 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -14.50 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yang serupa yaitu menurunnya nilai kekerasan namun variabel

yang paling berpengaruh menurunkan nilai kekerasan pada interaksi variabel arah pengelasan.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -1.67 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 3 inch) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -1.67 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -53.50 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -53.50 HV
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 6.67 HV dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 6.67 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 3.33 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 3.33 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 17.17 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 17.17 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah 5.67 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 5.67 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -0.16 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -0,16 HV.

dari data tersebut bahwa pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, menunjukkan hasil menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikkan nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 10.50 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2.5 inch ke 3 inch) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 10.50 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -67.83 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -67.83 HV
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 2.33 HV dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 2.33 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 17.67 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 17.67 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 21.50 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 21.50 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -8.83 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekesaran sebesar -8.83 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah 14.34 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar 14.34 HV.

Dari data tersebut bahwa pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil naiknya nilai kekerasan, namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikkan nilai kekerasa pada interaksi variabel diameter pipa.

Tabel 18. Desain faktorial diarea HAZ

KEKERASAN DIAREA HAZ								
DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	416	718	1479	8	184.87	Rata-rata
2.5	L	2	301	761	-2	4	-0.58	Pengaruh DP
2	C	2	418	-5	-190	4	-47.42	Pengaruh AP
2.5	C	2	343	3	153	4	38.25	DP-AP
2	L	4	-56	-115	44	4	10.92	Pengaruh Jumlah Layer
2.5	L	4	51	-75	8	4	1.92	DP-JL
2	C	4	-22	106	40	4	10.08	AP-JL
2.5	C	4	25	47	-60	4	-14.92	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	446	727	1491	8	186.42	Rata-rata
3	L	2	281	764	10	4	2.50	Pengaruh DP
2	C	2	436	4	-272	4	-68.00	Pengaruh AP
3	C	2	329	6	71	4	17.67	DP-AP
2	L	4	-26	-165	37	4	9.33	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	30	-107	1	4	0.33	DP-JL
2	C	4	-4	56	58	4	14.50	AP-JL
3	C	4	10	14	-42	4	-10.50	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2.5	L	2	390	722	1489	8	186.13	Rata-rata
3	L	2	332	767	12	4	3.08	Pengaruh DP
2.5	C	2	414	9	-119	4	-29.75	Pengaruh AP
3	C	2	353	3	-82	4	-20.59	DP-AP
2.5	L	4	30	-59	45	4	11.25	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	-20	-60	-6	4	-1.58	DP-JL
2.5	C	4	18	-50	-2	4	-0.42	AP-JL
3	C	4	-15	-32	18	4	4.42	DP-AP-JL

Dari pengolahan data tabel diatas merupakan interaksi diameter pipa (DP) 2 inch, 2.5 inch, 3 inch, arah pengelasan (AP) *longitudinal* dan *circumferential*, lalu jumlah (JL) 2 dan 4 layer, dan pembuktian bahwa interaksi variabel memiliki hasil serupa bila diubah dari level kecil ke besar terhadap variabel output penurunan nilai kekerasan dimana dapat disimpulkan menjadi beberapa poin berikut. Nilai rata-rata kekerasan di area HAZ tersebut sebesar 184.87 HV – 186.42 HV

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -0.85 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 2.5 inch) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -0.58 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -47.42 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -47.42 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 10.92 HV dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 10.92 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 38.25 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 38.25 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 1.92 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 1.92 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah 10.08 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekesaran sebesar 10.08 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -14.92 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -14.92 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yaitu menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 2.50 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 3 inch) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 2.50 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -68.00 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -68.00 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 9.33 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 9.33 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 17.67 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 17.67 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 0.33 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 0.33 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah 14.50 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekesaran sebesar 14.50 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -10.50 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -10.50 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yaitu, menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 3.08 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2.5 inch ke 3 inch) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 3.08 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -29.75 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -29.75 HV
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 11.25 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 11.25 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah -20.59 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -20.59 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah -1.58 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -1.58 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -0.42 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekesaran sebesar -0.42 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah 4.42 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar 4.42 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yang serupa yaitu naiknya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

Tabel 19. Desain faktorial diarea *base*

KEKERASAN DIAREA <i>BASE</i>								
DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	399	702	1397	8	174.58	Rata-rata
2.5	L	2	304	694	13	4	3.34	Pengaruh DP
2	C	2	396	-23	-193	4	-48.34	Pengaruh AP
2.5	C	2	298	36	167	4	41.84	DP-AP
2	L	4	-60	-95	-8	4	-2.00	Pengaruh Jumlah Layer
2.5	L	4	37	-98	59	4	14.84	DP-JL
2	C	4	-17	97	-3	4	-0.83	AP-JL
2.5	C	4	53	70	-27	4	-6.67	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2	L	2	421	677	1373	8	171.58	Rata-rata
3	L	2	256	696	-11	4	-2.67	Pengaruh DP
2	C	2	444	-49	-358	4	-89.51	Pengaruh AP
3	C	2	252	38	3	4	0.67	DP-AP
2	L	4	-38	-165	19	4	4.83	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	-11	-193	87	4	21.67	DP-JL
2	C	4	31	27	-27	4	-6.83	AP-JL
3	C	4	7	-24	-51	4	-12.67	DP-AP-JL

DP	AP	JL	1ST	2ND	3RD	DIVIDER	RESULT	
2.5	L	2	361	654	1386	8	173.25	Rata-rata
3	L	2	293	732	-24	4	-6.00	Pengaruh DP
2.5	C	2	427	-26	-191	4	-47.67	Pengaruh AP
3	C	2	305	2	-165	4	-41.17	DP-AP
2.5	L	4	22	-68	79	4	19.67	Pengaruh Jumlah Layer
3	L	4	-48	-122	27	4	6.83	DP-JL
2.5	C	4	48	-70	-54	4	-13.50	AP-JL
3	C	4	-46	-94	-24	4	-6.00	DP-AP-JL

Dari pengolahan data tabel diatas merupakan interaksi diameter pipa (DP) 2 inch, 2.5 inch, 3 inch, arah pengelasan (AP) *longitudinal* dan *circumferential*, lalu jumlah (JL) 2 dan 4 layer, dan pembuktian bahwa interaksi variabel memiliki hasil serupa bila diubah dari level kecil ke besar terhadap variabel output penurunan nilai kekerasan dimana dapat disimpulkan menjadi beberapa point berikut. Nilai rata-rata kekerasan di area *base* tersebut sebesar 171.58 HV – 174.58 HV

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah 3.34 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 2.5 inch) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 3.34 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -48.34 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -48.34 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah -2.00 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -2.00 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 41.84 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 41.84 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 14.84 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 14.84 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -0.83 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekesaran sebesar -0.83 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -6.67 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 2.5 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -6.67 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yaitu, menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel diameter pipa.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -2.67 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2 inch ke 3 inch) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -2.67 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -89.51 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -89.51 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 4.83 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 4.83 HV
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah 0.67 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 0.67 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 21.67 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 21.67 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -6.83 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekesaran sebesar -6.83 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -12.67 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -12.67 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yaitu, menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

- Pengaruh variabel diameter pipa (DP) adalah -6.00 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel diameter pipa diubah (dari 2.5 inch ke 3 inch) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -6.00 HV.
- Pengaruh variabel arah pengelasan (AP) adalah -47.67 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel arah pengelasan diubah (dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -47.67 HV.
- Pengaruh variabel jumlah layer (JL) adalah 19.67 HV, dapat diartikan bahwa jika variabel jumlah layer diubah (dari 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 19.67 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan arah pengelasan (DP-AP) adalah -41.17 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan arah pengelasan diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch dan arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential*) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -41.17 HV.
- Pengaruh interaksi diameter pipa dan jumlah layer (DP-JL) adalah 6.83 HV, dapat diartikan jika variabel diameter pipa dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menaikkan nilai kekerasan sebesar 6.83 HV.
- Pengaruh interaksi arah pengelasan dan jumlah layer (AP-JL) adalah -13.50 HV, dapat diartikan jika variabel arah pengelasan dan jumlah layer diubah dari level kecil ke level besar secara bersamaan (arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -13.50 HV.
- Pengaruh interaksi ketiga variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer (DP-AP-JL) adalah -6.00 HV. Jika tiga variabel ini diubah secara bersamaan dari level kecil ke level besar (diameter pipa 2.5 inch ke 3 inch, arah pengelasan *longitudinal* ke *circumferential* dan jumlah layer 2 ke 4 layer) maka akan menurunkan nilai kekerasan sebesar -6.00 HV.

Dari data tersebut pengaruh interaksi variabel diameter pipa, arah pengelasan, dan jumlah layer menunjukkan hasil yaitu, menurunnya nilai kekerasan namun variabel yang paling berpengaruh untuk menaikannya nilai kekerasan pada interaksi variabel jumlah layer.

5. Interpretasi data

- **Pengaruh variabel diameter pipa terhadap nilai kekerasan**

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada pengelasan longitudinal 2 layer, pipa dengan diameter 3 inch memberikan nilai kekerasan tertinggi sebesar 238 HV, pada area *base* material. sebaliknya pipa 2.5 inch pada spesimen yang sama memiliki nilai yang kekerasan yang lebih rendah, yaitu 176 HV di area HAZ dan 170 HV di area *base* material. ini menunjukkan bahwa pada kondisi tertentu, pipa berdiameter lebih besar cenderung menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. Hal ini dikarenakan oleh perbedaan kapasitas pipa dalam menyerap dan menyebarkan panas selama proses pengelasan. Namun, perbedaan nilai kekerasan yang diperoleh tidak selalu konsisten untuk semua arah pengelasan dan jumlah layer, sehingga analisis terhadap diameter pipa perlu dikaitkan dengan interaksi variabel lainnya.

- **Pengaruh arah pengelasan terhadap nilai kekerasan**

Dari hasil pengujian kekerasan, diketahui bahwa pengelasan arah *longitudinal* cenderung menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi dibandingkan pengelasan arah *circumferential*. Pada pipa 2 inch 2 layer, nilai kekerasan tertinggi pada arah longitudinal berada di area HAZ sebesar 236 HV, sedangkan arah *circumferential* pada spesimen yang sama menghasilkan nilai kekerasan 180 HV di area *base* material. Hasil serupa juga ditunjukkan pada pipa 2.5 inch 4 layer, dimana kekerasan HAZ pada arah *longitudinal* mencapai 220 HV, sedangkan arah *circumferential* hanya mencapai 198 HV. Perbedaan ini menunjukkan bahwa arah *longitudinal* memberikan hasil kekerasan yang lebih konsisten dan tinggi pada sebagian besar spesimen. Hal tersebut dapat dikaitkan dengan arah aliran panas yang lebih linear dan sejajar sumbu pipa pada arah *longitudinal*, sehingga proses pemanasan dan pendinginan lebih terkontrol.

- **Pengaruh jumlah layer terhadap nilai kekerasan**

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada pengelasan *longitudinal* pipa 2 inch, penambahan layer dari 2 ke 4 justru menurunkan nilai kekerasan di beberapa area. Di area HAZ, nilai kekerasan menurun dari 236 HV (2 layer) menjadi 210 HV (4 layer). Penurunan ini menandakan bahwa penambahan jumlah layer tidak selalu menghasilkan peningkatan kekerasan di semua area, dengan nilai HAZ meningkat dari 176 HV menjadi 220 HV.

Namun, pada pengelasan arah *circumferential*, efek penambahan layer bervariasi. Di area *weld*, penambahan layer cenderung menurunkan nilai kekerasan. Pada pipa 2.5 inch *circumferential* area weld, kekerasan turun dari 160 HV (2 layer) menjadi 118 HV (4 layer). Namun di area HAZ dan base, nilai kekerasan justru meningkat. Dari hasil tersebut bahwa pengaruh jumlah layer terhadap kekerasan sangat bergantung pada arah pengelasan dan diameter pipa. Pengelasan multi-layer hanya efektif meningkatkan kekerasan bila distribusi panas selama proses pengelasan tetap stabil dan tidak menyebabkan akumulasi panas berlebih.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

1. Kesimpulan

Overlay welding pada pipa baja karbon dalam arah *longitudinal* dan *circumferential* telah berhasil dilakukan dan diuji kekerasannya. Pengujian mencakup pengujian kekerasan pada *weld* metal, *heat-affected zone* (HAZ), dan *base* metal. Hasil pengujian menunjukkan:

- Diameter pipa yang paling mempengaruhi nilai kekerasan secara keseluruhan adalah pada area *weld*, dengan perbandingan 2" ke 2.5", yang memberikan penurunan kekerasan terbesar sebesar -12.17 HV. Artinya, kenaikan diameter dari 2" ke 2.5" paling signifikan menurunkan nilai kekerasan, terutama di daerah las (*weld*).
- Dari ketiga area pengujian, arah pengelasan dari *longitudinal* ke *circumferential* memiliki pengaruh penurunan nilai kekerasan paling besar diarea *base* material sebesar -89.51 HV
- Arah pengelasan memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil kekerasan. Arah pengelasan *longitudinal* menghasilkan nilai kekerasan lebih tinggi dan konsisten dibandingkan arah *circumferential*, terutama pada area HAZ dan base material
- Nilai kekerasan tertinggi dicapai pada pipa 2 inch longitudinal 2 layer diarea HAZ sebesar 236 HV, sedangkan nilai terendah ditemukan pada pipa 2 inch *circumferential* 2 layer diarea base material, yaitu sebesar 122 HV.

2. Saran

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada pipa baja karbon yang telah dilakukan *overlay welding* dalam arah *longitudinal* dan *circumferential*, berikut beberapa saran yang dapat diterapkan untuk pengembangan lebih lanjut maupun penerapan di lapangan:

- Arah pengelasan longitudinal secara konsisten menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi di seluruh area (*weld*, HAZ, dan *base material*). Oleh karena itu, dalam aplikasi *overlay welding* untuk meningkatkan kekerasan permukaan, sebaiknya digunakan arah *longitudinal*.
- Untuk meningkatkan homogenitas hasil pengelasan, sebaiknya digunakan jumlah layer lebih dari 2 terutama pada diameter pipa kecil hingga sedang, namun perlu dikontrol agar tidak menimbulkan cacat atau ketidakteraturan fusi antar lapisan.
- Dalam proses pengukuran kekerasan, penting untuk menjaga konsistensi penempatan titik uji dan menghindari kesalahan operator dalam pembacaan indentasi agar data lebih akurat dan ketidakpastian rendah.
- Studi tentang arah pengelasan berdasarkan fungsi aplikasi: pengelasan *circumferential* direkomendasikan untuk kebutuhan penguatan permukaan luar (karena distribusi kekerasan lebih merata dan tinggi), sedangkan *longitudinal* cocok untuk area yang membutuhkan transisi termal tajam, seperti HAZ. Oleh karena itu, pemilihan arah pengelasan sebaiknya disesuaikan dengan posisi beban dan tuntutan kerja pada pipa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. Y. Hutaeruk, “Analisa Laju Korosi pada Pipa Baja Karbon dan Pipa Galvanis dengan Metode Elektrokimia,” *Inst. Teknol. Sepuluh November, Surabaya*, pp. 3–16, 2017, [Online]. Available: <http://repository.its.ac.id/44852/>
- [2] A. P. Candra, H. Sonawan, and others, “Studi Pengaruh Overlay Welding Pada Pipa Baja Dalam Arah Longitudinal dan Circumferential Terhadap Tegangan Sisa Studies Effect of Overlay Welding on Steel Pipes in Long,” Fakultas Teknik Unpas, 2024.
- [3] R. A. A. Nasihin, H. Sonawan, and M. R. Hermawan, “Analisis Pengaruh Arah Pengelasan Longitudinal serta Circumferential terhadap Tegangan Sisa pada Pipa Baja Karbon 2 inch (50 mm) dan 4 inch (100 mm) dengan Proses Overlay Welding Analysis of the Effect of Longitudinal and Circumferential Welding Direction,” Fakultas Teknik Unpas, 2024.
- [4] N. M. R. Apriansyah and K. Pengantar, “Pengaruh Overlay Welding Pada Pipa Baja Karbon Dalam Arah Longitudinal Dan Circumferential Terhadap Tegangan Sisa USULAN PENELITIAN Oleh :,” 2023.
- [5] Y. Irwan, “Analisis Korosi Proses Cladding Dengan Elektroda Stainless Steel Pada Baja Karbon,” pp. 1–10, 2014.
- [6] 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*, p. 9, 2012.
- [7] H. D. A. Purbonugroho, A. Suprihanto, and 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, pp. 227–234, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/41880%0Ahttps://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/download/41880/30508>
- [8] M. S. Azdkar, H. Pratikno, and 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.
- [9] A. Fazadima, H. Pratikno, and H. Ikhwani, “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, pp. 38–43, 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i3.88068.
- [10] A. N. Akhmadi and 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, pp. 25–30, 2020, doi: 10.30591/nozzle.v9i2.2259.
 - [11] Fitria, “Proses pengelasan SMAW (Shield Metal Arc Welding),” *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
 - [12] E. S. Adi Nugroho, “Pengaruh Variasi Kuat Arus Pengelasan Terhadap Kekuatan Tarik Dan Kekerasan Sambungan Las Plate Carbon Steel ASTM 36,” *J. Rekayasa Sist. Ind.*, vol. 3, no. 2, pp. 134–142, 2018.
 - [13] E. Nugroho, S. D. Handono, A. Asroni, and W. Wahidin, “Pengaruh Temperatur dan Media Pendingin pada Proses Heat Treatment Baja AISI 1045 terhadap Kekerasan dan Laju Korosi,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 8, no. 1, pp. 99–110, 2019, doi: 10.24127/trb.v8i1.933.
 - [14] A. A. PANGESTI, “Analisa Tegangan Sisa Dan Distorsi Pada Sambungan Tubular Tipe T Dengan Pengaruh Post Weld Heat Treatment Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Jur. Tek. Kelaut. Fak. Teknol. Kelaut. ...*, 2016, [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/291472527.pdf>
 - [15] N. Syahroni, B. I. Fatkurokhim, and H. Handayanu, “Analysis of the Effect of Welding Sequence Variations on Residual Stresses and Distortions for Welding Pressure Vessels Structures at PT. Petrokimia Gresik using the Finite Element Method,” *Int. J. Offshore Coast. Engineering*, vol. 1, no. 2, p. 64, 2017, doi: 10.12962/j2580-0914.v1i2.7053.
 - [16] Sofi’i M and Djaja I K, “Teknik Konstruksi Kapal Baja,” pp. 413–424, 2018.
 - [17] T. Akbar and B. Santosa, “Analisa Pengaruh dari Welding Sequence Terhadap Tegangan Sisa dan Deformasi Pada Circular Patch Weld Double Bevel Butt-Joint Plat ASTM A36 Menggunakan Metode Element Hingga,” *J. Tek. ITS*, vol. 1, no. 1, pp. 351–356, 2012.
 - [18] F. J. Tulung, “Modul praktek pengelasan smaw,” *Politek. Negeri Manad.*, pp. 1–74, 2019, [Online]. Available: <http://mesin.polimdo.ac.id/wp-content/uploads/2019/02/Modul-Pengelasan-SMAW.pdf>

- [19] T. Pipit Mulyah, Dyah Aminatun, Sukma Septian Nasution, Tommy Hastomo, Setiana Sri Wahyuni Sitepu, "Sifat Mekanik Baja Karbon" *J. GEEJ*, vol. 7, no. 2, pp. 7–33, 2020.
- [20] DARMAWI, T. K. DEWI, H. ALIAN, and K. GINTING, "Ahli Korosi Dasar," p. 190 halaman, 2022, [Online]. Available: www.unsri.unsripress.ac.id
- [21] D. Juliaptini, "Analisis Sifat Mekanik dan Metalografi Baja Karbon Rendah untuk Aplikasi Tabung Gas 3 Kg," *UIN Syarif Hidayatullah*, pp. 1–90, 2010.
- [22] A. Rabiatul, "Pengaruh Beda Media Pendingin Pada Proses Hardening Terhadap Kekerasan Baja Pegas Daun," *Poros Tek.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–53, 2019, [Online]. Available: <https://ejurnal.poliban.ac.id>
- [23] Suparyanto dan Rosad (2015, "Pengaruh Ukuran Partikel Pasir Silika Sebagai Bahan Penguat Terhadap Kekerasan Dan Kekasaran Pelet Komposit," *Suparyanto dan Rosad (2015*, vol. 5, no. 3, pp. 248–253, 2020.
- [24] R. Putra, Junaidi, and F. Kurniawan, "Analisa Kekerasan Baja Carbon Steel 1045 Akibat Perlakuan Panas Yang Di Dinginkan Dengan Udara, Air dan Oli Menggunakan Metode Vickers," *J. Simetri Rekayasa*, vol. 2(20), pp. 86–91, 2020.
- [25] M. Furqan Maulana, "Analisa Kegagalan Pipa Astm A179 Pada Ruang Bakar Boiler," *J. Multidisiplin Indones.*, vol. 2, no. 9, pp. 2553–2569, 2023, doi: 10.58344/jmi.v2i9.501.
- [26] I. Wahid, L. Andryanto, P. Studi, T. Mesin, and F. Teknik, "PENGARUH TEKATAN DAN PRESENTASE KOMPOSISI TERHADAP NILAI KEKERASAN KOMPOSIT AL-ABU DASAR," vol. 9, no. 2, 2023.
- [27] M. F. Kumayasari and 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, pp. 85–89, 2017.
- [28] Y. Rizal and Ismardi, "Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Sifat Kekerasan (Hardness) Pada Roda Gigi Tarik Sepeda Motor Honda," *J. Fak. Tek. Univ. Pasir Pangaraian*, pp. 139–144, 2017.

LAMPIRAN

No.	Gambar	Keterangan
1		Pada gambar di samping menampilkan spesimen yang hasil uji tarik.
2		Lalu dilakukan pemotongan
3		Selanjutnya dilakukan proses mounting

		Setelah dilakukan pemolesan pada material yang sudah di mounting
		Selanjutnya dilakukan proses etsa pada spesimen
		Spesimen siap di uji

		Proses uji kekerasan <i>vickers</i>
--	---	--

LAPORAN PENGUJIAN

Test Report

NO. LAPORAN : 2-01-25-00022
Report No.

KOMODITI : Material Logam
Commodity (Baja Karbon)

DIBUAT UNTUK : TUGAS AKHIR,/UNIVERSITAS PASUNDAN
Executed for Jl. Dr.Setiabudi No.193, Gegerkalong, Sukasari, KOTA BANDUNG
JAWABARAT 40153

TANGGAL DITERIMA : 24 April 2025
Received on

TANGGAL DIUJI : 25 April 2025
Tested on

ALAT UJI : Vickers Hardness Zwick NS : 61029
Testing equipment

SUHU : 24°C
Temperature

STANDAR ACUAN : ASTM E92-2017
Test Standar (Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials)

KRITERIA STANDAR : -
Standar Criteria

URAIAN CONTOH : 12 Buah Sampel Uji Keras Vickers pada Baja Karbon, dengan kode:
Detail of Sample

- 2" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	- 2" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)
- 2" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	- 2" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)
- 2.5" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	- 2.5" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)
- 2.5" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	- 2.5" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)
- 3" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	- 3" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)
- 3" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	- 3" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)

HASIL PENGUJIAN : Terlampir
Test Result (Attached)

DITERBITKAN TANGGAL : 30 April 2025
Issued Date



Orang-orang ini secara digital oleh
Karya Tim Kerja Inspeksi Teknik
Ariyadi 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>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00022			Material Logam (Baja Karbon)			
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
1.	2" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	228	233	230	230.33
		HAZ	236	236	230	234
		Base Metal	230	230	228	229.33
2.	2" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	160	181	162	167.67
		HAZ	181	179	181	180.33
		Base Metal	170	170	168	169.33
3.	2.5" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	225	221	221	222.33
		HAZ	178	175	175	176
		Base Metal	170	170	171	170.33

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://bsre.bssn.go.id/verifikasi>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00022			Material Logam (Baja Karbon)			
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
4.	2.5" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	159	156	165	160
		HAZ	156	156	155	155.67
		Base Metal	123	122	122	122.33
5.	3" SCH 40 (Longitudinal, 2 Layer)	Weld Metal	209	206	209	208
		HAZ	210	215	222	215.67
		Base Metal	247	236	230	237.67
6.	3" SCH 40 (Circumferential, 2 Layer)	Weld Metal	183	181	181	181.67
		HAZ	172	168	168	169.33
		Base Metal	130	130	128	129.33

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>.

LAMPIRAN HASIL UJI KERAS						
No Laporan: 2-01-25-00022			Material Logam (Baja Karbon)			
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
7.	2" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	213	213	216	214
		HAZ	212	209	209	210
		Base Metal	193	191	191	191.67
8.	2" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	165	162	162	163
		HAZ	121	121	134	125.33
		Base Metal	134	132	134	133.33
9.	2.5" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	236	221	222	226.33
		HAZ	218	221	221	220
		Base Metal	206	208	206	206.67

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: 2-01-25-00022		Material Logam (Baja Karbon)				
No	Identifikasi Contoh	Lokasi	Nilai Keras Vickers, 10 kgf/mm ²			
			Uji ke-			Nilai Rata- Rata
			1	2	3	
10.	2.5" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	117	117	119	117.67
		HAZ	199	199	196	198
		Base Metal	187	191	191	189.67
11.	3" SCH 40 (Longitudinal, 4 Layer)	Weld Metal	224	228	227	226.33
		HAZ	188	181	183	184
		Base Metal	177	175	175	175.67
12.	3" SCH 40 (Circumferential, 4 Layer)	Weld Metal	183	181	181	181.67
		HAZ	172	168	168	169.33
		Base Metal	130	130	128	129.33

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.

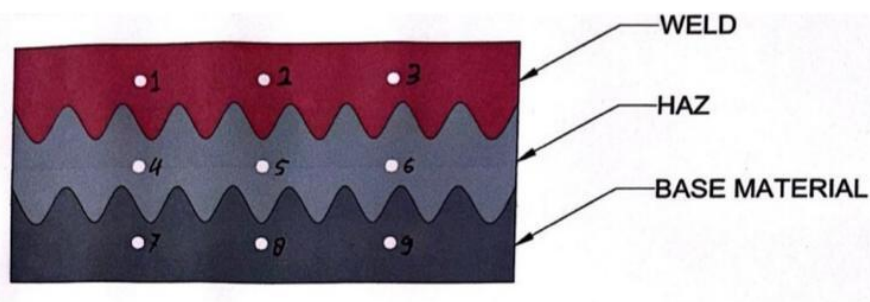
- Dokumen ini ditandatangani secara elektronik menggunakan sertifikat elektronik yang diterbitkan oleh Balai Sertifikasi Elektronik, Badan Siber dan Sandi Negara.
- Berdasarkan Undang-Undang Informasi dan Transaksi Elektronik pasal 11 tahun 2008, Tanda Tangan Elektronik memiliki kekuatan hukum dan akibat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

**LAMPIRAN
HASIL UJI KERAS**

No Laporan: 2-01-25-00022

Material Logam
(Baja Karbon)

Lokasi Pengujian:



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>.