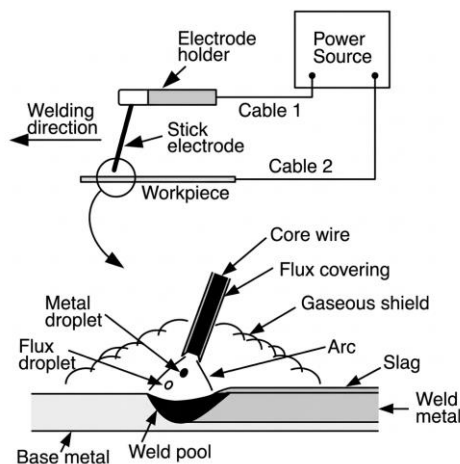


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Pengelasan merupakan suatu proses penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian atau seluruh logam induk dan logam pengisi menggunakan energi panas, sehingga menghasilkan sambungan permanen yang memiliki sifat mekanis mendekati logam dasar. Pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2. 1.



Gambar 2. 1 Pengelasan (<https://www.omesin.com/2026>)

Proses pengelasan melibatkan pembentukan ikatan metalurgi. Ikatan metalurgi pada pengelasan SMAW terjadi melalui proses pencairan dan pembekuan logam las, yang menghasilkan penyatuan antara *weld metal* dan *base metal* serta membentuk *Heat Affected Zone* (HAZ). HAZ merupakan daerah pada logam induk yang tidak mengalami pencairan, tetapi mengalami perubahan struktur mikro akibat siklus termal selama proses pengelasan, yang dapat mempengaruhi sifat mekanis seperti kekuatan, kekerasan, dan ketangguhan. Dalam industri manufaktur, pengelasan menjadi metode penyambungan yang dominan karena kemampuannya menghasilkan sambungan dengan kekuatan tinggi, efisiensi produksi yang baik, serta aplikabilitas pada berbagai jenis material dan konfigurasi geometri.

2.2 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

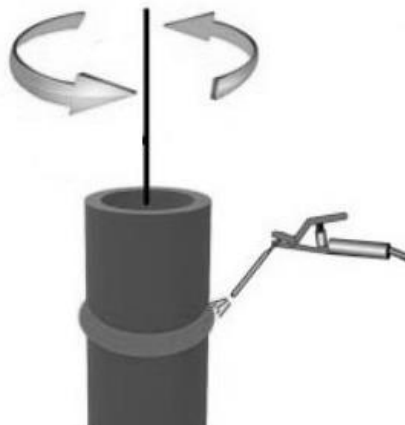
Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yang juga dikenal sebagai pengelasan elektroda terbungkus atau *stick welding*, merupakan salah satu metode

pengelasan busur listrik yang paling banyak digunakan dalam industri fabrikasi dan konstruksi. Proses SMAW menggunakan busur listrik yang terbentuk antara elektroda terbungkus (*flux-coated electrode*) dan logam dasar (*base metal*) sebagai sumber panas untuk melelehkan logam. SMAW dapat menggunakan sumber arus listrik AC maupun DC, dimana polaritas arus mempengaruhi karakteristik penetrasi, stabilitas busur, dan laju deposisi logam las (Setiawan & Imran, 2019).

Keunggulan utama metode SMAW terletak pada fleksibilitas dan portabilitasnya yang tinggi, sehingga sangat cocok untuk aplikasi di lapangan dengan kondisi lingkungan yang bervariasi. Peralatan SMAW relatif sederhana dan tidak memerlukan gas pelindung eksternal, sehingga lebih tahan terhadap pengaruh angin dan dapat digunakan pada lokasi terbuka. Metode ini juga dapat diaplikasikan pada hampir semua posisi pengelasan dan mampu mengelas material dengan ketebalan yang bervariasi.

2.3 Posisi Pengelasan Pipa 2G

Posisi pengelasan pipa 2G adalah posisi pengelasan dimana pipa berada dalam orientasi horizontal dengan sumbu tetap dan tidak dapat diputar, serta pengelasan dilakukan pada bidang vertikal sepanjang keliling sambungan. Posisi 2G merupakan salah satu konfigurasi pengelasan pipa yang paling menantang dan paling umum dijumpai dalam praktik instalasi sistem perpipaan industri. Ilustrasi pengelasan pipa 2G dapat dilihat pada Gambar 2. 2.



Gambar 2. 2 Ilustrasi Pengelasan Pipa 2G
(<https://www.theengineerspost.com/2026>)

Waranugraha et al (2025) membuktikan secara empiris bahwa posisi pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan kekuatan impak sambungan, dimana posisi 2G menunjukkan distribusi cacat yang unik akibat perubahan orientasi gravitasi di setiap kuadran. Assagaf et al (2025) yang menganalisis cacat SMAW pada posisi 2G menggunakan metode FTA juga menegaskan bahwa posisi 2G memerlukan pendekatan parameter yang berbeda dari posisi lainnya. Karakteristik unik dari posisi 2G adalah pengaruh gravitasi yang berbeda-beda pada setiap kuadran pengelasan, dimana pada bagian bawah pipa (*flat position*) *weld pool* cenderung lebih stabil, sedangkan pada bagian atas pipa (*overhead position*) gravitasi menyebabkan logam cair cenderung untuk jatuh atau sagging jika tidak dikontrol dengan baik.

2.4 Material Carbon Steel ASTM A106

Carbon Steel ASTM A106 merupakan material spesifikasi standar yang ditetapkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) untuk pipa baja karbon *seamless* yang digunakan pada layanan temperatur tinggi. Material ini dirancang khusus untuk aplikasi sistem perpipaan bertekanan tinggi yang mentransmisikan fluida dengan temperatur operasi tinggi, seperti pada sistem steam, *hydrocarbon processing*, serta transportasi minyak dan gas. ASTM A106 tersedia dalam tiga *grade* yaitu *Grade A*, *Grade B*, dan *Grade C*, dengan *Grade B* menjadi yang paling umum digunakan (Nofri & Fardiansyah, 2018).

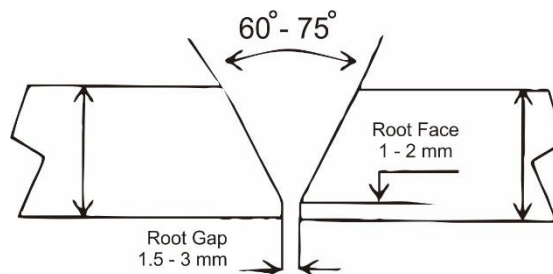
Tabel 2. 1 *Chemical Requirements* ASTM A106 *Grade B*
(Nofri & Fardiansyah, 2018)

<i>Chemical</i>	<i>Composition (%)</i>
<i>Carbon, max^A</i>	0.30
<i>Manganese</i>	0.29-1.06
<i>Phosphorus, max</i>	0.035
<i>Sulfur, max</i>	0.035
<i>Silicon, min</i>	0.10
<i>Chrome, max^B</i>	0.40
<i>Copper, max^B</i>	0.40

<i>Chemical</i>	<i>Composition (%)</i>
<i>Molybdenum, max^B</i>	0.15
<i>Nikel, max^B</i>	0.40
<i>Vanadium, max^B</i>	0.08

Dari Tabel 2. 1 dapat dilihat bahwa komposisi kimia *Carbon Steel A106 Grade B* memiliki kandungan karbon maksimum 0,30%, mangan 0,29-1,06%, fosfor maksimum 0,035%, sulfur maksimum 0,035%, serta elemen paduan lain dalam jumlah terkontrol. Kandungan karbon yang dibatasi ketat bertujuan untuk meningkatkan *weldability* dan mengurangi risiko *hot cracking* serta *cold cracking* pada zona HAZ (Nofri & Ferdiansyah, 2018). (Rofiqie & Fitri, 2024) juga membuktikan bahwa material A106 *Grade B* sangat sensitif terhadap kontaminasi *moisture* selama pengelasan, sehingga memerlukan kontrol parameter yang ketat. Sementara itu, abdulah et al (2021) mengidentifikasi bahwa kegagalan las pada pipa A106 sering berkaitan dengan *heat input* yang tidak terkontrol optimal.

2.5 Sambungan Las *Butt Joint* pada Pipa



Gambar 2. 3 Sambungan *Butt Joint* (Nugroho et al., 2022)

Sambungan las *butt joint* merupakan konfigurasi sambungan dimana dua komponen logam diposisikan dengan ujung-ujungnya bertemu pada bidang yang sama dan disambung melalui proses pengelasan sepanjang ketebalan material. Pada aplikasi pipa, *butt joint* adalah jenis sambungan yang paling umum dan paling *critical* karena sambungan ini harus menahan beban *internal pressure*, *thermal stress*, serta *mechanical loading* yang sama dengan pipa dasar tanpa menimbulkan *stress concentration* yang berlebihan. Sambungan *butt joint* pada pipa umumnya menggunakan *edge preparation* berupa kampuh V tunggal

(*single V-groove*) atau kampuh U untuk ketebalan yang lebih besar, dengan sudut kampuh yang dirancang untuk memastikan penetrasi penuh (*full penetration*) dan aksesibilitas elektroda selama proses pengelasan (Nugroho et al., 2022). Sambungan *Butt Joint* dapat dilihat pada Gambar 2. 3.

Desain kampuh untuk sambungan *butt joint* pipa harus mempertimbangkan beberapa faktor penting seperti ketebalan dinding pipa, metode pengelasan yang digunakan, posisi pengelasan, serta persyaratan aksesibilitas untuk inspeksi. Sudut kampuh V tunggal umumnya berkisar antara 60° hingga 75° dengan *root gap* 1,5-3 mm dan *root face* 1-2 mm. A Qofi et al (2019) yang meneliti sambungan *butt joint* SMAW posisi 3G material ASTM A36 menemukan bahwa desain kampuh yang tepat berkontribusi terhadap minimnya cacat pada *root pass*.

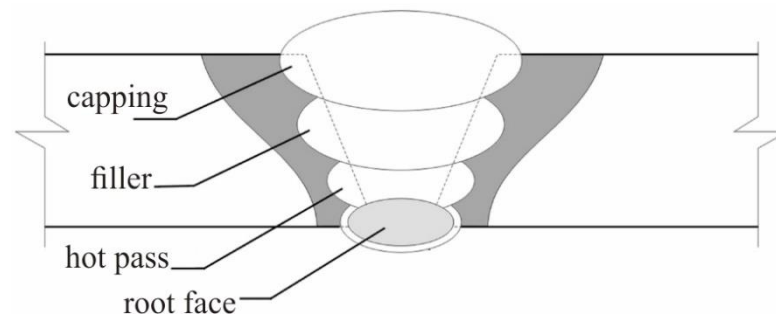
2.6 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan merupakan variabel-variabel proses yang dikontrol selama operasi pengelasan untuk menghasilkan karakteristik *weld metal* dan kualitas sambungan yang diinginkan. Parameter utama dalam proses SMAW meliputi arus listrik (*welding current*), tegangan busur (*arc voltage*), kecepatan pengelasan (*travel speed*), polaritas, dan diameter elektroda (Setiawan & Imran, 2019; Marthiana et al., 2020).

Arus listrik (*welding current*) adalah parameter paling fundamental yang mengendalikan laju pencairan elektroda, ukuran *weld pool*, serta kedalaman penetrasi. Arus yang lebih tinggi menghasilkan busur yang lebih panas dengan *energy density* yang lebih besar, meningkatkan laju deposisi dan penetrasi, namun juga meningkatkan risiko cacat seperti *undercut*, *excessive penetration*, *spatter*, dan *porosity*. Sebaliknya, arus yang terlalu rendah menghasilkan busur yang tidak stabil, penetrasi yang dangkal, dan meningkatkan risiko *lack of fusion*, *slag inclusion*, serta *incomplete penetration* (Setiawan & Imran, 2019). Setia & Pranatal (2022) membuktikan bahwa pada posisi 2G, arus merupakan variabel dominan yang mempengaruhi profil cacat internal.

2.7 Multi-Pass Welding (Multilayer Welding)

Multi-pass welding atau *multilayer welding* merupakan teknik pengelasan di mana pengisian logam las dilakukan secara bertahap dalam beberapa lapisan (*pass*) hingga sambungan mencapai ketebalan penuh yang dipersyaratkan. Teknik ini menjadi keharusan pada sambungan *butt joint* pipa berdinding tebal seperti ASTM A106 Schedule 80 (ketebalan $\pm 10,97$ mm).



Gambar 2. 4 Multi-Pass Welding (<https://www.mdpi.com/2026>)

Lopo et al (2023) menganalisis pengaruh arus pada pengelasan bertingkat dan menemukan bahwa variasi arus antar lapisan memengaruhi homogenitas struktur mikro dan distribusi kekerasan akibat perbedaan *heat input* yang diterima setiap lapisan. Burhanudin et al (2022) menemukan bahwa akumulasi siklus termal dari pengelasan berulang menyebabkan perubahan pada struktur mikro. Munir et al (2019) menunjukkan bahwa urutan lapisan yang tidak terkontrol meningkatkan gradien termal dan tegangan sisa yang berpotensi memicu retak pada HAZ. Multi-Pass Welding dapat dilihat pada Gambar 2. 4.

2.8 Heat Input pada Proses Pengelasan

Heat input merupakan parameter termodinamika yang menggambarkan jumlah energi panas yang dimasukkan ke dalam base metal per satuan panjang sambungan selama proses pengelasan. *Heat input* dihitung dengan formula $HI = (V \times I \times 60 \times \eta) / (1000 \times v)$, dimana HI adalah *Heat Input* (kJ/mm), V adalah tegangan busur (*volt*), I adalah arus pengelasan (*ampere*), v adalah kecepatan pengelasan (mm/min) dan η adalah efisiensi *thermal* proses pengelasan (0,75-0,85 untuk SMAW).

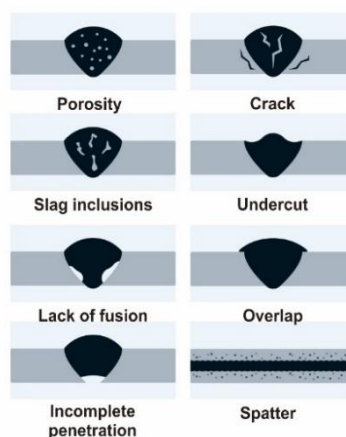
Heat input yang berlebihan menyebabkan laju pendinginan yang lambat, menghasilkan *grain coarsening* pada HAZ yang menurunkan *toughness*.

Sebaliknya, *heat input* yang terlalu rendah menyebabkan laju pendinginan yang sangat cepat, meningkatkan risiko *hydrogen-induced cracking* dan pembentukan cacat seperti *lack of fusion* serta *slag inclusion* (Marthiana et al., 2020; Lopo et al., 2023).

2.9 Discontinuity dan Cacat Pengelasan

Discontinuity dalam konteks pengelasan merujuk pada setiap diskontinuitas atau ketidaksempurnaan dalam struktur atau komposisi material las. Suatu *discontinuity* dikategorikan sebagai cacat hanya jika ukuran, lokasi, orientasi, atau distribusinya melebihi kriteria *acceptance* yang ditetapkan dalam *welding code* atau *engineering specification* yang berlaku (Sulaiman et al., 2020).

Porosity terbentuk ketika gas-gas terlarut dalam *weld pool* tidak sempat keluar sebelum logam membeku. *Slag inclusion* disebabkan oleh *incomplete removal slag* dari *previous pass*. *Lack of fusion* adalah cacat berupa tidak terjadinya penyatuan metalurgi yang sempurna antara *weld metal* dengan *base metal*. *Incomplete penetration* adalah cacat dimana *weld metal* tidak mencapai kedalaman penetrasi yang disyaratkan (Hidayat et al., 2024). Elga et al (2025) mengkonfirmasi bahwa jenis cacat ini bersifat variabel tergantung pada besar arus yang digunakan. Cacat pengelasan dapat dilihat pada Gambar 2. 5 berikut:



Gambar 2. 5 Cacat Pengelasan (<https://ndtcorner.com/2026>)

2.10 Non-Destructive Testing (NDT)

Non-Destructive Testing (NDT) merupakan sekumpulan metode inspeksi dan evaluasi material yang memungkinkan deteksi, lokasi, dan karakterisasi

discontinuity atau cacat tanpa merusak atau mengubah kemampuan komponen untuk melakukan fungsinya. Berbagai metode NDT telah dikembangkan, masing-masing dengan prinsip fisika yang berbeda dan kapabilitas deteksi yang spesifik (Sulaiman et al., 2020).

Haryanto et al (2023) membandingkan metode ultrasonik dan radiografi, menemukan bahwa ultrasonik menawarkan sensitivitas lebih baik untuk deteksi *crack* dan *lack of fusion* dengan biaya operasional lebih rendah. Widyawati et al (2021) membuktikan efektivitas metode ultrasonik lanjut dalam mengidentifikasi cacat lasan FCAW pada fondasi mesin kapal. Wangsa (2023) menunjukkan bahwa UT dapat mengidentifikasi cacat internal yang tidak terdeteksi secara visual pada pengelasan SMAW baja ST 37.

2.11 Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)

Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT) adalah metode NDT ultrasonik generasi lanjut yang menggunakan *array transducer multi-elemen* yang dapat diaktifkan secara elektronik menggunakan *time delays (phasings)* untuk menghasilkan berkas ultrasonik yang dapat dikontrol arah, sudut, dan fokusnya secara elektronik tanpa menggerakkan *probe* secara fisik. PAUT menghasilkan berbagai tampilan data meliputi *A-scan (amplitude vs waktu)*, *B-scan* (tampilan penampang melintang), *S-scan* (tampilan sektor), dan *C-scan* (tampilan *plan view* dari atas), yang secara kolektif memberikan gambaran tiga dimensi yang komprehensif tentang lokasi dan karakteristik *discontinuity*.

Pujono & Galih (2018) membuktikan keunggulan PAUT dalam inspeksi komponen kritis pesawat terbang, dimana PAUT menghasilkan pencitraan *S-scan* yang komprehensif dengan resolusi dan sensitivitas jauh lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Syarifuddin & Akbar (2024) secara khusus menerapkan PAUT pada analisis cacat las pipa pembakaran *boiler* dan membuktikan bahwa PAUT mampu mendeteksi dan memetakan cacat dengan akurasi *sizing* yang superior, termasuk cacat berukuran kecil yang tidak terdeteksi oleh metode lain.

Dibandingkan dengan *Conventional Ultrasonic Testing* (UT), PAUT menawarkan keunggulan berupa:

1. Kemampuan pemindaian volumetrik secara elektronik dengan kecepatan tinggi
2. Pencitraan *B-scan* dan *S-scan real-time* yang memudahkan interpretasi
3. Akurasi *sizing* cacat yang lebih tinggi
4. Kemampuan mendeteksi cacat *planar* yang berorientasi dalam berbagai sudut tanpa perlu mengganti *probe*
5. Data yang tersimpan secara digital untuk dokumentasi dan analisis lebih lanjut.

Oleh karena itu, *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) dipilih dalam penelitian ini sebagai metode inspeksi utama yang memiliki kemampuan lebih superior dibandingkan *Ultrasonic Testing* (UT) konvensional yang digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya (Hidayat et al., 2024; Wangsa, 2023).

2.12 Penelitian Terdahulu

Berikut adalah Tabel 2. 2 *Literatur Review* yang merangkum penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini:

Tabel 2. 2 *Literatur Review*

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
1	Setiawan & Imran (2019)	Analisa Cacat Las SMAW <i>Butt Joint</i> dengan Variasi Arus	Menganalisis pengaruh variasi arus terhadap cacat las	SMAW dengan variasi arus; sambungan <i>butt joint</i> baja karbon	Arus rendah: <i>lack of fusion & slag inclusion</i> ; arus tinggi: <i>porosity & undercut</i>	Material bukan A106; tidak posisi 2G; tidak menggunakan PAUT
2	Hidayat et al (2024)	Analisis Cacat SMAW 3G Pelat ST60 dengan NDT UT dan PT	Menganalisis cacat SMAW posisi 3G dengan UT dan PT	SMAW posisi 3G; pelat baja ST60; UT dan PT	UT lebih efektif mendeteksi cacat internal; PT untuk cacat permukaan	Material ST60 bukan A106; posisi 3G bukan 2G; UT konvensional bukan PAUT
3	Syarifuddin & Akbar (2024)	Analisa Cacat Las Pipa <i>Boiler</i> dengan PAUT	Menganalisis cacat las pipa menggunakan PAUT	PAUT; pipa pembakaran <i>boiler</i>	PAUT dapat mendeteksi dan memetakan cacat dengan resolusi dan akurasi lebih tinggi	Tidak fokus pada variasi arus SMAW; material dan aplikasi berbeda

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
4	Pujono & Galih (2018)	Inspeksi <i>Wing Panel</i> Pesawat menggunakan PAUT	Membuktikan keunggulan PAUT pada komponen kritis	PAUT; <i>upper wing top skin</i> panel pesawat	PAUT menghasilkan S-scan komprehensif dengan resolusi tinggi	Objek bukan sambungan las pipa; tidak pada pengelasan SMAW
5	Lopo et al (2023)	Analisis Pengaruh Arus pada <i>Multilayer Welding</i> terhadap Struktur Mikro, Kekerasan, Kuat Tarik	Menganalisis pengaruh arus pada pengelasan bertingkat	SMAW <i>multilayer welding</i> ; variasi arus; baja karbon	Variasi arus pada <i>multilayer welding</i> memengaruhi homogenitas struktur mikro dan distribusi kekerasan	Material bukan A106; tidak posisi 2G pipa; tidak menggunakan PAUT
6	Waranugraha et al (2025)	Pengaruh Variasi Posisi Pengelasan 1G, 2G, 3G terhadap Kekuatan Tarik dan Impak (SMAW)	Menganalisis pengaruh posisi pengelasan terhadap kekuatan	SMAW; posisi 1G, 2G, 3G; uji tarik dan impak	Posisi pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan impak	Fokus pada sifat mekanis, tidak menganalisis cacat dengan PAUT; tidak pada material A106

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
7	Assagaf et al (2025)	Analisis Cacat Las SMAW Elektroda Berbeda Posisi 2G Baja ST 37 dengan FTA	Menganalisis cacat SMAW posisi 2G dengan variasi elektroda	SMAW posisi 2G; baja ST 37; FTA <i>method</i>	Posisi 2G memiliki karakteristik cacat unik yang membutuhkan kajian parameter tersendiri	Material ST 37 bukan A106; variasi elektroda bukan arus; tidak menggunakan PAUT
8	Setia & Pranatal (2022)	Analisa Cacat Las SMAW Posisi 2G Baja A36 dengan Variasi Arus dan Sudut	Menganalisis cacat SMAW posisi 2G dengan variasi arus	SMAW posisi 2G; baja A36; variasi arus dan sudut	Arus merupakan variabel dominan dalam menentukan profil cacat internal posisi 2G	Material A36 bukan A106; tidak menggunakan PAUT; tidak pada pipa
9	Rofiqie & Fitri (2024)	Analisis Kelembapan terhadap Porositas Las (SMAW) Material Baja A106 Grade B	Menganalisis pengaruh kelembapan terhadap <i>porosity</i> pada A106	SMAW; baja A106 Grade B; RT dan PT	Kontaminasi <i>moisture</i> merupakan faktor kritis <i>porosity</i> pada A106	Fokus pada kelembapan bukan variasi arus; RT dan PT bukan PAUT; tidak posisi 2G

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
10	Abdulah et al (2021)	Analisis Keretakan pada Sambungan Las Pipa ASTM A106 dengan <i>Globe Valve</i>	Menganalisis keretakan pada sambungan las pipa A106	Analisis kegagalan; pipa ASTM A106 dengan <i>globe valve</i>	Keretakan disebabkan <i>residual stress</i> dan <i>heat input</i> tidak terkontrol optimal	<i>Failure analysis</i> bukan eksperimental; tidak sistematis menganalisis variasi arus dengan PAUT
11	Widyawati et al (2021)	Identifikasi Cacat Lasan FCAW Fondasi Mesin Kapal menggunakan UT	Mengidentifikasi cacat las menggunakan metode ultrasonik	FCAW; fondasi mesin kapal; UT	UT efektif mengidentifikasi cacat internal las pada aplikasi kritis	Metode FCAW bukan SMAW; tidak pada pipa; tidak menggunakan PAUT
12	Sulaiman et al (2020)	Analisa Cacat Las (SMAW) Material ST 45 dengan MT dan UT	Mengevaluasi cacat permukaan dan internal dengan MT dan UT	SMAW; material ST 45; MT dan UT	MT efektif cacat permukaan; UT efektif <i>internal defects</i>	Material ST 45 bukan A106; tidak posisi 2G; UT konvensional bukan PAUT

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
13	Saputra et al (2024)	Pengaruh Variasi Arus terhadap Kekuatan Tarik dan NDT GMAW SS400	Menganalisis pengaruh variasi arus dengan NDT pada GMAW	GMAW; MT dan UT; baja SS400	Variasi arus berkorelasi langsung dengan jenis cacat pada NDT	GMAW bukan SMAW; material SS400 bukan A106; tidak posisi 2G; tidak PAUT
14	Marthiana et al (2020)	Analisa Pengaruh Variasi Arus MIG pada Material ST 37	Menganalisis pengaruh variasi arus terhadap kekuatan sambungan MIG	GMAW (MIG); variasi arus; material ST 37	Terdapat arus optimal yang menghasilkan kekuatan tarik maksimum	GMAW bukan SMAW; ST 37 bukan A106; fokus pada DT bukan PAUT
15	Elga et al (2025)	Analisis Cacat SMAW <i>Undercut</i> Material ST 41 Posisi 1G Variasi Arus dan Elektroda	Menganalisis cacat SMAW dengan variasi arus	SMAW; baja ST 41; posisi 1G; variasi arus dan elektroda	Arus merupakan faktor determinan terhadap jenis dan frekuensi cacat	ST 41 bukan A106; posisi 1G bukan 2G; tidak menggunakan PAUT

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
16	Haryanto et al (2023)	Pemeriksaan Cacat <i>Planar</i> dan <i>Non-Planar</i> menggunakan <i>Ultrasonic Testing</i> (UT) dan Radiografi	Membandingkan efektivitas ultrasonik dan radiografi	Perbandingan UT dan RT; sampel logam terpilih	Ultrasonik lebih sensitif untuk <i>crack</i> dan <i>lack of fusion</i> dengan biaya lebih rendah	Tidak pada material A106; tidak posisi 2G; tidak menggunakan PAUT
17	Wangsa (2023)	Analisa Pengaruh Variasi Kampuh SMAW ST 37 dengan UT dan <i>Bending</i>	Menganalisis pengaruh variasi kampuh dengan UT dan <i>bending</i>	SMAW; variasi kampuh; baja ST 37; UT dan <i>bending</i>	UT dapat mengidentifikasi cacat internal yang tidak terdeteksi visual	Fokus variasi kampuh bukan arus; ST 37 bukan A106; UT konvensional bukan PAUT

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
18	A Qofi et al (2019)	Analisa Kekuatan Tarik dan Cacat <i>Butt Joint</i> SMAW 3G ASTM A36	Menganalisis kekuatan dan cacat sambungan SMAW 3G	SMAW posisi 3G <i>vertical up/down</i> ; ASTM A36	Arah pengelasan <i>vertical</i> mempengaruhi distribusi cacat dan kekuatan	A36 bukan A106; posisi 3G bukan 2G; bukan pipa; tidak menggunakan PAUT
19	Burhanudin et al (2022)	Efek Perbaikan Las Berulang (<i>Multilayer Repair</i>) pada SS400	Menganalisis efek <i>repair welding</i> berulang pada SS400	SMAW <i>multilayer repair</i> ; baja SS400	Siklus perbaikan berulang menyebabkan degradasi sifat mekanis dan HAZ	SS400 bukan A106; <i>repair welding</i> bukan variasi arus baru; tidak PAUT
20	Munir et al (2019)	<i>Effect of Welding Sequence on Multi Pass Temper Bead Welding</i> PT. INKA Bogie	Menganalisis pengaruh <i>welding sequence</i> pada <i>multi pass</i>	<i>Multi pass temper bead welding</i> ; Bogie LRT INKA	Urutan lapisan yang tidak terkendali meningkatkan distorsi dan risiko retak	Komponen LRT bukan pipa A106; variasi <i>sequence</i> bukan arus; tidak PAUT

No	Penulis	Judul	Tujuan	Metode & Objek	Hasil & Kesimpulan	GAP
21	Nofri & Fardiansyah (2018)	Analisis Sifat Mekanik Pipa <i>Carbon Steel</i> A106 dan A53 untuk Kilang LNG	Membandingkan sifat mekanik A106 dan A53	Analisis sifat mekanik; pipa A106 dan A53	A106 memiliki kombinasi <i>strength, toughness, weldability</i> lebih baik untuk <i>high temp/pressure</i>	Fokus karakterisasi material bukan analisis cacat; tidak menggunakan PAUT
22	“Analisa Variasi” (2000)	Analisa Variasi Arus Cacat Las SMAW <i>Butt Joint</i> 2G NDT Plat Baja Karbon ST-37	Menganalisis cacat SMAW butt joint 2G dengan variasi arus menggunakan NDT	SMAW; plat baja karbon ST-37; posisi 2G; NDT	Variasi arus mempengaruhi jenis cacat pada posisi 2G baja karbon rendah	ST-37 bukan A106; bukan pipa; tidak menggunakan PAUT; tidak pada <i>multi-pass</i>

Berdasarkan kajian komprehensif terhadap 22 penelitian terdahulu yang telah diuraikan di atas, dapat diidentifikasi beberapa pola umum dan gap penelitian. Pertama, dari sisi variabel penelitian, mayoritas penelitian yang mengkaji pengaruh variasi arus menggunakan material baja karbon konvensional seperti ST 37, ST 41, ST 45, ST 60, SS400, A36, atau material *non-ferrous* seperti aluminium dan *stainless steel*. Tidak ada satu pun penelitian yang secara komprehensif menganalisis pengaruh variasi arus *multi-pass* SMAW terhadap distribusi cacat internal pada material ASTM A106 Grade B yang merupakan material standar industri untuk pipa bertekanan tinggi. Penelitian yang paling dekat dari sisi material adalah Rofiqie & Fitri (2024) dan Abdulah et al (2021), namun keduanya tidak mengkaji pengaruh variasi arus secara sistematis.

Kedua, dari sisi posisi pengelasan, mayoritas penelitian menggunakan posisi 1G (*flat*) atau 3G (*vertical*), sementara posisi 2G yang merupakan posisi paling umum dalam instalasi pipa industri hanya dikaji secara terbatas oleh Setia & Pranatal (2022), Assagaf et al (2025), dan Analisa Variasi (2000). Ketiga penelitian ini memiliki keterbatasan masing-masing: material yang digunakan bukan A106, objek berupa pelat bukan pipa, dan metode inspeksi bukan PAUT. Padahal, posisi 2G memiliki kompleksitas unik akibat perubahan orientasi gravitasi di setiap kuadran pengelasan yang menghasilkan karakteristik cacat berbeda antara kuadran *flat*, *overhead*, dan *vertical*.

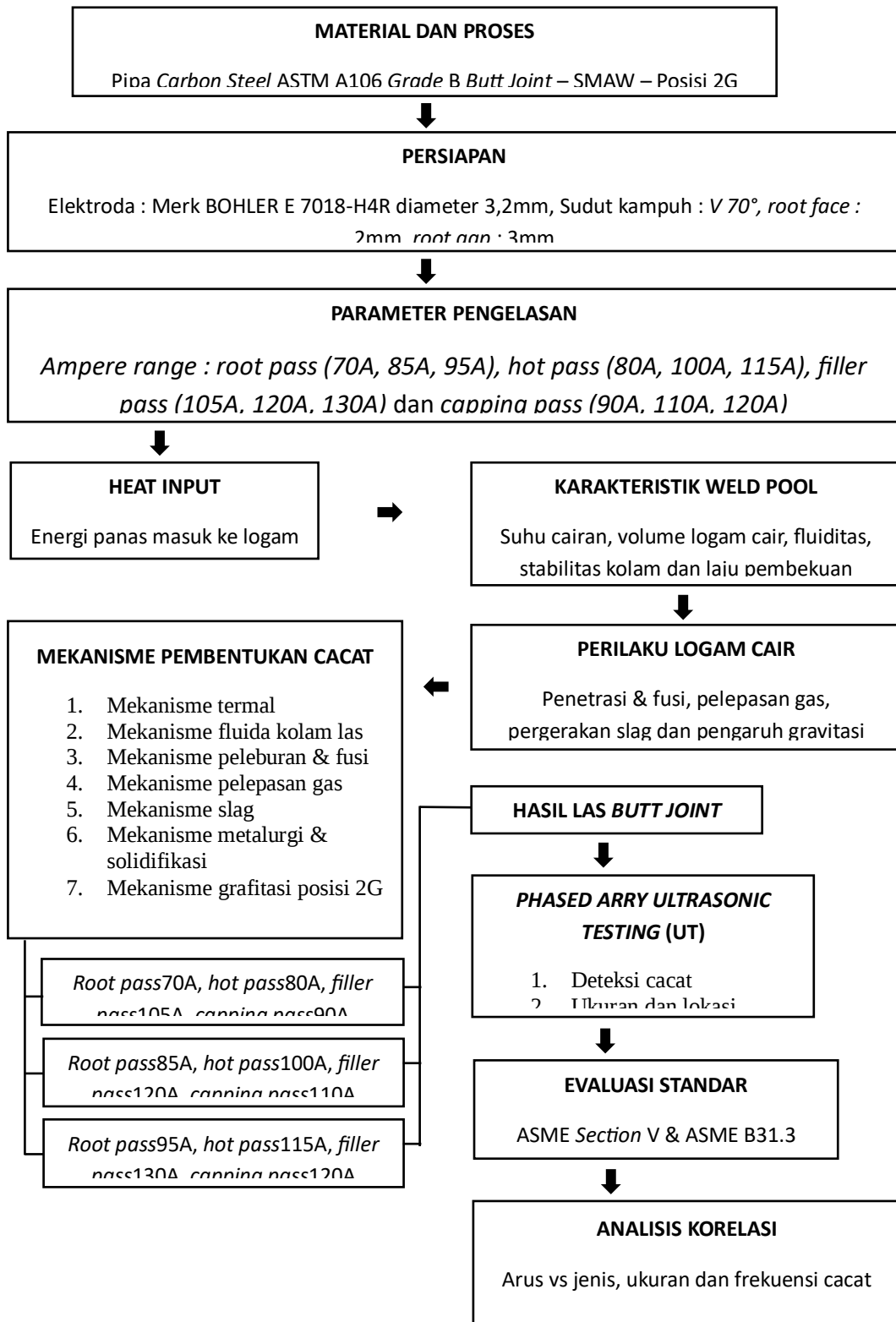
Ketiga, dari sisi metode inspeksi, terdapat perkembangan yang jelas dalam *literatur* dari metode visual dan *penetrant test*, ke radiografi, ke UT konvensional, hingga PAUT yang merupakan teknologi terkini. Namun, penggunaan PAUT pada analisis cacat sambungan las SMAW dengan variasi arus baru dilakukan dalam konteks yang terbatas. Syarifuddin & Akbar (2024) menerapkan PAUT pada pipa *boiler* tanpa mengkaji variasi parameter pengelasan, sementara Pujono & Galih (2018) menerapkan PAUT pada komponen pesawat yang sangat berbeda konteksnya. Belum ada penelitian yang menggabungkan secara simultan variasi arus SMAW *multi-pass*, posisi 2G, material A106 Grade B, pipa, dan metode inspeksi PAUT.

Keempat, dari sisi aspek *multi-pass welding*, penelitian Lopo et al (2023), Burhanudin et al (2022), dan Munir et al (2019) memberikan pemahaman yang baik tentang kompleksitas pengelasan bertingkat, namun semuanya fokus pada sifat mekanis atau distorsi, bukan pada analisis kuantitatif cacat internal melalui PAUT. Pengaruh variasi arus per lapisan (*root, hot, filler, capping*) terhadap jenis dan distribusi cacat yang terdeteksi PAUT pada pipa A106 posisi 2G sama sekali belum pernah dikaji.

Berdasarkan keempat gap tersebut, penelitian yang sedang dilakukan hadir untuk mengisi ruang kosong dalam *literatur* dengan mengintegrasikan secara simultan: material ASTM A106 Grade B sebagai material standar industri perpipaan, posisi pengelasan 2G sebagai posisi paling representatif dalam instalasi pipa industri, pengelasan *multi-pass* SMAW dengan variasi arus yang spesifik per lapisan, objek berupa pipa silindris NPS 6" *Schedule* 80, dan metode inspeksi PAUT yang memiliki resolusi dan akurasi lebih tinggi dibandingkan seluruh metode yang digunakan dalam penelitian-penelitian sebelumnya. Integrasi kelima aspek tersebut dalam satu penelitian merupakan kontribusi orisinal yang belum pernah dilakukan sebelumnya dalam *literatur* yang tersedia, sehingga hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya *body of knowledge* tentang *metallurgy of welding* dan menyediakan panduan empiris yang langsung dapat diaplikasikan oleh industri perpipaan bertekanan tinggi.

2.13 Kerangka Pemikiran Penelitian

Tabel 2. 3 Kerangka Berfikir



Kerangka pemikiran penelitian yang terlihat pada Tabel 2. 3 dibangun berdasarkan pemahaman bahwa kualitas sambungan las *butt joint* pada pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B sangat bergantung pada kontrol parameter pengelasan, khususnya arus listrik yang merupakan parameter fundamental dalam proses SMAW. Alur pemikiran penelitian ini dimulai dari penetapan material dan proses, persiapan, parameter pengelasan, heat input, karakteristik *weld pool*, perilaku logam cair, mekanisme pembentukan cacat, hasil las, inspeksi PAUT, evaluasi standar, hingga analisis korelasi akhir.

Material yang digunakan adalah pipa *Carbon Steel* ASTM A106 Grade B *seamless* ukuran NPS 6" (OD ± 168 mm), *Schedule* 80 (ketebalan $\pm 10,97$ mm). Jenis sambungan adalah *butt joint* dengan metode SMAW pada posisi 2G menggunakan elektroda BOHLER E 7018-H4R diameter 3,2mm, sudut kampuh V 70°, *root face* 2 mm, *root gap* 3 mm, dan polaritas DC EP.

Parameter pengelasan ditetapkan secara *multi-pass*: *root pass* (70A, 85A, 95A), *hot pass* (80A, 100A, 115A), *filler pass* (105A, 120A, 130A) dan *capping pass* (90A, 110A, 120A) dengan *volts* dan *travel speed* yang dijaga konstan. Seluruh spesimen diinspeksi menggunakan *Phased Array Ultrasonic Testing* (PAUT) sesuai standar ASME *Section V Article 4*, dengan penilaian *acceptance criteria* berdasarkan ASME B31.3. Tahap akhir adalah analisis korelasi arus vs jenis, ukuran, dan frekuensi cacat untuk menentukan parameter optimal per lapisan.

2.14 Hipotesis Penelitian

Berdasarkan kajian teori, tinjauan pustaka, dan penelitian terdahulu, maka dapat dirumuskan hipotesis penelitian sebagai berikut:

1. Pengaruh variasi arus terhadap jenis, ukuran, dan jumlah cacat las

Variasi arus pengelasan SMAW pada kisaran 70A–130A berpengaruh terhadap jenis dan jumlah cacat internal yang terbentuk pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 2G, di mana arus yang terlalu rendah cenderung menghasilkan cacat dominan berupa *lack of fusion*, *incomplete penetration*, dan *slag inclusion*, sedangkan arus yang terlalu tinggi cenderung menghasilkan cacat dominan berupa *porosity* akibat

turbulensi *weld pool* yang berlebihan (Setiawan & Imran, 2019; Setia & Pranatal, 2022; Elga et al., 2025).

2. Karakteristik dan distribusi cacat internal berdasarkan inspeksi PAUT

Cacat internal yang terdeteksi melalui inspeksi PAUT pada sambungan *butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 2G tidak terdistribusi merata, melainkan menunjukkan pola distribusi yang spesifik berdasarkan lapisan pengelasan dan kuadran posisi 2G, di mana *lack of fusion* dan *incomplete penetration* cenderung dominan pada zona *root pass* dan *hot pass*, *slag inclusion* cenderung terkonsentrasi pada antarlapis, serta *porosity* cenderung terbentuk lebih merata pada *filler pass* dan *capping pass*, dengan frekuensi dan ukuran cacat yang lebih tinggi pada kuadran *overhead* (Lopo et al., 2023; Waranugraha et al., 2025; Syarifuddin & Akbar, 2024)

3. Rentang arus pengelasan optimal pada setiap lapisan

Terdapat rentang arus pengelasan yang optimal untuk masing-masing lapisan pada pengelasan SMAW *multi-pass butt joint* pipa ASTM A106 Grade B posisi 2G, yaitu pada kisaran arus menengah dari rentang yang diuji (*root pass* sekitar 85A, *hot pass* sekitar 100A, *filler pass* sekitar 120A, dan *capping pass* sekitar 110A) yang menghasilkan *heat input* cukup untuk menjamin penetrasi dan fusi yang sempurna sekaligus tidak menyebabkan turbulensi *weld pool* berlebihan, sehingga menghasilkan jumlah, ukuran, dan jenis cacat paling minimal berdasarkan evaluasi PAUT sesuai standar ASME Section V dan ASME B31.3 (Marthiana et al., 2020; Lopo et al., 2023; Abdulah et al., 2021)

Dampak penerapan hasil hipotesis penelitian ini pada skala industri berskala besar. Apabila terbukti bahwa terdapat rentang arus optimal yang meminimalkan pembentukan cacat pada sambungan *butt joint* pipa A106 posisi 2G, maka rekomendasi parameter tersebut dapat langsung diintegrasikan ke dalam *Welding Procedure Specification* (WPS) yang digunakan oleh industri minyak, gas, dan petrokimia. Pengurangan *rejection rate* akibat cacat las akan menurunkan biaya *rework* secara substansial, mengingat perbaikan sambungan las pipa bertekanan tinggi di lapangan membutuhkan biaya yang sangat besar karena melibatkan

shutdown produksi, mobilisasi *welder* bersertifikat, dan inspeksi ulang. Lebih jauh, data empiris tentang korelasi arus-cacat pada A106 posisi 2G akan menjadi acuan bagi *Quality Control Inspector* dalam menetapkan batas penerimaan parameter pengelasan di lapangan, sehingga meningkatkan konsistensi kualitas sambungan las pada skala proyek besar. Peningkatan *reliability* sistem perpipaan yang dihasilkan juga berdampak langsung pada *safety* operasional, mengurangi risiko kecelakaan industri akibat kegagalan pipa yang berpotensi menimbulkan korban jiwa dan kerugian lingkungan yang masif.