

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hasil Penelitian Terdahulu

Sejumlah penelitian terdahulu telah menunjukkan pentingnya kombinasi pengujian tersebut menunjukkan bahwa pada proses SMAW baja ST37 dengan elektroda E6013, peningkatan arus dari 90A ke 110A menyebabkan kenaikan kekerasan dari 168 VHN menjadi 191 VHN, serta kekuatan tarik tertinggi sebesar 36,47 MPa diperoleh pada arus 110A.(Vietanti et al., 2023). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi arus dan sudut sambungan berpengaruh signifikan terhadap kekuatan mekanik sambungan las, dengan tensile strength tertinggi 482,54 N/mm² pada arus 110A dan sudut 70°, sedangkan nilai terendah 399,54 N/mm² terjadi pada arus 90A.

Selain parameter arus dan sudut sambungan, faktor pendinginan pasca las juga berpengaruh terhadap sifat mekanik baja ST37. Penelitian (Tarigan et al., 2023) menunjukkan bahwa media pendingin minyak menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 365,15 N/mm², lebih tinggi dibandingkan dengan pendinginan air (347,75 N/mm²) dan tanpa pendinginan (343,35 N/mm²). Sementara itu, pengaruh jenis elektroda dan kecepatan las dikaji oleh (Pamungkas et al., 2024) menunjukkan bahwa elektroda E7016 menghasilkan kekuatan tarik hingga 460,32 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan E6013 sebesar 256,02 MPa, sehingga membuktikan bahwa pemilihan elektroda dan kecepatan las berpengaruh besar terhadap kualitas sambungan.

Dari sisi cacat permukaan, (A Assagaf et al., 2023) melakukan penelitian pengelasan baja ST37 pada posisi 1G dengan uji penetrant, dan hasilnya menunjukkan adanya cacat dominan berupa undercut dan porositas yang berpengaruh langsung terhadap kualitas sambungan. Penelitian ini sejalan dengan hasil (Wari et al., 2020) yang mendeteksi cacat porositas pada baja ST37 menggunakan metode *dye penetrant*, di mana sebagian spesimen menunjukkan porositas yang melebihi standar penerimaan TWI.

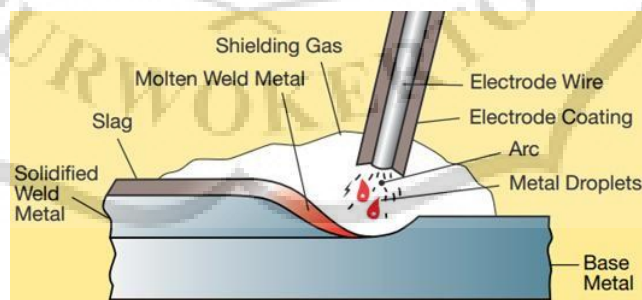
Penelitian dalam lingkup internasional juga memperkuat temuan tersebut. (Vietanti et al., 2021) meneliti pengaruh variasi arus (90A, 110A, 130A) dan posisi pengelasan (1G, 2G, 3G) pada baja A36 menggunakan SMAW, dan hasilnya menunjukkan bahwa tensile strength tertinggi sebesar 471,93 MPa serta kekerasan 242,20 HV diperoleh pada arus 90A dengan posisi 3G. Sementara itu, Winarto (2020) meneliti pengaruh posisi pengelasan (1G, 2G, 3G) serta tebal pelat pada baja karbon dan stainless steel, dan hasilnya menunjukkan bahwa posisi 3G cenderung menghasilkan tegangan sisa lebih tinggi dan sifat mekanik lebih rendah dibanding posisi 2G, sehingga posisi pengelasan terbukti menjadi faktor penting yang menentukan kualitas sambungan.

B. Teori Dasar Pengelasan SMAW

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) merupakan metode pengelasan busur listrik yang menggunakan elektroda berlapis fluks sebagai bahan pengisi. Busur listrik yang terbentuk melelehkan logam induk dan elektroda sehingga membentuk kolam las, sementara lapisan fluks menghasilkan gas pelindung dan terak yang melindungi logam cair dari kontaminasi atmosfer selama pendinginan (Afzal et al.,

2025). Proses SMAW dapat menggunakan sumber arus bolak-balik (AC) maupun arus searah (DC), dimana parameter las seperti arus, tegangan, dan kecepatan gerak elektroda sangat menentukan stabilitas busur serta penetrasi las. Pengendalian parameter ini penting untuk meminimalkan cacat umum pada sambungan las seperti porositas, retak, dan kurang fusi (Orłowska et al., 2020).

Pengelasan SMAW banyak digunakan untuk pengelasan baja karbon rendah, baja tahan karat, dan pekerjaan fabrikasi maupun perbaikan karena peralatannya sederhana serta fleksibel terhadap berbagai posisi pengelasan. Namun, kualitas sambungan sangat bergantung pada keterampilan operator agar diperoleh hasil las yang kuat dan bebas cacat (Ary et al., 2023) (Musavi et al., 2019). Metode SMAW dipilih bukan karena keterbatasannya, melainkan karena keunggulannya yang meliputi ketahanan, fleksibilitas, kualitas sambungan, serta keterampilan tinggi yang dihasilkan. Metode ini tetap bernilai dan andal meskipun teknologi pengelasan modern terus berkembang. Gambar 2.1 menunjukkan teori dasar proses pengelasan SMAW.



Gambar 2.1 Teori Pengelasan SMAW(Wisnujati & Andryansyah, 2021)

C. Baja ST 37

Baja ST37 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan dalam konstruksi karena mudah dilas dan memiliki kekuatan yang memadai. Pemilihan

elektroda dan pengaturan arus las yang tepat sangat berpengaruh terhadap kekuatan sambungan dan minimnya cacat, karena proses pengelasan menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah pengaruh panas yang harus dikontrol agar kualitas sambungan optimal (Azmi et al., 2025).

Pengelasan SMAW pada baja ST37 memerlukan pengaturan arus las dan pemilihan elektroda yang tepat untuk menghasilkan sambungan yang kuat dan bebas cacat. Perubahan struktur mikro akibat proses pengelasan sangat memengaruhi sifat mekanik, sehingga pengendalian parameter pengelasan dan perlakuan pasca las diperlukan untuk menurunkan tegangan sisa serta meningkatkan keuletan dan ketahanan sambungan (Soleymani et al., 2024). Tabel 2.1 di bawah ini menunjukkan spesifikasi dan gambar dari baja ST 37.

Tabel 2. 1 Spesifikasi Baja ST37

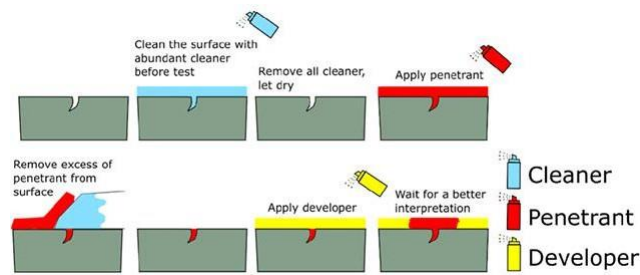
Unsur	317/25-S938 (%)	Standar Deviasi
C	0,130	0,0032
Si	0,134	0,0081
Mn	0,605	0,0020
P	0,029	0,0005
S	<0,0100	0,0007
Cr	0,165	0,0015
Mo	<0,0100	0,0011
Ni	0,060	0,0027
Cu	0,050	0,0035
Al	0,017	0,0042
Co	<0,0050	0,0007
Mg	<0,0050	0,00003
V	<0,0050	0,0003
Fe	98,78	0,020

D. Uji penetrant (*Penetrant Testing/PT*)

Uji penetrant merupakan metode pengujian *non-destruktif* untuk mendeteksi cacat permukaan pada material, khususnya logam. Metode ini bekerja

dengan mengaplikasikan cairan penetrant yang meresap ke dalam retakan atau celah terbuka, kemudian ditarik kembali oleh *developer* sehingga cacat dapat terlihat jelas. Uji penetrant banyak digunakan karena sensitivitasnya tinggi, mudah diaplikasikan, dan efektif dalam inspeksi kualitas las (Azmi et al., 2025). Uji penetrant dilakukan melalui tahapan persiapan permukaan, aplikasi penetrant, waktu penetrasi, pembersihan berlebih, dan penggunaan *developer* untuk menampakkan cacat. Meskipun sederhana dan ekonomis, metode ini hanya efektif untuk mendeteksi cacat yang terbuka ke permukaan. Perkembangan terbaru menunjukkan penerapan uji penetrant otomatis dengan kontrol proses terintegrasi untuk meningkatkan konsistensi hasil dan mengurangi kesalahan manusia. (Wagener & Rongen, 2020).

Tabel 2.2 tersebut menunjukkan tingkat penerimaan cacat permukaan pada pengelasan berdasarkan standar ISO 23277, di mana cacat dibedakan menjadi dua jenis yaitu *linear indication* (retakan memanjang) dan *nonlinear indication* (cacat bulat/tidak beraturan); untuk *linear indication*, panjang cacat yang masih dapat diterima adalah ≤ 2 mm pada Level 1, ≤ 4 mm pada Level 2, dan ≤ 8 mm pada Level 3, sedangkan untuk *nonlinear indication*, ukuran sumbu utama cacat yang masih diperbolehkan adalah ≤ 4 mm pada Level 1, ≤ 6 mm pada Level 2, dan ≤ 8 mm pada Level 3, sehingga semakin tinggi level yang dipilih maka toleransi terhadap ukuran cacat yang dapat diterima juga semakin besar (Wagener, 2015). Gambar 2.2 dibawah ini menunjukkan cara uji penetrant, sedangkan Tabel 2.2 merupakan Tabel Tingkat penerimaan ukuran cacat.



Gambar 2.2 Cara Uji Penetrant Cair (Maxwill-ind, 2024)

Tabel 2. 2 Penerimaan Cacat Menurut ISO 23277

Type of indication	Acceptance level 1	Acceptance level 2	Acceptance level 3
Linear indication <i>l</i> = length of indication	$l \leq 2$	$l \leq 4$	$l \leq 8$
Nonlinear indication <i>d</i> = major axis dimension	$d \leq 4$	$d \leq 6$	$d \leq 8$

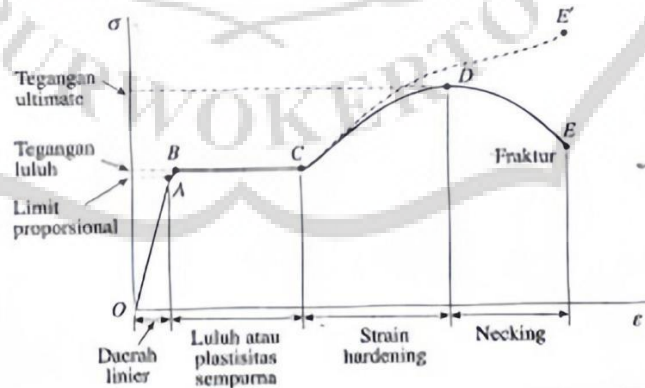
E. Uji Tarik

Uji tarik merupakan pengujian mekanik untuk mengetahui respons material terhadap beban tarik hingga terjadi patah. Spesimen dijepit pada mesin uji universal dan diberi gaya tarik searah sumbu hingga kerusakan, sehingga diperoleh data seperti kekuatan tarik maksimum, batas luluh, dan elongasi yang penting untuk evaluasi sifat mekanik, kontrol kualitas, dan analisis kegagalan material (Chen & Fan, 2022). Dalam uji tarik terdapat besaran utama berupa tegangan dan regangan. Tegangan teknik didefinisikan sebagai $\sigma = F/A$, sedangkan regangan teknik dinyatakan sebagai $\epsilon = \Delta L/L_0$. Pada daerah elastis, hubungan tegangan–regangan bersifat linear dan dinyatakan oleh modulus elastisitas (Young’s modulus) $E = \sigma/\epsilon$. Besaran-besaran ini menjadi dasar penentuan nilai modulus elastisitas, batas luluh,

dan kekuatan tarik maksimum (UTS) dalam laporan uji Tarik (Moayyedien et al., 2023).

Kurva tegangan–regangan menggambarkan perilaku material mulai dari daerah elastis, plastis, hingga patah. Dari kurva ini dapat ditentukan parameter lain seperti elongasi, reduksi penampang, dan energi patah. Oleh karena itu, pelaporan parameter uji seperti geometri spesimen, metode pengukuran regangan, dan kondisi penjepitan perlu diperhatikan karena berpengaruh terhadap hasil dan perbandingan antar penelitian (Lin et al., 2024).

Dalam praktik uji tarik, penggunaan standar ASTM/ISO dan dataset terkini diperlukan untuk memastikan hasil yang valid dan dapat dibandingkan. Pada pengujian sambungan las, perhatian khusus perlu diberikan pada lokasi pengambilan spesimen dari daerah las dan HAZ, kecepatan penarikan, metode pengukuran regangan (extensometer atau DIC), serta pencatatan parameter uji secara lengkap agar hasil pengujian akurat dan reliabel (AbouelNour et al., 2024). Dibawah ini Gambar 2.3 adalah kurva tegangan regangan.



Gambar 2.3 Kurva Tegangan Regangan (Mulyati, 2015).

F. Uji Kekerasan

Uji kekerasan adalah salah satu cara untuk mengetahui seberapa keras atau kuat permukaan suatu logam menahan tekanan dari benda lain. Dalam pengujian ini, ujung alat uji yang disebut *indentor* ditekan ke permukaan logam dengan beban tertentu, lalu bekas tekanannya diukur. Semakin kecil bekas yang dihasilkan, maka semakin keras material tersebut. Uji ini sering digunakan karena cepat, mudah, dan bisa menunjukkan kualitas permukaan hasil pengelasan atau perlakuan panas.

Ada beberapa jenis uji kekerasan yang umum digunakan, seperti Brinell, Vickers, Rockwell, dan Knoop. Setiap jenis memiliki cara pengukuran yang sedikit berbeda, tergantung bentuk ujung alat dan besarnya beban. Misalnya, pada uji Vickers, kekerasan dihitung dengan rumus:

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

di mana **F** adalah beban (Newton) dan **d** adalah panjang diagonal bekas tekan (mm). Nilai ini disebut “angka kekerasan Vickers” dan menunjukkan seberapa kuat permukaan logam menahan tekanan.

karena umumnya material yang lebih keras memiliki kekuatan tarik lebih tinggi, meskipun hubungannya dipengaruhi oleh struktur mikro, perlakuan panas, dan jenis material. Oleh karena itu, uji kekerasan sering dikombinasikan dengan uji tarik untuk memperoleh analisis sifat mekanik yang lebih akurat (Rongcai et al., 2021).

Pada penelitian pengelasan SMAW material ST37, pengujian kekerasan dilakukan pada logam induk, daerah HAZ, dan logam las untuk mengetahui pengaruh panas pengelasan terhadap perubahan sifat mekanik, di mana perbedaan nilai kekerasan yang signifikan dapat mengindikasikan perubahan struktur mikro atau potensi cacat

pada sambungan las (Lahouel et al., 2025). Gambar 2.4 dibawah ini menunjukkan alat uji kekerasan *Vickers*.



Gambar 2.4 Mesin Uji Kekerasan

G. Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro merupakan metode metalografi untuk mengidentifikasi fasa dan morfologi butir material melalui pengamatan mikroskopis setelah proses preparasi spesimen (Babu et al., 2022). Pengujian ini penting karena perubahan mikrostruktur akibat pengelasan dan variasi *heat input* sangat memengaruhi sifat mekanik material (Tandon et al., 2020). *Heat input* yang tinggi menyebabkan pendinginan lebih lambat, pembesaran ukuran butir, serta perubahan fraksi fasa yang dapat menurunkan kekerasan daerah las (Liu et al., 2023b). Oleh karena itu, pengaturan parameter pengelasan perlu dioptimalkan untuk memperoleh keseimbangan kekuatan dan keuletan sambungan las (Babu et al., 2022).

Uji struktur mikro menggunakan mikroskop cahaya, SEM, dan analisis citra untuk mengidentifikasi fasa serta fraksi ferrit–perlit (Babu et al., 2022). Hasil pengujian ini dapat dikorelasikan dengan uji mekanik seperti uji kekerasan dan uji tarik untuk interpretasi sifat material yang lebih akurat (Liu et al., 2023). Oleh

karena itu, diperlukan standar preparasi dan pengamatan yang konsisten agar hasil mikrostruktur dapat dibandingkan dan dimanfaatkan dalam penelitian maupun kontrol kualitas pengelasan (Tandon et al., 2020b). Contoh hasil foto uji struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 2.5 dibawah ini.



Gambar 2.5 Alat Foto Uji Struktur Mikro

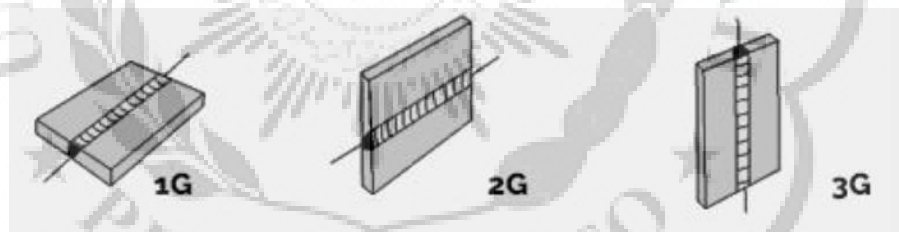
H. Posisi Pengelasan Dan Pengaruh Terhadap Kualitas Las

Posisi pengelasan menentukan bagaimana panas diaplikasikan dan didistribusikan selama proses pengelasan. Posisi ini berpengaruh langsung pada bentuk dan ukuran jalur las serta kedalaman penetrasi logam las ke dalam bahan dasar. Pengelasan dengan posisi yang tepat memungkinkan pengontrolan panas yang baik sehingga menghasilkan sambungan yang kuat dan minim cacat utama seperti kurangnya penetrasi atau penggabungan yang tidak sempurna (Cheng et al., 2021).

Posisi pengelasan juga berperan dalam menentukan jenis dan jumlah cacat mikro yang muncul, seperti pori-pori dan retak halus pada sambungan. Beberapa

posisi, terutama posisi datar, cenderung meminimalkan terbentuknya cacat tersebut karena memudahkan pengendalian logam cair dan aliran gas pelindung, yang sangat penting untuk menghasilkan las yang tahan lama dan dapat diandalkan dalam kondisi operasional berat (Lang et al., 2025).

Selain itu, posisi pengelasan juga mempengaruhi sifat mekanik sambungan, seperti kekuatan tarik, ketangguhan, dan ketahanan benturan. Pemilihan posisi yang optimal meningkatkan homogenitas mikrostruktur pengelasan dan mengurangi tegangan internal, yang pada akhirnya memperbaiki performa mekanik sambungan las. Hal ini sangat penting dalam aplikasi industri berat yang membutuhkan kualitas sangat tinggi (Shafeek et al., 2024). Pengelasan 1G, 2G, dan 3G dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Posisi Pengelasan 1G, 2 G dan 3G (Peter gemanse, 2023).

I. Elektroda E6013

Elektroda E6013 merupakan elektroda yang umum digunakan pada proses SMAW karena lapisan flux medium-nya mampu menghasilkan busur las yang halus, stabil, dan mudah dikendalikan dengan percikan minimal. Elektroda ini dapat digunakan pada berbagai posisi pengelasan seperti datar, horizontal, vertikal, dan overhead, sehingga cocok untuk pekerjaan konstruksi dan fabrikasi ringan. E6013 sangat sesuai untuk pengelasan baja karbon rendah ST37 karena menghasilkan

sambungan yang bersih, kuat, dan tidak memerlukan peralatan khusus (Adiman et al., 2020). Secara teknis, lapisan flux elektroda E6013 mengandung titanium dioksida dan besi bubuk yang memberikan penetrasi sedang, terak mudah dilepas, serta kestabilan busur yang baik. Komposisi kimianya, seperti karbon, mangan, dan silikon dalam kadar rendah, mendukung kualitas sambungan tanpa menyebabkan deformasi berlebih pada material ST37 (Sunjames, 2025).

Elektroda E6013 merupakan kode klasifikasi elektroda menurut AWS (*American Welding Society*) A5.1, di mana huruf E menunjukkan elektroda untuk proses SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), angka 60 menyatakan kekuatan tarik minimum hasil las sebesar 60 ksi (sekitar 413 MPa), angka 1 menandakan elektroda dapat digunakan pada semua posisi pengelasan (datar, horizontal, vertikal, dan overhead), sedangkan angka 3 menunjukkan jenis selaput rutile coating yang memiliki karakteristik busur mudah dinyalakan, stabil, penetrasi sedang, dan slag mudah dibersihkan (MechanicalBrothers, 2015). Spesifikasi elektroda dapat dilihat pada Tabel 2.3 di bawah ini.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Elektroda E6013(Adiman et. Al., 2020)

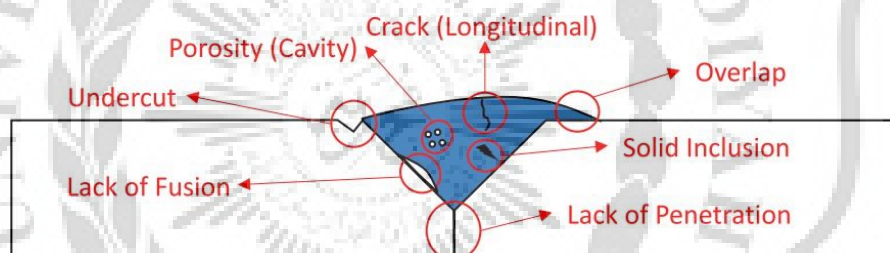
Parameter	Spesifikasi	Keterangan
Jenis Elektroda	E6013 (Rutile electrode)	Elektroda las dengan lapisan rutile yang memberikan busur halus dan stabil.
Diameter	2.5 mm, 3.2 mm, 4.0 mm, 5.0 mm	Ukuran umum untuk berbagai ketebalan material dan aplikasi pengelasan.
Kekuatan Tarik	Minimum 60,000 psi (sekitar 420 MPa)	Sesuai standar kode '60' pada E6013, menunjukkan kekuatan hasil las.
Posisi Pengelasan	Semua posisi (flat, horizontal, vertical, overhead)	Sangat fleksibel untuk berbagai posisi pengelasan.

Komposisi Kimia Utama	C: ~0.08%, Mg: ~0.4-5%, Si: ~0.18%	Komposisi untuk stabilitas busur dan penetrasi sedang pada baja karbon rendah.
Karakteristik Busur	Halus, stabil, sedikit percikan	Memudahkan pengelasan dan menghasilkan hasil las yang rapi.
Penetrasi Las	Sedang	Cocok untuk pengelasan baja karbon rendah St 37 tanpa kerusakan termal berlebih.
Lapisan Flux	Titanium dioksida, besi bubuk, rutile	Mendukung kestabilan busur dan pengangkatan terak yang mudah.
Arus Pengelasan	70-160 A tergantung diameter elektroda	Pengaturan arus harus disesuaikan agar hasil las optimal diperoleh.
Aplikasi Umum	Konstruksi ringan, fabrikasi tangki, perbaikan kendaraan	Digunakan luas di industri pengelasan ringan dan perbaikan.

J. Cacat Las (*Welding Defects*)

Cacat las permukaan merupakan masalah umum dalam proses pengelasan yang dapat menurunkan kualitas dan kekuatan sambungan las. Beberapa cacat yang sering dijumpai meliputi *porositas*, *undercut*, *overlap*, *crack* (retakan), dan *slag inclusion* (terperangkapnya terak di dalam las). *Porositas* timbul akibat adanya gas yang terperangkap saat logam cair membeku, membentuk lubang kecil di permukaan las. *Undercut* adalah lekukan atau penghilangan material di tepi las yang mengurangi kekuatan. *Overlap* adalah tumpukan logam las yang tidak menyatu dengan dasar material, sementara *crack* adalah retakan yang sangat berbahaya karena berpotensi menyebabkan kegagalan mekanis. *Slag inclusion* adalah terak yang terperangkap dalam las, sehingga melemahkan sambungan (Zhang et al., 2020).

Cacat las dapat disebabkan oleh teknik pengelasan, kondisi material, dan parameter proses yang kurang tepat. Porositas umumnya terjadi akibat kontaminasi gas, kelembaban, atau pembersihan permukaan yang tidak optimal. *Undercut* disebabkan oleh arus las yang terlalu tinggi atau sudut elektroda yang tidak sesuai, sedangkan *overlap* terjadi karena pengaturan kecepatan pengelasan yang tidak tepat sehingga logam las tidak melebur sempurna. Retak (*crack*) muncul akibat pendinginan yang terlalu cepat, tegangan sisa tinggi, atau ketidaksesuaian material, sementara *slag inclusion* biasanya disebabkan oleh pembersihan terak yang kurang baik antar lapisan las (Xie et al., 2021). Gambar 2.7 memperlihatkan beberapa jenis cacat.



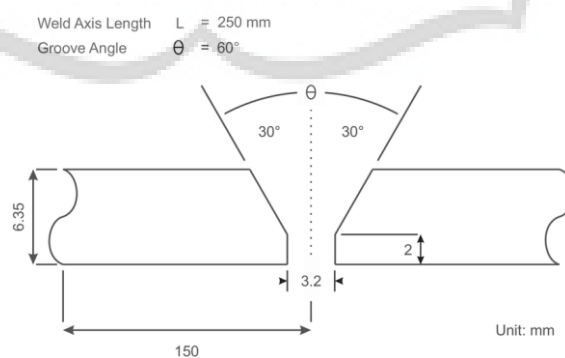
Gambar 2.7 Cacat Pengelasan (Amirashari et al., 2021)

K. Kampuh Tipe V

Kampuh tipe V adalah metode mempersiapkan dua permukaan logam yang akan disambung dengan cara memotong ujung-ujungnya membentuk sudut menyerupai huruf "V". Bentuk ini membuat ruang yang cukup untuk mengisi logam las dengan baik, sehingga sambungan menjadi kuat dan lebih tahan lama. Biasanya bentuk dan sudut kampuh disesuaikan dengan ketebalan bahan agar pengisian las bisa maksimal dan sambungan tidak mudah patah. Pendekatan ini sering digunakan ketika bahan yang dilas cukup tebal (Hussin & CheLah, 2020).

Pembuatan kampuh V dilakukan dengan memotong ujung logam membentuk sudut tertentu, kemudian diisi logam las secara bertahap untuk memastikan ruang V terisi penuh dan meminimalkan cacat seperti retak atau porositas. Pengelasan bertahap membantu pemerataan panas sehingga mengurangi risiko deformasi, dan metode ini umum digunakan pada material tebal atau konstruksi yang memerlukan kekuatan sambungan tinggi (Pratikno et al., 2022). Kampuh V memiliki keunggulan berupa sambungan yang kuat dan tahan lama karena penetrasi dan pengisian logam las yang baik, serta distribusi panas yang lebih merata. Namun, proses pembuatannya lebih kompleks, memerlukan waktu lebih lama, dan dapat meningkatkan biaya produksi dibandingkan sambungan sederhana (Irelin et al., 2024).

Meskipun demikian, kampuh tipe V sangat populer dan luas digunakan terutama dalam industri yang membutuhkan sambungan presisi dan kuat seperti pembuatan kapal, konstruksi jembatan, serta otomotif. Penggunaan teknologi las modern membuat proses pengelasan kampuh V semakin efisien dan hasilnya minim cacat. Ini menambah keandalan produk akhir yang dibuat dengan sambungan jenis ini (Molski & Tarasiuk, 2020).



Gambar 2.8 Kampuh Tipe V (Maria, 2022)