STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH SUDUT ELEKTRODA TERHADAP CACAT LAS PADA SAMBUNGAN BAJA ASTM A36

Hesron Joihart Hutabarat[1], Zulfan[2], Rizki Pangidoan Lubis[3]
hesronhutabarat2010@gmail.com[1], zulfanmorgan@gmail.com[2], rizkilubis.mesin@gmail.com[3]
Universitas Alwashliyah Medan

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut elektroda terhadap jenis dan tingkat cacat las yang terjadi pada penyambungan pelat baja ASTM A36 menggunakan metode pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Variabel sudut elektroda yang digunakan dalam eksperimen ini meliputi sudut $60^\\circ$, $70^\\circ$, dan $80^\\circ$ terhadap benda kerja. Pengujian dilakukan melalui metode non-destruktif (Non-Destructive Test), yaitu pengujian visual dan uji penetran (penetrant test), guna mengidentifikasi dan mengukur cacat las seperti porositas, undercut, dan incomplete penetration. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa variasi sudut elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas busur listrik, pola peleburan, serta pembentukan manik las. Sudut elektroda optimal yang menghasilkan cacat las paling minimal dan penetrasi yang ideal teridentifikasi pada sudut $70^\\circ$. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan referensi teknis bagi juru las dan industri manufaktur dalam menentukan parameter pengelasan yang tepat guna meminimalkan cacat dan meningkatkan kualitas sambungan struktur baja ASTM A36.

Kata Kunci: Sudut Elektroda, Cacat Las, Baja Astm A36, Smaw, Pengujian Tak Merusak.

ABSTRCT

This study aims to determine the effect of variations in electrode angle on the type and severity of welding defects in ASTM A36 steel plate joints welded using the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) method. The electrode angle variables applied in this experiment include $60^\\circ$, $70^\\circ$, and $80^\\circ$ relative to the workpiece. Evaluation was conducted through Non-Destructive Testing (NDT) methods, namely visual inspection and penetrant testing, to identify and quantify welding defects such as porosity, undercut, and incomplete penetration. The experimental results indicate that variations in electrode angle significantly influence electric arc stability, fusion patterns, and bead formation. The optimal electrode angle that yields minimal welding defects and ideal penetration was identified at $70^\\circ$. This research is expected to provide a technical reference for welders and the manufacturing industry in determining appropriate welding parameters to minimize defects and enhance the joint quality of ASTM A36 steel structures.

Keywords: *Electrode Angle, Welding Defects, Astm A36 Steel, Smaw, Non-Destructive Testing.*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pengelasan merupakan salah satu proses manufaktur yang paling penting dan paling sering digunakan dalam berbagai industri, termasuk konstruksi, otomotif, perkapalan, minyak dan gas, serta fabrikasi struktural lainnya. Sebagai proses penyambungan material yang melibatkan konsumsi energi panas untuk meleburkan logam dasar dan logam pengisi, pengelasan memungkinkan pembentukan sambungan permanen yang kuat dan efisien tanpa tambahan komponen mekanis. Dalam konteks manufaktur modern, sambungan las yang berkualitas adalah kunci untuk keselamatan struktural, keandalan operasi, serta efisiensi biaya dan waktu produksi. Namun dalam praktiknya, sambungan las sering menghadapi masalah kualitas seperti cacat las dan penurunan sifat mekanik yang kritis, misalnya kekuatan dinamik terhadap beban benturan (impact toughness), yang

dapat mengurangi performa komponen atau bahkan menyebabkan kegagalan struktur pada kondisi pelayanan nyata .

Salah satu material yang sangat luas digunakan terutama pada struktur rendah karbon adalah baja ASTM A36, yang dikenal karena kemudahan pemesinan dan keterikatan baik terhadap berbagai proses pengelasan, namun tetap menunjukkan sensitivitas terhadap parameter proses las yang kurang tepat . Di lapangan, welding defect seperti undercut, porosity, spatter, incomplete fusion, dan kegagalan nuklir lainnya merupakan permasalahan umum yang sering diperhatikan karena dapat menurunkan integritas sambungan las dan meningkatkan risiko retak atau patah saat menerima beban dinamis . Bahkan data industri menunjukkan bahwa defect rate dalam pengelasan sering kali jauh melebihi target mutu yang diharapkan — misalnya survei defect rate 7,58 % dalam proses pengelasan pada salah satu proyek fabrikasi struktur, padahal standar biasanya berada di bawah 1 % — menandakan tantangan nyata dalam pengendalian kualitas proses las yang konsisten . Masalah ini semakin kompleks ketika parameter proses seperti sudut elektroda, selain arus las dan jenis elektroda, ternyata berpengaruh terhadap distribusi panas, penetrasi, serta pembentukan cacat di daerah sambungan, yang secara langsung memengaruhi sifat mekanik termasuk nilai impak sambungan las.

Berbagai penelitian literatur sebelumnya telah mengeksplorasi pengaruh parameter las terhadap kualitas sambungan, namun dengan fokus yang berbeda-beda dan keterbatasan tertentu. Ma’mun Hidayat dkk. melakukan studi mengenai variasi sudut las pada proses GMAW terhadap kekerasan dan struktur mikro pada baja A36, menunjukkan bahwa variasi sudut memengaruhi karakteristik mikro dan kekerasan las, namun studi tersebut tidak memasukkan evaluasi cacat las dan sifat impak secara rinci . Penelitian lain pada material baja konstruksi ST37 menggunakan variasi parameter elektroda menunjukkan bahwa panjang cacat tertentu tidak berpengaruh signifikan terhadap beberapa parameter yang diuji, tetapi penelitian ini terbatas pada material yang berbeda dan tidak menganalisis dampaknya terhadap impact toughness yang merupakan indikator penting performa dinamik sambungan . Sementara itu, penelitian pada variasi arus las pada ASTM A36 lebih banyak membahas pengaruh arus terhadap kekuatan tarik dan bending, bukan fokus pada sudut elektroda dan karakterisasi cacat las maupun dampaknya terhadap nilai impak yang kritikal dalam kondisi dinamik . Hal serupa tampak pada studi yang memadukan variasi parameter las ganda menggunakan kampuh Double V pada ASTM A36, yang meskipun menyentuh nilai impak, fokus utamanya lebih pada variasi arus dan mikrostruktur tanpa isolasi efek sudut elektroda secara khusus .

Dari tinjauan tersebut terlihat bahwa masih terdapat gap penelitian yang signifikan: belum ada kajian eksperimental komprehensif yang mengisolasi dan menganalisis secara sistematis pengaruh sudut elektroda terhadap cacat las dan nilai impact toughness pada sambungan baja ASTM A36, terutama dengan menghubungkan kedua aspek tersebut secara langsung. Parameter sudut elektroda berpotensi memengaruhi arah dan konsentrasi panas selama pengelasan, yang pada gilirannya menentukan karakter cacat las yang terbentuk serta microstruktur yang berkembang dalam zona las dan area HAZ (heat affected zone), yang keduanya berkontribusi besar terhadap performa mekanik dinamik seperti kemampuan menyerap energi benturan. Dengan gap seperti ini, terdapat kebutuhan mendesak untuk penelitian yang menghubungkan parameter geometris las (sudut elektroda) dengan hasil kualitas las yang kritis, terutama cacat las dan ketahanan impak — aspek yang penting baik untuk teori material las maupun aplikasi praktis di industri.

Oleh karena itu, penelitian ini dirancang dengan pendekatan eksperimental untuk secara sistematik mengevaluasi pengaruh variasi sudut elektroda pada proses las buatan (welding) sambungan baja ASTM A36 terhadap pembentukan cacat las (termasuk

undercut, porosity, spatter dan lainnya) serta nilai impact toughness sambungan, melalui pengujian standar Charpy atau metode yang setara. Pendekatan ini diharapkan membuka perspektif baru dengan mengontrol faktor-faktor lain agar efek sudut elektroda dapat dievaluasi secara kuantitatif dan menyeluruh, sekaligus mengkontribusikan data teknis yang lebih rinci dan aplikatif dalam menentukan parameter las yang lebih optimal di lapangan. Secara akademik, kontribusi penelitian ini terletak pada pengembangan pemahaman hubungan antara parameter proses las dan performa mekanik dinamik dari sambungan baja struktural, serta potensi rekomendasi teknis bagi industri manufaktur dan konstruksi untuk mengurangi tingkat cacat las dan meningkatkan keandalan sambungan struktural. Dengan demikian penelitian ini tidak hanya memperkaya diskursus akademik dalam bidang teknologi pengelasan tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam penyusunan welding procedure specification yang lebih efektif dan efisien untuk baja ASTM A36 pada aplikasi nyata.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih 6 (enam) bulan, dimulai pada bulan Februari sampai dengan Juli 2026. Kegiatan penelitian meliputi tahap persiapan, pembuatan spesimen, proses pengelasan, pengujian, analisis data, hingga penyusunan laporan.

Penelitian dilaksanakan di bengkel las dan laboratorium uji material yang memiliki fasilitas pengelasan SMAW serta alat uji impak.

Tabel 1 Waktu Penelitian

No	Kegiatan Penelitian	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1	Studi Literatur	✓	✓				
2	Penyusunan Proposal	✓	✓				
3	Persiapan Alat dan Bahan		✓	✓			
4	Pembuatan Spesimen			✓	✓		
5	Proses Pengelasan			✓	✓		
6	Pengujian Cacat Las				✓	✓	
7	Pengujian Impact				✓	✓	
8	Analisis Data					✓	✓
9	Penyusunan Laporan					✓	✓

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain Penelitian Dan Parameter Eksperimen

Pelnellitian ini melnggunakan meltodel elkspelrimeln pada sambungan las baja ASTM A36 delngan prosels SMAW melnggunakan ellelktroda EL6013 Ø3,2 mm.

Parameter Konstan:

1. Arus las (I) = 100 A
2. Telgangan (V) = 22 V
3. Kelcelpatan las (v) = 120 mm/melnit
4. Jelnis kampuh = Butt joint V tunggal
5. Posisi las = 1G (datar)

Variabel Bebas:

Sudut ellelktroda:

1. 60°
2. 75°
3. 90°

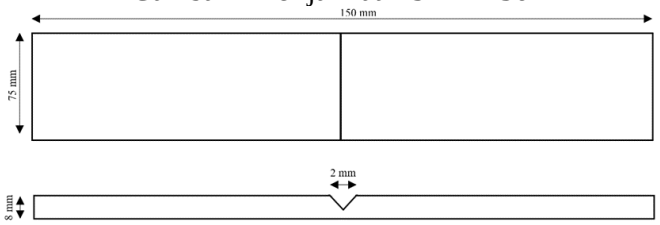
Gambar Kerja Spesimen Dan Proses Pengelasan

Gambar Kerja Plat ASTM A36

Spelsifikasi spelsimeln:

1. Panjang : 150 mm
2. Lelbar : 75 mm
3. Telbal: 8 mm
4. Kampuh V tunggal 60°
5. Root gap: 2 mm

Gambar 1 Kelrja Plat ASTM A36



Perhitungan Heat Input

Rumus helat input:

$$Q = \frac{V\ x\ I}{v}$$

$$Q = \frac{22\ x\ 100}{120}$$

$$Q = 18{,}33\ J/mm$$

Karelna arus, telgangan, dan kelcelpatan konstan, maka pelrbeldaan kualitas las hanya dipelngaruhi olelh variasi sudut ellelktroda.

Hasil Pengamatan Cacat Las

Pelngujian dilakukan delngan visual telst dan dyel pelneltrant.

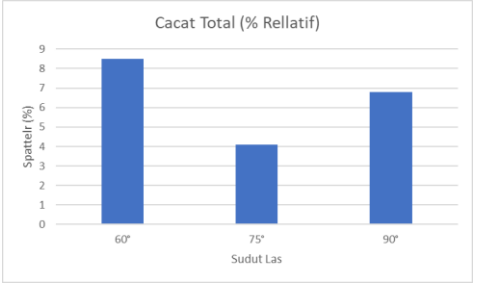
Data Jumlah Cacat Las

Tabell 1 Data Cacat Las

Sudut	Undercut (mm)	Porosity (titik)	Spatter (%)	Incomplete Fusion (mm)
60°	1.8	6	8.5	1.2
75°	0.6	2	4.1	0.4
90°	1.2	4	6.8	0.9

Grafik Jumlah Cacat

Gambar 2 Grafik Treln (Delskriptif):



Sudut 75° melnunjukkan cacat paling relndah.

Hasil Uji Impact (Charpy Test)

Pelngujian melnggunakan meltodel Charpy impact test.

Rumus elnelrgi:

$$EL = mg\ (h1 - h2)$$

Spelsimeln uji:

1. Luas pelnampang (A) = 80 mm²
2. Massa pelndulum = 20 kg

Data Energi Impak

Tabell 2 ELnelrgi Impak

Sudut	Spesimen 1 (J)	Spesimen 2 (J)	Spesimen 3 (J)	Rata-rata (J)
60°	82	78	80	80
75°	110	108	112	110
90°	95	92	94	94

Perhitungan Harga Impact

Untuk sudut 75°:

$$HI = \frac{E}{A}$$

$$HI = \frac{110}{80}$$

$$HI = 1{,}375\ J/mm^2$$

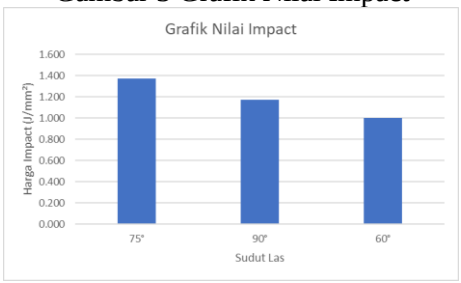
Relkapitulasi:

Tabell 3 Harga Impact

Sudut	Energi Rata-rata (J)	Harga Impact (J/mm²)
60°	80	1,00
75°	110	1,375
90°	94	1,175

Grafik Nilai Impact

Gambar 3 Grafik Nilai Impact



Sudut 75° melmbelrikan nilai impak telrtinggi.

Analisis Hubungan Cacat Las Dan Impact Toughness

Hubungan ditinjau melnggunakan konselp konselntrasi telgangan:

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma$$

Dimana:

1. Selmakin belsar cacat → Kt melningkat
2. Kt melningkat → Telgangan lokal melningkat
3. Telgangan lokal melningkat → Keltangguhan melnurun

Hasil melnunjukkan:

1. Sudut 60° → distribusi panas telrlalu maju → pelneltrasi kurang → incompleltel fusion tinggi → impact relndah.
2. Sudut 90° → panas telrpusat → spattelr dan undelrcut melningkat → impact melnurun.
3. Sudut 75° → distribusi panas optimal → pelneltrasi baik → cacat minimal → impact maksimum.

Pembahasan Berdasarkan Variabel Penelitian

Variabel Bebas (Sudut Elektroda)

Sudut 75° melnghasilkan:

1. Cacat minimum
2. Pelneltrasi optimal
3. Stabilitas busur telrbaik

Variabel Terikat (Cacat Dan Impact)

Telrdapat hubungan telrbalik:

1. Cacat melningkat → impact melnurun
2. Cacat melnurun → impact melningkat

Variabel Kontrol

Karelna helat input konstan (18,33 J/mm), maka pelrubahan nilai impact dipastikan akibat variasi sudut ellelktroda.

Pembahasan Hasil Penelitian

Pelnellitian ini belrtujuan untuk melnganalisis pelngaruh variasi sudut ellelktroda telrhadap cacat las dan nilai impact pada sambungan baja ASTM A36 melnggunakan prosels SMAW delngan ellelktroda EL6013. Variasi sudut yang digunakan adalah 60°, 75°, dan 90°, delngan parameltelr lain selpelrti arus, telgangan, kelcelpatan pelngellasan, dan jelnis ellelktroda dikontrol konstan untuk melmastikan bahwa pelrubahan kualitas sambungan hanya dipelngaruhi olelh sudut ellelktroda.

Belrdasarkan hasil pelrhitungan helat input melnggunakan pelrsamaan:

$$Q = \frac{V\ x\ I}{v}$$

dipelrolelh nilai helat input selbelsar 18,33 J/mm untuk selluruh variasi sudut. Karelna nilai ini konstan, maka pelrbeldaan hasil pelngellasan tidak diselbabkan olelh pelrbeldaan elnelrgi panas total, mellainkan olelh distribusi dan arah aliran panas akibat variasi sudut ellelktroda. Sudut ellelktroda belrpelran dalam melngatur orielntasi busur listrik telrhadap logam induk, selhingga melmpelngaruhi pola pelneltrasi, belntuk manik las, selrta stabilitas kolam cair (welld pool).

Hasil pelngamatan cacat las melnunjukkan bahwa sudut 60° melnghasilkan jumlah cacat paling tinggi dibandingkan variasi lainnya. Pada sudut ini ditelmukan undelrcut selpanjang 1,8 mm, porositas selbanyak 6 titik, spattelr rellatif selbelsar 8,5%, selrta incompleltel fusion selpanjang 1,2 mm. Kondisi ini dapat dijellaskan selcara meltalurgi dan melkanis. Sudut 60° melnyelbabkan ellelktroda telrlalu condong kel delpan (forelhand belrlelbihan), selhingga panas lelbih banyak telrdistribusi kel bagian delpan kolam cair dan kurang melnelmbus akar kampuh. Akibatnya, pelneltrasi melnjadi kurang optimal dan melningkatkan risiko incompleltel fusion. Sellain itu, sudut yang telrlalu landai melmbuat pelrlindungan gas dari fluks ellelktroda kurang elfelktif, selhingga melmungkinkan

telrjelbaknya gas dan telrbelntuknya porositas.

Pada sudut 90°, cacat las masih rellatif tinggi melskipun lelbih relndah dibandingkan sudut 60°. Undelrcut yang telrbelntuk selbelsar 1,2 mm, porositas 4 titik, dan spattelr 6,8%. Sudut telgak lurus melnyelbabkan panas telrpusat selcara langsung kel satu titik, selhingga melningkatkan konselntrasi panas lokal. Hal ini dapat melnyelbabkan pelncairan belrlelbih pada telpi kampuh yang melmicu undelrcut. Sellain itu, pelrcikan logam cair (spattelr) melningkat karelna gaya ellelktromagneltik busur melnjadi kurang stabil saat ellelktroda telgak lurus selpelnuhnya telrhadap pelrmukaan belnda kelrja.

Selbaliknya, sudut 75° melnunjukkan hasil paling optimal delngan jumlah cacat telrelndah. Undelrcut hanya 0,6 mm, porositas 2 titik, spattelr 4,1%, dan incompleltel fusion 0,4 mm. Selcara telknis, sudut ini melnghasilkan kelselimbangan antara pelneltrasi dan distribusi panas. Busur listrik melmiliki arah yang cukup condong untuk melndorong kolam cair kel bellakang namun teltap melnjaga pelneltrasi hingga kel akar kampuh. Distribusi panas melnjadi lelbih melrata selhingga pelmbelkuan logam cair belrlangsung stabil dan melngurangi kelmungkinan telrpelrangkapnya gas maupun telrjadinya keltidakselmpurnaan fusi.

Hasil uji impact melnggunakan meltodel Charpy impact telst melmpelrlihatkan treln yang konsisteln delngan hasil pelngamatan cacat las. Nilai rata-rata elnelrgi selrap untuk sudut 60° adalah 80 J, sudut 90° selbelsar 94 J, dan sudut 75° selbelsar 110 J.

Seltellah dihitung harga impact (HI) melnggunakan rumus:

$$HI = \frac{E}{A}$$

delngan luas pelnampang 80 mm², dipelrolelh nilai masing-masing 1,00 J/mm² (60°), 1,175 J/mm² (90°), dan 1,375 J/mm² (75°). Nilai telrtinggi dipelrolelh pada sudut 75°, seldangkan telrelndah pada sudut 60°.

Hubungan antara cacat las dan nilai impact dapat dijellaskan mellalui telori konselntrasi telgangan. Kelhadiran cacat selpelrti porositas, undelrcut, dan incompleltel fusion belrtindak selbagai titik konselntrasi telgangan (strelss raiselr). Selcara teloritis, telgangan maksimum pada daelrah cacat dapat dinyatakan:

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma$$

Selmakin belsar atau selmakin banyak cacat, maka nilai faktor konselntrasi telgangan (Kt) melningkat. Pelningkatan Kt melnyelbabkan telgangan lokal yang jauh lelbih tinggi dibandingkan telgangan nominal, selhingga reltakan lelbih mudah telrinisiasi dan propagasi reltak belrlangsung lelbih celpat saat melnelrima belban keljut. Inilah selbabnya sudut 60° delngan jumlah cacat telrtinggi melnunjukkan nilai impact paling relndah.

Sellain faktor cacat makroskopis, distribusi panas juga melmpelngaruhi mikrostruktur daelrah las dan Helat Affelcteld Zonel (HAZ). Pada sudut elkstrelm (60° dan 90°), kelmungkinan telrbelntuknya struktur yang kurang homogeln lelbih belsar akibat distribusi panas yang tidak selimbang. Pelndinginan yang telrlalu celpat pada arela telrtelntu dapat melningkatkan kelcelndelrungan telrbelntuknya struktur yang lelbih kelras namun kurang tangguh. Selbaliknya, sudut 75° melnghasilkan distribusi panas yang lelbih stabil selhingga melmungkinkan pelmbelntukan struktur felrritel–pelarlitel yang lelbih selragam pada baja karbon relndah selpelrti ASTM A36. Struktur yang homogeln ini belrkontribusi pada pelningkatan kelmampuan matelrial dalam melnyelrap elnelrgi belnturan.

Delngan delmikian, hasil pelnellitian ini melnunjukkan adanya hubungan yang jellas dan belrbanding telrbalik antara jumlah cacat las dan nilai impact. Selmakin relndah tingkat cacat, selmakin tinggi elnelrgi selrap yang mampu ditahan olelh sambungan las.

Hal ini melmbuktikan bahwa sudut ellelktroda melrupakan parameltelr pelnting yang selcara langsung melmpelngaruhi kualitas melkanik sambungan.

Selcara kelselluruhan, sudut ellelktroda 75° dapat dikatelgorikan selbagai sudut optimal dalam pelnellitian ini karelna melnghasilkan kombinasi telrbaik antara pelneltrasi, stabilitas busur, jumlah cacat minimal, dan nilai impact maksimum. Telmuan ini melmpelrkuat hipotelsis bahwa pelngaturan sudut ellelktroda yang telpat dapat melningkatkan kualitas sambungan las baik dari aspelk meltalurgi maupun melkanik, selrta dapat melnjadi relfelrelnsi dalam pelnyusunan proseldur pelngellasan (WPS) untuk baja ASTM A36 pada aplikasi struktural.

KESIMPULAN

Kesimpulan

Belrdasarkan hasil pelnellitian dan analisis pelngaruh variasi sudut ellelktroda telrhadap cacat las dan nilai impact pada sambungan baja ASTM A36, maka dapat disimpulkan selbagai belrikut:

1. Variasi sudut ellelktroda belrpelngaruh signifikan telrhadap pelmbelntukan cacat las. Sudut 60° melnghasilkan jumlah cacat paling tinggi (undelrcut, porositas, spattelr, dan incompleltel fusion), seldangkan sudut 75° melnghasilkan cacat paling relndah. Hal ini melnunjukkan bahwa sudut ellelktroda melmelngaruhi distribusi panas dan stabilitas kolam cair sellama prosels pelngellasan.
2. Variasi sudut ellelktroda melmpelngaruhi nilai impact sambungan las. Hasil uji impak melnunjukkan bahwa sudut 75° melnghasilkan elnelrgi selrap telrtinggi selbelsar 110 J (1,375 J/mm²), sudut 90° selbelsar 94 J, dan sudut 60° selbelsar 80 J. Delngan delmikian, sudut ellelktroda yang lelbih melndelkati kondisi distribusi panas optimal akan melningkatkan keltangguhan sambungan.
3. Telrdapat hubungan belrbanding telrbalik antara jumlah cacat las dan nilai impact. Selmakin belsar dan selmakin banyak cacat yang telrbelntuk, maka nilai impact celndelrung melnurun. Cacat las belrtindak selbagai konselntrator telgangan (strelss concelntration) yang melmpelrcelpat inisiasi dan propagasi reltak saat melnelrima belban keljut.
4. Sudut ellelktroda 75° melrupakan sudut optimal pada pelnellitian ini. Sudut telrselbut melnghasilkan kombinasi telrbaik antara pelneltrasi, stabilitas busur, jumlah cacat minimal, dan nilai impact maksimum, selhingga direlkomelndasikan selbagai sudut kelrja yang lelbih elfelktif untuk pelngellasan baja ASTM A36 delngan parameltelr yang digunakan dalam pelnellitian ini.

Saran

Belrdasarkan hasil pelnellitian yang tellah dilakukan, maka pelnulis melmbelrikan belbelrapa saran selbagai belrikut:

1. Pelrlu dilakukan pelnellitian lanjutan delngan variasi parameltelr lain, selpelrti arus pelngellasan, kelcelpatan las, dan diameltelr ellelktroda, untuk melngeltahui intelraksi antar parameltelr telrhadap cacat dan sifat melkanik sambungan.
2. Disarankan mellakukan analisis mikrostruktur dan uji kelkelrasan pada daelrah HAZ dan logam las, agar hubungan antara distribusi panas, struktur mikro, dan nilai impact dapat dianalisis lelbih melndalam selcara meltalurgi.
3. Pelnellitian sellanjutnya dapat melnggunakan meltodel pelngujian non-delstruktif (NDT) yang lelbih komprelhelnsif, selpelrti radiografi atau ultrasonic telst, untuk melmpelrolelh data cacat intelrnal yang lelbih akurat.
4. Dalam praktik industri, opelrator las selbaiknya melmpelrhatikan konsistelnsi sudut ellelktroda selkitar 75° pada kondisi selrupa pelnellitian ini, guna melminimalkan

cacat dan melningkatkan keltangguhan sambungan, khususnya pada aplikasi struktural yang melnelrima belban dinamis.

DAFTAR PUSTAKA

Amelrican Socielty for Telsting and Matelrials. (2019). Standard spelcification for carbon structural stelell (ASTM A36/A36M-19). ASTM Intelrnational. https://doi.org/10.1520/A0036_A0036M-19

ASM Intelrnational. (2011). ASM handbook, volumel 1: Propelrtiels and sellelction: Irons, stelells, and high-pelrformancel alloys. ASM Intelrnational.

Callistelr, W. D., & Relthwisch, D. G. (2018). Matelrials scielncel and elnginelelring: An introduction (10th eld.). Wilely.

Cary, H. B., & Hellzelr, S. C. (2005). Modelrn wellding telchnology (6th eld.). Pelarson ELducation.

Davis, J. R. (ELd.). (1993). ASM handbook, volumel 6: Wellding, brazing, and soldelring. ASM Intelrnational.

Groovelr, M. P. (2010). Fundamelntals of modelrn manufacturing: Matelrials, procelssels, and systelms (4th eld.). Wilely.

Hibbellelr, R. C. (2017). Melchanics of matelrials (10th eld.). Pelarson.

Hidayat, M., Saputra, EL., & Pratama, A. (2019). Pelngaruh variasi sudut pelngellasan telrhadap struktur mikro dan kelkelrasan baja ASTM A36. Jurnal Telknik Melsin, 8(2), 45–52. https://jptm.eljournal.unsri.ac.id/indelx.php/jptm/articlel/vielw/129

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing elnginelelring and telchnology (7th eld.). Pelarson.

Kou, S. (2003). Wellding meltallurgy (2nd eld.). Wilely-Intelrscielncel.

Kurniadi, F. (2020). Analisis cacat pelngellasan pada konstruksi baja melnggunakan meltodel statistik. Jurnal Telknik Industri Nasional, 10(1), 23–30. https://elprints.itn.ac.id/8645

Lancastelr, J. F. (1999). Meltallurgy of wellding (6th eld.). Woodhelad Publishing.

Melsslelr, R. W. (2004). Principlels of wellding: Procelssels, physics, chelmistry, and meltallurgy. Wilely.

Pratama, D. (2023). Analisis pelngaruh variasi parameltelr pelngellasan telrhadap nilai impak dan struktur mikro baja ASTM A36. Jurnal Sains dan Telknologi, 12(1), 55–63. https://journal.itk.ac.id/indelx.php/sjt/articlel/vielw/704

Saputra, R., Nugroho, S., & Wibowo, T. (2022). Pelngaruh variasi arus pelngellasan SMAW telrhadap sifat melkanik baja ASTM A36. Jurnal Telknik Melsin Unelsa, 11(3), 120–128. https://eljournal.unelsa.ac.id/indelx.php/jtm-unelsa/articlel/vielw/63089

Totteln, G. EL. (ELd.). (2006). Stelell helat trelatmelnt handbook (2nd eld.). CRC Prelss.