

VARIASI KEMIRINGAN SUDUT PENGELASAN SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIS MATERIAL BAJA SS400

Nurmala Shanti Dera¹, Onesimus Kevin Saputro¹, Rahmad Hidayat Boli¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gorontalo

Jln. Aa Wahab No 247, Limboto, Gorontalo 96211.

Email. Santydera@gmail.com

Abstrak

Baja SS400 merupakan material yang banyak digunakan di bidang industri, baik manufaktur maupun konstruksi, karena memiliki sifat mekanis yang baik, seperti kekuatan tarik dan keuletan. Kualitas sambungan las baja SS400 dipengaruhi oleh parameter pengelasan, di antaranya adalah variasi sudut kemiringan elektroda. Pengembangan teknologi di bidang konstruksi yang semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena memiliki peranan yang sangat penting. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi kemiringan elektroda (30°, 45°, dan 60°) terhadap sifat mekanis, khususnya tegangan tarik maksimum (UTS) dan modulus elastisitas pada baja SS400 yang dilas menggunakan SMAW. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi sudut kemiringan elektroda yang memberikan hasil terbaik dalam hal kekuatan tarik dan stabilitas mekanis sambungan las. Dengan mengetahui hubungan antara sudut elektroda dan sifat mekanis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan bagi kegiatan pengelasan baja SS400 untuk dapat diimplementasikan di dunia industri yang terus berkembang. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengujian eksperimen di laboratorium. Penelitian ini memvariasikan kemiringan elektroda, yaitu 30°, 45°, dan 60°, menggunakan mesin las SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Selanjutnya, pengujian sifat mekanis dilakukan menggunakan pengujian tarik baja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut kemiringan elektroda 60° menghasilkan sifat mekanis yang terbaik, dengan nilai tegangan tarik maksimum mencapai 411,9 MPa. Hal ini disebabkan oleh penetrasi yang optimal dan distribusi panas yang merata. Nilai tegangan terendah terdapat pada sudut kemiringan elektroda 30°, dengan nilai tegangan 376,5 MPa, sementara nilai tegangan tarik menengah terdapat pada sudut kemiringan 45°, dengan nilai tegangan 382,90 MPa. Selanjutnya, nilai rata-rata regangan tertinggi terdapat pada sudut kemiringan 30° dan 60°, dengan nilai regangan masing-masing 16,67%. Nilai modulus elastisitas tertinggi terdapat pada pengelasan dengan sudut kemiringan 30°, yaitu sebesar 140.053 MPa. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam keilmuan pengelasan, khususnya dalam memahami pengaruh sudut kemiringan elektroda terhadap sifat mekanis baja SS400. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan atau dasar dalam pengelasan komponen material baja untuk diaplikasikan pada dunia industri. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan peningkatan efisiensi proses pengelasan, tetapi juga dapat memastikan kualitas sambungan las yang lebih baik, handal, serta aman digunakan.

Kata kunci : Baja SS 400; tegangan; regangan; SMAW; Pengujian; elektroda;

PENDAHULUAN

Pengembangan teknologi di bidang konstruksi yang semakin maju tidak dapat dipisahkan dari pengelasan karena memiliki peranan yang sangat penting. Banyak metode klasifikasi pengelasan digunakan hingga saat ini. Secara konvensional, klasifikasi tersebut dapat dibagi menjadi dua, yaitu berdasarkan energi yang digunakan dan berdasarkan metode pengelasan. Metode yang sering digunakan adalah Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) (Umartono et al., 2018).

Pada tahun 1921, pengelasan mulai digunakan sebagai metode utama dalam membangun kapal laut, ditandai dengan konstruksi kapal pertama yang sepenuhnya mengandalkan sambungan las. Namun, pada dekade 1940-an, muncul permasalahan serius berupa kegagalan kekuatan pada sejumlah jembatan dan kapal yang sebelumnya menggunakan pengelasan. Penanganan cepat diperlukan untuk mengatasi permasalahan tersebut, sehingga mendorong banyak kemajuan baru dalam teknologi pengelasan, termasuk pada sifat dan proses pengelasan baja (Wirjosutomo & Okumura, 2000).

Dalam praktiknya, di workshop fabrikasi sering kali ditemukan kecacatan dalam proses pengelasan, seperti kerusakan pada material logam. Hal ini terjadi akibat penerapan metode pengelasan yang kurang sempurna. Walaupun pengelasan terlihat sederhana, proses ini memiliki banyak tantangan teknis yang membutuhkan pemecahan masalah beragam. Oleh karena itu, pengetahuan tentang pengelasan menjadi aspek yang sangat penting, terutama dalam perancangan struktur bangunan dan mesin yang melibatkan sambungan las. Metode pengelasan yang digunakan harus diperhitungkan secara matang (Wiryosutomo & Okumura, 2000).

Pengelasan merupakan metode penyambungan logam yang sering digunakan dalam industri manufaktur, termasuk pada baja SS400. Baja SS400 merupakan baja struktural karbon rendah dengan kadar karbon sekitar 0,19%, sehingga tidak dapat dikeraskan secara langsung tanpa penambahan karbon (Kalpakjian & Schmid, 2018). Baja ini sering digunakan dalam konstruksi, alat berat, dan komponen otomotif karena memiliki kekuatan tarik dan daktilitas yang baik. Kualitas sambungan las pada baja SS400 sangat dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti sudut kemiringan elektroda dan sudut pengelasan (Murti, 2015).

Menurut *Biro Klasifikasi Indonesia* (BKI), baja karbon rendah SS400 harus memenuhi standar kekuatan tarik (tensile strength) sebesar 400–560 MPa (*Rules for the Classification and Construction*, 2020). Variasi sudut elektroda memengaruhi distribusi panas dan bentuk daerah las. Kemiringan elektroda yang tidak tepat dapat menyebabkan cacat las, seperti porositas, retakan, atau penetrasi yang tidak memadai. Selain itu, distribusi panas yang tidak merata dapat memengaruhi struktur mikro pada *heat-affected zone* (HAZ), yang berdampak pada perubahan sifat mekanis, seperti kekuatan tarik dan kekerasan (Pangestu & Sulistyio, 2019).

Pengujian tarik dilakukan untuk menentukan sifat mekanis material, seperti kekuatan tarik, tegangan luluh, dan regangan. Data gaya (force) dan perubahan panjang (elongation) diukur, dan hasilnya ditampilkan dalam grafik tegangan terhadap regangan (Dieter, 1986). Grafik ini mencakup zona

elastis sesuai hukum Hooke, deformasi permanen pada zona plastis, dan tegangan maksimum (UTS) sebelum patah.

Naubnome (2020) menyimpulkan bahwa variasi ketebalan lapisan karbon fiber pada baja SS400 memengaruhi nilai *yield strength* lebih signifikan dibandingkan *tensile strength*. Yohanes et al. (2018) menunjukkan bahwa variasi sudut pengelasan SMAW (60°, 65°, dan 75°) memengaruhi kekuatan tarik, dengan kekuatan tarik tertinggi pada 571,35 MPa. Rouhollah et al. (2014) menemukan bahwa sudut alur berbeda dalam pengelasan SMAW memengaruhi kekuatan luluh dan energi benturan, dengan sudut 60° menghasilkan kekuatan luluh yang lebih tinggi dibandingkan logam dasar. Shamini et al. (2021) menyatakan bahwa sudut pengelasan yang lebih besar cenderung menurunkan kekuatan tarik.

Menurut Kalpakjian dan Schmid (2018), parameter pengelasan, seperti sudut kemiringan elektroda, memengaruhi distribusi panas, penetrasi, dan struktur mikro di zona las. Kemiringan yang kurang tepat dapat menyebabkan cacat las yang menurunkan sifat mekanis sambungan (Murti, 2015).

Penelitian ini bertujuan mengeksplorasi pengaruh variasi sudut elektroda terhadap kekuatan tarik maksimum dan modulus elastisitas baja SS400. Dengan menggunakan sudut kemiringan elektroda 30°, 45°, dan 60°, penelitian ini memberikan wawasan baru tentang bagaimana parameter ini dapat dioptimalkan untuk aplikasi manufaktur dan konstruksi.

Keunikan penelitian ini terletak pada pendekatan sistematis untuk mengkaji sudut elektroda sebagai parameter utama dalam pengelasan. Penelitian ini bertujuan membantu industri meningkatkan efisiensi proses pengelasan, mengurangi cacat las, dan menghasilkan sambungan yang kuat sesuai standar. Baja SS400, yang banyak digunakan untuk rangka baja dan pelat struktural, dapat dioptimalkan dengan memilih sudut elektroda yang tepat. Penelitian ini juga relevan sebagai panduan pelatihan tenaga kerja di bidang pengelasan manual metode SMAW.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menggunakan metode eksperimental yaitu dengan melakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan hasil

yang sesuai dengan yang direncanakan. Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Gorontalo, Adapun material yang digunakan yaitu material baja SS400, arang ampas tebu sebagai media padat caburizing dan SMAW sebagai alat untuk digunakan pada proses pengelasan dan oven untuk tempat pembakaran.

Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding) adalah salah satu metode pengelasan manual yang paling umum digunakan. Dalam proses ini, busur listrik yang terjadi antara elektroda terlapis dan material kerja menghasilkan panas yang cukup untuk mencairkan elektroda dan logam dasar. Proses ini sangat cocok untuk baja SS400, yang merupakan baja karbon rendah dengan sifat mekanis yang baik (Nugroho, 2019). Parameter penelitian yang digunakan adalah variable bebas yaitu variasi sudut kemiringan elektroda (30°, 45° dan 60°), variabel terikat adalah analisis sifat mekanis yang dilakukan menggunakan pengujian tarik, variable control yaitu arus las, jenis elektroda, kecepatan las dan jenis material (SS400). Selanjutnya untuk pengambilan data menggunakan metode eksperimen yang kemudian data di masukan ke dalam table yang telah disiapkan, lalu dilakukan pengolahan data untuk di analisis hasil dari penelitian ini. Untuk pengujian sifat mekanis menggunakan alat uji Tarik (tensile strage).

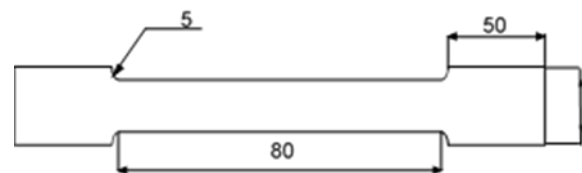


Gambar 1. Proses pengelasan SMAW

Proses pengelasan dimulai dengan persiapan material dan peralatan yang meliputi penggunaan pelat baja SS400 dengan dimensi 200 mm × 100 mm × 10 mm. Elektroda E6013 berdiameter 3,2 mm dipilih karena sesuai untuk baja karbon rendah, dan mesin las SMAW dengan pengaturan arus DC (Direct Current) atau AC (Alternating Current) digunakan. Sambungan disiapkan

dengan tipe kampuh V pada sudut tertentu untuk memastikan penetrasi optimal.

Variasi sudut elektroda dilakukan pada 30°, 45°, dan 60° terhadap bidang pengelasan untuk mengevaluasi pengaruh distribusi panas terhadap penetrasi dan sifat mekanis sambungan. Sudut ini dijaga tetap konsisten selama proses pengelasan menggunakan alat bantu atau marking pada jig. Proses pengelasan dilakukan dengan pengaturan arus las antara 100–120 A, sesuai dengan ketebalan material dan diameter elektroda. Preheating diterapkan pada baja SS400 dengan suhu 100–150°C untuk mencegah retak akibat pendinginan cepat. Pengelasan dilakukan secara bertahap dengan kecepatan yang konsisten, sementara untuk material yang lebih tebal, digunakan metode las lapis ganda (multi-pass welding) untuk memastikan kualitas sambungan.



Gambar 2. Dimensi Spesimen Uji Tarik (ASTM E8)

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan sambungan las melalui analisis sifat mekanis, seperti kekuatan tarik maksimum, tegangan luluh, dan elongasi. Variasi sudut elektroda (30°, 45°, dan 60°) memberikan gambaran pengaruh distribusi panas dan geometri sambungan terhadap performa las. Sebelum pengujian, spesimen yang telah dilas dibentuk mengikuti standar ASTM E8 dengan dimensi panjang 200 mm, lebar 25 mm, dan tebal 5 mm untuk memastikan validitas hasil uji tarik (lihat gambar 2). Dengan langkah-langkah ini, penelitian dilakukan secara sistematis untuk menghasilkan data akurat mengenai pengaruh variasi sudut elektroda pada kualitas sambungan las.

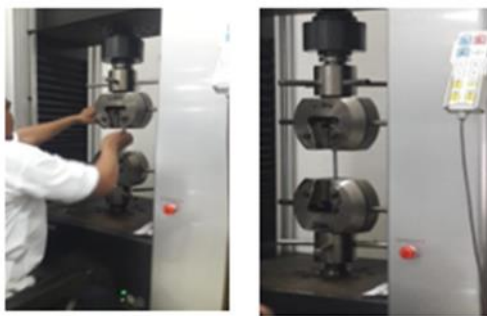
Setelah proses pengelasan selesai, material dilas dipotong menjadi spesimen uji tarik yang mengikuti standar ASTM E8/E8M atau ISO 6892. Spesimen dirancang dengan dimensi panjang total 100–150 mm, panjang bagian uji (gage length) 50 mm, lebar bagian uji 10 mm, dan ketebalan yang sama dengan material awal. Zona las ditempatkan tepat di tengah spesimen untuk memastikan evaluasi

langsung terhadap kekuatan sambungan las (lihat gambar 3).



Gambar 3. specimen sesudah dibentuk

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik berkapasitas 100 kN. Sebelum dimulai, mesin dikalibrasi untuk menjamin hasil yang akurat, dan extensometer digunakan untuk mengukur regangan dengan presisi tinggi. Spesimen dipasang pada penjepit mesin dengan posisi simetris, memastikan distribusi gaya yang merata selama pengujian. Kecepatan penarikan diatur sesuai standar, yaitu 2–5 mm/menit. Proses berlangsung hingga spesimen mengalami fraktur, dengan parameter seperti gaya tarik maksimum, tegangan luluh, dan regangan maksimum dicatat secara otomatis.



Gambar 4. Proses pengujian Tarik material

Hasil pengujian dianalisis berdasarkan tiga parameter utama: tegangan maksimum (UTS) yang menunjukkan tegangan tertinggi sebelum patahan, tegangan luluh (yield strength) yang menandai awal deformasi plastis, dan elongasi yang mengukur persentase perubahan panjang setelah fraktur. Data ini digunakan untuk membandingkan variasi sudut kemiringan elektroda (30°, 45°, dan 60°) guna menentukan parameter pengelasan terbaik (lihat gambar 4).

Setelah pengujian, zona patahan diperiksa untuk menentukan lokasi kegagalan,

apakah terjadi pada logam las, HAZ (Heat Affected Zone), atau logam dasar. Mikroskop optik atau SEM digunakan untuk analisis mendalam mengenai mode patahan, seperti ductile, brittle, atau kombinasi keduanya. Proses pengujian tarik dilaksanakan di Laboratorium Ilmu Logam Universitas Kristen Indonesia Paulus Makassar untuk mengevaluasi kekuatan material dan karakteristiknya berdasarkan hasil sambungan las.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji tarik baja SS400 setelah pengelasan dengan variasi sudut kemiringan elektroda 30°, 45°, dan 60° menunjukkan adanya perbedaan dalam kekuatan tarik (UTS), tegangan luluh (σ_y), dan elongasi (E). Perbedaan ini disebabkan oleh distribusi panas dan penetrasi las yang dipengaruhi oleh sudut kemiringan elektroda. Pengaruh sudut kemiringan elektroda terhadap sifat mekanis dapat dilihat melalui distribusi panas dan kedalaman penetrasi las. Pada sudut 60°, distribusi panas lebih merata, menghasilkan struktur mikro yang homogen pada zona las dan HAZ (Heat Affected Zone). Temuan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Murti (2015), yaitu distribusi panas yang optimal dapat meningkatkan kekuatan pada sambungan las. Sudut 30° menghasilkan penetrasi yang lebih dalam, akan tetapi panas tidak terdistribusi secara merata sehingga mengakibatkan struktur mikro yang keras dan rapuh di daerah HAZ. Sebaliknya di sudut 45° memberikan distribusi yang seragam, tetapi penetrasi yang dangkal sehingga mengurangi kekuatan sambungan las. Implikasi dari temuan pada penelitian ini adalah pentingnya dalam menetapkan sudut kemiringan elektroda yang sesuai untuk memastikan kekuatan sambungan las. Pada aplikasi di bidang industry, sudut 45° dapat direkomendasikan untuk pengelasan baja SS400 karena dapat memberikan kombinasi yang baik antara kekuatan dan stabilitas mekanis. Huda dan Purnomo (2020) menyatakan bahwa variasi parameter pengelasan dapat memberikan pengaruh secara signifikan terhadap sifat mekanis baja karbon rendah.

Variasi kemiringan elektroda yang digunakan pada proses pengelasan baja SS400 adalah 30°, 45° dan 60°. Hasil yang

didapatkan dari pengujian tarik adalah nilai tegangan, regangan, dan modulus elastisitas, yang dapat digunakan untuk mengetahui sifat mekanis dari material baja SS 400 setelah menerima perlakuan.

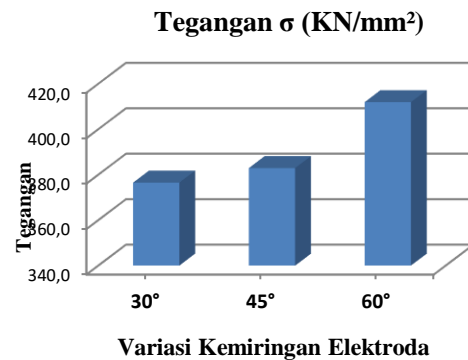
Dari hasil pengujian tarik specimen pada mesin uji tarik (tensile test) akan di dapatkan data dan akan diolah untuk mendapatkan nilai tegangan maksimum, regangan dan modulus elastisitas.



Gambar 5. foto specimen baja SS 400 setelah pengujian Tarik

Nilai Tegangan digunakan untuk melihat seberapa kuat specimen tersebut menahan beban yang diberikan. Nilai Tegangan ini merupakan perbandingan antara beban (F) yang diberikan terhadap luas penampang (A). sehingganya untuk mengetahui kekuatan material baja setelah diberikan perlakuan dengan variasi kemiringan elektroda 30°, 45° dan 60° Maka dapat di ketahui specimen yang kuat menahan beban saat di uji tarik seperti grafik pada gambar 6.

Dari grafik pada gambar 6 menunjukkan hubungan antara nilai tegangan pada variasi sudut kemiringan elektroda 30°, 45° dan 60° terlihat sudut kemiringan elektroda 30° dengan nilai $\sigma = 376,5$ Mpa memiliki nilai tegangan terendah, dan sudut kemiringan elektroda 45° dengan nilai $\sigma = 382,90$ MPa dengan nilai tegangan menengah dan nilai tegangan tertinggi pada sudut kemiringan 60° dengan nilai $\sigma = 411,9$ MPa.



Gambar 6. Grafik nilai tegangan uji tarik pada specimen variasi kemiringan 30°, 45° dan 60°.

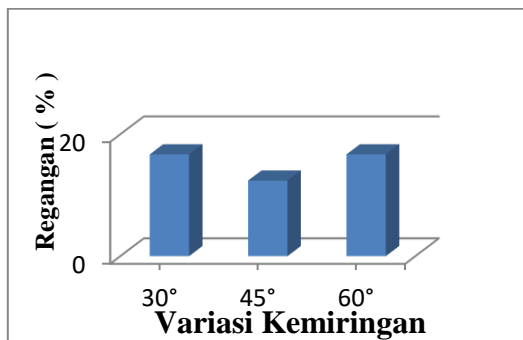
Pada sudut elektroda 30°, penetrasi las lebih dalam tetapi distribusi panas kurang merata tetapi distribusi panas yang tidak merata menyebabkan struktur HAZ lebih keras dan rentan terhadap kegagalan, sementara pada sudut 60° Sudut ini menghasilkan penetrasi yang optimal dan distribusi panas yang lebih merata, sehingga struktur mikro sambungan las menjadi lebih seimbang antara kekuatan dan daktilitas.

Tabel 1. Nilai tegangan tarik pada variasi kemiringan 30°, 45° dan 60°.

Sudut Pengelasan	Beban (N)	Luas Penampang (Ao) (mm²)	Tegangan (MPa)	Beban Rata-Rata (N)	Tegangan Rata-Rata (MPa)
30°	19,539	50	390.78	18,826.7	376.53
	19,693	50	393.86		
	17,248	50	344.96		
45°	19,061	50	381.22	19,145.3	382.90
	16,638	50	332.76		
	21,737	50	434.74		
60°	20,716	50	414.32	20,609.7	411.93
	21,574	50	431.48		
	19,539	50	390.78		

Pada Tabel 1, hasil analisis keseluruhan masing-masing specimen pada pengujian tegangan tarik menunjukkan bahwa nilai tertinggi untuk tegangan tarik terdapat pada specimen dengan pengelasan sudut 60°, dengan beban maksimum sebesar 20.609,7 N dan nilai tegangan tarik $\sigma = 411,933$ MPa \sigma = 411,933 \,

\text{MPa}. Dari hasil penyajian data pada Tabel 2, tegangan tarik tertinggi pada pengelasan baja SS400 dengan metode carburizing juga ditemukan pada sudut elektroda dengan kemiringan 60°. Tegangan tarik maksimum (*Ultimate Tensile Strength*, UTS) sangat dipengaruhi oleh sudut kemiringan elektroda, karena terkait erat dengan distribusi panas dan penetrasi las (Murti, 2015).



Gambar 7. Grafik Hubungan Antara Nilai Regangan Tarik Pengelasan

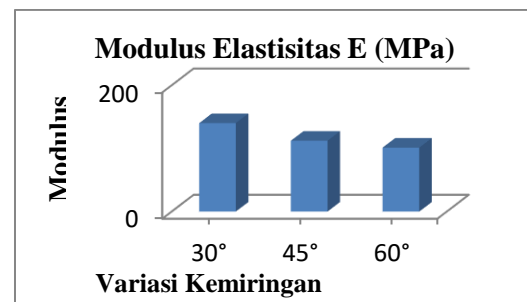
Variasi sudut kemiringan elektroda pada pengelasan SMAW memengaruhi distribusi panas dan penetrasi las, yang berdampak langsung pada sifat regangan tarik material. Regangan tarik (*elongation*, EE) menunjukkan kemampuan material untuk meregang sebelum patah dan sangat bergantung pada struktur mikro yang terbentuk setelah pengelasan. Untuk menghitung perubahan panjang spesimen atau nilai regangan ketika dilakukan pengujian tarik, digunakan metode pengukuran panjang spesimen setelah pengujian (LL) dikurangi panjang spesimen awal (LOL₀). Perubahan panjang ini mencerminkan kemampuan spesimen untuk menahan deformasi sebelum terjadi kegagalan.

Hasil analisis pengujian tarik disajikan dalam bentuk grafik, seperti pada Gambar 7. Gambar tersebut menunjukkan hubungan antara nilai regangan dengan variasi sudut kemiringan elektroda 30°, 45°, dan 60°. Nilai rata-rata regangan tertinggi ditemukan pada sudut kemiringan elektroda 30° dan 60°, yaitu $e=16,67\%$, sedangkan nilai regangan terendah terdapat pada sudut kemiringan 45°, yaitu $e=12,37\%$.

Tabel 2 Nilai regangan tarik pada pengelasan dengan variasi elektroda 30°, 45° dan 60°.

N o	Spesimen	Panjang Akhir (Li) (mm)	Panjang Awal (Lo) (mm)	Regangan (%)	Regangan Rata-Rata (%)
1	Pengelasan 30°	96.00	80	20.00	16.67
		97.00	80	21.25	
		87.00	80	8.75	
2	Pengelasan 45°	87.00	80	8.75	12.37
		90.00	80	12.10	
		93.00	80	16.25	
3	Pengelasan 60°	93.00	80	16.25	16.67
		94.00	80	17.50	
		93.00	80	16.25	

Dari penyajian data pada tabel 2 diatas menunjukkan Regangan keseluruhan Spesimen pengelasan dengan variasi kemiringan elektroda 30°, 45° dan 60°, diperoleh nilai Regangan tertinggi pada Spesimen pengelasan 30° pada specimen 2 dengan nilai regangan $e=21.25\%$.



Gambar 8. Grafik pengujian tarik specimen pengelasan kemiringan 30°, 45° dan 60°

Pada Gambar 8, grafik menunjukkan bahwa nilai rata-rata regangan tertinggi terdapat pada pengelasan dengan kemiringan elektroda 30° dan 60°, yaitu $e=16,67\%$. Sebaliknya, nilai regangan terendah ditemukan pada pengelasan dengan kemiringan elektroda 45°, yaitu $e=12,37\%$. Analisis grafik menunjukkan tren yang menarik, di mana regangan tarik material meningkat signifikan pada sudut kemiringan 30° dan 60°, tetapi menurun tajam pada sudut 45°. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi panas dan penetrasi yang dihasilkan pada sudut 45° tidak optimal, yang berpotensi menyebabkan struktur mikro yang kurang homogen di zona las. Visualisasi diagram

batang menegaskan hasil ini, dengan sudut 30° dan 60° memiliki batang tertinggi, sedangkan sudut 45° memiliki batang terendah, memberikan perbandingan visual yang jelas antar variasi sudut.

Gambar 8 juga menunjukkan hubungan antara nilai modulus elastisitas pada pengelasan dengan variasi kemiringan elektroda 30°, 45°, dan 60°. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai rata-rata modulus elastisitas tertinggi terdapat pada pengelasan dengan sudut kemiringan elektroda 30°, yaitu $E = 140,053 \text{ MPa}$. Distribusi panas yang merata pada sudut ini menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan homogen, yang meningkatkan modulus elastisitas material. Sebaliknya, nilai modulus elastisitas terendah ditemukan pada sudut 60°, yaitu $E = 101,221 \text{ MPa}$. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun sudut 60° menghasilkan tegangan tarik maksimum, struktur mikro di zona las lebih cenderung kaku, yang mengurangi kemampuan material untuk merespons deformasi elastis.

Tabel 3 mendukung hasil ini, di mana nilai rata-rata modulus elastisitas tertinggi ditemukan pada pengelasan dengan sudut 30° dan nilai terendah pada sudut 60°. Temuan ini menunjukkan bahwa pada baja SS400, pengelasan dengan sudut kemiringan elektroda 60° menghasilkan sifat mekanis yang lebih kaku dibandingkan dengan sudut lainnya. Kekakuan ini dapat menjadi keuntungan dalam aplikasi tertentu yang membutuhkan ketahanan terhadap deformasi, tetapi dapat menjadi kelemahan jika material memerlukan fleksibilitas.

Kesimpulan dari hasil analisis menunjukkan bahwa sudut elektroda sangat memengaruhi kualitas pengelasan. Sudut 60° menghasilkan tegangan tarik maksimum sebesar $\sigma = 411,93 \text{ MPa}$, yang memenuhi standar BKI untuk baja karbon rendah SS400. Namun, sudut 30° memberikan modulus elastisitas tertinggi, yang mengindikasikan stabilitas elastis yang lebih baik. Sudut elektroda yang optimal harus dipilih berdasarkan kebutuhan spesifik aplikasi: apakah mengutamakan kekuatan tarik maksimum atau stabilitas elastis material.

Analisis ini juga menyoroti pentingnya kontrol parameter pengelasan dalam proses SMAW. Sudut elektroda yang terlalu besar atau terlalu kecil dapat menyebabkan cacat, seperti porositas, retakan, atau penetrasi yang tidak memadai. Oleh karena itu, pertimbangan sudut kemiringan elektroda yang cermat dan sesuai dengan standar sangat penting untuk memastikan kualitas dan performa sambungan las yang optimal (Bukhori et al., 2023).

Tabel 3. Nilai modulus elastisitas pada pengelasan dengan variasi elektroda 30°, 45° dan 60°.

Specimen	Tegangan (Mpa)	Regangan (%)	Modulus Elastisitas (σ)	Rata-rata Modulus Elastisitas
Pengelasan 30°	1 390.780	20.00	195.390	140.053 MPa
	2 393.860	21.25	185.345	
	3 344.960	8.75	39.424	
Pengelasan 45°	1 381.220	8.75	43.568	112.176 MPa
	2 332.760	12.10	266.208	
	3 434.740	16.25	26.753	
Pengelasan 60°	1 414.320	16.25	254.966	101.221 MPa
	2 431.480	17.50	24.650	
	3 390.000	16.25	24.048	

Penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam menyediakan data empiris yang dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas proses pengelasan di bidang industry baik manufaktur maupun konstruksi, khususnya dapat diaplikasikan pada penggunaan alat berat yang memerlukan standar kekuatan tinggi. Dengan memahami pengaruh sudut kemiringan elektroda, pada praktisi di bidang industry dapat mengoptimalkan parameter pengelasan untuk menghasilkan kualitas dan kekuatan sambungan las yang lebih efisien dan handal dalam penggunaannya.

PENUTUP

Kesimpulan

Hubungan antara sudut kemiringan elektroda dan tegangan tarik pada pengelasan SMAW material SS400 dipengaruhi oleh distribusi panas dan penetrasi las. Sudut elektroda 60° memberikan hasil terbaik dalam

hal tegangan tarik maksimum (UTS), tegangan luluh, dan elongasi karena distribusi panas yang merata dan penetrasi optimal. Sudut elektroda 30° menghasilkan modulus elastisitas tertinggi, meskipun sifat mekanis lainnya lebih rendah akibat struktur mikro yang terlalu keras di zona HAZ. Sementara itu, sudut elektroda 45° menunjukkan hasil menengah, dengan penetrasi yang dangkal dan kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan sudut 60°.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sudut elektroda 60° adalah yang paling optimal untuk pengelasan baja SS400, dengan nilai tegangan tarik sebesar 411,93 MPa yang sesuai dengan standar BKI (*Biro Klasifikasi Indonesia*). Pemilihan sudut elektroda harus disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi untuk memastikan kualitas dan performa sambungan las.

DAFTAR PUSTAKA

- Agus, S. U., & Danyirawan. (2018). Analisa pengaruh perbedaan metode pengelasan SMAW dan GTAW terhadap sifat mekanis material HG 30. Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Gresik, 7(2), 131–140.
- American Welding Society (AWS). (2020). *Welding Handbook* (9th ed.). Miami, FL: AWS.
- Ahmad, B., Harahap, M. R., & Napid, S. (2023). The effect of variation of welding camp on the strength of the arc joint welding sheltered metal arc welding (SMAW) on Steel 37.
- Dieter, G. E. (1986). *Mechanical Metallurgy* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Huda, T. A., & Purnomo, H. (2020). Studi pengaruh variasi sudut elektroda terhadap kekuatan tarik hasil las SMAW pada baja karbon rendah. *Jurnal Teknik Mesin dan Material*, 8(2), 45–52.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2018). *Manufacturing Engineering and Technology* (8th ed.). Pearson.
- Murti, B. S. (2015). Pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanis baja karbon rendah. *Jurnal Teknik Mesin*, 3(2), 15–23.
- Nugroho, S. (2019). Analisis distribusi panas pada pengelasan SMAW dengan variasi sudut elektroda. *Jurnal Teknik Pengelasan*, 6(1), 32–40.
- Pangestu, R. H., & Sulisty, J. P. (2019). Pengaruh sudut elektroda terhadap kekuatan tarik sambungan las baja karbon rendah. *Jurnal Teknik Pengelasan*, 7(1), 25–30.
- Rouhollah, M. P., Peyman, S., & Saiedeh, S. (2014). Groove angles influence on mechanical and microstructural properties of P460N steel in SMAW.
- Ridwan, R., Kadir, A., & Aminur, A. (2022). Analisa pengaruh kuat arus terhadap kekuatan tarik bending sambungan las kampuh V menggunakan las SMAW dengan elektroda E6013 pada pengelasan baja karbon rendah. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Teknik Mesin*.
- Subagyo, P., & Supriyadi, A. (2019). Analisis hasil uji tarik baja SS400 setelah pengelasan SMAW. *Jurnal Rekayasa Material dan Teknik*, 7(1), 15–20.
- Shamini, J., Walisijiang, T., Gan, J. H., & Teo, H. (2021). Optimization of tensile strength in automated shielded metal arc welding using Taguchi technique.
- Wirjosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknik Pengelasan Logam* (Cet. ke-8). Jakarta: Pradyaparamita.
- Yohanes, N., & Sianipar, A. M. (2018). Experimental effect of angle variation and speed welding filler using vertical sliding system in SMAW welding. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace*, 59(1).