

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini disusun untuk memberikan landasan teoretis sebagai dasar analisis penelitian mengenai pengaruh variasi elektroda terhadap kekuatan tarik, tekuk, dan struktur mikro pada pengelasan logam tidak sejenis (*dissimilar metal welding*) baja SS400 dan SS304. Tinjauan pustaka ini menyajikan konsep, definisi, teori, serta hasil studi terdahulu yang relevan untuk membangun kerangka berpikir yang komprehensif dan terstruktur. Ruang lingkup pembahasan mencakup beberapa konsep utama, yaitu pengelasan beda logam (*dissimilar metal welding*), karakteristik material SS400 dan SS304, mekanisme pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), fungsi dan spesifikasi variasi elektroda (E308, E309L, dan E312), pengujian sifat mekanis dan metalurgi (uji tarik, uji tekuk, serta analisis struktur mikro), hingga dasar teoretis analisis statistik inferensial menggunakan metode *Analysis of Variance* (ANOVA). Selain itu, bab ini menguraikan temuan penelitian terdahulu yang menjadi dasar dalam mengidentifikasi *research gap*, khususnya penerapan pengujian hipotesis statistik kuantitatif melalui ANOVA untuk memvalidasi signifikansi pengaruh jenis elektroda terhadap hasil uji mekanis guna mendukung optimasi pemilihan elektroda pada sambungan las di bidang rekayasa konstruksi perkapalan dan manufaktur.

2.1 Gambaran Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pengelasan dissimilar metal antara baja karbon dan baja tahan karat telah banyak dilakukan karena kedua material tersebut memiliki perbedaan komposisi kimia, sifat mekanik, konduktivitas termal, serta karakteristik metalurgi. Salah satu pasangan material yang banyak digunakan adalah SS400 sebagai baja karbon dan SS304 sebagai baja tahan karat. Perbedaan karakteristik kedua material tersebut menyebabkan pemilihan metode pengelasan, parameter pengelasan, serta jenis elektroda menjadi faktor penting dalam menghasilkan sambungan dengan sifat mekanik dan struktur mikro yang baik.

Apriyanto (2020) melakukan penelitian mengenai sifat fisik dan mekanik hasil pengelasan SMAW dissimilar antara SUS304 dan SS400. Penelitian tersebut menggunakan elektroda E6013 dengan diameter 2,5 mm dan variasi arus pengelasan sebesar 80 A, 90 A, dan 100 A. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian tarik, kekerasan, dan struktur mikro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik dan kekerasan sambungan. Kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada penggunaan arus 100 A dengan nilai sebesar 513,87 MPa. Pengamatan struktur mikro juga menunjukkan adanya perubahan pada daerah heat affected zone (HAZ) akibat perubahan masukan panas selama proses pengelasan (Apriyanto, 2020)

(Nurcholis, 2022)) melakukan penelitian terhadap sambungan dissimilar SUS304 dan SS400 menggunakan proses SMAW dengan variasi posisi pengelasan 1G, 2G, dan 3G. Penelitian tersebut menggunakan elektroda E309-16 dengan diameter 3,2 mm dan 4,0 mm. Pengujian dilakukan melalui pemeriksaan visual, pengujian kekerasan, dan pengamatan struktur mikro pada daerah base metal, HAZ, dan weld metal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa posisi pengelasan dapat memengaruhi karakteristik sambungan, termasuk distribusi kekerasan dan perubahan struktur mikro pada daerah hasil pengelasan. Penelitian ini relevan karena menggunakan pasangan material yang sama, yaitu SS400 dan SUS304, serta proses SMAW dengan elektroda yang dirancang untuk penyambungan material berbeda (Nurcholis, 2022)

(Rajab, 2023) meneliti pengaruh variasi elektroda pada proses SMAW terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan antara baja karbon ST37 dan stainless steel SS304. Elektroda yang digunakan adalah E6013, E309-16, dan E7018 dengan variasi arus 70 A, 80 A, dan 90 A. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan kekuatan tarik akibat penggunaan jenis elektroda yang berbeda. Rata-rata kekuatan tarik yang diperoleh untuk elektroda E7018 sebesar 33,19 kg/mm², E6013 sebesar 35,36 kg/mm², sedangkan E309 sebesar 36,20 kg/mm². Pengamatan metalografi juga menunjukkan adanya perbedaan struktur mikro pada daerah logam las dan HAZ akibat perbedaan jenis elektroda serta masukan panas selama proses pengelasan (Rajab, 2023)

(Mahendra, 2023) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi filler dan arus pengelasan terhadap kekuatan tarik dan nilai kekerasan sambungan dissimilar SS304 dan SS400 menggunakan metode GTAW. Penelitian ini secara khusus mengkaji penggunaan variasi filler pada penyambungan kedua material tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan filler dan parameter arus merupakan faktor yang berkaitan dengan perubahan sifat mekanik sambungan, khususnya kekuatan tarik dan kekerasan. Penelitian tersebut memperkuat pentingnya pemilihan logam pengisi yang sesuai pada proses penyambungan SS304 dengan SS400 (Mahendra, 2023)

Penelitian terbaru oleh Setiawan et al. (2026) membahas pengaruh variasi elektroda SMAW terhadap sifat mekanik sambungan dissimilar antara baja ST42 dan stainless steel SS304. Penelitian tersebut menggunakan elektroda E309L dan E312 serta variasi posisi pengelasan 2G dan 3G. Pengujian tarik dilakukan berdasarkan ASTM E8, sedangkan pengujian impak menggunakan ASTM E23. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan kekuatan tarik antara penggunaan elektroda E309L dan E312. Pada posisi 2G, penggunaan E309L menghasilkan nilai kekuatan tarik rata-rata 458,88 MPa. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa jenis elektroda memiliki keterkaitan terhadap karakteristik mekanik sambungan dissimilar, meskipun material yang digunakan pada sisi baja karbon adalah ST42 dan bukan SS400 (Setiawan, 2026)

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa jenis elektroda, parameter pengelasan, dan kondisi proses pengelasan mempunyai keterkaitan dengan sifat mekanik serta karakteristik struktur mikro sambungan dissimilar. Penelitian (Apriyanto, 2020) dan (Nurcholis, 2022) memiliki kesamaan material dengan penelitian yang akan dilakukan, yaitu SS400 dan SS304. Sementara itu, penelitian (Rajab, 2023) dan (Setiawan, 2026) memberikan dasar yang lebih spesifik mengenai penggunaan variasi elektroda pada pengelasan dissimilar. Penelitian (Mahendra, 2023) juga menunjukkan pentingnya variasi filler dalam menghasilkan karakteristik mekanik sambungan yang berbeda.

Penelitian yang akan dilakukan memiliki fokus pada analisis pengaruh variasi elektroda terhadap kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan struktur mikro pada pengelasan dissimilar SS400 dan SS304. Fokus tersebut memiliki perbedaan dari penelitian terdahulu karena tidak hanya menganalisis kekuatan tarik dan struktur mikro, tetapi juga memasukkan pengujian tekuk (bending test) sebagai salah satu parameter untuk mengevaluasi kemampuan sambungan dalam menerima pembebanan., penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai hubungan antara jenis elektroda, sifat mekanik, dan perubahan struktur mikro pada sambungan SS400 dan SS304.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengelasan

Pengelasan adalah cara menyatukan logam dengan cara melelehkan sebagian bahan utama dan bahan tambahan, baik dengan atau tanpa bahan lain, sehingga sambungan yang dibuat menjadi kuat dan tahan lama[15]. Menurut British Standard Institution (1983), pengelasan adalah proses menyambungkan dua atau lebih bahan yang dalam keadaan lunak atau cair dengan memakai panas, tekanan, atau keduanya. Karena itu, pengelasan bisa mengubah sifat dan bentuk bahan yang dilas. Ada berbagai cara pengelasan tergantung dari sumber panas, jenis logam, dan kebutuhan di bidang industri.

2.2.2 Shielded Metal Arc Welding (SMAW)

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dikenal juga dengan istilah Manual Metal Arc Welding (MMAW) atau Las elektroda terbungkus adalah suatu proses penyambungan dua keping logam atau lebih, menjadi suatu sambungan yang tetap, dengan menggunakan sumber panas listrik dan bahan tambah/pengisi berupa elektroda terbungkus. Shielded Metal Arc Welding (SMAW), yang juga dikenal sebagai pengelasan elektroda terlindung, adalah teknik pengelasan yang memanfaatkan busur listrik sebagai sumber panas untuk melelehkan logam. Menurut American Welding Society (AWS), SMAW adalah proses pengelasan yang menggunakan elektroda yang dilapisi fluks untuk membentuk busur listrik antara elektroda dan bahan dasar yang dilas. Selama proses ini, gas pelindung dihasilkan melalui pembakaran lapisan pelapis elektroda, yang berfungsi melindungi ujung elektroda, busur listrik, logam cair, serta area sekitar benda kerja dari pengaruh lingkungan luar.



Gambar 2.1 SMAW

2.2.3 Baja

Baja merupakan komponen vital dalam konstruksi kapal karena kekuatan dan ketahanannya yang tinggi. Dalam perkapalan, baja karbon rendah sering digunakan untuk lambung kapal, dengan kandungan karbon yang terkontrol untuk memastikan ketahanan terhadap korosi. Baja sering kali menjadi material yang lazim dipakai dalam industri konstruksi karena memiliki karakteristik yang memudahkan proses pembentukan, elastisitas, kekuatan, dan ketahanan yang baik. Baja adalah logam campuran yang utama terbuat dari besi (Fe) dan karbon (C) sebagai elemen campuran utama dengan kadar karbon antara 0,02% sampai 2,14% berat. Penambahan karbon membuat baja menjadi lebih keras dan kuat, tetapi juga dapat mengurangi kelenturannya. Selain karbon, unsur lain seperti mangan (Mn), silikon (Si), kromium (Cr), nikel (Ni), dan vanadium (V) sering ditambahkan untuk memperbaiki kekuatan mekanik dan ketahanan terhadap korosi. Bentuk susunan kristal baja, seperti bodycentered cubic (BCC) dan face-centered cubic (FCC), berpengaruh pada sifat mekaniknya.

2.2.4 Baja SS 400

SS adalah kepanjangan dari Baja Struktural Steel, bukan Stainless Steel, dengan grade 400 yang mirip AISI 1018. Plat baja SS-400 biasa disebut plat Mild Steel (MS) atau pelat kapal, sebab banyak dipakai di sektor perkapalan. Pilihan baja SS-400 ini karena kerap digunakan untuk fabrikasi kapal dan struktur jembatan[16]. Baja SS400 sering digunakan dalam proyek konstruksi, karena kandungan karbonnya di bawah 0,3%. Hal ini membuatnya ulet dan tangguh, meskipun kekerasan serta ketahanan ausnya rendah. Namun, baja ini sangat ideal sebagai bahan utama struktur bangunan, pipa gedung, bodi motor, hingga tangki minyak.

2.2.5 Stainless Steel 304

Stainless steel jenis ini minimal mengandung 18% kromium dan 8% nikel, yang memberikan ketahanan korosi superior. Daya tahannya memudahkan pembersihan, sehingga ideal untuk alat pengolahan makanan[17]. Harganya lebih ekonomis daripada SS 316, tapi lebih tinggi dibanding seri SS 430 atau 201. SS304 menawarkan kekuatan tarik sekitar 515-620 MPa dengan elongasi baik, sehingga mudah dibentuk, dilas, dan menahan beban mekanis tanpa deformasi permanen. Ia tahan suhu hingga 870°C untuk penggunaan berkelanjutan dan lebih rendah lagi tanpa kehilangan kekuatan.

2.2.6 Sistem Kode Identifikasi Elektroda

Elektroda terdiri dari dua bagian utama, yaitu lapisan luar (fluks) dan inti yang tidak dilapisi, yang berfungsi sebagai pegangan untuk alat las. Lapisan fluks atau pelapis elektroda memiliki peran penting dalam proses pengelasan, yaitu melindungi logam yang meleleh dari pengaruh atmosfer sekitarnya, menghasilkan gas pelindung, menjaga stabilitas busur listrik, serta menyediakan unsur paduan tambahan. Elektroda digunakan dalam proses pengelasan untuk menghasilkan busur listrik yang mencairkan logam dasar dan logam pengisi, sehingga terbentuk sambungan las. Jenis elektroda yang berbeda memiliki komposisi kimia yang berbeda, yang dapat memengaruhi kekuatan tarik[18].

Material elektroda harus memiliki sifat yang serupa dengan logam yang akan dilas. Pemilihan elektroda harus dilakukan dengan hati-hati, terutama dalam hal kekuatan hasil lasan agar sesuai dengan kekuatan material yang digunakan. Elektroda diklasifikasi berdasarkan standar yang ditetapkan oleh American Welding Society (AWS) dan American Society for Testing and Materials (ASTM) [1]. Adapun Kodefikasi dari elektroda sebagai berikut Seperti: E 308

: Menyatakan elektroda busur pengelasan SMAW

3: Menunjukkan bahan stainless steel austenitik dan kadar kromiumnikel tertentu.

0: Menunjukkan tingkat kekuatan tarik minimal (tensile strength).

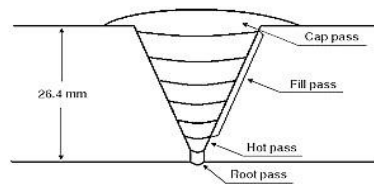
8: Menunjukkan komposisi kimia utama, khususnya persentase kromium dan nikel

Adapun Kodefikasi dari elektroda sebagai berikut Seperti: E 312

: Menyatakan elektroda busur pengelasan SMAW

31 : Komposisi kimia khusus (29% Cr, 9% Ni, 1% Mn tinggi) untuk las dissimilar metals, baja tuang, atau material sulit dila

2 : Posisi las semua (all-position)



Gambar 2. 2 Contoh Urutan Pengisian Filler atau Elektroda

2.2.7 Elektroda E309L

Elektroda E309L merupakan salah satu jenis elektroda stainless steel austenitik yang banyak digunakan pada proses pengelasan dissimilar metal, khususnya pada penyambungan antara baja karbon dan stainless steel. Elektroda ini memiliki kandungan unsur paduan kromium (Cr) dan nikel (Ni) yang relatif tinggi dibandingkan elektroda stainless steel lainnya, sehingga mampu menghasilkan logam las dengan ketahanan korosi, ketangguhan, dan kestabilan struktur mikro yang baik.

Menurut AWS A5.4/A5.4M (2020), elektroda E309L termasuk klasifikasi elektroda stainless steel dengan kandungan kromium sekitar 23% dan nikel sekitar 13%, yang dirancang khusus untuk aplikasi pengelasan material berbeda jenis (dissimilar welding) maupun pelapisan (cladding). Penggunaan elektroda E309L pada pengelasan dissimilar antara SS400 dan SS304 dianggap sangat sesuai karena mampu mengakomodasi perbedaan karakteristik kimia dan termal kedua material dasar tersebut. Baja karbon SS400 memiliki kandungan karbon yang lebih tinggi dibandingkan stainless steel SS304 sehingga pada proses pengelasan terdapat potensi terjadinya migrasi karbon ke daerah logam las yang dapat menyebabkan terbentuknya struktur getas maupun retak panas. Kandungan kromium dan nikel yang tinggi pada elektroda E309L mampu meningkatkan kestabilan struktur austenitik pada daerah las sehingga dapat meminimalkan risiko pembentukan retak akibat tegangan termal dan perbedaan koefisien muai panas antar material (Lippold, 2021)

Selain itu, elektroda E309L memiliki kandungan karbon rendah (low carbon) yang ditandai dengan huruf “L” pada kode elektroda. Kandungan karbon yang rendah, umumnya kurang dari 0,03%, bertujuan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya korosi intergranular akibat pengendapan kromium karbida pada batas butir selama proses pendinginan setelah pengelasan. Menurut (Kou, 2020) kandungan karbon yang rendah pada elektroda stainless steel sangat penting untuk menjaga ketahanan korosi sambungan las, terutama pada material stainless steel austenitik yang sensitif terhadap fenomena sensitization pada temperatur sekitar 450°C–850°C. Dengan rendahnya kadar karbon, elektroda E309L mampu menghasilkan sambungan las yang lebih tahan terhadap korosi serta memiliki struktur mikro yang lebih stabil.

Elektroda E309L juga dikenal memiliki ketahanan yang baik terhadap retak panas (hot cracking) pada daerah weld metal. Retak panas merupakan salah satu cacat yang sering terjadi pada pengelasan dissimilar metal akibat adanya perbedaan komposisi kimia dan distribusi panas yang tidak merata selama proses pengelasan. Menurut (Pham, 2025), penggunaan elektroda E309L pada pengelasan dissimilar carbon steel dan stainless steel mampu menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang tinggi serta mengurangi kemungkinan terbentuknya retak pada daerah heat affected zone (HAZ). Hal ini disebabkan karena kandungan ferrite dalam logam las E309L mampu meningkatkan ketahanan terhadap retak panas selama proses solidifikasi.

Dalam proses pengelasan SMAW, elektroda E309L juga memiliki karakteristik busur listrik yang stabil dan penetrasi yang baik sehingga mempermudah proses pengelasan pada material berbeda jenis. Menurut (Helzer, 2021), elektroda stainless steel tipe E309L memiliki kemampuan menghasilkan deposit logam las yang lebih ulet dan tahan terhadap perubahan temperatur dibandingkan elektroda baja karbon biasa. Oleh karena itu, elektroda ini sering digunakan pada aplikasi industri yang membutuhkan sambungan antara baja karbon dan stainless steel seperti industri perkapalan, perpipaan, pressure vessel, serta konstruksi kimia.

Pada penelitian ini, elektroda E309L digunakan sebagai salah satu variabel penelitian untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan struktur mikro hasil pengelasan dissimilar SS400 dan SS304. Penggunaan elektroda ini diharapkan mampu menghasilkan sambungan las dengan kualitas mekanik yang baik serta struktur mikro yang lebih homogen dibandingkan elektroda lainnya. Dengan karakteristik kandungan kromium dan nikel yang tinggi serta kadar karbon rendah, elektroda E309L diperkirakan mampu memberikan performa sambungan yang optimal pada pengelasan dissimilar metal menggunakan metode SMAW.

2.2.8 Sudut Kampuh

Sudut kampuh (groove angle) merupakan sudut yang dibentuk oleh dua permukaan logam induk (base metal) yang dipersiapkan sebelum proses pengelasan dilakukan. Geometri dan pemilihan sudut kampuh memegang peranan krusial dalam menentukan kualitas sambungan las, karena sudut ini secara langsung mengatur besarnya ruang (volume) yang tersedia untuk penetrasi logam las (weld bead), jumlah bahan pengisi (filler metal) yang dibutuhkan, serta pola distribusi masukan panas (heat input) selama proses pengelasan berlangsung. Pemilihan sudut kampuh yang presisi sangat penting untuk mencapai penetrasi yang sempurna (full penetration), mencegah terjadinya cacat las internal maupun permukaan (seperti lack of fusion, incomplete penetration, atau porosity), serta menghasilkan sifat mekanik dan keutuhan struktur sambungan yang optimal. Sudut kampuh umumnya dinyatakan dalam satuan derajat ($^{\circ}$) dan penentuannya sangat bergantung pada beberapa faktor teknis, antara lain jenis sambungan (butt joint, T-joint, atau corner joint), bentuk morfologi kampuh (seperti single V-groove, double V-groove, U-groove, atau X-groove), ketebalan pelat material dasar, serta metode pengelasan yang diterapkan (seperti SMAW, GTAW, atau GMAW).

Pada pengelasan pelat dengan ketebalan sedang hingga tebal, penggunaan kampuh single V-groove dengan sudut 60° sering dijadikan standar acuan karena mampu memberikan keseimbangan antara aksesibilitas elektroda, penetrasi akar las (root pass), dan efisiensi penggunaan bahan pengisi. Secara fenomena termal dan metalurgi, sudut kampuh memengaruhi besarnya energi panas yang terdistribusi ke area logam induk dan daerah terpengaruh panas (Heat Affected Zone / HAZ). Sudut kampuh yang terlalu kecil dapat menyulitkan gerakan dan jangkauan elektroda ke dasar sambungan, sehingga

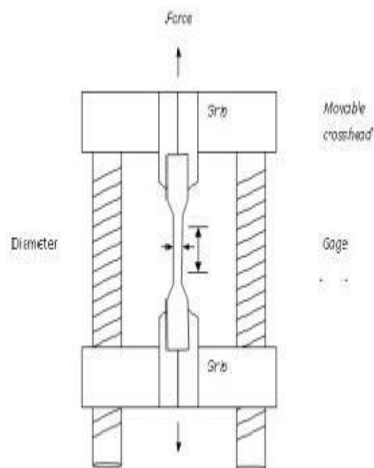
berpotensi menimbulkan cacat kurang penetrasi (incomplete penetration) serta pembekuan terak yang terperangkap (slag inclusion). Sebaliknya, sudut kampuh yang terlalu besar akan memperluas area penampang kampuh, sehingga memerlukan pasokan logam pengisi yang lebih banyak dan peningkatan jumlah alur pengelasan (multi-pass welding). Hal ini berdampak pada tingginya akumulasi heat input, yang memicu pelebaran zona HAZ, pembesaran ukuran butir (grain coarsening), serta peningkatan risiko timbulnya tegangan sisa (residual stress) dan distorsi termal pada sambungan las.

Nilai kekuatan mekanik (seperti kekuatan tarik dan kekuatan tekuk) dari sambungan las sangat dipengaruhi oleh geometri sudut kampuh. Perubahan sudut kampuh secara signifikan memengaruhi laju pendinginan (cooling rate), komposisi kimia akibat pencampuran logam induk dan pengisi (dilution rate), serta evolusi mikrostruktur pada zona las dan HAZ. Sambungan dengan desain sudut kampuh yang tepat dan presisi mampu menghasilkan penetrasi yang homogen serta distribusi fasa mikro yang lebih stabil, sehingga memberikan peningkatan nilai kekuatan tarik dan keuletan sambungan jika dibandingkan dengan kampuh berbuku atau bergeometri kurang optimal. Oleh karena itu, pada pengelasan dissimilar metal antara baja karbon SS400 dan stainless steel SS304, pengendalian sudut kampuh menjadi salah satu variabel kontrol yang vital untuk memastikan ketercapaian penetrasi dan kestabilan fasa hasil pengelasan.

2.2.9 Uji Tarik

Kekuatan tarik merupakan salah satu sifat mekanik yang sangat penting dalam proses perancangan dan pembuatan bangunan. Setiap bahan memiliki karakteristik seperti kekerasan dan kelenturan yang memengaruhi sifat mekaniknya, sehingga perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui hal tersebut. Salah satu pengujian yang paling sering dilakukan adalah uji tarik, yang dapat mengukur tingkat kekuatan bahan sekaligus mengenali sifat-sifat material tersebut. Uji tarik merupakan salah satu jenis pengujian material yang termasuk dalam pengujian destruktif dan digunakan untuk mengkaji sifat mekanik suatu bahan. Pada pengujian ini, sampel material diberikan gaya tarik secara bertahap sampai akhirnya patah, sehingga dapat diketahui bagaimana bahan tersebut bereaksi terhadap tegangan yang diterima[20]. Pengujian tarik dilakukan untuk mengukur seberapa kuat sambungan las dan untuk menentukan titik di mana sambungan tersebut akan putus. Pembebanan tarik berarti memberikan gaya tarik yang berlawanan pada kedua ujung benda yang diuji.[21]

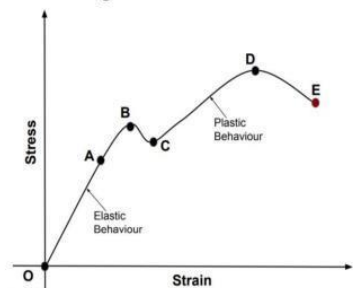
Beberapa parameter utama yang diamati dalam uji tarik meliputi batas elastis, perpanjangan, kekuatan tarik maksimum, serta perubahan luas penampang material. Uji tarik dilakukan menggunakan Universal Testing Machine dengan cara menjepit kedua ujung spesimen. Jika spesimen tersebut patah selama pengujian, hal ini menandakan adanya cacat pada area pengelasan. Oleh karena itu, patahnya benda seharusnya terjadi di luar area sambungan las[22]. Kekuatan tarik sambungan las sangat dipengaruhi oleh sifat logam dasar, zona pengaruh panas (HAZ), karakteristik logam yang berubah akibat proses pengelasan, bentuk sambungan, serta distribusi tegangan di dalam sambungan tersebut.



Gambar 2.3 Mesin Uji Tarik

Uji tarik dilakukan dengan menggunakan Universal Testing Machine dengan cara menjepit kedua ujung dari spesimen, jika spesimen uji putus hal tersebut menggambarkan terjadi cacat pada daerah pengelasan, sehingga dapat disimpulkan bahwa putus nya benda harus berada diluar dari sambungan las tersebut. Kemampuan tarik dari kekuatan sambungan las sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat logam dasar, zona pengaruh panas (HAZ), karakteristik logam yang terpengaruh oleh proses pengelasan, geometri, dan distribusi tegangan dalam sambungan tersebut.

a. Tegangan Maksimum (Ultimate Tensile Strength)



Gambar 2.4 Hubungan antara Tegangan dan Regangan

Hubungan antara tegangan dan regangan dapat dilihat dalam gambar. Dari titik A ke titik B menunjukkan bahwa bahan masih berada pada kondisi elastis, sehingga hukum Hooke masih berlaku dan disebut sebagai batas proporsi. Jika gaya yang diterapkan pada spesimen melewati titik B, maka spesimen akan mengalami perubahan bentuk permanen dan memasuki daerah deformasi plastis. Dalam kondisi ini, regangan tidak bisa kembali ke semula sepenuhnya.

Ketika gaya mencapai titik C, regangan masih terjadi tanpa peningkatan tegangan; titik C ini dikenal sebagai upper yield point, sedangkan titik D disebut lower yield point. Jika gaya terus diberi hingga titik E, maka ini merupakan tegangan maksimum yang dapat diterima oleh spesimen atau disebut UTS (Ultimate Tensile Strength). titik F menunjukkan kerusakan pada spesimen yang mempengaruhi luas penampang dengan tegangan lebih rendah dibanding titik E.

b. Modulus Elastisitas (Elastic Modulus)

Modulus elastisitas atau modulus Young adalah ukuran tingkat kekakuan suatu material yang menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan di zona elastis. Material dengan modulus elastisitas yang tinggi membutuhkan tegangan lebih besar agar mengalami deformasi. Untuk baja SS 400, nilai modulus elastisitas teoritisnya sekitar 210 GPa dan untuk SS 304 nilai modulus elastisitas teoritisnya sekitar 200 GPa. Namun, pada bagian sambungan las, nilai ini bisa berbeda-beda karena dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk.

Proses pendinginan setelah pengelasan juga memengaruhi jenis fasa yang muncul di area las dan berdampak pada nilai modulus elastisitasnya.

Modulus elastisitas dihitung dengan persamaan:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Dimana:

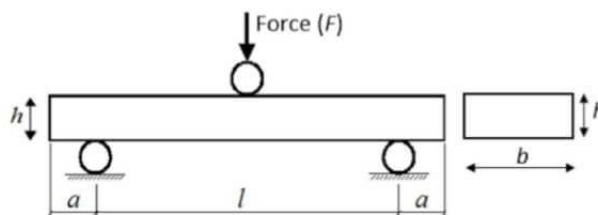
E = Modulus elastisitas (GPa)

σ = Tegangan (MPa)

ε = Regangan

2.2.10 Uji Tekuk

Uji tekuk (bend test) merupakan salah satu metode pengujian mekanik yang digunakan untuk mengetahui kemampuan material atau sambungan las dalam menahan deformasi plastis akibat pembebanan lentur tanpa mengalami retak maupun patah. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi keuletan (ductility), kualitas sambungan las, serta mengetahui adanya cacat internal pada daerah las dan heat affected zone (HAZ). Pada pengelasan dissimilar antara SS400 dan SS304, uji tekuk menjadi penting karena kedua material memiliki sifat mekanik dan karakteristik termal yang berbeda sehingga berpotensi menghasilkan distribusi tegangan yang tidak merata pada sambungan las.



Menurut AWS (American Welding Society), pengujian tekuk dilakukan dengan memberikan gaya tekan pada spesimen hingga membentuk sudut tertentu sesuai standar pengujian. Pada proses tersebut, bagian permukaan spesimen akan mengalami tegangan tarik dan tekan secara bersamaan. Sambungan las dikatakan memiliki kualitas baik apabila setelah proses pembengkokan tidak ditemukan retak terbuka, cacat permukaan, maupun patahan pada daerah las (AWS, 2020)

Dalam pengelasan SMAW, hasil uji tekuk dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis elektroda, arus pengelasan, penetrasi las, serta desain kampuh. Variasi elektroda dapat memengaruhi komposisi logam las yang terbentuk sehingga berdampak terhadap tingkat keuletan sambungan. Elektroda dengan kandungan unsur paduan tertentu mampu menghasilkan logam las yang lebih ulet dan tahan

terhadap retak saat menerima pembebanan lentur. Selain itu, sudut kampuh yang tepat dapat membantu distribusi panas dan penetrasi las menjadi lebih optimal sehingga kualitas sambungan meningkat.

Pada penelitian ini, uji tekuk digunakan untuk mengetahui kemampuan sambungan las dissimilar SS400 dan SS304 dalam menerima pembebanan lentur setelah dilakukan variasi penggunaan elektroda. Hasil pengujian diharapkan dapat menunjukkan pengaruh jenis elektroda terhadap kualitas sambungan las, khususnya terhadap sifat keuletan dan ketahanan deformasi plastis sambungan hasil pengelasan SMAW.

2.2.11 Uji Struktur Mikro

Uji struktur mikro merupakan metode pengamatan yang dilakukan untuk mengetahui bentuk, ukuran, distribusi, dan perubahan fasa pada suatu material menggunakan mikroskop optik maupun mikroskop elektron. Pengamatan struktur mikro sangat penting dalam penelitian pengelasan karena sifat mekanik sambungan las dipengaruhi oleh struktur mikro yang terbentuk akibat siklus termal selama proses pengelasan. Pada pengelasan dissimilar antara SS400 dan SS304, perbedaan komposisi kimia dan karakteristik termal kedua material dapat menyebabkan terbentuknya struktur mikro yang berbeda pada daerah logam induk, logam las, dan HAZ.

Pengujian struktur mikro diawali dengan proses preparasi spesimen yang meliputi pemotongan, pengamplasan, pemolesan (polishing), dan etsa (etching). Proses etsa dilakukan menggunakan larutan kimia tertentu untuk memperjelas batas butir dan fasa material sehingga struktur mikro dapat diamati dengan jelas menggunakan mikroskop. Menurut (Rethwisch, 2021) struktur mikro yang terbentuk pada hasil pengelasan akan memengaruhi sifat mekanik material seperti kekuatan, kekerasan, dan keuletan.

Pada baja karbon rendah SS400, struktur mikro umumnya terdiri dari ferrite dan pearlite, sedangkan pada stainless steel SS304 didominasi oleh struktur austenite. Selama proses pengelasan SMAW, panas yang tinggi dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada daerah HAZ maupun logam las akibat proses pemanasan dan pendinginan yang cepat. Variasi elektroda yang digunakan juga dapat memengaruhi komposisi kimia logam las sehingga berdampak pada pembentukan struktur mikro sambungan. Pengamatan struktur mikro pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat penggunaan variasi elektroda pada pengelasan dissimilar SS400 dan SS304. Hasil pengamatan diharapkan dapat memberikan informasi mengenai hubungan antara jenis elektroda dengan karakteristik mikrostruktur sambungan las, sehingga dapat dianalisis pengaruhnya terhadap sifat mekanik sambungan hasil pengelasan SMAW.

2.2.12 Research Gap Penelitian

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, diketahui bahwa pengelasan *dissimilar metal* antara baja karbon dan *stainless steel* telah banyak diteliti dengan berbagai parameter pengelasan. Pham (2025) menyatakan bahwa variasi *filler metal* berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro sambungan *dissimilar*, namun penelitian tersebut belum membahas pengujian tekuk (*bending test*) serta belum menggunakan elektroda E312 sebagai variabel penelitian. Selanjutnya, Zhang (2025) menjelaskan bahwa kualitas sambungan *dissimilar carbon steel*–

stainless steel dipengaruhi oleh *heat input* dan *filler metal*, tetapi penelitian tersebut menggunakan metode pengelasan selain SMAW sehingga belum memberikan gambaran pengaruh variasi elektroda pada proses SMAW.

Penelitian lain yang dilakukan Rahman (2024) menunjukkan bahwa tegangan sisa berpengaruh terhadap kualitas sambungan las *dissimilar*, namun penelitian tersebut belum melakukan analisis struktur mikro untuk mengetahui perubahan fasa dan karakteristik mikrostruktur hasil pengelasan. Nugroho (2024) juga menyebutkan bahwa parameter pengelasan memengaruhi ketahanan mekanik sambungan *stainless steel*, tetapi penelitian tersebut belum membandingkan penggunaan elektroda E308, E309L, dan E312 secara spesifik pada pengelasan *dissimilar*.

Selain itu, Saputra dan Hidayat (2023) menemukan bahwa variasi elektroda memengaruhi kekuatan tarik hasil pengelasan SMAW, namun penelitian tersebut hanya menggunakan material sejenis (*similar metal*) sehingga belum merepresentasikan karakteristik *dissimilar metal welding*. Wang (2023) menjelaskan penggunaan *stainless steel* pada lingkungan industri korosif, tetapi tidak membahas proses pengelasan *dissimilar* antara *stainless steel* dan baja karbon. Penelitian Prasetyo (2022) menunjukkan bahwa elektroda *low hydrogen* dapat meningkatkan kualitas sambungan las, namun penelitian tersebut belum menganalisis struktur mikro hasil pengelasan. Sementara itu, Rahman dan Putra (2022) menyatakan bahwa kampuh 60° menghasilkan penetrasi yang lebih baik, tetapi penelitian tersebut belum melakukan pengujian struktur mikro untuk mengetahui pengaruh geometri kampuh terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan las.

Di samping keterbatasan parameter pengujian mekanis dan metalurgi di atas, keterbatasan metodologis utama pada mayoritas penelitian pengelasan *dissimilar* terdahulu terletak pada belum diterapkannya analisis statistik inferensial berbasis *Analysis of Variance* (ANOVA) (Tarigan & Drastiawati, 2022; Montgomery, 2017). Sebagian besar studi terdahulu menyajikan data hasil pengujian mekanis secara deskriptif (hanya berupa nilai rata-rata numerik) tanpa melakukan uji hipotesis kuantitatif. Tanpa adanya validasi statistik menggunakan metode ANOVA, belum dapat dibuktikan secara ilmiah apakah perbedaan kekuatan mekanis yang dihasilkan oleh tiap-tiap variasi elektroda (E308, E309L, E312) bernilai signifikan secara statistik ($p < 0,05$) atau sekadar variasi eksperimental acak (*random error*) (Walpole et al., 2012).

Berdasarkan uraian tersebut, dapat diketahui bahwa penelitian sebelumnya masih memiliki keterbatasan (*research gap*), terutama pada analisis komprehensif yang menghubungkan variasi elektroda E308, E309L, dan E312 terhadap kekuatan tarik, uji tekuk (*face bend* dan *root bend*), dan evolusi struktur mikro pada pengelasan *dissimilar* SS400 dan SS304 menggunakan metode SMAW, serta pembuktian signifikansi statistik antar perlakuan elektroda menggunakan metode One-Way ANOVA. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kekosongan penelitian (*research gap*) tersebut guna memberikan rekomendasi ilmiah yang akurat, teruji secara statistik, dan aplikatif bagi industri manufaktur maupun perkapalan.