

## Pengaruh variasi elektroda dan arus pengelasan terhadap kekuatan tarik sambungan las SMAW pada stainless steel 304

<sup>1\*</sup>Ario Ardiansyah, <sup>2</sup>Basuki, <sup>3</sup>Retno Eka Pramasari, <sup>4</sup>Dian Anisa Rokhmah Wati

<sup>1,2,3,4</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang  
<sup>1,2,3,4</sup>Jl. Irian Jaya No. 55, Cukir, Kec. Diwek, Jombang, Jawa Timur, Indonesia  
<sup>1</sup>arioardiansyah169@gmail.com, <sup>2</sup>basuki@unhasy.ac.id, <sup>3</sup>retnopramasari@unhasy.ac.id,  
<sup>4</sup>dianrokhmahwati@unhasy.ac.id

### Abstract

Research on the effect of electrode type on the mechanical properties of stainless steel 304 welds produced by the Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process is still limited, particularly in comparing E6013 and E7016 electrodes at low welding currents for thin materials. This study aimed to analyze the effect of E6013 and E7016 electrodes and welding current variations on the tensile strength of stainless steel 304 welded joints. An experimental quantitative method was employed by varying the electrode type and welding current as the independent variables. The electrodes used were E6013 and E7016 with welding currents of 75 A and 80 A, while the dependent variables included tensile strength, strain, and modulus of elasticity. The test material consisted of 1.8-mm-thick stainless steel 304 plates, which were prepared into 12 test specimens and evaluated using a universal tensile testing machine. The results showed that the E6013 electrode at 75 A produced the highest average tensile strength of 527.94 MPa and a modulus of elasticity of 15,994.9 MPa. For the E7016 electrode, the highest average tensile strength was obtained at 80 A, reaching 409.3 MPa. The findings indicate that electrode type and welding current influence the tensile strength of welded joints. The combination of the E6013 electrode and a welding current of 75 A provided the optimum performance, while higher current tended to reduce tensile strength due to increased heat input. This study provides information on the optimum combination of electrode type and welding current for the SMAW of stainless steel 304, which can serve as a reference for selecting welding parameters in industrial applications and future research.

**Keywords:** E6013 electrode, E7016 electrode, shielded metal arc welding (SMAW), stainless steel 304, tensile strength, welding current

### Abstrak

Penelitian mengenai pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil pengelasan stainless steel 304 menggunakan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) masih terbatas, terutama pada perbandingan elektroda E6013 dan E7016 dengan variasi arus rendah pada material tipis. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penggunaan elektroda E6013 dan E7016 serta variasi arus pengelasan terhadap kekuatan tarik sambungan las stainless steel 304. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan variasi jenis elektroda dan arus pengelasan sebagai variabel bebas. Elektroda yang digunakan adalah E6013 dan E7016 dengan arus 75 A dan 80 A, sedangkan variabel terikat meliputi tegangan tarik, regangan, dan modulus elastisitas. Material uji berupa pelat stainless steel 304 setebal 1,8 mm yang dibuat menjadi 12 spesimen dan diuji menggunakan mesin uji tarik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda E6013 pada arus 75 A menghasilkan tegangan tarik rata-rata tertinggi sebesar 527,94 MPa dengan modulus elastisitas 15.994,9 MPa. Pada elektroda E7016, tegangan tarik rata-rata tertinggi

diperoleh pada arus 80 A sebesar 409,3 MPa. Hasil penelitian mengindikasikan bahwa jenis elektroda dan besar arus pengelasan berpengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan las. Kombinasi elektroda E6013 pada arus 75 A memberikan hasil paling optimal, sedangkan peningkatan arus di atas kondisi tersebut cenderung menurunkan kekuatan tarik akibat meningkatnya masukan panas. Penelitian ini memberikan informasi mengenai kombinasi jenis elektroda dan arus pengelasan yang optimal pada proses SMAW untuk stainless steel 304, sehingga dapat menjadi acuan dalam pemilihan parameter pengelasan pada aplikasi industri maupun penelitian selanjutnya.

**Kata kunci:** arus pengelasan, elektroda E6013, elektroda E7016, kekuatan tarik, *shielded metal arc welding* (SMAW), stainless steel 304

## 1. Pendahuluan

Pengelasan adalah salah satu teknik penyambungan logam yang sangat penting dalam berbagai bidang industri, seperti konstruksi, otomotif, perkapalan, manufaktur, dan industri proses. Teknik ini digunakan untuk menyatukan dua atau lebih bagian logam melalui pembentukan ikatan metalurgi yang bersifat permanen. Dibandingkan metode penyambungan mekanis seperti baut maupun paku keling, pengelasan menawarkan beberapa keunggulan, antara lain efisiensi penggunaan material, kekuatan sambungan yang tinggi, serta kemampuan menghasilkan konstruksi yang lebih ringan dan ekonomis. Oleh sebab itu, mutu sambungan las menjadi aspek penting yang menentukan tingkat keandalan suatu komponen maupun struktur selama masa penggunaannya [1]–[3].

Seiring berkembangnya teknologi industri, kebutuhan akan sambungan las yang memiliki performa mekanik tinggi semakin meningkat. Kualitas sambungan yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai parameter proses, seperti jenis elektroda, besar arus, tegangan pengelasan, kecepatan pengelasan, posisi pengelasan, dan karakteristik material dasar yang digunakan [4], [5]. Variasi parameter tersebut akan memengaruhi besarnya masukan panas (*heat input*) selama proses berlangsung. Masukan panas yang berbeda dapat menyebabkan perubahan struktur mikro pada logam las maupun daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*), yang pada akhirnya berdampak pada sifat mekanik sambungan las [6]–[8].

Salah satu metode pengelasan yang masih banyak diterapkan dalam dunia industri adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Metode ini memanfaatkan busur listrik yang terbentuk antara elektroda dan logam induk sebagai sumber panas untuk mencairkan material sehingga terbentuk sambungan yang kuat. SMAW banyak dipilih karena peralatannya relatif sederhana, biaya operasionalnya cukup ekonomis, dapat digunakan pada berbagai posisi pengelasan, serta kompatibel dengan berbagai jenis material logam [9], [10]. Namun demikian, kualitas hasil pengelasan sangat bergantung pada pemilihan parameter proses yang tepat agar diperoleh sambungan dengan karakteristik yang optimal.

Salah satu material yang sering digunakan dalam proses pengelasan adalah stainless steel 304. Material ini termasuk dalam kelompok baja tahan karat austenitik yang mengandung kromium sekitar 18–20% dan nikel sekitar 8–10,5%. Kandungan unsur paduan tersebut memberikan ketahanan korosi yang baik, sifat ketangguhan yang tinggi, serta kemudahan dalam proses fabrikasi dibandingkan berbagai jenis baja lainnya. Oleh karena itu, stainless steel 304 banyak dimanfaatkan pada industri makanan dan minuman, peralatan medis, industri kimia, maupun komponen mesin yang memerlukan ketahanan terhadap lingkungan korosif. Meskipun demikian, siklus termal selama pengelasan dapat memicu perubahan struktur mikro yang berpotensi memengaruhi sifat mekanik, terutama kekuatan tarik sambungan las [11]–[14].

Pada praktik industri, penyambungan stainless steel 304 umumnya menggunakan elektroda stainless seperti E308L untuk mempertahankan ketahanan korosi sambungan. Namun demikian, pada pekerjaan fabrikasi ringan, perbaikan darurat (*maintenance repair*), maupun industri skala kecil, masih dijumpai penggunaan elektroda baja karbon seperti E6013 dan E7016 karena lebih mudah diperoleh, memiliki harga yang lebih ekonomis, serta tersedia hampir di seluruh bengkel pengelasan. Penggunaan elektroda tersebut memang berpotensi menyebabkan terjadinya *dilution* antara logam pengisi dan logam induk yang dapat memengaruhi komposisi kimia logam las, struktur mikro, ketahanan korosi, maupun sifat mekaniknya. Oleh sebab itu, penelitian ini tidak bertujuan merekomendasikan E6013 maupun E7016 sebagai elektroda standar untuk stainless steel 304, melainkan mengevaluasi bagaimana pengaruh kedua elektroda tersebut terhadap kekuatan tarik sambungan las sehingga dapat menjadi referensi teknis apabila kombinasi tersebut digunakan pada kondisi tertentu.

Meskipun pengelasan stainless steel 304 pada praktik industri umumnya menggunakan elektroda stainless steel, seperti E308L atau E308-16, penelitian ini secara sengaja menggunakan elektroda baja karbon tipe E6013 dan E7016 sebagai variabel penelitian. Pemilihan kedua elektroda tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa E6013 dan E7016 merupakan elektroda SMAW yang banyak digunakan pada bengkel fabrikasi, industri kecil, dan pekerjaan perawatan (*maintenance*) karena mudah diperoleh, ekonomis, serta memiliki karakteristik fluks yang berbeda. Perbedaan karakteristik tersebut memungkinkan terjadinya variasi masukan panas, penetrasi, dan pembentukan logam las yang dapat memengaruhi sifat mekanik sambungan pada stainless steel 304. Selain itu, variasi arus pengelasan sebesar 75 A dan 80 A dipilih karena berada pada rentang arus kerja yang direkomendasikan untuk elektroda berdiameter 2,6 mm serta sesuai untuk proses pengelasan pelat tipis stainless steel 304 dengan ketebalan 1,8 mm. Pemilihan kedua variasi arus tersebut bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan masukan panas yang relatif kecil terhadap sifat mekanik sambungan las tanpa menimbulkan risiko masukan panas yang berlebihan, seperti distorsi, burn-through, atau pelebaran daerah terpengaruh panas yang dapat menurunkan kualitas sambungan.

Dalam proses SMAW, elektroda berfungsi sebagai penghantar arus listrik sekaligus sebagai logam pengisi yang membentuk logam las. Karakteristik elektroda memiliki pengaruh besar terhadap mutu sambungan karena berkaitan dengan kestabilan busur listrik, kedalaman penetrasi, pembentukan terak, komposisi kimia logam las, serta sifat mekanik yang dihasilkan [15], [16]. Di antara berbagai jenis elektroda yang tersedia, E6013 dan E7016 merupakan elektroda yang umum digunakan. Elektroda E6013 termasuk tipe *rutile* yang dikenal memiliki busur stabil, mudah dioperasikan, dan menghasilkan percikan yang relatif rendah. Sementara itu, elektroda E7016 tergolong elektroda *low hydrogen* yang mampu menghasilkan kekuatan mekanik lebih tinggi serta mengurangi kemungkinan terjadinya retak akibat hidrogen [17], [18].

Selain pemilihan elektroda, besar arus pengelasan juga menjadi parameter utama yang menentukan kualitas hasil sambungan. Penggunaan arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan penetrasi kurang sempurna dan munculnya cacat berupa *lack of fusion*. Sebaliknya, arus yang terlalu tinggi dapat menimbulkan deformasi, distorsi, hingga penurunan sifat mekanik akibat pertumbuhan butir yang berlebihan pada daerah las. Oleh karena itu, pengaturan arus yang sesuai sangat diperlukan untuk memperoleh sifat mekanik yang optimal. Pengaruh variasi arus terhadap kekuatan tarik sambungan las menjadi aspek penting untuk

diteliti, terutama pada material stainless steel 304 yang memiliki karakteristik perpindahan panas berbeda dibandingkan baja karbon [13], [19].

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil pengelasan. Salah satu penelitian yang membandingkan elektroda E6013 dan E7016 pada pengelasan baja ST-37 dengan metode SMAW menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E7016 menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan E6013. Perbedaan tersebut dikaitkan dengan karakteristik fluks dan kandungan hidrogen yang berbeda sehingga memengaruhi struktur mikro serta kualitas logam las yang terbentuk. Hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa jenis elektroda berperan penting dalam menentukan performa mekanik sambungan las [17], [20], [21].

Penelitian lain pada pengelasan baja API 5L Grade X52 menggunakan elektroda E6013 dan E7016 juga menunjukkan hasil yang serupa. Pada penelitian tersebut, elektroda E7016 menghasilkan nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan elektroda E6013. Hal ini disebabkan oleh kemampuan elektroda *low hydrogen* dalam menghasilkan logam las yang lebih homogen dan memiliki cacat internal yang lebih sedikit dibandingkan elektroda *rutile*. Dengan demikian, pemilihan jenis elektroda yang tepat dapat memberikan peningkatan signifikan terhadap kualitas sambungan las [17], [22].

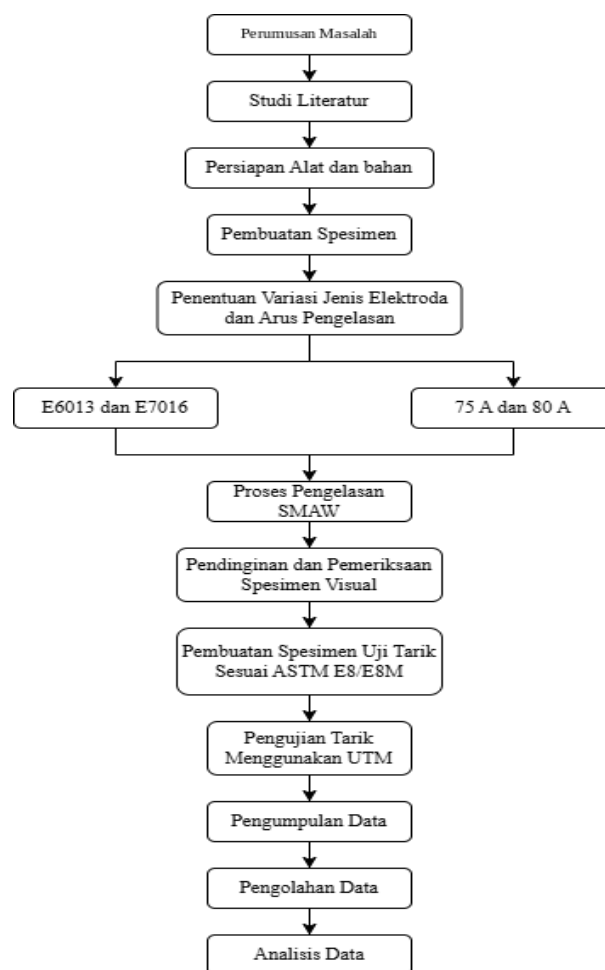
Penelitian terkait karakteristik stainless steel 304 menunjukkan bahwa sifat mekanik material ini sangat dipengaruhi oleh kondisi termal yang diterimanya. Variasi temperatur selama perlakuan panas dapat menyebabkan perubahan struktur mikro yang berdampak pada perubahan sifat mekanik material. Kenaikan temperatur tertentu diketahui dapat menurunkan kekuatan tarik akibat transformasi struktur mikro yang terjadi. Hal tersebut mengindikasikan bahwa panas yang dihasilkan selama proses pengelasan juga berpotensi memengaruhi kekuatan tarik sambungan las pada stainless steel 304, sehingga pengendalian parameter proses menjadi sangat penting [23]–[25].

Berbagai penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh jenis elektroda E6013 dan E7016 terhadap sifat mekanik hasil pengelasan pada baja karbon, seperti ST37, ST41, SS400, dan API 5L X52. Di sisi lain, penelitian mengenai pengelasan stainless steel 304 lebih banyak menggunakan elektroda stainless (misalnya E308) atau berfokus pada pengaruh variasi arus dan masukan panas terhadap struktur mikro serta sifat mekaniknya. Hingga saat ini masih sangat terbatas penelitian yang secara langsung membandingkan penggunaan elektroda baja karbon tipe E6013 dan E7016 pada material stainless steel 304 dengan variasi arus pengelasan yang sama. Padahal kombinasi material yang berbeda tersebut berpotensi menghasilkan karakteristik metalurgi dan sifat mekanik yang berbeda akibat perbedaan komposisi logam pengisi, karakteristik fluks, serta besarnya masukan panas selama proses SMAW. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengisi kesenjangan tersebut melalui evaluasi komparatif pengaruh jenis elektroda dan variasi arus terhadap kekuatan tarik sambungan las stainless steel 304.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penggunaan elektroda E6013 dan E7016 serta variasi arus pengelasan sebesar 75 A dan 80 A terhadap kekuatan tarik sambungan las pada pelat stainless steel 304 menggunakan metode SMAW. Kebaruan penelitian ini terletak pada analisis komparatif dua jenis elektroda yang memiliki karakteristik fluks berbeda pada material stainless steel 304 dengan pengaturan arus yang terkontrol. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengelasan, khususnya terkait optimasi parameter SMAW, serta menjadi referensi bagi industri dalam menentukan kombinasi elektroda dan arus pengelasan yang mampu menghasilkan sambungan dengan kualitas mekanik terbaik.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen murni di laboratorium untuk menguji pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanik material. Desain penelitian difokuskan pada analisis komparatif antara dua jenis elektroda las yang berbeda karakteristik fluksnya, yaitu tipe E6013 dan E7016. Kedua jenis elektroda tersebut diaplikasikan pada penyambungan pelat stainless steel 304 dengan variasi arus pengelasan yang diatur pada tingkat 75 A dan 80 A. Melalui pendekatan ini, data mekanis yang dihasilkan dari setiap kombinasi parameter dapat dibandingkan secara objektif untuk menentukan karakteristik mekanik sambungan las yang dihasilkan. Gambar 1 menyajikan diagram alir penelitian yang menggambarkan tahapan penelitian mulai dari perumusan masalah, studi literatur, persiapan alat dan bahan, pembuatan spesimen, penentuan variasi jenis elektroda dan arus pengelasan, proses pengelasan, pemeriksaan spesimen, pengujian tarik, hingga pengolahan dan analisis data.



**Gambar 1.** Diagram alir penelitian

Proses pengerjaan benda uji dan pengambilan data eksperimen dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang. Seluruh tahapan persiapan material, pemotongan, hingga proses pengelasan dilakukan pada fasilitas laboratorium tersebut untuk memastikan kondisi lingkungan kerja yang terkendali. Setelah seluruh spesimen berhasil dilas dan dibentuk sesuai dengan standar pengujian, tahapan pengujian tarik destruktif dilakukan dengan memanfaatkan mesin uji tarik (*Universal Testing Machine/UTM*) yang tersedia di fasilitas laboratorium terpadu untuk mendapatkan kurva beban dan pertambahan panjang secara akurat.

Bahan utama yang menjadi objek dalam penelitian ini adalah pelat baja tahan karat jenis stainless steel 304 dengan dimensi tebal sebesar 1,8 mm. Sebelum masuk ke tahap pengelasan, pelat tersebut dipotong menjadi beberapa potongan spesimen dengan ukuran panjang masing-masing sebesar 200 mm dan lebar 20 mm. Elektroda pengelasan yang disiapkan terdiri dari dua tipe, yaitu elektroda tipe E6013 yang memiliki karakteristik busur yang stabil serta elektroda tipe E7016 yang berkarakter *low hydrogen* untuk kekuatan mekanis tinggi. Total material benda uji yang dipersiapkan berjumlah 12 spesimen, yang terdiri atas 6 spesimen untuk pengelasan menggunakan elektroda E6013 dan 6 spesimen menggunakan elektroda E7016. Jumlah tersebut ditentukan berdasarkan rancangan penelitian eksperimen yang menggunakan dua jenis elektroda (E6013 dan E7016) serta dua variasi arus pengelasan (75 A dan 80 A), sehingga diperoleh empat kombinasi perlakuan. Setiap kombinasi perlakuan dibuat sebanyak tiga spesimen (tiga kali pengulangan) untuk meningkatkan keandalan data, mengurangi pengaruh variasi hasil pengelasan, serta memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif dalam analisis sifat mekanik sambungan las. Rincian spesimen berdasarkan jenis elektroda dan variasi arus pengelasan disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

**Tabel 1.** Spesimen uji elektroda E6013

| Spesimen | Pelat SS | Arus Pengelasan | Jenis Elektroda |
|----------|----------|-----------------|-----------------|
| 1        | 304      | 75 A            | <b>E6013</b>    |
| 2        | 304      | 75 A            | <b>E6013</b>    |
| 3        | 304      | 75 A            | <b>E6013</b>    |
| 4        | 304      | 80 A            | <b>E6013</b>    |
| 5        | 304      | 80 A            | <b>E6013</b>    |
| 6        | 304      | 80 A            | <b>E6013</b>    |

**Tabel 2.** Spesimen uji elektroda E7016

| Spesimen | Pelat SS | Arus Pengelasan | Jenis Elektroda |
|----------|----------|-----------------|-----------------|
| 1        | 304      | 75 A            | <b>E7016</b>    |
| 2        | 304      | 75 A            | <b>E7016</b>    |
| 3        | 304      | 75 A            | <b>E7016</b>    |
| 4        | 304      | 80 A            | <b>E7016</b>    |
| 5        | 304      | 80 A            | <b>E7016</b>    |
| 6        | 304      | 80 A            | <b>E7016</b>    |

Peralatan utama yang digunakan selama proses eksperimen ini meliputi satu unit mesin las busur listrik manual SMAW lengkap dengan sistem pengatur arus mekanisnya. Untuk mempersiapkan sambungan dan membersihkan permukaan logam sebelum maupun sesudah pengelasan, digunakan mesin gerinda tangan, sikat baja, dan palu terak. Alat ukur presisi berupa jangka sorong digunakan secara berkala untuk memverifikasi akurasi dimensi pemotongan awal pelat serta ukuran penampang spesimen. Selain itu, perangkat keselamatan kerja seperti topeng las, sarung tangan kulit pelindung, kaca mata keselamatan, dan apron wajib digunakan oleh operator selama proses fabrikasi berlangsung demi menjaga standar keselamatan kerja di laboratorium.

Prosedur pelaksanaan penelitian ini diawali dengan tahapan pembersihan permukaan pelat stainless steel 304 dari kontaminasi luar seperti karat, minyak, atau sisa pabrikan menggunakan gerinda. Setelah permukaan logam dibersihkan, dua pelat stainless steel 304 disusun membentuk sambungan tumpul (*butt joint*) menggunakan kampuh I (*square groove*). Pemilihan kampuh I didasarkan pada ketebalan pelat sebesar 1,8 mm sehingga tidak diperlukan pembuatan bevel untuk memperoleh penetrasi sambungan yang memadai. Kedudukan kedua pelat dijaga tetap sejajar dan celah sambungan dipertahankan seragam selama proses pengelasan untuk menghasilkan kualitas sambungan yang konsisten. Proses pengelasan SMAW kemudian dilakukan oleh operator berpengalaman pada posisi pengelasan bawah tangan atau datar menggunakan variasi arus 75 A dan 80 A.

Untuk menjaga konsistensi kualitas hasil pengelasan pada pelat stainless steel 304 dengan ketebalan 1,8 mm, seluruh proses pengelasan dilakukan oleh satu operator yang sama sehingga variasi teknik pengelasan dapat diminimalkan. Selama proses pengelasan, panjang busur dijaga tetap pendek dan kecepatan gerak elektroda diusahakan konstan sesuai



variasi arus yang telah ditentukan. Setelah proses pengelasan selesai, sambungan las dibersihkan dari terak menggunakan palu terak dan sikat baja, kemudian dilakukan pemeriksaan visual untuk memastikan tidak terdapat cacat makroskopis seperti *burn-through*, *undercut*, porositas, maupun *slag inclusion*. Hanya spesimen yang memenuhi kriteria pemeriksaan visual yang digunakan dalam pengujian tarik. Spesimen dibiarkan mendingin secara alami di dalam suhu ruangan tanpa perlakuan pendinginan cepat.

Setelah seluruh spesimen selesai dilas dan mencapai suhu kamar, pelat hasil sambungan dibentuk menjadi spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E8/E8M. Pengujian dilakukan dengan memasang ujung-ujung spesimen pada pencekam mesin uji tarik secara tegak lurus dan seimbang. Beban tarik aksial diberikan secara bertahap dengan kecepatan konstan hingga sambungan las mengalami kepatahan dan akhirnya putus. Selama pengujian berlangsung, instrumen pencatat pada mesin akan merekam data beban maksimum saat material menahan tarikan serta nilai elongasi atau pertambahan panjang yang terjadi hingga spesimen mengalami kegagalan fungsi.

Tahap terakhir penelitian adalah pengolahan dan analisis data hasil pengujian tarik. Tegangan tarik maksimum dihitung menggunakan Persamaan (1), regangan menggunakan Persamaan (2), dan modulus elastisitas dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

dengan  $\sigma$  merupakan tegangan tarik maksimum (MPa),  $F$  merupakan beban atau gaya tarik maksimum yang tercatat oleh mesin uji tarik,  $A$  merupakan luas penampang awal spesimen pada bagian yang diuji (mm<sup>2</sup>),  $\varepsilon$  merupakan regangan tarik,  $\Delta L$  merupakan pertambahan panjang spesimen selama pengujian tarik (mm),  $L_0$  merupakan panjang awal spesimen sebelum diberikan beban tarik (mm), dan  $E$  merupakan modulus elastisitas.

Penentuan modulus elastisitas mengacu pada ASTM E111-17, yang membahas penentuan Young's modulus dari data tegangan-regangan. Dalam penelitian ini, modulus elastisitas dihitung menggunakan rasio tegangan terhadap regangan pada Persamaan (3) [26]. Seluruh data yang diperoleh dari perhitungan ini kemudian diolah secara deskriptif untuk dianalisis hubungan terhadap variasi arus dan jenis elektroda, lalu disajikan dalam bentuk tabel serta grafik untuk mempermudah penarikan kesimpulan ilmiah.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini, hasil yang diperoleh disajikan berdasarkan data pengujian tarik yang mencakup nilai tegangan tarik maksimum, regangan, dan modulus elastisitas dari setiap spesimen hasil pengelasan. Seluruh spesimen dibuat menggunakan elektroda E6013 dan E7016 dengan variasi arus pengelasan sebesar 75 A dan 80 A. Data yang diperoleh kemudian dianalisis dan dibandingkan untuk mengidentifikasi pengaruh perbedaan parameter pengelasan terhadap perubahan sifat mekanik sambungan las. Selain itu, hasil pengujian juga diinterpretasikan dengan mengacu pada teori pengelasan serta temuan penelitian sebelumnya sehingga diperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara masukan panas, karakteristik elektroda, dan kualitas sambungan las yang terbentuk.

Berdasarkan hasil pengujian tarik, diketahui bahwa variasi jenis elektroda dan besar arus pengelasan memberikan dampak yang nyata terhadap karakteristik mekanik sambungan las pada material stainless steel 304. Pengaruh tersebut terlihat dari perbedaan nilai tegangan tarik, regangan, dan modulus elastisitas yang diperoleh pada setiap kombinasi perlakuan.

Variasi parameter pengelasan memengaruhi proses peleburan logam, kedalaman penetrasi, serta distribusi panas selama pengelasan berlangsung, yang pada akhirnya berpengaruh terhadap struktur mikro dan kualitas ikatan metalurgi pada daerah sambungan.

Perbedaan sifat mekanik yang dihasilkan menunjukkan bahwa pemilihan jenis elektroda dan pengaturan arus pengelasan merupakan faktor penting dalam menentukan performa sambungan las. Arus yang digunakan selama proses pengelasan akan memengaruhi jumlah energi panas yang masuk ke material, sedangkan karakteristik elektroda berperan dalam menentukan kestabilan busur listrik, komposisi logam las, dan kualitas deposit las yang terbentuk. Oleh karena itu, kombinasi kedua parameter tersebut perlu dioptimalkan agar diperoleh sambungan las dengan kekuatan mekanik yang baik.

Melalui pembahasan hasil penelitian ini, diharapkan dapat dijelaskan secara lebih rinci hubungan antara variasi elektroda, besar arus pengelasan, dan perubahan sifat mekanik sambungan las pada stainless steel 304. Selain itu, hasil penelitian juga dapat digunakan untuk menentukan kombinasi parameter pengelasan yang paling efektif dalam menghasilkan nilai kekuatan tarik yang optimal sehingga dapat menjadi referensi bagi penerapan proses SMAW di bidang manufaktur maupun konstruksi.

### 3.1 Hasil Kekuatan Tarik Elektroda E6013

Hasil pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik sambungan hasil pengelasan pada masing-masing variasi jenis elektroda dan arus pengelasan. Hasil pengujian tarik yang diperoleh dari setiap spesimen kemudian disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil pengujian tarik menggunakan elektroda E6013

| Spesimen               | Arus | Tegangan (MPa)        | Regangan (%)       | Modulus Elastisitas (MPa) |
|------------------------|------|-----------------------|--------------------|---------------------------|
| 1                      | 75   | 571,74                | 4,65               | 12.283,6                  |
| 2                      | 75   | 419,39                | 1,78               | 23.537,6                  |
| 3                      | 75   | 592,70                | 4,87               | 12.163,7                  |
| <b>Hasil Rata-rata</b> |      | <b>527,94 ± 94,54</b> | <b>3,76 ± 1,74</b> | <b>15.994,9 ± 6.556,0</b> |
| 4                      | 80   | 580,88                | 8,45               | 6870,6                    |
| 5                      | 80   | 409,67                | 2,40               | 17.069,6                  |
| 6                      | 80   | 448,49                | 3,41               | 13.120,8                  |
| <b>Hasil Rata-rata</b> |      | <b>479,68 ± 89,58</b> | <b>4,75 ± 3,24</b> | <b>12.353,6 ± 5.132,3</b> |

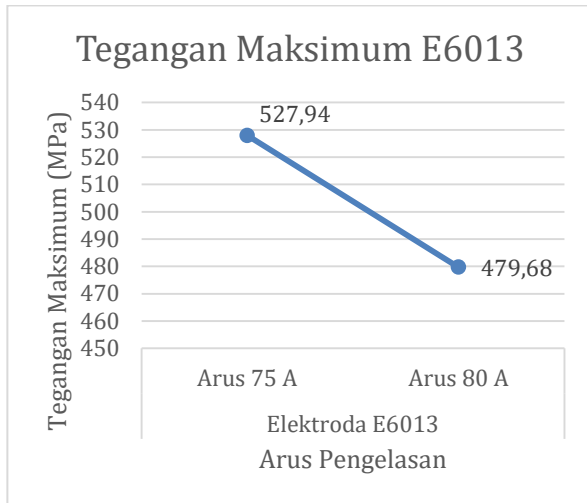
**Keterangan:** Nilai yang disajikan merupakan **rata-rata ± simpangan baku** dari **tiga spesimen pengujian ( $n = 3$ )** untuk setiap variasi arus dan jenis elektroda.

Berdasarkan Tabel 3, penggunaan elektroda E6013 menunjukkan bahwa variasi arus pengelasan memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik sambungan las stainless steel 304. Nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi diperoleh pada arus 75 A sebesar 527,94 MPa, sedangkan pada arus 80 A mengalami penurunan menjadi 479,68 MPa, yang dapat dilihat dari Gambar 2. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan tidak selalu menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi, terutama pada material tipis dengan ketebalan 1,8 mm. Penurunan tersebut diduga berkaitan dengan peningkatan masukan panas pada arus 80 A yang berpotensi memengaruhi kondisi termal dan karakteristik daerah las. Secara metalurgi, peningkatan masukan panas dapat berkaitan dengan perubahan struktur mikro dan daerah terpengaruh panas, yang pada kondisi tertentu dapat memengaruhi sifat mekanik sambungan. Namun, mekanisme tersebut belum dapat dikonfirmasi secara langsung dalam penelitian ini karena tidak dilakukan karakterisasi mikrostruktur maupun pengukuran *dilution*.

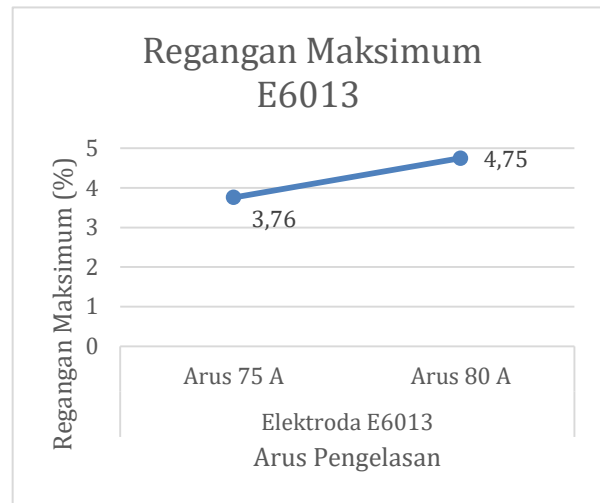
Oleh karena itu, penggunaan arus 75 A pada elektroda E6013 menghasilkan kondisi yang lebih optimum karena mampu menghasilkan nilai tegangan tarik tertinggi pada kondisi penelitian ini. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rosadi *et al.* [17] yang melaporkan



bahwa elektroda E6013 mampu menghasilkan kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan E7016 pada kondisi pengelasan tertentu. Namun demikian, pada penelitian ini material yang digunakan adalah stainless steel 304 sehingga karakteristik sambungan tidak hanya dipengaruhi oleh jenis elektroda, tetapi juga oleh respons termal material terhadap masukan panas selama proses SMAW. Dengan demikian, kombinasi elektroda E6013 dan arus 75 A dapat dinyatakan sebagai kondisi pengelasan yang paling optimal dalam penelitian ini karena menghasilkan kekuatan tarik tertinggi.

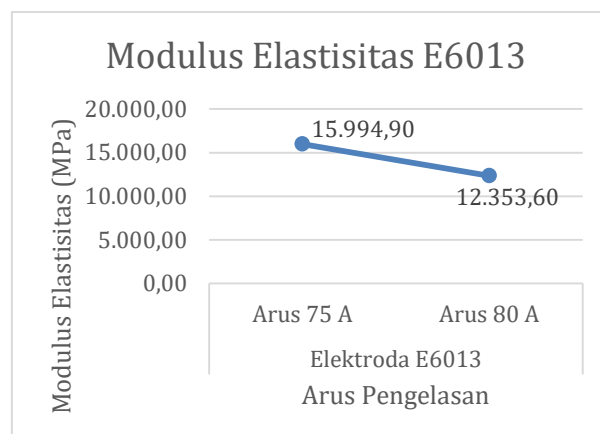


**Gambar 2.** Tegangan maksimum E6013



**Gambar 3.** Regangan maksimum E6013

Hasil pengujian regangan pada Gambar 3 menunjukkan bahwa rata-rata regangan meningkat dari 3,76% pada arus 75 A menjadi 4,75% pada arus 80 A. Peningkatan regangan tersebut mengindikasikan bahwa sambungan las memiliki kemampuan deformasi plastis yang lebih besar sebelum mengalami patah. Akan tetapi, peningkatan keuletan tersebut tidak diikuti oleh peningkatan kekuatan tarik, sehingga menunjukkan adanya hubungan yang berlawanan antara kekuatan dan keuletan material. Kondisi ini diduga disebabkan oleh meningkatnya masukan panas pada arus 80 A yang memengaruhi perubahan struktur mikro di daerah las dan HAZ, sehingga sambungan menjadi lebih mudah mengalami deformasi tetapi memiliki kemampuan menahan beban yang lebih rendah.



**Gambar 4.** Modulus elastisitas E6013

Hal yang sama juga terlihat pada Gambar 4 yaitu nilai modulus elastisitas, di mana rata-rata modulus elastisitas tertinggi diperoleh pada arus 75 A sebesar 15.994,90 MPa, sedangkan pada arus 80 A menurun menjadi 12.353,60 MPa. Penurunan modulus elastisitas menunjukkan berkurangnya kekakuan sambungan las akibat pengaruh masukan panas yang

lebih tinggi. Dengan demikian, kombinasi elektroda E6013 dan arus 75 A tidak hanya menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, tetapi juga memberikan keseimbangan yang lebih baik antara kekuatan, kekakuan, dan kemampuan deformasi, sehingga dapat dianggap sebagai parameter pengelasan yang paling optimal pada penelitian ini.

### 3.2 Hasil Kekuatan Tarik Elektroda E7016

Hasil pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik sambungan hasil pengelasan pada masing-masing variasi jenis elektroda dan arus pengelasan. Hasil pengujian tarik yang diperoleh dari setiap spesimen kemudian disajikan pada Tabel 4.

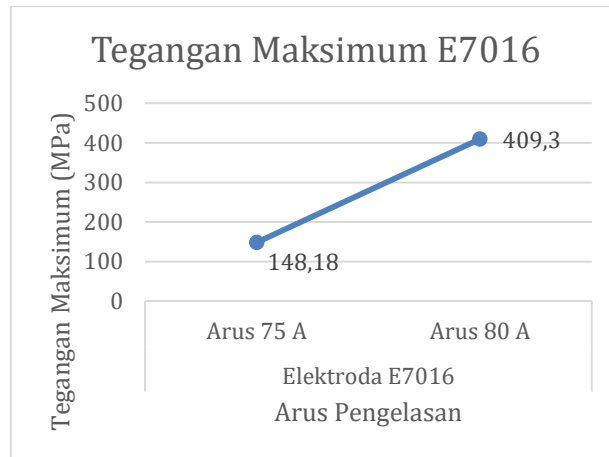
**Tabel 4.** Hasil pengujian tarik menggunakan elektroda E7016

| Spesimen               | Arus | Tegangan (MPa)        | Regangan (%)       | Modulus Elastisitas (MPa)  |
|------------------------|------|-----------------------|--------------------|----------------------------|
| 1                      | 75   | 145,64                | 2,18               | 6675,2                     |
| 2                      | 75   | 149,41                | 0,69               | 21.625,6                   |
| 3                      | 75   | 149,49                | 2,36               | 6324,9                     |
| <b>Hasil Rata-rata</b> |      | <b>148,18 ± 2,20</b>  | <b>1,74 ± 0,92</b> | <b>11.541,9 ± 8.734,5</b>  |
| 4                      | 80   | 498,71                | 4,25               | 11.721,9                   |
| 5                      | 80   | 423,25                | 2,80               | 15.116,2                   |
| 6                      | 80   | 305,95                | 0,98               | 31.162,0                   |
| <b>Hasil Rata-rata</b> |      | <b>409,30 ± 97,13</b> | <b>2,67 ± 1,64</b> | <b>19.333,3 ± 10.383,5</b> |

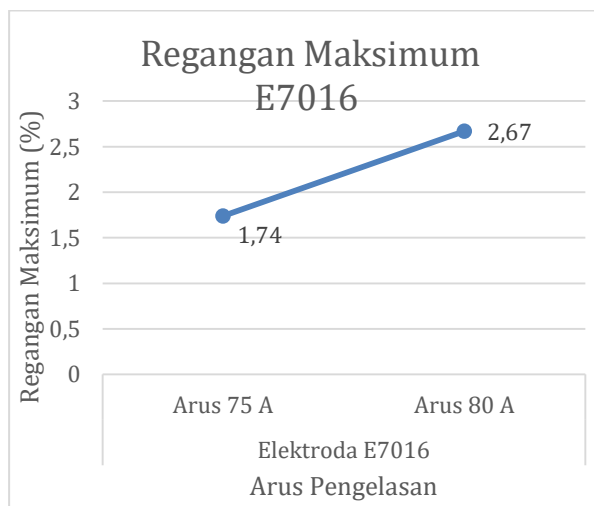
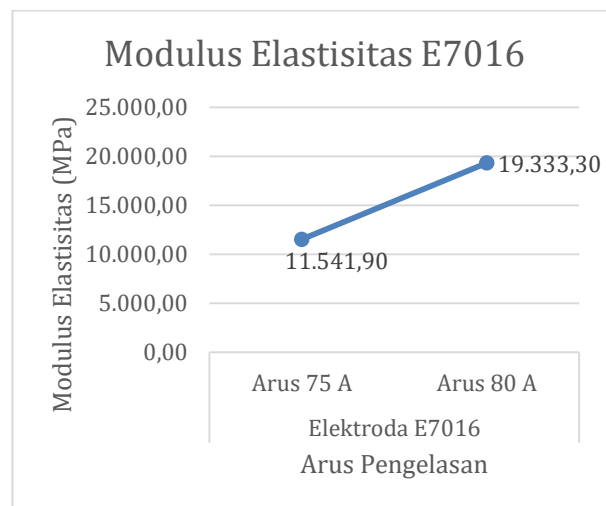
**Keterangan:** Nilai yang disajikan merupakan **rata-rata ± simpangan baku** dari **tiga spesimen pengujian (n = 3)** untuk setiap variasi arus dan jenis elektroda.

Berdasarkan Tabel 4, penggunaan elektroda E7016 menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan dari 75 A menjadi 80 A memberikan peningkatan yang cukup besar terhadap kekuatan tarik sambungan las stainless steel 304. Nilai kekuatan tarik rata-rata meningkat dari 148,18 MPa pada arus 75 A menjadi 409,30 MPa pada arus 80 A. Kondisi ini menunjukkan bahwa arus 75 A belum mampu menghasilkan peleburan elektroda E7016 secara optimal. Elektroda E7016 merupakan elektroda tipe *low hydrogen* yang memiliki karakteristik penetrasi lebih dalam dan membutuhkan masukan panas yang lebih tinggi dibandingkan elektroda E6013. Apabila arus yang digunakan terlalu rendah, peleburan elektroda dan logam induk menjadi kurang sempurna sehingga berpotensi menyebabkan ikatan metalurgi yang kurang baik pada daerah sambungan. Sebaliknya, penggunaan arus 80 A menghasilkan masukan panas yang lebih sesuai sehingga proses peleburan berlangsung lebih optimal, penetrasi las meningkat, dan terbentuk ikatan metalurgi yang lebih baik antara logam pengisi dan logam induk.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Rosadi *et al.* [17] yang melaporkan bahwa elektroda E7016 menunjukkan performa mekanik yang lebih baik ketika digunakan pada arus yang sesuai dengan karakteristiknya. Dengan demikian, arus 80 A dapat dikatakan sebagai kondisi yang lebih optimum untuk penggunaan elektroda E7016 pada penelitian ini.

**Gambar 5.** Tegangan maksimum E7016

Pada Gambar 5, terdapat perbedaan kekuatan tarik yang cukup besar antara penggunaan arus 75 A dan 80 A, yang menunjukkan adanya indikasi bahwa kondisi pengelasan pada arus 75 A belum mencapai parameter optimum untuk elektroda E7016. Nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 148,18 MPa tergolong jauh lebih rendah dibandingkan perlakuan lainnya. Kondisi tersebut diduga dipengaruhi oleh masukan panas yang belum mencukupi sehingga peleburan elektroda E7016 dan logam induk berlangsung kurang optimal. Akibatnya, ikatan metalurgi pada daerah sambungan kemungkinan belum terbentuk secara sempurna sehingga kemampuan sambungan dalam menahan beban tarik menjadi lebih rendah. Selain itu, variasi hasil juga dapat dipengaruhi oleh faktor proses pengelasan manual, seperti kestabilan panjang busur, kecepatan gerak elektroda, serta distribusi panas selama proses pengelasan. Namun demikian, karena penelitian ini tidak disertai pengamatan makrostruktur maupun mikrostruktur hasil las, penyebab pasti rendahnya nilai kekuatan tarik tersebut belum dapat dipastikan dan memerlukan penelitian lanjutan dengan karakterisasi struktur sambungan las.

**Gambar 6.** Regangan maksimum E7016**Gambar 7.** Modulus elastisitas E7016

Peningkatan arus pengelasan juga berpengaruh terhadap nilai regangan dan modulus elastisitas sambungan las. Pada Gambar 6 rata-rata regangan meningkat dari 1,74% pada arus 75 A menjadi 2,67% pada arus 80 A, sedangkan modulus elastisitas meningkat dari 11.541,90 MPa menjadi 19.333,30 MPa, yang dapat dilihat pada Gambar 7. Peningkatan regangan

menunjukkan bahwa sambungan las memiliki kemampuan deformasi plastis yang lebih baik sebelum mengalami kegagalan, sedangkan peningkatan modulus elastisitas menunjukkan bertambahnya kekakuan sambungan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa penggunaan arus 80 A mampu menghasilkan kualitas sambungan las yang lebih baik dibandingkan arus 75 A. Secara metalurgi, masukan panas yang sesuai pada arus 80 A memungkinkan terbentuknya penetrasi yang lebih baik tanpa menyebabkan penurunan sifat mekanik, sehingga menghasilkan kombinasi kekuatan tarik, keuletan, dan kekakuan yang lebih seimbang. Oleh karena itu, kombinasi elektroda E7016 dengan arus 80 A dapat dianggap sebagai parameter yang paling efektif untuk menghasilkan sifat mekanik terbaik pada kelompok elektroda E7016 dalam penelitian ini.

### 3.3 Perbedaan Kekuatan Tarik Maksimum Elektroda E6013 dan E7016

Berdasarkan hasil pengujian, kedua jenis elektroda menunjukkan karakteristik yang berbeda terhadap sifat mekanik sambungan las stainless steel 304. Elektroda E6013 menghasilkan kekuatan tarik tertinggi pada arus 75 A, sedangkan peningkatan arus menjadi 80 A justru menurunkan kekuatan tarik. Sebaliknya, elektroda E7016 menunjukkan kecenderungan yang berbeda, di mana peningkatan arus dari 75 A menjadi 80 A meningkatkan kekuatan tarik, regangan, dan modulus elastisitas sambungan las. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap jenis elektroda memiliki karakteristik kerja dan kebutuhan masukan panas yang berbeda.

Perbedaan perilaku kedua elektroda dipengaruhi oleh karakteristik lapisan *fluks* yang dimilikinya. Elektroda E6013 merupakan elektroda tipe *rutile* yang menghasilkan busur listrik lebih stabil, mudah dinyalakan, dan sesuai digunakan pada arus yang relatif rendah, sehingga mampu menghasilkan kualitas sambungan yang baik pada pelat stainless steel 304 dengan ketebalan 1,8 mm menggunakan arus 75 A. Sebaliknya, elektroda E7016 merupakan elektroda tipe *low hydrogen* yang dirancang untuk menghasilkan sifat mekanik sambungan yang lebih baik, namun membutuhkan masukan panas yang lebih tinggi agar peleburan elektroda dan logam induk berlangsung secara optimal. Oleh karena itu, penggunaan arus 80 A memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan 75 A pada elektroda E7016.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa elektroda E6013 lebih sesuai digunakan pada arus 75 A, sedangkan elektroda E7016 memberikan performa yang lebih baik pada arus 80 A. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis elektroda tidak dapat dipisahkan dari pemilihan parameter arus pengelasan karena keduanya saling memengaruhi dalam menentukan kualitas sambungan las. Dengan demikian, pemilihan parameter pengelasan yang sesuai dengan karakteristik elektroda menjadi faktor penting untuk memperoleh sifat mekanik sambungan las yang optimal pada material stainless steel 304.

## 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa adanya perbedaan sifat mekanik sambungan las pada variasi jenis elektroda dan arus pengelasan. Pada penggunaan elektroda E6013, arus pengelasan 75 A menghasilkan sifat mekanik yang paling baik dengan kekuatan tarik lebih tinggi dibandingkan arus 80 A. Sebaliknya, pada penggunaan elektroda E7016, peningkatan arus menjadi 80 A menghasilkan peningkatan kekuatan tarik, regangan, dan modulus elastisitas dibandingkan arus 75 A. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa setiap jenis elektroda memiliki karakteristik kerja dan kebutuhan masukan panas yang berbeda

sehingga pemilihan parameter arus harus disesuaikan dengan karakteristik elektroda yang digunakan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi E6013 pada arus 75 A menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi pada kondisi penelitian ini. Temuan ini memberikan informasi yang dapat dijadikan sebagai acuan dalam pemilihan jenis elektroda dan parameter arus pengelasan SMAW untuk memperoleh sambungan las dengan sifat mekanik yang lebih baik, khususnya pada material stainless steel 304.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena evaluasi sifat mekanik hanya didasarkan pada hasil uji tarik tanpa disertai pengamatan makrostruktur, mikrostruktur, maupun analisis cacat hasil pengelasan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan karakterisasi struktur mikro, pengujian kekerasan, serta analisis daerah terpengaruh panas sehingga hubungan antara parameter pengelasan, perubahan struktur mikro, dan sifat mekanik sambungan las dapat dijelaskan secara lebih komprehensif.

### Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin Universitas Hasyim Asy'ari Tebuireng Jombang atas fasilitas yang telah disediakan selama pelaksanaan penelitian dan pengujian.

### Pernyataan

**Kontribusi Penulis.** A.A.: konseptualisasi penelitian, perancangan metode, penerapan konsep, analisis data, penulisan konsep awal naskah. B.: pengawasan penelitian, evaluasi hasil, peninjauan dan penyuntingan naskah, persetujuan akhir naskah, supervisi penelitian. R.E.P dan D.A.R.W.: pengawasan penelitian, pengawasan pengumpulan dan pengolahan data, dan validasi eksperimen.

**Pendanaan.** Penelitian ini didanai oleh penulis pribadi.

**Konflik Kepentingan.** Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan terkait publikasi artikel ini.

**Ketersediaan Data.** Data tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar.

**Penggunaan Kecerdasan Buatan (AI).** Penulis menyatakan bahwa penggunaan alat berbasis kecerdasan buatan (AI) hanya terbatas pada aspek penyuntingan bahasa dan tidak memengaruhi substansi ilmiah penelitian.

### Daftar Referensi

- [1] R. Conte, F. R. Battista, and G. Ambrogio, "Submerged arc welding process: enhancement of production performance based on metallurgical observations," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 134, pp. 781–793, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14153-y.
- [2] C. González-González, J. Los Santos-Ortega, E. Fraile-García, and J. Ferreiro-Cabello, "Environmental and economic analyses of TIG, MIG, MAG and SMAW welding processes," *Metals*, vol. 13, no. 6, Art. no. 1094, 2023, doi: 10.3390/met13061094.
- [3] A. D. Shiedieque, A. Abdullah, D. A. Rajab, and J. Jafarudin, "Analisis kekuatan mekanis A304 menggunakan logam pengisi E308 pada pengelasan GTAW dengan variasi parameter," *Metal Indonesia*, vol. 43, no. 1, pp. 17–26, 2021, doi: 10.32423/jmi.2021.v43.17-26.
- [4] D. K. Pratiwi, A. Arifin, Gunawan, A. Mardhi, and Afriansyah, "Investigation of welding parameters of dissimilar weld of SS316 and ASTM A36 joint using a grey-

- based Taguchi optimization approach,” *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 1, Art. no. 39, 2023, doi: 10.3390/jmmp7010039.
- [5] S. S. S. Elfallah, H. Z. Abdullah, and M. I. Idris, “Effect of GTAW on the mechanical properties of mild steel,” *Journal of Advanced Mechanical Engineering Applications*, vol. 3, no. 2, pp. 57–65, 2022.
- [6] K. Kornokar, F. Nematzadeh, H. Mostaan, A. Sadeghian, M. Moradi, D. G. Waugh, and M. Bodaghi, “Influence of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Gas Tungsten Arc Welded HSLA S500MC Steel Joints,” *Metals*, vol. 12, no. 4, Art. no. 565, 2022, doi: 10.3390/met12040565.
- [7] A. Pratama, N. Subeki, and A. F. H. Soegiharto, “Pengaruh heat input pengelasan terhadap distorsi mikrostruktur dan sifat mekanis aluminium 5052,” *TURBINE: Journal Technology Urgency Breakthrough in Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 409–420, 2025.
- [8] S. F. Welly S. and N. S. Drastiawati, “Pengaruh preheat dan variasi arus pengelasan pada material SA 516 G70 terhadap sifat mekanik dan struktur mikro,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 3, pp. 35–42, 2023, doi: 10.26740/jtm.v11n03.p35-42.
- [9] D. A. Rajab, L. Artitana, and A. Suprayitno, “Analysis of SMAW in different materials with electrode variations,” *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, vol. 8, no. 2, pp. 113–125, 2024, doi: 10.21831/dinamika.v8i2.64465.
- [10] M. Sarifudin and P. H. Tjahjanti, “Karakteristik pengelasan shield metal arc welding (SMAW) dan gas tungsten arc welding (GTAW) pada plat stainless steel 201 di tabung air minum,” *Innovative Technologica: Methodical Research Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.47134/innovative.v3i1.98.
- [11] S. S. R. Singh, R. V. Praneeth, V. Sai Sankalp, S. Sravan Sashank, and R. Karthikeyan, “Welding, mechanical properties and microstructure of different grades of austenitic stainless steels: A review,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, part 6, pp. 3675–3680, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.425.
- [12] D.-H. Lee, B. Sun, S. Lee, D. Ponge, E. A. Jäggle, and D. Raabe, “Comparative study of hydrogen embrittlement resistance between additively and conventionally manufactured 304L austenitic stainless steels,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 803, Art. no. 140499, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140499.
- [13] A. H. Laksana, C. U. S. B. Himawan, M. A. Basuki, and Y. B. Prasetya, “Pengaruh variasi arus listrik pada pengelasan SMAW material stainless steel 304 dengan elektroda E308 terhadap kekuatan mekanik dan struktur mikro,” *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 21, no. 2, pp. 320–327, 2023, doi: 10.31963/sinergi.v21i2.4176.
- [14] M. Saleh, “Studi pengelasan TIG pada material SUS 304 ditinjau dari kekuatan dan sifat mekanis,” *Global Education Journal*, vol. 1, no. 3, pp. 451–458, 2023, doi: 10.59525/gej.v1i3.159.
- [15] H. M. Munawar, I. N. Gusniar, and R. Hanafi, “Pengaruh jenis elektroda las SMAW terhadap sifat mekanik dan struktur mikro,” *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 11, no. 1, pp. 93–110, 2023.
- [16] S. Gunawan, Karyadi, and M. T. Ulhakim, “Analisis pengaruh jenis elektroda terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan SMAW material baja S45C,” *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, vol. 12, no. 2, pp. 154–163, 2024, doi: 10.23887/jptm.v12i2.83515.
- [17] M. A. Rosadi, A. Suprihanto, F. X. A. Wahyudianto, A. Hariyanto, and A. Muis, “Pengaruh pengelasan SMAW dengan variasi elektroda E6013 dan E7016 terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada baja SS400,” *Simetris: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Ilmu Komputer*, vol. 17, no. 1, pp. 39–48, 2026, doi: 10.24176/simet.v17i1.17004.
- [18] M. R. Kurniawan and N. S. Drastiawati, “Pengaruh variasi jenis elektroda pengelasan shield metal arc welding (SMAW) terhadap kekuatan tarik dan bending sambungan las



- pada material baja ST 37 untuk aplikasi paddock,” *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 123–128, 2024.
- [19] V.-T. Nguyen, P. S. Minh, T. M. T. Uyen, T. T. Do, H. V. T. N. Ngoc, M.-T. Le, and V. T. T. Nguyen, “WAAM technique: Process parameters affecting the mechanical properties and microstructures of low-carbon steel,” *Metals*, vol. 13, no. 5, Art. no. 873, 2023, doi: 10.3390/met13050873.
- [20] D. Pamungkas, S. Hastuti, and I. Taufik, “Strength analysis of SMAW welding butt joint on ST-37 material with variation of electrode and welding speed,” *Elemen: Jurnal Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 29–35, 2024, doi: 10.34128/je.v11i1.277.
- [21] L. F. Tuwo, B. Tangaran, and K. Pasau, “Analisa pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik baja ST 41 hasil pengelasan SMAW,” *Paulus Mechanical Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 9–13, 2025.
- [22] Q. Matin, R. Haliq, A. I. Ismail, and M. Jamil, “Analysis of shielded metal arc welding (SMAW) with current variations against tensile strength, bending strength, and microstructure of API 5L X52,” *Indonesian Journal of Maritime Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 1–6, 2024. doi: 10.35718/ismatech.v2i1.1055.
- [23] Y. Luo, W. Gu, W. Peng, Q. Jin, Q. Qin, and C. Yi, “A study on microstructure, residual stresses and stress corrosion cracking of repair welding on 304 stainless steel: Part I-effects of heat input,” *Materials*, vol. 13, no. 10, Art. no. 2416, 2020. doi: 10.3390/ma13102416.
- [24] W. Wartono, E. P. Aditya, and N. R. Dian, “Pengaruh heat input terhadap struktur mikro dan sifat mekanis sambungan TIG pada stainless steel 304,” *Jurnal Teknik Mesin MERC*, vol. 2, no. 2, 2019.
- [25] Sungkono and S. Ismarwanti, “Perilaku tarik dan struktur mikro baja tahan karat AISI 304 pasca perlakuan panas pada daerah sensitisasi 600–700 °C,” *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 27, no. 3, pp. 123–132, 2021. doi: 10.17146/urania.2021.27.3.6570.
- [26] ASTM International, “Standard test method for Young’s modulus, tangent modulus, and chord modulus,” ASTM E111-17(2025)e1, 2025, doi: 10.1520/E0111-17R25E01.