

## PENGARUH VARIASI ELEKTRODA TERHADAP SIFAT MEKANIK PADA SAMBUNGAN PENGELASAN SMAW BAJA KARBON RENDAH ST40

Yufi Ikbal \*<sup>1</sup>  
Razali <sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Politeknik Negeri Bengkalis

\*e-mail: [yufiqbalslp001@gmail.com](mailto:yufiqbalslp001@gmail.com), [razali@polbeng.ac.id](mailto:razali@polbeng.ac.id)

### Abstrak

*Pengelasan SMAW adalah pengelasan dengan busur nyala listrik yang digunakan sebagai sumber panas untuk mencairkan logam (elektroda) penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik pada baja ST40 setelah dilakukan pengelasan. menggunakan variasi elektroda yang berbeda yaitu. E6013, E7016, E7018 dan tegangan ampre 90A, bahan yang digunakan jenis material baja karbon rendah dengan ketebalan 10 mm, penelitian ini menggunakan dua jenis pengujian yaitu uji pengujian tarik dan uji Kekerasan Rockwell. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan rockwell dengan variasi lektroda yang berbeda nilai kekerasan yang terbaik untuk daerah las terdapat pada elektroda 7018 denan nilai kekerasan sebesar 95,7 kgf. Dan untuk hasil pengujian tarik dengan bervariasi elektroda yang berbeda terdapat pada elektroda 6013 memiliki kekuatan tarik sebesar 414,14 N/mm dan nilai regangan sebesar 8.57 % dan nilai elastisitas 4855.77 N/mm.*

**Kata kunci:** Elektroda, Baja Karbon Rendah, Pengujian Tarik, dan Uji Rockwell.

### Abstract

*SMAW welding is a type of welding that uses an electric arc as a heat source to melt the metal (electrode). This study aims to determine the mechanical properties of ST40 steel after welding using different electrode variations, namely E6013, E7016, E7018, and a current of 90A. The material used is low carbon steel with a thickness of 10 mm. The study involves two types of tests: tensile testing and Rockwell hardness testing. Based on the results of the Rockwell hardness test with different electrode variations, the best hardness value for the weld area was found with the E7018 electrode, which had a hardness value of 95.7 kgf. For the tensile test results, the E6013 electrode showed the highest tensile strength with a value of 305.39 N/mm, a strain value of 7.27%, and an elasticity value of 3563.47 N/mm.*

**Keywords:** Electrode, Low Carbon Steel, Tensile Testing, Rockwell Testing

## PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di bidang konstruksi mesin tidak dapat dipisahkan dari pengelasan, yang memainkan peran penting dalam rekayasa dan reparasi logam. Dalam konstruksi mesin saat ini, pengelasan menjadi sangat krusial, terutama dalam bidang rancang bangun. Sambungan las adalah salah satu metode pembuatan sambungan yang membutuhkan keterampilan tinggi agar dapat menghasilkan sambungan dengan kualitas yang baik. Pengelasan bukan tujuan utama dari konstruksi mesin, tetapi merupakan sarana untuk mencapai pembuatan yang lebih baik. Oleh karena itu, rancangan las harus memperhatikan kesesuaian antara sifat-sifat las, yaitu kekuatan dari sambungan yang akan dilas. Hasil pengelasan yang baik tidak hanya bergantung pada keterampilan pengelas, tetapi juga pada pemilihan elektroda yang sesuai dengan jenis material logam induk. Elektroda yang tepat akan mencair dan menyatu dengan logam induk, mempengaruhi kekuatan dari hasil pengelasan. Selain jenis elektroda, parameter-parameter pengelasan seperti tegangan, arus, dan kecepatan pengelasan juga berpengaruh besar terhadap hasil pengelasan.

Salah satu aspek kritis dalam proses pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding) adalah variasi elektroda yang digunakan. Elektroda yang berbeda dapat memberikan pengaruh signifikan pada sifat mekanik sambungan pengelasan, termasuk komposisi kimia elektroda, diameter, dan jenis lapisan pelindung. Penelitian mengenai pengaruh variasi elektroda pada sambungan pengelasan SMAW pada baja St 40 sangat penting untuk meningkatkan kualitas dan keandalan sambungan tersebut.

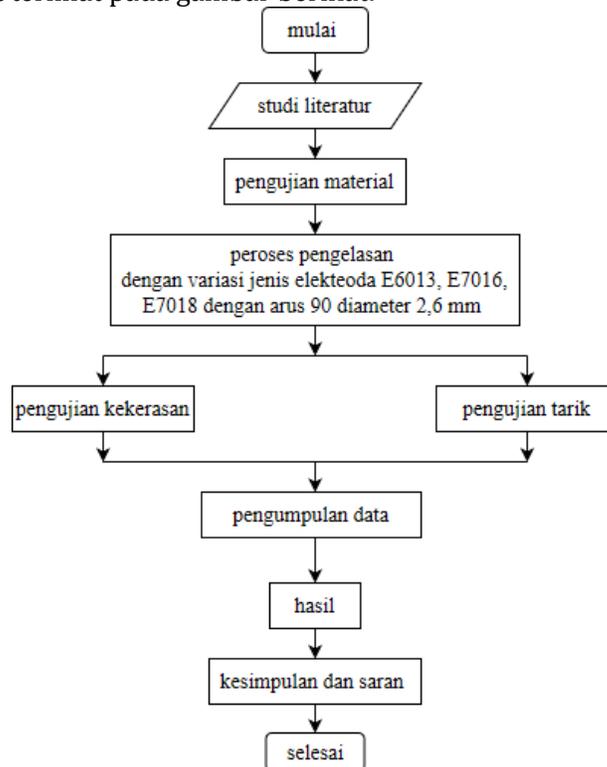
Permintaan industri akan sambungan pengelasan yang memiliki sifat mekanik optimal semakin meningkat, mengingat sambungan pengelasan yang berkualitas tinggi dapat meningkatkan ketahanan terhadap beban mekanis, keausan, dan korosi, yang sangat penting dalam aplikasi konstruksi dan manufaktur.

Variasi elektroda dapat mempengaruhi sifat mekanik sambungan pengelasan seperti kekuatan tarik, kekuatan luluh, kekerasan, dan ketangguhan. Elektroda dengan komposisi kimia yang berbeda dapat menghasilkan struktur mikro yang beragam, yang pada gilirannya memengaruhi sifat mekanik sambungan. Kajian ini akan memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana pemilihan elektroda dapat memaksimalkan atau meminimalkan sifat mekanik tertentu, sesuai dengan kebutuhan aplikasi spesifik. Memahami secara mendalam pengaruh variasi elektroda pada sambungan pengelasan SMAW baja dapat mengoptimalkan proses pengelasan untuk mencapai keseimbangan yang tepat antara sifat mekanik.

Hasil dari penelitian ini akan memberikan panduan berharga bagi para insinyur dan produsen dalam pemilihan elektroda yang sesuai untuk aplikasi tertentu, sehingga dapat meningkatkan kualitas dan daya tahan sambungan pengelasan dalam berbagai lingkungan kerja. Dalam penelitian ini, penulis akan melakukan penelitian lanjutan dengan memvariasikan jenis elektroda lain dengan diameter elektroda 2,6 mm, yaitu E7016, E6013, dan E7018, untuk mengetahui pengaruh jenis elektroda terhadap material menggunakan pengelasan SMAW baja karbon rendah St 40.

**METODE**

Metode penelitian dapat terlihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Diagram Alir Proses Penelitian

Setelah dilakukan tahap-tahap penelitian mengenai pengaruh variasi elektroda terhadap kekuatan tarik dan kekerasan pada sambungan pengelasan SMAW baja St 40, percobaan dilakukan dengan menggunakan variasi elektroda yang berbeda. Proses ini melibatkan pengelasan dengan elektroda-elektroda yang bervariasi dan kemudian mengukur kekuatan tarik serta kekerasan

sambungan untuk menilai pengaruhnya terhadap sifat mekanik. Metode ini memerlukan peralatan pengukuran yang tepat. Data yang diperoleh akan dimasukkan ke dalam bentuk tabel. Penelitian ini mencakup proses dan tahapan pengambilan serta analisis data. Pengambilan data dilakukan pada spesimen yang telah dilas menggunakan tiga variasi elektroda yang berbeda, yaitu E6013, E7016, dan E7018. Pengujian dilakukan dengan tiga spesimen uji, di mana pada setiap spesimen diambil tiga titik pengujian: satu titik pada logam induk, satu titik pada batas HAZ, dan satu titik lagi pada daerah lasan. Hasil pengujian nilai kekerasan Rockwell dari tiap titik ini akan dimasukkan ke dalam tabel.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Mikro melihat Panjang HAZ**

Untuk melihat panjang *Heat-Affected Zone* (HAZ) secara mikro, dapat dilakukan pengambilan spesimen yang mewakili keseluruhan sampel. Selain itu, pengamatan visual juga dapat dilakukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas. Hasil pengamatan ini dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2. Panjang HAZ

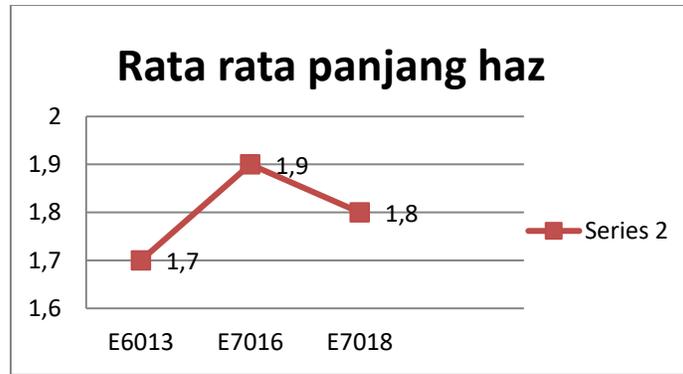
Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Pengujian kekerasan *Rockwell* pada daerah las dan panjang *HAZ* dilakukan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas terhadap lasan. Hasil pengujian ini memberikan informasi mengenai bagaimana perlakuan panas mempengaruhi panjang *HAZ*. Data lengkap mengenai panjang batasan *HAZ* dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini.

Tabel 1. Nilai Panjang HAZ

No	Variasi Elektroda	Panjang HAZ (mm)			Rata (mm)
1	Elektroda 6013	1,7	1,7	1,8	1,7
2	Elektroda 7016	1,9	1,9	2	1,9
3	Elektroda 7018	1,8	1,9	1,9	1,8

Sumber: Hasil Penelitian, 2024



Gambar 3. Nilai Panjang HAZ  
 Sumber: Hasil Penelitian, 2024

**B. Pengujian Kekerasan Rockwell**

Pada penelitian ini, pengambilan data pertama dilakukan dengan menggunakan nilai uji kekerasan Rockwell menggunakan variasi elektroda yang berbeda. Pengujian ini dilakukan dengan tiga spesimen uji untuk setiap variasi elektroda. Setiap spesimen diambil hanya dari tiga titik pengujian, yaitu satu titik untuk logam induk, satu titik untuk batas HAZ, dan satu titik lagi untuk daerah lasan. Untuk melihat tabel proses pengambilan data nilai uji kekerasan Rockwell, silakan lihat di bagian berikut.

Tabel 2. Hasil Kekerasan Rockwell E 6013

Jenis variasi	Daerah Titik	Hasil Uji Kekerasan HRC			Rata rata Kgf
		Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	
Elektroda 6013	Daerah las	93	88	84,5	88,1
		94,5	92	83,5	
		84,5	90	83,5	
	HAZ	79	75	79,5	77,8
		79	79	78	
		77,5	78	75,5	
	Logam induk	70,5	75	70	72,1
		71	73,5	71	
		72	73	73	

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Berdasarkan sajian tabel di atas, hasil pengelasan menggunakan elektroda 6013 menunjukkan nilai kekerasan Rockwell pada berbagai area yang diuji. Nilai kekerasan Rockwell pada daerah las sebesar 88,1 kgf, sedangkan pada batas HAZ sebesar 77,8 kgf, dan pada logam induk sebesar 72,1 kgf. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan tertinggi terdapat pada daerah las, yaitu sebesar 88,1 kgf. Hal ini menunjukkan bahwa daerah las memiliki kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan dengan batas HAZ dan logam induk.

Kemudian berikut disajikan hasil pengujian *rockwell* menggunakan elektroda E 7016:

Tabel 3. Hasil Kekerasan E7016

Jenis variasi	Daerah titik	Hasil Uji Kekerasan HRC			Rata rata Kgf
		Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	
Elektroda 7016	Daerah las	95,5	90	93,5	94,7
		97	98	90	
		97,5	99	92	

	HAZ	77	76	75,5	76,6
		77,5	74	74	
		79	77,5	79	
	Logam induk	79	79	72	76
		75	78,5	74,5	
		74	81	71	

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Hasil pengujian kekerasan Rockwell dengan menggunakan elektroda E 7016, sebagaimana ditunjukkan pada tabel di atas, terungkap beberapa temuan penting. Nilai kekerasan Rockwell untuk daerah las tercatat sebesar 94,7 kgf, sedangkan batas HAZ memiliki nilai sebesar 76,7 kgf, dan logam induk sebesar 76 kgf. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan tertinggi diperoleh di daerah las, dengan nilai mencapai 94,7 kgf. Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E 7016 memberikan kekerasan yang paling signifikan pada daerah las dibandingkan dengan batas HAZ dan logam induk. Temuan ini penting untuk mempertimbangkan pemilihan elektroda dalam aplikasi pengelasan yang memerlukan kekerasan tinggi di daerah las.

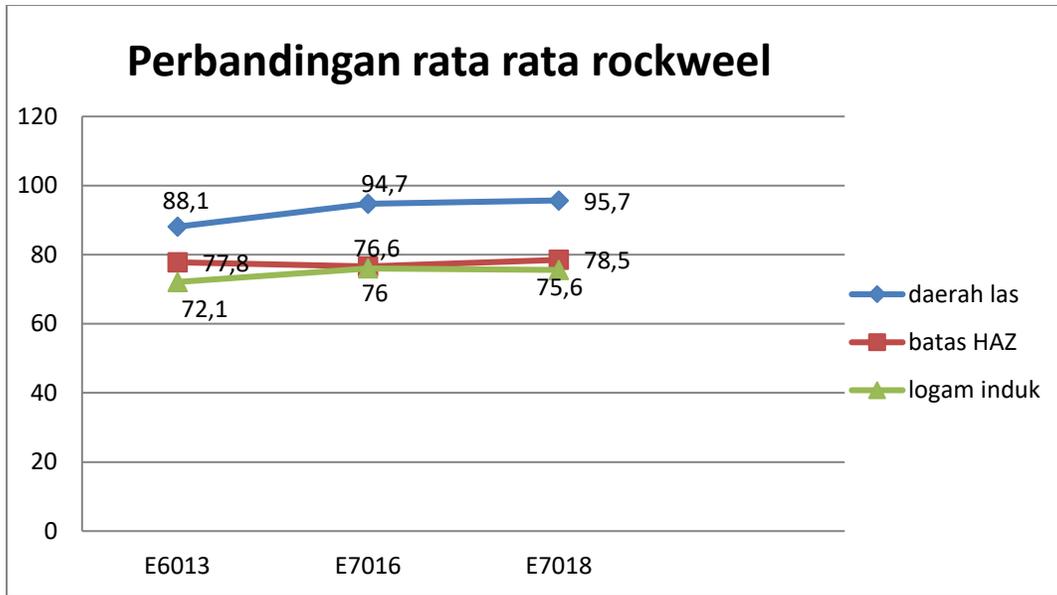
Tabel 4. Hasil Kekerasan E7018

Jenis variasi	Daerah titik	Hasil Uji Kekerasan HRC			Rata rata kgf
		Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	
Elektroda 7018	Daerah las	95,5	95	92	95,7
		98,5	98,5	94	
		98	95	95,5	
	HAZ	78,5	80	78	78,5
		75	79,5	79	
		79,5	79,5	79,5	
	Logam induk	76,5	76	77	75,6
		74	72	74	
		75,5	78	77,5	

Sumber: Hasil Penelitian, 2024

Hasil pengujian kekerasan Rockwell yang menggunakan elektroda E7018 menunjukkan beberapa hasil signifikan sebagaimana tersaji pada tabel di atas. Pengelasan yang dilakukan dengan elektroda E7018 menghasilkan nilai kekerasan Rockwell pada daerah las sebesar 95,7 kgf, pada batas HAZ sebesar 78,5 kgf, dan pada logam induk sebesar 75,6 kgf. Dari data ini, dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada daerah las dengan angka 95,7 kgf. Kesimpulan dari pengujian ini adalah bahwa proses pengelasan dengan elektroda E7018 menghasilkan peningkatan kekerasan yang signifikan pada daerah las dibandingkan dengan batas HAZ dan logam induk. Hal ini menunjukkan efektivitas elektroda E7018 dalam meningkatkan kekerasan dan ketahanan material di daerah las.

Guna melihat lebih jelas hasil pengukuran nilai kekerasan Rockwell dari 3 elektroda yang berbeda, berikut disajikan perbandingannya dalam bentuk grafik.



Gambar 4. Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Rockwell  
 Sumber: Olahan Peneliti, 2024

Grafik perbandingan kekerasan Rockwell memberikan informasi yang mendetail mengenai performa berbagai elektroda yang digunakan dalam proses pengelasan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa elektroda E7018 menghasilkan nilai kekerasan terbaik untuk daerah lasan, dengan kekerasan mencapai 95,7 kgf. Ini menunjukkan bahwa elektroda E7018 mampu memberikan hasil yang optimal dalam memperkuat daerah lasan. Selain itu, elektroda E7018 juga menunjukkan performa unggul pada batas Heat-Affected Zone (HAZ), dengan nilai kekerasan tertinggi sebesar 78,5 kgf. Ini mengindikasikan bahwa elektroda E7018 tidak hanya efektif dalam memperkuat daerah lasan, tetapi juga mampu menjaga kekuatan pada batas HAZ yang seringkali menjadi area kritis dalam pengelasan. Untuk logam induk, elektroda E7016 menghasilkan nilai kekerasan tertinggi sebesar 75,6 kgf. Meskipun tidak setinggi nilai yang dicapai oleh elektroda E7018 di daerah lasan dan HAZ, ini menunjukkan bahwa elektroda E7016 masih memberikan performa yang baik dalam menjaga kekerasan logam induk. Nilai kekerasan yang tinggi ini dapat dijelaskan oleh perlakuan panas yang terjadi selama proses pengelasan. Perlakuan panas ini menyebabkan pertumbuhan kristal pada baja, yang pada gilirannya meningkatkan kekerasan material. Proses ini penting untuk memahami bagaimana perlakuan panas mempengaruhi sifat mekanis dari spesimen uji. Dengan demikian, dari hasil pengujian kekerasan Rockwell, dapat disimpulkan bahwa elektroda E7018 memberikan hasil terbaik dalam hal kekerasan, baik untuk daerah lasan maupun batas HAZ. Hal ini menjadikan elektroda E7018 sebagai pilihan yang sangat baik untuk aplikasi yang memerlukan kekuatan dan kekerasan tinggi pada area lasan dan sekitarnya.

**C. Analisa Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell**

Analisa pengujian kekerasan pada karbon rendah ST40 dilakukan dengan menggunakan aplikasi Minitab dan metode ANOVA Three Way. Berikut disajikan hasil dari pengujian kekerasan *rockwell*.

- *Factor Information*

Tabel 5. Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
jenis elektroda	Fixed	3	6013, 7016, 7018
daerah titik	Fixed	3	daerah las, haz, logam induk

Sumber: Olahan Peneliti, 2024

Merujuk pada sajian tabel di atas, faktor jenis elektroda bersifat tetap dan terdiri dari tiga level, yaitu elektroda tipe 6013, 7016, dan 7018. Faktor daerah titik juga bersifat tetap, dengan pengukuran yang dilakukan pada tiga daerah berbeda: daerah las, HAZ (Heat-Affected Zone), dan logam induk. Dengan menetapkan kedua faktor ini sebagai faktor tetap, metode ANOVA Three Way memungkinkan kita untuk mengevaluasi pengaruh individu dari masing-masing faktor serta interaksinya terhadap kekerasan material yang diuji.

- *Analysis of Variance*

Tabel 6. Analysis of Variance

Source	DF	Adj MS	Adj MS	F-Value	P-Value
jenis elektroda	2	25.78	12.888	2.66	0.184
titik Pengujian	2	574.12	287.058	59.23	0.001
Error	4	19.38	4.846		
Total	8	619.28			

(Sumber: Data Olahan Minitab)

Tabel 6. menyajikan hasil analisis varians yang digunakan untuk mengevaluasi apakah terdapat perbedaan signifikan dalam tekanan yang diukur berdasarkan tingkat viskositas. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai setiap kolom dalam tabel tersebut:

1. *Adj MS (Adjusted Mean Square atau Mean Square)*

✓ Jenis Elektroda: Total Sum of Squares (jumlah kuadrat total) untuk faktor jenis elektroda adalah 25.78. Nilai ini dibagi dengan derajat kebebasan (degrees of freedom) sebesar 2, menghasilkan nilai Mean Square sebesar 12.888. Ini menggambarkan variasi yang dijelaskan oleh faktor jenis elektroda dalam analisis.

✓ Titik Pengujian: Total Sum of Squares untuk faktor titik pengujian adalah 574.12. Setelah dibagi dengan derajat kebebasan yang juga 2, diperoleh nilai Mean Square sebesar 287.058. Ini menunjukkan kontribusi variasi dari titik pengujian terhadap total variasi dalam data.

✓ Error: Total Sum of Squares untuk error adalah 19.38. Ketika nilai ini dibagi dengan derajat kebebasan yang berjumlah 4, menghasilkan Mean Square sebesar 4.846. Ini mencerminkan variasi yang tidak dapat dijelaskan oleh model, yaitu kesalahan atau variabilitas yang tersisa dalam data.

2. *Jenis Elektroda*

Untuk faktor jenis elektroda, nilai F yang diperoleh adalah 2.66 dengan P-Value sebesar 0.184. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan antara berbagai jenis elektroda tidak mencapai tingkat signifikansi statistik pada level yang biasanya diterima, seperti  $\alpha = 0.05$ . Dengan kata lain, P-Value yang lebih besar dari 0.05 menunjukkan bahwa tidak ada bukti yang cukup kuat untuk mengklaim bahwa jenis elektroda memiliki efek yang signifikan terhadap variabel yang diamati. Hal ini mengindikasikan bahwa perbedaan jenis elektroda mungkin tidak mempengaruhi hasil yang diukur secara signifikan dalam konteks analisis ini.

3. *Titik Pengujian*

Untuk faktor titik pengujian, diperoleh nilai F sebesar 59.23 dan P-Value sebesar 0.001. Angka-angka ini menunjukkan bahwa perbedaan antara titik pengujian sangat signifikan secara statistik. P-Value yang sangat kecil, jauh di bawah ambang batas umum 0.05, memberikan bukti yang kuat bahwa titik pengujian memiliki pengaruh yang signifikan terhadap variabel dependen. Dengan kata lain, hasil analisis ini menunjukkan bahwa variabilitas yang disebabkan oleh titik pengujian secara konsisten menghasilkan perbedaan yang jelas dan terukur dalam variabel dependen, menegaskan bahwa faktor ini memainkan peran penting dalam menentukan hasil yang diukur.

Analisis ini mengungkapkan bahwa titik pengujian memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil yang diukur, sedangkan jenis elektroda tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan. Ini berarti

faktor titik pengujian harus diperhatikan lebih lanjut dalam analisis, sementara jenis elektroda mungkin tidak perlu menjadi fokus utama dalam konteks pengaruh terhadap variabel dependen.

- *Model Summary*

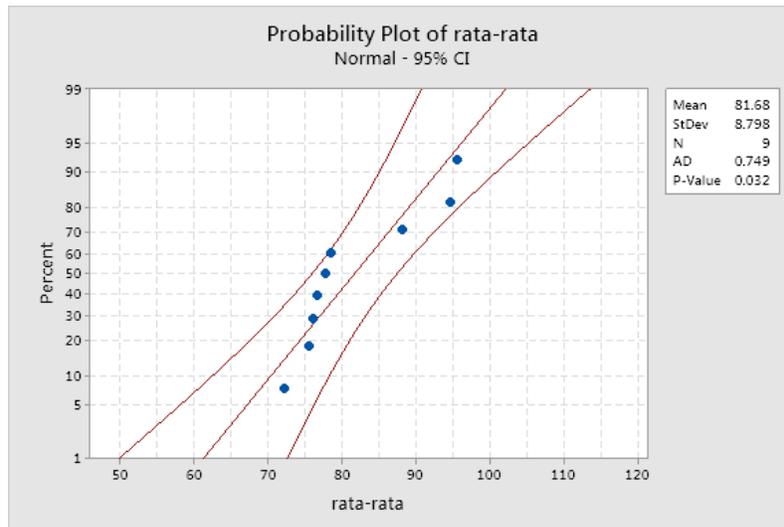
Tabel 7. Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
2.20139	96.87%	93.74%	84.15%

Sumber: Olahan Peneliti, 2024

Berikut penjelasan dari tabel 7 di atas:

- ✓ **S (Standard Error of the Regression):** Mengukur jarak rata-rata nilai yang diamati dari garis regresi, dengan standar error sebesar 2.20139. Nilai yang lebih kecil menunjukkan model yang lebih baik.
- ✓ **R-sq (R-kuadrat):** Koefisien determinasi yang menunjukkan proporsi variansi variabel dependen yang dapat diprediksi dari variabel independen. Dengan R-kuadrat sebesar 96.87%, model menjelaskan sebagian besar variabilitas dalam variabel respon.
- ✓ **R-sq(adj) (R-kuadrat Teradjustasi):** Versi R-kuadrat yang telah disesuaikan untuk jumlah prediktor dalam model. Dengan R-kuadrat teradjustasi sebesar 93.74%, model masih menjelaskan sebagian besar variabilitas meskipun mempertimbangkan jumlah prediktor.
- ✓ **R-sq(pred) (R-kuadrat Prediksi):** Menilai kinerja model dalam memprediksi data baru. R-kuadrat prediksi sebesar 84.15% menunjukkan bahwa model memiliki kekuatan prediktif yang baik, dengan kemampuan menjelaskan 84.15% variabilitas dalam data baru.



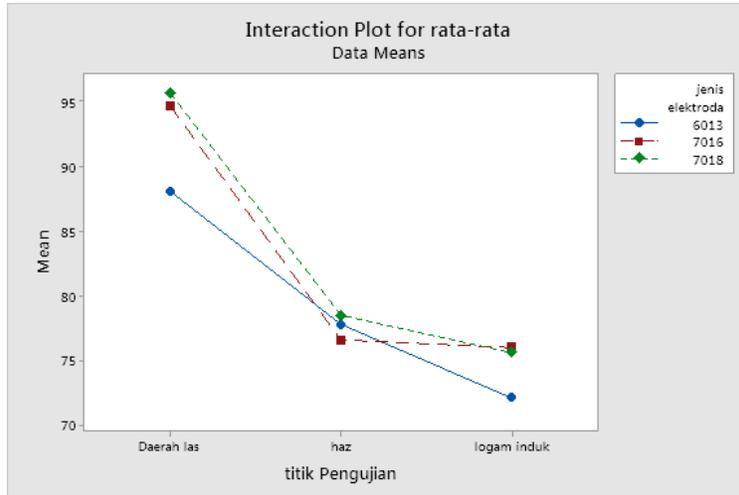
Gambar 5 Normal probality  
 Sumber: Olahan Peneliti, 2024

Gambar 5. menunjukkan plot probabilitas untuk menilai apakah suatu kumpulan data mengikuti distribusi normal. Berikut adalah penjelasan komponennya:

- **Nilai p (0,032):** Nilai p dari uji *Anderson-Darling* adalah 0,032, yang lebih kecil dari 0,05, menunjukkan hasil yang signifikan secara statistik. Ini berarti kita memiliki bukti cukup untuk menolak hipotesis nol bahwa data mengikuti distribusi normal pada tingkat signifikansi 5%.
- **Titik Data dan Garis Kecocokan:\*\*** Pada plot, titik-titik biru tidak konsisten berada di garis lurus merah yang diharapkan untuk distribusi normal.

Interval Kepercayaan:\*\* Garis merah melengkung menunjukkan interval kepercayaan 95% untuk distribusi normal. Beberapa titik data berada di luar interval ini, menunjukkan bahwa data tidak sepenuhnya sesuai dengan distribusi normal.

Berdasarkan nilai p yang kurang dari 0,05, kita dapat menyimpulkan bahwa hasil uji ini signifikan, menunjukkan bukti cukup untuk menyatakan bahwa data kekerasan tidak mengikuti distribusi normal. Titik-titik data yang menyimpang dari garis kecocokan dan berada di luar interval kepercayaan mendukung kesimpulan ini. Dengan demikian, kita menolak hipotesis nol bahwa data kekerasan berdistribusi normal. Berikut disajikan grafik yang digunakan untuk melihat *response* is rata rata kgf.



Gambar 6. Grafik Histogram  
 Sumber: *Olahan Peneliti, 2024*

Sajian grafik diatas merupakan *Interaction Plot* untuk variabel "rata-rata" berdasarkan "jenis elektroda" dan "titik pengujian". Berikut adalah penjelasan dan interpretasi plot tersebut:

- Sumbu X (titik pengujian): Menunjukkan berbagai titik pengujian, yaitu daerah las, HAZ (Heat-Affected Zone), dan logam induk.
- Sumbu Y (mean): Menunjukkan nilai rata-rata yang diukur pada tiap titik pengujian.
- Jenis elektroda: Diwakili oleh tiga jenis elektroda yang diberi kode warna dan bentuk garis:
  - Elektroda 6013 (garis biru dengan titik lingkaran)
  - Elektroda 7016 (garis merah dengan kotak)
  - Elektroda 7018 (garis hijau dengan segitiga)

**Interpretasi**

- **Daerah Las**  
 Elektroda 7018 menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai rata-rata tertinggi, menunjukkan kemampuannya untuk menghasilkan las yang kuat dan konsisten. Elektroda 7016 berada di urutan kedua, sementara elektroda 6013, yang memiliki nilai rata-rata terendah, mungkin kurang cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan las yang tinggi.
- **HAZ (Zona Terpengaruh Panas)**  
 Semua elektroda mengalami penurunan nilai rata-rata di zona ini, yang bisa diakibatkan oleh perubahan mikrostruktur material akibat panas. Elektroda 6013 menunjukkan penurunan terbesar, mendekati nilai elektroda 7016 dan 7018, yang mengindikasikan bahwa elektroda ini lebih rentan terhadap pengaruh panas.
- **Logam Induk**

Nilai rata-rata elektroda 6013 terus menurun pada logam induk, mengindikasikan bahwa elektroda ini mungkin kurang stabil atau efektif dalam mempertahankan kualitas logam dasar. Di sisi lain, elektroda 7016 dan 7018 menunjukkan penurunan yang lebih kecil dan stabil, menandakan bahwa keduanya lebih mampu mempertahankan kualitas logam induk yang baik.

**Interaksi:**

- Kemiringan Garis: Kemiringan garis yang berbeda-beda di berbagai titik pengujian menunjukkan adanya interaksi antara jenis elektroda dan titik pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa efek jenis elektroda terhadap rata-rata kekerasan bervariasi sesuai dengan titik pengujian yang berbeda.
- Interaksi Signifikan: Perbedaan dalam kemiringan garis tersebut menandakan adanya interaksi signifikan antara jenis elektroda dan titik pengujian. Dengan kata lain, performa setiap jenis elektroda tidak konsisten di semua titik pengujian, melainkan bervariasi.
- Pemilihan Elektroda: Berdasarkan nilai rata-rata, elektroda 7018 cenderung memberikan hasil kekerasan tertinggi di daerah las. Namun, perbedaan kekerasan antara elektroda 7016 dan 7018 pada logam induk menjadi lebih kecil.

Dengan demikian, plot interaksi ini menunjukkan bahwa performa elektroda sangat bergantung pada titik pengujian. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan jenis elektroda yang paling sesuai dengan setiap titik pengujian yang spesifik.

**D. Pengujian Tarik**

Pengujian tarik dilaksanakan untuk mengevaluasi sifat-sifat mekanis material St 40 sebagai material uji dalam penelitian ini. Hasil dari pengujian tarik umumnya meliputi parameter kekuatan (seperti kekuatan tarik atau kekuatan luluh), serta parameter keliatan atau keuletan yang ditunjukkan melalui persentase perpanjangan dan persentase kontraksi atau reduksi penampang. Penelitian ini menggunakan variasi elektroda yang berbeda, yaitu E 6013, E 7016, dan E 7018.

Hasil dari data pengujian tarik tanpa perlakuan tambahan bertujuan untuk mengetahui nilai kekuatan material baja St 40. Nilai kekuatan tarik material sebelum dilakukan pengujian dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 8. Sebelum dilakukan Proses Pengelasan

Tegangan N/mm	Regangan (%)	Modulus N/mm
413,09	11.9%	2438.48

Sumber: Olahan Peneliti, 2024

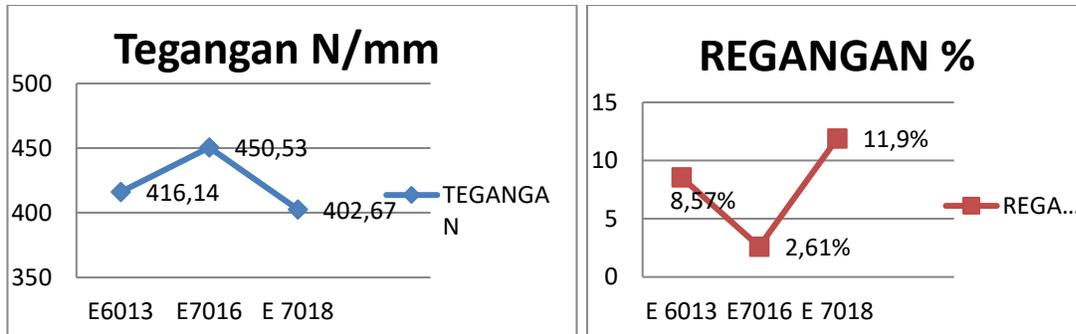
Dari tabel di atas, terlihat bahwa sebelum perlakuan panas, nilai tegangan adalah 290,18 N/mm<sup>2</sup>, sedangkan nilai regangan mencapai 11,9%. Nilai modulus elastisitas tercatat sebesar 2.438,48 N/mm<sup>2</sup>.

Tabel 9. Nilai Rata Rata dengan Tiga Variasi Elektroda

No	Varisi elektroda	Tegangan (MPa)	Regangan (%)	Modulus E (MPa)
1	Elektroda 6013	414,14	8.57	4855.77
2	Elektroda 7016	450,53	2.61	173,28
3	Elektroda 7018	402,67	11,9	3383.78

Sumber: Olahan Peneliti, 2024

Berdasarkan tabel di atas, setiap variasi elektroda menunjukkan perubahan panjang dan beban yang berbeda. Elektroda 6013 memiliki nilai tarik sebesar 414,14 N/mm<sup>2</sup>, nilai regangan sebesar 8,57%, dan modulus elastisitas sebesar 4.855,77 N/mm<sup>2</sup>. Elektroda 7016 memiliki nilai tarik sebesar 450,53 N/mm<sup>2</sup>, nilai regangan sebesar 2,61%, dan modulus elastisitas sebesar 173,28 N/mm<sup>2</sup>. Sementara itu, elektroda 7018 menunjukkan nilai tarik sebesar 402,67 N/mm<sup>2</sup>, nilai regangan sebesar 11,9%, dan modulus elastisitas sebesar 3.383,78 N/mm<sup>2</sup>.



Gambar 7. Grafik Tegangan dan Regangan

Berdasarkan grafik di atas, variasi elektroda 7016 menunjukkan nilai tegangan tertinggi sebesar 450,53 N/mm<sup>2</sup>, sementara nilai tegangan terendah ditemukan pada elektroda 7018, yaitu sebesar 402,67 N/mm<sup>2</sup>. Selain itu, grafik regangan juga menunjukkan bahwa variasi elektroda 7018 memiliki nilai regangan tertinggi sebesar 11,9%, sedangkan nilai regangan terendah terdapat pada elektroda 7016 dengan nilai sebesar 2,61%.

**E. Perhitungan Mencari Tegangan, Regangan , dan Modulus Elastis**

Tegangan:

$$\sigma \frac{f}{A_0} = \frac{41614,216 N}{100 mm} = 416,14 N/mm^2$$

Regangan %

$$\epsilon \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{18 N}{210 mm} \times 100 = 8,57\%$$

Modulus elastis

$$E \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{416,14 N}{0,0857 mm^2} = 4855,77 N/mm^2$$



Berikutnya perhitungan untuk mencari tegangan, regangan dan modulus elastis pada elektroda 7016:

Tegangan:

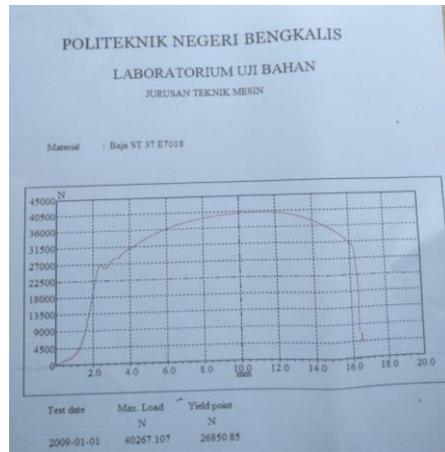
$$\sigma \frac{f}{A_0} = \frac{45053,101 N}{100 mm} = 450,53 N/mm^2$$

Regangan %

$$\epsilon \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{5,5 N}{210 mm} \times 100 = 2,61\%$$

Modulus elastis

$$E \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{450.53 N}{0,0026 mm} = 173,28 N/mm^2$$



Perhitungan untuk mencari tegangan, regangan dan modulus elastis pada elektroda 7018:

Tegangan

$$\sigma \frac{f}{A_0} = \frac{40267,107 \text{ N}}{100} = 402,67 \text{ N/mm}^2$$

Regangan %

$$\epsilon \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{25 \text{ N}}{210 \text{ mm}} \times 100 = 11,9\%$$

Modulus elastis

$$E \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{402,67 \text{ N}}{0,1190} = 3383,78 \text{ N/mm}^2$$

Perhitungan untuk mencari tegangan, regangan dan modulus elastis tanpa perlakuan apapun

Tegangan

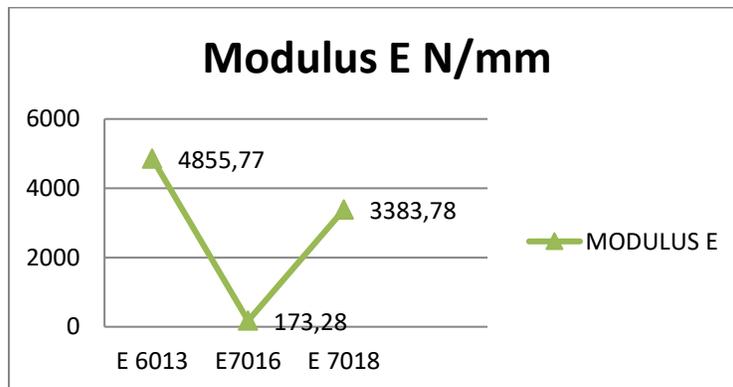
$$\sigma \frac{f}{A_0} = \frac{41309,977 \text{ N}}{100} = 413,09 \text{ N/mm}^2$$

Regangan %

$$\epsilon \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% = \frac{25}{210 \text{ mm}} = 11,9\%$$

Modulus elastis

$$E \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{413,09 \text{ N}}{0,1190 \text{ mm}^2} = 2438,48 \text{ N/mm}^2$$



Gambar 8. Grafik Modulus Elastisitas

Berdasarkan grafik di atas, nilai modulus elastisitas tertinggi pada variasi elektroda terdapat pada elektroda 6013 dengan nilai sebesar 4.855,77 N/mm<sup>2</sup>, sedangkan nilai terendah ditemukan pada elektroda 7016 dengan nilai sebesar 44,29 N/mm<sup>2</sup>.

#### KESIMPULAN

Pengamatan terhadap kekuatan tarik dan kekerasan *Rockwell* dari proses pengelasan menggunakan elektroda E6013, E7016, dan E7018 dengan diameter 2,6 mm pada baja karbon rendah menghasilkan beberapa temuan penting. Elektroda E7018 memberikan hasil kekerasan terbaik pada daerah lasan dengan nilai 95,7 kgf dan juga mencapai kekerasan tertinggi pada batas HAZ sebesar 78,5 kgf. Sementara itu, elektroda E7016 mencatatkan kekerasan tertinggi pada logam induk sebesar 75,6 kgf. Perlakuan panas selama proses pengelasan menyebabkan pembesaran unsur kristal pada baja, yang meningkatkan kekerasan material, sehingga penggunaan elektroda E7018 adalah pilihan yang tepat untuk mencapai kekerasan optimal di berbagai zona pengelasan baja St 40. Penelitian kekuatan tarik menunjukkan bahwa elektroda E6013 memiliki kekuatan tarik sebesar 416,14 N/mm<sup>2</sup>, regangan sebesar 8,27%, dan modulus elastis sebesar 4855,77 N/mm<sup>2</sup>, menandakan kombinasi kekuatan tarik tinggi dan regangan sedang. Elektroda E7016 menunjukkan kekuatan tarik yang sangat baik sebesar 450,53 N/mm<sup>2</sup> namun dengan regangan rendah sebesar 2,61% dan modulus elastis rendah sebesar 173,28 N/mm<sup>2</sup>, yang menunjukkan kerapuhan lebih tinggi dan kemampuan menahan deformasi yang lebih rendah. Elektroda E7018 memiliki kekuatan tarik terendah sebesar 402,67 N/mm<sup>2</sup> tetapi dengan regangan tertinggi sebesar 11,9% dan modulus elastis sebesar 3383,78 N/mm<sup>2</sup>, menunjukkan material yang lebih elastis dan mampu menahan deformasi lebih besar sebelum patah. Secara keseluruhan, elektroda E6013 menunjukkan kombinasi terbaik antara kekuatan tarik tinggi dan elastisitas yang cukup.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Azis, R. A. Suharno, S., & Saputro, H. (2019). Pengaruh Variasi Diameter Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Struktur Mikro Pengelasan pada Baja Karbon Rendah Jenis SS400 dengan Metode SMAW. *Jurnal Teknik*, 17(2), 94-105.
- Arifin, J., Purwanto, H., & Syafa'at, I. (2017). Pengaruh jenis elektroda terhadap sifat mekanik hasil pengelasan smaw baja ASTM A36. *Majalah Ilmiah Momentum*, 13(1).
- Bawazir, F., Bukhari, B., & Ismy, A. S. (2021). Pengaruh Variasi Elektroda Las pada Sambungan Pengelasan SMAW Baja ST. 37 dengan ST. 40 Terhadap Sifat Mekanik. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 5(2), 91-96.
- Azwinur, A., & Muhazir, M. (2019). Pengaruh jenis elektroda pengelasan SMAW terhadap sifat mekanik material SS400. *Jurnal Polimesin*, 17(1), 19-25.
- Munawar, H. M., Gusniar, I. N., & Hanafi, R. (2023). Pengaruh jenis elektroda las SMAW terhadap sifat mekanik dan struktur mikro. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 11(1)
- Pribadi, B. B. (2017). Pengaruh variasi kecepatan pengelasan las SMAW terhadap sifat mekanik bahan baja SS-400. *Undergraduate Thesis, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*.
- Prasetyo, E. (2014). Pengaruh hasil pengelasan las TIG terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan pada material baja karbon rendah. *Jurnal Teknik Mesin*, 2(3).
- Santoso, J. (2019). Pengaruh variasi elektroda las pada sambungan pengelasan SMAW baja St. 37 dengan St. 40 terhadap sifat mekanik. *E-Jurnal PNL*.
- Tarigan, B. S. S., & Drastiawati, N. S. (2022). Pengaruh Variasi Arus Pengelasan Shield Metal Arc Welding (Smaw) Terhadap Kekuatan Tarik Dan Tekuk Pada Baja ST 37. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(03), 119-124
- Wahyudi, R., Nurdin, N., & Saifuddin, S. (2019). Analisa pengaruh jenis elektroda pada pengelasan SMAW penyambungan baja karbon rendah dengan baja karbon sedang terhadap tensile strength. *Journal of Welding Technology*, 1(2).