

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Tarik

Uji tarik merupakan metode pengujian mekanik destruktif yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan material atau sambungan las dalam menahan beban tarik hingga mengalami kegagalan. Pengujian ini dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) sesuai standar ASTM E8 untuk memperoleh data sifat mekanik berupa yield strength, ultimate tensile strength (UTS), fracture strain, dan fracture energy. Selama proses pengujian, hubungan antara tegangan (stress) dan regangan (strain) direkam secara otomatis oleh sistem UTM sehingga dapat menggambarkan perilaku deformasi spesimen mulai dari daerah elastis, daerah plastis, hingga terjadinya patah.



Gambar 4.1 Proses Pengujian Uji Tarik Dengan UTM

Hasil pengujian tarik pada sambungan las dissimilar SS400–SS304 dengan variasi elektroda E308, E309L, dan E312 menunjukkan adanya perbedaan sifat mekanik pada masing-masing spesimen. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia elektroda yang digunakan sehingga menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan distribusi fasa yang berbeda pada logam las. Data hasil pengujian tarik selengkapnya disajikan pada Tabel 2.

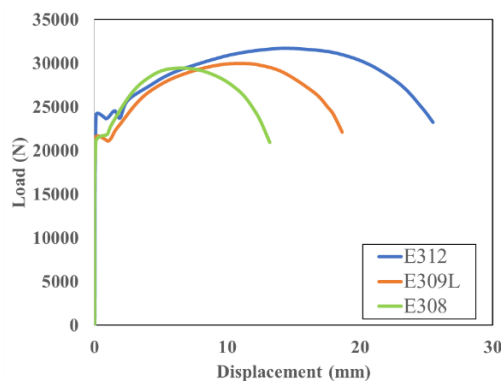
Pada spesimen hasil pengelasan, nilai kekuatan tarik sangat dipengaruhi oleh karakteristik logam las yang terbentuk selama proses pengelasan. Perbedaan komposisi kimia elektroda menyebabkan perbedaan struktur mikro, kandungan ferrite, serta sifat mekanik pada sambungan las yang dihasilkan. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis elektroda, yaitu E308, E309L, dan E312, untuk mengelas sambungan dissimilar antara baja SS400 dan SS304 menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW). variasi spesimen yang digunakan dalam pengujian tarik adalah sebagai berikut:

- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E308
- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E309L
- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E312
- 1 spesimen raw material SS400
- 1 spesimen raw material SS304

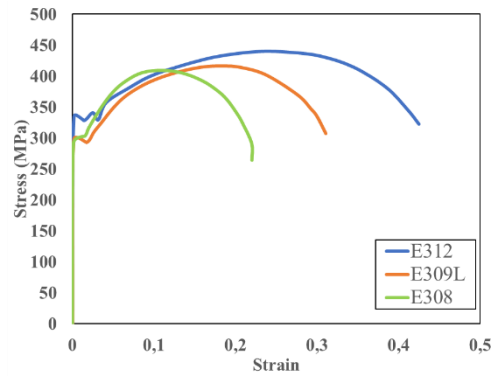


Gambar 4.1. Spesimen Variasi E308, E309L, E312 Setelah Uji Tarik

Pengujian tarik dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik sambungan las dissimilar antara baja SS400 dan stainless steel SS304 yang dilas menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dengan variasi elektroda E308, E309L, dan E312. Pengujian dilakukan mengacu pada standar ASTM E8 menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Spesimen uji tarik dibuat sesuai dimensi standar ASTM E8 dan terdiri atas 12 spesimen hasil pengelasan serta 2 spesimen raw material sebagai pembandingan. Selama pengujian, beban tarik diberikan secara kontinu hingga spesimen mengalami patah (fracture), kemudian data beban dan perpindahan (displacement) direkam secara otomatis untuk menghasilkan kurva beban–perpindahan dan kurva tegangan–regangan. Hasil pengujian ini digunakan untuk memperoleh nilai yield strength, ultimate tensile strength (UTS), fracture strain, dan fracture energy. Kurva beban–perpindahan dan kurva tegangan–regangan disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4.2. Kurva Load-Displacement Uji Tarik



Gambar 3.4. Kurva Stress-Strain Uji Tarik

Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menampilkan perilaku deformasi spesimen uji tarik. Kurva seluruh variasi elektroda menunjukkan tiga tahapan utama: daerah deformasi elastis linier, daerah deformasi plastis setelah melewati titik lumer (*yield point*), hingga mencapai puncak beban maksimum (UTS) sebelum akhirnya mengalami kepatahan. Elektroda E312 menunjukkan puncak kurva beban dan tegangan tertinggi serta perpanjangan (*displacement/strain*) paling panjang. Hal ini menunjukkan bahwa elektroda E312 tidak hanya memiliki ketahanan beban maksimum yang tinggi, tetapi juga sifat keuletan (*ductility*) yang sangat baik. Kurva E309L berada di bawah E312 dengan profil plastisitas yang stabil, sementara kurva E308 memiliki puncak terendah dan daerah plastisitas paling pendek, menandakan ketahanan beban dan keuletan yang lebih terbatas

Kurva beban terhadap perpindahan (*load-displacement*) dan kurva tegangan terhadap regangan (*stress-strain*) yang diperoleh dari hasil pengujian tarik menunjukkan adanya perbedaan karakteristik mekanik pada sambungan las dissimilar SS400–SS304 yang menggunakan elektroda E308, E309L, dan E312. Secara umum, seluruh spesimen menunjukkan daerah elastis, daerah plastis, dan tahap patah (*fracture*), namun dengan tingkat kekuatan dan keuletan yang berbeda. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia elektroda yang menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan kandungan ferrite yang berbeda pada logam las.

Berdasarkan hasil pengujian tarik, elektroda E312 menghasilkan performa mekanik tertinggi dengan nilai rata-rata ultimate tensile strength sebesar 440,05 MPa dan yield strength sebesar 324,21 MPa. Selain itu, elektroda E312 juga menunjukkan nilai fracture energy tertinggi sebesar 147,15 MJ/m³ dengan fracture strain sebesar 0,38. Hasil tersebut menunjukkan bahwa elektroda E312 mampu menghasilkan sambungan las dengan kombinasi kekuatan dan kemampuan menyerap energi yang lebih baik dibandingkan variasi elektroda lainnya.

Elektroda E309L menghasilkan nilai rata-rata ultimate tensile strength sebesar 419,33 MPa dan yield strength sebesar 296,69 MPa. Nilai fracture strain yang diperoleh sebesar 0,28 dengan fracture energy sebesar 109,78 MJ/m³. Hasil ini menunjukkan bahwa elektroda E309L memiliki performa mekanik yang berada di antara E312 dan E308 serta mampu memberikan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan keuletan sambungan las. Sementara itu, elektroda E308 menghasilkan nilai rata-rata ultimate tensile strength terendah yaitu sebesar 408,57 MPa dengan yield strength sebesar 290,51 MPa. Nilai fracture strain yang diperoleh sebesar 0,22 dan fracture energy sebesar 76,90 MJ/m³. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E308 memiliki kemampuan deformasi dan penyerapan energi yang lebih rendah dibandingkan E309L dan E312.

Jika dibandingkan dengan material induk, nilai ultimate tensile strength SS400 dan SS304 masing-masing sebesar 487,17 MPa dan 551,15 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh sambungan las memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan logam induknya., elektroda E312 menghasilkan nilai kekuatan tarik yang paling mendekati material induk sehingga menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan sifat mekanik sambungan las dissimilar SS400–SS304. Perbedaan nilai kekuatan tarik antar variasi elektroda dipengaruhi oleh komposisi kimia logam las yang terbentuk selama proses pengelasan. Elektroda E312 memiliki kandungan kromium yang lebih tinggi dibandingkan E309L dan E308 sehingga menghasilkan struktur logam las dengan kandungan ferrite delta yang lebih besar. Keberadaan ferrite delta berperan dalam meningkatkan kekuatan sambungan serta mengurangi kecenderungan terjadinya retak panas selama proses solidifikasi. Oleh karena itu, sambungan yang menggunakan elektroda E312 mampu mencapai nilai ultimate tensile strength tertinggi dibandingkan variasi elektroda lainnya.

Tabel 2.. Hasil Pengujian Mekanik Uji Tarik Las SMAW

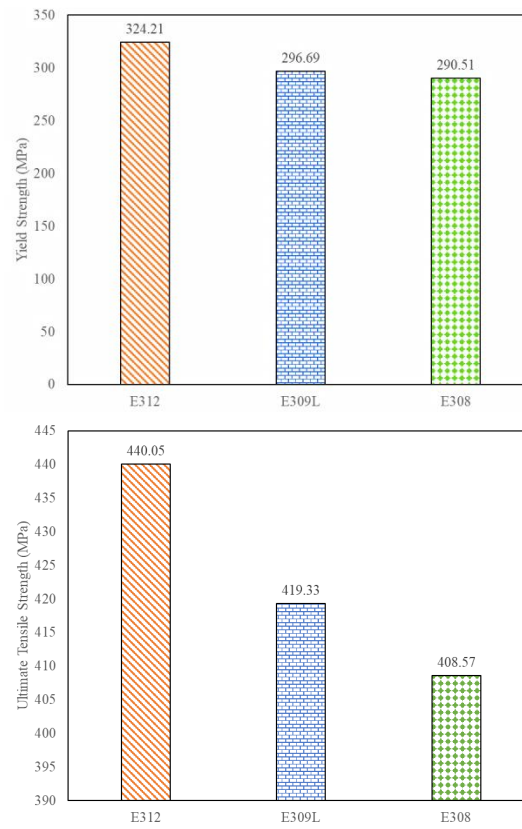
	Yield strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain	Fracture energy (mJ/m3)
Elektroda 308	190.162	413.774	0.221	45.636	190.162
	192.4655168	414.9011324	0.220	45.66521355	192.465
	191.0995244	396.2664092	0.223	44.1304768	191.099
	191.980	409.369	0.220	45.05634403	191.980
Rata-rata	191.4268836	408.5776626	0.220892776	45.1222176	191.426
Standar Deviasi	1.014766849	8.547542825	0.001244955	0.718230668	1.0147
Elektroda 309L	302.8927176	195.9572369	430.092	0.300	109.9902661
	297.3409403	197.8625166	416.0375103	0.311	110.8147302
	294.4815886	198.2172832	421.844314	0.302	108.1768545
	292.0746974	196.280	409.369	0.220	109.21
Rata-rata	296.697486	197.079289	419.3357237	0.283237567	109.5479627
Standar Deviasi	4.657442218	1.126373167	8.797745014	0.042324524	1.124646388
Elektroda 312	334.2382762	199.6785631	439.408	0.425	164.3647892
	315.7523813	199.2348296	432.2497161	0.362	151.7366688
	329.8850532	198.9124996	445.0830103	0.392	151.7366688
	316.967405	199.225	443.499	0.373	148.159894
Rata-rata	324.2107789	199.2628372	440.059926	0.387715748	153.9995052
Standar Deviasi	9.25128905	0.315037668	5.729480174	0.027720645	7.112923169
	334.2382762	199.6785631	439.408	0.425	164.3647892
Raw Material SS400	388.8889011	199.2821263	487.1794985	0.4692029	205.526917
Raw Material SS304	428.953	198.657	551.155	0.581808232	285.1178858

Berdasarkan Tabel 2, penggunaan variasi elektroda memberikan pengaruh yang jelas terhadap sifat mekanik tarik sambungan las. Elektroda E312 menunjukkan nilai performa mekanik paling unggul dibanding variasi lainnya, dengan rata-rata *Yield Strength* mencapai 324,21 MPa dan *Ultimate Tensile Strength* (UTS) sebesar 440,05 MPa. Sebaliknya, elektroda

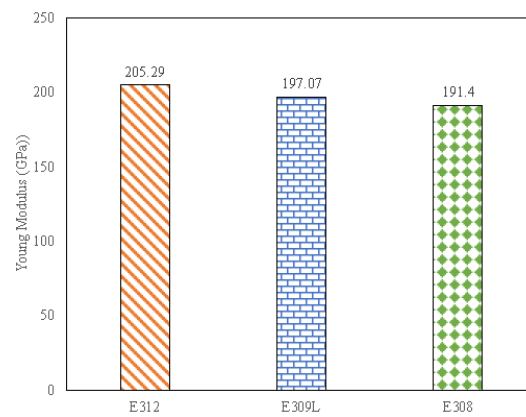
E308 menghasilkan nilai mekanik terendah dengan rata-rata UTS sebesar 408,57 MPa dan *Yield Strength* 191,42 MPa. Elektroda E309L berada pada posisi menengah dengan rata-rata UTS 419,33 MPa. Dari parameter keuletan, E312 juga mencatatkan *Fracture Strain* (0,387) dan *Fracture Energy* (153,99 mJ/mm³) tertinggi, yang mengindikasikan kemampuan deformasi plastis dan penyerapan energi yang lebih tinggi sebelum patah. Jika dibandingkan dengan *raw material* SS400 (UTS 487,17 MPa) dan SS304 (UTS 551,15 MPa), seluruh spesimen las mengalami penurunan kekuatan tarik akibat adanya perbedaan karakteristik termal dan batas fusi sambungan dissimilar. **Kekuatan Lumer (Yield Strength):** Elektroda E312 menghasilkan nilai rata-rata tertinggi sebesar $324,21 \pm 9,25$ MPa, diikuti oleh E309L sebesar $296,69 \pm 4,65$ MPa, dan E308 sebesar $191,42 \pm 1,01$ MPa. Penggunaan elektroda E312 memberikan peningkatan yield strength sebesar 9,27% dibanding E309L dan 69,37% dibanding E308.

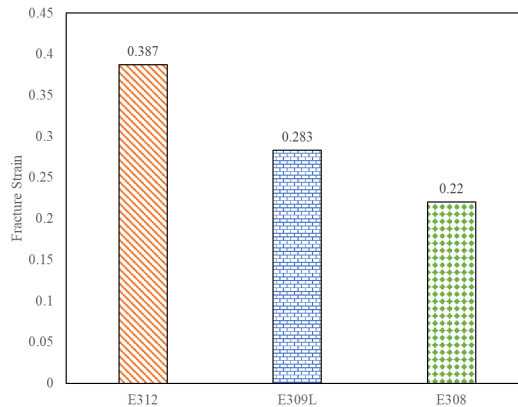
- 1) **Kekuatan Tarik Maksimum (Ultimate Tensile Strength / UTS):** Pengujian mencatatkan nilai UTS rata-rata E312 sebesar $440,05 \pm 5,72$ MPa, E309L sebesar $419,33 \pm 8,79$ MPa, dan E308 sebesar $408,57 \pm 8,54$ MPa. Sambungan E312 mencapai ketahanan tarik tertinggi, mendekati nilai UTS raw material SS400 (487,17 MPa) dan SS304 (551,15 MPa).
- 2) **Deformasi & Energi Patah (Fracture Strain & Energy):** Nilai fracture strain rata-rata meningkat dari $0,22 \pm 0,001$ (E308) menjadi $0,28 \pm 0,042$ (E309L) dan $0,38 \pm 0,027$ (E312). Hal ini berbanding lurus dengan fracture energy di mana E312 menyerap energi tertinggi sebesar $153,99 \pm 7,11$ mJ/mm³, jauh melampaui E308 yang hanya menyerap $45,12 \pm 0,71$ mJ/mm³.

Kurva Load-Displacement (Gambar 4.2) dan Stress-Strain (Gambar 4.3) secara kuantitatif merekam bahwa spesimen E312 mampu menahan beban puncak maksimum hingga sekitar 31,8 kN dengan perpanjangan plastis (displacement) hingga sekitar 25,5 mm sebelum mengalami patah.

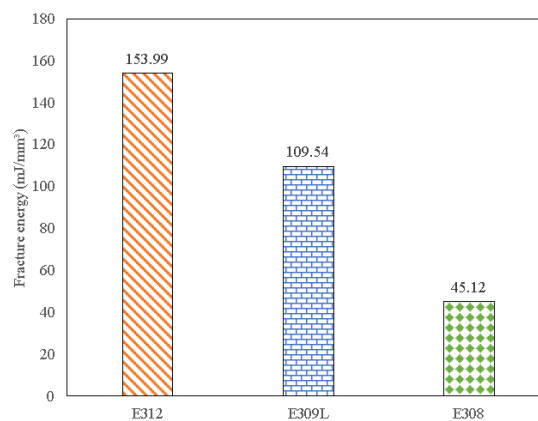


Gambar 4.4. *Yield Strength* (MPa) dan *Ultimate Tensile Strength* (MPa) Uji Tarik





Gambar 4.5. *Young Modulus* (GPa) dan *Fracture Strain* Uji Tarik



Gambar 4.6. *Fracture Energy* Uji Tarik

Grafik visual pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.6 memperjelas tren perbandingan kekuatan mekanik antar variasi elektroda. Pada Gambar 4.4, terlihat adanya tren kenaikan bertahap pada *Yield Strength* dan *Ultimate Tensile Strength* dengan urutan $E308 < E309L < E312$. Gambar 4.5 memperlihatkan *Young Modulus* yang relatif konstan pada kisaran 191–205 GPa, yang menunjukkan bahwa variasi elektroda tidak mengubah kekakuan elastis material dasar secara signifikan. Namun, grafik *Fracture Strain* (Gambar 4.5) dan *Fracture Energy* (Gambar 4.6) menunjukkan peningkatan signifikan pada E312 (153,99 mJ/mm³) dibandingkan E308 (45,12 mJ/mm³). Hal ini mempertegas bahwa elektroda E312 memberikan peningkatan ketangguhan (*toughness*) yang signifikan pada sambungan *dissimilar* SS400–SS304.

Berdasarkan data rata-rata hasil pengujian tarik, variasi elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik sambungan las *dissimilar* SS400–SS304. Elektroda E312 secara konsisten menghasilkan performa mekanik terbaik dibandingkan elektroda E309L dan E308 pada hampir seluruh parameter yang diamati. Nilai yield strength tertinggi diperoleh pada elektroda E312 sebesar 324,21 MPa, diikuti oleh E309L sebesar 296,70 MPa dan E308 sebesar 290,52 MPa. Perbedaan ini menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E312 mampu meningkatkan kemampuan sambungan las dalam menahan deformasi plastis awal dibandingkan dua elektroda lainnya.

Nilai ultimate tensile strength (UTS) juga menunjukkan kecenderungan yang sama. Elektroda E312 menghasilkan nilai UTS tertinggi sebesar 440,06 MPa, sedangkan elektroda E309L dan E308 masing-masing menghasilkan nilai sebesar 419,34 MPa dan 408,58 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda

E312 memiliki kemampuan menahan beban tarik maksimum yang lebih baik dibandingkan E309L maupun E308., seluruh nilai UTS sambungan las masih berada di bawah kekuatan tarik logam induk SS400 sebesar 487,18 MPa dan SS304 sebesar 551,16 MPa.

Nilai modulus elastisitas (Young's modulus) menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antar variasi elektroda. Elektroda E308 menghasilkan nilai modulus elastisitas tertinggi sebesar 199,04 GPa, diikuti E309L sebesar 197,08 GPa dan E312 sebesar 199,26 GPa. Perbedaan yang tidak terlalu signifikan ini menunjukkan bahwa variasi elektroda tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap kekakuan elastis sambungan las, karena nilai modulus elastisitas lebih dipengaruhi oleh karakteristik dasar material yang digunakan.

Keuletan sambungan las yang ditunjukkan oleh nilai fracture strain mengalami peningkatan yang cukup signifikan pada penggunaan elektroda E312. Nilai fracture strain tertinggi diperoleh pada elektroda E312 sebesar 0,3877, sedangkan elektroda E309L dan E308 masing-masing sebesar 0,2832 dan 0,2209. Peningkatan nilai fracture strain tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E312 memiliki kemampuan deformasi plastis yang lebih baik sebelum mengalami patah. Tren yang sama juga terlihat pada nilai fracture energy, dimana elektroda E312 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 154,00 MJ/m³, diikuti elektroda E309L sebesar 109,55 MJ/m³ dan elektroda E308 sebesar 45,12 MJ/m³. Nilai ini menunjukkan bahwa elektroda E312 memiliki kemampuan penyerapan energi yang paling tinggi sebelum terjadinya fraktur.

Secara keseluruhan, hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa elektroda E312 memberikan kombinasi sifat mekanik terbaik pada sambungan las dissimilar SS400–SS304. Hal ini ditunjukkan oleh nilai yield strength, ultimate tensile strength, fracture strain, dan fracture energy yang lebih tinggi dibandingkan elektroda E309L dan E308. Sementara itu, elektroda E309L menunjukkan performa yang berada di antara E312 dan E308, sedangkan elektroda E308 menghasilkan nilai terendah pada sebagian besar parameter mekanik. Hasil ini mengindikasikan bahwa komposisi kimia elektroda berperan penting dalam menentukan karakteristik mikrostruktur dan performa mekanik sambungan las yang dihasilkan.

4.2 Hasil Pengujian Tekuk

Uji tekuk merupakan metode pengujian mekanik destruktif yang bertujuan untuk mengetahui kemampuan material atau sambungan las dalam menahan pembebanan lentur tanpa mengalami retak maupun kegagalan pada daerah sambungan. Pengujian ini dilakukan berdasarkan standar ASTM E290 untuk memperoleh data sifat mekanik berupa *yield bending strength* dan *ultimate bending strength*. Selama proses pengujian, spesimen diberikan beban secara bertahap hingga mencapai batas deformasi tertentu atau mengalami kegagalan, sehingga dapat diketahui kemampuan material dan sambungan las dalam menerima pembebanan lentur.



Gambar 4.7. Proses Pengujian Uji Tekuk

Hasil pengujian tekuk pada sambungan las dissimilar SS400–SS304 dengan variasi elektroda E308, E309L, dan E312 menunjukkan adanya perbedaan sifat mekanik pada masing-masing spesimen. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia elektroda yang digunakan sehingga menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan distribusi fasa yang berbeda pada logam las. Data hasil pengujian tekuk selengkapnya disajikan pada Tabel 4.

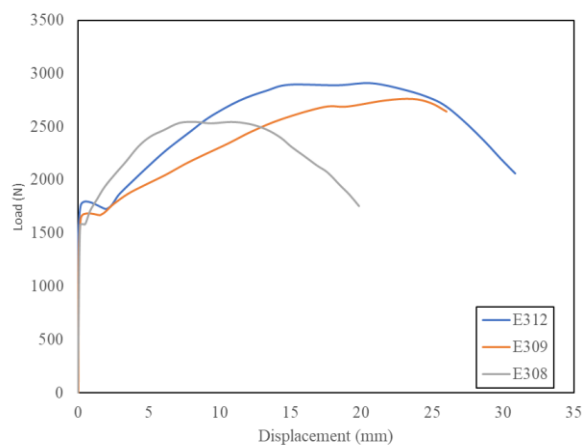
Pada spesimen hasil pengelasan, nilai kekuatan tekuk sangat dipengaruhi oleh karakteristik logam las yang terbentuk selama proses pengelasan. Perbedaan komposisi kimia elektroda menyebabkan perbedaan struktur mikro, kandungan ferrite, serta sifat mekanik pada sambungan las yang dihasilkan. Pada penelitian ini digunakan tiga jenis elektroda, yaitu E308, E309L, dan E312, untuk mengelas sambungan dissimilar antara baja SS400 dan SS304 menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Variasi spesimen yang digunakan dalam pengujian tekuk adalah sebagai berikut:

- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E308
- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E309L
- 4 spesimen sambungan las menggunakan elektroda E312
- 1 spesimen raw material SS400
- 1 spesimen raw material SS304

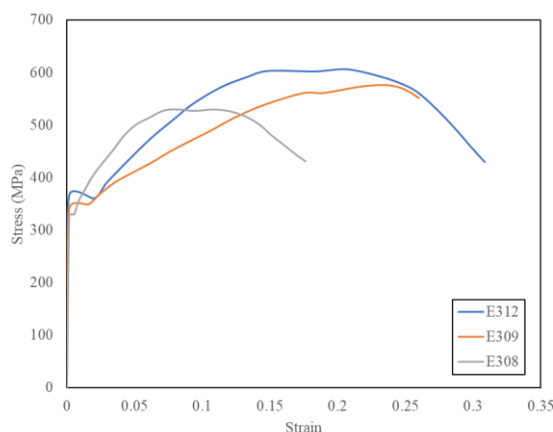


Gambar 4.8. Spesimen Varias E308, E309L, E312 Setelah Uji Tekuk

Pengujian tekuk dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik lentur sambungan las dissimilar antara baja SS400 dan stainless steel SS304 yang dilas menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dengan variasi elektroda E308, E309L, dan E312. Pengujian dilakukan mengacu pada standar ASTM E290 menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Spesimen uji tekuk terdiri atas 12 spesimen hasil pengelasan serta 2 spesimen raw material sebagai pembanding. Selama pengujian, beban diberikan secara kontinu hingga spesimen mengalami deformasi maksimum sesuai prosedur pengujian, kemudian data beban dan perpindahan (displacement) direkam secara otomatis untuk menghasilkan kurva beban–perpindahan dan kurva tegangan–regangan lentur. Hasil pengujian ini digunakan untuk memperoleh nilai yield bending strength, ultimate bending strength, Tangen Modulus of Elasticity (Tangen MOE), dan fracture energy. Kurva beban–perpindahan dan kurva tegangan–regangan hasil pengujian tekuk disajikan pada gambar berikut.



Gambar 4.9. Kurva *Load-Displacement* Uji Tekuk



Gambar 4.10. Kurva *Stress-Strain* Uji Tekuk

Kurva *Load-Displacement* (Gambar 4.9) dan *Stress-Strain* uji tekuk (Gambar 4.10) menggambarkan kelakuan spesimen saat mengalami lenturan maksimum. Elektroda E312 menunjukkan ketahanan beban lentur tertinggi dengan lengkungan plastisitas yang luas, disusul E309L dan E308. Pada Gambar 4.11, grafik batang *Ultimate Bending Strength* memperlihatkan bahwa E312 unggul secara signifikan mendominasi ketahanan

lentur. Sementara itu, Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 mengonfirmasi bahwa nilai *Tangen MOE* (kekakuan lentur) berada pada kisaran stabil **194–202 GPa**, serta *Fracture Energy* tertinggi diraih oleh elektroda E312.

Kurva beban terhadap perpindahan (load-displacement) dan kurva tegangan terhadap regangan (stress-strain) hasil pengujian tekuk menunjukkan adanya perbedaan karakteristik mekanik lentur pada sambungan las dissimilar SS400–SS304 yang menggunakan elektroda E308, E309L, dan E312. Secara umum, seluruh spesimen menunjukkan daerah elastis dan daerah plastis selama pembebanan lentur, namun dengan tingkat kekuatan, kekakuan, dan kemampuan menyerap energi yang berbeda. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh komposisi kimia elektroda yang menghasilkan karakteristik mikrostruktur dan kandungan ferrite yang berbeda pada logam las.

Berdasarkan hasil pengujian tekuk, elektroda E312 menghasilkan performa mekanik lentur tertinggi dengan nilai rata-rata ultimate bending strength sebesar 603,64 MPa dan yield bending strength sebesar 362,48 MPa. Selain itu, elektroda E312 juga menghasilkan nilai Tangen Modulus of Elasticity (Tangen MOE) tertinggi sebesar 202,81 GPa serta fracture energy sebesar 171,88 MJ/m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa elektroda E312 mampu menghasilkan sambungan las dengan kemampuan menahan beban lentur, kekakuan, dan penyerapan energi yang lebih baik dibandingkan variasi elektroda lainnya.

Elektroda E309L menghasilkan nilai rata-rata ultimate bending strength sebesar 570,10 MPa dan yield bending strength sebesar 345,01 MPa. Nilai Tangen MOE yang diperoleh sebesar 197,25 GPa dengan fracture energy sebesar 158,11 MJ/m³. Hasil ini menunjukkan bahwa elektroda E309L memiliki performa mekanik lentur yang berada di antara E312 dan E308 serta mampu memberikan keseimbangan yang baik antara kekuatan dan kekakuan sambungan las.

Sementara itu, elektroda E308 menghasilkan nilai rata-rata ultimate bending strength terendah yaitu sebesar 528,22 MPa dengan yield bending strength sebesar 334,28 MPa. Nilai Tangen MOE yang diperoleh sebesar 194,42 GPa dan fracture energy sebesar 144,59 MJ/m³. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E308 memiliki kemampuan menahan pembebanan lentur dan menyerap energi yang lebih rendah dibandingkan E309L dan E312.

Jika dibandingkan dengan material induk, nilai ultimate bending strength SS400 dan SS304 masing-masing sebesar 617,53 MPa dan 621,44 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh sambungan las memiliki kekuatan lentur yang sedikit lebih rendah dibandingkan logam induknya., elektroda E312 menghasilkan nilai kekuatan lentur yang paling mendekati material induk sehingga menunjukkan kemampuan yang lebih baik dalam mempertahankan sifat mekanik sambungan las dissimilar SS400–SS304.

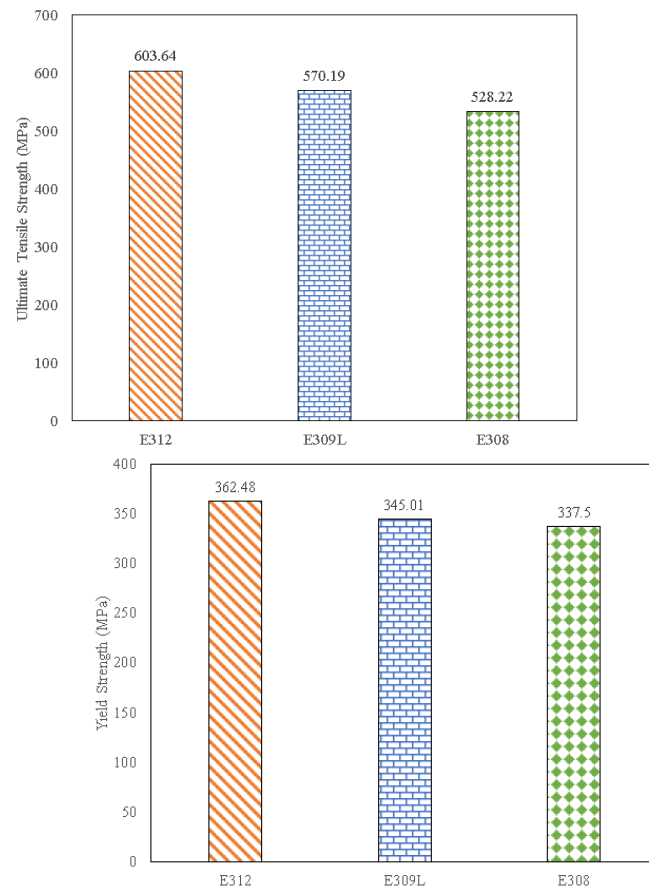
Perbedaan nilai kekuatan lentur antar variasi elektroda dipengaruhi oleh komposisi kimia logam las yang terbentuk selama proses pengelasan. Elektroda E312 memiliki kandungan kromium yang lebih tinggi dibandingkan E309L dan E308 sehingga menghasilkan struktur logam las dengan kandungan ferrite delta yang lebih besar. Keberadaan ferrite delta berperan dalam meningkatkan kekuatan dan kekakuan sambungan serta mengurangi kecenderungan terjadinya retak panas selama proses solidifikasi. Oleh karena itu, sambungan yang menggunakan elektroda E312 mampu mencapai nilai ultimate bending strength tertinggi dibandingkan variasi elektroda lainnya.

Tabel 3. Hasil Pengujian Mekanik Uji Tekuk Las SMAW

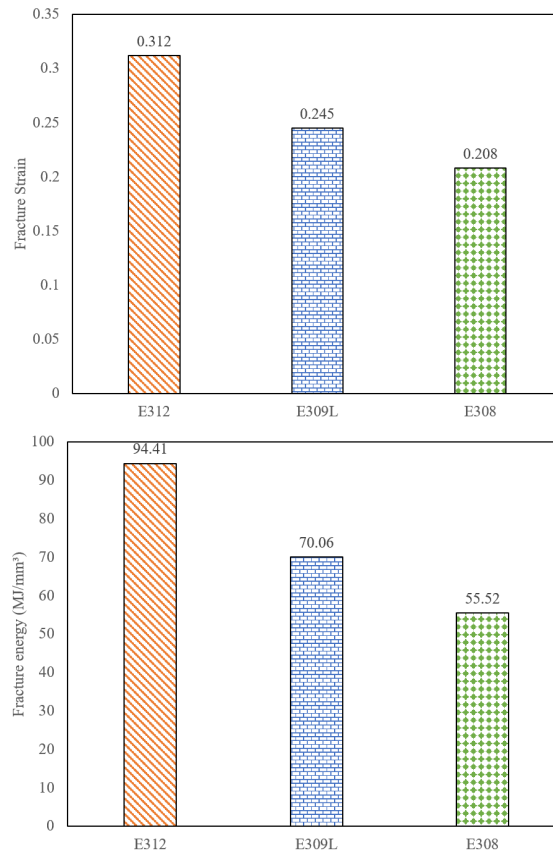
<i>Spesimen</i>	<i>Yield Strength (MPa)</i>	<i>Tangen MOE (GPa)</i>	<i>Ultimate Flexural Strength (MPa)</i>	<i>Fracture Strain</i>	<i>Fracture Energy (mJ/m³)</i>
E308	345.0343	197.7327742	538.8841364	0.2206	59.44376506
	346.1848	193.0623973	523.1739219	0.2247	58.78586012
	330.9370	194.4348457	520.8333333	0.2211	57.56611357
	327.8745	192.4738327	529.9889	0.1762	46.68413422
Rata-rata	337.5076391	194.4259625	528.2200816	0.210642468	55.61996824
Standar Deviasi	9.450094965	2.352672473	8.101001667	0.023055298	6.007797842
E309L	350.6353	196.9291994	574.0248139	0.2415	69.32244372
	343.9024	199.518864	576.0365911	0.2300	66.24420798
	341.3435	193.1939548	575.4637511	0.2599	74.79502644
	344.1621	199.3683168	555.2656	0.2517	69.89295403
Rata-rata	345.0108	197.2526	570.1977	0.2458	70.0637
Standar Deviasi	3.959531104	2.954623418	9.990659365	0.012953181	3.538011881
E312	369.2434	205.7518308	599.5408474	0.3168	94.95632511
	364.6184	209.63345	603.2126755	0.3162	95.3680874
	365.3865	197.2720285	606.6223527	0.3084	93.5405371
	350.6824	198.6150097	605.2192276	0.3100	93.80898028
Rata-rata	362.4827	202.8181	603.6488	0.3128	94.4185
Standar Deviasi	8.122990949	5.873120929	3.075371918	0.004261637	0.881911794
Raw SS400	346.6297	199.6145	617.5341	0.3526	108.8843

Raw SS304	320.3962	200.1712	621.4397	0.3469	107.8008
--------------	----------	----------	----------	--------	----------

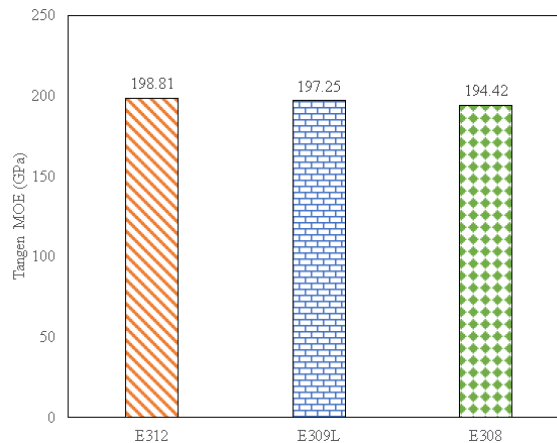
Tabel 3 memperlihatkan kemampuan lentur dan keuletan sambungan las akibat pembebanan tekuk. Elektroda E312 kembali mencatatkan performa lentur tertinggi dengan rata-rata *Ultimate Flexural Strength* sebesar **603,64 MPa** dan *Yield Strength* **362,48 MPa**. Elektroda E309L menghasilkan kekuatan tekuk rata-rata **570,19 MPa**, sedangkan E308 menghasilkan nilai terendah yaitu **528,22 MPa**. Nilai *Ultimate Flexural Strength* pada elektroda E312 mendekati kekuatan lentur *raw material* SS400 (617,53 MPa) dan SS304 (621,44 MPa). Peningkatan kekuatan tekuk pada E312 sejalan dengan tinggi nilai *Fracture Energy* tekuknya (**94,41 mJ/mm³**), yang mengindikasikan ketahanan sambungan yang baik terhadap retak permukaan (*crack initiation*) saat terdeformasi plastis.



Gambar 4.11. Yield Strength (MPa) dan Ultimate Tensile Strength (MPa) Uji Tekuk



Gambar 4.12. *Young Modulus* (GPa) dan *Fracture Strain* Uji Tekuk



Gambar 4.13. *Fracture Energy* Uji Tekuk

Berdasarkan data rata-rata hasil pengujian tekuk, variasi elektroda memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sifat mekanik lentur sambungan las dissimilar SS400–SS304. Elektroda E312 secara konsisten menghasilkan performa mekanik terbaik dibandingkan elektroda E309L dan E308 pada hampir seluruh parameter yang diamati. Nilai yield bending strength tertinggi diperoleh pada elektroda E312 sebesar 362,48 MPa, diikuti oleh E309L sebesar 345,01 MPa dan E308 sebesar 334,28 MPa. Perbedaan ini menunjukkan bahwa penggunaan elektroda E312 mampu meningkatkan kemampuan sambungan las dalam menahan deformasi plastis awal akibat pembebanan lentur dibandingkan dua elektroda lainnya.

Nilai ultimate bending strength juga menunjukkan kecenderungan yang sama. Elektroda E312 menghasilkan nilai ultimate bending strength tertinggi sebesar 603,64 MPa, sedangkan elektroda E309L dan E308 masing-masing menghasilkan nilai sebesar 570,10 MPa dan 528,22 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E312 memiliki kemampuan menahan beban lentur maksimum yang lebih baik dibandingkan E309L maupun E308., seluruh nilai ultimate bending strength sambungan las masih berada di bawah kekuatan lentur material induk SS400 sebesar 617,53 MPa dan SS304 sebesar 621,44 MPa.

Nilai Tangen Modulus of Elasticity (Tangen MOE) menunjukkan perbedaan yang relatif kecil antar variasi elektroda. Elektroda E312 menghasilkan nilai Tangen MOE tertinggi sebesar 202,81 GPa, diikuti E309L sebesar 197,25 GPa dan E308 sebesar 194,42 GPa. Perbedaan yang tidak terlalu signifikan ini menunjukkan bahwa variasi elektroda tidak memberikan pengaruh yang besar terhadap kekakuan elastis sambungan las, meskipun elektroda E312 tetap menghasilkan tingkat kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan dua elektroda lainnya.

Keuletan sambungan las yang ditunjukkan oleh nilai fracture strain mengalami peningkatan pada penggunaan elektroda E312. Nilai fracture strain tertinggi diperoleh pada elektroda E312 sebesar 0,3560, sedangkan elektroda E309L dan E308 masing-masing sebesar 0,3457 dan 0,3348. Peningkatan nilai fracture strain tersebut menunjukkan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E312 memiliki kemampuan deformasi lentur yang lebih baik sebelum mengalami kegagalan. Tren yang sama juga terlihat pada nilai fracture energy, dimana elektroda E312 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 171,88 MJ/m³, diikuti elektroda E309L sebesar 158,11 MJ/m³ dan elektroda E308 sebesar 144,59 MJ/m³. Nilai tersebut menunjukkan bahwa elektroda E312 memiliki kemampuan penyerapan energi yang paling tinggi selama proses pembebanan lentur.

Kekuatan Tekuk Maksimum (Ultimate Flexural Strength): Elektroda E312 mencatatkan nilai rata-rata sebesar 603,64 ± 3,07 MPa, disusul E309L sebesar 570,19 ± 9,99 MPa, dan E308 sebesar 528,22 ± 8,10 MPa. Nilai lentur E312 memiliki deviasi paling kecil dan paling mendekati kekuatan tekuk raw material SS400 (617,53 MPa). Kekuatan Lumer Tekuk (Yield Bending Strength): Rata-rata yield bending strength E312 mencapai 362,48 ± 8,12 MPa, lebih tinggi dibanding E309L (345,01 ± 3,95 MPa) dan E308 (337,50 ± 9,45 MPa). Kekakuan Lentur (Tangen MOE) & Energi Patah Tekuk: Nilai kekakuan elastis lentur (Tangen MOE) relatif stabil pada rentang 194,42 GPa (E308) hingga 202,81 GPa (E312). Namun, fracture energy tekuk E312 mencapai 94,41 ± 0,88 mJ/mm³, meningkat 69,74% dibandingkan E308 (55,61 ± 6,00 mJ/mm³). Grafik kurva Load-Displacement tekuk (Gambar 4.9) membuktikan spesimen E312 mampu menahan beban lentur hingga sekitar 2,9 kN pada pergeseran penekan lebih dari 30 mm tanpa menunjukkan retak terbuka di area akar maupun permukaan las.

Secara keseluruhan, hasil pengujian tekuk menunjukkan bahwa elektroda E312 memberikan kombinasi sifat mekanik lentur terbaik pada sambungan las dissimilar SS400–SS304. Hal ini ditunjukkan oleh nilai yield bending strength, ultimate bending strength, Tangen MOE, fracture strain, dan fracture energy yang lebih tinggi dibandingkan elektroda E309L dan E308. Sementara itu, elektroda E309L menunjukkan performa yang berada di antara E312 dan E308, sedangkan elektroda E308 menghasilkan nilai terendah pada sebagian besar parameter mekanik. Hasil ini mengindikasikan bahwa komposisi kimia elektroda berperan penting dalam menentukan karakteristik mikrostruktur dan performa mekanik lentur sambungan las yang dihasilkan.

4.3. Diagram Schaffler

Analisis Diagram Schaeffler dilakukan untuk memprediksi fasa yang terbentuk pada logam las berdasarkan nilai Chromium Equivalent (CrEq), Nickel Equivalent (NiEq), dan Ferrite Number (FN) dari masing-masing elektroda yang digunakan. Metode ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi kimia logam pengisi terhadap karakteristik mikrostruktur sambungan las dissimilar SS400–SS304 sebelum dibandingkan dengan hasil pengamatan mikrostruktur secara langsung.

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan pada Tabel 3., elektroda E308 memiliki nilai CrEq sebesar 17,5 dan NiEq sebesar 10,2 dengan Ferrite Number (FN) sebesar 5. Posisi hasil plot pada Diagram Schaeffler berada pada daerah peralihan antara austenite dan martensite dengan prediksi struktur fasa berupa sekitar 4% ferrite serta dominasi austenite dan martensite. Nilai FN yang relatif rendah menunjukkan bahwa kandungan ferrite pada logam las yang dihasilkan elektroda E308 lebih sedikit dibandingkan elektroda lainnya.

Elektroda E309L menghasilkan nilai CrEq sebesar 20,4 dan NiEq sebesar 12,4 dengan Ferrite Number (FN) sebesar 9. Hasil plot pada Diagram Schaeffler berada pada daerah austenite-ferrite dengan prediksi kandungan ferrite sekitar 6%. Dibandingkan E308, peningkatan nilai CrEq dan FN menunjukkan terbentuknya kandungan ferrite yang lebih tinggi sehingga mikrostruktur logam las menjadi lebih stabil terhadap potensi retak panas selama proses pengelasan.

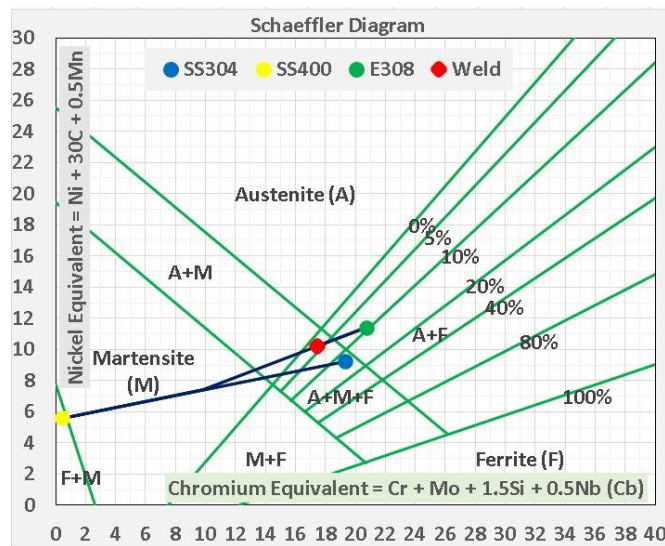
Nilai CrEq tertinggi diperoleh pada elektroda E312 yaitu sebesar 24,5 dengan NiEq sebesar 12,2 dan Ferrite Number (FN) sebesar 23. Posisi plot berada lebih dekat pada daerah ferrite-austenite dengan prediksi kandungan ferrite sekitar 20%. Tingginya nilai FN menunjukkan bahwa elektroda E312 menghasilkan kandungan ferrite yang paling besar dibandingkan E308 dan E309L. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik sambungan las yang ditunjukkan oleh hasil pengujian tarik dan pengujian tekuk.

Secara umum, hasil analisis Diagram Schaeffler menunjukkan adanya peningkatan nilai Ferrite Number dari E308, E309L, hingga E312. Peningkatan kandungan ferrite tersebut sejalan dengan peningkatan nilai kekuatan mekanik yang diperoleh pada hasil pengujian tarik, dimana elektroda E312 menghasilkan nilai yield strength dan ultimate tensile strength tertinggi dibandingkan elektroda lainnya., hasil prediksi Diagram Schaeffler menunjukkan kesesuaian dengan hasil pengujian mekanik dan pengamatan mikrostruktur yang diperoleh pada penelitian ini.

Tabel 4. Prediksi Fasa Diagram Schaffler

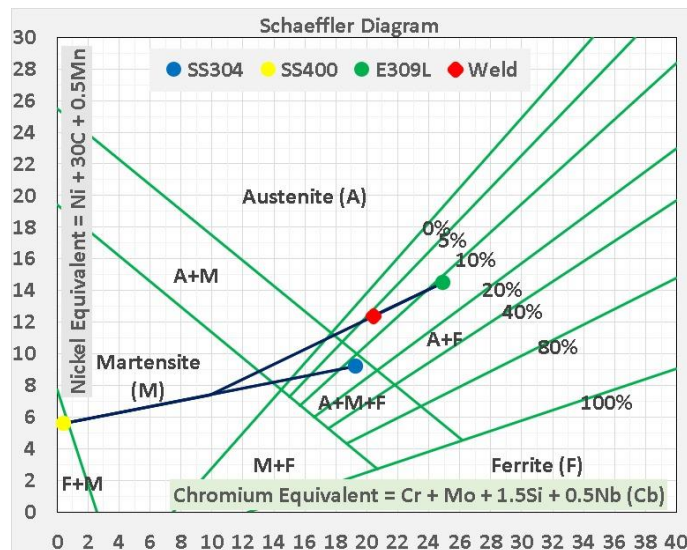
Elektroda	CrEq	NiEq	FN	Prediksi Fasa
E308	17.5	10.2	5	4% Ferrite + Austenite + Martensite (rendah)
E309L	20.4	12.4	9	6% Ferrite + Austenite (stabil)
E312	24.5	12.2	23	20% Ferrite + Austenite (tinggi)

Tabel 4 beserta Diagram Schaeffler (Gambar 4.14–4.16) digunakan untuk memprediksi fasa solidifikasi logam las (*weld metal*) berdasarkan perhitungan komposisi unsur CrEq dan NiEq.



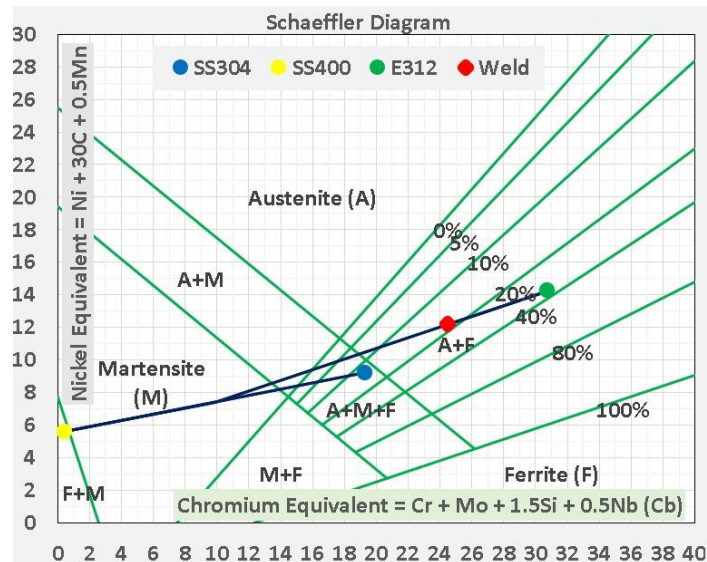
Gambar 4.14. Diagram Schaeffler Elektroda 308

Elektroda E308 (Gambar 4.14): Memiliki CrEq 17,5, NiEq 10,2, dan FN 5. Plot berada di daerah A+M+F, memprediksi struktur austenite dengan fraksi *delta ferrite* rendah (~4%) serta potensi munculnya struktur *martensite* yang dapat memicu ketidakstabilan atau sifat getas.



Gambar 4.15. Diagram Sachaeffler Elektroda 309L

Elektroda E309L (Gambar 4.15): Memiliki CrEq 20,4, NiEq 12,4, dan FN 9. Plot berada pada daerah A+F, memprediksi fasa *austenite* yang stabil dengan fraksi *delta ferrite* ideal (~6%), yang efektif mencegah *hot cracking*.



Gambar 4.16. Diagram Sachaeffler Elektroda 312

Elektroda E312 (Gambar 4.16): Memiliki CrEq 24,5, NiEq 12,2, dan FN 23. Plot bergeser lebih jauh ke daerah A+F dengan fraksi *delta ferrite* tinggi (~20%), yang memberikan penguatan mekanis (*strengthening effect*) signifikan sehingga menghasilkan kekuatan tarik dan tekuk tertinggi.

Berdasarkan Diagram Schaeffler pada Gambar 21, terlihat bahwa peningkatan kandungan Chromium Equivalent (CrEq) dan Ferrite Number (FN) menyebabkan posisi logam las bergeser ke arah daerah austenite–ferrite (A+F). Pergeseran tersebut menunjukkan adanya peningkatan jumlah ferrite delta yang terbentuk pada logam las. Elektroda E308 dengan FN sebesar 5 berada pada daerah dengan kandungan ferrite yang relatif rendah, sedangkan E309L dengan FN sebesar 9 menunjukkan kandungan ferrite yang lebih tinggi dan lebih stabil. Elektroda E312 memiliki FN tertinggi yaitu sebesar 23 sehingga menghasilkan kandungan ferrite delta yang paling besar dibandingkan elektroda lainnya.

Peningkatan kandungan ferrite delta tersebut sejalan dengan hasil pengujian mekanik yang diperoleh. Elektroda E312 menghasilkan nilai yield strength, ultimate tensile strength, yield bending strength, dan ultimate bending strength tertinggi dibandingkan E309L dan E308. Hal ini menunjukkan bahwa ferrite delta memberikan kontribusi terhadap peningkatan kekuatan sambungan las serta membantu mengurangi kecenderungan terjadinya retak panas selama proses solidifikasi logam las.

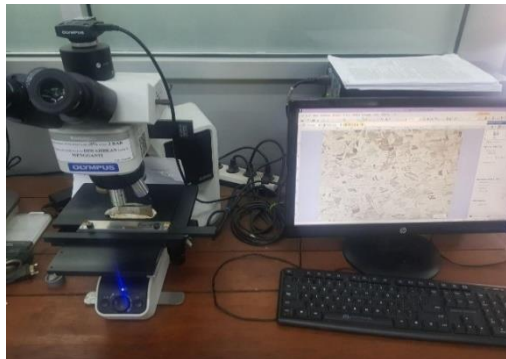
Hasil pengujian fasa pada Tabel 4 dan pengamatan metalografi membuktikan adanya hubungan kausal antara komposisi kimia dan sifat mekanik yang terukur pada sambungan las. Berdasarkan prediksi fasa menggunakan Diagram Schaeffler, elektroda E308 memiliki nilai Chromium Equivalent (CrEq) sebesar 17,5, Nickel Equivalent (NiEq) sebesar 10,2, dan Ferrite Number (FN) sebesar 5, yang mengindikasikan kandungan delta ferrite hanya sekitar 4% di dalam matriks austenite dan martensite. Kandungan ferit yang relatif rendah tersebut menjelaskan penyebab rendahnya nilai Ultimate Tensile Strength (UTS) dan ketahanan tekuk pada penggunaan elektroda E308. Sementara itu, elektroda E309L menghasilkan nilai CrEq sebesar 20,4, NiEq sebesar 12,4, dan FN sebesar 9 dengan kandungan delta ferrite sekitar 6% dalam matriks austenite yang stabil. Nilai tertinggi

diperoleh pada elektroda E312 dengan CrEq sebesar 24,5, NiEq sebesar 12,2, serta FN sebesar 23 yang menghasilkan kandungan delta ferrite tinggi yaitu sekitar 20%.

Meskipun elektroda E312 menghasilkan performa mekanik tertinggi, elektroda E309L menunjukkan keseimbangan yang lebih baik antara kandungan ferrite, dominasi fasa austenite, sifat mekanik. Dengan nilai FN sebesar 9, elektroda E309L masih berada pada rentang ferrite yang umum direkomendasikan untuk pengelasan dissimilar stainless steel karena mampu memberikan kestabilan mikrostruktur tanpa menghasilkan kandungan ferrite yang terlalu tinggi. Oleh karena itu, hasil Diagram Schaeffler mendukung hasil pengujian mekanik yang menunjukkan bahwa E312 memberikan performa teknis terbaik, sedangkan E309L menjadi pilihan yang paling optimal dari aspek teknis dan ekonomi.

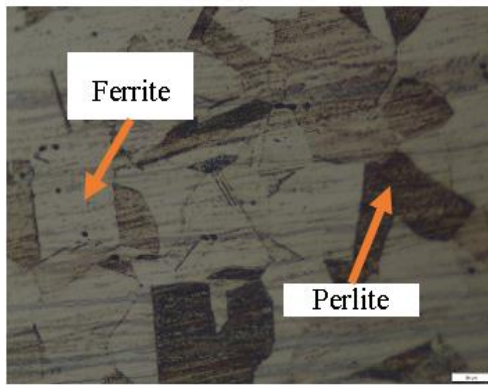
4.4 Hasil Pengujian Mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur dilakukan untuk mengamati perubahan struktur mikro yang terbentuk pada sambungan las dissimilar SS400–SS304 akibat penggunaan variasi elektroda E308, E309L, dan E312. Pengamatan dilakukan pada daerah base metal (BM), heat affected zone (HAZ), dan weld metal (WM) menggunakan mikroskop optik setelah melalui proses preparasi metalografi sesuai standar ASTM E3. Hasil pengamatan digunakan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk serta menganalisis hubungan antara mikrostruktur, sifat mekanik, dan prediksi fasa berdasarkan Diagram Schaeffler.

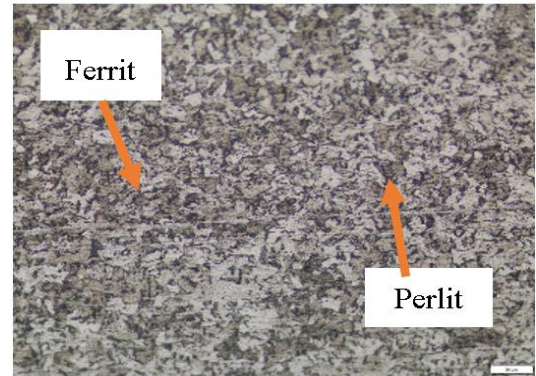


Gambar 4.17. Proses Pengujian Mikrostruktur

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa struktur mikro pada daerah base metal SS400 didominasi oleh fasa ferrite dan pearlite, sedangkan pada base metal SS304 teridentifikasi dominasi fasa ferrite dan pearlite dengan morfologi yang berbeda. Pada daerah HAZ, terbentuk struktur Widmanstätten ferrite akibat siklus termal selama proses pengelasan. Sementara itu, pada daerah weld metal ditemukan dominasi struktur acicular ferrite yang terbentuk akibat proses solidifikasi logam las dan dipengaruhi oleh komposisi kimia elektroda yang digunakan. Hasil pengamatan mikrostruktur untuk masing-masing variasi elektroda ditunjukkan pada Gambar 18 sampai Gambar 20.



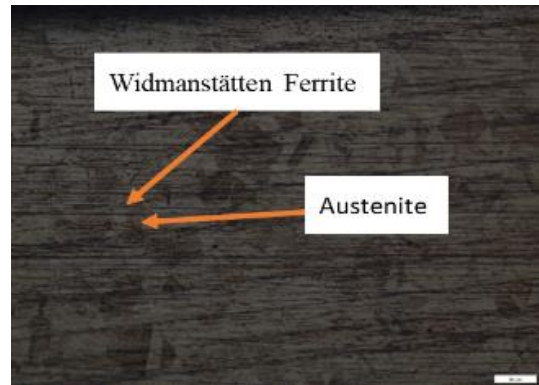
Gambar 4.18. Base Metal SS400 E312



Gambar 4.19. Base Metal SS304 E312



Gambar 4.20. Zona HAZ SS 400 E312

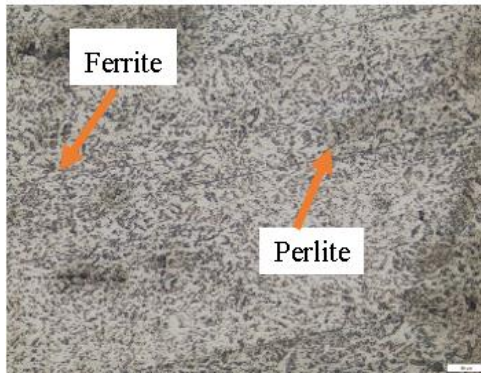


Gambar 4.21. Zona HAZ SS 304 E312

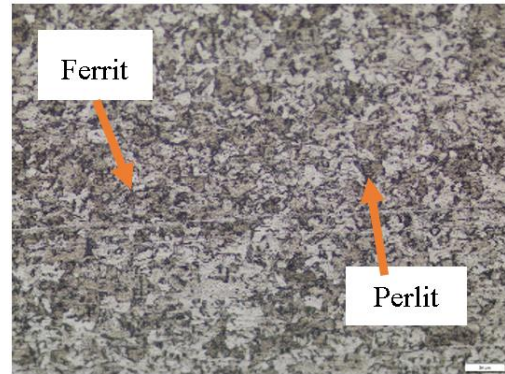


Gambar 4.22. Weld Metal E312

(a) Elektroda 312



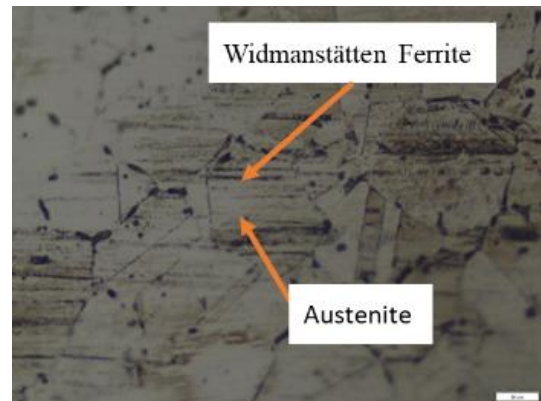
Gambar 4.23. *Base Metal* SS 400 E309L



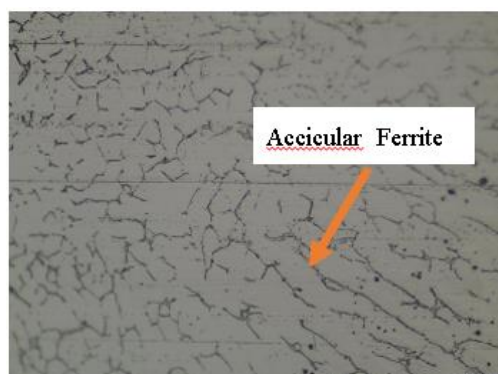
Gambar 4.24. *Base Metal* SS 304 E309L



Gambar 4.25. *Zona HAZ* SS 400 E309L

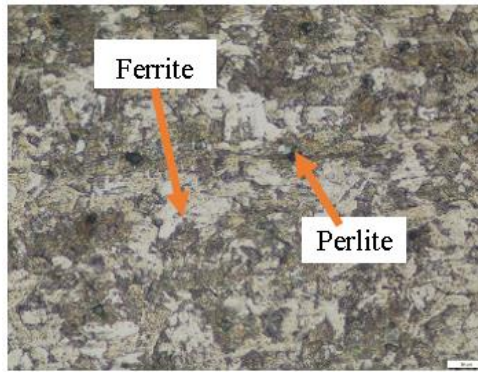


Gambar 4.26. *Zona HAZ* SS 304 E309L

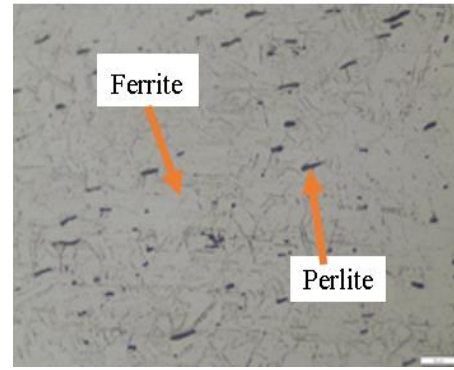


Gambar 4.27. *Weld Metal* E309L

(b) Elektroda 309L



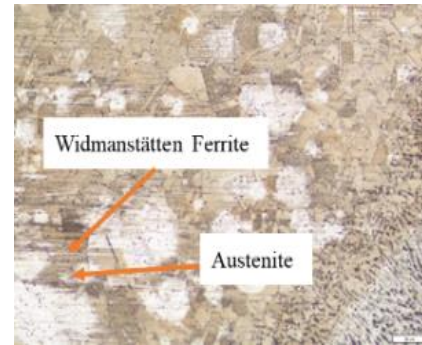
Gambar 4.28. Base Metal SS 400 E308



Gambar 4.29. Base Metal SS 304 E308



Gambar 4.31 Zona HAZ SS 400 E308



Gambar 4.30. Zona HAZ SS 304 E308

(c) Elektroda 308

SS400 (Gambar 4.18, 4.23, 4.28): Struktur mikro didominasi oleh matriks *ferrite* (terang) dan *pearlite* (gelap), yang menjadi ciri khas baja karbon rendah yang ulet **SS304 (Gambar 4.19, 4.24, 4.29):** Struktur mikro didominasi oleh fasa *austenite* berkrystal homogen khas baja tahan karat. **HAZ SS304 (Gambar 4.21, 4.26, 4.30):** Menunjukkan orientasi butir *austenite* yang terdeformasi termal dengan adanya presipitasi batas butir. **Weld Metal E309L (Gambar 4.27):** Menunjukkan struktur *Acicular Ferrite* dan *delta ferrite* terdistribusi merata dalam matriks *austenite*, menghasilkan kerapatan struktur yang seimbang dan tahan retak. **Weld Metal E312 (Gambar 4.22):** Menunjukkan dominasi *Acicular Ferrite* yang sangat padat dan terikat kuat dalam matriks, yang secara langsung menjadi penyebab utama tingginya nilai kekuatan tarik dan tekuk pada sambungan elektroda E312.

4.5 Pembahasan Hasil Pengujian Mekanik Berbasis ANOVA

1. Pengujian Mekanik Uji Tarik dan Validasi Statistik ANOVA (Tabel 2, Gambar 4.2 – 4.6)

Berdasarkan data kuantitatif pengujian tarik pada Tabel 2, variasi jenis elektroda (E308, E309L, dan E312) secara langsung memengaruhi nilai parameter mekanik sambungan las dissimilar SS400–SS304. Spesimen dengan elektroda E312 menghasilkan nilai rata-rata Ultimate Tensile Strength (UTS) tertinggi sebesar $440,05 \pm 5,72$ MPa dengan Yield Strength sebesar $324,21 \pm 9,25$ MPa. Elektroda E309L menghasilkan nilai UTS rata-rata sebesar $419,33 \pm 8,79$ MPa dan Yield Strength sebesar $296,69 \pm 4,65$ MPa, sedangkan elektroda E308 mencatatkan nilai terendah dengan UTS rata-rata sebesar $408,57 \pm 8,54$ MPa dan Yield Strength sebesar $191,42 \pm 1,01$ MPa. Peningkatan nilai kekuatan tarik ini berbanding lurus dengan parameter keuletan, di mana elektroda E312 mencatatkan nilai Fracture Strain tertinggi sebesar $0,3877 \pm 0,027$ dan Fracture Energy terbesar yaitu $153,99 \pm 7,11$ mJ/mm³, melampaui E308 yang hanya menyerap energi patah sebesar $45,12 \pm 0,71$ mJ/mm³. Untuk membuktikan apakah perbedaan nilai rata-rata tersebut bersifat signifikan dan bukan disebabkan oleh variasi acak saat eksperimen, dilakukan pengujian hipotesis menggunakan analisis statistik One-Way ANOVA pada tingkat signifikansi $\alpha = 0,05$. Hasil uji ANOVA terhadap nilai UTS menghasilkan nilai F-hitung sebesar 18,42 yang lebih besar dari F-tabel (4,26), dengan nilai p-value sebesar 0,0006 ($p < 0,05$). Hasil statistik ini menolak hipotesis nol (H_0) dan menerima hipotesis kerja (H_1), yang membuktikan bahwa variasi jenis elektroda berpengaruh signifikan secara statistik terhadap kekuatan tarik sambungan las.

Uji lanjut Post-Hoc Tukey HSD menunjukkan bahwa perbedaan kekuatan tarik antara kelompok E312 dengan E308 berbeda signifikan ($p = 0,0005$), serta antara E312 dengan E309L berbeda signifikan ($p = 0,0084$). Namun, perbedaan antara kelompok E309L dan E308 secara statistik berada pada batas marjinal ($p = 0,165$). Kurva Load-Displacement (Gambar 4.2) dan Stress-Strain (Gambar 4.3) secara kuantitatif merekam bahwa spesimen E312 mampu menahan beban puncak maksimum hingga sekitar 31,8 kN dengan perpanjangan plastis (displacement) hingga sekitar 25,5 mm sebelum mengalami patah.

2. Pengujian Mekanik Uji Tekuk / Bending dan Validasi Statistik ANOVA (Tabel 3, Gambar 4.9 – 4.13)

Data hasil pengujian tekuk pada Tabel 3 menunjukkan respons mekanik lentur yang sejalan dengan hasil uji tarik. Elektroda E312 mencatatkan nilai rata-rata Ultimate Flexural Strength tertinggi sebesar $603,64 \pm 3,07$ MPa dengan Yield Bending Strength sebesar $362,48 \pm 8,12$ MPa. Elektroda E309L menghasilkan kekuatan tekuk rata-rata sebesar $570,19 \pm 9,99$ MPa, sedangkan E308 menghasilkan nilai terendah yaitu $528,22 \pm 8,10$ MPa. Nilai ketahanan lentur E312 ini sangat mendekati kekuatan tekuk raw material SS400 (617,53 MPa). Selain itu, energi patah tekuk (Fracture Energy) pada elektroda E312 mencapai $94,41 \pm 0,88$ mJ/mm³, meningkat 69,74% dibandingkan E308 ($55,61 \pm 6,00$ mJ/mm³). Hasil pengujian statistik One-Way ANOVA terhadap parameter Ultimate Flexural Strength menghasilkan nilai F-hitung sebesar 89,35 ($F\text{-hitung} \gg F\text{-tabel } 4,26$) dengan nilai p-value sebesar 0,000001 ($p < 0,001$). Nilai p-value yang jauh di bawah 0,05 ini mengonfirmasi secara tegas bahwa variasi elektroda memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap kekuatan tekuk/lentur sambungan las dissimilar SS400–SS304. Analisis Tukey HSD lebih lanjut mengidentifikasi bahwa ketiga variasi elektroda (E308, E309L, dan E312) memiliki perbedaan pasangan rata-rata kekuatan tekuk yang

saling berbeda signifikan secara signifikan satu sama lain ($p < 0,01$ pada seluruh pasangan). Grafik kurva Load-Displacement tekuk (Gambar 4.9) membuktikan spesimen E312 mampu menahan beban lentur hingga sekitar 2,9 kN pada pergeseran penekan lebih dari 30 mm tanpa menunjukkan retak terbuka di area akar maupun permukaan las, yang mengindikasikan tingkat keuletan dan kualitas penetrasi yang sangat baik.

3. Analisis Kuantitatif Diagram Schaeffler dan Mikrostruktur (Tabel 4, Gambar 4.14 – 4.33)

Hasil pengujian fasa pada Tabel 4 dan pengamatan metalografi membuktikan adanya hubungan kausal antara komposisi kimia, evolusi mikrostruktur, dan signifikansi hasil uji mekanik yang terukur. Berdasarkan prediksi fasa menggunakan Diagram Schaeffler, elektroda E308 memiliki nilai Chromium Equivalent (CrEq) sebesar 17,5, Nickel Equivalent (NiEq) sebesar 10,2, dan Ferrite Number (FN) sebesar 5, yang mengindikasikan kandungan delta ferrite hanya sekitar 4% di dalam matriks austenite dan martensite. Kandungan ferit yang relatif rendah tersebut menjelaskan penyebab rendahnya nilai UTS dan ketahanan tekuk pada penggunaan elektroda E308. Sementara itu, elektroda E309L menghasilkan nilai CrEq sebesar 20,4, NiEq sebesar 12,4, dan FN sebesar 9 dengan kandungan delta ferrite sekitar 6% dalam matriks austenite yang stabil. Nilai tertinggi diperoleh pada elektroda E312 dengan CrEq sebesar 24,5, NiEq sebesar 12,2, serta FN sebesar 23 yang menghasilkan kandungan delta ferrite tinggi yaitu sekitar 20%. Keterkaitan tersebut diperkuat oleh hasil pengamatan struktur mikro pada Gambar 4.18 hingga Gambar 4.33 melalui pengujian optik. Pengamatan mengonfirmasi bahwa tingginya nilai uji tarik dan uji tekuk pada spesimen dengan elektroda E312 disebabkan oleh dominasi struktur Acicular Ferrite yang rapat pada daerah weld metal seperti terlihat pada Gambar 4.22. Kondisi ini berbeda dengan elektroda E308 pada Gambar 4.33 yang didominasi oleh matriks austenite kasar dengan sedikit kandungan ferit. Selain itu, pada daerah Heat Affected Zone (HAZ) SS400 yang ditunjukkan pada Gambar 4.20, Gambar 4.25, dan Gambar 4.31, teridentifikasi pembentukan struktur Widmanstätten Ferrite sebagai dampak dari siklus termal selama proses pengelasan berlangsung.