

Variasi Besar Arus Listrik dan Ketebalan Pelat pada Pengelasan SMAW Terhadap Distorsi Angular Sambungan T Baja ST37

Ratna Fajarwati Meditama^{1*}, Luchyto Chandra Permadi², Faisol Khoufi Asshidiqi³

^{1,2,3}Universitas Islam Raden Rahmat, Malang

*Penulis Korespondensi, email: anantafajar@gmail.com

Received: 23/06/2022

Revised: 28/06/2022

Accepted: 28/06/2022

Abstract. Distortion of ST37 steel T welding with SMAW affects the quality, accuracy, size, and dimensions. Distortion is affected by weld heat and plate thickness. This study aims to analyze the variation of electric current (I) and plate thickness (h) on the angular distortion of Steel ST 37. The method used is an experimental pre-test and post-test to obtain data relevant to the hypothesis to be tested. The research objectives (1) to find the effect of large variations in electric current (80 A, 100 A, and 120 A) in SMAW welding on the angular distortion of the T-joint of St 37 steel, (2) to find the effect of variations in plate thickness (3 mm, 4 mm, and 5 mm) on SMAW welding on the angular distortion of St 37 steel T joints, (3) Found a significant effect between variations in electric current (80 A, 100 A, 120 A) and plate thickness (3 mm, 4 mm, 5 mm). This research is classified as an experimental research with a 2 x 3 x 3 factorial design. The results of the study found that the magnitude of the electric current and the thickness of the plate affected the occurrence of angular distortion in the T junction of St 37 steel, including: (1) An electric current of 120 A produced the highest mean angular distortion, namely 2.014 mm and an electric current of 80 A produces the lowest mean angular distortion of 0.558 mm, (2) 3 mm plate thickness produces the highest mean angular distortion of 2.014 mm and a plate thickness of 5 mm produces the lowest mean angular distortion of 0.558 mm, (3) On electric current 120 A with a plate thickness of 3 mm, the highest T-joint welding causes angular distortion than electric current and the other plate thickness with an average value of 2.014 mm

Keywords: Electric current, Plate joint, ST37 Steel, SMAW

Abstrak. Distorsi las T baja ST37 dengan SMAW berpengaruh pada kualitas, ketelitian, ukuran, dan dimensi. Distorsi dipengaruhi oleh panas lasa dan tebal pelat. Penelitian bertujuan menganalisis variasi arus listrik (I) dan tebal pelat (h) terhadap distorsi angular T Baja ST 37. Metode yang digunakan berupa kajian eksperimental *pre test* dan *post test* untuk memperoleh data yang relevan dengan hipotesis yang akan diuji. Tujuan penelitian (1) Menemukan pengaruh variasi besar arus listrik (80 A, 100 A, dan 120 A) pada pengelasan SMAW terhadap distorsi angular sambungan T baja St 37, (2) Menemukan pengaruh variasi ketebalan pelat (3 mm, 4 mm, dan 5 mm) pada pengelasan SMAW terhadap distorsi angular sambungan T baja St 37, (3) Menemukan pengaruh yang signifikan antara variasi arus listrik (80 A, 100 A, 120 A) dan ketebalan pelat (3 mm, 4 mm, 5 mm). Penelitian ini tergolong jenis penelitian eksperimental dengan rancangan *factorial* 2 x 3 x 3. Hasil penelitian menemukan bahwa besar arus listrik dan ketebalan pelat mempengaruhi terjadinya distorsi angular pada sambungan T baja St 37, diantaranya: (1) Arus listrik 120 A menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi yaitu 2,014 mm dan arus listrik 80 A menghasilkan *mean* distorsi angular terendah yaitu 0,558 mm, (2) Ketebalan pelat 3 mm menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi 2,014 mm dan ketebalan pelat 5 mm menghasilkan *mean* distorsi angular terendah 0,558 mm, (3) Pada arus listrik 120 A dengan ketebalan pelat 3 mm, pada pengelasan sambungan T paling tinggi menyebabkan distorsi angular daripada arus listrik dan ketebalan Pelat yang lain dengan nilai rerata sebesar 2,014 mm.

Kata Kunci: Arus listrik, Sambungan pelat, Baja ST37, SMAW

I. PENDAHULUAN

Setiap konstruksi dalam permesinan dan bangunan pada umumnya terdiri dari banyak bagian yang dirakit menjadi satu kesatuan. Bagian-bagian

tersebut disambungkan dengan beberapa macam sistem sambungan [1]. Hal ini dimaksudkan untuk memudahkan pembuatan dalam konstruksi. Dalam penyambungan ini digunakan pengelasan.

Pengelasan ini disebut dengan sambungan permanen. Sambungan permanen adalah sambungan yang tidak dapat dibuka. Sambungan permanen banyak digunakan untuk pekerjaan konstruksi besar, seperti jembatan, bangunan baja, konstruksi baja pada bangunan gedung [2]. Pada pengelasan ini menggunakan jenis las listrik dan las karbit. Keduanya ini memerlukan panas untuk memanaskan permukaan benda kerja yang akan disambung. Sambungan las mampu untuk menyambung benda kerja, baik dalam bentuk pelat maupun dalam bentuk balok-balok yang tebal dan mudah pelaksanaannya. Benda kerja itu biasanya menggunakan baja lunak (*mild steel*).

Wiryosumarto dan Okumura [3] menyebutkan baja lunak (*mild steel*) merupakan jenis baja karbon rendah yang dikenal luas penggunaannya mengingat sifat mampu lasnya (*weldability*) yang lebih baik dibandingkan baja karbon sedang atau tinggi, walaupun kekuatan dan kekerasannya lebih rendah. Sifat mampu lasnya yang baik memberikan kemudahan pengelasan untuk menghasilkan logam lasan berkualitas baik. Salah satu spesifikasi baja lunak yaitu St 37, cukup banyak digunakan pada pengelasan sambungan T dengan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), misalnya untuk penguat dan *flange* penghubung pada konstruksi baja bangunan atau penguat pada struktur kapal. Meningkatnya kebutuhan akan hasil lasan yang berkualitas itu sebagai akibat penerapan kontrol kualitas yang semakin baik [4]. Berbagai permasalahan kemudian timbul dalam prakteknya di bidang industri dan konstruksi, seperti terjadinya simpangan atau distorsi angular yang cenderung bersifat permanen. Distorsi angular pada hasil lasan tidak hanya mengurangi ketelitian ukuran dan mengubah bentuk luarnya saja, tetapi juga menurunkan kekuatannya [5].

Pada sambungan T yang dilas SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), bila tidak dilakukan pencegahan hampir selalu terjadi distorsi angular (biasanya lebih besar daripada yang terjadi pada sambungan las tumpul). Distorsi angular sangat dipengaruhi oleh pemilihan parameter pengelasan yang menentukan besarnya masukan panas (*heat*

input) pengelasan yang berupa arus listrik las, kecepatan pengelasan, tegangan listrik las, diameter dan jenis elektroda [6]. Faktor-faktor yang turut mempengaruhi adalah ketebalan *flange* yang dilas, jumlah lapisan las, urutan pengelasan, geometri alur las (*weldgroove*) yang digunakan (mempengaruhi pemilihan elektroda) dan teknik pengelasan (manipulasi gerakan elektroda, yang sekaligus mempengaruhi kecepatan pengelasan). Ketebalan *flange* benda kerja yang dilas menentukan ketahanan benda kerja terhadap momen pada sumbu netralnya. Inilah yang penyebab terjadinya distorsi angular [7]. Sedangkan penelitian yang dilakukan oleh Juliana Anggoro dan Roche Alimin [8] menyatakan bahwa semakin besar arus listrik maka semakin besar pula distorsinya dan semakin tebal bahan (Baja lunak SS400) maka distorsinya semakin kecil.

II. METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah kajian eksperimental dengan pre test dan post test yang dapat diartikan suatu peristiwa yang direncanakan dan dilaksanakan untuk memperoleh data yang relevan dengan hipotesis yang akan diuji. Bentuk rancangan penelitian yang digunakan dalam penelitian eksperimen ini adalah factorial $2 \times 3 \times 3$ untuk menguji ada tidaknya pengaruh dari dua variabel bebas yaitu arus listrik dan ketebalan pelat pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T baja St 37. Mekanisme penelitian disusun untuk menentukan langkah-langkah percobaan agar diperoleh data yang tepat, sesuai dengan karakteristik, variabel dan tujuan penelitian.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil pengujian sambungan ST37 dengan variasi arus 80A, 100A, dan 120A

Setelah dilakukan pengambilan data terhadap obyek penelitian, yang kemudian data tersebut telah diolah dan dianalisis untuk menguji hipotesis, telah ditemukan bahwa ada pengaruh yang signifikan variasi besar arus listrik pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi

angular sambungan T Baja St 37. Pada tabel 1 dapat dilihat perbedaan rerata distorsi angular yang menggunakan arus listrik 80 A, 100 A, dan 120 A dengan nilai (1) Pada arus listrik 80 A, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 1,021 mm, (2) Pada arus listrik 100 A, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 1,246 mm, (3) Pada arus listrik 120 A, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 1,510 mm.

Tabel 1. Hasil pengujian dengan arus 80A, 100A, dan 120A

Arus	Pelat	Mean	Std. Error	99% Confidence Interval	
				Lower Bound	Upper Bound
80 A	3 mm	1.314	.059	1.155	1.473
	4 mm	1.192	.059	1.033	1.351
	5 mm	.558	.059	.399	.717
100 A	3 mm	1.638	.059	1.479	1.797
	4 mm	1.362	.059	1.203	1.521
	5 mm	.738	.059	.579	.897
120 A	3 mm	2.014	.059	1.855	2.173
	4 mm	1.446	.059	1.287	1.605
	5 mm	1.070	.059	.911	1.229

Dari data tersebut dapat ditemukan bahwa distorsi angular terbesar (*mean* terbesar 1,510 mm) dihasilkan dari arus listrik 120 A, sedangkan distorsi angular terendah (*mean* terendah 1,021 mm) dihasilkan dari arus listrik 80 A. Pada tabel 1 dapat dilihat perbedaan rerata distorsi angular yang terjadi.

1. Pada arus listrik 80 A, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 0,558 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 1,314 mm.
2. Pada arus listrik 100 A, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 0,738 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 1,638 mm.
3. Pada arus listrik 120 A, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 1,070 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 2,014 mm.

Dari tabel 1 dapat ditemukan bahwa *mean* distorsi angular tertinggi pada arus listrik 80 A diperoleh pada ketebalan pelat 3 mm sebesar 1,314 mm. Pada arus listrik 100 A, dapat diketahui *mean* distorsi angular tertinggi diperoleh pada ketebalan pelat 3 mm sebesar 1,638 mm. Sedangkan pada arus listrik 120 A, dapat diketahui *mean* distorsi angular tertinggi diperoleh pada ketebalan pelat 3 mm sebesar 2,014 mm. Kesimpulannya adalah arus listrik 120 A menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi yaitu sebesar 2,014 mm dan arus listrik 80 A menghasilkan *mean* distorsi angular terendah yaitu sebesar 0,558 mm. Artinya semakin bertambahnya arus listrik maka terjadinya distorsi angular sangat besar dan semakin berkurangnya arus listrik maka terjadinya distorsi angular sangat kecil (dengan ketebalan yang sama).

Pada kajian teori telah dijelaskan, Menurut Wiryosumarto dan Okumura (1994) siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan. Lamanya pendinginan dalam suatu daerah temperatur tertentu dari situasi siklus termal las sangat mempengaruhi kualitas sambungan. Masukan panas (*heat input*) pengelasan ditentukan oleh beberapa parameter pengelasan, diantaranya adalah tegangan busur las, arus listrik las, dan kecepatan pengelasan

Untuk arus listrik 80 A distorsi angular yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan arus 100 A. Demikian juga dengan arus listrik 100 A, distorsi angular yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan arus 120 A. Maka kenaikan arus listrik menyebabkan terjadinya distorsi angular menjadi lebih besar (untuk ketebalan pelat yang sama). Hal tersebut diatas dapat ditarik asumsi bahwa dengan semakin bertambahnya arus listrik las yang digunakan maka masukan panas pengelasan yang diterima logam las dan sekitarnya menjadi lebih besar. Dengan demikian penyusutan termal yang terjadi lebih besar sehingga distorsi angular yang terjadi juga lebih besar.

B. Perbedaan rata-rata tiap plat 3mm, 4mm, dan 5mm

Setelah dilakukan pengambilan data terhadap obyek penelitian, ditemukan bahwa ada pengaruh

yang signifikan variasi ketebalan pelat pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T Baja St 37.

Tabel 2. Rata-rata distorsi las pada plat 3mm, 4mm, dan 5 mm

Pelat	Mean	Std. Error	99% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
3 mm	1.655	.034	1.563	1.747
4 mm	1.333	.034	1.241	1.425
5 mm	.789	.034	.697	.881

Pada tabel 2 dapat dilihat perbedaan rerata distorsi angular yang menggunakan ketebalan pelat 3 mm, 4 mm, dan 5 mm dengan nilai (1) Pada ketebalan pelat 3 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 1,655 mm, (2) Pada ketebalan pelat 4 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 1,333 mm, (3) Pada ketebalan pelat 5 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angularnya sebesar 0,789 mm. Dari data tersebut dapat ditemukan bahwa distorsi angular terbesar (*mean* terbesar 1,655 mm) dihasilkan dari ketebalan pelat 3 mm, sedangkan distorsi angular terendah (*mean* terendah 0,789 mm) dihasilkan dari ketebalan pelat 5 mm. Pada tabel 1 dapat dilihat perbedaan rerata distorsi angular yang terjadi.

1. Pada ketebalan pelat 3 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 1,314 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 2,014 mm.
2. Pada ketebalan pelat 4 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 1,192 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 1,446 mm.
3. Pada ketebalan pelat 5 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angular terendah sebesar 0,558 mm. Sedangkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 1,070 mm.

Dari tabel 1 dapat ditemukan bahwa *mean* distorsi angular tertinggi pada ketebalan pelat 3 mm yang diperoleh pada arus listrik 120 A sebesar 2,014 mm. Pada ketebalan pelat 4 mm, dapat diketahui

mean distorsi angular tertinggi diperoleh pada arus listrik 120 A sebesar 1,446 mm. Sedangkan pada ketebalan pelat 5 mm, dapat diketahui *mean* distorsi angular tertinggi diperoleh pada arus listrik 120 A sebesar 1,070 mm. Kesimpulannya adalah ketebalan pelat 3 mm menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 2,014 mm dan ketebalan pelat 5 mm menghasilkan *mean* distorsi angular terendah sebesar 0,558 mm. Artinya semakin bertambahnya ketebalan pelat maka terjadinya distorsi angular sangat kecil dan semakin berkurangnya ketebalan pelat maka terjadinya distorsi angular sangat besar (dengan arus yang sama).

Pada kajian teori telah dijelaskan, menurut Wirjosumarto dan Okumura (1994) besarnya distorsi angular juga dipengaruhi oleh kondisi pengelasan berupa besaran (harga) parameter pengelasan:

$$x = \left(h \cdot \sqrt{v \cdot h} \right) 10^{-3} \quad A \sqrt{\det \cdot \text{cm}^{-2}} \quad (1)$$

Dengan:

I = Arus listrik las (A)

h = tebal *flange* (cm)

v = Kecepatan pengelasan (cm/det)

Pada suatu harga $\frac{I}{\left(h \cdot \sqrt{v \cdot h} \right) 10^{-3}}$ tertentu

(x_{kritis}), distorsi angular yang terjadi akan mencapai harga tertinggi. Dibawah atau diatas harga tersebut, terjadinya distorsi angular relatif lebih kecil. Jadi untuk pengelasan dengan harga x tertentu, jika besarnya harga x tersebut semakin menjauhi x_{kritis} maka distorsi angular yang terjadi semakin kecil dan sebaliknya.

C. Pembahasan hasil distorsi las SMAW

Setelah dilakukan pengujian hipotesis dengan menggunakan data-data yang terkumpul, maka dapat ditemukan adanya pengaruh yang signifikan variasi besar arus listrik dan ketebalan pelat pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T Baja St 37. Pada tabel 1 dan grafik rerata 4.3 dapat dilihat jelas bahwa pengelasan pada sambungan T baja St 37

dengan variasi arus listrik 80 A, 100 A, 120 A dan ketebalan pelat 3 mm, 4 mm, 5 mm pada obyek penelitian telah terjadi distorsi angular dengan menghasilkan rerata yang berbeda. Di sini dapat dijelaskan pengelasan sambungan T yang menggunakan ketebalan pelat 3 mm memperoleh *mean* terendah pada arus listrik 80 A dengan nilai sebesar 1,314 mm dan *mean* tertinggi pada arus listrik 120 A dengan nilai sebesar 2,014 mm. Pengelasan sambungan T yang menggunakan ketebalan pelat 4 mm memperoleh *mean* terendah pada arus listrik 80 A dengan nilai 1,192 mm dan *mean* tertinggi pada arus listrik 120 A dengan nilai sebesar 1,446 mm. Sedangkan pengelasan sambungan T yang menggunakan ketebalan pelat 5 mm memperoleh *mean* terendah pada arus listrik 80 A dengan nilai 0,558 mm dan *mean* tertinggi pada arus listrik 120 A dengan nilai sebesar 1,070 mm. Dari hasil tersebut dapat dijelaskan pada arus listrik 120 A dengan ketebalan pelat 3 mm, pada pengelasan sambungan T paling tinggi menyebabkan distorsi angular daripada arus listrik dan ketebalan pelat yang lain.

Asumsinya, masukan panas pengelasan yang besar berpengaruh untuk terjadi distorsi angular. Tingginya distorsi angular pada arus listrik 120 A dikarenakan masukan panas pengelasan yang diterima logam las dan sekitarnya menjadi besar, sehingga untuk ketebalan pelat yang tipis (3 mm) terjadinya distorsi angular cukup besar. Selain itu pada arus listrik 80 A terjadinya distorsi angular lebih kecil dikarenakan masukan panasnya relatif seimbang dengan ketebalan pelat yang tipis (3 mm). Hal ini sesuai dengan Wiryosumarto dan Okumura (1994) pada suatu harga $\frac{I}{(h \cdot \sqrt{v \cdot h})} \cdot 10^{-3}$ tertentu (X_{kritis}), distorsi angular yang terjadi akan mencapai harga tertinggi. Dengan kata lain dengan peningkatan atau penurunan I dan h, jika harga x-nya mendekati X_{kritis} maka distorsi angular yang terjadi semakin besar dan sebaliknya.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah melakukan penelitian tentang pengaruh variasi besar arus listrik (80 A, 100 A, dan 120 A)

dan ketebalan pelat (3 mm, 4 mm, dan 5 mm) pada pengelasan pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T baja St 37 maka dapat ditarik kesimpulan:

1. Terdapat pengaruh yang signifikan variasi besar arus listrik pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T Baja St 37. Pengaruh yang dihasilkan tersebut adalah semakin bertambahnya arus listrik maka terjadinya distorsi angular sangat besar dan semakin berkurangnya arus listrik maka terjadinya distorsi angular sangat kecil (dengan ketebalan yang sama). Dari hasil penelitian arus listrik 120 A menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi yaitu sebesar 2,014 mm dan arus listrik 80 A menghasilkan *mean* distorsi angular terendah yaitu sebesar 0,558 mm.
2. Terdapat pengaruh yang signifikan variasi ketebalan pelat pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T Baja St 37. Pengaruh yang dihasilkan tersebut adalah semakin bertambahnya ketebalan pelat maka terjadinya distorsi angular sangat kecil dan semakin berkurangnya ketebalan pelat maka terjadinya distorsi angular sangat besar (dengan arus yang sama). Dari hasil penelitian pada ketebalan pelat 3 mm menghasilkan *mean* distorsi angular tertinggi sebesar 2,014 mm dan ketebalan pelat 5 mm menghasilkan *mean* distorsi angular terendah sebesar 0,558 mm.
3. Terdapat pengaruh yang signifikan variasi besar arus listrik dan ketebalan pelat pada pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) terhadap distorsi angular sambungan T Baja St 37. Perubahan distorsi angular yang menggunakan arus listrik 80 A dan ketebalan pelat 5 mm relatif lebih kecil dengan *mean* sebesar 0,558 mm. Sedangkan perubahan distorsi angular yang menggunakan arus listrik 120 A dan ketebalan pelat 3 mm relatif lebih besar dengan *mean* sebesar 2,014 mm. Pengaruh yang terjadi pada penelitian ini adalah semakin bertambahnya arus listrik dan berkurangnya ketebalan pelat (I dan h) maka

distorsi angular yang terjadi relatif besar dan sebaliknya.

REFERENSI

- [1] M. B. King, "Water electrolyzers and the zero-point energy," *Phys. Procedia*, vol. 20, pp. 435–445, 2011, doi: 10.1016/j.phpro.2011.08.038.
- [2] T.-H. Pham and S.-E. Kim, "Microstructure evolution and mechanical properties changes in the weld zone of a structural steel during low-cycle fatigue studied using instrumented indentation testing," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 114, pp. 141–156, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2016.05.021.
- [3] J. Chen, Y. Wei, X. Zhan, Y. Li, W. Ou, and T. Zhang, "Melt flow and thermal transfer during magnetically supported laser beam welding of thick aluminum alloy plates," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 254, pp. 325–337, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.046.
- [4] G. A. Nassef, A. Elkhatib, and M. Yakout, "Analysis of a failed rocker arm shaft of a passenger car engine," *Case Stud. Eng. Fail. Anal.*, vol. 5–6, pp. 10–14, 2016, doi: 10.1016/j.csefa.2016.01.001.
- [5] A. D. Putra, M. Rohman, and A. Wahab, "Analisis Desain Excavator Bucket Menggunakan Metode Elemen Hingga dengan Material Baja," vol. 16, pp. 4–7, 2020.
- [6] S. C. Wu, Z. W. Xu, C. Yu, O. L. Kafka, and W. K. Liu, "A physically short fatigue crack growth approach based on low cycle fatigue properties," *Int. J. Fatigue*, vol. 103, pp. 185–195, Oct. 2017, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2017.05.006.
- [7] M. S. Pham and S. R. Holdsworth, "Change of stress-strain hysteresis loop and its links with microstructural evolution in AISI 316L during cyclic loading," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 1069–1074, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.176.
- [8] Q. Zhou, L. Qian, J. Meng, L. Zhao, and F. Zhang, "Low-cycle fatigue behavior and microstructural evolution in a low-carbon carbide-free bainitic steel," *Mater. Des.*, vol. 85, pp. 487–496, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.172.