

## STUDI PENGARUH *FLAME STRAIGHTENING* TERHADAP KEKERASAN MATERIAL *HIGH STRENGTH LOW ALLOY (HSLA)*

Nur Fitria Pujo Leksonowati<sup>1\*</sup>, Salman Al Faris<sup>1</sup>, dan Nurman Pamungkas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

\*Corresponding author: nurfitriapujo@polibatam.ac.id

### Article history

**Received:**

28-06-2021

**Accepted:**

29-06-2021

**Published:**

30-06-2021

Copyright © 2021  
Jurnal Teknologi dan  
Riset Terapan

Open Access

### Abstrak

Baja *high strength low alloy* (HSLA) memiliki kekuatan mekanis lebih tinggi dibanding baja pada umumnya tetapi dengan *weldability* yang mudah, dalam studi ini material yang dipakai adalah S690QL. *Flame straightening* digunakan untuk mengembalikan bentuk material S690QL yang telah terdistorsi akibat proses pemanasan dan pendinginan selama proses fabrikasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai kekerasan material S690QL setelah melalui proses *flame straightening*. Proses *Flame straightening* dilakukan dengan teknik *line heating* menggunakan variasi suhu 700 °C, 750 °C, dan 800 °C selama 45 menit di setiap varian suhu. *Nozzle* dengan diameter 14 mm – 20 mm dengan *multi flame torch* digunakan dalam proses *flame straightening*. Sebagai langkah pengurangan tegangan sisa dan *stress relieving*, *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* dengan *holding time* 1 jam dilakukan. Proses dilanjutkan dengan *air cooling* hingga temperatur ruang. Pengujian kekerasan *Vickers* dilakukan dengan pengambilan 9 sampel titik, 2 titik pada bagian base metal, dan 7 titik pada area *Heat Affected Zone*. Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa pada suhu 700 °C dan 750 °C belum terjadi perubahan fasa, sehingga nilai kekerasan tertinggi pada suhu tersebut adalah 270 HVN dan 295 HVN. Sedangkan pada suhu 800 °C, terjadi perubahan fasa ditandai dengan nilai kekerasan yang meningkat menjadi 379 HVN.

**Kata Kunci:** *Flame straightening, S690QL, distorsi, PWHT, Stress relieving*

### Abstract

*High strength low alloy (HSLA) steel has higher mechanical strength than steel in general but with easy weldability, in this study the material used is S690QL. Flame straightening is used to restore the distorted shape of the S690QL material due to the heating and cooling process during the fabrication process. The purpose of this study was to determine the hardness value of the S690QL material after going through the flame straightening process. Flame straightening process is carried out by line heating technique using temperature variations of 700 °C, 750 °C, and 800 °C for 45 minutes in each temperature variant. A nozzle with a diameter of 14 mm – 20 mm with a multi flame torch is used in the flame straightening process. As a step to reduce residual stress and stress relieving, Post Weld Heat Treatment (PWHT) with a holding time of 1 hour was carried out. The process is continued with water cooling to room temperature. Vickers hardness test is carried out by taking 9 sample points, 2 points on the base metal, and 7 points on the Heat Affected Zone area. Based on the test results, it is known that at temperatures of 700 and 750 there has been no phase change, so the highest hardness values at these temperatures are 270 HVN and 295 HVN. While at a temperature of 800 °C, there was a phase change marked by the hardness value which increased to 379 HVN.*

**Keywords:** *Flame straightening, S690QL, distortion, PWHT, Stress relieving*

## 1.0 PENDAHULUAN

Pengelasan dan proses manufaktur lainnya yang menggunakan prinsip pemanasan logam akan meninggalkan *stress* pada logam/ material tersebut pada proses pendinginannya, sehingga menyebabkan distorsi.

*Flame straightening* digunakan untuk mengoreksi bagian yang terdistorsi tersebut dengan meluruskannya kembali. *Flame straightening* merupakan suatu teknik untuk menghilangkan deformasi pada material yang dilas dengan tanpa merusak material tersebut. Dalam praktiknya, nyalaa *Oxy-acetylene* digunakan untuk

memanaskan dengan cepat bagian benda kerja yang terdistorsi. Saat proses pendinginan, penyusutannya akan jauh lebih besar daripada pemuaiannya logam tersebut pada saat dipanaskan. Sehingga distorsi pada material tersebut dapat diluruskan kembali [1].

Uji kekerasan/*hardness test* merupakan pengujian untuk mengetahui gambaran mekanis dari suatu material melalui tingkat kekerasannya. Baja *HSLA (High Strength Low Alloy)* adalah baja yang didesain sedemikian rupa sehingga memberikan sifat mekanis dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan baja karbon biasa. Salah satu contoh baja yang tergolong dalam jenis ini adalah S690QL [2]. Diperlukannya pengujian untuk mengetahui kekuatan mekanis S690QL yang telah dipanaskan melalui proses *flame straightening* penting dilakukan karena untuk mengetahui tingkat kekerasan setelah terdistorsinya S690QL setelah *flame straightening* dilakukan. Di dalam dunia industri, penggunaan S690QL biasa digunakan pada alat-alat transportasi berat, machine building, konstruksi baja, dan alat angkut.

Pada penelitian sebelumnya, telah dipelajari pengaruh suhu pada properti mekanis *base material* dan sambungan las dengan material S690QL, dengan variasi suhu 200 °C, 250 °C, 350 °C, 450 °C, 500 °C, dan 550 °C. Penelitian tersebut berfokus pada material dan sambungan las dengan pengujian *tensile*. Dari variasi suhu ini diketahui bahwa *yield stress* dan kekuatan tarik *base material* menurun drastis pada suhu di atas 450 °C [3]. Hal ini dikarenakan difusi karbon dan transformasi dari *martensite* menjadi fase dengan kekuatan mekanis lebih rendah tetapi dengan kekuatan plastis (*plasticity*) yang lebih tinggi [3].

Penelitian serupa terhadap *flame straightening* telah dilakukan pada baja rol termomekanikal S355ML untuk melihat respon material tersebut terhadap *flame straightening*. Variasi suhu yang digunakan dalam penelitian ini antara 650 °C hingga 950 °C dengan pengujian *tensile* dan *charpy impact* [4]. Teknik *heating* yang digunakan adalah *wedge* dan *line heating*. Hasil penelitian ini adalah dengan teknik *wedge heating* properti mekanis material turun jika temperatur telah lebih dari 650 °C. Sedangkan untuk suhu di bawah 650 °C diberikan *wedge heating*, sementara untuk 650 °C hingga 950 °C, teknik *line heating* efektif untuk *flame straightening*. Pada teknik *line heating* temperatur 900 °C masih dapat ditoleransi tanpa kerusakan properti mekanis yang berarti. Temperatur dapat dilihat melalui titik panas secara langsung setelah *flame torch* diangkat. Untuk menghindari *local softening* pada saat *flame straightening*, *holding time* pemanasan harus dikurangi [4].

Penelitian lainnya adalah mengenai pemodelan distorsi pada pengelasan dan deformasi *flame straightening*. Penelitian ini berhasil memodelkan simulasi numerik teknik pengelasan baja *High Strength Low Alloy (HSLA)* dengan menggunakan *software* Simufact dan MARC untuk melihat deformasi pada S690QL [5]. Penelitian terkait material S690QL juga telah dilakukan oleh Knut Partes dkk tentang prediksi temperatur *preheat* untuk S690QL [6]. Dalam penelitiannya, dilakukan simulasi dengan *FEM model* untuk memprediksi temperatur *preheat* dan perhitungan

nilai kekerasan pada benda uji. Metode prediksi ini dapat menurunkan waktu dan biaya produksi terkait dengan pengujian dan analisis matriks untuk parameter proses [6].

Pengaruh *pre-heating* induksi terhadap struktur mikro dan properti mekanis sambungan S690QL dengan *laser welding* juga pernah diteliti oleh Li Li et al [7]. Dalam penelitiannya pengelasan S690QL dilakukan dengan dua metode yaitu *Laser induced hybrid welding (LIHW)* dan *Single Laser Welding (SLW)*. Kedua metode tersebut digunakan untuk membandingkan mikrostruktur dan properti mekanis S690QL. Hasilnya, dengan *pre heating* induksi mengakibatkan *heat input* dan *cooling time* bertambah, sehingga menghambat terjadinya defect dan *martensite*. *Ferrite* menjadi fasa paling dominan dalam lasan, sehingga menurunkan nilai kekerasan dan meningkatkan *plasticity* S690QL [7].

Dari paparan penelitian-penelitian sebelumnya yang telah menggunakan S690QL dan *flame straightening* sebagai objek penelitian, terlihat belum terdapat penelitian yang mengkaitkan *flame straightening* pada S690QL dengan nilai kekerasan materialnya. Material S690QL adalah material yang sering dipakai di dunia industri yang kemungkinan distorsinya tinggi. Oleh karena itu diperlukan pendekatan untuk mengukur *property* mekanisnya, salah satu metodenya adalah dengan pengukuran nilai kekerasan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh *flame straightening* pada S690QL dengan variasi suhu terhadap nilai kekerasannya.

## 2.0 METODE

Penelitian ini adalah penelitian eksperimental dengan objek penelitian material S690QL, variasi suhu sebagai variabel bebas dan nilai kekerasan sebagai variabel terikat. Penelitian ini dapat dikatakan sebagai penelitian awal yang menggunakan objek material baja HSLA S690QL dengan metode *flame straightening* untuk mengetahui *property* mekanis material dengan melihat tingkat kekerasannya. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan pengujian *destructive test* lain untuk mengetahui profil mekanisnya secara lengkap, atau dengan ditambahkan simulasi dengan *software* tertentu.

### 2.1. Flame Temperature

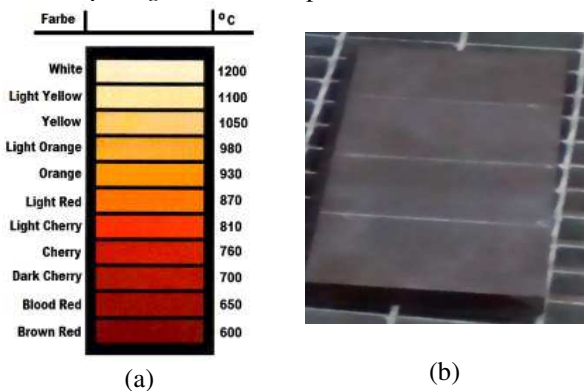
Material S690QL terklasifikasikan dalam material *Fine-grain structural steel* dengan suhu pemanasan *flame straightening* antara 550 °C hingga 700 °C. Perbedaan material akan mempengaruhi perbedaan suhu yang diperlukan dalam *flame straightening*, perbedaan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 [1].

Tabel 1: Temperatur *Flame Straightening* untuk Material yang Berbeda

| Materials                   | Specification                | Alternative Specification              | Flame straightening Temperature (°C) |
|-----------------------------|------------------------------|--|--------------------------------------|
| Mild Steel                  | S235JR<br>S355JO             |  | 600 – 800                            |
| Boiler Steel                | P265GH<br>16Mo3<br>13CrMo4-5 |  |                                      |
| Fine Grain Structural Steel | S355N<br><b>S690QL</b>       |  | 550 – 700                            |
| TM Steel                    | S355M<br>S460M               |  |                                      |
| Nickel Material             | 2.4360<br>2.4602<br>2.4856   | NiCu30Fe<br>NiCr21Mo14W<br>NiCr22Mo9Nb | 650 - 800                            |

Dalam penelitian ini, variasi suhu yang digunakan dalam *flame straightening* adalah: 700 °C, 750 °C, dan 800 °C dengan menggunakan *flame torch*. Pengambilan variasi suhu di atas batas standar ini bertujuan untuk mengetahui pada suhu berapakah kekerasan S690QL mengalami kenaikan.

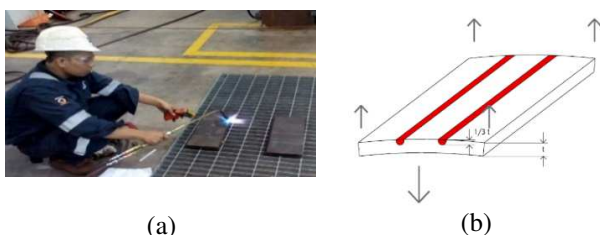
Penentuan suhu selama proses *flame straightening* berdasarkan warna material akibat panas berdasarkan *Steel Tempering Color Chart* pada Gambar 1.



Gambar 1: (a) *Steel Tempering Color Chart* [1]  
(b) Material Uji S690QL

## 2.2. Material Uji

Material yang dipakai pada penelitian ini adalah tiga plat S690QL dengan dimensi 300 × 150 × 24 mm. Material tersebut digaris untuk arah *fairing/flame straightening* dengan ukuran 100 mm, dapat dilihat pada gambar 1b. Setiap material uji S690QL akan di-*line heating* dengan suhu 700 °C, 750 °C, dan 800 °C. *Flame straightening* dilakukan 45 menit untuk setiap variasi suhu dan dilakukan dengan teknik *line heating*. Proses dan arah *line heating* dapat dilihat pada Gambar 2b.

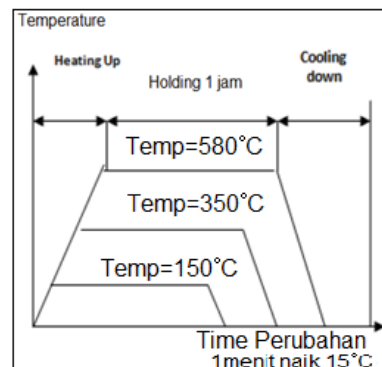


Gambar 2: (a) Proses Pengambilan Data  
(b) Arah *Line Heating*

Distorsi angular merupakan bentuk distorsi yang paling sering terjadi. Pada umumnya, distorsi angular tersebut dapat dihilangkan dengan menggambar satu atau lebih *heat lines* secara paralel di sisi yang berlawanan dari lapisan *fillet*. *Heat line* akan efektif jika hanya 1/3 dari ketebalan benda kerja yang dipanaskan hingga suhu *flame straightening*. Dalam hal ini, *flame torch* telah diatur sesuai dengan ketebalan material. Kedalaman penetrasi pada permukaan material dilihat berdasarkan warna *annealing* secara langsung pada permukaan material, berdasarkan *steel tempering color chart*.

Tegangan sisa internal dapat terjadi pada material sebagai akibat dari deformasi plastis akibat proses permesinan, pendinginan yang tidak homogen pada bagian yang difabrikasi atau diproses pada suhu tinggi seperti lasan atau *casting*, transformasi fasa yang terjadi saat pendinginan karena densitas yang berbeda. Distorsi dan *warpage* akan tetap terjadi jika tegangan sisa ini tidak dihilangkan. Tegangan sisa dapat dihilangkan dengan *stress relief annealing heat treatment*, dimana material dipanaskan pada suhu yang direkomendasikan, ditahan disana agar suhu material tersebut merata, setelah itu didinginkan hingga suhu ruang atau lebih dikenal dengan istilah *Post Weld Heat Treatment (PWHT)* [8].

Setelah proses *line heating* selesai, dilakukan proses PWHT selama dua jam dengan *holding time* 1 jam sesuai dengan grafik pada Gambar 3.



Gambar 3: Siklus PWHT untuk *Stress Relieve* [9] [8]

Setelah proses PWHT, material didinginkan di udara terbuka dengan hingga temperatur ruang.

Komposisi kimia S690QL dapat dilihat pada tabel 2 [10]

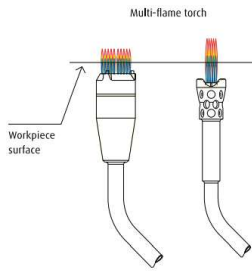
Tabel 2: *Chemical Composition* Baja S690QL [10]

| C    | Si   | Mn    | P     | S     | N     | B     | Cr   |
|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 0.18 | 0.50 | 1.60  | 0.020 | 0.010 | 0.015 | 0.005 | 0.80 |
| Cu   | Mo   | Nb    | Ti    | V     | Ni    | Zr    |      |
| 0.50 | 0.70 | 0.062 | 0.050 | 0.10  | 2.00  | 0.15  |      |

Kekuatan *tensile* baja S690QL adalah 770 – 940 Mpa dengan kekuatan *yield* 690 MPa [11].

## 2.3. Nozzle, Gas

Pemilihan bahan bakar *acetylene* dan *Oxygen* berdasarkan pertimbangan suhu nyala api tertinggi dan intensitas pemanasan yang cepat [1].



Gambar 4: Multi-Flame Torch [1]

Nozzle yang dipakai pada penelitian ini adalah multiflame torch diameter 14 – 20 dengan konsumsi gas Acetylene 28,3 L/min dan Oksigen 31,2 L/min sesuai dengan Tabel 3.

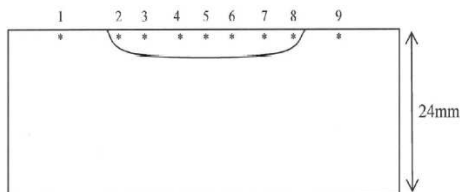
Tabel 3: Ukuran Nozzle dan Konsumsi Gas untuk Flame straightening [1]

| Ukuran Nozzle | Konsumsi Gas      |                |
|---------------|-------------------|----------------|
|               | Acetylene (L/min) | Oxygen (l/min) |
| 1 – 2         | 2.5               | 2.8            |
| 2-4           | 5.0               | 5.5            |
| 4 – 6         | 8.3               | 9.2            |
| 6 – 9         | 12.5              | 13.8           |
| 9 – 14        | 19.2              | 21.1           |
| 14 – 20       | 28.3              | 31.2           |
| 20 – 30       | 41.7              | 45.8           |
| 30 – 50       | 66.7              | 73.3           |
| 50 – 100      | 125.0             | 137.5          |

Selain nozzle dan gas, alat lain yang digunakan adalah mesin uji kekerasan dan stopwatch.

### 2.4. Pengujian Kekerasan Vickers

Pengujian kekerasan ini dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan pada material uji S690QL pada daerah sekitar flame heating dan Heat Affected Zone dengan pembebanan 10KgF atau 98,07 N. Pengujian kekerasan ini berdasarkan BS EN ISO 6507-1- 2005. Gambar 5 menunjukkan titik-titik pengujian kekerasan pada material uji. Titik 1 dan 9 adalah titik- titik pada area base metal, sedangkan titik 2 hingga 8 merupakan titik uji pada area fairing.



Gambar 5: Titik uji kekerasan

### 3.0 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kekerasan Vickers berdasarkan BS EN ISO15614-1 : 2004 pada suhu 700 °C, 750 °C, dan 800 °C ditampilkan pada Tabel 4, Tabel 5, dan Tabel 6.

Tabel 4: Hasil pengujian Vickers pada Suhu 700 °C

| Sample identification  | Material             | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 kgf |      |
|--|----------------------|---------------|---|------|
|  |                      |               | No  | Line |
| One Steel Plate after 2 times fairing (700 C) on surface<br><br>Sample 1 | S690QL               | Base Metal    | 1   | 248  |
|  |                      |               | 2   | 258  |
|  | 2 Times Fairing Area |               | 3   | 250  |
|  |                      |               | 4   | 246  |
|  |                      |               | 5   | 240  |
|  |                      |               | 6   | 245  |
|  |                      |               | 7   | 257  |
|  |                      |               | 8   | 265  |
|  | S690QL               | Base Metal    | 9   | 270  |

Dari pengujian kekerasan dengan suhu 700 °C, pada area base metal maupun pada area fairing nilai kekerasannya berkisar antara 240 hingga 270 HVN. Nilai kekerasan terendah terdapat pada titik uji 5, pada fairing area yaitu 240 HVN. Berdasarkan temperatur transformasi fasa pada baja S690QL adalah 723 °C, maka pengujian flame straightening pada suhu 700 °C ini belum mengubah fasa ferrite menjadi austenite. Tidak terjadinya perubahan fasa dan holding time selama satu jam juga memberikan dampak perubahan kecil pada kekerasan.

Tabel 5: Hasil Pengujian Vickers pada Suhu 750 °C

| Sample identification  | Material             | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 kgf |      |
|--|----------------------|---------------|---|------|
|  |                      |               | No  | Line |
| One Steel Plate after 2 times fairing (750 C) on surface<br><br>Sample 1 | S690QL               | Base Metal    | 1   | 260  |
|  |                      |               | 2   | 256  |
|  | 2 Times Fairing Area |               | 3   | 264  |
|  |                      |               | 4   | 275  |
|  |                      |               | 5   | 283  |
|  |                      |               | 6   | 295  |
|  |                      |               | 7   | 295  |
|  |                      |               | 8   | 265  |
|  | S690QL               | Base Metal    | 9   | 226  |

Dari pengujian kekerasan dengan suhu 750 °C, pada area base metal maupun pada area fairing nilai kekerasannya berkisar antara 226 hingga 295 HVN. Nilai kekerasan terendah terdapat pada titik uji 9, pada base metal area yaitu 226 HVN. Meskipun suhu pemanasan telah melewati 723 °C, namun proses heating yang bergerak membuat panas yang diterima material untuk berubah fasa tidak cukup. Berdasarkan pada ASME B31.3, untuk perubahan fasa diperlukan waktu minimal 30 menit untuk panas yang homogen pada material baja.

Tabel 6: Hasil Pengujian Vickers pada Suhu 800 °C

| Sample identification  | Material             | Test Location | Vickers Hardness Number (HV)<br>Test Load Applied, 10 kgf |      |
|--|----------------------|---------------|---|------|
|  |                      |               | No  | Line |
| One Steel Plate after 2 times fairing (800 C) on surface<br><br>Sample 1 | S690QL               | Base Metal    | 1   | 267  |
|  |                      |               | 2   | 273  |
|  | 2 Times Fairing Area |               | 3   | 300  |
|  |                      |               | 4   | 319  |
|  |                      |               | 5   | 329  |
|  |                      |               | 6   | 368  |
|  |                      |               | 7   | 379  |
|  |                      |               | 8   | 265  |
|  | S690QL               | Base Metal    | 9   | 267  |

Dari pengujian kekerasan dengan suhu 800 °C, pada area *base metal* maupun pada area *fairing* nilai kekerasannya berkisar antara 265 hingga 379 HVN. Nilai kekerasan terendah terdapat pada titik uji 5, pada *fairing area* yaitu 240 HVN. Pada temperatur *heating* di atas 723 C cukup tinggi, walaupun pemanasan bergerak dan tidak homogen, masih dimungkinkan terjadi perubahan fasa dari *ferrite* menuju ke *austenite* di sekitar daerah *flame straightening*. Perubahan fasa ini memiliki andil terhadap perubahan kekerasan yang tinggi karena saat pendinginan, perubahan fasa *austenite* menjadi *ferrite* tidak sepenuhnya homogen. Logam di sekitar *flame straightening* yang tidak terkena panas mendinginkan bagian logam yang panas lebih cepat, hal ini berakibat fasa *ferrite* tidak cukup waktu mengalami *stress relieving*, sehingga nilai kekerasan di daerah ini mengalami peningkatan yang tinggi. Nilai kekerasan yang tinggi ini nantinya akan berhubungan dengan sifat mampu las material. Meskipun fasa *martensite* belum terbentuk, namun tingkat kekerasan yang tinggi ini akan membuat material S690QL sulit dilas dan mudah retak apabila dilas. Oleh karena itu, meskipun *flame straightening* terhadap S690QL dapat dilakukan untuk mengatasi distorsi, pemilihan suhu antara 550 °C hingga 700 °C perlu dilakukan untuk *weldability* yang baik.

#### 4.0 KESIMPULAN

Berdasarkan eksperimen *flame straightening* dengan teknik *line heating* dengan variasi suhu 700 °C, 750 °C, dan 800 °C dilanjutkan pengujian tingkat kekerasan pada baja S690QL dapat disimpulkan bahwa pada suhu *flame straightening* 700 °C dan 750 °C belum terjadi perubahan fasa material, sehingga belum terjadi peningkatan nilai kekerasan. Sedangkan, pada suhu *flame straightening* 800 °C, nilai kekerasan meningkat. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada titik No. 7 yaitu sebesar 379 HVN. Nilai kekerasan yang tinggi ini berasal dari perubahan fasa material dari *ferrite* menjadi *austenite*, tetapi tidak cukup waktu untuk *stress relieving* sehingga nilai kekerasannya meningkat.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] BOC, *Fundamentals of flame straightening*. Guildford, Surrey GU2 7XY.; The Linde Group, 2009.
- [2] Nugroho Anggun, "Analisa ukuran butir ferit dan laju korosi baja HSLA," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 53, no. 9, pp. 8–24, 2018, [Online]. Available: [http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/124754-R040819-Analisa ukuran-Literatur.pdf](http://lib.ui.ac.id/file?file=digital/124754-R040819-Analisa%20ukuran-Literatur.pdf).
- [3] V. Lazić *et al.*, "The influence of temperature on mechanical properties of the base material (BM) and welded joint (WJ) made of steel S690QL," *Metalurgija*, vol. 55, no. 2, pp. 213–216, 2016.
- [4] F. Hanus and R. Hubo, "Flame straightening of thermomechanically rolled structural steel." Verlag Stahleisen, Dusseldorf, pp. 193–197, 1999.
- [5] J. Dobránszky, B. Bebok, B. Varbai, A. Szlancsik, T. Gerencsér, and Á. Németh, "Modeling of welding distortions and flame straightening deformations," *15th IMEKO TC10 Work. Tech. Diagnostics 2017 - "Technical Diagnostics Cyber-Physical Era,"* pp. 133–138, 2017.
- [6] K. Partes, M. Schmidt, and S. Gorny, "Prediction of Preheating Temperatures for S690QL High Strength Steel Using FEM-Simulation for High Power Laser Welding," *Lasers Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 2, pp. 177–189, 2020, doi: 10.1007/s40516-020-00111-5.
- [7] L. Li, G. Mi, X. Zhang, L. Xiong, Z. Zhu, and C. Wang, "The influence of induction pre-heating on microstructure and mechanical properties of S690QL steel joints by laser welding," *Opt. Laser Technol.*, vol. 119, no. November 2018, 2019, doi: 10.1016/j.optlastec.2019.105606.
- [8] W. D. Callister, "Materials science and engineering: An introduction (2nd edition)," *Mater. Des.*, vol. 12, no. 1, p. 59, 1991, doi: 10.1016/0261-3069(91)90101-9.
- [9] ASME, *Process Piping ASME Code for Pressure Piping, B31.3*, vol. 76, no. 8. 2018.
- [10] P. Paillard, E. Bertrand, M. Allart, A. Benoit, and G. Ruckert, "Microstructure, mechanical properties and microtexture of friction stir welded S690QL high yield steel," *Mater. Charact.*, vol. 122, pp. 183–188, 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.11.005.
- [11] Conquest Steel and Alloys, "Steel Flat Products And Technical Data," 2019. <http://www.csteel.in/Weldox-700-and-S690QL.html#:~:text=Chemical Composition of S690QL%3A At least 0.015%25 of,one of these elements. Mechanical Properties of S690QL%3A>.