



# Karakteristik Kekerasan Lasan Titik Gesekan dan Pengadukan pada Paduan Aluminium 5052-H112

## *Hardness Characteristics Friction Stir Spot Weld on Aluminum Alloys 5052-H112*

Armansyah<sup>1</sup>, Juri Saedon<sup>2</sup>, Ferdyanto<sup>3</sup>, Nely Toding Bunga<sup>4</sup> dan James Julian<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik Mesin, Universiti Teknologi MARA, Shah Alam 40450, Malaysia

<sup>3</sup>Teknik Elektro, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Indonesia

### Informasi artikel

Diterima:  
02/03/2022  
Direvisi:  
17/04/2022  
Disetujui:  
24/04/2022

### Abstract

*Issues in friction stir spot welding focus mainly on the mechanical characteristic affected by its Hardness. This Hardness must be maintained by evenly temperature distribution in weld zones during welding. The process parameters are mainly responsible for the development of the hardness of the friction stir spot weld. This study presented the hardness evaluations on the friction stir spot weld via the Hardness-Vickers test and analysis of the temperature distribution in the weld zones via the finite element method. The workpiece samples used in this study were Aluminium alloy 5052-H112 with a thickness of 2 millimeters in the lap-shear mode based on 3 main parameters at low and high levels of parameters configuration. The results obtained via the Hardness-Vickers tests exhibited a value of 42-HV located in the middle of the spot-weld center using a low-level parameters configuration. This value increased to 64-HV around the vicinity of the keyhole. And then the value decreased to 53-HV outside the keyhole, about 6 millimeters from the spot-weld center. Using high-level parameter configuration, the Hardness-Vickers value increased to 61-HV in the middle of the spot-weld center. The value then increased to 76-HV in the vicinity of the keyhole. Furthermore, the value decreased at 60-HV outside the keyhole, which ca 6 millimeters away from the spot-weld center. The temperature distribution of the weld zones achieved 480 °C in the vicinity of the keyhole using the low-level parameter configuration. Slowly, the temperature declined to 380 °C at 6 mm away from the friction spot-weld center in the HAZ. Using the high-level parameters configuration, the temperature distribution reached 540 °C in SZ, and slowly reduced to 425 °C in HAZ. Based on the results, it was found that by using high-level parameters configuration the hardness of the friction stirs spot weld exhibited better Hardness-Vickers value and evenly temperature distribution in the weld zones.*

**Keywords:** *friction stir spot welding, hardness-Vickers, temperature distribution.*

### Abstrak

Masalah dalam pengelasan titik gesekan dan pengadukan (FSSW) utamanya berfokus pada karakteristik mekanis yang dipengaruhi oleh Kekerasannya. Kekerasan ini harus dipertahankan melalui distribusi suhu yang merata di zona lasan selama pengelasan FSSW. Parameter proses bertanggung jawab terutama dalam pengembangan tingkat kekerasan lasan FSSW. Studi ini menyajikan evaluasi tingkat kekerasan pada pengelasan FSSW melalui uji kekerasan (*Hardness-Vickers*) dan analisis distribusi suhu di zona lasan melalui metode elemen hingga. Sampel benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan Aluminium 5052-H112 dengan ketebalan 2 mm dalam *lap-shear mode* berdasarkan 3 parameter utama pada konfigurasi parameter tingkat rendah dan tingkat tinggi. Hasil yang diperoleh dari uji Kekerasan menunjukkan nilai 42-HV yang terletak di pusat titik lasan FSSW menggunakan konfigurasi parameter tingkat rendah. Nilai ini meningkat menjadi 64-HV di sekitar lubang kunci (*keyhole*). Dan kemudian menurun menjadi 53-HV di luar *keyhole* (sekitar 6 milimeter dari pusat lasan). Menggunakan konfigurasi parameter tingkat tinggi, nilai kekerasan meningkat menjadi 61-HV di pusat titik lasan. Nilai tersebut kemudian meningkat menjadi 76-HV di sekitar *keyhole*. Selanjutnya, nilainya menurun ke 60-HV di luar *keyhole*, yang berjarak sekitar 6 milimeter dari pusat titik lasan. Distribusi suhu zona lasan mencapai 480 °C di sekitar *keyhole* menggunakan konfigurasi parameter tingkat rendah. Perlahan-lahan, suhu turun menjadi 380 °C pada jarak 6 mm dari pusat titik lasan di HAZ. Menggunakan konfigurasi parameter tingkat tinggi, distribusi suhu mencapai 540 °C di SZ, dan perlahan-lahan berkurang menjadi 425 °C di HAZ. Berdasarkan hasil pengujian, ditemukan bahwa dengan menggunakan konfigurasi parameter tingkat tinggi kekerasan pada lasan FSSW menunjukkan nilai yang lebih baik dan distribusi suhu yang merata di zona lasan.

**Kata Kunci:** pengelasan titik gesekan dan pengadukan, kekerasan-Vickers, distribusi temperatur.

\*Penulis Korespondensi. Tel: -; Handphone: +62 878 8343 9097  
email : [juliansiregar@gmail.com](mailto:juliansiregar@gmail.com)

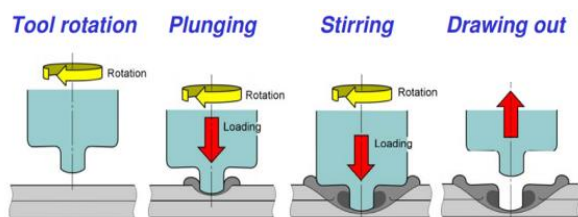


This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

## 1. PENDAHULUAN

Meningkatnya permintaan untuk struktur bahan ringan marak terjadi di industri otomotif untuk komponen struktural seperti bodi mobil dan bagian panel (Haghshenas dan Gerlich, 2018). Bahan ringan seperti paduan Aluminium telah menjadi potensi besar di banyak industri, karena memiliki keunggulan dalam sifat mekanik, kemudahan desain, dan kemudahan didalam proses manufaktur (Dursun dan Soutis, 2014). Pengelasan titik gesekan dan pengadukan atau *friction stir spot welding* (FSSW) telah diusulkan secara konvensional untuk diterapkan dalam pengelasan paduan Aluminium (Akinlabi dkk., 2020).

Proses FSSW ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti kecepatan spindle (*spindle speed*), kedalaman pahat (*plunge depth*), dan waktu tinggal (*dwell time*). Proses tersebut terutama mengandalkan kontak gesek antara pahat gesek yang berputar dan benda kerja yang diam untuk menghasilkan struktur las yang akhirnya menjadi las titik yang terdeformasi plastis oleh suhu (Almanar dan Hussain, 2011). Proses ini dibagi menjadi tiga tahap utama yaitu terjun (*plunging*), mengaduk (*stirring*), dan mencabut (*drawing out*) seperti yang digambarkan pada Gambar 1 (Pan, 2007).



Gambar 1. Tiga tahapan penting: (a) Terjun (*Plunging*), (b) Mengaduk (*Stirring*), dan (c) Mencabut (*Drawing out*) (Pan, 2007)

*Plunging* dimulai melalui gerakan pahat gesek yang tegak lurus terhadap benda kerja, terjun menembus titik las pada benda kerja hingga mencapai kedalaman yang dibutuhkan. Kemudian, pengadukan dimulai dengan menempatkan pahat gesek yang berputar di titik lasan pada benda kerja menyebabkan gesekan dalam beberapa detik sehingga menyebabkan deformasi plastis yang parah pada benda kerja (Padmanaban dkk., 2016; Jambhale, Kumar dan

Kumar, 2015), sehingga panas dihasilkan dan membentuk struktur lasan (Patel dkk., 2016). Tahap akhir, pahat gesek ditarik perlahan dari benda kerja dan kembali ke keadaan awal.

Area di sekitar lubang kunci dan bahu pada struktur lasan titik mewakili zona lasan yaitu zona pusran gesekan atau *stir zone* (SZ), zona terpengaruh termo-mekanis atau *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ), zona terpengaruh panas atau *heat affected zone* (HAZ), dan material dasar atau *base material* (BM) (Yuan dkk., 2011). Pengukuran kekerasan diperlukan untuk mengetahui sifat struktur lasan yang memungkinkannya menahan deformasi plastis. Sejumlah penelitian dalam uji kekerasan di FSSW sejauh ini telah dilakukan oleh para peneliti untuk menyelidiki sifat sambungan las (Muhayat dan Putra, 2019), menyelidiki kekerasan dari FSSW gesekan untuk paduan Aluminium 6082-T6 dengan variasi diameter pin dan waktu diam yang konstan. Simpulan sementara bahwa kekerasan tertinggi diperoleh pada SZ sebesar 96,2-HV dengan menggunakan diameter pin 7 mm dan waktu tinggal 3 detik, sedangkan yang terendah adalah 42,1-HV menggunakan diameter pin 3 mm dan waktu tinggal 3 detik. Sebuah studi menyelidiki sifat kekerasan pada lasan titik gesekan dan pengadukan logam semi padat untuk paduan Aluminium 7075 dengan variasi kecepatan spindle dan waktu tinggal (Sitthipong dkk., 2018). Berdasarkan hal tersebut ditemukan bahwa nilai kekerasan mikro di zona las memiliki nilai rata-rata sebesar 79,83-HV yang lebih rendah dari kekerasan logam dasar.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyumbangkan ide dan pemahaman yang lebih baik dalam karakteristik kekerasan pada pengelasan titik aduk gesekan pada paduan Aluminium 5052-H112 dalam kaitannya dengan parameter utama dalam proses FSSW. Karena parameter yang tidak tepat yang diterapkan dalam proses akan mempengaruhi karakter kekerasan pada lasan titik gesekan dan pengadukan. Oleh karena itu, pemahaman tentang pengaruh parameter terhadap karakteristik kekerasan lasan titik gesekan dan pengadukan perlu dieksplorasi. Evaluasi kekerasan pada lasan titik gesekan dan pengadukan dilakukan melalui pengukuran

kekerasan, dan simulasi 2D analisis elemen hingga atau “FEA” untuk distribusi suhu di zona las diperlukan untuk mendukung pemahaman ini.

## 2. METODOLOGI

Material benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan Aluminium 5052-H112. Paduan Aluminium yang tidak dapat diperlakukan panas ini (*non-heat treatable Aluminium Alloy*) dipilih karena kekuatannya yang relatif tinggi dan umum digunakan dalam industri otomotif seperti untuk panel bodi. Penguatan paduan Aluminium ini sebagian besar dipengaruhi oleh penguatan larutan padat dan efek pengerasan dispersi dari elemen paduan seperti silikon, besi, mangan, dan magnesium (Kou, 2003). Misalnya, elemen paduan Magnesium dalam penguatan larutan seri 5052 meningkatkan kekuatan bahkan dalam kondisi anil (*annealed condition*). Selain itu, siklus termal las pada pemanasan paduan Aluminium 5052 ini di FSSW, mengurangi efek pengerasan kerja (pelunakan) dan meningkatkan keuletan yang pada gilirannya akan kehilangan kekuatan HAZ (Kou, 2003; Burns, 2014). Namun, solusi penguatan Magnesium dan Mangan dalam paduan Aluminium 5052 ini sesuai untuk struktur yang dilas karena menawarkan sifat mekanik yang relatif seragam di seluruh sambungan las. Komposisi kimia dari paduan ini, termasuk sifat mekanik dan sifat termal ditabulasikan masing-masing pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia paduan Aluminium 5052-H112 (Steels, 2013)

Unsur	Berat (wt%)
Al	95,8-97,7
Mg	2,2-2,8
Fe	0,4
Cr	0,15-0,35
Si	0,25
Cu	0,1
Mn	0,1
Zn	0,1
Al	0,15

Tabel 2. Sifat mekanik paduan Aluminium 5052-H112 (Steels, 2013)

Sifat Mekanik	Nilai
Modulus Elastisitas [E]	70 GPa
Peregangan [A]	11 %
Peregangan A50 [A50]	7 %
Kekuatan Tarik [Rm]	170-200 MPa
Kekuatan Luluh [YS]	91 MPa
Kekuatan Luluh [Rp 0,2]	65-110 MPa
Nilai Kekerasan	80 HV

Pahat gesek yang berputar juga memainkan peran penting dalam proses pengelasan. Bahan dari pahat gesek yang berputar ini harus memiliki sifat bahan yang tahan pada suhu tinggi yang dapat menahan suhu tinggi selama proses. Material pahat gesek yang berputar FSSW yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja VCN-150 dengan komposisi kimia ditabelkan pada Tabel 3. Pahat gesek yang berputar ini berbentuk silinder seperti terlihat pada [Error! Reference source not found.\(a\)](#). Bentuk dari pahat gesek yang berputar ini adalah jenis konvensional yang digunakan untuk penelitian dalam pengelasan FSSW (Elangovan dan Balasubramanian, 2008; YÜKLER dkk., 2018; Jun-Won dkk., 2012).

Tabel 3. Komposisi kimia bahan pahat gesek berputar VCN-150 (berat dalam %) (Jun-Won dkk., 2012)

Unsur	Berat (wt%)
C	0,38
Si	0,20
Mn	0,70
Cr	1,50
Fe	96,79
Mo	0,20
Ni	1,64

Dalam studi ini, karakteristik kekerasan lasan FSSW dievaluasi melalui uji kekerasan (*Hardness-Vickers*) menggunakan mesin Mitutoyo MVK-H1

pada beban 10 gram dengan durasi indentasi selama 15 detik yang mengacu pada standard ASTM E92 (ASTM, 1991), dari lasan titik gesekan dan pengadukan berpenampang melintang di zona lasan dilakukan di bawah konfigurasi parameter yang ditabelkan pada Error! Reference source not found.. Selain itu, distribusi temperatur pada penampang lasan FSSW dari konfigurasi parameter tingkat rendah dan tingkat tinggi kemudian disimulasikan menggunakan perangkat lunak simulasi FEA untuk mendukung evaluasi kekerasan untuk memprediksi kondisi suhu di zona las selama proses pengelasan.

Tabel 4. Parameter konfigurasi tingkat rendah dan tingkat tinggi

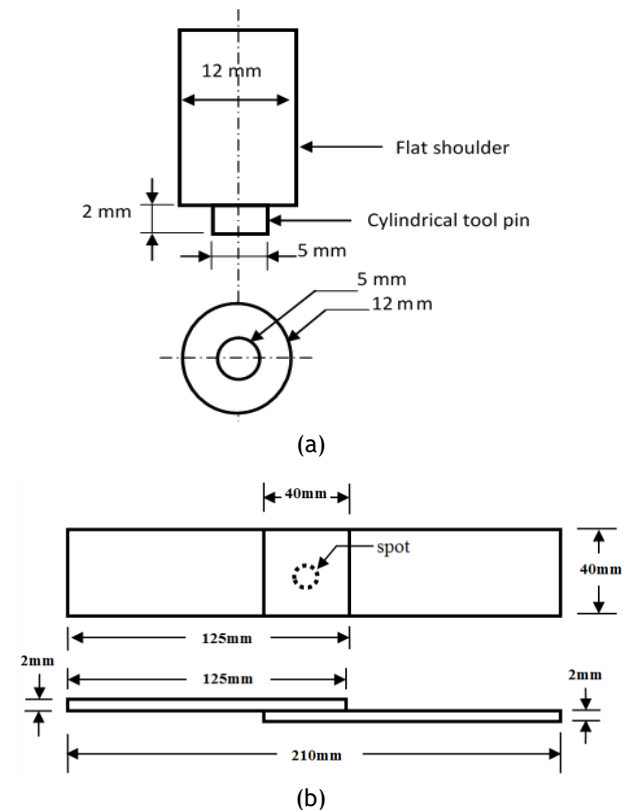
Tingkat	Rendah	Tinggi
Spindle speed (rpm)	1000	1400
Tool plunge depth (mm)	2.5	3.5
Tool Dwell time (detik)	5	9

Error! Reference source not found.(a) mengilustrasikan konfigurasi benda kerja menjadi benda uji FSSW dengan titik tegangan silang lasan FSSW yang digunakan. Spesimen pengujian dibuat dengan menggunakan dua lembaran berukuran 40x125 mm dengan luas area sambungan berhimpit (lap joint) 40x40 mm sesuai standar JIS Z3136 : 1999 (JSA, 1999).

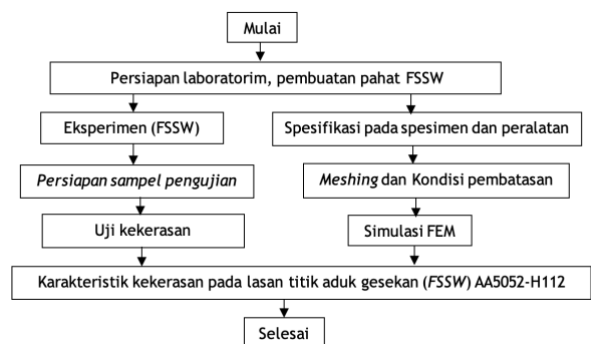
Alur kerja rinci dari studi ini ditunjukkan pada Error! Reference source not found. dimana pada eksperimen proses pengelasan FSSW menggunakan Mesin Milling CNC Bed tipe VH450 yang tegak lurus dengan permukaan benda kerja. Selanjutnya benda kerja dijepit dengan kuat pada mesin CNC menggunakan bed jig dengan mekanisme penjepitan. Oleh karena itu, benda kerja tidak dapat bergerak ke segala arah melawan gerakan pahat FSSW.

Setelah benda kerja berada pada posisi yang tepat, pahat aduk gesek FSSW mulai berputar dan terjun (*plunging*) perlahan dengan kecepatan terjun 1 mm/detik ke arah benda kerja melalui titik sambungan yang berhimpitan tumpang tindih untuk waktu yang cukup dalam menciptakan lasan FSSW melalui plastisisasi. Setelah pahat mencapai kedalaman jatuh tertentu, maka pahat dihentikan terjun tetapi tetap berputar pada durasi tertentu.

Pada akhirnya, pahat aduk gesek yang berputar mundur kembali ke posisi awal. Error! Reference source not found.(a) menunjukkan contoh sampel spesimen pengujian setelah FSSW dengan las titik tepat di tengah-tengah area titik sambungan berhimpit yang tumpang tindih (*lap joint*) pada benda kerja.



Gambar 2. (a) Geometri pahat untuk FSSW dengan profil pin silindris (*cylindrical Pin*); (b).Geometri spesimen pengujian FSSW AA5052-H112, dengan tebal 2 mm, dan area sambungan berhimpit (*lap joint*) 40x40 mm.



Gambar 3. Diagram alir eksperimental.

Spesimen pengujian dipotong dalam arah memanjang pada area yang dilas. Sampel disiapkan melalui pemotongan, pemasangan, penggilingan, dan pemolesan. Sampel lasan FSSW awalnya dipisahkan dari spesimen lasan menggunakan mesin pemotong abrasif, kemudian dipotong untuk mendapatkan luas penampang sambungan las. Selanjutnya sampel dipasang menggunakan mesin *hot mounting pressure*. Setelah pemasangan, spesimen digiling basah untuk mengungkapkan permukaan logam. Spesimen digerus berturut-turut dengan kertas abrasif silikon karbida dari nilai kekasaran 280, 330, 400, 600, 800, dan 1200 mikro meter (Yang, Fu dan Li, 2014). Setelah itu, dilakukan pemolesan dengan bubuk alumina-silika untuk menghasilkan hasil akhir permukaan yang bebas gores, bebas pelumuran dan bebas seretan partikel dari proses persiapan.

Uji kekerasan dilakukan pada sampel spesimen lasan yang disiapkan di bawah standar ASTM E92 (ASTM, 1991) yang biasa digunakan untuk bahan logam. Simulasi FEA kemudian digunakan dalam menganalisis distribusi suhu di penampang lasan FSSW untuk mendukung evaluasi kekerasan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini, hasil dari penyelidikan karakteristik kekerasan lasan FSSW pada konfigurasi parameter rendah dan tinggi dibandingkan dan dibahas. Selain itu simulasi FEA pada distribusi temperatur yang melintasi zona lasan ditunjukkan untuk melihat hubungan dengan nilai kekerasan yang dimiliki pada lasan FSSW untuk konfigurasi parameter rendah dan tinggi.

#### 3.1. Pengujian Kekerasan

Mengenai kekerasan lasan FSSW, Gambar 4 menunjukkan representasi grafis dari hasil yang diperoleh melalui uji kekerasan. Evolusi nilai kekerasan dari konfigurasi parameter tingkat rendah dimulai di tengah pusat lasan titik aduk gesek sebesar 42-HV. Nilai kekerasan di pusat lasan FSSW menurun tajam dari paduan Aluminium dasar sekitar 50% karena proses pelunakan selama FSSW.

Selain itu, lokasi pusat lasan FSSW ini mengalami kontak gesek yang lebih rendah dengan pin yang berputar sehingga deformasi plastis sangat kecil di lokasi ini. Kekerasan kemudian meningkat secara bertahap menjadi 64-HV pada 2,5 mm diukur dari pusat lasan FSSW ke kanan, dan menjadi 63-HV pada 2,5 mm dari pusat lasan ke kiri. Terlihat bahwa peningkatan nilai kekerasan pada jalur di bawah *keyhole* diikuti dengan peningkatan jarak lekukan kekerasan dari titik pusat las ke tepi *keyhole* secara *longitudinal*.

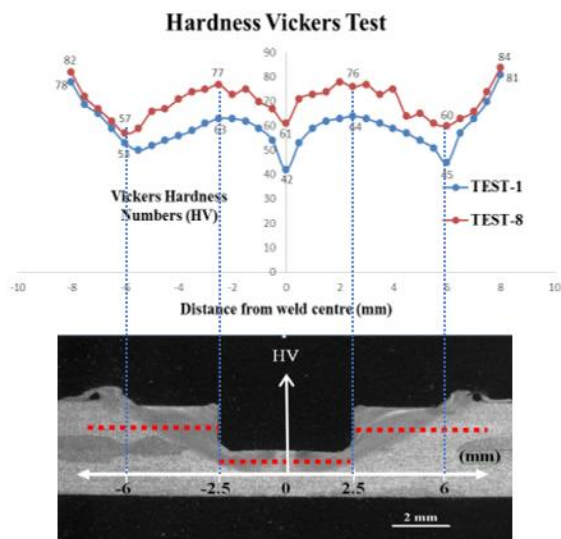
Peningkatan nilai kekerasan ini di bawah tepian lubang kunci (*edge keyhole*) merepresentasikan nilai kekerasan yang relatif lebih tinggi karena terletak pada daerah SZ. Selanjutnya, evolusi kekerasan menurun langkah demi langkah dari 64-HV menjadi 45-HV pada 6 mm diukur dari pusat lasan FSSW ke arah kanan, dan dari 63-HV menjadi 53-HV pada 6 mm diukur dari pusat lasan ke kiri.

Terjadi deklinasi evolusi kekerasan yang diikuti dengan bertambahnya jarak jalur indentasi kekerasan dari 2,5 mm menjadi 6 mm dari titik pusat lasan. Setelah itu, evolusi kekerasan meningkat tajam dari 45-HV menjadi 81-HV dan dari 53-HV menjadi 78-HV masing-masing pada jarak 8 mm ke kanan dan ke kiri, diukur dari pusat lasan FSSW. Peningkatan kekerasan ini terjadi diikuti dengan penambahan jarak jalur lekukan kekerasan dari 6 mm menjadi 8 mm dari pusat titik lasan.

Evolusi nilai kekerasan dari tingkat tinggi menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan dengan tingkat rendah. Ini dimulai di tengah pusat lasan FSSW yang terukur 61-HV. Nilai kekerasan ini turun 23% dari BM menjadi 80-HV karena proses pelunakan selama FSSW dan juga mengalami deformasi plastis yang lebih rendah karena kontak gesek yang lebih rendah dengan pin yang berputar. Ketika lekukan kekerasan dilakukan di sepanjang jalur lekukan menjauh dari pusat lasan FSSW, evolusi kekerasan meningkat secara bertahap dari 61-HV menjadi 76-HV pada 2,5 mm menjauh dari pusat lasan ke kanan, dan dari 61-HV menjadi 77-HV pada 2,5 mm dari pusat lasan ke kiri.



Dapat dilihat dari **Gambar 4** bahwa peningkatan evolusi kekerasan di jalur lekukan di bawah *keyhole* diikuti dengan peningkatan jarak lekukan kekerasan di jalur dari pusat lasan FSSW ke tepi *keyhole* secara *longitudinal*. Peningkatan ini menunjukkan daerah SZ pada tepi *keyhole* mengalami rekristalisasi dinamis yang lebih tinggi membentuk struktur mikro yang sangat halus pada daerah dengan nilai kekerasan yang lebih tinggi yang terutama dipengaruhi oleh gesekan.



**Gambar 4.** Hasil pengukuran kekerasan pada parameter konfigurasi tingkat rendah dan tingkat tinggi

Selanjutnya, evolusi kekerasan menurun secara bertahap dari 76-HV menjadi 60-HV pada 6 mm menjauh dari pusat lasan FSSW ke kanan, dan dari 77-HV menjadi 57-HV pada 6 mm dari pusat lasan ke kiri. Penurunan kekerasan ini terjadi diikuti dengan penambahan jarak jalur lekukan kekerasan dari 2,5 mm menjadi 6 mm dari pusat titik lasan. Peningkatan ini terjadi sebagai akibat dari perubahan zona las dari SZ ke TMAZ sepanjang jalur lekukan ke kanan dan ke kiri dari tepi *keyhole*. Setelah itu, evolusi kekerasan meningkat tajam dari 60-HV menjadi 84 HV, dan dari 57-HV menjadi 82-HV masing-masing pada jarak 8 mm ke kanan dan ke kiri dari pusat lasan FSSW. Serupa dengan tingkat rendah, peningkatan jarak jalur lekukan kekerasan dari 6 mm menjadi 8 mm dari pusat lasan sebagai akibat dari perubahan zona las dari TMAZ, HAZ dan BM. BM memiliki nilai Kekerasan yang lebih tinggi

dibandingkan zona lain sebagai hasil dari proses pengerjaan dingin (*cooling process*).

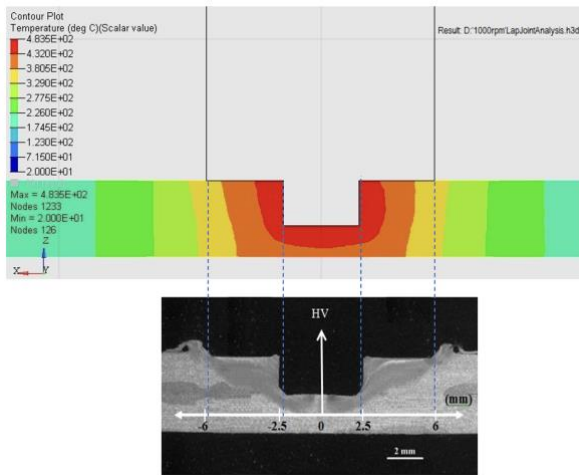
Mengenai penemuan evolusi kekerasan yang ditemukan oleh Piccini dan Svoboda (Piccini dan Svoboda, 2015), menurun dari BM 90-HV menuju 62-HV di HAZ, dan kemudian sedikit meningkat menjadi 78-HV di dekat *keyhole*. Sedangkan nilai kekerasan pada area lasan FSSW ditemukan serupa dengan temuan Zhang (Zhang dkk., 2011) yang juga menggunakan benda kerja yang sama dari paduan Aluminium 5052-H112. Ditemukan bahwa di daerah dekat pusat lasan FSSW, kekerasan menurun menjadi 38-HV. Evolusi kekerasan ini terjadi karena modifikasi mikrostruktur yang terkait dengan eskalasi suhu yang terjadi di zona lasan. Ini umumnya terjadi pada paduan aluminium yang dapat diolah panas, di mana endapan dapat terjadi dalam pelarutan HAZ karena kenaikan suhu di zona ini selama FSSW.

Peningkatan kekerasan akhir dapat dijelaskan oleh dua efek. Pertama, deformasi plastis di TMAZ meningkatkan kekerasan. Selain itu, di SZ terjadi rekristalisasi dinamis dan penyempurnaan butir. Terakhir, di dekat permukaan pin, campuran kedua bahan diamati sesuai dengan nilai kekerasan maksimum di SZ. Penuaan alami (*natural ageing*) dapat terjadi oleh karena itu uji kekerasan harus dikaitkan dengan periode waktu yang berlalu dari pengelasan (Mishra dan Ma, 2005). Seperti yang dilaporkan dalam literatur dari penelitian sebelumnya, dapat dilihat bahwa kekerasan di zona lasan umumnya lebih keras daripada zona TMAZ dan HAZ serta area yang terletak di tengah lasan, kekerasan berkurang di zona TMAZ dan HAZ, dan naik tajam di BM.

### 3.2. Simulasi Distribusi Suhu

Pada sesi ini, distribusi temperatur pada konfigurasi parameter level rendah dan level tinggi di sepanjang luas penampang lasan FSSW selama FSSW berhasil disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Hyperweld* dalam model 2D. **Gambar 5** menunjukkan wilayah warna merah yang menyatakan distribusi suhu tertinggi di zona las. Distribusi suhu di daerah warna merah berkurang dari 480 °C di sekitar tepian *keyhole* menjadi 430 °C di batas SZ.

Suhu maksimum 480 °C adalah yang paling dekat dengan *keyhole* yang juga merupakan jumlah panas tertinggi yang dihasilkan selama proses FSSW. Suhu terendah 430 °C adalah yang terjauh dari *keyhole*. Hal ini menandakan bahwa distribusi suhu tinggi terjadi terutama di SZ selama FSSW.

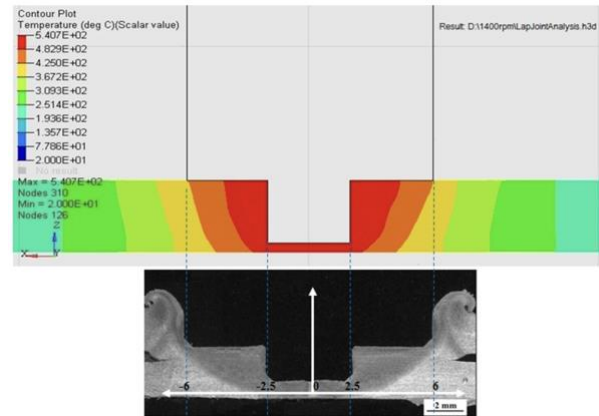


**Gambar 5.** Kontur panas dari distribusi suhu (*temperature distribution*) dibawah parameter konfigurasi tingkat rendah

Temperatur yang tinggi memungkinkan terjadinya deformasi plastis pada SZ sebagai akibat dari gesekan antara benda kerja dan pahat FSSW yang berputar sehingga membentuk struktur butir yang sangat halus pada daerah tersebut. Selanjutnya, wilayah oranye pada **Gambar 5** mewakili pengurangan distribusi suhu berkisar antara 380 °C hingga 320 °C di bawah pahat FSSW yang mengidentifikasi zona transisi dari SZ ke TMAZ. Mengacu pada **Gambar 4**, perubahan ini diikuti oleh perubahan nilai kekerasan dari 60-HV menjadi 54-HV pada 6 mm sepanjang zona lasan FSSW dari titik pusat lasan. Selanjutnya, daerah kuning pada **Gambar 5** mewakili suhu di HZ dari 329 °C hingga 381 °C. Dapat dilihat bahwa pada daerah ini mengalami input panas yang paling kecil dibandingkan dengan zona lain pada daerah lasan FSSW karena zona transisi dari TMAZ ke HAZ yang sedikit ruang untuk kontak gesek dengan alat FSSW. Porsi besar masukan panas terutama diperoleh dari perpindahan panas dari daerah lain seperti TMAZ (langsung) dan SZ (tidak langsung).

**Gambar 6** menunjukkan distribusi suhu tingkat tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada gambar,

daerah warna merah menyatakan SZ di zona suhu tertinggi mencapai 541 °C, di sekitar pinggiran *keyhole* hingga 483 °C di batas SZ. Dapat dilihat bahwa dengan menerapkan parameter tingkat tinggi, SZ meningkatkan wilayahnya dalam arah lebar dan tebal. Dalam arah ketebalan, SZ mencapai permukaan bawah. Dalam arah lebar, SZ lebih dekat ke sekitar diameter bahu (*shoulder*).



**Gambar 6.** Kontur panas dari distribusi suhu (*temperature distribution*) dibawah parameter konfigurasi tingkat tinggi

Seperti pada **Gambar 6**, zona ini memiliki nilai Kekerasan tertinggi 76-HV terutama dekat dengan sekitar pinggiran *keyhole*. Terlihat bahwa parameter tingkat tinggi menghasilkan lebih banyak panas dibandingkan dengan tingkat rendah. Deformasi plastis pada SZ telah secara dramatis mengubah struktur menjadi lasan sangat halus sebagai akibat dari gesekan antara benda kerja dan pahat yang berputar dipengaruhi oleh parameter. Wilayah oranye yang berdekatan dengan wilayah warna merah mewakili TMAZ dengan kisaran panas dari 425 °C hingga 483 °C. Perubahan ini juga diikuti dengan perubahan nilai kekerasan dari 75-HV pada 3 mm dari titik pusat lasan, menjadi 57-HV pada 6 mm menjauh dari titik pusat lasan. Zona transisi TMZ, menunjukkan struktur berbutir kasar karena mengalami efek termal dan mekanis dari aksi gesekan dan pengadukan pahat FSSW.

Selanjutnya, daerah kuning mewakili suhu di HZ dari 367 °C hingga 425 °C. Terlihat bahwa pada daerah ini mengalami masukan panas yang paling kecil dibandingkan dengan daerah lainnya dikarenakan zona transisi dari TMAZ ke HAZ yang

yang sedikit ruang untuk kontak gesekan dengan pahat FSSW. Oleh karena itu, wilayah oranye itu dianggap sebagai TMAZ. Porsi besar masukan panas terutama diperoleh dari perpindahan panas dari daerah lain seperti TMAZ (langsung) dan SZ (tidak langsung).

#### 4. SIMPULAN

Dalam penelitian ini, karakteristik kekerasan dari struktur lasan FSSW AA5052-H112 setebal 2 mm dievaluasi melalui uji kekerasan dan simulasi distribusi temperatur melalui FEA. Evolusi pengukuran kekerasan dari konfigurasi parameter tingkat rendah menunjukkan 42-HV di titik pusat lasan FSSW, meningkat menjadi 64-HV di sekitar *keyhole*, dan kemudian berkurang menjadi 53-HV pada jarak 6 mm dari pusat lasan FSSW. Pengukuran kekerasan dari konfigurasi parameter tingkat tinggi menunjukkan 61-HV di pusat titik lasan FSSW dan meningkat menjadi 76-HV di sekitar *keyhole*, dan kemudian berkurang menjadi 60-HV pada jarak 6 mm dari titik pusat lasan FSSW. Distribusi suhu las titik gesekan di bawah parameter tingkat rendah mencapai 480 °C di sekitar pinggiran *keyhole* di SZ dan perlahan-lahan berkurang hingga 380 °C pada jarak 6 mm dari pusat titik lasan FSSW di HAZ. Sementara itu, distribusi temperatur dari lasan FSSW pada parameter tingkat tinggi mencapai 540 °C di SZ, dan perlahan-lahan berkurang menjadi 425 °C di HAZ.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Akinlabi, E.T. dkk. (2020) 'Data on microhardness and structural analysis of friction stir spot welded lap joints of AA5083-H116', *Data in brief*, 33, hal. 106585.
- Almanar, I.P. dan Hussain, Z. (2011) *Basic Considerations for Weldment Formation in Friction Stir Welding*. Nova Science Publishers, Incorporated.
- ASTM, American Society for Testing and Materials (1991) *Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data*. Available at: <https://www.astm.org/e0739-10r15.html> (diakses: 5 April 2022).
- Burns, T. (2014) 'Characteristics of Heat Treatable vs. Non Heat Treatable Aluminum Alloys', *Fabricating and Metalworking*, 25 February. Available at: <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2014/02/characteristics-of-heat-treatable-vs-non-heat-treatable-aluminum-alloys/> (diakses: 5 April 2022).
- Dursun, T. dan Soutis, C. (2014) 'Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys', *Materials & Design (1980-2015)*, 56, hal. 862-871.
- Elangovan, K. dan Balasubramanian, V. (2008) 'Influences of tool pin profile and welding speed on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy', *Journal of materials processing technology*, 200(1-3), hal. 163-175.
- Haghshenas, M. dan Gerlich, A.P. (2018) 'Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review', *Engineering science and technology, an international journal*, 21(1), hal. 130-148.
- Jambhale, S., Kumar, Sudhir and Kumar, Sanjeev (2015) 'Effect of process parameters & tool geometries on properties of friction stir spot welds: a review', *Universal Journal of Engineering Science*, 3(1), hal. 6-11.
- JSA, Japanese Standards Association (1999) 'Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot and Embossed Projection Welded Joints', *Japanese Standards Association. Japan, JIS (3136)*. [Cetak].
- Jun-Won, K. dkk. (2012) 'Influence of tool plunge depth and welding distance on friction stir lap welding of AA5454-O aluminum alloy plates with different thicknesses', *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22, hal. s624-s628.
- Kou, S. (2003) 'Welding metallurgy', *New Jersey, USA*, 431(446), hal. 223-225.
- Mishra, R.S. dan Ma, Z.Y. (2005) 'Friction stir welding and processing', *Materials science and engineering: R: reports*, 50(1-2), hal. 1-78.
- Muhayat, N. dan Putra, B.P. (2019) 'Mechanical properties and microstructure of friction stir spot welded 6082-T6 Aluminium alloy joint', in *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, hal. 01005.
- Padmanaban, R. dkk. (2016) 'Process parameters effect on the strength of Friction Stir Spot Welded AA6061', *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(9), hal. 6030-6035.
- Pan, T.-Y. (2007) 'Friction stir spot welding (FSSW)-a literature review', *Transactions Journal of Materials and Manufacturing*, V116(5), hal. 1-12.



- Patel, V.V. dkk. (2016) 'Effect of tool rotation speed on friction stir spot welded AA5052-H32 and AA6082-T6 dissimilar aluminum alloys', *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 5(2), hal. 142-148.
- Piccini, J.M. dan Svoboda, H.G. (2015) 'Effect of the tool penetration depth in Friction Stir Spot Welding (FSSW) of dissimilar aluminum alloys', *Procedia Materials Science*, 8, hal. 868-877.
- Sitthipong, S. dkk. (2018) 'The influence of parameters affecting mechanical properties and microstructures of semi-solid-metal 7075 aluminum alloy by using friction stir spot welding', *Engineering Journal*, 22(3), hal. 51-64.
- Steels, A. (2013) 'Aluminium Alloy Data Sheet 5052'. Available at: [https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas\\_Aluminium\\_datasheet\\_5052\\_rev\\_Oct\\_2013.pdf](https://www.atlassteels.com.au/documents/Atlas_Aluminium_datasheet_5052_rev_Oct_2013.pdf). (diakses: 5 April 2022).
- Yang, X.W., Fu, T. dan Li, W.Y. (2014) 'Friction stir spot welding: a review on joint macro-and microstructure, property, and process modelling', *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014.
- Yuan, W. dkk. (2011) 'Effect of tool design and process parameters on properties of Al alloy 6016 friction stir spot welds', *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), hal. 972-977.
- YÜKLER, A.İ. dkk. (2018) 'The optimization of welding tool material and welding parameters in friction stir spot welding of plastics using Taguchi experimental design', *International journal of Engineering science and application*, 2(2), hal. 47-53.
- Zhang, Z. dkk. (2011) 'Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy', *Materials & Design*, 32(8), hal. 4461-4470.

