

Analisis Distribusi Kekerasan dan Struktur Makro pada Sambungan FSW *Dissimilar* Aluminium 7075-SS400

Aifa Haidar Rafif¹, Yudy Surya Irawan², Sugiarto^{*3}

^{1,2,3} Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya

Email: ¹haidaraifa@studet.ub.ac.id, ²yudysir@ub.ac.id, ³sugik@ub.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi sambungan *dissimilar* antara aluminium 7075 dan *mild steel* SS400 menggunakan metode *Friction Stir Welding* (FSW). Fokus utama kajian adalah distribusi kekerasan mikro dan morfologi struktur makro pada daerah *interface* dengan variasi *offset tool* (OT) sebesar 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm ke arah sisi aluminium. Pengujian kekerasan dilakukan melalui mikroindentasi Vickers (beban 50 gf, *dwelt time* 14 detik) pada tujuh titik pengamatan di sepanjang *interface* dan kedua material dasar. Hasil pengamatan makro digunakan untuk mengevaluasi kontinuitas kontak, pola plastisasi, serta keberadaan cacat seperti *void* dan *crack*. Temuan menunjukkan bahwa variasi OT 1,6 mm menghasilkan kualitas sambungan terbaik. Secara morfologi, parameter ini memberikan penetrasi yang lebih stabil, minim cacat terbuka, dan kontinuitas *interface* yang lebih baik. Secara mekanik, OT 1,6 mm menghasilkan nilai kekerasan *interface* tertinggi mencapai 142,0 HV. Kombinasi integritas struktural dan penguatan lokal ini memposisikan OT 1,6 mm sebagai parameter optimal dalam pengelasan Al-baja tersebut.

Kata kunci: aluminium 7075, *Friction Stir Welding*, kekerasan Vickers, *offset tool*, struktur makro, SS400

Abstract

This study evaluates the dissimilar joining of 7075 aluminum alloy and SS400 mild steel using Friction Stir Welding (FSW). The research focuses on local transverse hardness distribution and macrostructural morphology at the interface, utilizing tool offset (OT) variations of 0.8 mm, 1.2 mm, and 1.6 mm toward the aluminum side. Hardness testing was conducted via Vickers microindentation (50 gf load, 14-second dwell time) across seven points covering the interface and both base materials. Macro-observations were performed to evaluate contact continuity, material plasticization patterns, and the presence of defects such as voids or cracks. Results indicate that the 1.6 mm OT variation yields the highest joint quality. Morphologically, this parameter provides the most stable penetration, minimal open defects, and superior interface continuity. Mechanically, the 1.6 mm OT achieved the highest interface hardness value of 142.0 HV. This combination of structural integrity and local reinforcement positions the 1.6 mm OT as the optimal parameter for this Al-steel welding configuration.

Keywords: aluminium 7075, *Friction Stir Welding*, macrostructure, SS400, tool offset, Vickers hardness

I. PENDAHULUAN

Friction Stir Welding (FSW) merupakan metode penyambungan *solid-state* yang banyak digunakan untuk menggabungkan material dengan karakteristik berbeda. Pada sambungan aluminium 7075 dan *mild steel* SS400, tantangan utama tidak hanya terletak pada keberhasilan penyatuan dua material, tetapi juga pada bagaimana panas gesek, deformasi plastis, dan posisi *tool* membentuk sifat lokal di sekitar antarmuka sambungan. Perbedaan konduktivitas termal, kekerasan, dan respons deformasi antara aluminium dan baja menyebabkan daerah sambungan cenderung tidak simetris [1], [2].

Dalam sambungan aluminium-baja, posisi *offset tool* berpengaruh langsung terhadap masukan panas, keterlibatan material di sekitar *interface*, serta aliran material pada sisi aluminium. Literatur menunjukkan bahwa *offset* yang tidak tepat dapat menghasilkan deformasi plastis yang tidak memadai, *void*, *tunnel*, atau celah antarmuka, sedangkan kondisi yang lebih optimum dapat menghasilkan *interface* yang lebih jelas dan material baja yang tertanam lebih stabil dalam matriks aluminium [2], [3], [4].

Evaluasi kekerasan diperlukan untuk membaca respons mekanik lokal pada jalur melintang sambungan. Namun, pada material *dissimilar*, nilai *hardness* tidak boleh diperlakukan sebagai satu angka tunggal karena perbedaan karakter dasar aluminium dan baja akan menghasilkan gradien yang tajam secara alamiah. Oleh sebab itu, pembacaan yang lebih tepat adalah membaca pola perubahan *HV* pada titik-titik

berurutan di sekitar *interface* [2], [5], [4], sedangkan standar ASTM E384-22 mendukung penggunaan mikroindentasi untuk mengevaluasi variasi kekerasan lokal pada jarak kecil [6].

Struktur makro berfungsi sebagai verifikasi fisik terhadap hasil kekerasan. Penampang melintang dapat memperlihatkan *Stir Zone (SZ)*, *Thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ)*, *Heat-Affected Zone (HAZ)*, serta kontinuitas antarmuka. Foto makro juga diperlukan untuk memastikan apakah perubahan nilai *HV* berkaitan dengan sambungan yang kompak atau justru dipengaruhi oleh cacat seperti *void*, celah, *tearing*, atau *incomplete filling* [2], [3], [4].

Berdasarkan fokus tersebut, artikel ini membahas pengaruh variasi *offset tool* 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm terhadap profil kekerasan tujuh titik dan morfologi *interface* pada penampang makro sambungan FSW aluminium 7075-SS400.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan rancangan eksperimen FSW pada pelat aluminium 7075 dan *mild steel* SS400. *Tool* diposisikan dengan *offset* ke sisi aluminium dari garis *interface*. Variasi *offset tool* yang dianalisis adalah 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm. Pembacaan hasil diarahkan pada hubungan antara posisi *tool*, profil kekerasan tujuh titik di sekitar *interface*, dan morfologi *interface* pada penampang makro sambungan [4].

2.1. Pengujian Kekerasan Mikro Vickers

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan metode mikroindentasi *Vickers* pada penampang melintang sambungan FSW aluminium 7075-SS400. Pengujian diarahkan untuk membaca distribusi kekerasan lokal di sekitar *interface* sambungan, bukan untuk memetakan seluruh *base metal* secara menyeluruh. Jalur indentasi dibuat secara horizontal melewati *interface* pada satu garis pengujian yang sama.

Sebanyak tujuh titik indentasi digunakan pada setiap spesimen. Satu titik ditempatkan pada *interface* sebagai titik pusat pengamatan, sedangkan tiga titik ditempatkan ke arah sisi aluminium 7075 dan tiga titik ke arah SS400. Jarak antar titik indentasi ditetapkan sebesar 1 mm. Dengan panjang penampang spesimen sebesar 30 mm dari ujung kiri ke ujung kanan, lintasan pengujian *hardness* sepanjang 6 mm ini merepresentasikan daerah lokal sekitar *interface*, yaitu sekitar 20% dari panjang penampang. Oleh karena itu, hasil *HV* pada lintasan ini digunakan untuk mengevaluasi transisi mekanik lokal di sekitar *interface*, bukan untuk menyimpulkan distribusi kekerasan seluruh *base metal* [6].

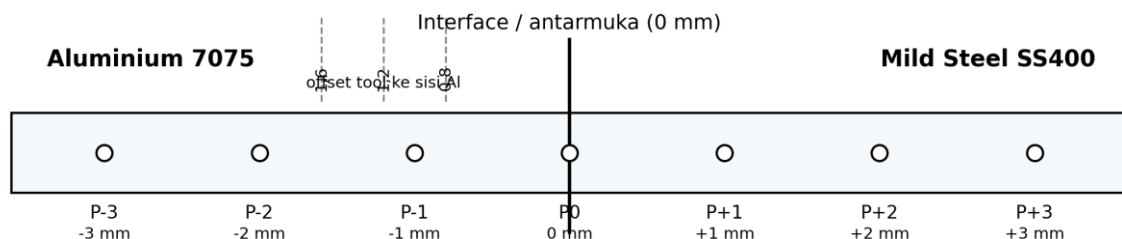
Beban uji yang digunakan adalah 50 gf, sehingga pelaporan nilai kekerasan dapat dinyatakan sebagai *HV0,05*. Waktu tahan beban atau *dwell time* ditetapkan sekitar 14 detik mengikuti setelan standar mesin. Nilai ini masih berada dalam rentang umum uji *Vickers*, yaitu 10-15 detik; apabila ingin dilaporkan secara eksplisit, hasil dapat ditulis sebagai *HV0,05/14* [6].

Penggunaan beban 50 gf masih sesuai dengan cakupan ASTM E384-22 karena standar tersebut mencakup uji mikroindentasi *Vickers* dan *Knoop* pada rentang gaya 1-1000 gf. Pemilihan jarak 1 mm antar titik juga bertujuan mengurangi kemungkinan pengaruh deformasi plastis dari bekas indentasi sebelumnya terhadap titik berikutnya [6].

Nilai *Vickers Hardness Number (HV)* dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$HV = 1,8544 F / d^2 \quad [1]$$

dengan *F* adalah beban uji dalam *kilogram-force* dan *d* adalah rata-rata panjang diagonal bekas indentasi dalam milimeter. Persamaan tersebut digunakan untuk mengubah ukuran jejak indentasi menjadi nilai kekerasan lokal pada setiap titik lintasan horizontal.



Gambar 1. Skema jalur pengujian kekerasan tujuh titik dan variasi *offset tool* 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm pada sisi aluminium terhadap antarmuka sambungan FSW Al 7075-SS400.

Tabel 1. Makna Interpretatif Posisi Titik Uji Kekerasan terhadap *Interface*

Titik uji	Posisi relatif	Zona pengamatan lokal
P-3	-3 mm dari <i>interface</i>	Sisi Al 7075
P-2	-2 mm dari <i>interface</i>	Sisi Al 7075
P-1	-1 mm dari <i>interface</i>	Sisi Al 7075 dekat <i>interface</i>
P0	0 mm	<i>Interface</i> Al 7075-SS400
P+1	+1 mm dari <i>interface</i>	Sisi SS400 dekat <i>interface</i>
P+2	+2 mm dari <i>interface</i>	Sisi SS400
P+3	+3 mm dari <i>interface</i>	Sisi SS400

2.2. Pengujian Struktur Makro

Pengujian struktur makro dilakukan pada spesimen penampang melintang yang dipotong tegak lurus terhadap arah pengelasan. Permukaan spesimen disiapkan melalui *grinding* bertahap, pembersihan, dan etsa. Prosedur preparasi mengikuti prinsip ASTM E3-11(2017), yaitu bahwa preparasi spesimen harus mampu menampilkan struktur logam secara memadai untuk pengamatan metalografi [7].

Pada sisi aluminium digunakan larutan Keller, sedangkan pada sisi SS400 digunakan larutan etsa berbasis campuran air, asam nitrat, dan asam klorida sesuai prosedur eksperimen. Hasil etsa diamati secara visual dan didokumentasikan menggunakan kamera atau alat optik dengan perbesaran rendah. Dengan keterbatasan resolusi dan kontras pada hasil makro, pengamatan ini tidak digunakan untuk memetakan zona TMAZ dan HAZ. Analisis difokuskan pada morfologi *interface*, kontinuitas kontak Al-baja, pola plastisasi material di sekitar *interface*, dan indikasi cacat makro yang dapat memengaruhi respons kekerasan lokal.

Parameter utama uji makro meliputi morfologi *interface*, keteraturan kontak Al-baja, bentuk daerah plastisasi di sekitar antarmuka, serta ada tidaknya cacat makro. Cacat yang diamati mencakup *void*, *cavity*, celah antarmuka, *incomplete filling*, *tearing*, dan *crack* pada sisi aluminium. Indikator tersebut penting karena studi FSW aluminium-baja menunjukkan bahwa kualitas sambungan sangat dipengaruhi oleh kecukupan aliran material, ketebalan lapisan IMC, dan keberadaan diskontinuitas pada *interface* [2], [3], [4].

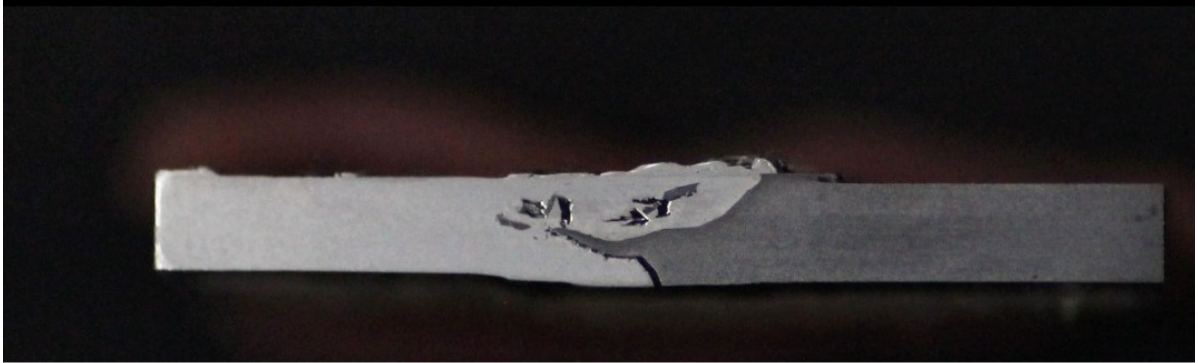
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Makro dan Morfologi *Interface* Sambungan

Hasil uji makro diperbarui berdasarkan foto penampang melintang terbaru dengan urutan variasi *offset tool* 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm. Arah kiri penampang merupakan sisi Al 7075, sedangkan arah kanan merupakan sisi SS400. Berdasarkan kualitas visual foto makro, batas TMAZ dan HAZ tidak dapat diidentifikasi secara tegas. Oleh karena itu, pembacaan makro pada penelitian ini tidak diarahkan pada pemetaan zona HAZ atau TMAZ, tetapi difokuskan pada morfologi *interface*, kontinuitas kontak Al-baja, pola plastisasi material di sekitar antarmuka, serta indikasi cacat seperti celah, *void*, *crack*, dan *incomplete filling*. Interpretasi cacat pada skala makro bersifat observasional dan perlu dikaitkan dengan data kekerasan, karena pada sambungan *dissimilar* Al-baja nilai kekerasan lokal dapat dipengaruhi oleh aliran material, fragmen baja, pemadatan *interface*, dan diskontinuitas sambungan [2], [3], [4], [7].

(a) OT 0,8 mm

kiri: Al 7075 | kanan: SS400



(b) OT 1,2 mm

kiri: Al 7075 | kanan: SS400



(c) OT 1,6 mm

kiri: Al 7075 | kanan: SS400



Gambar 2. Foto makro penampang sambungan FSW Al 7075-SS400 pada variasi *offset tool*: (a) 0,8 mm, (b) 1,2 mm, dan (c) 1,6 mm. Arah kiri menunjukkan Al 7075 dan arah kanan menunjukkan SS400.

Pada variasi *offset tool* 0,8 mm, morfologi *interface* menunjukkan daerah plastisasi yang berada sangat dekat dengan batas Al 7075-SS400. Kontur sambungan tampak tidak beraturan, dengan indikasi aliran aluminium yang terdorong dan terkonsentrasi di sekitar *interface*. Pada area tengah hingga bawah *interface* terlihat diskontinuitas berupa celah/retak yang berkembang dari bagian bawah sambungan, sedangkan di sekitar daerah adukan tampak beberapa area gelap yang mengindikasikan ketidakraturan material atau kemungkinan fragmen material keras. Kondisi ini menunjukkan bahwa *offset* yang terlalu dekat dengan *interface* dapat menghasilkan keterlibatan material yang kuat, tetapi aliran plastis dan efek penempaan belum sepenuhnya stabil. Pada FSW *dissimilar* Al-baja, ketidaksesuaian *offset* dapat memicu aliran material yang tidak seragam, *void*, *gap*, *tearing*, atau *incomplete filling* sehingga nilai kekerasan lokal yang tinggi belum tentu merepresentasikan integritas sambungan yang baik [2], [3], [4].

Pada variasi *offset tool* 1,2 mm, morfologi *interface* terlihat lebih terpusat dan lebih terkendali dibandingkan OT 0,8 mm. Daerah plastisasi membentuk kontur melengkung di sekitar *interface*, dengan batas kontak antara sisi aluminium dan baja yang masih dapat dibaca secara makro. Namun, pada bagian

bawah atau akar sambungan masih tampak celah lokal yang menunjukkan bahwa pemadatan *interface* belum sepenuhnya sempurna. Dengan demikian, OT 1,2 mm dapat dipahami sebagai kondisi menengah yang lebih baik daripada OT 0,8 mm, tetapi belum menunjukkan kontinuitas sambungan sebaik OT 1,6 mm. Literatur mengenai FSW dissimilar Al-baja menunjukkan bahwa perubahan *offset tool* dapat memengaruhi aliran material, pembentukan cacat, dan stabilitas kontak mekanik pada *interface* [2], [3], [4].

Pada variasi *offset tool* 1,6 mm, morfologi *interface* menunjukkan sambungan Al-baja yang lebih menyatu dibandingkan variasi lainnya. Daerah plastisasi memang lebih dominan pada sisi aluminium, tetapi kontur *interface* tampak lebih kontinu dan tidak memperlihatkan porositas terbuka atau *crack* dominan seperti yang terlihat pada variasi 0,8 mm. Indikasi masuknya sebagian kecil material baja ke sisi aluminium pada kondisi ini dapat dibaca sebagai keterlibatan mekanik material baja di dalam matriks aluminium, sehingga berpotensi meningkatkan *mechanical interlocking* pada daerah *interface*. Pola ini mendukung bahwa OT 1,6 mm memiliki pemadatan *interface* yang lebih baik, karena kontak Al-baja terlihat lebih nyambung dan diskontinuitas makro lebih minimal. Pada FSW dissimilar Al-baja, *interface* yang lebih kontinu, cacat terbuka yang lebih sedikit, dan keterlibatan material baja yang terkendali merupakan indikator penting bagi peningkatan integritas sambungan [2], [3], [4], [7].

Tabel 2. Ringkasan Hasil Makro pada Tiga Variasi *Offset Tool*

Variasi <i>offset tool</i>	Morfologi <i>interface</i> yang tampak	Cacat/ketidakteraturan makro	Interpretasi langsung
0,8 mm	Daerah plastisasi berada sangat dekat dengan <i>interface</i> ; kontur sambungan tampak tidak beraturan dan keterlibatan material cukup kuat.	Terindikasi <i>crack</i> /celah dari bagian bawah sambungan dan ketidakteraturan material di sekitar zona adukan.	<i>Offset</i> terlalu dekat dapat meningkatkan interaksi material, tetapi aliran plastis dan pemadatan <i>interface</i> belum stabil [2], [3], [4], [7].
1,2 mm	Daerah plastisasi lebih terpusat; kontur <i>interface</i> lebih terkendali dibanding OT 0,8 mm, tetapi kontinuitas kontak belum sebaik OT 1,6 mm.	Masih terdapat indikasi celah kecil pada akar sambungan.	Kondisi menengah; profil relatif terkendali, tetapi masih ada diskontinuitas akar sambungan [2], [3], [4], [7].
1,6 mm	Daerah plastisasi dominan pada sisi Al 7075; <i>interface</i> tampak lebih kontinu dan sambungan Al-baja lebih nyambung secara makro.	Cacat terbuka seperti porositas dan <i>crack</i> dominan tampak lebih minimal dibanding variasi lain; terdapat indikasi keterlibatan baja pada sisi Al.	Kondisi paling stabil secara makro karena kontak <i>interface</i> lebih kontinu, cacat terbuka lebih sedikit, dan <i>mechanical interlocking</i> lebih mungkin terbentuk [2], [3], [4], [7].

3.2. Hasil Uji Kekerasan Tujuh Titik

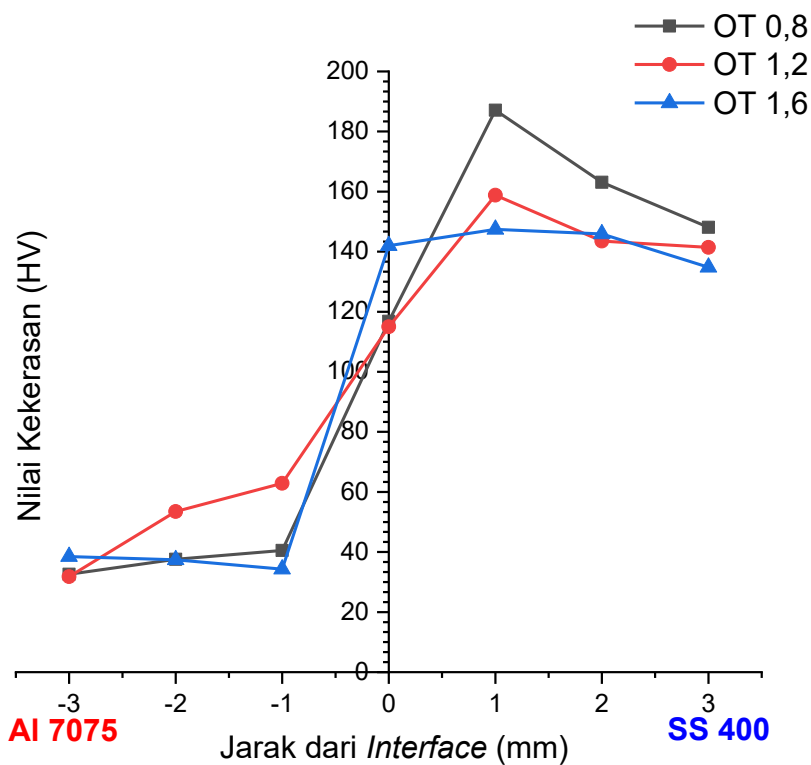
Uji kekerasan dilakukan pada tujuh titik horizontal dengan jarak antar titik 1 mm. Titik P0 ditempatkan pada *interface*, P-1 sampai P-3 berada ke arah Al 7075, dan P+1 sampai P+3 berada ke arah SS400. Karena lintasan ini hanya mencakup daerah lokal sekitar antarmuka, hasil *hardness* harus dibaca sebagai distribusi transisi mekanik di sekitar *interface*, bukan sebagai distribusi kekerasan seluruh penampang [4], [5], [6].

Pada sisi Al 7075, variasi OT 0,8 mm menunjukkan kenaikan nilai kekerasan dari 32,6 HV pada jarak -3 mm menjadi 40,5 HV pada jarak -1 mm. Pola serupa tampak pada OT 1,2 mm, yaitu dari 31,8 HV menjadi 62,9 HV. Kenaikan menuju *interface* ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya pengaruh deformasi plastis dan siklus termal FSW di sekitar daerah adukan. Pada sambungan *dissimilar*, perubahan lokal seperti ini lazim terjadi karena posisi *tool* mengatur intensitas gesekan, plastisasi, dan aliran material di dekat *interface* [2], [4], [5].

OT 1,6 mm menunjukkan pola kekerasan yang berbeda dibandingkan dua variasi lainnya. Nilai kekerasan sisi aluminium menurun dari 38,5 HV pada jarak -3 mm menjadi 34,3 HV pada jarak -1 mm,

kemudian meningkat tajam menjadi 142,0 HV pada titik *interface*. Pada pembacaan terpadu, penurunan di sisi aluminium tidak langsung menunjukkan kualitas sambungan yang rendah, karena foto makro justru memperlihatkan sambungan Al-baja yang lebih kontinu dan minim cacat terbuka. Lonjakan HV pada *interface* dapat dikaitkan dengan pemadatan lokal, deformasi plastis, dan keterlibatan material baja di sekitar *interface*. Pada sambungan dissimilar, nilai *hardness* lokal di *interface* dapat meningkat akibat kombinasi strain hardening, kontak mekanik Al-baja, serta pembentukan atau keberadaan fase keras di daerah antarmuka [2], [3], [4], [5], [6].

Pada sisi SS400, seluruh variasi menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan sisi aluminium. Nilai tertinggi terjadi pada titik +1 mm, yaitu 187,1 HV untuk OT 0,8 mm, 158,8 HV untuk OT 1,2 mm, dan 147,4 HV untuk OT 1,6 mm. Setelah itu, nilai kekerasan cenderung menurun menuju titik +3 mm. Pola ini menunjukkan bahwa daerah baja paling dekat dengan *interface* menerima pengaruh deformasi dan interaksi termomekanik paling besar, sedangkan titik yang lebih jauh dari *interface* mulai menunjukkan respons yang lebih stabil [4], [5], [6].



Gambar 3. Distribusi kekerasan tujuh titik pada sambungan FSW Al 7075-SS400 untuk variasi *offset tool* 0,8 mm, 1,2 mm, dan 1,6 mm.

Tabel 3. Data Distribusi Kekerasan Tujuh Titik terhadap *Interface*

Jarak dari <i>interface</i> (mm)	OT 0,8 (HV)	OT 1,2 (HV)	OT 1,6 (HV)
-3	32,6	31,8	38,5
-2	37,6	53,5	37,4
-1	40,5	62,9	34,3
0	116,8	115,0	142,0
+1	187,1	158,8	147,4
+2	163,1	143,5	145,9
+3	148,1	141,4	134,8

3.3. Pembahasan Terpadu Hasil Makro dan Kekerasan

Hubungan antara hasil makro dan *hardness* menunjukkan bahwa kualitas sambungan tidak dapat ditentukan dari satu pengujian saja. Foto makro pada penelitian ini menjelaskan kondisi fisik *interface* dan cacat makro, sedangkan profil HV menunjukkan respons mekanik lokal pada lintasan melintang. Karena batas HAZ dan TMAZ tidak tampak jelas pada foto makro, pembahasan tidak diarahkan pada identifikasi zona tersebut. Pada sambungan *dissimilar* Al-baja, nilai HV di sekitar *interface* harus dibaca bersama morfologi *interface* karena perbedaan sifat dasar aluminium dan baja, adanya fragmen baja, lapisan intermetalik, serta cacat lokal dapat menghasilkan lonjakan atau penurunan kekerasan yang tidak selalu sejalan dengan kualitas sambungan secara keseluruhan [2], [3], [4], [5], [6].

Pada variasi OT 0,8 mm, nilai kekerasan sisi aluminium meningkat secara bertahap menuju *interface*, yaitu dari 32,6 HV pada -3 mm menjadi 40,5 HV pada -1 mm, lalu naik menjadi 116,8 HV pada *interface* dan 187,1 HV pada sisi SS400 dekat *interface*. Peningkatan ini menunjukkan adanya deformasi lokal yang kuat di sekitar batas sambungan. Akan tetapi, foto makro memperlihatkan *interface* yang tidak beraturan, terindikasi *crack* dari bagian bawah sambungan, serta ketidakaturan material di sekitar daerah plastisasi. Oleh karena itu, tingginya HV lokal pada variasi ini tidak dapat langsung dinyatakan sebagai kualitas sambungan terbaik, karena cacat makro dapat menjadi titik konsentrasi tegangan dan menurunkan integritas sambungan [2], [3], [4], [7].

Pada variasi OT 1,2 mm, distribusi kekerasan terlihat relatif teratur. Nilai pada sisi aluminium meningkat dari 31,8 HV pada -3 mm menjadi 62,9 HV pada -1 mm, kemudian naik menjadi 115,0 HV pada *interface* dan 158,8 HV pada sisi SS400 dekat *interface*. Setelah itu, nilai HV menurun secara bertahap hingga 141,4 HV pada +3 mm. Pola ini menunjukkan transisi yang cukup stabil dari sisi aluminium menuju baja. Akan tetapi, hasil makro masih memperlihatkan celah lokal pada akar sambungan, sehingga kestabilan profil *hardness* pada OT 1,2 mm belum sepenuhnya diikuti oleh integritas morfologi *interface* yang paling baik [2], [3], [4], [5], [7].

Pada variasi OT 1,6 mm, nilai kekerasan *interface* merupakan yang tertinggi, yaitu 142,0 HV. Meskipun sisi aluminium menunjukkan penurunan dari 38,5 HV pada -3 mm menjadi 34,3 HV pada -1 mm, hasil makro memperlihatkan bahwa sambungan Al-baja pada variasi ini lebih menyatu, minim porositas terbuka, dan tidak menunjukkan *crack* dominan pada daerah *interface*. Selain itu, profil kekerasan pada sisi SS400 relatif lebih halus dari +1 mm ke +2 mm, yaitu 147,4 HV menjadi 145,9 HV, sebelum menurun menjadi 134,8 HV pada +3 mm. Kombinasi antara nilai *interface* yang tinggi, kontak Al-baja yang lebih kontinu, dan cacat makro yang lebih minimal memperkuat interpretasi bahwa OT 1,6 mm menghasilkan sambungan paling stabil. Pada FSW *dissimilar* Al-baja, kualitas parameter tidak hanya ditentukan oleh gradien *hardness* yang bertahap, tetapi juga oleh kemampuan *offset tool* menghasilkan *interface* yang tersambung, minim *void*, dan memiliki *mechanical interlocking* yang memadai [2], [3], [4], [5], [6], [7].

Tabel 4. Sintesis Penilaian Makro dan Kekerasan Berdasarkan Variasi *Offset Tool*

Variasi	Hasil makro utama	Titik HV paling menentukan	Pembacaan terpadu
0,8 mm	<i>Interface</i> tidak beraturan; deformasi kuat tetapi muncul indikasi <i>crack</i> /celah pada bagian bawah.	P-1, P0, P+1	HV meningkat menuju <i>interface</i> , tetapi kualitas sambungan dibatasi oleh cacat makro dan ketidakteraturan aliran material [3], [5], [6], [9].
1,2 mm	<i>Interface</i> relatif terpusat, tetapi masih terdapat celah lokal pada akar sambungan.	P-3 sampai P+3	Profil HV relatif teratur, tetapi integritas makro belum paling baik karena masih ada celah lokal [3], [4], [5], [6], [9].
1,6 mm	Sambungan Al-baja lebih kontinu; cacat terbuka seperti porositas dan <i>crack</i> dominan lebih minimal; terdapat keterlibatan baja pada sisi Al.	P0, P+1 sampai P+3	Nilai <i>interface</i> tertinggi dan morfologi paling menyatu; menjadi variasi pengelasan paling stabil [3], [5], [6], [8], [9].

Berdasarkan korelasi tersebut, variasi OT 1,6 mm dapat diposisikan sebagai kondisi pengelasan paling stabil dalam penelitian ini. Keunggulan OT 1,6 mm tidak hanya berasal dari nilai *hardness* tertinggi pada titik *interface*, tetapi juga dari morfologi sambungan yang lebih nyambung antara Al 7075 dan SS400, minimnya cacat terbuka seperti porositas dan *crack* dominan, serta keterlibatan material baja yang dapat memperkuat kontak mekanik pada *interface*. OT 0,8 mm menunjukkan deformasi kuat tetapi masih disertai *crack*/celah dan ketidakteraturan *interface*, sedangkan OT 1,2 mm memiliki profil *hardness* yang relatif teratur tetapi masih memperlihatkan celah lokal pada akar sambungan. Dengan keterbatasan foto makro yang tidak mampu memperlihatkan batas HAZ dan TMAZ secara jelas, parameter terbaik pada penelitian ini ditentukan melalui kombinasi antara nilai *hardness interface*, kontinuitas morfologi *interface*, dan minimnya cacat makro. Berdasarkan tiga indikator tersebut, OT 1,6 mm menjadi variasi terbaik [2], [3], [4], [6], [7].

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mencapai tujuannya dengan membuktikan bahwa variasi *offset tool* berpengaruh signifikan terhadap distribusi kekerasan lokal dan morfologi antarmuka sambungan FSW Al 7075-SS400, di mana *offset tool* 1,6 mm terbukti sebagai parameter pengelasan paling stabil dan optimal. Keunggulan tersebut divalidasi oleh capaian kekerasan antarmuka tertinggi sebesar 142,0 HV dan kontinuitas kontak Al-baja yang paling menyatu dengan minimnya cacat makro terbuka, jauh lebih baik dibandingkan variasi 0,8 mm yang rentan retak dan 1,2 mm yang masih menyisakan celah lokal pada akar sambungan. Sebagai prospek pengembangan, parameter pengelasan 1,6 mm ini sangat potensial untuk diadopsi sebagai acuan manufaktur dalam industri otomotif maupun transportasi yang membutuhkan penyambungan komponen *dissimilar* secara efisien dan minim cacat.

REFERENSI

- [1] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, 2005, doi: 10.1016/j.mser.2005.07.001.
- [2] L. Wan and Y. Huang, "Friction stir welding of dissimilar aluminum alloys and steels: A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, pp. 1781–1811, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2601-x.
- [3] E. Joshani, B. Beidokhti, A. Davodi, and M. Amelzadeh, "Evaluation of dissimilar 7075 aluminum/AISI 304 stainless steel joints using friction stir welding," *J. Adv. Join. Process.*, vol. 7, p. 100017, 2023, doi: 10.1016/j.jalms.2023.100017.
- [4] F. A. Mir, N. Z. Khan, A. N. Siddiquee, and S. Parvez, "Effect of tool-pin offset on microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of friction stir welded AA2024-T3 and SS304 dissimilar joints," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 238, no. 7, pp. 1239–1255, 2024, doi: 10.1177/14644207231217479.
- [5] S. Zandsalimi, A. Heidarzadeh, and T. Saeid, "Dissimilar friction-stir welding of 430 stainless steel and

-
- 6061 aluminum alloy: Microstructure and mechanical properties of the joints,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 233, no. 9, pp. 1791–1801, 2019, doi: 10.1177/1464420718789447.
- [6] A. International, “ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials,” 2022, *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*. [Online]. Available: <https://www.astm.org/e0384-22.html>
- [7] A. International, “ASTM E3-11(2017): Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens,” 2017, *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*. [Online]. Available: <https://www.astm.org/e0003-11r17.html>