

Analisis peran *anvil plate* terhadap sifat mekanik sambungan *Friction Stir Spot Welding* AA5052

Y.E. Widyantono

¹Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

Penulis Korespondensi: Yudha Eko Widyantono (e-mail: yudha@itny.ac.id)

ABSTRAK

Friction Stir Spot Welding (FSSW) merupakan pengembangan dari metode pengelasan *Friction Stir Welding* (FSW) yang diterapkan di industri dengan tujuan untuk menggantikan metode pengelasan *Resistance Spot Welding* (RSW). Dalam penelitian ini, FSSW diterapkan untuk menyambung pelat paduan aluminium 5052-H32 dan pelat baja standar JIS G 3136. Variabel utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis *anvil plate* yang terdiri dari granit, baja AISI 1010, dan paduan Al-Si, sedangkan parameter pengelasan yang digunakan adalah kecepatan putar 1000 rpm, waktu penahanan (*dwell time*) selama 5 detik, dan kedalaman penekanan (*plunge depth*) sebesar 0,2 mm yang dijadikan sebagai variabel tetap. Konduktivitas termal dari *anvil plate* memengaruhi kekerasan sambungan las FSSW dan beban geser tarik (*tensile shear load*) dari sambungan las. *Anvil plate* berbahan granit menghasilkan suhu pengelasan sebesar 167,37°C, baja AISI 1010 sebesar 113,18°C, dan Al-Si sebesar 100,88°C. Peningkatan konduktivitas termal menyebabkan sambungan las menjadi lebih keras. *Anvil plate* granit menghasilkan kekerasan *Vickers* sebesar 36,5 HVN, baja AISI 1010 sebesar 47 HVN, dan Al-Si sebesar 49,5 HVN. Beban geser tarik dipengaruhi oleh ukuran *nugget* yang terbentuk. *Anvil plate* granit menghasilkan rata-rata beban geser tarik sebesar 3986,98 N, baja AISI 1010 sebesar 3769,00 N, dan Al-Si sebesar 3414,32 N.

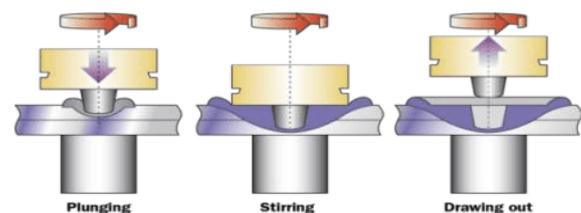
KATA KUNCI *Friction Stir Spot Welding* (FSSW), AA5052-H32, *Anvil Plate*, Sifat Mekanik.

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan bagian yang penting dalam suatu proses industri, dan kebutuhan akan pengelasan sangat tinggi oleh karena itu teknologi pengelasan semakin lama semakin berkembang. Penggunaan teknologi las biasanya dipakai dalam bidang konstruksi, otomotif, perkapalan, pesawat terbang, dan bidang lainnya yang dalam beberapa tahun terakhir ini mengembangkan teknologi material ringan seperti aluminium *alloy*. Dalam dunia industri, pengelasan dilakukan dengan sistem pengelasan *consumable electrode*, sedangkan untuk pengelasan spot umumnya dengan metode pengelasan *Resistance Spot Welding* (RSW). Metode pengelasan *spot* metode ini memiliki beberapa kelemahan dalam bidang produksi, salah satunya adalah investasi biaya yang tinggi karena dalam hal ini pengadaan peralatan RSW mahal.

Friction stir spot welding (FSSW) telah dikembangkan dan diimplementasikan dalam industri otomotif sebagai pengganti *Resistance Spot Welding* untuk aluminium. Pada FSW, *tool* bergerak sepanjang bagian yang dilas, sedangkan FSSW terfokus pada sambungan satu titik yang disebut sebagai sambungan titik (*spot*). Selama proses FSSW, pin mengalami kontak langsung dengan benda kerja untuk waktu yang lebih

lama. Akibatnya, gaya gesekan antara pin dan benda kerja menghasilkan sebagian besar energi panas. Karakteristik ini membuat proses FSSW berbeda dari proses FSW [1].



Gambar 1. Tahapan Proses FSSW [2]

Gambar 1 menunjukkan tahapan proses FSSW terjadi. Proses FSSW terdiri dari tiga tahap utama, yaitu *plunging*, *stirring*, dan *drawing out*. Pada tahap *plunging*, *tool* FSSW yang berputar dengan kecepatan tinggi mulai menekan permukaan dua lembar material yang akan disambung, sehingga terjadi gesekan yang menghasilkan panas dan melunakkan material di sekitar *pin*. Selanjutnya, pada tahap *stirring*, *tool* tetap berputar di posisi tetap dan pin *tool* mengaduk material yang telah melunak, sehingga terjadi pencampuran dan difusi antar material yang membentuk zona las (*weld nugget*) yang homogen dan kuat. Setelah proses pengadukan selesai,

tahap *drawing out* dilakukan dengan cara menarik *tool* secara perlahan dari material, sehingga material hasil lasan mulai mendingin dan mengeras membentuk sambungan FSSW [2].



Gambar 2. Zona Pengelasan FSSW [2]

Gambar 2 menunjukkan zona utama dalam proses pengelasan FSSW, yaitu *keyhole* di tengah sebagai bekas *pin*, *stir zone* (SZ) di bawah *keyhole* yang merupakan area pengadukan utama, *thermo-mechanically affected zone* (TMAZ) di sekitar SZ yang mengalami panas dan deformasi, *heat affected zone* (HAZ) yang hanya terpengaruh panas, serta *base material* (BM) di bagian terluar yang tidak terpengaruh proses las [2].

Meskipun FSSW telah banyak digunakan dalam penyambungan logam ringan seperti aluminium, sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada pengaruh parameter proses, seperti kecepatan putar, tekanan penekanan, dan desain alat las. Sementara itu, aspek penting lainnya, yakni material *anvil plate* yang berfungsi sebagai penopang selama proses pengelasan, belum banyak mendapat perhatian dalam kajian ilmiah. Padahal, karakteristik termal dan mekanik dari material landasan dapat berdampak signifikan terhadap distribusi panas, deformasi plastis, dan pembentukan mikrostruktur sambungan. Kebanyakan studi hanya menggunakan satu jenis material logam sebagai *anvil* tanpa mengevaluasi perbedaan performa hasil pengelasan akibat variasi material tersebut. Kondisi ini membuka peluang untuk mengeksplorasi lebih jauh peran landasan dengan sifat fisis yang berbeda terhadap kualitas sambungan FSSW, khususnya pada paduan aluminium.

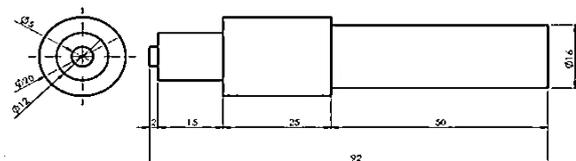
Dalam penelitian ini, digunakan tiga jenis material sebagai *anvil plate*, yaitu granit, baja AISI 1010, dan paduan Al-Si, untuk mengkaji pengaruh sifat termal dan mekanik landasan terhadap kualitas sambungan FSSW pada material aluminium AA 5052. Pemilihan granit didasarkan pada kemampuannya dalam menghambat aliran panas serta ketahanannya terhadap deformasi, sehingga memungkinkan pengamatan terhadap kondisi pengelasan dengan transfer panas minimal. Baja AISI 1010 digunakan sebagai acuan karena memiliki konduktivitas termal menengah dan sifat mekanik yang stabil, mencerminkan karakteristik material logam konvensional. Sementara itu, paduan Al-Si dipilih karena memiliki kesamaan karakteristik dengan logam dasar, baik dalam hal konduktivitas maupun kompatibilitas kimia, yang memungkinkan analisis terhadap pengaruh interaksi antar material sejenis dalam proses pengelasan. Dengan membandingkan ketiga jenis material ini, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam memahami peran *anvil plate* terhadap performa mekanik sambungan FSSW, serta menjadi dasar pertimbangan dalam pemilihan

material *anvil* yang tepat untuk aplikasi praktis di industri [3].

2. BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan adalah *Aluminium Alloy* 5052-H32 dengan dimensi sesuai standar JIS G 3136 yaitu 125 x 40 x 2 mm dengan *overlap* 40 x 40 mm² serta baja K100 sebagai bahan *tool* yang digunakan. Mesin las yang digunakan dalam pengelasan ini adalah mesin *milling vertical* dengan memvariasikan *anvil plate* dengan konduktivitas termal yang berbeda yaitu granit yaitu 2,79 W/m³K, baja AISI 1010 67,9 W/m³K, Al-Si 237 W/m³K serta variabel tetap yaitu kecepatan putar 1000 RPM, panjang pin 2 mm dan *dwell time* selama 5 detik.

Pengujian yang dilakukan adalah observasi makroskopik, observasi mikroskopik, kekerasan Vickers, dan uji kekuatan tarik geser. Observasi makroskopik dilakukan dengan mikroskop OLYMPUS DF PLAPO dan observasi mikroskopik dilakukan dengan mikroskop EUROMEX Holland dengan perbesaran 10x10. Pengujian kekerasan menggunakan mesin *Vickers* HIGHWOOD HWMMT X7 dengan ASTM E384 yaitu pembebanan 0,3 kgf dan *dwell time* 10s [4]. Uji tarik geser dilakukan dengan *SANS Testing Machine* dengan kecepatan penarikan 5mm/min.



Gambar 3. Tool FSSW

Gambar 3 adalah *tools* yang digunakan untuk proses pengelasan *Friction Stir Spot Welding* (FSSW). Gambar tersebut menunjukkan desain poros bertingkat dengan beberapa diameter berbeda. Bagian pin yang kecil dengan diameter 5 mm berperan sebagai pengaduk material yang telah lunak. *Shoulder* memiliki diameter 12 mm yang bekerja menghasilkan panas lewat gesekan supaya material bisa menyatu dengan baik. *Tools FSSW* menggunakan material K100 Bohler, yang sangat ideal karena merupakan baja perkakas dingin dengan ketahanan aus dan kekerasan yang tinggi. Sifat-sifat ini membuatnya mampu menahan tekanan dan gesekan yang intens selama proses pengelasan FSSW [5], [6].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

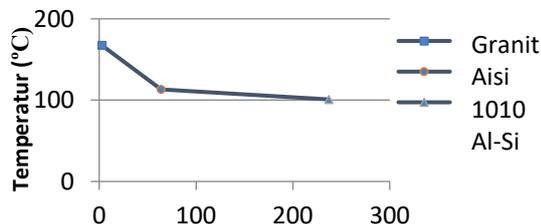
A. 3.1. Temperatur Pengelasan

Gambar 4. menunjukkan grafik hubungan temperatur permukaan *anvil plate* dan konduktivitas termal *anvil plate* dari masing – masing variasi *anvil plate*. *Anvil plate* granit memiliki temperatur permukaan sebesar 167,37°C, Baja AISI 1010 113,18°C, dan Al-Si 100,88°C. Pengelasan dengan *anvil plate* Granit memiliki temperatur paling tinggi, hal ini disebabkan oleh material granit memiliki konduktivitas termal terendah yaitu 2,79 W/m³.K [7]. Material *anvil plate* yang memiliki konduktivitas termal rendah akan sulit

menghantarkan panas ke bagian yang lain atau sisi yang lain, sehingga panas terpusat pada satu titik dan akan berakibat pada peningkatan temperatur yang lebih maksimal pada titik tersebut.

Anvil plate baja AISI 1010 memiliki konduktivitas termal sedang yaitu 63,9 W/m³K [7]. Pengelasan dengan anvil plate baja AISI 1010 memiliki temperatur permukaan yang lebih rendah dibandingkan dengan pengelasan dengan anvil plate granit, karena material anvil plate pada baja AISI 1010 memiliki kemampuan sebagai konduktor yang lebih baik dibandingkan dengan granit, sehingga panas dari tool diserap oleh anvil plate dan disebarkan ke sisi lain dari anvil plate.

Al-Si memiliki konduktivitas termal paling tinggi yaitu 237 W/m³.K [7]. Pengelasan dengan anvil plate Al-Si memiliki temperatur permukaan paling rendah dibandingkan dengan anvil plate baja AISI 1010 dan Al-Si, karena panas lebih cepat tersebar ke anvil plate sehingga pendinginan cenderung terjadi lebih cepat. Perbedaan temperatur didapatkan karena perbedaan konduktivitas termal dari masing - masing material. Semakin rendah nilai konduktivitas termal maka semakin buruk kemampuan material untuk menghantarkan panas, dan semakin tinggi nilai konduktivitas termal maka semakin baik kemampuan material untuk menghantarkan panas [8]. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang telah dilakukan Zubaydi, dkk (2014) dimana penggunaan anvil plate dengan konduktivitas termal tinggi menyebabkan panas pengelasan lebih cepat hilang [9], [10],[11],[12].



Gambar 4. Temperatur Pengelasan FSSW

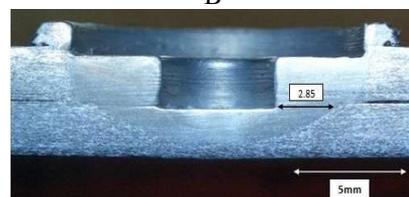
Gambar 5.A (Granit) menunjukkan luasan stir zone yang paling luas serta nugget paling besar karena temperatur las paling tinggi terpusat pada satu titik dan tidak cepat tersebar serta waktu pendinginan yang lebih lama. Gambar 5.B (baja AISI 1010) menunjukkan luasan stir zone dan nugget yang lebih kecil dibandingkan A, karena waktu pendinginan yang lebih cepat dari waktu pendinginan pengelasan A. Gambar 5.C (Al-Si) menunjukkan luasan stir zone dan nugget paling kecil karena temperatur las yang lebih rendah dan waktu pendinginan yang sangat cepat.



A



B



C

Gambar 5. Perbedaan Hasil Pengelasan dengan Variasi Anvil plate

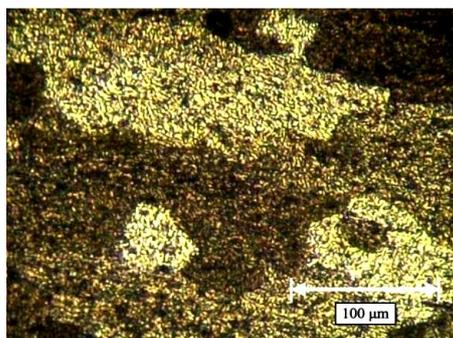
Tabel 1 menunjukkan data pengukuran luasan nugget dari hasil pengelasan FSSW dengan variasi anvil plate yang digunakan. Pengukuran luasan nugget pada pengelasan FSSW dipengaruhi oleh jenis anvil plate yang digunakan. Data menunjukkan anvil plate granit menghasilkan nugget terbesar (3,25 mm), diikuti baja AISI 1010 (3,13 mm), dan Al-Si dengan nugget terkecil (2,85 mm). Perbedaan ini disebabkan oleh sifat termal dan mekanik anvil plate yang memengaruhi distribusi panas dan deformasi selama pengelasan. Anvil granit yang memiliki konduktivitas termal rendah menahan panas lebih lama sehingga memperbesar nugget, sedangkan Al-Si cepat menyerap panas sehingga nugget lebih kecil [13].

Tabel 1. Pengukuran Luasan nugget

Anvil Plate	Ukuran Luasan (mm)
Granit	3.25
Baja AISI 1010	3.13
Al-Si	2.85

B. Struktur Mikro

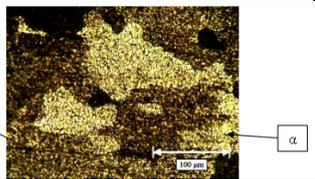
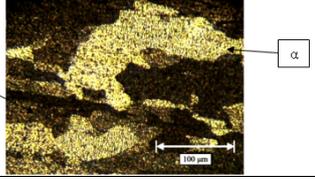
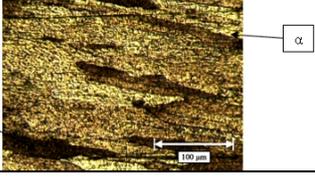
Struktur mikro base metal AA5052-H32 pada Gambar 6 menunjukkan butiran aluminium yang relatif besar dengan ukuran sekitar 40 μm, yang stabil dan homogen tanpa adanya deformasi atau rekristalisasi dinamis. Struktur ini terdiri dari butiran aluminium dengan dispersi fasa magnesium yang memberikan kekuatan dan ketahanan korosi khas paduan seri 5xxx [14]. Pada kondisi base metal, tidak terjadi perubahan mikrostruktur signifikan karena belum terkena siklus termal atau deformasi mekanis akibat proses pengelasan. Struktur mikro ini menjadi acuan untuk membandingkan perubahan yang terjadi pada zona stir dan zona pengaruh panas setelah FSSW, di mana terjadi penghalusan butir dan peningkatan kekerasan akibat rekristalisasi dinamis selama pengelasan [14].



Gambar 6. Struktur Mikro Daerah *Base Metal*

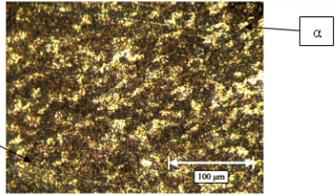
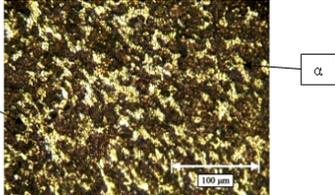
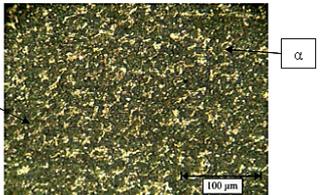
Struktur mikro pada daerah HAZ memiliki perbedaan yang signifikan pada bentuk dan ukuran butir jika dibandingkan dengan butir pada daerah BM. Daerah HAZ memiliki butir dengan bentuk kasar.

Tabel 2. Struktur Mikro HAZ

Anvil	Struktur Mikro
Granit	
AISI 1010	
Al-Si	

Tabel 2 menunjukkan struktur mikro hasil FSSW pada daerah HAZ AA5052-H32 menunjukkan perbedaan signifikan dibandingkan dengan *base metal*. Pada daerah HAZ, butiran cenderung lebih kasar dan bentuknya tidak homogen, berbeda dengan butiran pada base metal yang lebih halus dan stabil. Hal ini terjadi karena daerah HAZ mengalami pemanasan akibat proses pengelasan, namun tanpa deformasi plastis yang cukup untuk menyebabkan rekristalisasi, sehingga butiran di HAZ tetap kasar dan tidak mengalami penghalusan seperti pada *stir zone*. Struktur kasar ini juga berkontribusi pada penurunan kekerasan di HAZ dibandingkan dengan *stir zone* yang memiliki butiran halus hasil rekristalisasi dinamis. Studi dari jurnal internasional menunjukkan bahwa struktur mikro HAZ AA5052-H32 tidak jauh berbeda dengan *base metal* namun memiliki butiran yang lebih kasar dan bentuk yang terelongasi akibat pengaruh panas, yang berdampak pada sifat mekanik seperti kekerasan dan kekuatan tarik di zona tersebut [15].

Tabel 3. Struktur Mikro TMAZ

Anvil	Struktur Mikro
Granit	
AISI 1010	
Al-Si	

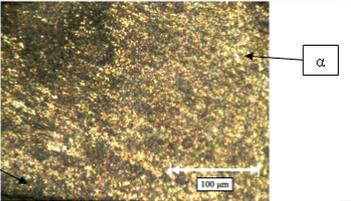
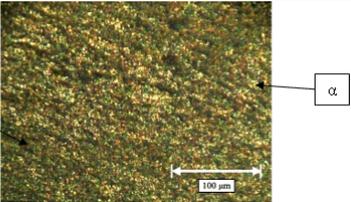
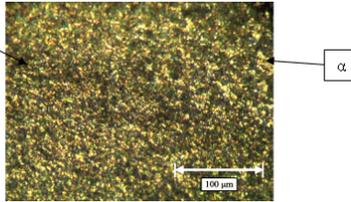
Tabel 3 menunjukkan struktur mikro pada daerah TMAZ hasil pengelasan FSSW AA5052-H32 ditandai oleh butiran dengan orientasi miring atau diagonal yang menunjukkan adanya beban mekanis dari kinerja *tool* selama proses pengelasan. Butiran di TMAZ memiliki arah yang seragam karena terbentuk menyesuaikan dengan arah aliran material yang diaduk, sehingga butiran di TMAZ sudah mengalami deformasi dan sebagian besar berorientasi mengikuti aliran material. Selain itu, variasi *anvil plate* dengan konduktivitas termal berbeda memengaruhi ukuran butir di zona pengelasan; semakin tinggi konduktivitas termal, maka butiran yang terbentuk semakin halus. Waktu pendinginan merupakan faktor utama dalam menentukan ukuran butir, di mana pendinginan yang cepat menghasilkan butiran halus, sedangkan pendinginan lambat menghasilkan butiran kasar. Dengan demikian, struktur mikro di TMAZ dipengaruhi oleh kombinasi deformasi mekanis dan kondisi termal selama proses FSSW [14], [15]

Tabel 4 Menunjukkan struktur mikro pada daerah *stir zone*. Struktur mikro pada SZ hasil pengelasan FSSW terhadap paduan AA5052-H32 menunjukkan butiran yang jauh lebih kecil dan lebih halus dibandingkan dengan daerah lain seperti BM maupun HAZ. Fenomena ini terjadi akibat adanya pencampuran intensif antara fasa α (aluminium) dengan unsur magnesium (Mg) selama proses pengelasan, yang menginduksi rekristalisasi dinamis dan menghasilkan mikrostruktur yang halus serta seragam di zona tersebut [14], [16].

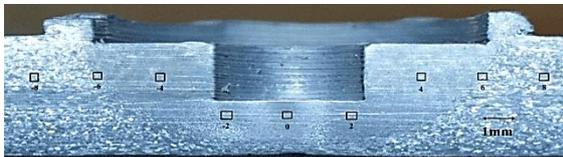
Ukuran butir di SZ secara umum jauh lebih kecil, dengan kisaran antara 4 hingga 11 μm , bergantung pada parameter proses seperti kecepatan putaran *tool* [17],[18]. Sebagai perbandingan, ukuran butir pada BM berkisar di angka 40 μm . Refinemen butir ini memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan kekerasan dan kekuatan mekanik lokal di area SZ

dibandingkan dengan zona lainnya [18]. Dari sisi tekstur kristal, SZ didominasi oleh orientasi yang menunjukkan komponen *simple shear*, yang merupakan indikasi dari deformasi plastis intensif akibat gesekan dan gerakan rotasi tool selama proses FSSW berlangsung [18].

Tabel 4. Struktur Mikro SZ

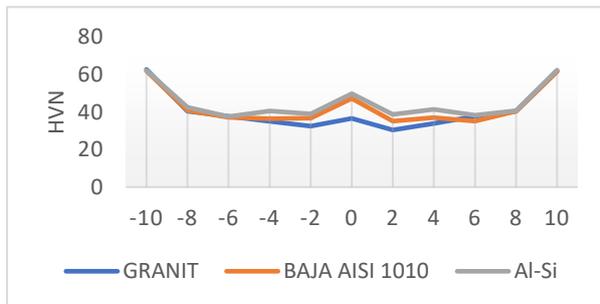
Anvil	Struktur Mikro
Granit	
AISI 1010	
Al-Si	

C. Kekerasan Micro Vickers



Gambar 7. Pemetaan titik Uji Vickers

Gambar 7 menunjukkan titik pengujian kekerasan *Micro Vickers* disusun pada sambungan las FSSW dari material aluminium AA 5052. Pengujian ini dilakukan untuk melihat seberapa besar perubahan kekerasan di bagian sambungan setelah proses pengelasan FSSW. Titik uji diberi jarak 2 mm antar titik, dimulai dari bagian *nugget*, TMAZ, HAZ, hingga akhirnya mencapai *base metal*.



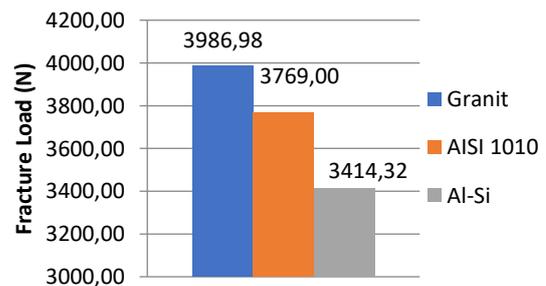
Gambar 8. Grafik Kekerasan Vickers

Gambar 8 menunjukkan bahwa variasi material anvil plate dengan konduktivitas termal berbeda secara signifikan memengaruhi kekerasan pada *nugget* selama

proses FSSW. Kekerasan tertinggi teramati pada pusat *stir zone*, yang disebabkan oleh deformasi plastis dan suhu tinggi sehingga terbentuk butir mikro halus yang meningkatkan kekerasan material. Penggunaan *anvil plate* granit dengan konduktivitas termal rendah menghasilkan suhu puncak pengelasan yang lebih tinggi, memicu pertumbuhan butir kasar dan menurunkan nilai kekerasan [19], [20]. Sebaliknya, *anvil plate* baja AISI 1010 dengan konduktivitas termal sedang dan *anvil plate* Al-Si dengan konduktivitas tinggi mempercepat laju pendinginan, menghasilkan struktur mikro butir halus dan peningkatan kekerasan [20]. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada *anvil plate* Al-Si, yang memiliki kemampuan pendinginan terbaik dan menghasilkan butir mikro dengan ukuran terkecil. Hubungan positif antara konduktivitas termal *anvil plate* dan peningkatan kekerasan konsisten dengan prinsip pengerasan butir (*Hall-Petch relationship*) [21]. Peningkatan konduktivitas termal *anvil plate* berkontribusi pada pembentukan struktur mikro halus dan peningkatan kekerasan pada zona pengelasan [22], [23].

D. Struktur Mikro

Pengujian tarik geser dilakukan pembebanan statis dengan beban sebesar 20 kN dan dengan kecepatan penarikan 5 mm/min. Gambar 9 menunjukkan hasil uji tarik geser berdasarkan dengan hasil pengelasan dari *anvil plate* yang memiliki konduktivitas termal berbeda. Pengelasan dengan *anvil plate* berkonduktivitas termal rendah memiliki beban tarik geser tertinggi. Sedangkan dengan *anvil plate* berkonduktivitas termal medium beban tarik geser yang semakin turun dan dengan *anvil plate* berkonduktivitas termal tertinggi beban tarik geser menjadi paling rendah. Beban tarik geser dipengaruhi oleh ukuran *nugget* dimana temperatur pengelasan yang tinggi menjadikan *nugget* semakin besar [22]. Kecepatan pendinginan pasca pengelasan dimana *anvil plate* dengan konduktivitas termal rendah memiliki temperatur puncak las tertinggi dan proses pendinginan paling lama, sehingga pembentukan *nugget* menjadi lebih baik [24]. Seiring dengan meningkatnya konduktivitas termal *anvil plate*, temperatur puncak pengelasan semakin menurun dan pendinginan pengelasan menjadi semakin cepat sehingga pembentukan *nugget* sambungan las semakin kecil namun dengan kerasan yang semakin meningkat [25], [26], [27], [28].

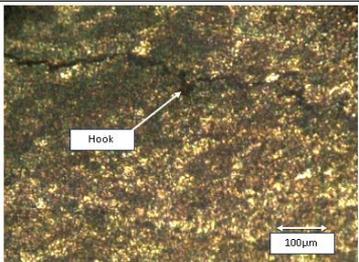


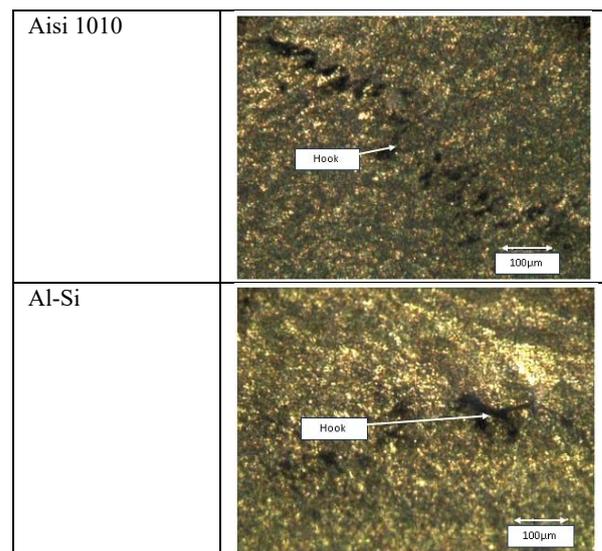
Gambar 9. Grafik Beban Tarik Geser

Pada pengelasan menggunakan *anvil plate* dengan konduktivitas termal rendah, seperti granit, struktur *hook* terdeteksi pada zona termomekanik (TMAZ) dengan lebar yang lebih kecil dan kerapatan yang tinggi. Karakteristik ini berkontribusi pada ketahanan sambungan terhadap beban tarik geser, di mana nugget tidak mengalami kerusakan. Hal ini disebabkan oleh temperatur puncak pengelasan yang tinggi, yang memungkinkan proses difusi material lebih optimal dan menghasilkan ikatan antar material yang lebih kuat. Sebaliknya, pada pengelasan dengan *anvil plate* yang memiliki konduktivitas termal sedang, seperti baja AISI 1010, struktur *hook* teramati secara mikro pada zona las utama (SZ). Posisi dan bentuk *hook* pada daerah ini mengakibatkan terjadinya kegagalan sambungan di area nugget ketika diberi beban tarik geser, menunjukkan bahwa morfologi dan lokasi *hook* berpengaruh signifikan terhadap integritas mekanik sambungan las.

Struktur *hook* pada sambungan hasil pengelasan menggunakan *anvil plate* dengan konduktivitas termal terendah, yaitu granit, terdeteksi pada zona termomekanik TMAZ. *Hook* yang terbentuk memiliki celah yang lebih kecil dan rapat, yang mendukung integritas struktural sambungan. Saat diuji dengan metode tarik geser, nugget tidak mengalami kerusakan, yang mengindikasikan kualitas ikatan yang baik. Hal ini disebabkan oleh temperatur puncak pengelasan yang tinggi ketika menggunakan granit, yang memungkinkan pembentukan mikrostruktur yang lebih stabil. Sebaliknya, pada pengelasan dengan *anvil plate* yang memiliki konduktivitas termal sedang, seperti baja AISI 1010, struktur *hook* teramati secara mikro pada zona adukan SZ. Keberadaan *hook* pada SZ ini berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan sambungan pada area nugget saat diuji tarik geser. Adapun pada *anvil plate* dengan konduktivitas termal tertinggi, yakni paduan Al-Si, struktur *hook* juga teridentifikasi pada zona SZ, namun dengan celah yang lebih kecil dibandingkan dengan *hook* yang terbentuk pada pengelasan menggunakan AISI 1010. Perbedaan ini menunjukkan bahwa nilai konduktivitas termal *anvil plate* tidak hanya mempengaruhi distribusi panas selama pengelasan, tetapi juga berperan penting dalam menentukan morfologi dan lokasi *hook*, yang pada akhirnya berdampak pada performa mekanik sambungan las.

Tabel 5. Struktur Hooke

Variasi	Struktur Hook
Granit	



Tabel 5 menunjukkan gambar hasil uji mikro terhadap keberadaan *hook* atau *join line remnant* pada hasil pengelasan FSSW dengan variasi *anvil plate*. Berdasarkan hasil pengamatan mikrograf pada gambar tersebut, terlihat adanya variasi morfologi *hook* atau *joint line remnant* pada pengelasan FSSW dengan *anvil plate* yang berbeda. Pada hasil pengelasan FSSW dengan *anvil plate* granit, *hook* tampak terbentuk dengan kontur yang relatif halus dan tidak terlalu menonjol, menandakan proses deformasi yang terjadi cukup stabil. Pada hasil FSSW dengan *anvil plate* baja AISI 1010 menunjukkan *hook* dengan kontur yang lebih kasar dan tidak beraturan, mengindikasikan adanya variasi tekanan atau suhu selama proses pengelasan. Sementara itu, pada hasil FSSW dengan *anvil plate* Al-Si, *hook* tampak lebih dalam dan menonjol, memperlihatkan adanya penetrasi material yang lebih signifikan akibat pengaruh *anvil plate* yang digunakan. Perbedaan karakteristik *hook* ini mencerminkan pengaruh material *anvil plate* terhadap distribusi panas, deformasi plastik, dan mekanisme pembentukan sambungan pada proses FSSW [29].

Fenomena terbentuknya *hook* atau *joint line remnant* (JLR) dalam proses FSSW pada aluminium merupakan akibat pergerakan material yang tidak sempurna selama proses pengelasan, sehingga menyebabkan terperangkapnya lapisan oksida di sepanjang garis sambungan [14]. Hal ini dapat mengurangi kualitas sambungan dan mempengaruhi kekuatan mekanik sambungan lasan. Selain itu, pengendalian parameter proses, seperti kecepatan putar dan waktu penahanan, sangat penting untuk meminimalkan pembentukan *hook* [16].

4. KESIMPULAN

Variasi *anvil plate* pada proses FSSW mengakibatkan penurunan temperatur puncak pengelasan, dengan *anvil plate* granit menghasilkan temperatur tertinggi dan Al-Si terendah. Nilai beban tarik geser cenderung menurun seiring meningkatnya konduktivitas termal *anvil plate*, di mana granit memberikan beban tertinggi dan Al-Si terendah. Kekerasan Vickers di pusat *nugget* justru meningkat

dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi, mencapai nilai maksimum pada Al-Si. Ukuran butir mikrostruktur mengecil seiring peningkatan konduktivitas termal *anvil plate*, menunjukkan pengaruh signifikan terhadap sifat mikro dan mekanik sambungan FSSW. Selain itu, pembentukan *hook* atau *joint line remnant* lebih banyak ditemukan pada *anvil plate* dengan konduktivitas termal tinggi, akibat proses pendinginan yang cepat dan aliran material yang tidak merata, yang berpotensi mengurangi kekuatan dan integritas sambungan las secara lokal.

5. Saran

Penelitian selanjutnya dapat fokus pada karakterisasi mikrostruktur tiga dimensi untuk memahami pembentukan cacat internal seperti *hook* dan *joint line remnant*. Selain itu, simulasi numerik distribusi temperatur dan aliran material selama proses FSSW dengan variasi *anvil plate* perlu dilakukan. Evaluasi parameter proses tambahan seperti kecepatan putar dan waktu penahanan juga penting untuk mengoptimalkan kualitas sambungan. Eksplorasi material *anvil plate* dengan konduktivitas termal menengah atau terkontrol serta modifikasi desain *anvil plate* untuk mengatur laju pendinginan dapat meningkatkan performa sambungan. Pengujian ketahanan sambungan terhadap kelelahan dan korosi perlu dilakukan untuk menilai kinerja jangka panjang pada aplikasi nyata.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian ini. Terutama kepada Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY) dan Laboratorium Manufaktur Teknik Mesin ITNY yang telah menyediakan fasilitas dan sumber daya yang memadai. Kami juga berterima kasih kepada rekan-rekan yang telah memberikan masukan, serta semangat sehingga penelitian tentang peran *anvil plate* terhadap sifat mekanik sambungan *Friction Stir Spot Welding* AA5052 dapat terselesaikan dengan baik.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Awang, V. H. Mucino, Z. Feng, and S. A. David, "Thermo-Mechanical Modeling of Friction Stir Spot Welding (FSSW) Process: Use of an Explicit Adaptive Meshing Scheme Downloaded from SAE International by Univ of Nottingham-Kings Meadow Campus," 2005.
- [2] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," Aug. 31, 2005.
- [3] S. O. Dahi, A. A. A. Al-Shawk, and H. Al-Gburi, "Effect of Friction Stir Spot Welding with a Rotating Anvil on the Microstructure of Aluminum AA6061-T4 Alloy," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 11, no. 3, pp. 721–726, Mar. 2024.
- [4] "Test Method for Microindentation Hardness of Materials," Jun. 01, 2017, *ASTM International*, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/E0384-17.
- [5] N. Muhayat *et al.*, "Friction stir welded aa5052-h32 under dissimilar pin profile and preheat temperature: Microstructural observations and mechanical properties," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 1, Jan. 2022.
- [6] R. Belnap *et al.*, "Evaluating the Influence of Tool Material on the Performance of Refill Friction Stir Spot Welds in AA2029," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 8, no. 3, Jun. 2024.
- [7] Incropera, *Fundamental of Heat and Mass Transfer*. 2007.
- [8] Yunus A. Chengels and Afshin J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer*. 2011.
- [9] A. Zubaydi *et al.*, "Effect of backplate thermal diffusivity on mechanical properties of double sided friction stir welded aluminum for ship structure," in *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, 2014, pp. 219–222.
- [10] Z. Zhang, W. Li, J. Shen, Y. J. Chao, J. Li, and Y. E. Ma, "Effect of backplate diffusivity on microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints," *Mater Des*, vol. 50, pp. 551–557, 2013.
- [11] D. Vijayan and V. S. Rao, "Friction Stir Welding of Age-Hardenable Aluminum Alloys: A Parametric Approach Using RSM Based GRA Coupled With PCA," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 95, no. 2, pp. 127–141, Apr. 2014.
- [12] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, and B. Zou, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy," *Mater Des*, vol. 32, no. 8–9, pp. 4461–4470, Sep. 2011.
- [13] H. Ardianto, T. Dirgantara, and S. Abstrak, "Efek Friction Stir Spot Welding Dalam Pemasangan Rivet Terhadap Sifat Mekanik Material Aluminium Seri 2024," 2021.
- [14] M. M. Z. Ahmed, M. M. El-Sayed Seleman, I. Albaijan, and A. Abd El-Aty, "Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of Friction Stir Spot-Welded AA5052-H32: Influence of Tool Rotation Rate," *Materials*, vol. 16, no. 9, May 2023.
- [15] Filbert Manggala Sulianto, Sulardjaka, and Norman Iskandar, "Analisis Nilai Kekerasan Dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Friction Stir Welding Sambungan T-Joint Aluminium 5052-H32 Dan Aluminium 7075-T651," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. Vol. 12, No. 2, 2024, Accessed: Jun. 07, 2025.

- [16] M. M. Z. Ahmed *et al.*, “Friction Stir-Spot Welding of AA5052-H32 Alloy Sheets: Effects of Dwell Time on Mechanical Properties and Microstructural Evolution,” *Materials*, vol. 16, no. 7, Apr. 2023.
- [17] G. A. Roegen, S. G. Yousefi, R. Emadi, M. Shooshtari, and S. Lotfian, “Remanufacturing the aa5052 gtaw welds using friction stir processing,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 5, May 2021.
- [18] T. Baudin, S. Bozzi, F. Brisset, and H. Azzeddine, “Local Microstructure and Texture Development during Friction Stir Spot of 5182 Aluminum Alloy,” *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023.
- [19] A. G. Wiedenhof, H. J. de Amorim, T. de Souza Rosendo, M. A. Durlo Tier, and A. Reguly, “Effect of heat input on the mechanical behaviour of Al-Cu FSW lap joints,” *Materials Research*, vol. 21, no. 4, 2018.
- [20] F. Martins *et al.*, “Effect of Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of uns C19400 Alloy Plates,” *Materials Research*, vol. 26, 2023.
- [21] S. Señorís-Puentes, R. F. Serrano, G. González-Doncel, J. H. Hattel, and O. V. Mishin, “Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6061/AA6061 + 40 vol% SiC plates,” *Metals (Basel)*, vol. 11, no. 2, pp. 1–11, Jan. 2021.
- [22] S. Park, Y. Joo, and M. Kang, “Effect of backing plate materials in micro-friction stir butt welding of dissimilar aa6061-t6 and aa5052-h32 aluminum alloys,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–9, Jul. 2020.
- [23] T. Baudin, S. Bozzi, F. Brisset, and H. Azzeddine, “Local Microstructure and Texture Development during Friction Stir Spot of 5182 Aluminum Alloy,” *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 3, Mar. 2023.
- [24] D. G. Mohan and S. Gopi, “Influence of In-situ induction heated friction stir welding on tensile, microhardness, corrosion resistance and microstructural properties of martensitic steel,” *Engineering Research Express*, vol. 3, no. 2, Jun. 2021.
- [25] H. Y. Huang, I. C. Kuo, and C. W. Zhang, “Friction-stir welding of aluminum alloy with an iron-based metal as reinforcing material,” *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 25, no. 1, pp. 123–131, Jan. 2018.
- [26] S. S. Baghel and P. K. Soni, “An experimental study of friction stir welding parameters effect on joint properties of aluminium alloy and copper plate,” *Mater Res Express*, vol. 10, no. 1, Jan. 2023.
- [27] W. H. Khalafe, E. L. Sheng, M. R. Bin Isa, A. B. Omran, and S. Bin Shamsudin, “The Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Weldability of Aluminum Alloys with Similar and Dissimilar Metals: Review,” Dec. 01, 2022, *MDPI*.
- [28] A. Kar, S. Mathiyalagan, S. Malopheyev, R. Kaibyshev, S. Suwas, and S. V. Kailas, “Investigation on Friction Stir Welding Parameters: Mechanical Properties, Correlations and Corrosion Behaviors of Aluminum/Titanium Dissimilar Welds,” *Crystals (Basel)*, vol. 14, no. 4, Apr. 2024.
- [29] K. Chen, “Advanced Friction Stir Spot Welding of Aluminum Alloy to Transformation Induced Plasticity Steel,” 2019.