

Pengaruh *Feed Rate* dan Kecepatan Putar *Pin Tool Friction Stir Welding (FSW)* terhadap Kekuatan Tarik dan Kekerasan Aluminium 5052

(Effect of Feed Rate and Speed of Rotating Pin Tool Friction Stir Welding (FSW) with Tensile Strength and Hardness Aluminum 5052)

Muhammad Budi Nur Rahman^a, Aris Widy Nugroho^b, Bayu Satriya Wardhana^c

^{a,b}Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
Jl. Brawijaya, Tamantirto, Kasihan Bantul, Yogyakarta, Indonesia, 55183
Telephone (0274) 387656/ fax (0274) 387646
e-mail: nurrahman_ummy@yahoo.co.id^a / budinurrahman@umy.ac.id

^cJurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya
Jl. Veteran, Ketawanggede, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145
e-mail: wardhanabayu@ub.ac.id^c

Abstrak

Friction Stir Welding (FSW) adalah proses pengelasan yang memanfaatkan alat bundar yang menimpa dua potong pelat yang akan disambung. Hasil pengelasan dipengaruhi oleh input panas yang dihasilkan antara alat pin dan bahan las. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh laju umpan dan rotasi alat pin FSW terhadap sifat mekanik Aluminium 5052. Lembaran logam dihubungkan dengan metode FSW dengan variasi laju umpan 20, 60, 120, 180 mm/menit dan rotasi pin *tool* 1500, 2500, 360 rpm menggunakan *holder cylinder tool pin* dengan panjang 22mm dan 4mm. Pengujian mekanis yang dilakukan adalah uji tarik, uji kekerasan Vickers mikro dan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin cepat laju umpan, kekuatan tarik semakin rendah, tetapi regangan tarik meningkat. Pada laju umpan 600 mm/menit, kekuatan tarik diperoleh 187 MPa dengan regangan 12,4% dan laju umpan 180 mm/menit kuat tarik 103 MPa dengan regangan 3,17%. Rotasi lebih cepat dari alat pin, kekuatan tarik meningkat, koneksi solid dan menyatu, dan pada 1500 rpm kekuatan tarik dari 112 MPa menjadi 207 MPa pada 3600 rpm. Semakin besar laju umpan dan rotasi alat pin, nilai kekerasan meningkat di mana tingkat umpan 20 mm/menit kekerasan 44,8 VHN menjadi 86,4 VHN pada laju umpan 120 mm/menit, sedangkan alat putaran pin 1500 Kekerasan rpm 51,3 VHN menjadi 69,6 VHN pada 3.600 rpm.

Kata Kunci: *Friction Stir Welding*, laju umpan, alat putaran pin, kuat tarik, kekerasan Vickers

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) is a welding process that utilizes a round tool that impinges on the two pieces of plates that will be spliced. Welding results are influenced by heat input which is generated between the pin tool with the material of the weld. The purpose of the research was to determine the influence of feed rate and rotation of the pin tool of the FSW on mechanical properties of Aluminum 5052. Metal Sheet connected with the method of the FSW with the variation of the feed rate 20, 60, 120, 180 mm/minute and rotation of the pin tool 1500, 2500, 360 rpm using the holder cylinder 22mm long pin tool 4mm. Mechanical testing carried out are tensile test, hardness test micro Vickers and microstructure observation using optical microscope and SEM. The results showed that the faster the feed rate then the tensile strength more low however, the tensile strain increased. At feed rate of 600 mm/minute tensile strength obtained 187 MPa with a strain of 12.4% and a feed rate of 180 mm/minute tensile strength of 103 MPa with a strain of 3.17%. The Faster rotation of the pin tool, the tensile strength increases, the connection is solid and fused, where at 1500 rpm tensile strength

of 112 MPa to 207 MPa at 3600 rpm. The greater the feed rate and rotation of the pin tool then the value of hardness is increasing where the feed rate of 20 mm/minute hardness by 44.8 VHN to 86.4 VHN at a feed rate of 120 mm/minute, while the round pin tool 1500 rpm hardness of 51.3 VHN become 69,6 VHN at 3600 rpm.

Keywords: Friction Stir Welding, Feed rate, Pin Tool Rotation, Tensile strength, Vickers hardness

1. PENDAHULUAN

Aluminium dikenal memiliki sifat lunak, mudah dibentuk, ditempa, tahan korosi, ringan, dan konduktor listrik terbaik sehingga banyak digunakan pada pipa hidrolik, bagian-bagian dalam kendaraan, perkapalan, bidang kedirgantaraan, dan lain-lain. Jika dilihat dari fungsi atau kegunaan, aluminium sangat banyak digunakan oleh masyarakat tetapi yang menjadi kendala adalah proses pengelasan atau penyambungan aluminium sangat sulit dan jarang ditemukan. Pada umumnya, penyambungan aluminium menggunakan metode *rivet* dan las TIG. Kedua penyambungan ini sangat terbatas jika dilihat dari beberapa aspek misal penyambungan *rivet* hasilnya akan menambah tebal, menggunakan bahan tambah dan ada juga bahan yang terbuang dari sisa pengeboran. Jika dilihat dari teknologi yang sedang dikembangkan, hal tersebut tidak efektif. Salah satu alternatif untuk penyambungan aluminium adalah dengan menggunakan *friction stir welding* (FSW). FSW merupakan salah satu metode pengelasan dengan memanfaatkan gaya gesek *tool pin* terhadap material dan tanpa adanya penggunaan logam pengisi (*filler material*). Penelitian teknologi tentang pengelasan *friction stir welding* masih terus dikembangkan baik secara sifat-sifat material, bentuk dari *pin tool*, kecepatan putar *tool*, maupun *feed rate* yang digunakan.

Pengamatan struktur mikro hasil pengelasan FSW pada aluminium AA 1100 diketahui terdapat cacat *wormholes* dan celah pada putaran 780 rpm maupun 980 rpm karena kurangnya penetrasi dan menimbulkan konsentrasi tegangan pada hasil pengelasan [1]. Pengelasan FSW pada aluminium 5083 antara satu sisi dengan dua sisi mendapatkan hasil yang sangat berbeda. Nilai kekuatan tarik, kekerasan, dan struktur mikro pada pengelasan dua sisi mendapatkan hasil lebih baik. Pada pengelasan dua sisi, juga tidak menimbulkan cacat dalam, cacat permukaan, atau cacat terbuka, tetapi membutuhkan waktu, daya, dan usaha yang lebih banyak daripada pengelasan satu sisi [2]. Berdasarkan uraian di atas, pengkajian terhadap FSW masih sangat luas cakupannya. Banyak pengetahuan yang masih bisa digali untuk menjelaskan FSW yang beragam, baik dari kecepatan putar *tool*, *feed rate* maupun jenis *tool* yang digunakan. Untuk itu, penelitian tentang kecepatan putaran *tool* pada FSW ini dilakukan dengan harapan dapat memberikan informasi baru tentang FSW dengan variasi kecepatan putaran *tool*.

Aluminium seri 5052 adalah paduan antara aluminium dan magnesium (Al-Mg) termasuk paduan *non-heat treatable* (tidak terpengaruh perlakuan panas), tetapi memiliki sifat mampu las yang baik dan memiliki daya tahan korosi yang baik terutama pada lingkungan air laut. Paduan Al-Mg banyak digunakan dalam peralatan rumah tangga, konstruksi, struktur rangka kendaraan, tangki-tangki penyimpanan bahan *cryogenic*, dan kapal laut.

Penelitian tentang pengaruh *feed rate* terhadap sifat mekanik pada FSW pada aluminium 6110 dengan variasi kecepatan pengelasan 40 mm/menit, 64 mm/menit, 93 mm/menit, 200 mm/menit, dan 320 mm/menit pada putaran *tool* 3600 rpm diperoleh kekuatan tarik dan regangan dari hasil pengelasan jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan logam induknya. Pada *feed rate* 320 mm/menit, diperoleh nilai tegangan dan regangan yang paling baik sebesar 8,89 kg/mm² dan 2.17%, sedangkan tegangan terendah diperoleh pada *feed rate* 64 mm/menit sebesar 5,75 kg/mm² dan nilai regangan terendah pada *feed rate* 200 mm/menit sebesar 1,02%. Peningkatan *feed rate* juga menurunkan nilai kekerasan yang banyak pada daerah logam las, HAZ, dan logam induk jika dibandingkan *base metal*-nya, tetapi pada *feed rate* 320 mm/menit terjadi penyempitan daerah pengelasan dengan nilai kekerasan pada *raw material* sebesar ± 55 VHN dan nilai kekerasan pada *stir zone* sebesar ± 37.5 VHN [3].

Nilai kekerasan tergantung pada daerah yang terkena titik indentasi pada saat pengukuran. Akan tetapi, nilai kekerasan pada daerah las lebih homogen yaitu mempunyai *range* nilai antara 50-65 VHN pada pengelasan aluminium seri 6063 T6 dengan *feed rate* 12,5; 25; 50 mm/menit. Hal tersebut disebabkan oleh bentuk struktur mikro yang lebih homogen dibandingkan logam induk [4].

Hasil penelitian proses FSW aluminium 5052 terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impact meningkat dengan putaran rendah dan *feed rate* tinggi, tetapi menurunkan kekuatan tarik. Pada putaran *tool* 1100 rpm dan *feed rate* 19,8 mm/mnt, nilai kekerasan tertinggi sebesar 62,36 dan ketangguhan impact 0,157 J/mm². Pada putaran 1800 rpm dan *feed rate* 11,4 mm/mnt, nilai kekerasan terendah sebesar 49 dan ketangguhan impact 0,148 J/mm². Nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada putaran *tool* 1800 rpm dan *feed rate* 11,4 mm/mnt dengan nilai rata-rata sebesar 5,3 kg/mm², sedangkan nilai terendahnya terjadi pada kecepatan *tool* 1100 rpm dengan kecepatan pengelasan 19,8 mm/mnt mencapai nilai rata-rata sebesar 2 kg/mm² [5].

Berdasarkan uraian tersebut, pengkajian terhadap FSW dalam proses pengelasan di dunia industri masih sangat luas. Penelitian FSW menggunakan kecepatan *feed rate* masih sangat jarang, ditambah lagi dengan metode pengelasan, kekerasan *tool*, bahan yang digunakan, kecepatan putar, dan sebagainya. Untuk itulah, penelitian tentang pengaruh kecepatan *feed rate* dan kecepatan putaran *pin tool* terhadap kekuatan mekanik dengan FSW pada aluminium 5052 ini dilakukan dengan harapan dapat memberikan informasi tentang kekuatan tarik, tingkat kekerasan, dan struktur mikro.

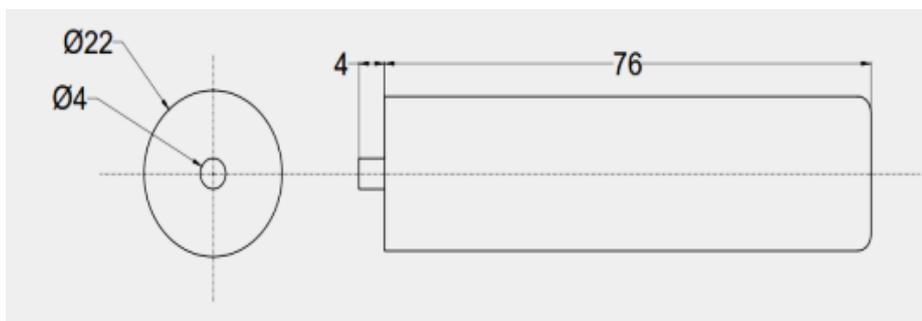
2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan untuk penelitian adalah aluminium 5052 yang memiliki komposisi kimia seperti pada Tabel 2.1. Pelat dengan tebal 5 mm dipotong dengan ukuran panjang 160 mm, lebar 55 mm.

Table 2.1. komposisi kimia paduan aluminium yang digunakan (% berat)

Unsur	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
Komposisi standar Al 5052	95,7–97,7	0,15 -0,35	Max 0,1	Max 0,4	2,2 -2,8	Max 0,1	Max 0,25	Max 0,1
Komposisi Hasil Uji	95.32	2.14	0.163	0.342	1.51	0.03	0.112	0.103



Gambar 2.1. Desain tool

Holder pin tool terbuat dari besi pejal dengan diameter 22 mm, panjang pin 4 mm, dan diameter 4 mm. Setelah *holder pin tool* selesai dibentuk dengan mesin bubut, dikeraskan (*hardening*) dengan *quenching*. Bentuk *holder pin tool* yang dibentuk sesuai dengan Gambar 2.1.

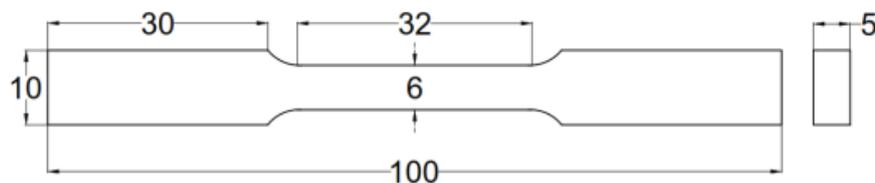
2.2 Proses Pengelasan

Proses pengelasan FSW menggunakan mesin *milling*. Variabel proses pengelasan FSW adalah variasi *feed rate* dan kecepatan putaran *holder pin tool*. Variasi *feed rate* yang digunakan adalah 20 mm/menit, 60 mm/menit, 120 mm/menit, dan 180 mm/menit pada putaran *pin tool* 3600 rpm. Variasi kecepatan putar pin tool adalah 950 rpm, 1500 rpm, 2500 rpm, dan 3600 rpm dengan *feed rate* 60 mm/menit.

2.3 Proses Pengujian

Karakterisasi hasil pengelasan FSW dilakukan dengan pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik dan SEM. Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui zona-zona yang terbentuk logam induk, Heat Affected Zone (HAZ), thermo mechanically affected zone (TMAZ), dan nugget zone (NZ) dari batas-batas zona tersebut.

Pengamatan juga dilakukan terhadap sifat mekanik hasil lasan seperti kekerasan dan kekuatan tarik. Pengujian tarik menggunakan standart ASTM E8/E8M-09 (*Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric)*) dan membentuk spesimen uji tarik seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Spesimen uji tarik

Dalam pengujian tarik, spesimen uji dibebani dengan kenaikan beban sedikit demi sedikit hingga spesimen uji tersebut patah, kemudian sifat-sifat tarik dihitung dengan persamaan:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

Dengan: σ = tegangan (kgf/mm^2), F = beban (kgf), A_0 = luas mula dari penampang batang uji (mm^2); ϵ = regangan, L_0 = panjang mula dari batang uji (mm), L = panjang batang uji yang dibebani (mm)

Pengujian kekerasan dilakukan dengan metode mikro *vicker* di zona lasan dengan beban 50 gf. Posisi pengambilan titik uji kekerasan sepanjang 3 cm di kiri dan kanan daerah *weld nugget* pada bagian samping dengan jarak 0.3 mm, sehingga terdapat 21 titik. Angka *hardness vickers* (HV) didefinisikan sebagai hasil bagi (koefisien) dari beban uji (F) dengan luas permukaan bekas luka tekan (injakan) dari indenter (diagonalnya) (A) yang dikalikan dengan $\sin(136^\circ/2)$. Rumus untuk menentukan besarnya nilai kekerasan dengan metode vickers yaitu:

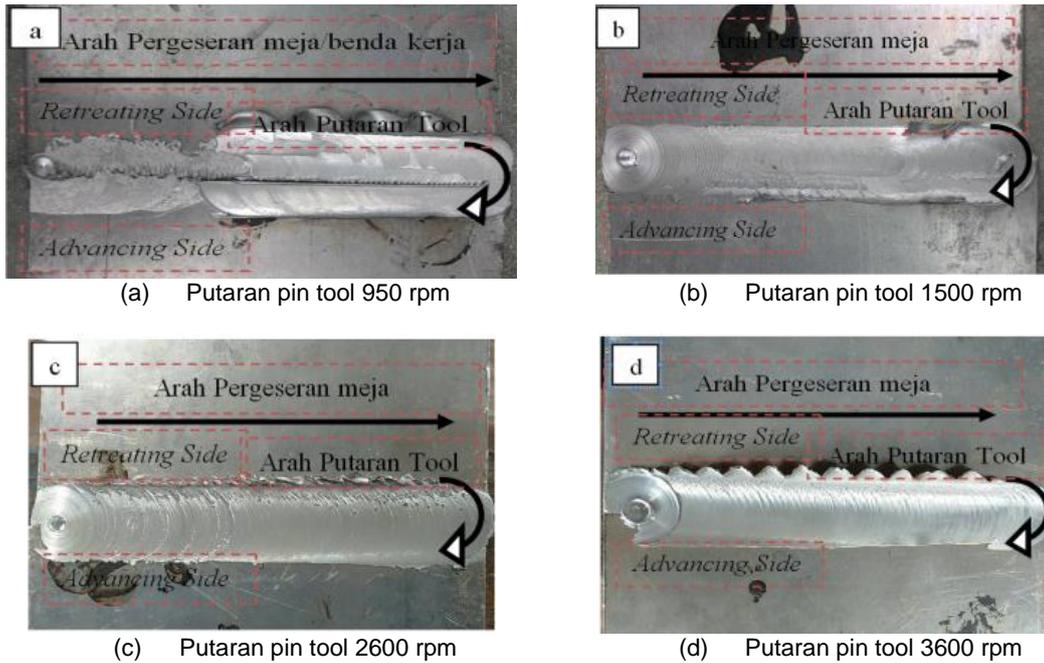
$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad (3)$$

Dengan : HV = Angka kekerasan Vickers (kgf/mm^2), F = Beban (kgf), d = diagonal (mm).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengelasan

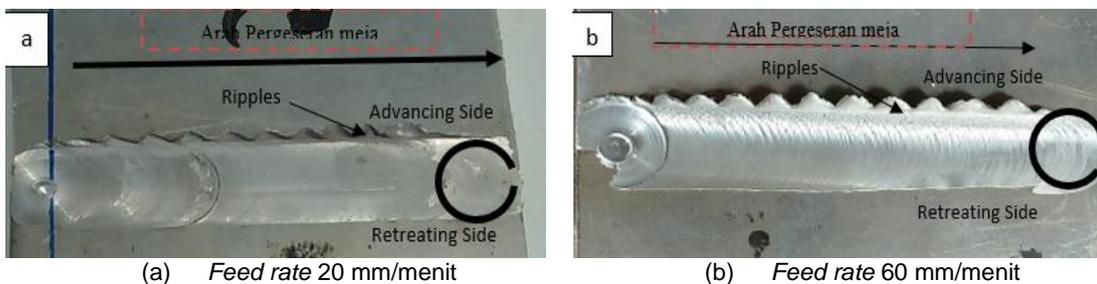
FSW merupakan pengelasan yang terjadi akibat gesekan antara *holder* dengan material yang disambung tanpa menambah bahan tambah. Gesekan menyebabkan panas yang mampu melelehkan material dan putaran *holder* juga berfungsi untuk mengaduk material dan akhirnya tersambung menjadi satu. Hasil FSW dengan variasi putaran *pin tool* dapat dilihat pada Gambar 3.1.

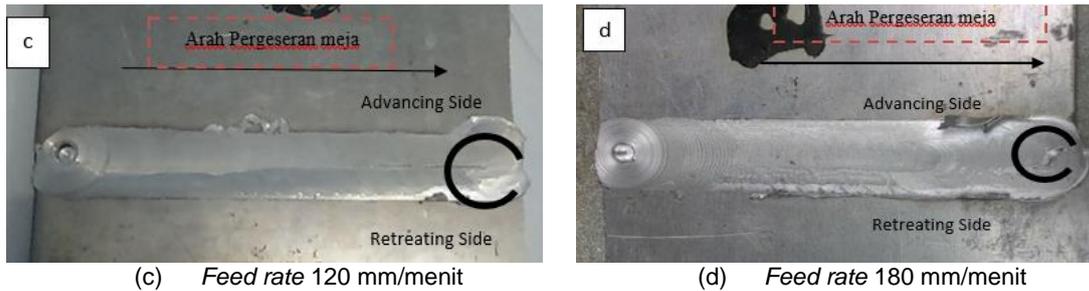


Gambar 3.1 Hasil friction stir welding aluminium 5052 dengan variasi putaran

Pada putaran rendah/950 rpm (Gambar 3.1a) terlihat jelas bahwa pelat tidak tersambung dengan baik, hal ini disebabkan oleh kecepatan putar *pin tool* yang rendah sehingga tidak dapat menghasilkan panas yang cukup untuk mencapai titik termoplastis aluminium yang mampu menyambungkan material. Pengelasan dengan putaran *pin tool* lebih tinggi dihasilkan sambungan yang menyatu dan solid, namun pada bagian permukaan tidak halus dan terjadi *ripples* di sisi alur gerak *pin tool*. Gambar 3.1.d adalah hasil FSW yang terbaik dengan kecepatan putaran *pin tool* 3600 rpm yang terlihat halus, rapih dan tidak terlihat cacat pada permukaannya. Semakin cepat putaran tool maka hasil pengelasan akan semakin menyatu dan solid. Foto makro memperlihatkan daerah yang dilalui oleh *pin tool* tercampur dengan dengan baik antara bagian *advancing* dengan *retreating* walau masih terdapat cacat las yang terlihat seperti lubang pada setiap variasi tool, hasil pengelasan yang cukup baik terdapat pada putaran *pin tool* 3600 rpm dengan campuran logam yang solid.

Profil permukaan hasil FSW dengan variasi *feed rate* 20 mm/menit ditunjukkan pada Gambar 3.2.a menunjukkan permukaan lasannya lebih kasar karena panas berlebih akibat kecepatan *feed rate* terlalu pelan. Pada *feed rate* rendah, *pin tool* menggesek pelat aluminium dalam waktu lama sehingga melelehkan aluminium yang akan disambung. Gambar 3.2.b-d sambungan las tersambung lebih baik. Walaupun terdapat *ripples* karena *pin tool* terlalu dalam menggesek pelat pada proses pengelasan.





Gambar 3.2 Hasil friction stir welding Aluminium 5052 dengan variasi feed rate

3.2 Pengamatan Struktur Makro dan Mikro

Putaran *pin tool* dan *feed rate* sangat berperan penting dalam proses pengelasan FSW. Panas yang digunakan untuk melelehkan material lasan dihasilkan dari faktor tersebut. Putaran yang cepat dengan *feed rate* rendah akan menghasilkan panas yang berlebih akan menyebabkan pelunakan pada material. Putaran rendah dengan *feed rate* tinggi akan menyebabkan panas yang dihasilkan menjadi kurang. Akibatnya, pelunakan material tidak dapat melunak sepenuhnya sehingga tidak bisa menyambung dengan baik. Proses pelunakan sangat penting dalam pengelasan FSW karena jika material tidak melunak, pin yang berfungsi sebagai penggesek dan pengaduk material tidak akan bisa melunakkan material dengan seragam.

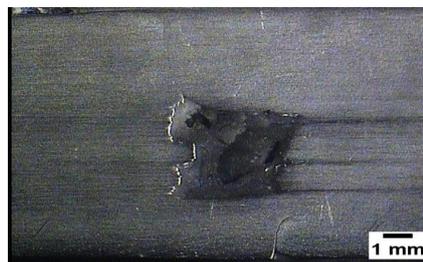
Gambar 3.3. a,d, f, dan g memperlihatkan pada hasil lasan terdapat cacat berupa *incomplete fusion* yang terjadi di sepanjang alur pengelasan. Cacat *incomplete fusion* terjadi pada semua hasil lasan dengan cacat terbesar pada penggunaan feed rate 20 mm/menit. *Incomplete fusion* adalah cacat berupa tidak menyatukan material yang dilas karena panas yang kurang sehingga tidak menempel atau terhalang oleh terak.



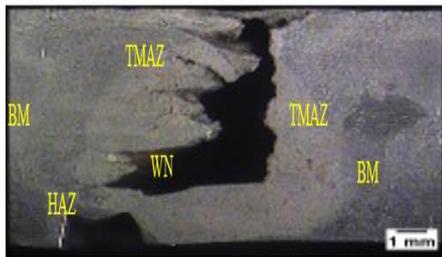
(a) Putaran pin tool 1500 rpm



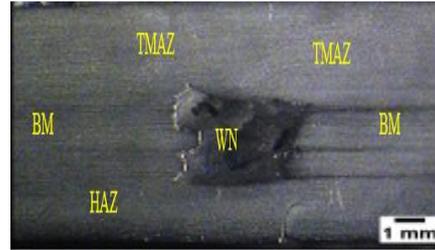
(b) Putaran pin tool 2500 rpm



(c) Putaran pin tool 3600 rpm



(d) Feed rate 20 mm/menit



(e) Feed rate 60 mm/menit



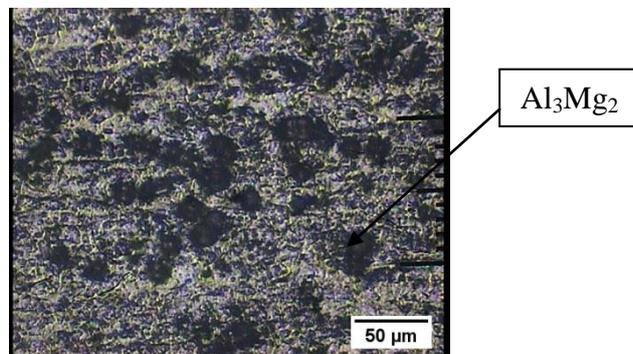
(f) Feed rate 120 mm/menit



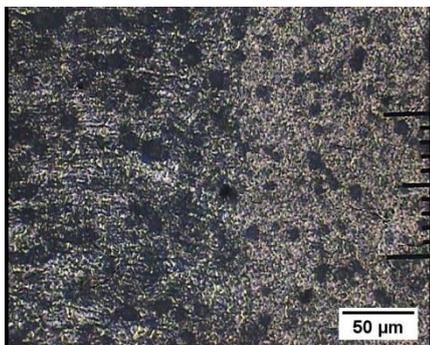
(g) Feed rate 180 mm/menit

Gambar 3.3. Foto struktur makro penampang melintang hasil pengelasan FSW

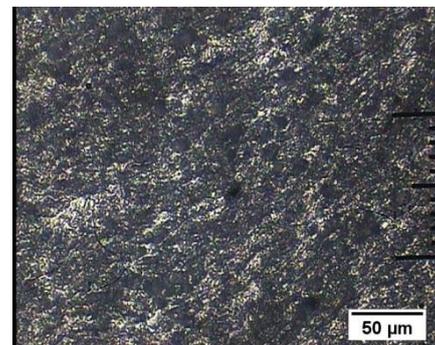
Hasil pengamatan struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 3.4. Pengelasan FSW pada aluminium 5052 tidak terjadi perubahan fase, hanya terjadi penghalusan partikel pada daerah *stir zone* karena FSW tidak menggunakan logam pengisi. Hasil pengamatan mikro memperlihatkan adanya partikel berwarna hitam. Berdasarkan pengujian komposisi kimia diketahui adanya fase Al_3Mg_2 yang terdispersi merata pada matriks aluminium [6]. Pada daerah *base metal*, bentuk butir Al_3Mg_2 memiliki ukuran yang lebih besar tidak terpengaruh panas yang dapat merubah struktur mikronya. Pada daerah HAZ dan *weld metal*, partikel Al_3Mg_2 mengalami perubahan bentuk menjadi lebih kecil dan merata. Partikel daerah HAZ partikel yang terbentuk kasar karena dipengaruhi panas gesekan *tool* pada proses pengelasan.



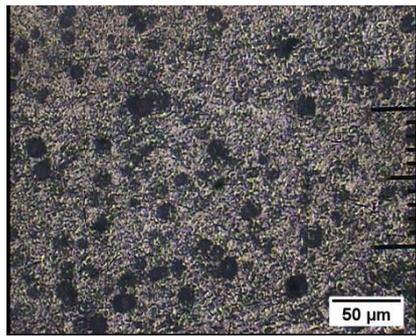
(a) Base metal aluminium 5052



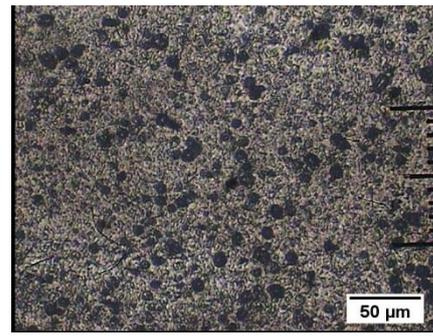
(b) Daerah HAZ pada feed rate 20 mm/menit



(c) Daerah HAZ pada feed rate 120 mm/menit



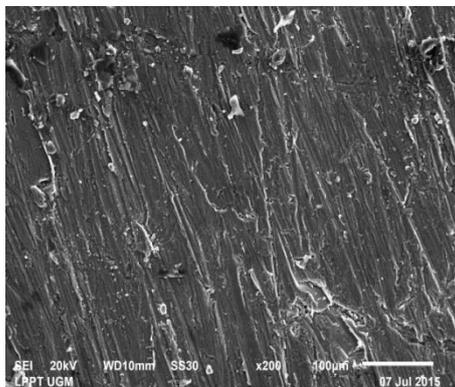
(d) Daerah stir zone pada feed rate 20 mm/menit



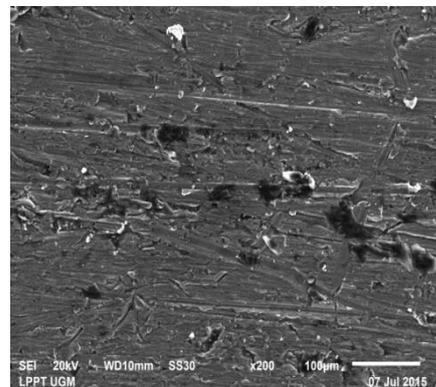
(e) Daerah stir zone pada feed rate 120 mm/menit

Gambar 3.4. Foto mikro sekitar daerah pengelasan

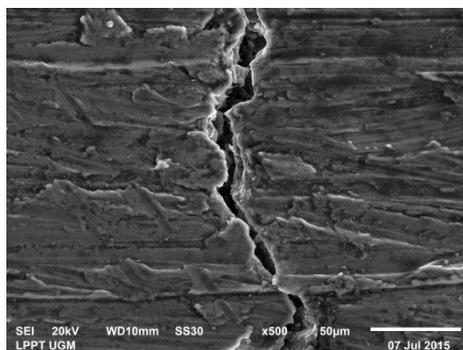
Gambar 3.4.c dan 3.4.e untuk *feed rate* 120 mm/menit menunjukkan partikel pada daerah *stir zone* partikel Al_3Mg_2 lebih kecil dan merata. akibat rekristalisasi pada proses puntiran pada ketika dilakukan pengelasan. Gambar 3.5 adalah hasil pengamatan struktur menggunakan SEM dengan perbesaran 200 kali yang memperlihatkan adanya lapisan-lapisan pada penampangnya. Layer tersebut diakibatkan karena kurang meratanya pencairan aluminium pada saat proses pengelasan, kurangnya merata aluminium dikarenakan pada saat proses pengelasan panas pada logam tidak merata. Gambar 3.5.a dengan perbesaran permukaan hasil uji SEM terlihat kasar, itu dikarenakan kurang halusnya pengamplasan. Gambar 3.5.c dan 3.5.d permukaan pengelasan didekat daerah pengelasan terlihat keretakan dan semakin terlihat jelas hasil pengujian SEM tampak kasar dan bergelombang adanya lapisan yang saling tersusun.



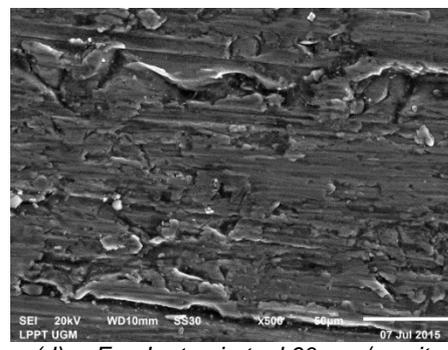
(a) Putaran pin tool 2500 rpm



(b) Putaran pin tool 3600 rpm



(c) Feed rate pin tool 20 mm/menit



(d) Feed rate pin tool 60 mm/menit

Gambar 3.5. Foto mikro hasil pengamatan dengan SEM

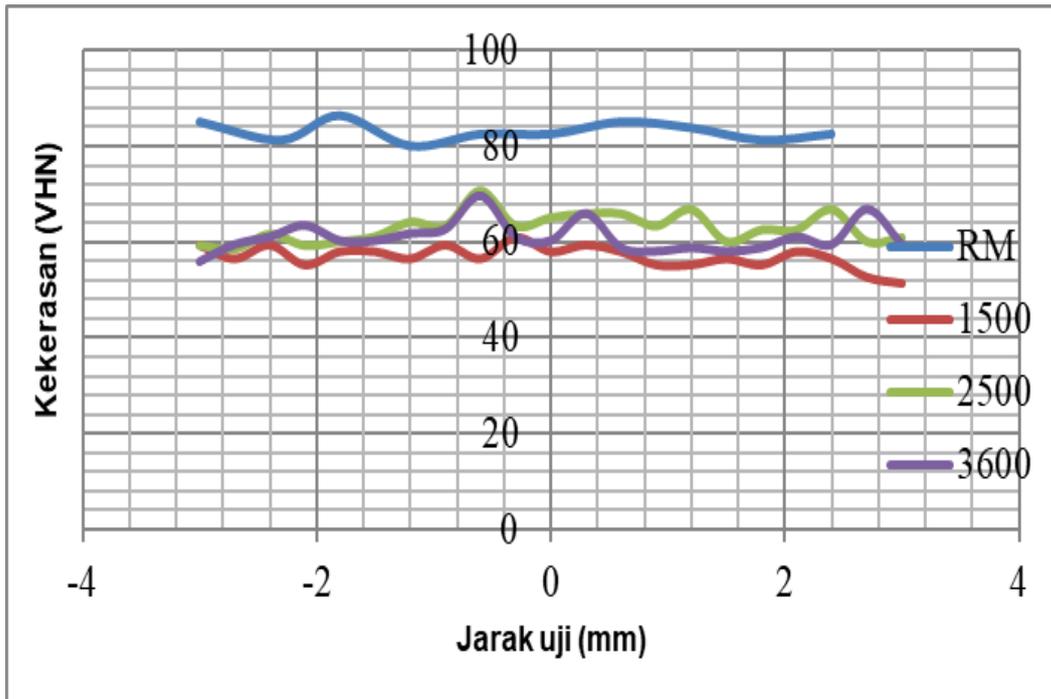
3.3 Hasil Pengujian Kekerasan

Kekerasan mikro Vickers pada sambungan FSW dengan variasi kecepatan putaran *pin tool* dan *feed rate* ditunjukkan pada Gambar 3.6 Nilai kekerasan material setelah mengalami pengelasan memiliki nilai kekerasan lebih rendah daripada *raw material*. *Raw material* memiliki nilai kekerasan rata-rata terbesar 83,1 VHN di mana menurut ASM Aluminium 5052-H34, nilai kekerasan dengan uji kekerasan vickers adalah 68 VHN, sehingga hasil penelitian ini sudah mendekati nilai kekerasan standarnya. Nilai kekerasan rata-rata tertinggi setelah mengalami sambungan FSW dengan kecepatan putaran *pin tool* 2500 rpm yaitu sebesar 65,1 VHN, sedangkan pada putaran *pin tool* 3600 rpm sebesar 60,2 VHN dan pada kecepatan putaran *pin tool* 1500 yaitu sebesar 58,0 VHN.

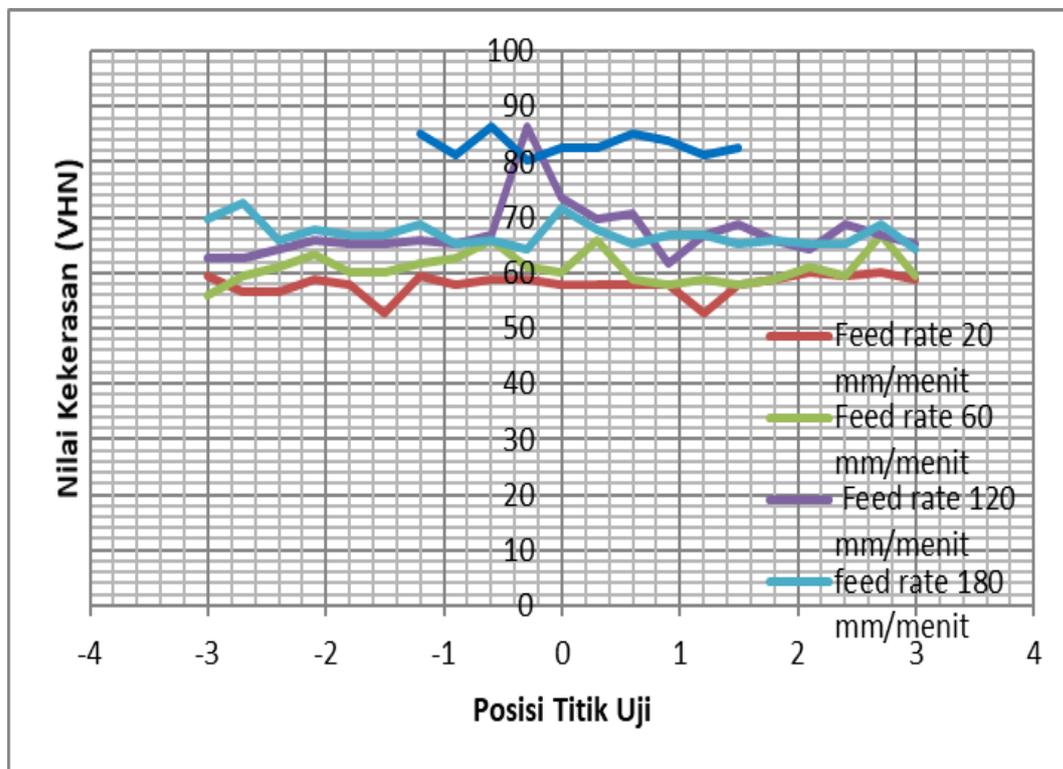
Nilai kekerasan pada daerah lasan lebih tinggi daripada daerah *raw material*. Nilai kekerasan pada putaran *pin tool* 2500 rpm antara 66 – 70 VHN, pada putaran 3600 rpm antara 60 – 69 VHN, dan pada putaran 1500 rpm antara 58 – 61 VHN. Nilai kekerasan tertinggi berada pada jarak 0,3 mm dari titik lasan. Hal ini bisa disebabkan oleh paduan yang dipulihkan dan rekristalisasi sebagai akibat deformasi panas selama pengelasan. Kekerasan yang tinggi pada *stir zone* disebabkan oleh terbentuknya grain yang kecil akibat *heat input* yang semakin besar [1]. Semakin besar putaran *holder* dan semakin lambat *feed rate*, *heat input* yang diterima material semakin besar akibat gesekan antara holder dengan material yang disambung.

Nilai kekerasan mikro vickers pada sambungan FSW dengan variasi *feed rate* yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.b. Semakin cepat *feed rate* proses pengelasan akan meningkatkan nilai kekerasan sampai *feed rate* 120 mm/menit, sedangkan pada *feed rate* 180 mm/menit nilai kekerasan kembali turun. Nilai kekerasan rata-rata tertinggi pada *feed rate* 120 mm/menit sebesar 67,2 VHN, pada *feed rate* 180 menjadi 66,9 VHN khususnya di sekitar daerah lasan. Kekerasan rata-rata terendah terdapat pada *feed rate* 20 mm/menit sebesar 58,0 VHN. *Feed rate* yang rendah akan menghasilkan *heat input* yang besar sehingga nilai kekerasan menjadi rendah. Akan tetapi, jika *feed rate* tinggi ada kemungkinan belum mencapai titik lebur sehingga nilai kekerasan kembali turun. Pada titik 0,3 mm, kecepatan *feed rate* 120 mm/menit mengalami kekerasan sebesar 86,4 VHN karena mampu perlakuan panas (*heat treatment*) sehingga kekerasan lebih tinggi dibandingkan dengan dengan kecepatan *feed rate* yang lain dan nilai kekerasannya melebihi *raw material*. Pada titik 1,2 mm, kecepatan 20 mm/menit dengan nilai kekerasan 52,6 VHN terjadi penurunan nilai kekerasan karena kemungkinan tersebut disebabkan proses *rekristalisasi* yang tingkat kerapatannya rendah sehingga kekerasan mengalami penurunan.

Berdasarkan posisi titik uji, semakin tinggi kecepatan *feed rate* maka nilai kekerasan akan semakin meningkat, tetapi *feed rate* 180 mm/menit mengalami penurunan nilai kekerasan dikarenakan penyebaran panasnya semakin kecil karena laju *feed rate* yang terlalu cepat. Jika dibandingkan nilai dengan *raw material*, nilai kekerasan hasil pengelasan masih jauh di bawah nilai kekerasan material. Nilai kekerasan pengelasan FSW tidak bisa melebihi kekerasan pada logam induk. Pelunakan bagian *stir zone* disebabkan oleh panas akibat terjadinya gesekan antara *pin tool* dan aluminium. Rendahnya nilai kekerasan pada daerah *stir zone* aluminium 5052 karena karakteristik paduan Al-Mg yang *non-heat treatable* juga karena tidak terjadi *fusion* pada saat proses pengelasan.



(a) Pengaruh putaran *pin tool* terhadap nilai kekerasan

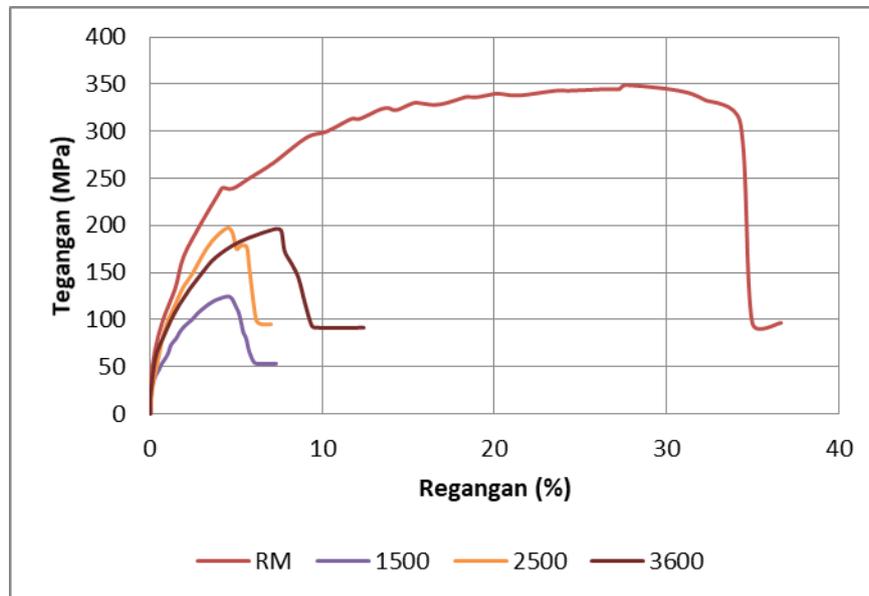


(b) Pengaruh *feed rate* terhadap nilai kekerasan

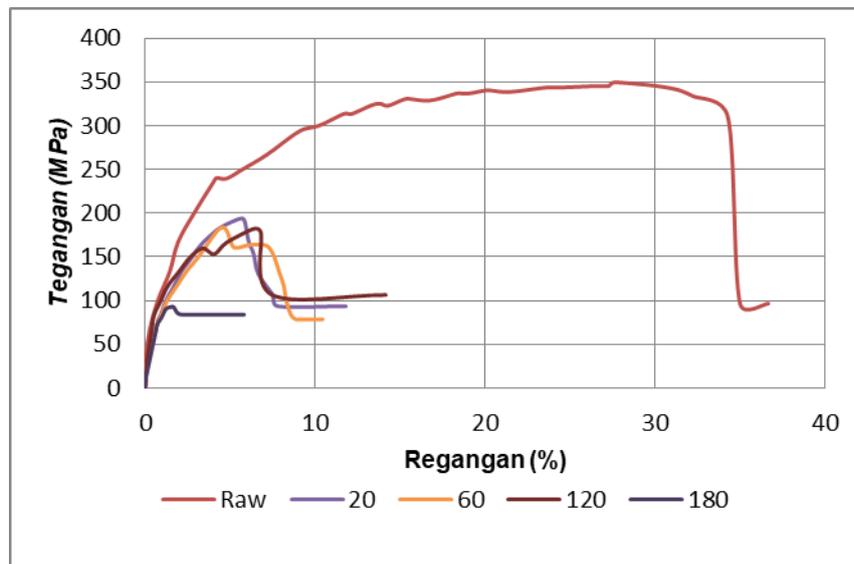
Gambar 3.6 Hasil pengujian kekerasan hasil pengelasan FSW

3.4 Hasil Pengujian Tarik

Pengujian tarik menggunakan standar ASTM E8. Hasil proses pengujian tarik berupa nilai tegangan dan regangan yang dapat dilihat pada Gambar 3.7.



(a) Pengaruh putaran *pin tool*



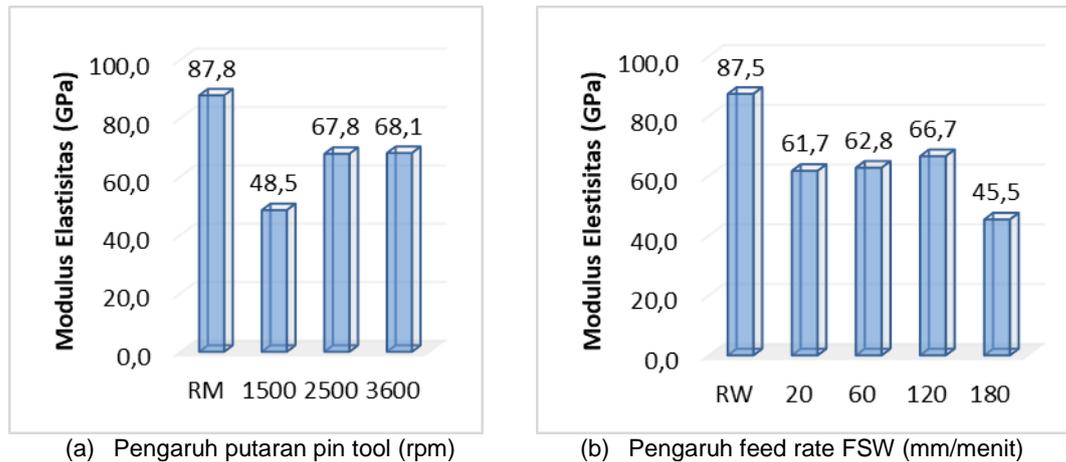
(b) Pengaruh *feed rate*

Gambar 3.7. Grafik tegangan-regangan hasil pengujian tarik pada material setelah proses FSW

Gambar 3.7.a menunjukkan bahwa kekuatan tarik hasil pengelasan FSW pada aluminium 5052 nilainya mencapai 56% dari kekuatan raw materialnya. Hasil pengujian diperoleh kekuatan tarik aluminium 5052 sebesar 349,67 MPa, sedangkan kekuatan tarik FSW semakin meningkat dengan penambahan putaran *pin tool*. Hingga putaran 2500 rpm dan 3600 rpm, nilai kekuatan tarik hampir sama yaitu sebesar 196,67 MPa sedangkan pada putaran 1500 rpm sebesar 124,0 MPa. Rendahnya kekuatan tarik dikarenakan adanya perubahan struktur mikro akibat pemanasan pada saat pengelasan dan juga terdapat cacat *wormholes* yang terjadi pada logam las. *Wormhole* pada hasil pengelasan akan menginisiasi

terjadinya retak dan kegagalan pada pembebanan tarik. Hal ini yang menyebabkan rendahnya nilai kekuatan tarik.

Gambar 3.7.b menunjukkan bahwa peningkatan *feed rate* akan menurunkan kekuatan tarik hasil FSW. Pada *feed rate* 20 mm/menit kekuatan tarik sebesar 193,33 MPa, sedangkan pada *feed rate* 60 mm/menit dan 120 mm/menit, besarnya kekuatan tarik sedikit lebih rendah yaitu 183,33 MPa dan 182 MPa, tetapi pada *feed rate* 180 mm/menit kekuatan tarik jauh lebih rendah yaitu sebesar 93,33 MPa. Hasil pengelasan dengan *feed rate* 120 mm/menit lebih tangguh dan ulet yang dapat dilihat dari besarnya regangan tarik sebesar 0,064 mm/mm daripada *feed rate* 60 mm/menit atau 20 mm/menit sebesar 0,045 mm/mm dan 0,056 mm/mm.



Gambar 3.8. Pengaruh *feed rate* dan putaran *pin tool* terhadap modulus elastisitas hasil pengujian tarik

Peningkatan putaran *pin tool* akan menaikkan nilai modulus elastisitas hasil FSW, seperti yang terlihat pada Gambar 3.8.a, tetapi masih di bawah modulus elastisitas *raw material* sebesar 87,8 GPa. Peningkatan putaran *pin tool* proses FSW akan menaikkan modulus elastis meskipun masih lebih rendah dari modulus elastisitas *raw material*. Nilai modulus elastis pada putaran *pin tool* 1500 rpm sebesar 48,5 GPa karena dengan putaran rendah *heat input* yang dihasilkan belum cukup untuk melelehkan material sehingga menghasilkan sambungan yang *solid*. Pada putaran pin tool 2500 rpm, modulus elastis naik menjadi sebesar 67,8 GPa dan pada putaran 3600 rpm peningkatan tidak signifikan sebesar 68,1 GPa.

Peningkatan *feed rate* akan meningkatkan modulus elastisitas sampai *feed rate* 120 mm.menit sebesar 66,7 GPa, dan pada *feed rate* 180 mm./menit modulus elastisitas jauh lebih rendah sebesar 45,5 GPa yang ditunjukkan pada Gambar 3.8.b. Dengan *feed rate* yang rendah memungkinkan *heat input* yang diterima material cukup untuk melelehkan *chip* yang terbentuk dan pengadukan sepanjang *weld nugget* yang dilalui *pin tool*. *Chip* yang terbentuk dapat mengisi *groove* sehingga membentuk *weld nugget* untuk menyambungkan kedua material.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa:

- Hasil sambungan FSW menyatu dengan baik, namun pada permukaan lasan masih terdapat *ripples*. Terdapat cacat berupa *incomplete fusion* pada sepanjang daerah pengelasan karena material yang teraduk tidak terjadi sampai ketebalan pelat. Butiran unsur menjadi lebih kecil jika lebih dekat dengan *stir zone* karena panas yang diterima oleh benda kerja akan semakin besar.
- Nilai kekerasan hasil FSW lebih rendah daripada nilai kekerasan *base metal* sebesar 84,5 VHN. Pada putaran 2500 rpm, diperoleh nilai kekerasan rata-rata tertinggi sebesar 65,1 VHN, sedangkan nilai kekerasan rata-rata tertinggi pada *feed rate* 120 mm/menit

- sebesar 67,2 VHN. Penurunan nilai kekerasan terjadi karena rekristalisasi pada proses pengelasan aluminium dengan FSW belum sempurna.
- c. Semakin cepat putaran *pin tool* FSW menyebabkan kekuatan tarik semakin tinggi dimana pada putaran 2500 rpm dan 3600 rpm sebesar 196,67 MPa, modulus elastisitas tertinggi pada putaran 3600 rpm 68,1 GPa. Semakin cepat *feed rate* menyebabkan kekuatan tarik semakin rendah di mana untuk *feed rate* 20 mm/menit sebesar 193,33 MPa dan *feed rate* 60 mm/menit dan 120 mm/menit sebesar 183,33 MPa, namun pada *feed rate* 180 mm/menit menjadi 93,0 MPa. Adapapun modulus elastisitas tertinggi pada *feed rate* 120 mm/menit sebesar 66,7 GPa.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pamungkas, A.S.F., Sumarji, dan Mahros Darsin, Analisis Sifat Mekanik Hasil Pengelasan Aluminium AA 1100 Dengan Metode Friction Stir Welding (FSW). *Jurnal ROTOR*. 2012: 5 (1): 50-61
- [2] Endartyana, R.F. Studi perbandingan sifat mekanik pada pengelasan satu sisi dan dua sisi friction stir welding aluminium 5083 kapal Katamaran”, Tugas Akhir S-1, Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh (ITS).Surabaya, (tidak dipublikasikan); 2013.
- [3] Wijayanto, J. Pengaruh *feed rate* terhadap sifat mekanik pada *friction stir welding* aluminium., Prosiding Seminar Nasional Aplikasi Sains & Teknologi (SNAST) Periode III. 2012.
- [4] Purwaningrum, Y. Karakterisasi Sifat Fisik dan Mekanik Sambungan Las Friksi Aluminium Seri 6063 T6 Dengan Variasi Parameter Pengelasan. *Jurnal Teknik Mesin*. 2012: 12 (1): 8-16
- [5] Iqbal, M., Tarkono, dan Ibrahim, G.A. Pengaruh Putaran Dan Kecepatan Tool Terhadap Sifat Mekanik Pada Pengelasan Friction Stir Welding Aluminium 5052”. *JURNAL FEMA*. 2014: 2 (1): 23-27
- [6] Wahyudianto, FX. A., Ilman, M.N., Iswanto, P.T., dan Kusmono. *Pengaruh Kecepatan Putar Tool Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Kekuatan Tarik Pada Sambungan Las FSW Tak Sejenis Anatara AA 5083 dan AA 6061-T6*. Prosiding Seminar Nasional Material dan Metalurgi (SENAMM VIII), Yogyakarta. 2015.