

# PENGARUH PEMANASAN AWAL TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN SPOT FRICTION STIR WELDING DALAM PEMASANGAN RIVET ALUMINIUM 2024

<sup>1</sup>Dicky Prasetyo Koesgi, <sup>2</sup>Sehono, <sup>3</sup>Dhimas wicaksono

*Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan Yogyakarta*

## Abstrak

*Teknik pengelasan pada aluminium sangat perlu dikembangkan dikarenakan penggunaannya dalam bidang manufaktur sangatlah dibutuhkan khususnya aluminium 2024 yang digunakan pada penelitian ini. Logam jenis aluminium ini memiliki peranan penting pada industri manufaktur pesawat dan otomotif hal tersebut dapat diperhatikan dari hampir seluruh rangka dan skin menggunakan aluminium. Selain itu metode penggabungan dua bahan material saat ini juga banyak yang sama namun banyak yang belum sesuai dengan karakteristik material yang berbeda. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan nilai kekuatan tarik pada paduan aluminium dengan pengelasan FSW tanpa pemanas dan pengelasan FSW dengan tambahan pemanas (transient thermal). Metode Penelitian dilakukan dengan pengelasan paduan aluminium plat 2024-T3 menggunakan teknik FSW tanpa pemanas dan teknik FSW dengan perlakuan transient thermal. Metode pengumpulan data yang akan digunakan untuk penelitian ini adalah dengan metode eksperimen, pada penelitian ini menggunakan aluminium seri Aluminium 2024-T3: skin dan doubler. Sebelum proses pengeboran terjadi untuk penggabungan aluminium pemanasan awal dilakukan pada plat menggunakan heater dengan variasi temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C. Kemudian saat proses pengeboran dilakukan, kecepatan putar yang digunakan adalah 1350 rpm, kecepatan tersebut diambil berdasarkan peneliti sebelumnya dikarenakan penggabungan material dengan nilai tersebut merupakan yang terbaik. Proses riveting dilakukan setelah pengeboran (welding) menggunakan paku keling. Peningkatan temperatur pada spesimen menyebabkan sifat mekanik yang cenderung meningkat pada tiap-tiap temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C yang di uji coba pada kekuatan geser pada spesimen. Hasil pengujian kekuatan geser yang terbaik pada temperatur 150°C dengan nilai sebesar 16,87 MPa. Uji kekerasan terbaik pada temperatur 200°C dengan nilai 287,52 kg/mm. Hal ini disebabkan karena munculnya pada struktur mikro dan hilangnya efek tempa dari panas yang dihasilkan dalam proses friction stir welding. Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan dari tiap spesimen hasil dengan metode friction stir welding semakin menurun. Namun penurunan nilai kekerasan yang terjadi tidaklah sangat signifikan. Penurunan nilai kekerasan ini dikarenakan sifat material aluminium 2024 yang telah mengalami strain hardened temper di mana adanya panas yang cukup tinggi akan membuat rekristalisasi pada material spesimen.*

**Kata kunci:** *spot friction stir welding, rotational tool speed, heater plat*

## Abstract

*Welding techniques on aluminum really need to be developed because their use in the manufacturing sector is needed, especially aluminum 2024 which is used in this study. This type of aluminum metal has an important role in the aircraft and automotive manufacturing industry, it can be seen from almost all frames and skins using aluminum. In addition, the method of combining the two materials at this time is also much the same, but many are not in accordance with the characteristics of different materials. The purpose of this study was to determine changes in the value of tensile strength in aluminum alloys by FSW welding without heating and FSW welding with additional heating (transient thermal). Method The research was conducted by welding aluminum alloy plate 2024-T3 using the FSW technique without heating and the FSW technique with transient thermal treatment. The data collection method that will be used for this research is the experimental method, in this study using aluminum series Aluminium 2024-T3: skin and doubler. Before the drilling process occurs for the incorporation of aluminum, preheating is carried out on the plate using a heater with temperature variations of 100°C, 150°C, and 200°C. Then when the drilling process is carried out, the rotational speed used is 1350 rpm, the speed is taken based on previous researchers because the combination of materials with these values is the best. The riveting process is carried out after drilling (welding) using rivets. Increasing the temperature of the specimen causes mechanical properties that tend to increase at each temperature of 100°C, 150°C, and 200°C which are tested on the shear strength of the specimen. The best shear strength test results are at a temperature of 150°C with a value of 16.87 MPa. The best hardness test at a temperature of 200°C with a value of 287.52 kg/mm. This is due to the appearance of the microstructure and the loss of the forging effect of the heat generated in the friction stir welding process. Hardness*

<sup>1</sup>Email Address : [prasetyodicky74@gmail.com](mailto:prasetyodicky74@gmail.com)

Received 1 Juli 2021, Available Online 30 Juli 2021

testing shows that the hardness value of each specimen using the friction stir welding method is decreasing. However, the decrease in the hardness value that occurs is not very significant. This decrease in hardness value is due to the nature of the 2024 aluminum material which has undergone strain hardened tempering where the presence of high enough heat will cause recrystallization of the specimen material. nails or rivets are a type of nail made of metal, which has the main part of the head and stem. A little seen from the meaning, rivet nails are widely used to tie the joints of iron plates and use the rivet method. The purpose of this study was to determine the change in the value of tensile strength in aluminum alloys with FSW welding without heating and FSW welding with additional heating (transient thermal). Method The research was conducted by welding aluminum alloy plate 2024-T3 using the FSW technique without heating and the FSW technique with transient thermal treatment. Heat treatment (transient thermal) is done by placing a heater in front of the welding tool. The specified SFSW welding speed is 1350 rpm. There are 4 stages of the FSSW process, namely tool rotating, plunging, stirring, drawing out. The results showed that the highest ultimate tensile strength ( $\sigma_{max}$ ) was obtained from the FSW welded specimen without heat treatment, which was 297.28 MPa. The transient thermal treatment with the heater position in front of the weld groove causes a decrease in the value of the tensile strength. The decrease in the maximum tensile stress value occurs around 32.2%, while the yield stress value decreases from the specimen without heating to the specimen using transient thermal heat, which is 32.5%. Tensile test results also show that brittle fracture occurs and the fracture location is in the weld area. front of the weld groove causes a decrease in the value of the tensile strength. The decrease in the maximum tensile stress value that occurs is about 32.2%, while the yield stress value decreases from the specimen without heating to the specimen using transient thermal heat, which is 32.5%. Tensile test results also show that brittle fracture occurs and the fracture location is in the weld area.

**Keyword:** spot friction stir welding, rotational tool speed, heater plat.

## Pendahuluan

Alumunium 2024 adalah salah satu logam yang sangat penting di bidang teknik untuk bahan struktur atau mesin, alumunium ini mempunyai kekuatan tinggi setelah memperlakukan panas. Pengelasan (*welding*) adalah suatu pekerjaan yang paling sering dijumpai dalam dunia konstruksi maupun industri. Pengelasan (*welding*) yang sering untuk perbaikan suatu komponen terbuat dari logam yang disambungkan dengan material lain, pengelasan (*welding*) yang biasanya digunakan pada kontruksi umumnya adalah menggunakan pengelasan (*welding*) dengan metode logam terlindung atau *Shielden Metal Arc Welding* (SMAW).

Paduan aluminium 2024 banyak digunakan dalam pembuatan elemen pada pesawat seperti skin wing pesawat. Proses ini terdiri dari *solution treatment*, *quenching*, *rolling* dan *natural aging*. Hasil dari proses *cold working* adalah paduan aluminium 2024 seri T3. Paduan aluminium 2024 T3 ini tidak memenuhi standar sebagai bahan pembuatan *skin wing* pesawat. Untuk meningkatkan kualitas baik dalam hal sifat mekanik, konduktivitas listrik dan ketahanan korosi pada paduan aluminium 2024 T3 tersebut dilakukanlah proses cladding dan aging.

Proses kecepatan putaran *tool* dalam proses (SFSW) ini akan menentukan kualitas lasan, karena berpengaruh terhadap besarnya masukan panas saat proses pengelasan dan dapat memberikan perubahan terhadap besarnya masukan panas saat proses pengelasan dan dapat memberikan perubahan terhadap sifat-sifat mekanik dan mikrostruktur daerah sambungan.

Salah satu upaya untuk memperbaiki sifat sambungan las paduan alumninium adalah dengan menggunakan teknik las *friction stir welding* (FSW). Pengelasan metode ini memiliki daerah *HAZ* yang lebih kecil dibandingkan dengan metode pengelasan lain seperti las busur nyala. Hal ini dikarenakan input panas yang dihasilkan tidak terlalu tinggi. Dengan nilai *HAZ* yang relatif lebih kecil maka akan didapatkan daerah lasan yang kuat tetapi tidak getas.

Perlakuan *heater* plat pada pengelasan dilakukan untuk mengurangi distorsi, tekukan, dan tegangan sisa. Panas yang ditimbulkan dari instrumen pemanas yang berada di belakang *tool / probe* (*shoulder*), secara signifikan dapat mengurangi gradien suhu dibandingkan FSW yang tanpa perlakuan *heater plat*. Pada material yang tanpa perlakuan *heater plat* dan dengan penambahan heater plat pada las FSW, dengan posisi heater di depan *tool*.

Penelitian teknologi pengelasan dengan metode *spot friction stir welding* (SFSW) masih harus terus menerus dikembangkan baik secara sifat-sifat atau tipe dari material (tebal tipis material), material hasil dari proses pengelasan, karakter pengelasan maupun alat untuk metode pengelasan FSSW. Teknik pengelasan di aluminium sangat perlu dikembangkan dikarenakan penggunaannya dalam bidang manufaktur sangatlah dibutuhkan. Logam jenis aluminium ini memiliki peranan penting pada industri manufaktur pesawat dan otomotif hal tersebut dapat dilihat dari hampir seluruh rangka dan skin menggunakan aluminium. aluminium juga mempunyai sifat konduktifitas termal dan listrik tinggi, lebih tahan lama, berkekuatan tinggi, mudah dibentuk serta lebih tahan terhadap korosi. Sifat-sifat mekanis tersebut dapat ditingkatkan menggunakan pemaduan menggunakan unsur-unsur lain seperti Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni dan sebagainya.

Ada beberapa jenis tahapan dan cara penggabungan material komposit yaitu seperti halnya pemanasan awal dan kemudian dilakukan penggabungan dengan pemampatan gesekan panas yang di hasilkan oleh *tool*. Proses pemanasan awal dapat mempengaruhi sifat awal aluminium sebelum digabungkan. Selain itu metode penggabungan dua bahan material saat ini juga banyak yang sama namun banyak yang belum sesuai dengan karakteristik material yang berbeda. Oleh sebab itu, penggabungan dari 2 atau lebih material tersebut harus disesuaikan seperti halnya pengelasan. Pengelasan yang digunakan haruslah lebih efektif dengan penggabungan 2 material yang tidak sejenis. Hal tersebut bisa dilakukan dengan contohnya metode *spot friction stir welding* yaitu peningkatan suhu pada sambungan material yang akan digabungkan dengan pemanfaatan putaran kecepatan mesin dan.

### Tinjauan Pustaka

Devireddy et al. (2018) dalam penelitian ini membahas tentang “*Analysis of the influence of friction stir processing on gas tungsten arc welding of 2024 aluminum alloy weld zone*”. Perubahan struktur mikro las dan penyempurnaan butir secara signifikan meningkatkan kekerasan las saat diolah dengan cara pengadukan gesekan pada atas las busur tungsten logam dasar & gas. Sifat mekanik pula berubah secara signifikan seiring menggunakan kualitas hasil las. Selain itu, pembentukan presipitat yang sangat halus diamati pada zona kocok lantaran pengaruh deformasi plastis yang intens & suhu selama proses pengadukan gesekan.

Nugroho dan Muhayat (2018) dalam penelitian ini membahas tentang “Pengaruh *plunge depth* dan *preheat* terhadap sifat mekanik sambungan *friction stir welding polyamide*”. Kekuatan tarik maksimum & lentur itu didapat berdasarkan kedalaman pemakanan 5,7mm menggunakan *preheat*. Nilai tegangan tarik & *bending aporisma* sebanyak 27, tiga Mpa, & 75,7 Mpa. Optimalisasi kedalaman pemakanan & pemanasan awal menciptakan pengadukan (*stir*) lebih baik sebagai akibatnya bahan cair sanggup menyebar ke semua area pengelasan.

Derniawan et al. (2021) dalam penelitian ini membahas tentang “Analisa Pengaruh Putaran *Spindel Pada Friction Welding Terhadap Tensile Strength Aluminium 6061*”. Dengan adanya luasan pengelasan yang berada pada seluruh permukaan bidang yang disambung, maka memungkinkan jenis sambungan las gesek untuk menerima beban puntir yang lebih besar, sehingga pada penerapannya las gesek sangat sesuai untuk digunakan pada proses penyambungan poros maupun bahan logam yang memiliki profil berbentuk lingkaran. Penelitian ini dilakukan dengan beberapa pengujian sifat mekanik. Sifat mekaniknya meliputi uji kekuatan tarik, dengan variasi putaran spindle pada mesin bubut menggunakan material aluminium 6061.

Tarmizi et al. (2017) dalam penelitian ini membahas tentang “Pengaruh putar *tool* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada proses *friction stir welding* aluminium paduan 2024”. Secara visual hasil proses *friction stir welding* yang paling baik adalah percobaan dengan kecepatan putar 1175 rpm dan laju pengelasan 29 mm/menit. Hasil percobaan ini lebih bagus dibandingkan dengan kedua

percobaan lainnya. Pada percobaan ini terlihat adanya flash dan hasil pengelasan halus. Hal ini terjadi karena kecepatan dari putaran *tool* konstan dan laju pengelasan yang tidak terlalu cepat, sehingga adukan menjadi baik.

Pujono (2017) dalam penelitian ini membahas tentang “Perubahan nilai kekuatan Tarik pada hasil pengelasan *friction stir welding* aluminium 2024 -T3 yang menggunakan perlakuan *transient thermal*”. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa terjadi patah getas dan lokasi patah berada pada daerah las, Kekuatan tarik maksimal ( $\sigma_{max}$ ) untuk spesimen dengan las FSW nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil uji tarik pada spesimen *heater* posisi di depan alur las.

Saputra (2017) dalam penelitian ini membahas tentang “Pengaruh Perbedaan *Tool Tilt Angle* terhadap Kekuatan Tarik, Impak, Pada Aluminium 6061 dengan Pengelasan *Double Sided Friction Stir Welding*”. *Friction Stir Welding* merupakan Teknik pengelasan dimana proses penyambungan menggunakan prinsip gesekan dari benda kerja yang berputar dengan benda kerja lain yang diam sehingga mampu melelehkan benda kerja dan akhirnya tersambung menjadi satu. Penelitian ini bertujuan membandingkan hasil kekuatan Tarik dan impak, dengan menggunakan variasi sudut *Tool Tilt Angle* ( $3^\circ$ ,  $4^\circ$ , dan  $5^\circ$ ).

Wang (2018) dalam penelitian ini membahas tentang “*The analysis of welding and riveting hybrid bonding joint of aluminum alloy and polyether ether ketone composites*”. Paduan aluminium dan Komposit *polieter eter keton* (PEEK) digabungkan dengan jenis teknologi pengelasan hibrid baru, yang menggabungkan metode pengelasan dan penyambungan yang memukau. Sumber pengelasan *hybrid* laser-TIG dan *stepped rivet* digunakan dalam percobaan, untuk mengontrol pengaruh panas pada *carbon particle reinforced* PEEK (CPRP) dalam proses pengelasan.

Shekhawat (2020) dalam penelitian ini membahas tentang “*Microstructures and mechanical properties of friction stir spot welded Al 6061 alloy lap joint welded in air and water*”. pengelasan *friction stir spot* 6061 paduan aluminium lembaran tebal 2 mm menggunakan kecepatan putar pahat yang berbeda 700, 900 dan 1100 RPM yang dilakukan di dua media berbeda yaitu udara dan air.

Suryanarayanan (2020) dalam penelitian ini membahas tentang “*Studies on the influence of process parameters in friction stir spot welded joints A review*”. Sambungan logam merupakan bagian integral dari proses pembuatan, di mana komponen dari bahan yang sama atau dua bahan yang berbeda dirakit dalam sistem yang kompleks. Teknik pengelasan seperti *Resistance Spot Welding* (RSW) dan *Self Piercing Rivets* (SPR) telah digunakan dalam industri otomotif untuk menggabungkan struktur pintu dan kap.

Fuad (2020) dalam penelitian ini membahas tentang “Pengaruh Kombinasi Ketebalan Plat Aluminium 2024 T42 Terhadap Sifat Mekanis pada Proses *Resistance Spot Welding Part Door Assy* Helikopter NBELL 412EP”. Pengelasan dengan metode pengelasan titik RSW (*Resistance Spot Welding*) banyak dijumpai pada industri otomotif, khususnya pada bidang industri pesawat terbang. Kegagalan pada sambungan sering sekali terjadi. Hal tersebut dapat diakibatkan oleh beberapa faktor, termasuk salah satunya adalah faktor ketebalan plat. Pada penelitian ini menggunakan variasi dua jenis kombinasi ketebalan plat yaitu 0.5 + 0.6 mm dan 0.5 + 1.6 mm.

## Landasan Teori

### Pengertian Aluminium

Menurut Tama. et al. (2020) aluminium adalah logam ringan yang memiliki ketahanan korosi yang baik dan penghantar listrik yang baik. Selain itu aluminium adalah logam yang mempunyai *mechanical properties* dan kemampuan untuk pengelasan yang relatif baik. Selain itu, aluminium pula mempunyai kelebihan antara lain massa jenisnya yang rendah, kemampuan menunda korosi, harga

relatif murah, konduktor listrik dan penghantar panas yang baik, dan juga merupakan material yang memiliki ketahanan oksidasi.

### **Pengertian Aluminium Seri 2024**

Aluminium 2024 merupakan salah satu logam yang sangat penting di bidang teknik terutama untuk bahan struktur atau mesin, sebagai contoh struktur pesawat terbang, kapal, otomotif. Aluminium 2024 memiliki nilai kekuatan lebih tinggi setelah mengalami perlakuan panas. Aluminium seri 2024 adalah aluminium paduan tempa, yang dapat dilakukannya pemanasan dengan menggunakan paduan utamanya adalah *Al-Cu* (Duniawan, 2016). Hal ini disebabkan karena saat pengelasan aluminium seri 2xxx terjadi retak panas (*liquation cracking*) saat proses pembekuan berlangsung akibat adanya *segregasi Cu* menjadi struktur dendritik aluminium. Upaya untuk memperbaiki telah dikembangkan proses pengelasan keadaan lumer seperti teknik *friction stir welding* dan mampu mengelas berbagai aluminium paduan yang sulit disambung dengan proses pengelasan busur listrik.

### **Klasifikasi Tentang Aluminium 2024 Dan Paduannya**

Standarisasi aluminium 2024 digunakan untuk menggolongkan logam aluminium paduan berdasarkan komposisi kimia, menurut standar yang digunakan di dunia seperti JIS, ASTM, ISI, ISO dll material aluminium dibagi kedalam beberapa kelas dengan penamaan sesuai dengan standart yang digunakan. Pengklarifikasian ini berdasarkan komposisi kimia paduannya dan juga *mechanical* propertisnya. Perlu diperhatikan bahwa pada digit kedua dan ketiga menunjukkan persentase aluminiumnya, sedangkan digit terakhir setelah titik adalah keterangan apakah aluminium dicor setelah dilakukan pelelehan pada produk aslinya, atau dicor segera setelah aluminium cair dengan paduan tertentu. Ditulis hanya dengan dua angka, yaitu 1 atau 0. Klasifikasi aluminium pada Standar Nasional Indonesia (SNI) tidak berdasarkan pada konsentrasi paduan maupun perlakuannya. Klasifikasi aluminium paduan pada Standar Nasional Indonesia didasarkan pada aplikasi aluminium tersebut.

### **Pengertian Rivet**

Paku rivet atau paku keling merupakan jenis paku yang terbuat dari logam, yang memiliki bagian utama kepala dan batang. Sedikit dilihat dari pengertiannya, paku rivet banyak digunakan untuk mengikat penyambungan dari plat besi dan menggunakan cara di keling. Paku rivet memberikan beberapa kelebihan diantaranya adalah dengan sifatnya yang tetap tidak menyebabkan adanya perubahan struktur pada logam. Contoh paku ini banyak terjadi ada sambungan yang menerapkan, sehingga lebih banyak digunakan pada sambungan pembebanan dinamis. Sedangkan untuk kekurangan darah pada sambungan paku irivet ini membutuhkan adanya pekerjaan awal yaitu pengeboran logam. Pengeboranlogam ini dilakukan pada bagian yang akan disambung. Untuk kekurangan yang lain adalah memungkinkan terjadinya karat pada bagian sekitar lubang sambungan selama proses pemasangan paku rivet tersebut. Selain dari logam, paku ini biasanya juga terbuat dari bahan aluminium, tembaga, perunggu, baja, atau nikel. Sebuah paku rivet biasanya terdiri pada bagian tangkai dan kepala.

### **Proses Pemasangan Sambungan Rivet Pada Aluminium 2024**

Sambungan paku keling atau rivet merupakan sambungan permanen karena sambungan ini sekali pasang. Pelubangan pada aluminium 2024 di bagian tengah permukaan yang dimana gerakan toolsnya bawah dan keatas. Paku keling merupakan suatu alat sambung konstruksi baja yang terbuat dari batang baja berpenampang bulat.

### **Pengertian Spot Friction Stir Welding (SFSW)**

*Spot Friction stir welding* (SFSW) adalah proses pengelasan *solid state* di mana sebuah *tool* yang berputar dimakamkan sepanjang garis sambungan antara dua benda kerja. *Tool* yang berputar dan

dimakamkan pada garis sambungan tersebut menghasilkan panas serta secara mekanis menggerakkan (*stirring*; bentuk dasar: *stir*, sehingga diberi nama *friction stir welding*) logam untuk membentuk sambungan las. Perbedaan *friction stir welding* dengan *friction welding* adalah pada *friction stir welding* panas gesekan dihasilkan oleh *tool* tahan aus, sedangkan pada *friction welding* berasal dari benda kerja yang akan disambung itu sendiri. Menurut Yajie L. (2017) *friction stir welding* (FSW) dikenal sebagai teknologi yang sangat praktis untuk menyambung paduan magnesium. Meskipun, sejumlah besar kemajuan telah dibuat pada FSW paduan *magnesium*, harus ditekankan bahwa masih banyak tantangan dalam menggabungkan *magnesium*.

### **Perlakuan Pemanasan Awal Menggunakan *Heater***

Menurut Kelautan (2015) preheat atau pemanasan awal adalah pemanasan inti logam pada temperatur yang tepat sehubungan dengan pengelasan. Preheat atau pemanasan awal harus dilakukan tanpa merusak bagian permukaan aluminium pada daerah yang akan dilas. Terdapat beberapa alasan mengapa menggunakan preheat, yaitu: Memperlambat laju pendinginan pada logam las dan logam induk, dapat menghasilkan struktur metalurgi yang lebih ulet, dan mempunyai daya tahan yang kuat terhadap *crack*. Laju pendinginan yang lambat dapat membuat kesempatan pada hidrogen untuk berdifusi keluar dari logam tanpa merusak, sehingga dapat mengurangi kemungkinan *crack*. Dapat mengurangi tegangan karena shrinkage yang berdekatan pada logam las dan logam induk. Dapat menaikkan mechanical properties pada baja untuk tahan di atas suhu yang menyebabkan terhasilkannya struktur getas dalam pembuatan baja.

### **Prinsip Kerja *Spot Friction Stir Welding* (SFSW)**

Dalam SFSW, *tool* pengelasan dengan atau tanpa profil pada *probe* berputar dan bergerak dengan kecepatan konstan sepanjang jalur sambungan antara dua material yang dilas. Benda kerja harus dicekam dengan kuat pada fixture atau ragum untuk mempertahankan posisinya akibat gaya yang terjadi pada waktu pengelasan. Panjang dari *probe* harus lebih pendek daripada tebal benda kerja dan *shoulder* dari *tool* harus bersentuhan dengan permukaan benda kerja. Gesekan panas (*Frictional Heat*) pada FSW dihasilkan oleh gesekan antara *probe* dan *shoulder* dari *welding tool* dengan material benda kerja. Panas ini bersama dengan panas yang dihasilkan dari proses pengadukan mekanik (*mechanical mixing*) akan menyebabkan material yang diaduk akan melunak tanpa melewati titik leburnya (*melting point*), hal inilah yang memungkinkan *tool* pengelasan bisa bergerak sepanjang jalur pengelasan. Ketika *pin welding tool* bergerak sepanjang jalur pengelasan, permukaan depan *pin* akan memberikan gaya dorong plastis terhadap material ke arah belakang *pin* sambil memberikan gaya tempa yang kuat untuk mengkonsolidasikan logam las. *Part* yang akan dilas harus dicekam dengan baik dan ditempatkan di atas *backing plat* sehingga beban yang diberikan pada *tool* dan diteruskan ke benda kerja tidak menyebabkan bagian bawah *plat* yang dilas terdeformasi. tahapan kerja FSSW dapan di urutkan sebagai berikut: *Tool rotating* proses ini merupakan tahapan awal yang dilakukan pada mesin kerja FSSW yaitu alat/matabor akan berputar terlebih dahulu sebelum menyentuh spesimen. *Plunging* Kondisi kerja ke dua yaitu plunging dimana di kondisi ini alat FSSW mulai menyentuh bagian luar spesimen dan mulai membentuk lubang. *Stirring* proses selanjutnya ialah *stirring*, pada kondisi ini alat FSSW masuk lebih dalam melewati spesimen pertama dan akan menggabungkan 2 aluminium tersebut dengan pelelehan yang di pengaruhi panas dari pergesekan tool dengan aluminium tersebut. *Drawing out* kondisi *drawing out* merupakan langkah yang terakhir yang terjadi yaitu proses pelepasan aluminium dengan tool FSSW. Pada langkah ini *tool* dari FSW akan bergerak pada *buttock line* atau mengikuti garis pengelasan. Panas gesekan yang dihasilkan oleh gesekan tool dengan material pada langkah *plugging* menyebabkan material tetap dalam kondisi plastis *Pin* akan mengaduk (*stirring*) atau menekan material yang dalam kondisi plastis dari sisi *advancing*. Hal ini dapat dianggap menerapkan gaya tempa (*forging*) yang memaksa untuk menggabungkan logam las ke sisi *retreating*. Proses ini menghasilkan campuran struktur yang halus dari material dasar.

### **Desain Tool Pada Spot Friction Stir Welding (SFSW)**

Desain *tool* adalah faktor yang sangat mempengaruhi hasil pengelasan, karena desain *tool* yang tepat dapat menghasilkan hasil pengelasan yang baik. Panas yang dihasilkan dari gesekan *tool* dan material yang akan dilas sekitar 70 – 80 % dari temperature titik lebur material yang akan di las tersebut. Material *tool* harus memiliki sifat tahan terhadap panas tinggi dan mempunyai titik lebur yang lebih tinggi dari material las, agar ketika proses pengelasan berlangsung material *tool* tidak ikut tercampur dengan material yang di las. Bahan perkakas las yang digunakan tergantung kepada logam yang akan disambung. Perkakas las berbahan seperti baja berkecepatan tinggi (HSS), baja perkakas H13 dan D3 digunakan untuk menyambung logam aluminium, *magnesium* dan *cooper*. Sedangkan paduan tungsten seperti *tungsten karbida* (WC), *tungsten rehenium* (W-25%Re) dan *polycrystal cubic boron nitrate* (PCBN) digunakan untuk menyambung logam yang lebih keras seperti baja, nikel dan titanium. Desain *tool* terdiri dari *shoulder* dan *pin*. *Pin* berfungsi untuk menghasilkan panas dan menggerakkan material yang sedang di las. *Shoulder* memiliki beberapa fungsi antara lain: Sebagai pelindung dari kemungkinan masuknya suatu material berbeda. *Shoulder* yang berdiameter lebih besar, berperan untuk mempertahankan dan menjaga agar *material plasticized* tidak keluar dari daerah las. *Shoulder* memiliki tekanan ke bawah yang member efek tempa pada lasan. *Shoulder* juga menyediakan input panas tambahan, karena luas permukaan yang bergesekan dengan material las lebih besar maka panas yang dihasilkan juga lebih besar.

### **Kelebihan Dan Kekurangan Pada Spot Friction Stir Welding (SFSW)**

Kelebihan spot friction stir welding antara lain: (1) Sifat mekanis sambungan baik. (2) Terhindar dari asap beracun dan masalah-masalah lain yang dapat dijumpai pada *arc welding*. (3) Distorsi atau penyusutan kecil. (4) Bentuk las bagus. Kekurangan spot friction stir welding antara lain: (1) Terdapat lubang ketika kita menarik *tool* dari benda kerja. (2) Penjepitan benda kerja harus kuat.

### **Proses Pengelasan Alumunium Pada Spot Friction Stir Welding**

Berdasarkan penjelasan dari Studi P. (2020) pengelasan merupakan salah satu metode penyambungan dalam bidang manufaktur untuk digunakan dalam suatu proses pembuatan produk. Pengelasan adalah penyambungan logam dengan mencairkan logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam penambah menghasilkan sambungan pada logam tersebut. *Micro Friction Stir Spot Welding* (MFSSW) adalah jenis pengelasan skala mikro yang menggunakan proses gesekan pada suatu titik dalam pengelasannya. Pada penelitian ini mencari pengaruh geometri lasan dari hasil pengelasan MFSSW terhadap sifat mekanik pada Plat Aluminium AA1100. Alumunium diletakkan pada alas dan tepian pelat dijepit agar pelat tidak bergeser ke samping pada saat pengelasan. Pengelasan dilakukan menggunakan sebuah *tool* berbentuk silinder yang sudah dirancang khusus. *Tool* memiliki ujung yang diameternya kurang lebih sepertiga dari diameter silinder secara keseluruhan dan umumnya memiliki panjang lebih kecil dari tebal pelat yang akan dilas. Ujung *tool* ditekan masuk (*plugging*) ke dalam sambungan antara kedua pelat sampai bagian *shoulder* menyentuh permukaan pelat. Tekanan kebawah dari *shoulder* membantu mencegah material yang telah melunak untuk keluar. Gesekan yang terjadi antara *shoulder* dan permukaan pelat menghasilkan panas tambahan dan membuat material disekitar *pin* dan dibawah *shoulder* menjadi plastis. Ketika pengelasan selesai dan *tool* diangkat, terdapat lubang bekas *tool* yang biasanya dipotong sehingga harus diciptakan area khusus yang biasanya disebut dengan *area run off*. Menurut Yajie L. (2017) Lasan yang diperoleh dengan alat "pin" menunjukkan kehalusan butir yang lebih jelas daripada yang diamati dengan menggunakan alat "tanpa jarum" meskipun adanya rongga dan homogenitas yang lebih rendah sangat mempengaruhi sifat mekanik sambungan. Avula D. (2018) menjelaskan pengaruh kecepatan las terhadap gesekan gesek terhadap sifat sambungan las kekerasan, sifat tarik, cacat dan karakterisasi struktur mikro dipelajari dalam penelitian ini. Pengelasan adukan gesekan dilakukan pada paduan perlakuan panas AA2014-T6 dengan pelat setebal 5 mm dengan konfigurasi sambungan

butt. Kecepatan pengelasan divariasikan dari 8 mm/menit hingga 120 mm/menit pada kecepatan perjalanan dan kondisi beban tetap. Diamati bahwa kecepatan pengelasan pada tingkat yang lebih tinggi dengan jangkauan yang luas dapat dimungkinkan untuk mengelas paduan ini pada tingkat putaran pahat yang lebih tinggi yang menunjukkan bahwa kemampuan yang melekat pada teknik pengelasan pengadukan gesekan untuk paduan aluminium 2014. Las yang dihasilkan biasanya menjadi 3 – 6% lebih tipis dibanding logam induk. *Tool* yang diputar menghasilkan gerakan mengaduk, yaitu sebuah gerakan perlakuan panas yang terjadi terus menerus, membuat logam menjadi plastis dalam sebuah area sempit sembari memindahkan logam dari bagian depan pin ke bagian belakang pin. Seiring Bergeraknya *tool*, hasil las mengalami pendinginan, sehingga kedua sisi dapat tersambung. Karena temperatur maksimal yang dihasilkan dalam proses FSW umumnya kurang dari 80% titik leleh material yang dilas, maka hasil pengelasan FSW dapat terhindar dari cacat yang disebabkan oleh pengelasan fusi.

### Sifat Mekanik

Sifat mekanik (*Mechanical Properties*) adalah sifat-sifat yang ada pada bahan yang berkaitan dengan kelakuan terhadap pembebanan mekanik yang ada pada material. Sifat-sifat ini perlu dipertimbangkan ketika menentukan produk yang ada pada konstruksi material yang digunakan. Untuk sifat mekanik memiliki nilai yang diturunkan dari minimum yang ditentukan pada produk yang relevan. Kemampuan las yang digunakan untuk menentukan kandungan pada material seperti kimia dari paduan. Metode untuk mengetahui sifat mekanik suatu bahan adalah sebagai berikut:

#### Uji geser

Dilakukan untuk mengetahui kekuatan geser dari berbagai variasi dari parameter pengelasan dengan standar. Dalam pengelasan titik aduk gesekan, masing-masing pengelasan titik dibuat dengan menekan alat berputar dengan kekuatan tinggi ke atas permukaan atas dua lembar yang saling tumpang tindih di pangakuan bersama. Panas gesekan dan tekanan tinggi berkembang menghasilkan di bahan benda kerja, sehingga ujung pin terjun kedalam area sambungan antara dua lembar dan aduk oksida. Pin alat tersebut dicelupkan ke dalam lembaran hingga bahu bersentuhan dengan permukaan lembaran atas. Bahu menerapkan tekanan tempa tinggi yang mengikat komponen secara metalurgi tanpa meleleh. Setelah waktu tunggu yang singkat, alat ditarik keluar dari benda kerja sekali lagisehingga pengelasan titik dapat dilakukan setiap 5 detik. Berikut merupakan rumus regangan yang digunakan untuk melakukan uji geser:

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad (2.1)$$

#### Kekerasan (*Vickers*)

Kekerasan suatu material/bahan merupakan sifat mekanik yang sangat penting, karena dapat digunakan untuk mengetahui sifat mekanik lain yaitu *strength* (kekuatan). Nilai kekuatan tarik yang dimiliki suatu material juga dapat dikonversi dari kekerasannya. Prinsip dasar pengujian *vickers* sama dengan uji *Brinell*, perbedaannya penggunaan indentor intan yang berbentuk piramid ber alas bujur sangkar dan sudut puncak antara dua sisi yang berhadapan 136°. Pengukuran diagonal segi empat lebih akurat dibandingkan pengukuran pada lingkaran. Pengujian ini dapat dilakukan untuk spesimen tipis hingga 0,006 inci. Nilai yang diperoleh akurat hingga nilai 1300 (setara dengan *Brinell* 850). Indentor relatif tidak menjadi rata seperti pada *Brinell*. Beban yang digunakan pada uji *vickers* antara 1 hingga 120 kgf. Penggunaan beban yang berbeda akan tetap menghasilkan nilai yang sama untuk material yang sama. Nilai *Hardness Vickers* dapat dihitung dengan persamaan:

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2)$$



$$D = \frac{1854 F}{D^2} \quad (3)$$

## Metode Penelitian

### Metode Experimen

Metode pengumpulan data yang akan digunakan untuk penelitian ini adalah dengan metode eksperimen, pada penelitian ini saya menggunakan aluminium seri Aluminum 2024-T3: *skin* dan *doubler*. Dengan tebal 2mm pada bahan material ini adalah bentuknya simple, penghantar panas yang baik, dan mudah dibentuk dalam manufaktur. Metode eksperimen ini merupakan suatu metode yang sesuai untuk pembelajaran sains, karena pada dasarnya metode eksperimen ini mampu memberikan kondisi belajar yang bisa untuk mengembangkan kemampuan berfikir dan juga bisa menambah kreativitas secara optimal. Pengumpulan data yang dilakukan memiliki tujuan untuk mengetahui serta memaparkan hasil dari penelitian yang dilakukan. Data yang telah diolah sedemikian rupa harus dapat menjelaskan perbandingan nilai terbaik ataupun perbandingan yang berbeda pada setiap jenis perbedaan yang didapatkan. Data yang dibentuk dalam penelitian akan berupa bentuk grafik agar dapat menunjukkan perbedaan nilai yang mungkin hamper sama.

### Tempat Penelitian

Tempat yang dijadikan objek untuk penelitian ini adalah: Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan (STTKD) yang terletak di Jalan Parangtritis Yogyakarta yaitu proses manufaktur alat spesimen pengujian. Lab Teknik Universitas Gajah Mada (UGM) merupakan tempat pengujian kekerasan alat penelitian. Institut Teknologi Nasional Yogyakarta (ITNY) yang bertempat di Babarsari Yogyakarta yaitu tempat pengujian geser untuk alat penelitian.

### Tahap Penelitian

Dalam penelitian ini yang akan dilakukan dan tahap tahap penelitian adalah: Langkah pertama yang dilakukan ialah merumuskan masalah dan tujuan dari penelitian. Melakukan pengelasan dan *drilling*, Melakukan proses *rivet* Melakukan Analisa uji mekanik yaitu uji geser uji kekerasan, micro dan lain lain.

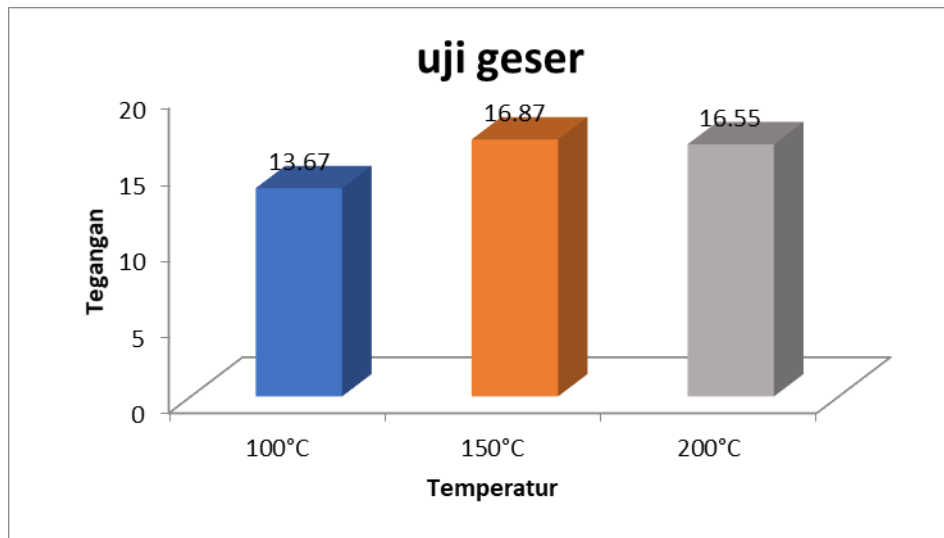
## Hasil dan Pembahasan

### Pengaruh Pemanasan Dengan Metode *Spot Friction Stir Welding* Terhadap Kekuatan Geser

Terdapat 8 buah spesimen yang di uji yaitu spesimen dengan pemanasan menggunakan *heater* dengan temperatur 100°C berjumlah 3 spesimen kemudian pada spesimen dengan temperatur 200°C juga terdapat 3 buah spesimen sedangkan pada spesimen dengan temperatur 150°C berjumlah 2 spesimen. Adapun jumlah spesimen tersebut hanya digunakan sebagai variasi jumlah pada penelitian ini.

**Tabel 1.** tabel pengujian geser

temp°C	W (mm)	T (mm)	Lo (mm)	Tegangan geser (kgf/mm <sup>2</sup> )	Mpa (kgf/mm <sup>2</sup> )	Rata-rata (Mpa)
100°	20,27	4,17	16,5	1.06	10.40	13.67
	20,46	4,38	16,5	1.42	13.93	
	21,24	4,19	15,6	1.70	16.68	
150°	20,39	4	16,4	1.64	16.09	16.87
	21,14	4,1	16,6	1.80	17.66	
200°	20,16	4,3	16,1	1.63	15.99	16.55
	21,13	4,5	16,5	1.54	15.11	
	20,64	4,34	16,6	1.89	18.54	



**Gambar 1. Grafik nilai rata-rata pengujian geser**

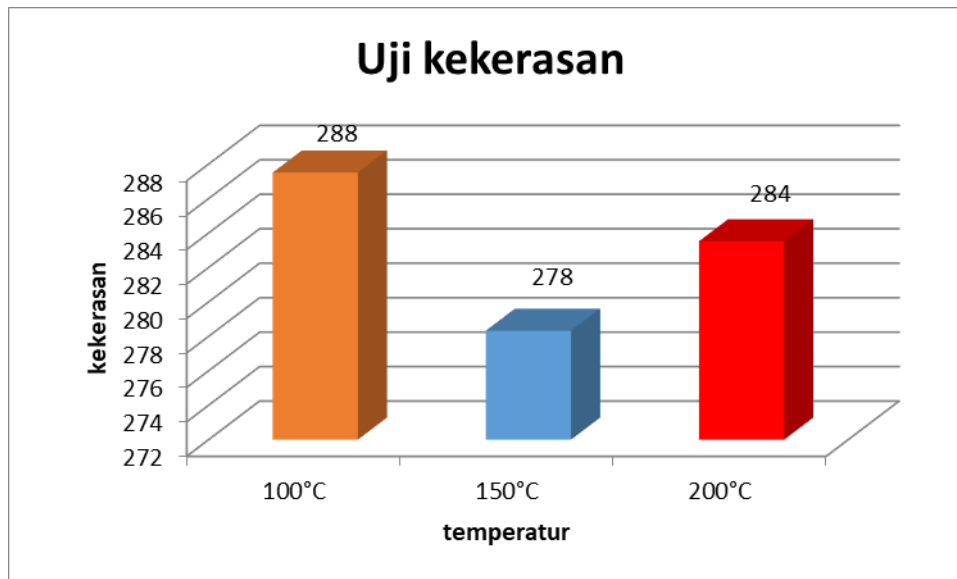
Hasil uji kekuatan geser ditempat ITNY (Institut Teknologi Nasional Yogyakarta) terhadap Pemanasan Dengan Metode *Spot Friction Stir Welding* dengan temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C, sedangkan kekuatan luluh pada las mengalami penurunan dibanding logam induk, dan penurunan kekuatan luluh las. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kekuatan geser hasil proses *friction stir welding* yang paling baik adalah pada temperatur 150°C yaitu dengan nilai rata-rata sebesar 16,87 MPa, lebih besar dibandingkan dengan kekuatan geser pada temperatur 100°C dengan nilai rata-rata terkecil sebesar 13,67 MPa, dan nilai kekuatan geser pada temperature 200°C dengan nilai rata-rata sebesar 16,55 MPa.

### **Pengaruh Uji Kekerasan Dari Material Alumunium dan Hasil Metode *Spot Friction Stir Welding***

Dari pengamatan nilai kekerasan dapat dilihat bahwa kekerasan tertinggi ditemukan pada daerah material yang dengan temperatur paling tinggi. Kemudian menurun pada temperatur yang lain, di mana pada daerah *weld nugget* adalah daerah dengan nilai kekerasan yang paling rendah.

**Tabel 2. Pengujian Kekerasan**

Kode Sinesik	d1	d2	d <sup>2</sup>	VHN Kg/mm <sup>2</sup>	Rata - Rata
100 °C	36	36.5	36.3	282	288
	36	36	36	286	
	36	35	35.5	294	
150 °C	36.5	36.5	36.5	278	278
	36.5	36.5	36.5	278	
	36.5	36.5	36.5	278	
200 °C	36	36	36	286	284
	36	36	36	286	
	37	36	36.5	278	

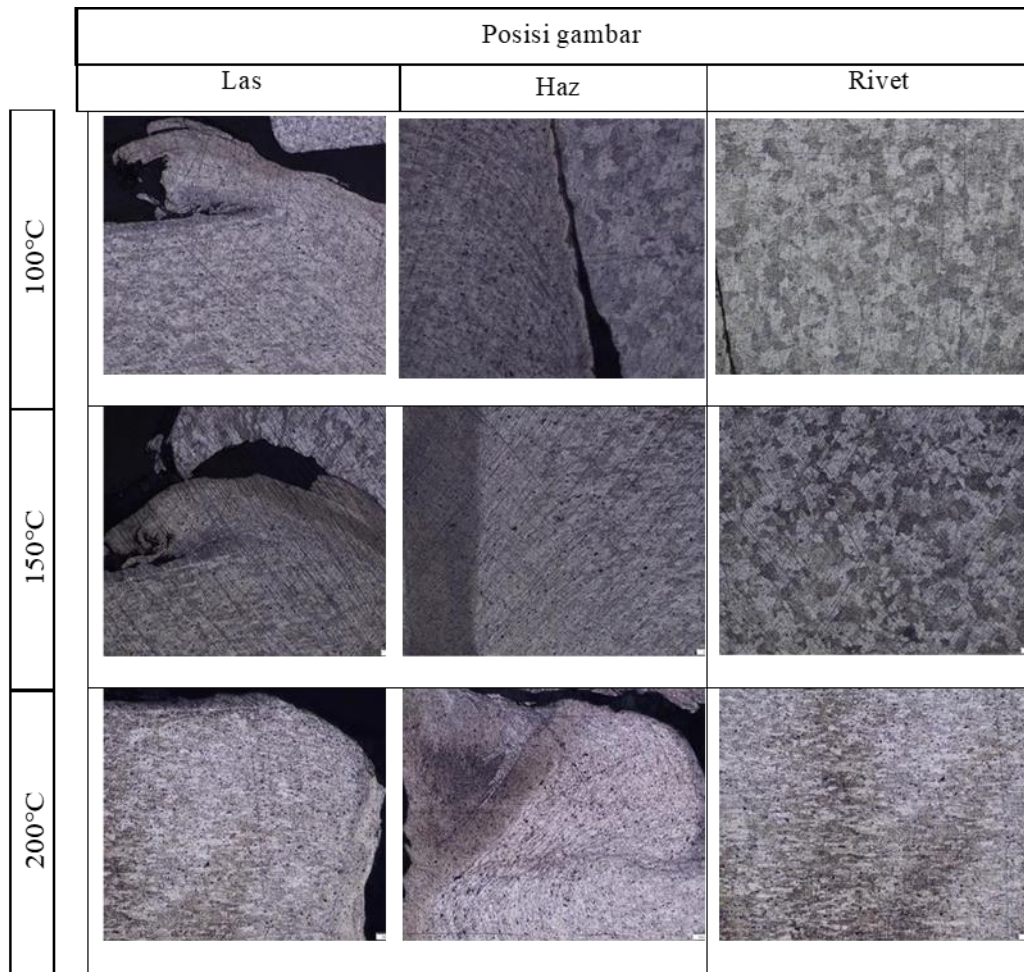


**Gambar 2. Grafik Rata-Rata Pengujian Kekerasan**

Pada hasil pengujian kekerasan di tempat UGM ( Universitas Gajah Mada ) menunjukkan bahwa nilai kekerasan dari tiap spesimen hasil dengan metode *friction stir welding* semakin menurun. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada temperatur 200°C dan nilai uji kekerasan paling rendah pada temperature 150°C. Namun penurunan nilai kekerasan yang terjadi tidaklah sangat signifikan. Penurunan rata – rata nilai kekerasan ini dikarenakan sifat material aluminium 2024 yang telah mengalami *strain hardened temper* di mana adanya panas yang cukup tinggi akan membuat rekristalisasi di *nugget zone* akan menurunkan efek dari *cold work*. Dan jika diamati nilai kekerasan terhadap parameter yang digunakan dalam penelitian ini, proses mekanik ini yang disebabkan oleh putaran pin tool mengakibatkan panas yang cukup tinggi. Proses deformasi mekanik dan konduksi panas tersebut menyebabkan pelunakan pada alumunium 2024.

### **Hasil Pengamatan Struktur Mikro Dari Material Alumunium**

Dari hasil pengamatan maka didapatkan struktur mikro pada daerah Las, *Haz*, Rivet. Berikut adalah struktur mikro hasil pengelasan *friction stir welding* pada temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C, dengan perbesaran 100x. Pada pengamatan tersebut berisi 9 gambar berisikan data tentang kondisi gambar las, haz, dan juga gambar rivet. Adapun tujuan dari pengamatan gambar dari mikro struktur tersebut iyalah agar mengetahui perbandingan dari setiap spesimen dengan tempertur 100°C, 150°C, dan 200°C. Dari gambar tersebut juga perbandingan akan terlihat yang erbedaan temperatur awal serta pengaruh dari pengelasan *spot friction stir welding*.



**Gambar 3. Struktur Mikro pada spesimen dengan temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C**

Pada pengamatan struktur mikro, maka dapat diketahui penampang melintang hasil pengelasan berupa kemungkinan cacat yang ditemukan. Pada pengelasan dengan parameter temperatur 100°C, 150°C, dan 200°C, struktur mikro menunjukkan adanya cacat pada setiap spesimen pengujian struktur mikro, akibat *tool* tidak mampu penetrasi ke *plat* secara sempurna, daerah adukan terbentuk meski tidak sempurna dan didapatkan *incomplete penetration*. Pada setiap spesimen pengujian yang dilakukan.

### Kesimpulan

Berikut kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini:

Peningkatan temperatur pada spesimen menyebabkan sifat mekanik yang cenderung meningkat pada tiap-tiap temperature 100°C, 150°C, dan 200°C yang di uji coba pada kekuatan geser pada spesimen. Hasil pengujian kekuatan geser yang terbaik pada temperatur 150°C dengan nilai sebesar 16,87 MPa.

Pengujian kekerasan menunjukkan bahwa nilai kekerasan dari tiap spesimen hasil dengan metode *friction stir welding* semakin menurun. Nilai kekerasan tertinggi ada di daerah spesimen kemudian menurun. Namun penurunan nilai kekerasan yang terjadi tidaklah sangat signifikan. Penurunan nilai kekerasan ini dikarenakan sifat material aluminium 2024 yang telah mengalami *strain hardened temper* di mana adanya panas yang cukup tinggi akan membuat rekristalisasi pada material spesimen. Uji kekerasan terbaik pada temperature 200°C dengan nilai 287,52 kg/mm.

Hal ini disebabkan karena munculnya pada struktur mikro dan hilangnya efek tempa dari panas yang dihasilkan dalam proses *friction stir welding*. *Friction stir welding* dilakukan dengan menggunakan

panas dengan temperatur dibawah titik lebur logam yang akan dilas secara teraduk oleh *tool*. Pengaruh putaran *tool* berperan penting dalam proses *friction stir welding* yang menentukan kualitas hasil lasan dan kemungkinan terjadinya *fusion/penetration*.

#### DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL NOTASI

AA	: Aluminium Alloy
HAZ	: Heat Affected Zone
SMAW	: Shielded Metal Arc Welding
SFSW	: Spot Friction Stir Welding
$\tau$	: tegangan geser (Pa)
F	: gaya (N)
A	: luas penampang (m <sup>2</sup> )
HV	: angka kekerasan vickers
VHN	: vickers, hardnes, number
F	: beban (kgf)
D	: diagonal (mm)
Mpa	: megapascal
Kg	: kilogram
mm	: mili meter
C	: celsius

#### Daftar Pustaka

- Avula, D., Devuri, V., Cheepu, M., & Dwivedi, D. K. (2018). Tensile Properties of Friction Stir Welded Joints of AA 2024-T6 Alloy at Different Welding Speeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 330(1).
- Derniawan, T. H., Nurdin, N., Fakhriza, F., & Mawardi, M. (2021). Analisa Pengaruh Putaran Spindel Pada Friction Welding Terhadap Tensile Strength Aluminium 6061. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 5(1), 46.
- Devireddy, K., Devuri, V., Cheepu, M., & Kranthi Kumar, B. (2018). Analysis of the influence of friction stir processing on gas tungsten arc welding of 2024 aluminum alloy weld zone. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 8(1), 243–252.
- Fuad, B. Y., Aisyah, I. S., & Kurniawati, D. (2020). Pengaruh Kombinasi Ketebalan Plat Aluminium 2024 T42 Terhadap Sifat Mekanis pada Proses Resistance Spot Welding Part Door Assy Helikopter NBELL 412EP. 151–162.
- Kelautan, F. T. (2015). Awal Terhadap Hasil Pengelasan Ulang Aluminium 5083 Ditinjau Dari Sifat Mekanik Dan Analysis Of Preheat Effect To Result Of Aluminium 5083 Reweld Reviewed From Mechanical Properties And Metallurgy On Hull.
- Nugroho, B., T., & Muhayat, N. (2018). Pengaruh plunge depth dan preheat terhadap sifat mekanik sambungan *friction stir welding polyamide*. *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, 11(2), 77.
- Nur, R., Sultan, A. Z., & Suyuti, M. A. (2017). Mechanical properties on friction stir welding of aluminum alloy 5052. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(15), 4445–4450.
- Özdemir, U., Sayer, S., & Yeni, Ç. (2012). Effect of pin penetration depth on the mechanical properties of friction stir spot welded aluminum and copper. *Materialpruefung/Materials Testing*, 54(4), 233–239.
- Saputra, L. I., Budiarto, U., & Jokosisworo, S. (2017). Jurnal teknik perkapalan. *Teknik Perkapalan*, 5(2), 421–430.
- Studi, P., Mesin, T., Tinggi, S., Wastukancana, T., Friction, M., Spot, S., & Pendahuluan, I. (2020). Pengaruh Geometri Lasan pada Plat Aluminium AA1100 Terhadap Sifat Mekanik Lasan Dengan Menggunakan Micro Friction Stir Spot Welding ( $\mu$ FSSW). 2019, 19–20.
- Suryanarayanan, R., & Sridhar, V. G. (2020). Materials Today : Proceedings Studies on the influence of process parameters in friction stir spot welded joints – A review. *Materials Today: Proceedings*, xxxx.
- Tama, A., Santosa, A. W. B., & Budiarto, U. (20 C.E.). Jurnal teknik perkapalan. *Teknik Perkapalan*, 5(2), 421–430.
- Tang, J., Shen, Y., 2017, Effects of preheating treatment on temperature distribution and material flow of aluminum alloy and steel friction stir welds, *Journal of Manufacturing Processes.*, 29, 29–40.

- Wang, H., Yang, K., & Liu, L. (2018). The analysis of welding and riveting hybrid bonding joint of aluminum alloy and polyether-ether-ketone composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 36(October), 301–308.
- Yajie, L., Fengming, Q., Cuirong, L., & Zhisheng, W. (2017). A review: Effect of friction stir welding on microstructure and mechanical properties of magnesium alloys. *Metals*, 7(12).
- Zhu, C., Tang, X., He, Y., Lu, F., Cui, H., 2018, *Effect of preheating on the defects and microstructure in NG-GMA welding of 5083 Al-alloy*, *Journal of Materials Processing Tech.*, 251, 214 – 224.