

INTISARI

Salah satu bahan utama untuk konstruksi pesawat terbang adalah aluminium paduan seperti AA2024-T3. Paduan AA2024-T3 memiliki ketangguhan dan ketahanan terhadap perambatan retak lelah yang sangat baik dan banyak digunakan pada badan pesawat (*fuselage*). Salah satu kelemahan AA2024-T3 adalah sifat mampu las rendah karena selalu terjadi retak pembekuan saat proses pengelasan busur. Permasalahan ini dapat diatasi melalui pemakaian teknik pengelasan *friction stir welding* (FSW) karena proses pengelasan FSW berlangsung pada kondisi padat dan masukan panas (*heat input*) rendah sehingga mampu mencegah terjadinya retak panas, porositas, tegangan sisa dan distorsi. Namun pengelasan FSW memiliki beberapa kelemahan di antaranya menghasilkan sambungan las yang memiliki sifat mekanis las relatif rendah dibanding logam induknya dan terjadinya tegangan sisa akibat panas lokal las. Adanya tegangan sisa las ini dapat menyebabkan penggetasan, penurunan ketahanan terhadap perambatan retak lelah dan terjadinya peretakan peka lingkungan. Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan pengelasan FSW aluminium AA2024-T3 dengan menambahkan perlakuan *transient thermal tensioning* (TTT), perlakuan *mechanical tensioning* berupa *in situ rolling tensioning* (ISRT) dan perlakuan *hybrid* TTT/ISRT. Penelitian ini bertujuan untuk mencari solusi dalam mengendalikan tegangan sisa dan distorsi yang selanjutnya dapat meningkatkan ketahanan laju perambatan retak lelah sambungan las FSW aluminium AA2024-T3 melalui pengembangan teknologi pengendalian tegangan sisa (*stress relieving*) dengan cara: (1) pemberian panas sekunder untuk menghasilkan *transient thermal tensioning* (TTT) dan (2) *in situ rolling* untuk menghasilkan *mechanical tensioning* (MT) dan (3) Pengaruh sinergis TTT dan ISRT.

Penelitian pada tahap pertama adalah pengelasan aluminium paduan AA2024-T3 menggunakan pengelasan FSW dengan variasi kecepatan putaran *tool* yaitu 950 rpm, 1500 rpm dan 2280 rpm sementara kecepatan pengelasan konstan sebesar 30 mm/menit. Dari penelitian ini diperoleh kecepatan putaran *tool* optimum yang menghasilkan sambungan FSW dengan sifat mekanik terbaik. Setelah mendapatkan putaran *tool* yang optimum, tahap selanjutnya adalah pengelasan FSW dengan penambahan perlakuan TTT dengan suhu 200°C. Perlakuan TTT dilakukan dengan menempatkan pemanas di depan *tool* pada kedua sisi las. Parameter yang diteliti pada perlakuan TTT ini adalah jarak pemanas. Selanjutnya, pengaruh perlakuan TTT terhadap struktur mikro dan sifat mekanis las seperti kekerasan, kekuatan tarik, tegangan sisa dan laju perambatan retak lelah dievaluasi. Penelitian tahap kedua adalah pengelasan FSW dengan perlakuan ISRT menggunakan beban yaitu 500 kg. Perlakuan ISRT dilakukan dengan dua metode yaitu ISRT *single roller* yang terletak di belakang alat las dan ISRT *double roller* yang terletak di belakang alat las pada kedua sisi garis las. Pada perlakuan ISRT *double roller* jarak antara pusat rol ke pusat las yaitu 17 mm dan 25 mm. Dari hasil karakterisasi material meliputi pengamatan struktur mikro dan makro, kekerasan, kekuatan tarik, tegangan sisa, fraktografi SEM dan laju perambatan retak lelah, dapat ditentukan ISRT terbaik yang menghasilkan sambungan FSW dengan sifat mekanik yang sangat baik. Parameter optimum yang menghasilkan sambungan

FSW terbaik untuk perlakuan TTT dan ISRT kemudian dipilih untuk penelitian lebih lanjut pada tahap ketiga, yaitu perlakuan *hybrid* TTT dan ISRT.

Hasil penelitian pada tahap pertama menunjukkan bahwa nilai kekerasan pada daerah *weld nugget* (WNZ) dan daerah *thermomechanically affected zone* (TMAZ) mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan kecepatan putaran *tool*. Kekuatan tarik ultimate (UTS) terbaik dengan nilai 344,4 MPa diperoleh pada putaran *tool* 1500 rpm, sedangkan kekuatan tarik terendah (268,9 MPa) diperoleh pada kecepatan putar *tool* 2280 rpm. Penambahan perlakuan *transient thermal tensioning* (TTT) dengan suhu pemanasan sekunder 200°C menyebabkan butiran pada daerah WNZ menjadi halus karena proses rekristalisasi dinamis. Distribusi kekerasan menunjukkan profil berbentuk huruf W dengan puncak kekerasan terjadi pada bagian tengah las sedangkan nilai kekerasan terendah terjadi pada daerah WNZ yang berdekatan dengan TMAZ baik pada sisi *advancing side* (AS) maupun sisi *retreating side* (RS). Profil distribusi seperti ini biasanya terjadi pada pengelasan paduan aluminium yang dapat diberi perlakuan panas (*heat treatable*) seperti AA2024-T3 karena pengerasan presipitasi. Konsisten dengan profil kekerasan, lokasi patahan pada pengujian tarik untuk semua sambungan las terjadi di daerah WNZ dekat daerah TMAZ pada sisi maju atau *advancing side* (AS) karena panas gesekan yang lebih tinggi. Pengurangan tegangan sisa yang terbaik yang meningkatkan performa pertumbuhan retak fatik terjadi pada las FSW dengan penambahan perlakuan TTT dengan suhu pemanasan 200°C dan dengan jarak pemanasan 25 mm dari garis tengah las. Penerapan perlakuan ISRT *roller* tunggal secara efektif menghaluskan butiran di daerah NZ, sedangkan pada perlakuan ISRT *rol ganda*, kehalusan butiran berkurang. Penerapan ISRT meningkatkan kekerasan pada bagian tengah WNZ dengan ISRT *roller* tunggal menghasilkan kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan ISRT *roller* ganda. Selain itu, ISRT *roller* tunggal lebih efektif dalam meminimalkan tegangan sisa yang dapat dikaitkan dengan efek *mechanical tensioning* dan terjadinya penghalusan butiran di area NZ. Namun, dalam hal meminimalisasi distorsi, ISRT *roller* ganda lebih baik daripada ISRT *roller* tunggal. Laju pertumbuhan retak fatik pada perlakuan ISRT berkurang yang disebabkan oleh tegangan sisa yang rendah, struktur mikro butiran halus terutama pada permukaan atas daerah WNZ. Penggunaan perlakuan *hybrid* TTT dan ISRT menghasilkan distribusi nilai kekerasan pada penampang melintang pada setiap spesimen menghasilkan distribusi berbentuk profil “W”. Kekuatan tarik tertinggi, dengan nilai 297,9 MPa diperoleh pada sambungan las FSW *hybrid* TTT/ISRT yang memiliki beban 800 kg. Peningkatan kekuatan tarik ini kemungkinan disebabkan oleh pengaruh penambahan perlakuan *in situ rolling* yang membentuk butiran struktur mikro yang lebih halus. Perlakuan kombinasi pengerolan *in situ rolling* dan TTT menghasilkan ketahanan pertumbuhan retak lelah tertinggi di antara sambungan FSW yang diteliti. Jumlah siklus kegagalan pada beban dinamis untuk sambungan FSW konvensional adalah 307.205 siklus, sedangkan sambungan FSW dengan perlakuan *hybrid* TTT/ISRT adalah 1.334.950 siklus yang berarti 4,3 kali lebih tinggi dibandingkan sambungan FSW konvensional. Peningkatan jumlah siklus juga terjadi pada spesimen dengan penambahan perlakuan TTT yaitu sebanyak 700.470 siklus, sedangkan pada spesimen dengan perlakuan ISRT sebanyak 901.055 siklus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan

perlakuan TTT dan ISRT mampu meningkatkan ketahanan perambatan retak lelah pada sambungan FSW AA2024-T3 dan performa lelah terbaik dicapai dengan menggabungkan perlakuan TTT/ISRT yang dikenal sebagai perlakuan *hybrid* TTT/ISRT karena efek sinergis dari tegangan termal dan tegangan mekanis yang secara efektif mengurangi tegangan sisa las. Pada perlakuan *hybrid* TTT/ISRT, tegangan sisa tarik yang umumnya terbentuk pada daerah las menjadi tegangan sisa tekan sehingga distribusi tegangan sisa memperlihatkan profil berbentuk M yang ditunjukkan oleh adanya puncak tegangan sisa tarik yang tinggi di HAZ dan tegangan sisa tekan di WNZ.

Kata Kunci: Aluminium AA2024-T3, *Friction Stir Welding*, *Transient Thermal Tensioning*, *In situ Rolling Tensioning*, Laju Perambatan Retak Fatik.

ABSTRACT

One of the main materials used for aircraft construction is aluminum alloy such as AA2024-T3. AA2024-T3 alloy has high strength to weight ratio, high toughness and good resistance to fatigue crack propagation so that this alloy is widely used for aircraft fuselages. One of the disadvantages of AA2024-T3 is its low weldability because of solidification cracking which always occur during arc welding process. This problem may be overcome by using friction stir welding (FSW) because the FSW welding process takes place in the solidstate condition and low heat input so that it can prevent hot cracking, porosity, residual stress and distortion. However, FSW welding has several weaknesses, i.e. it produces weld joints with relatively low mechanical properties compared to the base metal and the occurrence of residual stress due to local welding heat. The presence of this residual welding stress can cause embrittlement, a decrease in resistance to fatigue crack propagation and the occurrence of environmentally sensitive cracking. To address these problems, FSW processes of AA2024-T3 aluminum were carried out by the use of in-process transient thermal tensioning (TTT) treatment, mechanical tensioning treatment in the form of in-situ rolling tensioning (ISRT) and hybrid TTT/ISRT treatments. This study aims to find a solution in controlling residual stress and distortion which in turn improving resistance to fatigue crack propagation rate of FSW aluminum AA2024-T3 welded joints through the development of residual stress mitigating technology (stress relieving) by means of: (1) secondary heating to generate transient thermal tensioning (TTT), (2) in-situ rolling to create mechanical tensioning (MT) and (3) synergistic effect of TTT and ISRT.

The first stage of the research works was to join AA2024-T3 aluminum alloy using FSW with variation in tool rotation speed of 950 rpm, 1500 rpm and 2280 rpm whilst the welding speed was maintained constant at 30 mm/minute. From this study, the optimum tool rotation speed which produces the FSW joint with the best mechanical properties was obtained. After obtaining the optimum rotation, the next step was to introduce TTT treatment at a heating temperature of 200°C during FSW process. The TTT treatments were done by placing the heaters in front of the tool at both sides of the weld. The parameters studied in this TTT treatment were the heater distance. Furthermore, the effect of TTT treatment on the microstructure and mechanical properties of the weld such as hardness, tensile strength, residual stress and fatigue crack propagation rate were evaluated. The second stage of the research works was to perform ISRT during FSW process using a load of 500 kg. The ISRT treatments were carried out using two methods, i.e. a single roller located behind the tool known as single ISRT and two rollers located behind the tool at both sides of the weld line known as double roller ISRT. In double roller ISRT, the distance between roller center to weld center was varied, i.e. 17 mm and 25 mm. From the results of material characterizations including microstructure and macrostructure, hardness, tensile strength, residual stress, SEM fractography and fatigue crack propagation rate, it can be determined the best ISRT which gives the FSW joint with excellent mechanical properties. The optimum parameters which produce the best FSW joints for TTT and ISRT treatments were

then selected for further investigation in the third stage, namely in-process hybrid treatment of TTT and ISRT.

The results of the first stage showed that the hardness values in the weld nugget zone (WNZ) and thermomechanically affected zone (TMAZ) increased with increasing tool rotation speed. The best ultimate tensile strength (UTS), typically 344.4 MPa was obtained at a tool rotation speed of 1500 rpm, and in contrast, the lowest ultimate tensile strength (268.9 MPa) was obtained at a tool rotation speed of 2280 rpm. The addition of transient thermal tensioning (TTT) treatment at a secondary heating temperature of 200°C caused the grains in the WNZ area to become finer due to the dynamic recrystallization process. The hardness distribution showed a W-shaped profile with the peak hardness occurring in the middle of the weld while the lowest hardness values occurred in the WNZ adjacent to the TMAZ of the advancing side (AS) and the retreating side (RS). Such a distribution profile commonly occurs in welding of heat treatable aluminum alloys such as AA2024-T3 due to reprecipitation hardening. Consistent with the hardness profile, the fracture location under tensile testing for all welded joints occurred in the WNZ near the TMAZ area of the advancing side (AS) at which the frictional heat was higher. The best residual stress reduction which improved fatigue crack growth performance occurred in FSW joint as the heater distance was 25 mm from the weld centerline at a heating temperature of 200°C. The application of single roller ISRT treatment refined the grains in the WNZ more effectively than the double roller ISRT treatment. The application of ISRT increased the hardness in the center of the WNZ with single roller ISRT producing higher hardness than double ISRT. In addition, single roller ISRT was more effective in minimizing residual stress which could be associated with mechanical tensioning and the occurrence of grain refinement in the NZ area. However, in term of minimizing distortion, double roller ISRT was better than single roller ISRT. The fatigue crack growth rate in ISRT treatment is reduced due to low residual stress, fine grained microstructure, especially on the upper surface of the WNZ. The use of hybrid TTT and ISRT treatment results in a “W” shaped profile distribution. The highest tensile strength, typically 297.9 MPa was achieved by the hybrid TTT/ISRT treated FSW joint having the load of 800 kg. This increase in tensile strength was likely due to the influence of in situ rolling which forms finer microstructure. The combination treatment of in situ rolling and TTT produces the highest fatigue crack growth resistance among the FSW joints under study. The number of cycles to failure under dynamic loads for conventional FSW joint is 307,205 cycles, while the hybrid TTT/ISRT treated FSW joint is 1,334,950 cycles which 4.3 times higher than conventional FSW joint. The increase in the number of cycles also occurs in the TTT treated FSW joint, that is 700,470 cycles whereas under ISRT treatment, the number of cycles was 901,055 cycles. The results have confirmed that the applications of TTT and ISRT treatments improve the fatigue crack propagation resistance of FSWed AA2024-T3 joints and the best fatigue performance was achieved by combining TTT/ISRT known as hybrid TTT/ISRT treatments due to synergistic effects of thermal tensioning and mechanical tensioning which effectively reduced the weld residual stress. Under hybrid TTT/ISRT treatment, the tensile residual stress which commonly formed in the weld region becomes

compressive so that the residual stress distribution exhibits M shaped profile as indicated by the presence of high peaks of tensile residual stress in HAZ and compressive residual stress in WNZ.

Keywords: Aluminum AA2024-T3, Friction Stir Welding, Transient Thermal Tensioning, In-situ Rolling Tensioning, Fatigue Crack Propagation Rate.