

TEKNOLOGI TERKINI FRICTION STIR WELDING UNTUK APLIKASI DI DUNIA PENERBANGAN

Mochammad Syamsul Ma'arif
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Indonesia,
Jalan MT. Haryono No. 169 Malang, Jawa Timur, Kodepos 65145,
Indonesia

* E-mail: syamsulm@ub.ac.id

Abstract

Friction Stir Welding (FSW) merupakan sebuah proses yang mempunyai keunggulan dalam efisiensi energi, ramah terhadap lingkungan, dan versatile dibandingkan dengan fusion welding. Proses ini terutama sekali digunakan untuk menyambung aluminium dan paduannya karena logam ini berkarakter mampu mengalir pada laju regangan yang tinggi dan bercampur dalam keadaan tidak leleh. Meskipun demikian, untuk aplikasi industri manufaktur pesawat terbang, proses ini masih mempunyai kelemahan ketika diaplikasikan untuk menyambung struktur yang mempunyai bentuk kompleks. Kelemahan ini terutama diakibatkan karena mesin las untuk FSW hanya mampu bergerak dalam dua dimensi dan gaya yang dibangkitkan selama proses sangat besar.

Agar lebih versatile, maka FSW biasanya dipasangkan dengan robot manipulator sehingga mampu mengelas dalam tiga dimensi. Agar cocok digunakan di manipulator, maka harus diusahakan agar gaya yang dibangkitkan selama proses menjadi sekecil mungkin. Makalah ini berusaha untuk mengulas tentang state-of-the-art tentang pemahaman dan pengertian terhadap pengembangan sub-klas FSW untuk memenuhi persyaratan tersebut diatas. Ulasan terutama difokuskan terhadap non-rotating shoulder tool FSW, Thermal Stir Welding serta Heat Assisted FSW serta penggunaan robot manipulator dalam proses FSW.

Keywords :Teknologi Terkini; Friction Stir Welding; Penerbangan.

PENDAHULUAN

Meningkatnya jumlah *payload* dan tuntutan efisiensi bahan bakar telah menjadi tantangan bagi industri pesawat terbang untuk membuat pesawat terbang yang berbobot ringan serta mempunyai kekuatan struktur yang memadai. Guna menjawab tantangan ini, maka industri ini selalu berpaling kepada material aluminium paduan, terutama tipe A2024, 6061, 6063, 6082, 7075 and 8090 [1]. Selain melakukan inovasi pada material, juga telah dilakukan usaha memangkas waktu dan ongkos produksi serta jika memungkinkan untuk memperbaiki sifat mekanik dari struktur pesawat terbang [2]. Akibatnya, sambungan keling sebagai metode konvensional untuk menyambung bagian-bagian pesawat telah banyak digantikan oleh proses pengelasan. Proses pengelasan dengan memakai metode las fusi terbukti banyak menimbulkan permasalahan seperti inklusi slag, distorsi, solidification cracking, terbentuknya void di manik las akibat ketidaksesuaian material filler, terbentuknya oksida aluminium, larutnya

oksigen dsb [3], [4]; [5]. Sehingga industri tersebut menggunakan metode pengelasan yang bisa meminimalisir hal tersebut diatas dengan mengadopsi proses *Laser Beam Welding* (LBW) dan proses *Friction Stir Welding* (FSW) [6].

Khusus untuk proses FSW, sejak tahun 1999 NASA menggunakan proses ini untuk menyambung tangki bahan bakar luar yang merupakan aplikasi pertama di bidang penerbangan [7]. Meskipun menghasilkan produk dengan kemampuan ulangan dan reliabilitas yang baik serta mampu menyambung paduan logam ringan, tetapi proses ini mempunyai kelemahan dalam *set-up* (memerlukan sistem clamping khusus), hanya cocok untuk jenis sambungan yang sederhana (*butt-weld*) serta masih membutuhkan lisensi dari TWI sebagai pemegang paten [6]. Dari tiga kelemahan ini, kelemahan kedua (*versatility*) dari proses pengelasan ini perlu untuk segera diperbaiki. Sudah jamak diketahui bahwa struktur pesawat terbang bukanlah struktur yang

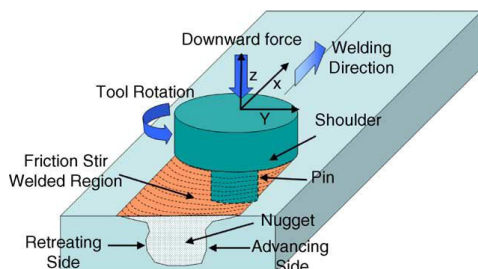
sederhana karena banyak bagian-bagiannya yang berbentuk kurva (3 dimensi) sehingga membatasi aplikasi FSW. Ada pilihan proses pengelasan lain yaitu LBW tetapi proses ini cenderung menghasilkan porositas dan daerah HAZ yang tampak jelas meskipun kecepatan pengelasan dan laju korosi benda lasan masih dipandang seimbang [2].

Kemampuan untuk mengikuti kontur tersebut menjadi masalah terutama karena gaya dan torsi yang dibangkitkan pada proses ini sangat besar sehingga sangat umum terjadi proses FSW memakai mesin perkakas yang besar. Akibatnya proses pengelasan sering terbatas pada pengelasan 2 dimensi (2-D). Agar mampu melakukan pengelasan dalam 3 dimensi (3-D) maka dibutuhkan konfigurasi mekanik khusus serta strategi kontrol baik untuk mendapatkan lintasan 3-D yang mulus.

Memakai konfigurasi mekanik khusus (mesin FSW) tidak menjadi ide yang populer terutama bagi industri. Untuk itu, pemakaian manipulator menjadi kajian yang diusulkan dalam mengatasi kendala pengelasan 3-D ini. Agar bisa dipakai untuk proses FSW maka hal pertama yang perlu diselesaikan adalah masalah keterbatasan beban maksimum dan perturbasi yang terjadi selama proses. Permasalahan beban maksimum bisa diatasi dengan memperbesar *work envelope* dengan pengaturan *work-cell layout* dan mengurangi gaya dan torsi yang dibangkitkan selama proses. Sedangkan perturbasi diatasi dengan merancang kontroler yang sesuai [11].

PROSES FRICTION STIR WELDING

Nomenklatur FSW

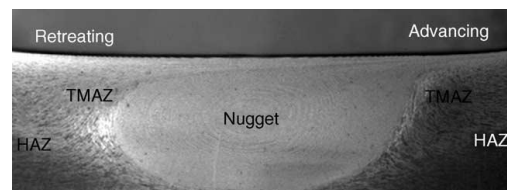


Gambar 1. Diagram skematik proses FSW [12]

Proses FSW ditemukan oleh The Welding Institute (TWI) di tahun 1991 sebagai sebuah teknik penyambungan keadaan-padat. Secara

prinsip, proses ini sangat sederhana yaitu tool yang tidak terumpan dengan pin dan bahu (*shoulder*) yang didesain khusus di masukkan dan diputar di sisi-sisi spesimen serta berjalan sepanjang spesimen untuk membentuk sambungan. Tool mempunyai dua macam fungsi yaitu fungsi pembangkitan energi dan pengaduk material lumer untuk membentuk sambungan.

Parameter proses yang penting dalam proses FSW ini adalah kecepatan putar *tool* (ω , rpm), kecepatan transversal (mm/min), kedalaman masuk *tool* (mm) serta kemiringan *tool* relatif terhadap garis vertikal (derajat).



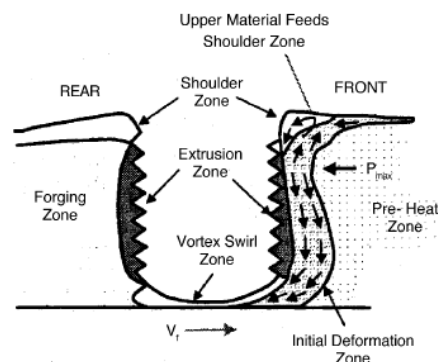
Gambar 2. Gambar makro sambungan las FSW [12]

Bentuk dari sambungan las proses ini dapat dilihat pada Gambar 2.

Pemodelan proses FSW

- Aliran logam

Secara umum aliran logam dalam proses FSW sangat tergantung kepada geometri *tool*, parameter proses, dan material logam/non logam yang disambung. Untuk mempelajari aliran logam dalam proses FSW, beberapa teknik yang dapat dipakai adalah antara lain teknik *tracer* dengan memakai *marker* (pewarna), pengelasan material yang berbeda, serta metode *Finite Element Analysis* (FEA) [12].



Gambar 3. Pola aliran logam di proses FSW [13]

Panas yang dibangkitkan selama proses pengelasan selalu diasumsikan terjadi dalam laju yang konstan kecuali pada awal dan akhir proses [14], [15]. Pada penampang melintang diasumsikan mempunyai geometri geometri, struktur dan sifat mekanik yang sama (*quasi-steady behaviour*). Aliran massa material dianggap sebagai aliran non-Newtonian, *incompressible*, dan *viscoplastic*. Tegangan geser maksimum untuk material dinyatakan dalam [14]:

$$\tau = \sigma_{yield} / \sqrt{3} \quad (1)$$

Dimana:

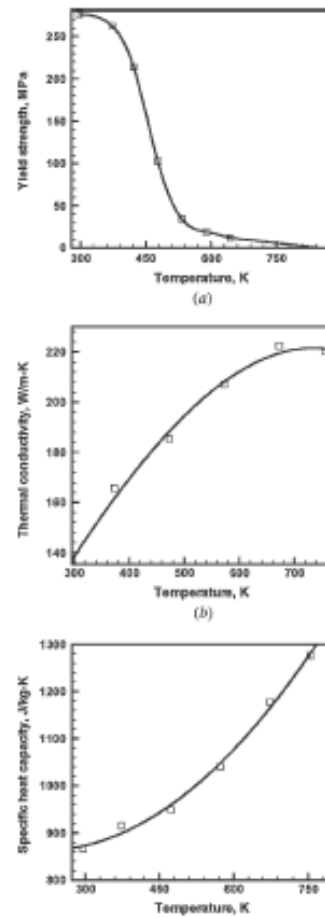
σ_{yield} = Tegangan yield yang didasarkan pada teori distorsi energi untuk tegangan bidang.

Karena pada proses FSW mengambil asumsi sebagai material non-Newtonian maka viskositas selama proses dinyatakan dalam [14]:

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3 \dot{\epsilon}} \quad (2)$$

Dimana:

$\dot{\epsilon}$ = *effective strain rate*.

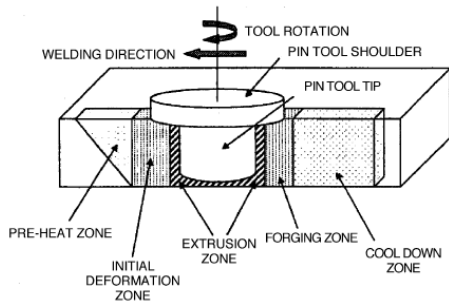


Gambar 4. Variasi *yield strength*, *thermal conductivity*, dan *specific capacity* terhadap temperatur [14]

Gambar 4 diatas maka menampilkan *yield strength*, *thermal conductivity* dan *specific heat capacity* sebagai fungsi dari temperatur yang diberikan menurut persamaan 1 dan 2.

- Distribusi temperatur

Proses FSW akan menyebabkan deformasi plastis yang sangat intensif terutama di sekitar tool yang berputar dan daerah gesekan antara tool dan benda kerja.



Gambar 5. Zona proses metalurgis pada proses FSW [13]

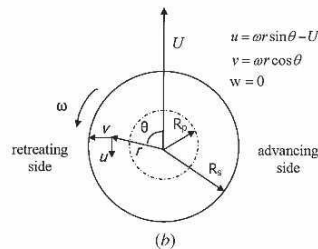
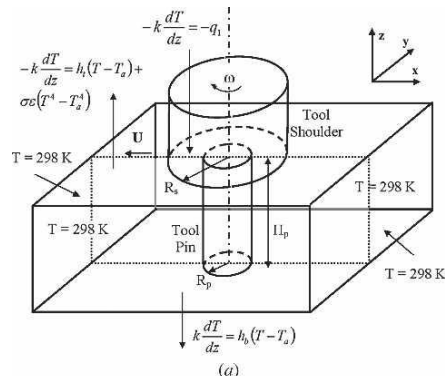
Distribusi temperatur akan sangat mempengaruhi mikrostruktur hasil lasan, termasuk ukuran butir, karakter batas butir, serta coarsening dan disolusi presipitat yang pada gilirannya akan mempengaruhi kekuatan mekanik hasil lasan.

Adalah tidak mudah untuk memperoleh informasi tentang distribusi temperatur, terutama daerah pengadukan (*stirred zone*), proses FSW karena sangat intensnya deformasi plastis di daerah tersebut. Akibatnya distribusi temperatur pada daerah tersebut didapatkan dengan memperkirakan besarnya berdasarkan mikrostruktur yang terjadi atau melakukan pengukuran didekat daerah tersebut dengan termokopel.

Pada proses ini, pembangkitan panas terbesar terjadi dibawah bahu *tool* (*tool shoulder*) dan menunjukkan *thermal gradient* mulai dari permukaan yang bersentuhan dengan *tool* sampai ke permukaan bawah benda kerja. Ditambah dengan sifat proses FSW yang *transient*, maka tidak ada penyelesaian analitis yang mudah untuk persoalan aliran panas di dalam proses ini. Oleh karena itu, sering dipakai solusi numerik yang didasarkan pada diskritasi hukum kedua Fourier (Carslaw, 1959 [16]).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_0}{V} \quad (3)$$

Dimana
 ρc = kapasitas panas volume
 $x, y, \text{ dan } z$ = koordinat ruang
 q_0/V = sumber panas.



Gambar 6. Diagram skematik (a) kondisi batas termal (*thermal boundary condition*) sistem FSW (b) pandangan atas kondisi batas kecepatan (*velocity boundary condition*) di permukaan *tool* [14].

- Gaya dan torsi

Memakai Gambar 5.a sebagai rujukan, maka torsi yang dibutuhkan untuk untuk memutar poros (*tool shoulder*) yang dikenai beban axial tertentu (F_z) dapat dinyatakan sebagai [17]; [18], [19]):

$$M = \int_0^{M_R} dM = \int_0^R \mu P(r) 2 \pi r^2 dr = \frac{2}{2} \mu \pi P R^3 \quad (4)$$

Dimana:
 M = torsi
 μ = koefisien gesek
 R = jari-jari
 $P(r)$ = distribusi tekanan sepanjang permukaan yang diasumsikan seragam (P).

Jika seluruh gesekan berubah menjadi panas, maka didapatkan masukan panan (*heat input*) per luasan per waktu [20]; [19]

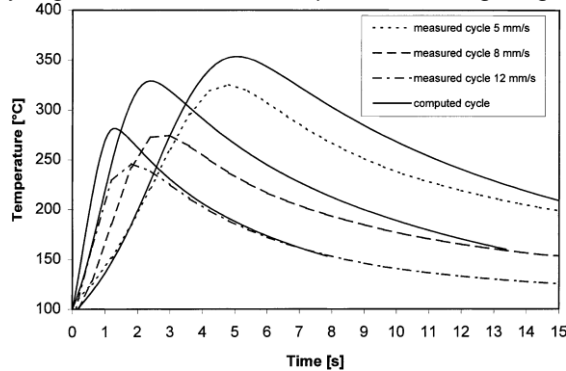
$$q_0 = \int_0^{M_R} \omega dM = \int_0^R \omega 2 \pi \mu P r^2 dr \quad (5)$$

Dimana:
 q_0 = daya bersih (Watt)
 ω = kecepatan angular (rad/s).

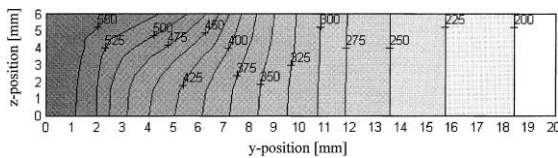
Dengan substitusi akhirnya didapatkan

$$q_0 = \int_0^R 4 \pi^2 \mu P N r^2 dr = \frac{4}{3} \pi^2 \mu P N R^3 \quad (6)$$

Dari persamaan (6) dengan jelas dapat diketahui bahwa heat input sangat tergantung kepada kecepatan putar dan jari-jari *tool* sehingga menyebabkan pembangkitan panas yang non-uniform selama proses berlangsung.



Gambar 7. Perbandingan antara perhitungan dan pengukuran siklus termal antara 3 (tiga) kecepatan pengelasan yang berbeda [19].

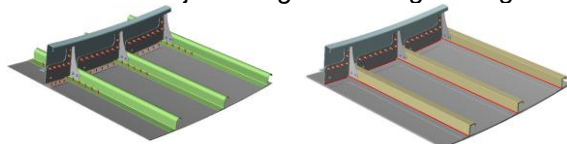


Gambar 8. Plotting kontur temperatur puncak terhitung (*computed peak temperature*) pada sumbu y (arah traverse) untuk kecepatan pengelasan 8mm/s [19].

APLIKASI PROSES FSW PADA PROSES MANUFAKTUR PESAWAT TERBANG

Konsep desain pesawat terbang

Konsep desain pesawat terbang telah mengalami pergeseran dari *Differential Structures* menjadi *Integral Fuselage Design*.



Gambar 9. *Differential Structures* vs *Integral Fuselage Design* [6]

Sejarah implementasi proses FSW pada proses manufaktur pesawat terbang

Untuk mewujudkan pendekatan desain baru ini maka diperlukan material serta proses produksi baru yang salah satunya adalah FSW.

Aplikasi proses FSW dalam proses manufaktur di industri penerbangan diawali oleh NASA untuk menyambung tangki luar bahan bakar pesawat ulang alik yang pertama kali menggunakan bahan Al 2219 dan selanjutnya menggunakan Al-Li 2195 [21]). Karena Al-Li 215 merupakan material yang super ringan maka proses yang lebih *robust* menjadi persyaratan. Dalam proses pengembangannya, Marshall Space Flight Centre mengembangkan *Retractable Pin Tool* (RPT) dan *Friction Stir Plug Welding* [22]. Selanjutnya, *United Launch Alliance* (ULA) mengimplementasikan proses FSW untuk roket Delta II, Delta IV, serta Atlas V. Untuk porsi yang lebih besar, roket Falcon IX milik SpaceX mengimplementasikannya untuk sambungan las *longitudinal* dan *circumferential* [23]).

Di pihak lain, NASA juga melanjutkan keponirannya dalam mengimplementasikan proses FSW ke struktur kendaraan angkasa seperti *Orion Multi-purpose Crew Vehicle* serta *Space launch System* (SLS) [24]).

Di bidang penerbangan, Airbus Industries menggunakan proses FSW untuk memproduksi komponen dan bagian struktur pesawat terbang terutama dari material 2XXX dan 7XXX untuk longitudinal fuselage skin joints dan wingspans untuk pesawat A340, 350, dan A380 [6]), [25]). Demikian juga untuk lantai pesawat angkut militer A400 [25]. Industri manufaktur pesawat lainnya yaitu Eclipse Aviation mengimplementasikan proses ini dalam pembuatan pesawat Eclipse 500 VLJ [26], [27].

Di pihak lain, Embraer juga telah menguji kelayakan proses ini untuk manufaktur pesawat Legacy 450 dan Legacy 500 [28]. Sedangkan Bombardier juga telah menguji proses ini untuk memproduksi pesawat regional mereka [29].

OTOMASI PROSES FRICTION STIR WELDING

Proses FSW merupakan proses yang menggunakan tool yang berputar yang mirip dengan proses kerja proses milling. Oleh karena itu banyak penelitian dalam bidang ini dilakukan dengan menggunakan platform mesin milling baik yang konvensional maupun CNC. Tetapi karena sifat dari proses FSW yang melibatkan gaya yang sangat besar,

maka mesin perkakas berkapasitas besar menjadi pilihan [11], [30]. Sebagai tambahan, maka mesin milling tersebut dilengkapi dengan sensor gaya dan sensor lainnya yang berfungsi sebagai instrumen pengumpul data yang selanjutnya dapat dipakai untuk sistem akuisisi data atau kontrol [31].

Custom built FSW machine

Meskipun mesin milling (terutama yang mempunyai kontrol gerakan) dengan mudah bisa difungsikan sebagai mesin FSW, tetapi untuk tujuan riset masih memerlukan tambahan berupa sensor dan aktuator. Sensor yang diperlukan biasanya berupa sensor gaya dan torsi serta aktuator yang ditambahkan agar meja mesin perkakas mempunyai kemampuan untuk bergerak secara terkontrol. Tidak lupa juga, sebuah sistem kontrol perlu untuk dikembangkan agar gerakan mesin dapat mengikuti apa yang telah diprogramkan sebelumnya.

Dedicated FSW machine

Mesin FSW ini memang dirancang khusus untuk melakukan proses pengelasan dengan kemampuan yang bervariasi. Meskipun demikian, mengakuisisi mesin yang sangat khusus seperti dipandang tidak menguntungkan bagi perusahaan-perusahaan yang memproduksi alat-alat transportasi seperti pesawat terbang, mobil, kapal dll karena ongkos produksi yang mahal (*high productivity losses*) karena ketidakkampuannya dalam memenuhi high duty cycles [32].

Beberapa contoh dari mesin FSW adalah dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11 berikut.



Gambar 10. Mesin FSW (horizontal) dari RV Machine Tools Model FSW 100-2000 [33].



Gambar 11. Mesin FSW (vertikal) dari Gatwick Machine Industries model CNC 15FSW [34]

Manipulator-based FSW machine

Karena proses FSW membutuhkan gaya yang sangat besar serta mesin yang dibuat khusus seperti custom built dan dedicated FSW machine masih mempunyai kelemahan dalam hal ongkos produksi, maka sejak tahun 1996 mulai diteliti kemungkinan penggunaan robot manipulator untuk aplikasi FSW. Secara sekilas, robot yang akan digunakan untuk proses ini harus mempunyai kemampuan yang besar serta perlu tambahan sistem kontrol untuk mengatasi sifat link robot yang kurang kaku agar ketelitian proses dapat terjaga.

Karena itu, maka robot yang digunakan biasanya punya load sampai dengan 500 kg. Beberapa robot awal yang digunakan untuk melakukan proses ini adalah ABB IRB 6400 dan Neos Tricept Robot seperti yang terlihat pada Gambar 12 dan 13 berikut.



Gambar 12. ABB IRB 6400 untuk aplikasi FSW [32].



Gambar 13. Neos Tricept Robot untuk aplikasi FSW [32].

Kemajuan teknologi di bidang robot manipulator juga memberi pengaruh yang baik terhadap kemajuan *robotic FSW* terutama dengan munculnya *serial kinematic robot* yang mempunyai payload yang jauh lebih besar dari robot sebelumnya. Beberapa industri pembuat robo, seperti ABB dan Kuka, mengeluarkan seri produksi mereka dengan fitur tersebut yang mempunyai payloads sampai dengan 500 kg. Robot-robot seperti ABB Robotics IRB7600, IRB940 yang mempunyai link yang lebih kaku dibandingkan dengan robot sebelumnya sangat membantu membuat FSW menjadi proses produksi yang mungkin dilakukan dengan robot manipulator.

Untuk melakukan fungsi pengelasan sebuah *end effector* khusus untuk FSW dirancang. *End effector* ini terdiri dari *spindle*, motor servo untuk menggerakkan *spindle* dan perangkat lunak sistem kontrol.



Gambar 14. ABB Robotic IRB7600 dengan FSW end effector [32].

Sistem kontrol ditambahkan kedalam sistem kontrol asli robot yang ditulis dalam bahasa tingkat tinggi. Beberapa fitur yang diadopsi oleh sistem kontrol ini adalah [32]:

- Mampu beroperasi dalam *force-controlled mode* sebagai oposisi terhadap *position-controlled mode*.
- Mempunyai kemampuan untuk beroperasi dalam *position controlled-mode*.
- Kemampuan untuk secara presisi memposisikan posisi dan orientasi tool selama proses karena hal ini sangat kritikal terhadap keberhasilan proses.
- Kemampuan untuk lebih baik dalam mengajari robot manipulator karena dalam programnya, end effector selalu diprogram dalam keadaan bersentuhan dengan material sehingga ketika melakukan dry run sebuah cara harus ditentukan agar posisi tool berada di atas benda kerja.
- Kemampuan untuk mencatat parameter yang nantinya berguna untuk melakukan proses pengelasan yang spesifik.

Sensor dan sistem kontrol

Sensor bertugas untuk mengukur gaya-gaya yang terjadi pada proses pengelasan yaitu gaya aksial (F_z), gaya transversal (F_x), dan gaya samping (F_y), disamping kadangkala juga diperlukan untuk mengukur torsi (M_z atau T). Sensor ini banyak dipakai untuk melihat kedalam proses untuk selanjutnya bisa dipakai untuk menentukan karakteristik proses serta kontrol proses yang bermuara pada perbaikan kemampuan adaptasi proses dalam lingkungan industri atau bahkan dipakai sebagai salah satu cara untuk mengikuti jalur pengelasan dan perbaikan proses.

Sensor yang dipakai bisa berupa *load cell* yang banyak tersedia di pasaran dengan dua kemungkinan lokasi pemasangan yaitu 1) di pemegang *tool* [33] dan 2) di meja kerja dimana spesimen dicekam [11].

Kadang kala karena faktor harga *load cell* yang tinggi, beberapa peneliti menggunakan sensor yang lebih murah untuk mengukur gaya [34], [35], [36], [7].

Sedangkan kontrol untuk proses FSW secara sederhana terbagi menjadi beberapa kategori yaitu kontrol posisi [37]), kontrol gaya [38] [39]), [40]), hibrid antara keduanya, atau salah

satu diantaranya ditambah dengan variabel lain seperti kontrol hibrid gaya dan temperatur [40] dll.

Jika mesin FSW yang digunakan adalah mesin perkakas atau mesin pengelasan yang didedikasikan berkapasitas besar maka ketelitian gerakan *tool* dan rigiditas sistem dapat dijamin dengan mudah. Tentunya, spesimen juga harus diperhatikan dengan memberikan pencekaman yang sesuai. Tetapi jika yang digunakan adalah mesin yang kurang rigid, seperti robot manipulator, maka muallilah timbul permasalahan seperti yang telah dibahas di bagian awal.

Sensor posisi sebenarnya cukup mampu untuk menghasilkan lasan yang konsisten jika mesin perkakas cukup rigid, spesimen terjaga konsistensi dimensinya serta mekanisme pencekaman baik. Tetapi jika salah satu faktor tersebut tidak tercapai maka hasil lasan yang konisten sulit untuk dicapai.

Sebagai langkah perbaikan, kontrol gaya pada proses FSW akan mampu untuk menghasilkan lasan yang konsisten ketika kondisi proses tidak ideal seperti diatas. Untuk menjaga agar gaya pengelasan (biasanya F_z) tetap terjaga maka ada beberapa metode yang bisa dipakai untuk mengaturnya seperti posisi *tool* relatif terhadap permukaan benda kerja, kecepatan maju (traverse speed), dan kecepatan putar *tool* [40].

Meskipun demikian, kontrol ini masih mempunyai kelemahan ketika *tool* terlalu dalam masuk ke spesimen atau temperatur proses naik secara signifikan sehingga proses menjadi tidak stabil. Akibatnya beberapa peneliti mencoba untuk memasukkan variabel temperatur sebagai salah satu parameter pengontrolan.

INOVASI PROSES FSW

Dengan tujuan untuk mengurangi gaya yang timbul pada proses pengelasan, maka beberapa inovasi yang sudah dilakukan dalam proses pengelasan adalah sebagai berikut.

Heat assisted FSW

Tujuan utama dari varian FSW ini adalah menurunkan gaya pengelasan dengan cara memberikan panas tambahan disamping juga mampu mengurangi keausan pahat yang terjadi. [30]) membuktikan bahwa dengan memanaskan mula spesimen dengan pemanas induksi sebelum proses dapat mengurangi gaya sampai dengan 21% dari total gaya. Metode

yang sama juga dilakukan oleh [42], [43]. Beberapa metode lain seperti dengan memakai laser [44], [45], [46], *electric resistance* [47], [48]; [49]), dengan micro-plasma [50]), dengan las TIG [51]), another mechanical friction heat [52]), GTAW [53] dan gelombang ultrasonik [54] [55]).

Non-rotating shoulder FSW

Non-rotating shoulder FSW atau *Stationary Shoulder* FSW pada mulanya dikembangkan oleh TWI untuk melakukan pengelasan material dengan temperatur leleh tinggi tetapi berkoefisien panas rendah seperti titanium. Keuntungan yang didapat dari proses ini adalah panas yang linier sepanjang proses, pengurangan daerah HAZ, dan penyelesaian permukaan yang mulus [56], [57], [58], [59], [60]. Pada perkembangannya timbul varian lain dari tipe ini yaitu AdStir™ yang menggunakan kawat untuk mengisi celah yang mungkin ada [56]). Juga dikembangkan *Stationary shoulder self-reacting pin tool* (SSSRPT) [59].

Thermal Stir Welding

Dipelopori oleh Marshall Space Flight Centre, varian lain dari FSW adalah *Thermal Stir Welding* (TSW). Menggabungkan masing-masing keuntungan dari las fusi dan las friksi, TSW membuat mungkin pengelasan dua material yang tidak sama dengan kecepatan yang tinggi [61]). Fitur dari proses pengelasan ini adalah ketidaktergantungan antara fungsi pembangkitan panas dan pengadukan, mudah untuk digunakan mengelas logam dengan temperatur tinggi seperti baja dan paduan inkonel, memperbaiki penyelesaian permukaan, dan kecepatan proses yang tinggi. Sumber panas mungkin dapat berasal dari aparatus las fusi yang sudah tersedia atau dengan memakai pemanasan induksi resistansi listrik.

Metode lain

Selain cara-cara diatas, maka cara lain yang dapat dipakai untuk memperkecil gaya yang timbul pada proses FSW adalah dengan meninggikan kecepatan putar *tool* (spindle) (ω , rpm), memperlambat kecepatan pengelasan (traversal) (mm/min), serta memperkecil diameter *tool* (m). Meninggikan kecepatan putar dan memperlambat kecepatan pengelasan akan menghasilkan panas yang lebih tinggi selama proses sehingga ada kemungkinan terjadi depresi tol

yang besar. Untuk mengatai hal ini maka disamping aplikasi kontrol gaya juga diperlukan kontrol temperatur selama proses [62], [63], [64], [40].

PERSOALAN RISET FSW DI MASA DATANG

FSW berawal dari teknologi proses yang masih membutuhkan pemahaman yang lebih mendalam tentang interaksi fisik yang kompleks yang mendasari proses ini. Salah satu yang dianggap penting adalah bagaimana melakukan manajemen termal dengan melakukan modifikasi kondisi batuan termal dan bersama dengan kontrol lup tertutup terhadap temperatur untuk mendapatkan kekuatan lasan yang tinggi [7].

Di pihak lain ada kebutuhan yang terus-menerus untuk membuat proses ini dapat diaplikasikan pada bermacam-macam material teknik yang ada, pengembangan sistem kontrol pengelasan, dan mengembangkan varian baru FSW antara lain untuk menurunkan gaya yang dibangkitkan.

KESIMPULAN

Dari review diatas, dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Dalam industri penerbangan, proses FSW sangat mungkin untuk dilakukan karena pergeseran filosofi desain komponen pesawat terbang dari *differential structure* ke *integral fuselage design* yang sebagian besar komponennya dibuat dari proses ekstrusi dan pengelasan. Atas alasan penggunaan "*green technology*" maka dua kelas teknologi pengelasan yang saat ini sedang dipakai untuk memproduksi roket dan pesawat terbang yaitu *Laser Beam Welding* (LBW) dan *Friction Stir Welding* (FSW).
2. FSW, dari segi peralatan dan ongkos produksi, dipandang lebih menjanjikan dibanding dengan LBW tetapi agar teknologi ini dapat digunakan secara luas dengan ekonomis maka proses ini diaplikasikan pada robot manipulator yang sudah menjadi peralatan standar dalam industri manufaktur pesawat terbang karena *versatility*-nya dan ongkosnya yang dipandang murah.
3. Agar dapat menjadi proses yang memenuhi syarat maka gaya yang dibangkitkan selama proses harus diusahakan menjadi sekecil mungkin. Beberapa hal yang bisa dilakukan untuk mencapai hal ini adalah dengan

mengadopsi *heat assisted FSW*, *Thermal Stir Welding* (TSW), atau dengan memodifikasi parameter-parameter proses dan *tool*.

Dua yang pertama terfokus kepada bagaimana secara efektif menambahkan heat input (mirip seperti preheating) sehingga ketika tool melakukan pengelasan tidak lagi membutuhkan gaya yang terlalu besar. Untuk yang terakhir maka kemampuan mesin dalam memberikan kecepatan putar yang cenderung tinggi menjadi penting. Hampir semua cara diatas membutuhkan sistem kontrol yang berbasis kontrol gaya dan temperatur (hibrid).

Agar dapat diaplikasikan dengan efisien dan ekonomis di dunia penerbangan, maka proses ini membutuhkan manajemen termal (karena sifat dari masing-masing material yang digunakan), kemampuan untuk melakukan pengelasan terhadap material teknik lain, pengembangan sistem kontrol dan varian baru FSW yang ditujukan untuk menurunkan gaya. Untuk hal ini maka *Heat Assisted FSW*, *Stationary Shoulder FSW* serta *Thermal Stir Welding* dapat menjadi awalan untuk menginovasi proses yang ada.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Able, N., and Pfefferkorn, F, Laser-assisted Friction Stir Lap Welding of Aluminium, Proceeding of ASME 2005 Summer Heat Transfer Conference collocated with the ASME 2005 Pacific Rim Technical Conference and Exhibition on Integration and Packaging of MEMS, NEMS, and Electronic Systems.
- [2] Airbus, 2008 [25]. Airbus to use friction stir welding. The Aluminum Association; <http://www.aluminum.org/AM/Template.cfm?Section=Home&CONTENTID=22762&TEMPLATE=/CM/ContentDisplay.cfm>
- [3] Andrews D, Russell M, Martin J. 2012 [56] Recent developments in FSW at TWI. In: Proceedings of the 9th international symposium on friction stir welding, TWI.
- [4] Arbogast, W.J. 2003 [13] in: Z. Jin, A. Beaudoin, T.A. Bieler, B. Radhakrishnan (Eds.), Hot Deformation of Aluminum

- Alloys III, TMS, Warrendale, PA, USA, 2003, p. 313.
- [5] Bang, H.S., Bang, H.S., Jeon, G.H., Oh, I.H., Ro, C.S., 2012 [53]. Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding of Dissimilar Materials Al6061-T6 Aluminum Alloy and STS304 Stainless Steel, *Materials and Design*, Vol. 37, pp. 48-55.
- [6] Blignault C, Hattingh DG, Kruger GH, Van Niekerk TI, James MN. 2008 [31]. Friction stir weld process evaluation by multi-axial transducer. *Measurement*, 41, pp. 32–43.
- [7] Blignault, C., Hattingh, D.G., Kruger, G.H., Van Niekerk, T.I., James, M.N. 2008 [36]. Friction stir weld process evaluation by multi - axial transducer, *Measurement* , 41, pp. 32-43.
- [8] Boehm, L. 2005 [2], *New Engineering Processes in Aircraft Construction: Application of Laser-Beam and Friction Stir Welding*, In *The Optimization of the Composition, Structure, and Properties of Metal, Oxides, Composites, Nanomaterials, and Amorphous Materials: Proceeding of The Third Russian-Israeli Bi National Workshop 2004, 13-23 June 2004* (pp. 27-29), St. Petersburg, Russia.
- [9] Carslaw, H.S., and Jaeger, J.C. 1959 [16]. *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, United Kingdom, 1959.
- [10] Cederqvist, L., Garpinger, O., H"agglund, T., Robertsson, A.. 2010 (64). Cascade control of the friction stir welding process to seal canisters for spent nuclear fuel, *Control Engineering Practice*, 20, pp. 35-48.
- [11] Christner B, Hansen M, Skinner M, Sylva G. 2003 [26]. Friction stir welding system development for thin gauge aerospace structures. In: *Proceedings of the 4th international symposium on friction stir welding*, TWI. 2003.
- [12] Christner B, McCoury J, Higgins S. 2003 [27]. Development and testing of friction stir welding as a joining method for primary aircraft structure. In: *Proceedings of the 4th international symposium on friction stir welding*, TWI. 2003. Crawford, R., Cook, G.E., dan Strauss, A.M. 2006 [62]. Modelling of friction stir welding for robotic implementation. *Int. J. Modelling, Identification and Control*, 1 (2), pp. 101-106. Crossland, B. 1971 [18]. Friction Welding, *Cont. Phys.*, 12 (6), pp. 559-74.
- [13] Cook, G.E., Crawford, R., Clark, D.E., dan Strauss, A.M.. 2004 [63]. Robotic friction stir welding, *Industrial Robot: An International Journal*, 31 (1), pp. 55-63.
- [14] Davies, P.S., Wynne, B.P., Rainforth, W.M., Thomas, M.J., and Threadgill, P.L. 2011 [57] Development of Microstructure and Crystallographic Texture during Stationary Shoulder Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 42A, pp. 2278-2289.
- [15] Ding, R.J. and Oelgoetzp, A. 1996 [22] 'The hydraulic controlled auto-adjustable pin tool for friction stir welding', US patent no. 5,893,507, US Government through the National Aeronautics and Space Administration, Greenbelt, MD, USA.
- [16] Fehrenbacher, A., Smith, C.B., Duffie, N.A., Ferrier, N.J., Pfefferkorn, F.E., Zinn, M.R. 2013 [41] Combined Temperature and Force Control for Robotic Friction Stir Welding, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- [17] Fernandez F. 2010 [28]. Friction stir welding applied on mid-size aircraft. In: *Proceedings of the 8th international symposium on friction stir welding*, TWI. 2010.
- [18] Ferrando, W.A., 2008 [48]. The Concept of Electrically Assisted Friction Stir Welding (EAFSW) and Application to the Processing of Various Metals, *Research Report No. NSWCCD-61-TR-2008/18*.
- [19] Fratini, L., Buffa, G., dan Lo Monaco, L. 2010 [4]. Improved FE model for simulation of friction stir welding of different materials. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15 (3), pp. 199-207.
- [20] Freeman J, Moore G, Thomas B, Kok L. 2006 [29]. Advances in FSW for commercial aircraft applications. In: *Proceedings of the 6th international symposium on friction stir welding*, TWI. 2006.
- [21] Frigaard, Ø., Grong, Ø., dan Midling, O.T. 2001 [19]. A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminium Alloys, *Metallurgical and*

- Materials Transactions A, 32 A, pp. 1189-1200.
- [22] Gibson BT. 2011 [7]. Custom low-cost force measurement methods in friction stir welding. [M.S. Thesis] Vanderbilt University.
- [23] Gibson BT, Cox CD, Longhurst WR, Strauss AM, Cook GE. 2012 [8] Exploiting robotic link deflection for low-cost force measurement in manufacturing. *Measurement*; 45, pp 140–143.
- [24] Gibson BT, Cox CD, Aguilar JR, Ballun MC, Strauss AM, Cook GE. 2012 [9] Low-cost wireless force sensor design with applications in friction stir welding. In: 9th international trends in welding research conference.
- [25] Gibson, BT., Lammlein, D.H., Praterc, T.J., Longhurst, W.R. Cox, C.D. Balluna, MC. Dharmaraja, KJ, Cook, GE, Strauss, AM. 2014 [10] Friction stir welding: Process, automation, and control, *Journal of Manufacturing Processes*, 16, pp. 56–73.
- [26] Kong, H.S., and Ashby, M.F. 1991 [20]. Case Studies in the Application of Temperature Maps for Dry Sliding,” Engineering Department Report, Cambridge University, Cambridge, United Kingdom.
- [27] Liu, H.J., Guo, N., and Feng, J.C., Friction Stir Welding Assisted by Micro-plasma Arc, *Int J Adv Manuf Technol.*, 64 (9-12), pp. 1685-1694.
- [28] Long, X., and Khanna, S.K., 2005 (47). Modelling of Electrically Enhanced Friction Stir Welding Process using Finite Element Method, *Science and Technology of Welding and Joining*, 10 (4), pp. 482-487.
- [29] Longhurst WR, Strauss AM, Cook GE, Cox CD, Hendricks CE, Gibson BT. 2010 [40]. Investigation of force controlled friction stir welding for manufacturing and automation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*;224(6):937–49.
- [30] Luo, J., Wang, X.J., Wang, J.X., 2009 [49]. New Technological Methods and Designs of Stir Head in Resistance Friction Stir Welding, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 14, No.7, pp. 650-654.
- [31] Ma'arif, M.S., and Cook, C.D.C, 2015 [11], Non-rotating Shoulder Tool for Friction Stir Welding, *Proceeding SAINTEK 1*, Malang, Indonesia.
- [32] Martin JP, Stanhope C, Gascoyne S. 2011 [57]. Novel techniques for corner joints using friction stir welding, *Friction stir welding and processing VI*. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society. Merklein, M., and Giera, A., 2008 [45]. Laser Assisted Friction Stir Welding of Drawable Steel-aluminium Tailored Hybrids”, *Int J Mater Form, Supplement 1*, pp. 1299-1302.
- [33] Midling, O.T. and Grong, Ø. 1994 [17]. A Process Model for Friction Stir Welding of Age Hardening Aluminium Alloys, *Acta Metall. Mater.*, 42, pp. 1595-1609 and pp. 1611-1622.
- [34] Mishra, R. S., and Ma, Z. Y., 2005 [12]. Friction Stir Welding and Processing, *Material Science and Engineering R*. 50 (1-2), pp. 1-78.
- [35] Mitchell JE. 2002 [35]. The experimental thermo-mechanics of friction stir welding. Vanderbilt University; 2002 [M.S. Thesis].
- [36] NASA, 2001 [21]. Friction stir welding, Space shuttle technology summary. <http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/104835mainfriction.pdf>.
- [37] NASA, 2010 [61] Thermal Stir Welding, Technology Opportunity, Mechanical Technology.
- [38] Nandan, R., Roy, G.G., dan Debroy, T. 2006 [14]. Numerical Simulation of Three-Dimensional Heat Transfer and Plastic Flow During Friction Stir Welding, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37A, pp. 1247-1259.
- [39] Nandan, R., Roy, G.G., Lenert, T.J., dan Debroy, T. 2007 [15]. Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel, *Acta Materialia*, 55, pp. 883-895.
- [40] Park, K.Y., 2009 [55]. Development and Analysis of Ultrasonic Assisted Friction Stir Welding Process, Dissertation, University of Michigan. Plaine, A.H., and de Alcantara, N.G. 2014 [37]. Prediction of Friction Stir Welding defect-free joints of AISI 304 austenitic stainless steel through axial force profile understanding, *Mat. Res.* 17 (5).
- [41] Rodelas J, Lippold J. 2012 [60]. Engineering surface layers in Ni-additive

- friction stir processing. In: Proceedings of the 9th international symposium on friction stir welding, TWI.
- [42] Rodrigues, D.M., Loureiro, A., Leitao, C., Leal, R.M., Chaparro, B.M., and Vilaca, P. 2009 [3]. Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA 6016-T4 thin welds. *Materials and Design*, 30, pp. 1913-1921.
- [43] Scutelnicu, E., Birsan, D., and Cojocaru, R. 2008 [51]. Research on Friction Stir Welding and Tungsten Inert Gas Assisted Friction Stir Welding of Copper, *Recent Advances in Manufacturing Engineering, Welding in the World*.
- [44] Sinclair, P.C., Longhurst, W.R., Cox, C.D., Lamlein, D.H., Strauss, A.M., Cook, G.E., 2010 [30]. Heated Friction Stir Welding: An Experimental and Theoretical Investigation into How Preheating Influences on Process Forces, *Materials and Manufacturing Processes*, 25, pp. 1283-1291.
- [45] Smith, C.B., Hinrichs, J.F., and Crusan, W.A. 2003 [32]. "Robotic Friction Stir Welding: State of the Art, Friction Stir Link.
- [46] Song, K.H., Tsumura, T., and Nakata, K., 2009 [46]. Development of Microstructure and Mechanical Properties in Laser-FSW Hybrid Welded Inconel 600, *Materials Transactions*, 50 (7), pp. 1832-1837. SpaceX; 2012 [23]. Falcon 9 overview. <http://www.spacex.com/falcon9.php>
- [47] Suda T, Sakamoto Y, Miyamichi T, Sato T. 2012 [59] A feasibility study for stationary shoulder self-reacting pin tool welding. In: Proceedings of the 9th international symposium on friction stir welding, TWI.
- [48] Sundaravel, V. 2011 [5]. Process Optimization for Friction Stir Welding: On AA 5083 for Marine Applications, VDM Verlag Dr. Mueller e.K.,
- [49] Suzuki, R., Takahashi, T., Hioki, S., Yamamoto, N., and Kaneko, Y., 2006 [42] On Pre-heating Effect for Friction Stir Welding of Aluminum Alloy -A Feasibility Study of Friction Stir Welding with Heating of Aluminum Alloy (Report 1), *Quarterly Journal of The Japan Welding Society*, Vol. 24, Issue 3, pp. 281-286.
- [50] Takahashi, T., Yoshinori, Kaneko, Y., Suzuki, R., Kobayashi, J., and Hioki, S., 2009 [52]. Numerical Analysis of Pre-heating by Solid Friction Process - A study on friction stir welding with heating, Vol. 24, Issue 3, pp. 281-286.
- [51] Tempus, G. 2001 [6]. New Aluminum Alloys and Fuselage Structures in Aircraft Design, paper presented at, "Werkstoffe für Transport und Verkehr", May 2001, ETH Zurich, Switzerland
- [52] Thomä. M., Wagner, G., StraßChristian, B., Bernd, C., Sigrid, W., Fürbeth, B.W.. 2017 [54], Realization of Ultrasound Enhanced Friction Stir Welded Al/Mg- and Al/Steel-Joints: Process and Robustness, Mechanical and Corrosion Properties, *Friction Stir Welding and Processing IX*.
- [53] Tweedy, B.M., Arbegast, W., and Allen, C. 1995 [43], "Friction Stir Welding of Ferrous Alloys using Induction Preheating", *Friction Stir Welding and Processing III*, pp. 97-104. Verma, S., Gupta, M., dan Misra, J.P. 2016 [1], *Friction Stir Welding of Aerospace Materials: a State of Art Review*, Chapter 13 in DAAAM International Scientific Book, Austria, Vienna. pp. 135-150.
- [54] Vogelaar R. 2010 [24]. Lockheed martin completes final friction stir weld on orion spacecraft, *Aviation News*. <http://www.aviationnews.eu/2010/06/15/lockheed-martin-completes-final-friction-stir-weld-on-orion-spacecraft>
- [55] Zhao, X., Kalya, P., Landers, R.G., and Krishnamuthy, K, 2009 [38]. Empirical Dynamic Modeling of Friction Stir Welding Processes, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 131, pp. 021001-1 – 9.
- [56] Zhao, X., Kalya, P., Landers, R.G., and Krishnamuthy, K, 2009 [39]. Path Force Control for Friction Stir Welding Processes, AFRL-RX-WP-TP-2009-4127.
- [57] 2017 [33] <https://www.indiamart.com/proddetail/friction-stir-welding-fsw-100-2000-14953464391.html> diakses tanggal 6 Agustus 2017
- [58] 2017 [34] <http://www.gatwicktechnologies.com/prod>

ucts/friction-stir-welding-machines diakses
tanggal 6 Agustus 2017.