

Karakteristik Variasi *Lateral Tilt Angle* pada *Friction Stir Welding* Material *High Density Polyethylene* Terhadap Kekuatan Tarik dan *Bending*

Salsa Bila Azara^{1*}, Risky Ramadhani¹, Febri Budi Darsono¹, Aldias Bahatmaka¹, Kriswanto¹, Hendrix Noviyanto Firmansyah¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, State University of Semarang

Article Info

Article history:

Received June 03, 2025

Accepted June 12, 2025

Published November 20, 2025

Keywords:

Friction Stir Welding,
High-Density Polyethylene,
Lateral Tilt Angle,
Tensile Strength,
Flexural Strength.

ABSTRACT

Friction Stir Welding (FSW) is a solid-state joining method suitable for thermoplastics like HDPE, which has lighter and more flexible properties. This study aims to examine the tensile and bending strength of HDPE joints influenced by parameters such as TRS 930 rpm, a feed rate of 20mm/min, and variations in the Lateral Tilt Angle (LTA) of 0°, 0,5°, 1°, and 1,5°, where the tool's position is sideways relative to the tool's movement direction as the main variable. Resulting in maximum tensile strength (UTS) values of 3,15 MPa, 16,0 MPa, 16,9 MPa, and 8,59 MPa. LTA 1° produced the highest UTS, while LTA 0° produced the lowest UTS because the heat input was not sufficient to perfectly bond the welding material. The bending strength values produced were 4,25 MPa, 14,3 MPa, 4,17 MPa, and 28,8 MPa. The highest stress is found at a 1,5° variation and the lowest at a 1° variation, due to uneven heat distribution during the FSW process. Therefore, choosing the right TLA during the FSW process is key to achieving HDPE joints with good mechanical strength.



Corresponding Author:

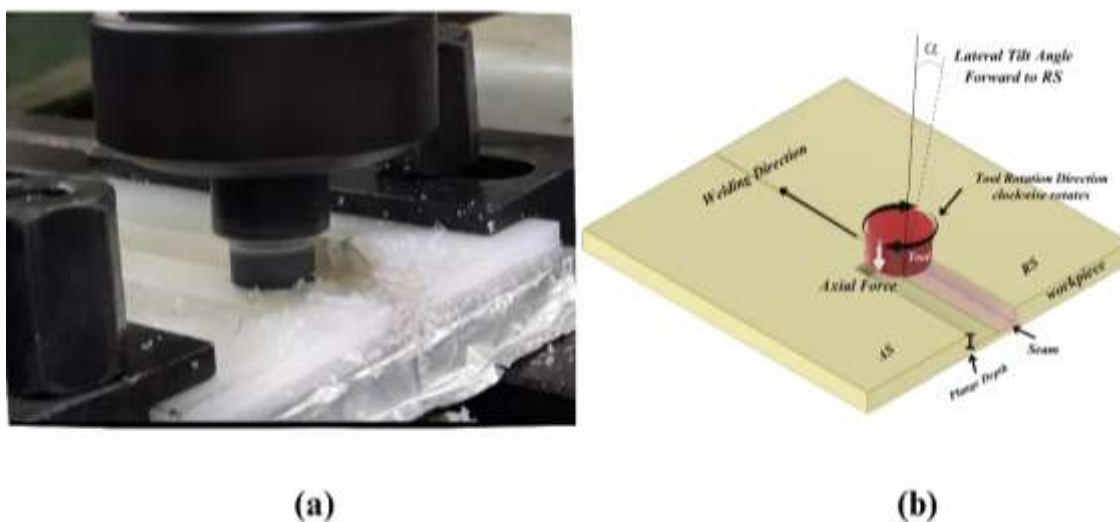
Salsa Bila Azara,
Department of Mechanical Engineering,
State University of Semarang,
Sekaran, Gunung Pati, Semarang City, Central Java 50229.
Email: salsabillajr7@students.unnes.ac.id

1. PENGANTAR

Thermoplastic polimer saat ini sudah banyak diaplikasikan dalam bidang industri seperti industri otomotif, kereta api, *aerospace sectors*, dan industri lainnya. Polimer menggantikan penggunaan logam karena material polimer lebih ringan, fleksibel, memiliki ketahanan terhadap korosi, dan lebih hemat biaya dibandingkan dengan jenis material lainnya[1][2]. Dalam industri transportasi, polimer menjadi alternatif yang efektif untuk mengurangi emisi dan dampak di lingkungan[3][4]. *Thermoplastic polimer* memiliki beberapa jenis umum yang digunakan dalam industri salah satunya adalah *High Density Polyethylene* (HDPE)[5]. Material HDPE memiliki beberapa teknik proses penyambungan yang baik, salah satunya adalah *Friction Stir Welding*. *Friction Stir Welding* (FSW) merupakan sebuah proses teknik penyambungan yang pertama kali dikenalkan oleh *The Welding Institute* (TWI) of UK pada tahun 1991 yang merupakan jenis proses penyambungan *solid-state* yang relatif baru [6][7][8][9]. Penelitian berbasis sambungan FSW awalnya dimulai pada paduan aluminium, kemudian dikembangkan ke paduan magnesium[10]. Pada tahun 1999 Clark mengembangkan *tool Friction Stir Welding* (FSW) yang berbeda untuk sambungan material *thermoplastic polimer* dan menjadi awal penelitian FSW pada polimer. Namun, penelitian yang lebih luas mengenai FSW pada *thermoplastic polimer* baru dimulai pada tahun 2005 dan meningkat setelah tahun 2009[11].

FSW adalah proses penyambungan dengan metode *solid-state joining*[3], yaitu metode dimana proses penyambungan terjadi dari hasil gesekan antara *tool* yang berputar dengan material kerja sehingga menghasilkan panas dan membentuk sambungan[12]. Metode FSW ini merupakan salah satu metode

penyambungan yang baik untuk material HDPE karena suhu proses penyambungan lebih rendah dari titik leleh HDPE, hanya memanaskan material hingga material lunak (plastis), bukan mencair. Sehingga, menghindari terjadinya degradasi termal pada HDPE dan menciptakan sambungan yang baik yang tidak merusak sifat mekanik HDPE [13]. FSW juga merupakan metode yang ramah lingkungan karena tidak menggunakan *filler material*, tidak menghasilkan radiasi UV maupun paparan *fume* yang berbahaya, dan tidak memerlukan persiapan khusus pada prosesnya[12]. Pada proses penyambungan FSW, *shoulder tool* menempel pada permukaan material dan memberikan gaya gesek seperti pada Gambar 1, memberikan tekanan aksial ke permukaan material, menghasilkan panas melalui gesekan antara *tool* dengan material kerja, serta menyebabkan deformasi plastik pada lapisan tipis di bawah permukaan *shoulder* dengan *pin tool* yang menembus material[1][7]. Hasil dari sambungan metode FSW ini dipengaruhi oleh parameternya seperti *travel speed*, *rotational speed*, *feed rate*, dan *tool tilt angle*[12]. Selain parameternya, jenis *tool* juga mempengaruhi hasil penyambungan pada FSW, dua aspek yang paling mempengaruhi adalah *tool material* dan *tool geometry* [14].



Gambar 1. (a) Proses FSW (b) Skema Proses FSW

Kekuatan tarik dan elongasi sambungan HDPE sangat dipengaruhi oleh perubahan parameter proses FSW, termasuk *tool rotational speed*, *travel speed*, dan *tool tilt angle*, menurut penelitian oleh A. Muchhadiya et al. (2024)[3]. Para peneliti menemukan kombinasi parameter ideal (1070 rpm, 20 mm/menit, dan *tilt angle* 2°) menghasilkan *Ultimate Tensile Strength* (UTS) sebesar 17,828 MPa dan elongasi maksimum sebesar 17,36%, dengan efisiensi sambungan hampir 60%, desain penelitian yang digunakan adalah Taguchi L16 dan Pendekatan Fungsi Kepuasan. Hasil ini konsisten dengan penelitian tahun 2023 oleh Muchhadiyaa et al [15]. yang menemukan optimasi yang sama menggunakan teknik optimasi Grey-Fuzzy. Menurut kedua eksperimen tersebut, faktor terpenting (28%) dalam menentukan kualitas sambungan adalah *tool rotational speed*, dan kekuatan mekanik optimum diperoleh dari *tilt angle* 2°.

Diperkuat oleh S. Ahmad et al. (2019), [16], yang menggunakan *tilt angle* konstan 1° pada HDPE yang dicampur dengan *carbon black*. Dalam parameter optimal (1000 rpm, 30 mm/menit, dan kedalaman 4,1 mm), diukur efisiensi sambungan hingga 63%. Namun, juga mengamati adanya cacat termasuk *voids* dan *wormhole*. Menurut penelitian tersebut, *plunge depth* dan *tilt angle* adalah faktor penting dalam mengurangi cacat dan meningkatkan pengikatan di *root zone*. Meskipun sudut kemiringan 1° dapat menghasilkan hasil yang baik, sudut yang sedikit lebih tinggi (2°) dari Muchhadiyaa mungkin lebih baik meningkatkan kekuatan tarik ketika digabungkan dengan faktor-faktor perbaikan lainnya.

Dampak parameter FSW, seperti *tilt angle* antara 1 dan 3°, dijelaskan lebih lanjut oleh Lambiasi et al. (2020) [17], ditunjukkan bahwa beberapa variabel proses memiliki dampak substansial pada kualitas dan efisiensi pengelasan pada HDPE, termasuk *plunge depth* (1,0 mm), kecepatan pengelasan (10–150 mm/menit), kecepatan putaran (1000–2000 rpm), dan *tool tilt angle* (1–3°). Untuk meningkatkan kinerja sambungan, beberapa profil *tool* telah diteliti, seperti *frustum*, silinder, dan *double pin*. Pengelasan *double pin* juga dapat dilakukan di bawah air. *Ultimate Tensile Strength* (UTS) dari hasil pengelasan HDPE dapat mencapai hingga 22 MPa dalam kondisi ideal (1500 rpm, 40 mm/menit, dan *plunge depth* 1,0 mm). Desain *tool* ditemukan memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi sambungan; ketika *pin tool* ganda digunakan dalam kondisi ideal, efisiensi sambungan dapat mencapai 96%, sedangkan *tool* silinder hanya dapat mencapai sekitar 60%. Menunjukkan bahwa penggunaan *pin* profil yang ideal dan kondisi proses (seperti *pin tool* ganda dan *tool hot*

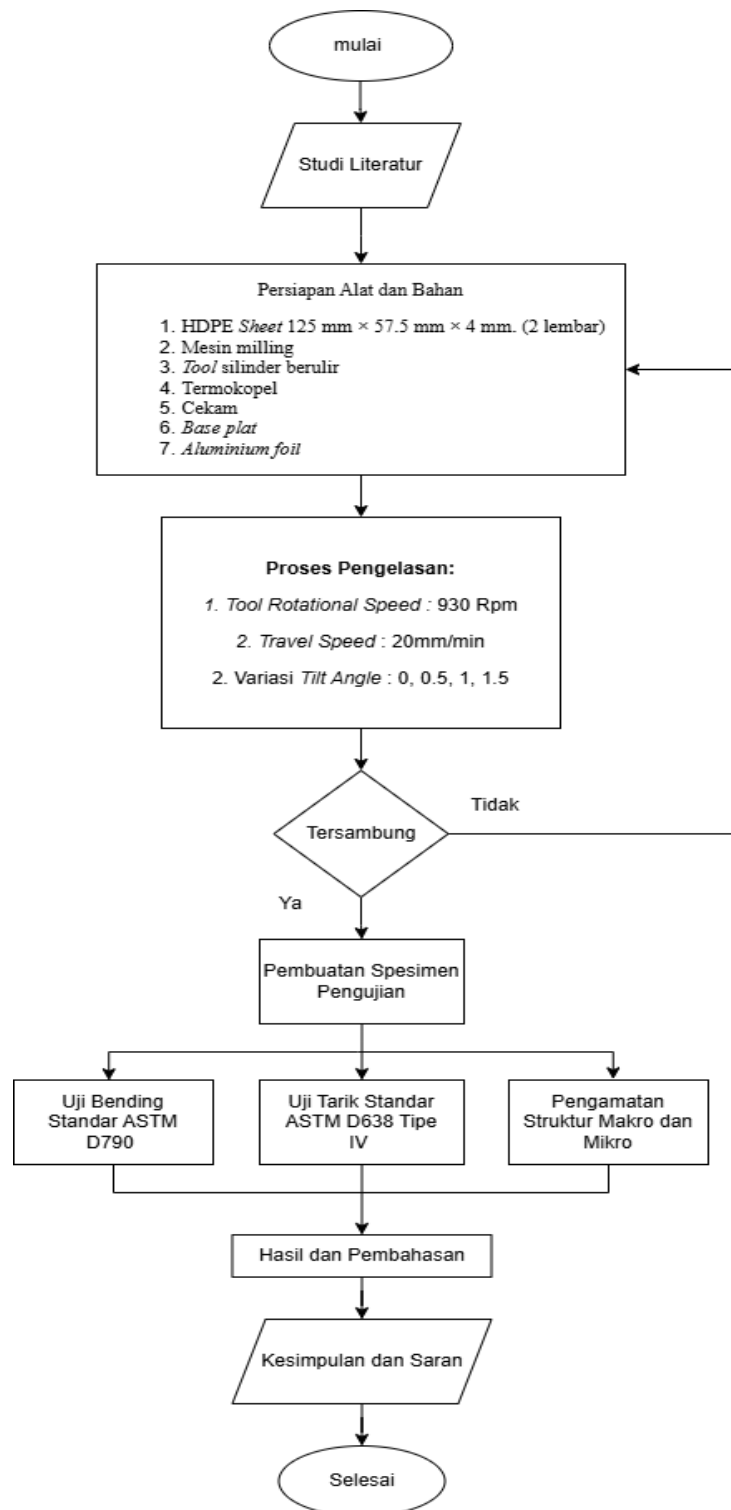
shoe) dapat meningkatkan efisiensi sambungan hingga 96%. Hasil menunjukkan bahwa sudut kemiringan antara 1 dan 3° sangat penting untuk menghasilkan las berkualitas tinggi, meskipun parameter eksperimentalnya berbeda.

Sementara itu, Khalaf (2023) [18], menggunakan *tilt angle* konstan sebesar 2° untuk memeriksa dampak perbedaan geometri *pin tool* terhadap kinerja termomekanik FSW pada HDPE. *Frustum Pin Tool* (FPT) memberikan kinerja yang lebih baik dengan mengurangi cacat internal karena pengadukan yang lebih stabil dan input panas yang terkontrol, sedangkan *pin tool* Kubik menghasilkan suhu dan aliran material yang lebih tinggi. Ini mengkonfirmasi temuan sebelumnya bahwa sudut kemiringan 2° meminimalkan cacat pengadukan berlebih dan menjaga kualitas sambungan ketika dipasangkan dengan alat yang sesuai seperti FPT.

Secara keseluruhan, pada penelitian terdahulu menegaskan bahwa pemilihan parameter yang tepat dalam proses FSW pada HDPE sangat penting untuk meningkatkan kekuatan mekanik, mengurangi cacat, serta menghasilkan sambungan yang lebih baik dan efisien, sehingga penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pengelasan yang optimal dengan mengetahui sifat tarik dan *bending* spesimen yang paling baik. Fokus penelitian-penelitian terdahulu adalah pada kualitas sambungan *tilt angle* konvensional dimana hanya berfokus pada kemiringan aksial (ke depan atau ke belakang) terhadap sumbu vertikal *tool* dalam proses *Friction Stir Welding* (FSW). Pada penelitian ini peneliti menggunakan *lateral tilt angle* yaitu posisi *tilt angle tool* menyamping terhadap arah gerak *tool* sebagai variabel utama penelitian. *Lateral tilt angle* masih jarang diteliti, khususnya pada pengelasan material termoplastik seperti HDPE. Diharapkan bahwa metode ini akan menawarkan sudut pandang baru dalam optimasi parameter FSW, terutama untuk material polimer HDPE. Variasi parameter dipilih setelah dilakukan uji coba pada beberapa parameter lain dan studi literatur, parameternya sebagai berikut *rotational speed* 930 rpm, *travel speed* 15 mm/min, *plunge depth* 3,95 mm dan dengan variasi *lateral tilt angle* 0°, 0,5°, 1°, dan 1,5°.

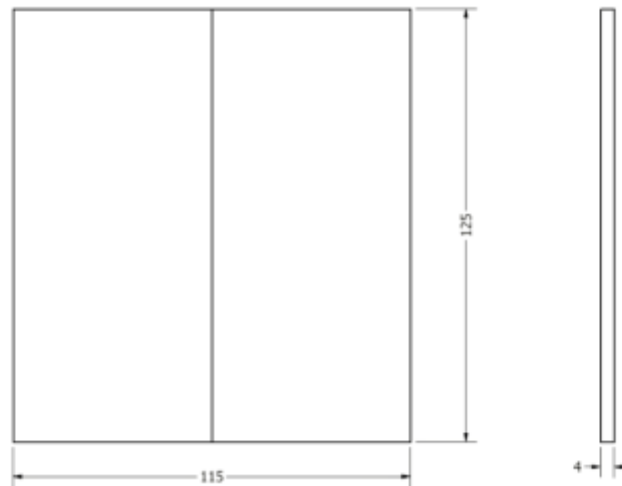
2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, alur penelitian (Gambar 2.) dimulai dengan studi literatur kemudian menyiapkan peralatan dan bahan untuk eksperimental penelitian, selanjutnya Proses Pengelasan, apabila hasil tersambung dengan baik dilanjutkan dengan pembuatan spesimen uji Tarik, *Bending*, dan untuk pengamatan struktur makro dan mikro. Hasil data pengujian disajikan dan dianalisis kemudian diberikan Kesimpulan akhir penelitian. Karena konduktivitas termal yang rendah pada material termoplastik menyebabkan panas pada *advancing side* dan *retreating side*, saat proses pengelasan hasilnya tidak akan merata dan terjadi cacat pada hasil pengelasan. Sehingga, pemilihan material kerja dan tool harus tepat [15].



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan menyiapkan lembaran material HDPE yang kekuatan tarik pada *base material* HDPE ditampilkan pada Tabel 1. dan kekuatan *bending base material* HDPE disajikan pada Tabel 2. sebanyak dua lembar seperti Gambar 3. dengan dimensi ukuran 125 mm × 57,5 mm × 4 mm yang diukur menggunakan jangka sorong dengan skala nonius, yang memiliki resolusi 0,02 mm dengan tingkat akurasi ±0,05 mm.



Gambar 3. Material HDPE

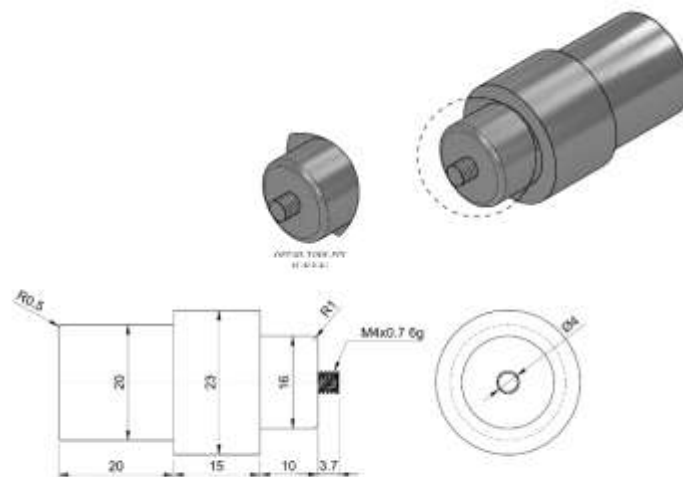
Tabel 1. Kekuatan Tarik *Base Material* HDPE

Sample Uji	Max Force (N)	Tegangan (MPa)	Elongasi (%)	Rata-Rata Tegangan (MPa)
1	444,64	17,1	7,7	17,7
2	466,13	18,3	7,5	

Tabel 2. Kekuatan *Bending Base Material* HDPE

Sample Uji	Force N	σ_f (MPa)	L mm	d mm	b mm	Rata-Rata kekuatan <i>Bending</i> (MPa)
1	127,43	43,5	64	4,2	15,96	32,53
2	61,77	21,8	64	4,15	15,8	

Kemudian menyiapkan *tool* dengan material SKD 61 yang telah di *heat-treated*. Pemilihan jenis, dan geometri *tool* sangat mempengaruhi hasil pengelasan karena geometri *tool* mengendalikan aliran pada material saat proses FSW[19]. Elemen utama pada geometri *tool* adalah diameter *shoulder*, panjang dan bentuk *pin*. dimensi ukuran *tool* yang digunakan adalah panjang keseluruhan *tool* adalah 48,7 mm, diameter *shoulder* 16 mm dan panjang *shoulder tool* 10 mm, memiliki *pin tool* berbentuk silinder berulir dengan diameter 4 mm dan panjang pin adalah 3,7 mm dengan detail desain *tool* terdapat pada Gambar 4. Pada saat meleleh material HDPE memiliki viskositas yang tinggi sehingga, *pin tool shape* silinder berulir memiliki bentuk geometry pin yang membuat pengadukan pada material (HDPE) lebih merata juga membuat pergerakan material di sekitar pin lebih efisien dan homogen, karena adukan yang baik sangat berpengaruh pada hasil sambungan pengelasan yang kuat dan merata[16][20].



Gambar 4. Desain *Tool*

Proses FSW dilakukan menggunakan mesin *milling* konvensional yang dimodifikasi agar dapat difungsikan sebagai mesin FSW Gambar 5. di bengkel permesinan, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang. Menggunakan meja kerja linier yang digerakkan oleh ulir trapezoidal, gerakan linier *tool* sepanjang sambungan (arah X) dikendalikan secara otomatis dan dikalibrasi dengan bantuan alat ukur berupa penggaris dan *stopwatch*. Penggaris logam tetap berfungsi sebagai referensi visual untuk memastikan bahwa pergerakan *tool* sepanjang jalur pengelasan akurat dan konsisten. Ketika pergerakan dilakukan perlahan dan stabil, penggaris ini berfungsi sebagai referensi untuk jarak. Meskipun menggunakan metode manual, kontrol visual dan konsistensi kecepatan gerakan operator sepanjang proses pengelasan memastikan kesempurnaan.



Gambar 5. Mesin *Milling*

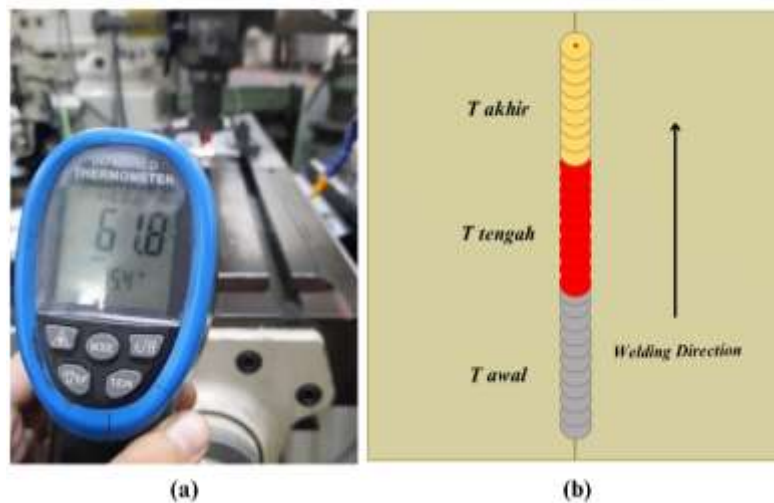
Variasi parameter yang digunakan dalam proses FSW ini diantaranya *tool rotational speed* 930 rpm, *feed rate* 20mm/min, *plunge depth* 3,95 mm, dan dengan detail variasi *lateral tilt angle* yang

digunakan pada proses *Friction Stir Welding* terdapat pada Tabel 3. Kontrol variasi parameter dan proses dilakukan dengan uji coba awal terlebih dahulu untuk mengkalibrasi keakuratan pengaturan dan menyesuaikan tool sebelum proses FSW aktual dilakukan. Mengendalikan kondisi lingkungan yang bebas dari gangguan eksternal yang dapat memengaruhi hasil, prosedur persiapan, serta pemasangan spesimen pada *jig* dilakukan secara sistematis dan konsisten. Pengontrolan *travel speed* dikalibrasi secara manual yaitu dengan bantuan alat ukur berupa penggaris dan *stopwatch*. Benda kerja digerakkan sesuai target kecepatan pengelasan 20 mm/menit, maka dalam satu menit dilakukan pengecekan jarak sudah mencapai 20 mm dan akurat. Penyesuaian *lateral tilt angle* dilakukan dengan bantuan *protractor presisi*, kemudian dikunci secara mekanis untuk memastikan kestabilan sudut dan dilakukan pengecekan secara berkala selama proses berlangsung.

Tabel 3 Parameter *Friction Stir Welding*

<i>Tool Rotational Speed</i>	<i>Feed Rate</i>	Spesimen	<i>Lateral Tilt Angle</i>
930 rpm	20 mm/min	1	0°
		2	0,5°
		3	1°
		4	1,5°

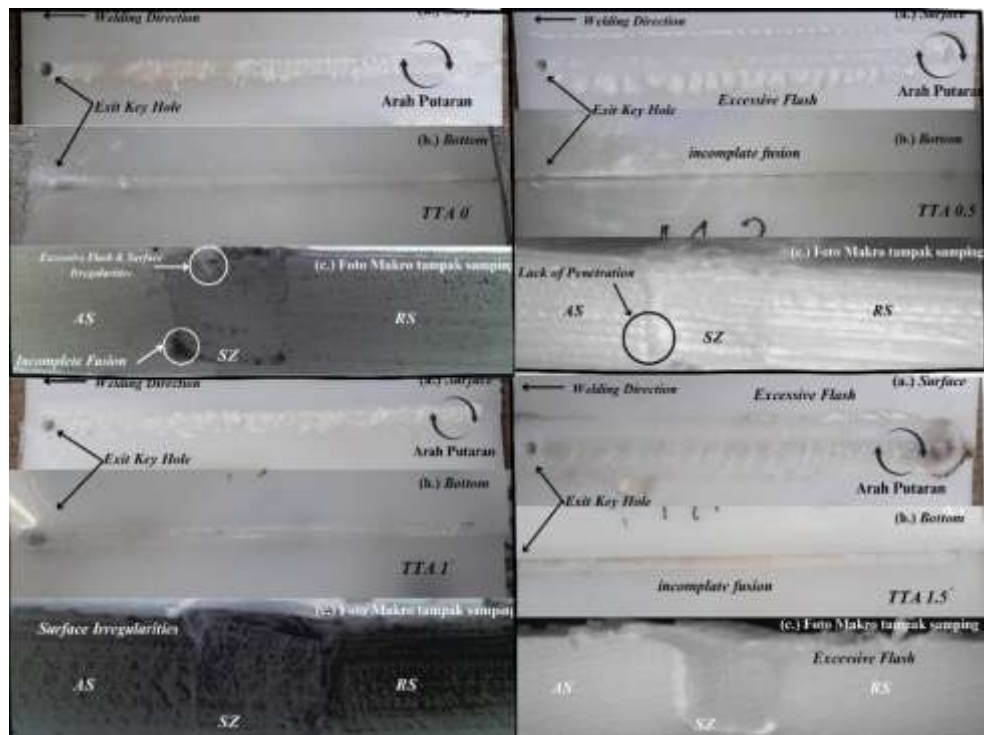
Pada proses FSW Gambar 1 (a), sebelum *tool* mulai bergerak secara *advancing phase* dan aksial, untuk mencapai suhu yang diperlukan dilakukan kontrol suhu agar material polimer HDPE dapat menyatu di bawah tekanan yang dihasilkan di *trailing zone pin tool*. Pengukuran suhu dilakukan dalam 3 tahap, yaitu tahap awal, tahap tengah, dan tahap akhir, seperti pada Gambar 6 (b). untuk mengetahui kestabilan suhu selama proses FSW berlangsung. Suhu maksimum *weld line* pada *top surface* meningkat secara bertahap selama waktu ketika dilakukan kontrol suhu menggunakan *thermogun* Gambar 6 (a). pada awal pengelasan dan kemudian mendekati keadaan konstan dengan meningkatnya waktu pengelasan[20]. Suhu disekitar material meningkat saat *tool* bergerak sepanjang arah garis pengelasan karena putaran rotasi dan tekanan aksial dari *tool* [21]. Setelah proses pengelasan selesai, plat didinginkan hingga suhu ruang selama sekitar 10 menit sebelum dilepaskan dari *jig* atau klem[22].



Gambar 6. (a) Pengukuran suhu dengan thermogun (b) Jarak pengukuran suhu pada spesimen

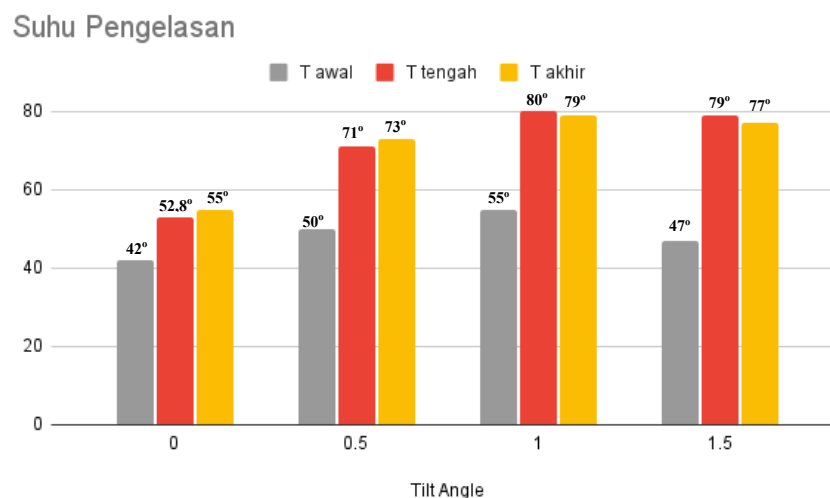
3. HASIL DAN ANALISIS

Setelah dilakukan proses pengelasan FSW dengan variasi *lateral tilt angle* yang telah ditetapkan pada HDPE, kemudian dilakukan pengujian sifat mekanis hasil sambungan FSW. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian tarik, pengujian *bending*, dan analisa hasil foto visual pengelasan, makro, dan mikro. Hasil data pengujian di analisis dan disajikan dalam bentuk gambar, grafik, serta penjelasan dari analisis data. Pada Gambar 7. ditampilkan visual hasil pengelasan (*surface* dan *bottom*), serta gambar makro tampak dari samping yang dapat diidentifikasi bebetapa jenis cacat las yang terjadi.



Gambar 7. Visual Hasil FSW (a) surface, (b) bottom, dan (c) makro

Pada Gambar 8. dapat dilihat semakin meningkat *tilt angle* pada FSW semakin tinggi pula suhunya. Peningkatan *tilt angle* menyebabkan peningkatan suhu dan fluks panas di zona las. Namun, *tilt angle* yang terlalu besar dapat mengakibatkan aliran material yang tidak merata dan cacat internal[23][24][25].



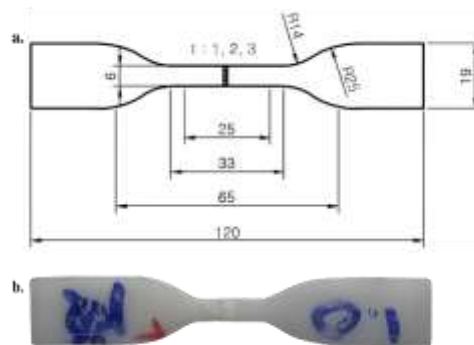
Gambar 8. Chart Suhu awal, tengah, dan akhir proses FSW

3.1. Uji Tarik

Proses pengujian tarik dilakukan dengan standar pada lab politeknik ATMI Surakarta yaitu dengan standar ASTM D638 Tipe IV dapat dilihat pada Gambar 9. *Machine data* yang digunakan pada pengujian ini adalah *Zwick Z020* buatan Jerman, Spesimen uji tarik ditempatkan pada chuck yang sesuai, kemudian diberi *Pre-load* sebesar 0,5 N, *Speed tensile modulus* 3 mm/min, *Test speed* 3 mm/min, dan *Grip to grip separation at the start position* sebesar 65,00 mm.

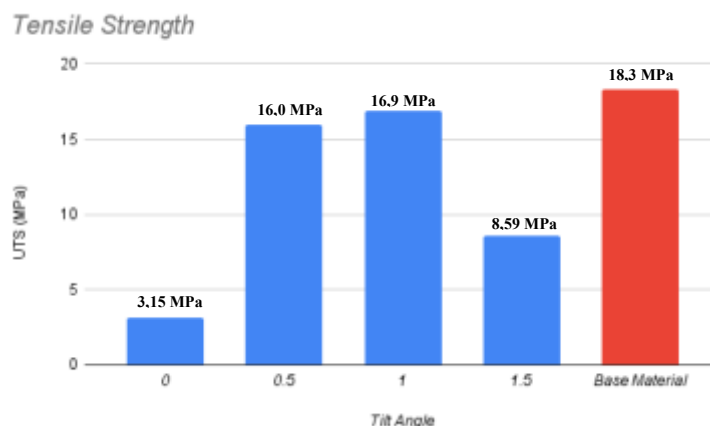


Gambar 9. Proses Uji Tarik



Gambar 10. Kupon Uji Tarik (a.) dimensi kupon (b.) kupon pengujian

Pembuatan spesimen pengujian tarik sesuai dengan standar ASTM D638 Tipe IV Gambar 10. [31]. Hasil nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) untuk sambungan FSW pada material HDPE disajikan pada Gambar 11. ditunjukkan bahwa semakin besar *lateral tilt angle* yang digunakan maka semakin meningkat pula kekuatan tarik spesimen pengelasan, kemudian mengalami penurunan setelah mencapai parameter yang optimum. Parameter optimum FSW dicapai pada *lateral tilt angle* 1°, *Tool Rotational Speed* 930 rpm, dan *feed rate* 20mm/min dengan pengukuran suhu paling tinggi dapat dilihat pada Gambar 8. ditunjukkan bahwa suhu yang mendekati titik leleh material HDPE menghasilkan UTS terbaik dengan nilai *joint efficiency* 92,35%, kekuatan UTS sebesar 16,9 MPa, dan elongasi sebesar 2,2%. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) untuk sambungan FSW pada material HDPE yang paling rendah memiliki nilai *joint efficiency* pada 17,21%, nilai *Ultimate Tensile Strength*nya adalah 3,15 MPa dan elongasi sebesar 2,9% dengan parameter *lateral tilt angle* 0°, *Tool Rotational Speed* 930 rpm, dan *feed rate* 20 mm/min.

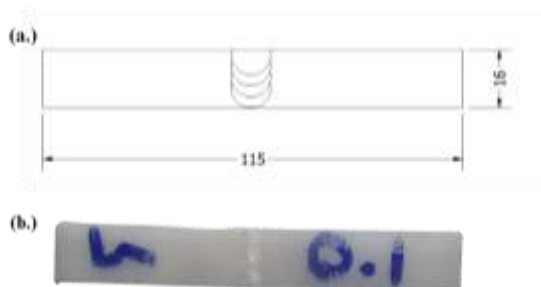


Gambar 11. Chart Hasil Uji Tarik

Muhtil Badria, etc. [26]. Pada penelitian FSWnya terhadap material HDPE menunjukkan pengukuran suhu menggunakan termokopel dilakukan di empat titik dan simulasi distribusi suhu menggunakan ANSYS. Hasilnya ditunjukkan bahwa suhu maksimum adalah $71,7^{\circ}\text{C}$ (5,65 mm), $79,3^{\circ}\text{C}$ (5,7 mm), dan $84,27^{\circ}\text{C}$ (5,75 mm) akibat peningkatan kedalaman pin. Kekuatan tarik tertinggi dicapai pada kedalaman 5,7 mm, atau 23,79 MPa. Pada *plunge depth* 5,65 mm, kekuatan tariknya adalah 15,58 MPa, sedangkan pada *plunge depth* 5,75 mm, kekuatan tariknya lebih dari 23,79 MPa. Menurut efisiensi sisi, peningkatan tarik kekuatan sebesar 13,3% diamati pada *plunge depth* 5,7 mm.

3.2. Uji Bending

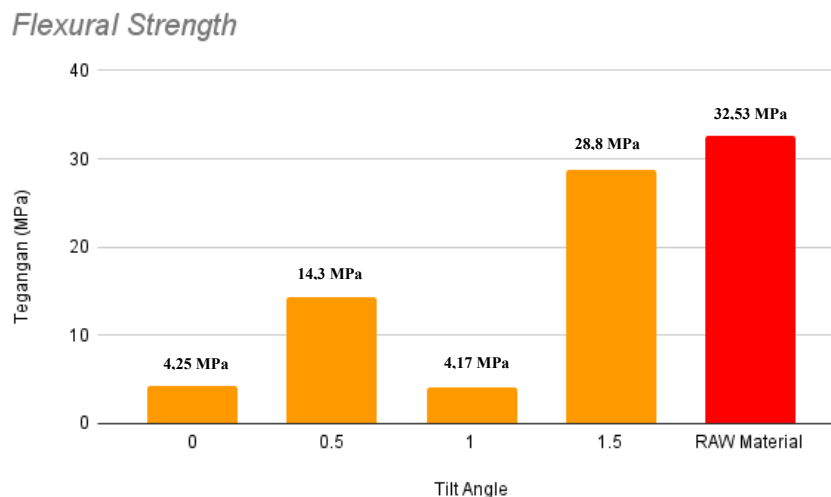
Pengujian *bending* dan pembuatan kupon pengujian dilakukan menggunakan standar lab uji yaitu ASTM D790 [32] menggunakan mesin uji Zwick Z020 buatan Jerman Gambar 13. Pengujian dimulai dengan beban awal (pre-load) sebesar 0,5 N dan kecepatan pengujian 2 mm/menit menggunakan metode *three-point bending*. Jarak span antar penumpu (support span) disesuaikan dengan panjang spesimen sesuai ketentuan standar. dilengkapi dengan *load cell* yang memiliki tingkat akurasi sebesar $\pm 0,5\%$ dari beban yang terukur dan resolusi pembacaan gaya hingga 0,01 N. Data gaya dan defleksi direkam secara digital oleh perangkat lunak mesin, yang kemudian digunakan untuk menghitung kekuatan *bending* (flexural strength). Spesimen kupon pengujian dibuat sesuai dengan standar dengan dimensi pada Gambar 12.



Gambar 12. Kupon Uji *bending* (a.) dimensi uji *bending* (b.) kupon pengujian

Gambar 13. Pengujian *Bending*

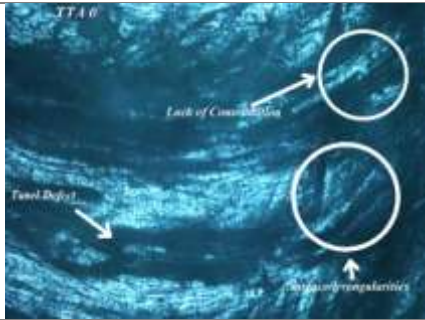
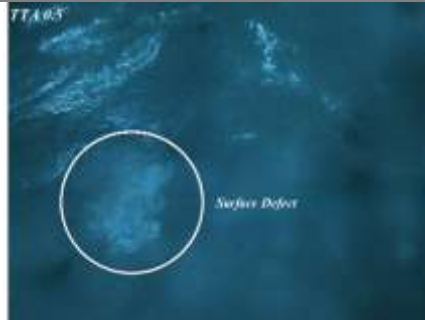
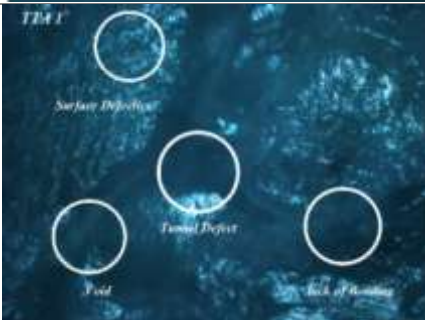
Hasil nilai kekuatan *bending* disajikan pada Gambar 16. tegangan paling tinggi kekuatan *bending* adalah pada parameter *lateral tilt angle* 1,5° dengan tegangan 28,8 MPa dan kekuatan *bending* yang terendah pada *lateral tilt angle* 1° dengan tegangan 4,17 MPa. kekuatan *bending* yang rendah terjadi karena ketidakstabilan suhu ditengah pengelasan saat proses FSW berlangsung. Nilai ini menunjukkan bahwa *lateral tilt angle* memiliki dampak nonlinier pada hasil *flexural strength* material dengan setiap peningkatan *tilt angle*. *Plunge depth tool* selama proses pengelasan, kualitas campuran material, dan distribusi panas yang tidak merata, merupakan beberapa variabel yang berkontribusi pada fenomena ini.

Gambar 14. Chart Hasil Pengujian *Bending*

Pada penelitian Hazim H, etc [7]. pengujian kekuatan *bending* dilakukan sesuai dengan ASTM D790 menggunakan material HDPE yang dilapisi dengan strip PP (0–30%) menggunakan proses Friction Stir Welding (FSW). Proses ini menggunakan *tool* tipe *shoe* yang terbuat dari baja H13 dengan diameter *shoulder* 20 mm, pin 5 mm, *tool tilt angle* 0°, *rotational speed* 520 rpm, *travel speed* 20 mm/menit. Selain itu, pada penelitian H. M. Kuhbanani, etc.(2019) [27]. Kekuatan *bending* maksimum sebesar 71 MPa, atau hampir 89% dari kekuatan *bending base material* sebesar 80 MPa, dicapai dalam uji kekuatan *bending* yang dilakukan pada sambungan polikarbonat (PC). *Tool Tilt Angle/TTA* sebesar 2,5°. Hasil pengujian tersebut mencerminkan efisiensi mekanisme penyambungan FSW, di mana *tilt angle* yang tepat mampu meningkatkan homogenitas material dan integritas sambungan secara signifikan dan meminimalisasikan cacat pada hasil las.

3.3. Struktur Mikro

Tabel 4. Foto Mikro Hasil Pengelasan

<i>Lateral Tilt Angle</i>	Foto
0°	
0,5°	
1°	
1,5°	

Hasil foto mikro berdasarkan Tabel 4. ditemukan beberapa jenis cacat las yang terjadi pada hasil FSW diantaranya pada *lateral tilt angle* 0°, dan 1° terdapat cacat *Lack of Consolidation* yang disebabkan panas yang ter *input* tidak cukup untuk melunakkan dan menyatukan material pengelasan dengan sempurna [28], cacat *tunnel defect* disebabkan karena aliran material yang tidak mencukupi untuk mengisi ruang di belakang *tool* las [19][28], *Surface Irregularities* terjadi karena ketidakstabilan aliran material selama proses *Friction Stir Welding* (FSW) menyebabkan cacat di permukaan sambungan yang terbentuk dan karena *revolution pitch*, yaitu rasio antara kecepatan putar alat dan kecepatan pengelasan berubah [17], *lack of Bonding* terjadi karena oksida atau kontaminan yang terperangkap di antara permukaan saat proses FSW berlangsung dan pemanasan

yang tidak memadai atau tekanan penekanan yang rendah, sehingga material tidak menyatu dengan baik [29]. Pada variasi *Lateral Tilt Angle* 1,5° terdapat *Void*, karena aliran material yang tidak sempurna atau tekanan penekanan yang tidak memadai pada saat proses pengelasan berlangsung. dalam pengelasan polimer [30].

Dalam penelitian Sheikh-Ahmad et al. [16], karena adanya *thermal gradient* yang signifikan sepanjang *thickness*, suhu proses yang diinduksi secara signifikan mempengaruhi integritas dan kualitas sambungan. Berbagai penelitian telah membahas evolusi mikrostruktur dari proses pengelasan ini terkait dengan morfologi las. Sesuai dengan parameter proses, seperti adanya *voids* dan *worm hole* pada parameter 1000 rpm, 30 mm/menit dengan *plunge depth* 4,1 mm, cacat material ditemukan pada las HDPE. Karena dorongan material maju di depan pin pada 800 rpm, 40 mm/menit, dan 4,1 mm, menghasilkan las yang mirip dengan alur (*groove-like*). Temuan studi Komposit Nylon 6 yang diperkuat serat kaca pada pengelasan FSW dalam penelitian oleh Kumar et al (2019) [31]. menunjukkan bahwa meningkatkan *tilt angle* dari 0° menjadi 2° dapat meningkatkan kekuatan tarik sambungan. Hal ini terjadi karena *shoulder tool* yang menghasilkan lebih banyak panas oleh tekanan, meningkatkan pencampuran material pengelasan. Namun, *tilt angle* yang terlalu besar dapat mengakibatkan sambungan yang lebih lemah karena distribusi tekanan ke seluruh zona pengelasan menjadi tidak merata.

Menurut hasil uji, Kekuatan tarik dan *bending* sambungan HDPE dipengaruhi oleh perubahan *lateral tilt angle*. Teknik FSW ini berpotensi diterapkan dalam industri manufaktur plastik, khususnya pada aplikasi pipa atau tangki berbahan termoplastik yang memerlukan sambungan yang baik dan berkekuatan tinggi, juga industri otomotif yang beberapa komponen kendaraan modern mulai memanfaatkan termoplastik untuk efisiensi bobot dan biaya. Bahkan di sektor dirgantara, farmasi, dan alat Kesehatan juga dapat memanfaatkan FSW pada *thermoplastic*, FSW menawarkan metode penyambungan presisi tinggi yang bersih dan minim kontaminasi, khususnya pada komponen non-struktural atau sistem saluran. Dalam hal ilmu pengetahuan ilmiah, penelitian ini memperkaya kajian mengenai pengaruh parameter *lateral tilt angle* pada proses FSW terhadap kekuatan mekanik material termoplastik. Disarankan agar lebih banyak eksplorasi parameter lainnya seperti *welding speed*, *plunge depth*, dan *tool rotational speed*, pada dua jenis material yang berbeda.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian dapat disimpulkan bahwa fokus penelitian menggunakan *lateral tilt angle* yaitu posisi *tilt angle tool* menyamping terhadap arah gerak *tool* dibandingkan dengan *tilt angle* konvensional dimana hanya berfokus pada kemiringan aksial (ke depan atau ke belakang) terhadap sumbu vertikal *tool*. *Lateral tilt angle* masih jarang diteliti, khususnya pada pengelasan material termoplastik seperti HDPE. Metode ini menawarkan sudut pandang baru dalam optimasi parameter FSW, terutama untuk material polimer HDPE. Semakin besar *lateral tilt angle* yang digunakan maka semakin meningkat pula kekuatan tarik spesimen pengelasan, kemudian mengalami penurunan setelah mencapai parameter yang optimum. Parameter optimum FSW dicapai pada *lateral tilt angle* 1°, *Tool Rotational Speed* 930 rpm, dan *feed rate* 20 mm/min dengan pengukuran suhu paling tinggi bahwa suhu yang mendekati titik leleh material HDPE menghasilkan UTS terbaik dengan nilai *joint efficiency* 92,35%, kekuatan UTS sebesar 16.9 MPa, dan elongasi sebesar 2,2%. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) untuk sambungan FSW pada material HDPE yang paling rendah memiliki nilai *joint efficiency* pada 17,21%, nilai kekuatan Ultimatenya adalah 3,15 MPa dan elongasi sebesar 2,9% dengan parameter *lateral tilt angle* 0°. Tegangan paling tinggi pada *flexural strength* adalah pada parameter *lateral tilt angle* 1,5° dengan tegangan 28,8 MPa dan yang terendah pada *lateral tilt angle* 1° dengan tegangan 4,17 MPa dan elongasi 7,0%. Hal ini terjadi karena ketidakstabilan suhu ditengah pengelasan saat proses FSW berlangsung. beberapa jenis cacat las yang terjadi pada hasil FSW diantaranya pada *tilt angle* 0°, dan 1° terdapat cacat *Lack of Consolidation* dan beberapa jenis cacat lainnya yang terjadi pada hasil pengelasan contohnya *Tunnel defect*, *lack of Bonding* dan lain-lainnya. Dengan demikian, pemilihan parameter *tilt angle* yang tepat menjadi salah satu faktor yang krusial dalam optimalisasi kualitas hasil sambungan FSW pada material HDPE. Studi ini memiliki keterbatasan dari variasi *tilt angle* dan hanya menggunakan satu jenis material (HDPE). Selain itu, proses hanya dilakukan dengan satu jenis desain pin tool, dan tidak membahas pengaruh parameter lainnya seperti kecepatan putar yang lebih tinggi, variasi *travel speed*, atau efek termal mendetail. Hasilnya belum dapat digeneralisasikan untuk semua kondisi pengelasan polimer. Saran penelitian selanjutnya adalah mengeksplorasi berbagai jenis desain *pin tool*, memperluas rentang parameter (*tilt angle* dan *travel speed*), serta menggabungkan pengujian morfologi sambungan menggunakan SEM/DSC. Informasi lebih lanjut mungkin dapat diperoleh dengan proses FSW dissimilar material dan membandingkan HDPE dengan polimer termoplastik lainnya seperti PP atau PVC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Review and M. Engineering, "Mechanical Properties of Friction Stir Welding Joining of PolyTetraFluoroEthylene," vol. 14, no. April, pp. 253–257, 2020.
- [2] M. E. Abdullah, G. Fan, J. Tomk, and H. Aghajani, "Investigation on polypropylene friction stir joint : effects of tool tilt angle on heat flux , material flow and defect formation," 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.028.
- [3] A. Muchhadiya *et al.*, "Optimization of friction stir welding process parameters for HDPE sheets using satisfaction function approach," *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, vol. 31, no. 1, pp. 58–66, 2024, doi: 10.56042/ijems.v31i1.561.
- [4] S. Eslami, J. F. Miranda, L. Mourão, P. J. Tavares, and P. M. G. P. Moreira, "Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, no. 1–4, pp. 127–136, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2504-x.
- [5] Sugiarto, M. S. Ma'arif, A. Wahjudi, and M. I. Yozianto, "Analysis of Friction Stir Welding Joints on High Density Polyethylene (Hdpe) Due To Change in Material Temperature and Spindle Rotation," *MM Science Journal*, vol. 2024, pp. 7848–7854, 2024, doi: 10.17973/MMSJ.2024_12_2024120.
- [6] M. S. Javadi, M. V. Ehteshamfar, and H. Adibi, "A comprehensive analysis and prediction of the effect of groove shape and volume fraction of multi-walled carbon nanotubes on the polymer 3D-printed parts in the friction stir welding process," *Polym Test*, vol. 117, no. September 2022, p. 107844, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107844.
- [7] and S. A. H. Hazim H. Abdulkadhum1,4, Sajed Abdul-khider2, "Mechanical behavior of friction stir welded high- density polyethylene sheets Mechanical behavior of friction stir welded high-density polyethylene sheets", doi: 10.1088/1757-899X/671/1/012030.
- [8] N. Vidakis, M. Petousis, C. David, D. Sagris, N. Mountakis, and A. Moutsopoulou, "The impact of process parameters and pin-to-shoulder ratio in FSW of polycarbonate: welding forces and critical quality indicators," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 130, no. 11–12, pp. 5457–5477, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-13033-9.
- [9] A. W. Nugroho, A. Arifin, M. R. Imbaraga, and M. B. N. Rahman, "The Effect of Tool Rotational Speed and Welding Configuration on the Mechanical Properties of High Density Polyethylene (HDPE) Plate Friction Stir Welded Joint," *Semesta Teknika*, vol. 27, no. 1, pp. 66–80, 2024, doi: 10.18196/st.v27i1.22182.
- [10] S. Ramesh Babu, S. R. K. Hudgikar, and Y. Poornachandra Sekhar, "Experimental Investigation on Friction Stir Welding of HDPE Reinforced with SiC and Al and Taguchi-Based Optimization," *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, no. October, pp. 929–939, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-1201-8_99.
- [11] "Enhancing The Efficiency of the Friction Stir Welding Joint for Low-Density Polyethylene Sheets by Adding Alumina Powder," vol. 3, no. 8, 2023.
- [12] M. A. R. Pereira, A. M. Amaro, and P. N. B. Reis, "Effect of Friction Stir Welding Techniques and Parameters on Polymers Joint Efficiency — A Critical Review," 2021.
- [13] M. A. E. Omer, M. Rashad, A. H. Elsheikh, and E. A. Showaib, "A review on friction stir welding of thermoplastic materials: recent advances and progress," *Welding in the World*, vol. 66, no. 1, 2022, doi: 10.1007/s40194-021-01178-0.
- [14] A. Chandrashekar, B. S. A. Kumar, and H. N. Reddappa, "Friction Stir Welding : Tool Material and Geometry," vol. 6, no. 1, pp. 16–20.
- [15] A. Muchhadiya, S. Kumari, D. Bandhu, K. Abhishek, and J. J. Vora, "Elucidating the Effect of Friction Stir Welding Variables on HDPE Sheets Using Grey Integrated with Fuzzy: Experimental Investigation and Parametric Optimization," *Jom*, vol. 75, no. 7, pp. 2684–2692, 2023, doi: 10.1007/s11837-023-05839-x.
- [16] J. Y. Sheikh-Ahmad, D. S. Ali, S. Deveci, F. Almaskari, and F. Jarrar, "Friction stir welding of high density polyethylene—Carbon black composite," *J Mater Process Technol*, vol. 264, no. September 2018, pp. 402–413, 2019, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2018.09.033.
- [17] F. Lambiase, H. A. Derazkola, and A. Simchi, "Friction Stir Welding and Friction Spot Stir Welding," 2020.
- [18] H. I. Khalaf *et al.*, "The Effects of Pin Profile on HDPE Thermomechanical Phenomena during FSW," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 21, 2022, doi: 10.3390/polym14214632.
- [19] A. A. Barakat, B. M. Darras, M. A. Nazzal, and A. A. Ahmed, "A Comprehensive Technical Review of the Friction Stir Welding of Metal-to-Polymer Hybrid Structures," 2023.

- [20] A. Alhourani, J. Sheikh-Ahmad, F. Almaskari, K. Khan, S. Deveci, and I. Barsoum, "Thermal modeling of friction stir welding of thick high-density polyethylene plates," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 28, no. November 2023, pp. 4186–4198, 2024, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.01.044.
- [21] B. Ahmad, F. Almaskari, J. Sheikh-ahmad, S. Deveci, and K. Khan, "Thermomechanical Modeling of Material Flow and Weld Quality in the Friction Stir Welding of High-Density Polyethylene," 2023.
- [22] K. Raza, M. Shamir, M. K. A. Qureshi, A. S. Shaikh, and M. Zain-ul-abdein, "On the friction stir welding, tool design optimization, and strain rate-dependent mechanical properties of HDPE–ceramic composite joints," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, vol. 31, no. 3, pp. 291–310, 2018, doi: 10.1177/0892705717697779.
- [23] G. Fan, J. Tomków, M. E. Abdullah, and H. A. Derazkola, "Investigation on polypropylene friction stir joint: effects of tool tilt angle on heat flux, material flow and defect formation," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 23, pp. 715–729, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.01.028.
- [24] B. Meyghani and M. Awang, "The Influence of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Behavior in Friction Stir Welding (FSW)," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 11, 2022, doi: 10.3390/met12111837.
- [25] N. Dialami, M. Cervera, and M. Chiumenti, "Effect of the tool tilt angle on the heat generation and the material flow in friction stir welding," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.3390/met9010028.
- [26] M. Badri, D. S. Arief, A. Pahlevi, T. Mesin, and U. Riau, "Pengaruh kedalaman pin terhadap sambungan friction stir welding pelat HDPE," pp. 534–539.
- [27] H. M. Kuhbanani, H. Yasemi, and H. A. Derazkola, "Effects of Tool Tilt Angle and Plunge Depth on Properties of Polycarbonate FSW Joint," vol. 7, no. 4, pp. 41–55, 2019.
- [28] Y. Huang *et al.*, "Friction stir welding/processing of polymers and polymer matrix composites," *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 105, pp. 235–257, 2018, doi: 10.1016/j.compositesa.2017.12.005.
- [29] D. Mishra, S. K. Sahu, R. P. Mahto, S. K. Pal, and K. Pal, *Strengthening and Joining by Plastic Deformation*, no. July 2018. Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-0378-4.
- [30] A. I. Albannai, "Review The Common Defects In Friction Stir Welding," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 9, no. 11, pp. 316–329, 2020.
- [31] S. Kumar, T. Medhi, and B. S. Roy, *Friction stir welding of thermoplastic composites*, no. January. Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-6412-9_21.
- [32] ASTM International, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials, ASTM Standard D790-17, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1520/D0790-17>.