

SIMULASI DISTRIBUSI TERMAL LAS GESEK ROTARI PADA PENYAMBUNGAN *MILD STEEL* BERBASIS ABAQUS

Andika Saputra^[1], Yohanes^[2], Ridwan Abdurrahman^[3]

Laboratorium Teknologi Produksi, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Riau

^[1]andika.saputra3424@student.unri.ac.id, ^[2]yohanes_tmesin@yahoo.com

ABSTRACT

The friction welding process occurs as a result of the direct conversion of mechanical energy in the form of friction into thermal energy. Thermal in the region near the peak joint has a significant effect on the formation of flash, the hot zone and the strength of the rotary friction welded joint. In this study, observations were made on the validation of the thermal distribution with the welding time reaching flash in experimental testing using a thermocouple sensor measuring instrument and the simulation using ABAQUS software. The test results will be carried out with a tensile test to see the maximum tensile strength of the variation of the chamfer angle 0 °, 15 °, 30 °, 45 °. The conclusions obtained are: (1) The form of thermal distribution from experimental and simulation testing is considered to be in accordance with the percentage error of the maximum thermal value of 37.55%. This is influenced by the slow thermal propagation on the friction surface. (2) Requirement of thermal distribution time in simulation and experimental testing, the shortest time is 59 seconds and 71 seconds at 0 ° chamfer angle and the longest time at 45 ° chamfer angle with 600 seconds and 494 seconds for simulation and experimental testing. This is influenced by the friction surface area and the small heat flux value. (3) The maximum tensile test results were obtained at a 45 ° chamfer angle of 505.53 MPa.

Keywords: Rotary Friction Welding, Thermal Distribution, Abaqus

1. Pendahuluan

Proses pengelasan adalah suatu proses penyambungan dua buah komponen material logam dengan memanfaatkan energi panas sebagai proses utama dalam proses penyambungan logam, baik dengan bantuan bahan tambahan maupun tidak menggunakan bahan tambahan sehingga terbentuklah suatu sambungan. Dengan metode-metode baru dalam proses penyambungan material merupakan petunjuk adanya perkembangan dalam teknologi pengelasan, salah satunya adalah pengelasan gesek. Pengelasan gesek merupakan pengelasan tanpa menggunakan kawat las atau elektroda sehingga bisa dipastikan bahwa sambungan yang diperoleh antara kedua material yang dilas adalah sambungan yang homogen. Selain itu penyambungan poros dengan proses ini dapat meminimalisir bergesernya sumbu dari material yang dilas [1].

Beberapa keuntungan dari *friction welding* ini adalah penghematan material, memerlukan waktu yang cepat untuk penyambungan dua material yang sama maupun berbeda. *Friction welding* juga dapat menyambung material yang bulat maupun tidak bulat. Sedangkan parameter proses yang penting adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar [2].

Termal pada sambungan puncak dan profil termal di wilayah dekat sambungan memiliki dampak yang signifikan terhadap pembentukan *flash*, perpanjangan zona yang dipengaruhi panas dan kekuatan sambungan. Efek termal dari

pengelasan gesekan diamati telah menurunkan kekerasan bahan yang dilas dibandingkan dengan bahan induk. Laju pemanasan dan pendinginan terkait erat dengan suhu sambungan dan secara langsung mempengaruhi tegangan residual yang dikembangkan pada sambungan tersebut. Oleh karena itu, sangat penting untuk memiliki alat yang secara cepat dan akurat memperkirakan termal sambungan puncak dan laju pendinginan berdasarkan parameter *input*. Metode numerik dikembangkan untuk mensimulasikan pengelasan gesekan dengan cepat memvisualisasikan respon spesifik proses untuk menentukan kualitas pengelasan. Analisis fenomena ini sangat membantu dalam meningkatkan metode dan kekuatan ikatan dalam proses pengelasan [3].

Penelitian untuk mengetahui pengaruh penambahan *flywheel* pada sistem penggerak mesin las gesek rotari terhadap kekuatan tarik baja *mild steel* [4]. Penelitian dengan melakukan penambahan *flywheel* pada sistem penggerak mesin *rotary friction welding* dan variasi sudut *chamfer forging* terhadap kekuatan pengelasan [5]. Penelitian dengan melakukan simulasi variasi sudut *chamfer forging* material *mild steel* pada las gesek rotari. Simulasi yang dilakukan terhadap material yang memiliki sudut *chamfer* 30°, 45°, 60° untuk mendapatkan waktu yang tepat dalam perubahan fase dengan menggunakan *software* Ansys. Akan tetapi dalam pencapaian mendapatkan *flash* belum begitu optimal dan hasil yang belum mencapai dengan keadaan eksperimental. Sedangkan pemahaman tentang pendistribusian termal simulasi

tidak dilakukan secara visual pada eksperimental sehingga dalam simulasi menjadi tidak valid jika membahas penjalaran termal pada benda kerja. Oleh karena itu, perlu diteliti penjalaran termal terhadap variasi sudut *chamfer* yang dapat meningkatkan kekuatan tarik hasil sambungan [6].

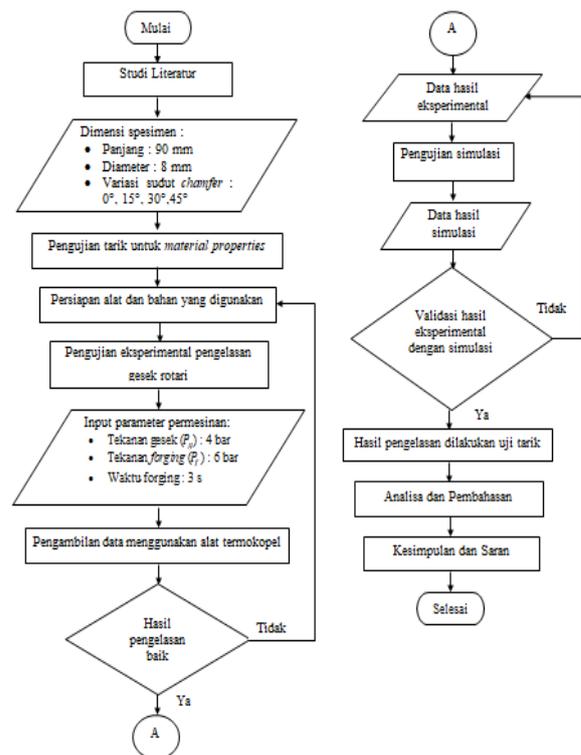
Dengan fenomena yang terjadi selama pengelasan, metode elemen hingga menjadi metode yang sangat tepat untuk dikembangkan pada proses pengelasan ini. Dalam penyederhanaan yang tepat dan mudah dimengerti maka metode ini disimulasikan pada aplikasi berbasis Abaqus [7].

Metode penggunaan simulasi mampu memberikan hasil perhitungan yang lebih tepat dan waktu yang diperlukan relatif lebih singkat jika dibandingkan pada perhitungan secara manual dan analitik, mampu mencegah kerusakan pada benda kerja tersebut, mendapatkan mutu produksi/kondisi operasi yang diinginkan dan dapat mengontrol jalannya proses pengelasan gesek rotari.

Maka perlu dilakukan simulasi menggunakan *software* Abaqus dengan tujuan untuk mengetahui simulasi pendistribusian termal pada material *mild steel* dengan *software* Abaqus CAE, mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk pendistribusian termal mencapai *flash*, mengetahui validasi hasil experimental dengan hasil simulasi dan mengetahui nilai kekuatan tarik pada hasil pengelasan gesek rotari.

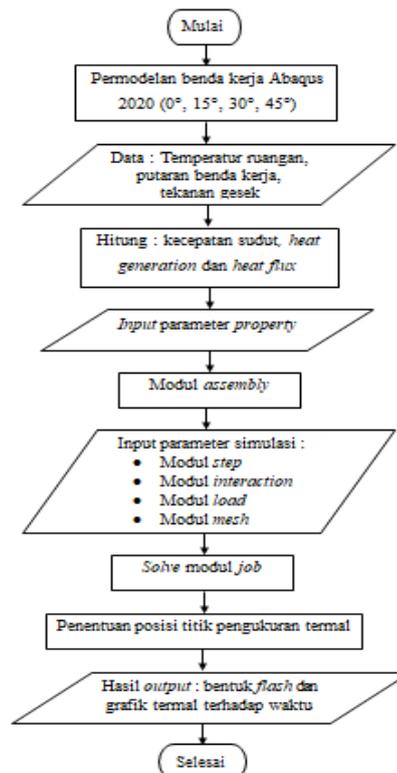
2. Metodologi

Dalam penelitian ini pengelasan gesek rotari dilakukan dengan menggunakan metode simulasi dan eksperimental dalam menyelesaikan suatu permasalahan. Secara garis besar metode dan mekanisme penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 1 Diagram alir penelitian

Untuk dapat mengetahui langkah pengerjaan atau pengujian simulasi las gesek rotari dalam mencapai *flash* dan hasil data *output* dapat dilihat pada Gambar 3.



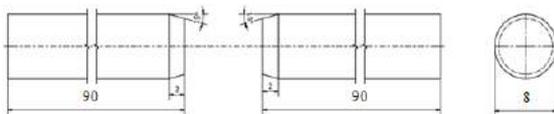
Gambar 2 Diagram alir simulasi

2.1 Pembuatan Benda kerja

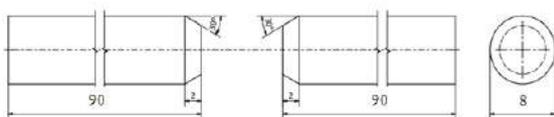
Dimensi benda kerja yang digunakan yaitu panjang 90 mm, diameter 8 mm, variasi sudut *chamfer* 0°, 15°, 30°, dan 45° dengan bahan *mild steel*.



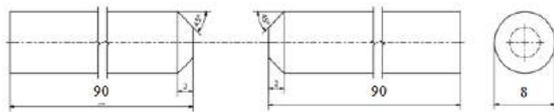
Gambar 3 Sudut *chamfer* 0°



Gambar 4 Sudut *chamfer* 15°



Gambar 5 Sudut *chamfer* 30°



Gambar 6 Sudut *chamfer* 45°

Penelitian ini menggunakan bahan *mild steel* dengan *properties material* untuk input parameter pengujian simulasi yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 *Properties material mild steel* [8]

<i>Properties</i>	<i>Metric</i>
<i>Density</i>	7800 kg/m ³
<i>Thermal conductivity</i>	43 W/m.K
<i>Specific heat capacity</i>	470 J/kg. °C
<i>Melting point</i>	1530 °C

Sedangkan untuk pengujian bahan yakni pengujian tarik hasil pengelasan menggunakan standar ASTM-E8 seperti pada Gambar 1 untuk hasil pembentukan benda kerja sebelum dilakukan uji tarik.

Tabel 2 Standar pengujian tarik (ASTM-E8) [9]

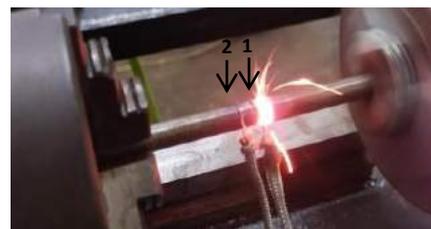
	<i>Specimen</i>
<i>G-Gage length</i>	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]
<i>D-Diameter (Note 1)</i>	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
<i>R-Radius of fillet, min</i>	6 [0.188]
<i>A-Length of reduced section, min (Note 2)</i>	36 [1.4]

2.2 Pengambilan Data

Pada penelitian ini metode pengambilan data dilakukan secara 2 pengujian yakni terhadap ekperiemntal dan simulasi. Pengambilan data distirbui termal terhadap pengujian eksperimental dan simulasi diperlakukan sama terhadap titik sensor pengukuran termal pada benda kerja.

2.2.1 Pengujian Eksperimental

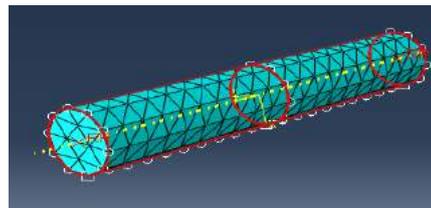
Pengambilan data distirbui termal secara eksperimen menggunakan alat ukur termokopel tipe K dengan peletakan sensor termokopel terhadap batang silinder pada posisi 2 mm dan 10 mm dari permukaan gesekan [8]. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 7 untuk lokasi 1 dan 2 peletakan sensor termokopel pada penelitian ini.



Gambar 7 Lokasi 1 dan 2 posisi termokopel 2 mm dan 10 mm dari antarmuka

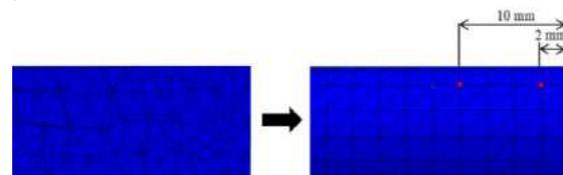
2.2.2 Permodelan Simulasi

Proses simulasi dilakukan menggunakan aplikasi Abaqus CAE 2020. Pemberian *mesh* terhadap simulasi benda kerja membantu dalam pengambilan data termal dalam proses pengelasan gesek rotari dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Model 3D dan mesh dari batang silinder

Sedangkan pada pengambilan data yang telah dilakukan proses pengelasan gesek rotari dapat mengukur titik pengukuran dari *mesh* yang telah diberikan yakni 2 mesh tiap bagian pada seluruh benda kerja dan dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Skema posisi titik pengukuran termal terhadap simulasi

Peletakan posisi titik pengukuran termal terhadap simulasi di samakan dengan keadaan eksperimental dengan ukuran titik 1 pada 2 mm dari dan titik 2 pada 10 mm dari permukaan gesek.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil parameter yang didapatkan saat pengujian eksperimental secara langsung dengan alat ukur pada pengelasan gesek rotari dengan variasi sudut *chamfer* dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 3 Data hasil eksperimental sudut *chamfer* 0°

Percobaan	Tekanan Gesek (2 bar)		Tekanan Forging (4 bar)		Panjang Spesimen	
	n	t	n	t	Awal	Akhir
	(rpm)	(s)	(rpm)	(s)	(mm)	(mm)
1	367,5	69	367,4			170
2	367,1	73	367,2		3	180
3	367,8	71	367,5			177,5
Rata-rata	367,4	71	367,3			172,9

Tabel 4 Data hasil eksperimental sudut *chamfer* 15°

Percobaan	Tekanan Gesek (2 bar)		Tekanan Forging (4 bar)		Panjang Spesimen	
	n	t (s)	n	t	Awal	Akhir
	(rpm)	(s)	(rpm)	(s)	(mm)	(mm)
1	368,2	121	368,1			171
2	368,5	125	368,9		3	180
3	369,2	119	369,1			171,5
Rata-rata	368,6	121	368,7			170,5

Tabel 5 Data hasil eksperimental sudut *chamfer* 30°

Percobaan	Tekanan Gesek (2 bar)		Tekanan Forging (4 bar)		Panjang Spesimen	
	n	t (s)	n	t	Awal	Akhir
	(rpm)	(s)	(rpm)	(s)	(mm)	(mm)
1	368,4	195	368,5			168
2	369,1	199	368,9		3	180
3	368,2	201	368,7			170
Rata-rata	368,5	198	368,7			169

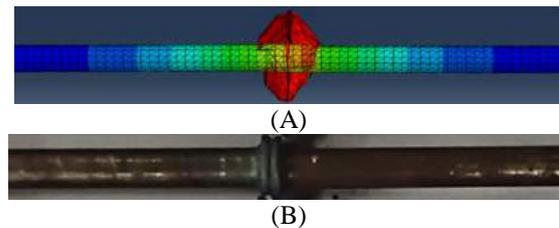
Tabel 6 Data hasil eksperimental sudut *chamfer* 45°

Percobaan	Tekanan Gesek (2 bar)		Tekanan Forging (4 bar)		Panjang Spesimen	
	n	t (s)	n	t	Awal	Akhir
	(rpm)	(s)	(rpm)	(s)	(mm)	(mm)
1	368,5	491	368,4			170
2	367,9	519	368,6		3	180
3	368,2	473	368,1			177,5
Rata-rata	368,2	494	368,3			172,9

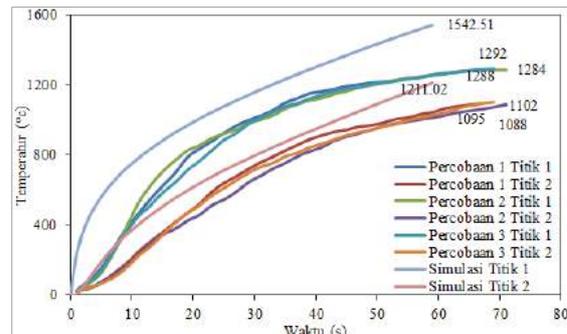
Data hasil parameter didapatkan secara langsung dengan metode pengukuran langsung menggunakan alat ukur. Parameter yang didapatkan menunjukkan parameter berbeda-beda yang mempengaruhi pengelasan gesekan. Parameter

yang digunakan untuk proses penyambungan dari kualitas yang tepat dari hasil lasan adalah waktu, tekanan, dan putaran. Dengan mengetahui panjang akhir dari spesimen uji, maka dapat mengetahui jumlah bahan yang terbuang akibat dari gesekan antar permukaan spesimen.

Hasil pengujian antara simulasi dan eksperimental akan dilakukan perbandingan untuk melihat validasi data hasil pengujian. Data hasil eksperimen dilakukan pada tiga kali tahap percobaan pengujian terhadap satu variasi sudut *chamfer*. Sedangkan pada simulasi dilakukan dengan satu kali percobaan terhadap satu kali variasi sudut *chamfer*. Data hasil eksperimental dan simulasi berupa hasil bentuk *flash* dan distribusi termal terhadap waktu dari spesimen pengelasan mencapai *flash*. Data hasil distribusi termal terhadap waktu pengelasan menggunakan variasi sudut *chamfer* pada pengujian eksperimental dan simulasi dapat dilihat pada Gambar 11, Gambar 13, Gambar 15 dan Gambar 17. Sedangkan untuk hasil bentuk *flash* dari pengelasan gesek rotari dapat dilihat pada Gambar 10, Gambar 12, Gambar 14 dan Gambar 16. Hasil *output* yang didapatkan akan dilakukan perbandingan terhadap pengujian eksperimental dan simulasi untuk mendapatkan hasil validasi dari penelitian ini. Untuk hasil pengelasan eksperimental dilakukan pengujian tarik agar dapat mengetahui kualitas dari pengelasan yang dilakukan dengan variasi sudut *chamfer*, dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 10 (A) hasil *flash* simulasi (B) hasil *flash* eksperimen sudut *chamfer* 0°

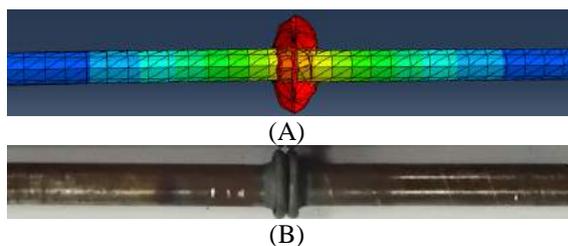


Gambar 11 Grafik distribusi termal eksperimental dan simulasi dengan sudut *chamfer* 0°

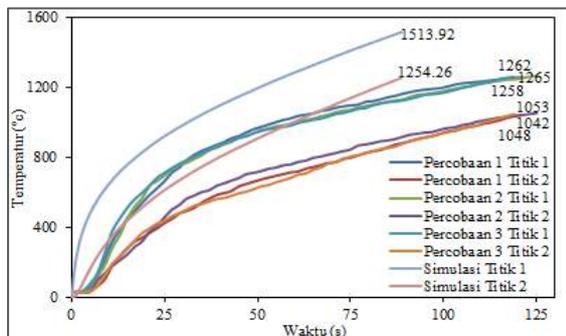
Pada Gambar 10 menunjukkan bentuk hasil *flash* pengujian eksperimental dan simulasi

pengelasan gesek rotari pada daerah tengah inti penyambungan. Dari simulasi dapat dilihat spesimen mengalami perubahan struktur mikro pada daerah *heat affected zone* (HAZ) akibat panas yang dihasilkan dari daerah inti sambungan las. Fenomena terbentuknya *flash* pada pengujian simulasi yang signifikan sesuai dengan hasil *flash* eksperimen pada pengelasan gesek rotari.

Gambar 11 menunjukkan grafik distribusi termal dan durasi waktu yang dibutuhkan pada sudut *chamfer* 0°. Terlihat bahwa distribusi termal terus meningkat akibat tekanan gesekan yang diberikan pada spesimen hingga mencapai titik puncak maksimal termal sebesar 1542 °C pada titik 1 dengan kebutuhan waktu 59 detik pada pengujian simulasi dan 1292 °C pada percobaan 3 eksperimen dengan kebutuhan waktu 71 detik. Sedangkan pada titik 2 termal maksimal mencapai 1211 °C dengan kebutuhan waktu 59 detik pada pengujian simulasi dan 1095 °C pada percobaan 1 dengan durasi waktu 69 detik. Semakin besar luas permukaan gesek yang bergesekan maka waktu yang dihasilkan las gesek rotari mencapai *flash* akan semakin kecil serta dengan nilai *heat flux* yang tinggi akibat permukaan gesek yang besar. Kebutuhan waktu yang lama akibat pengelasan gesek rotari pada pengujian eksperimen dari pada simulasi dipengaruhi oleh penurunan sifat mekanik dari bahan dan kemampuan alat saat eksperimen.



Gambar 12 (A) hasil *flash* simulasi (B) hasil *flash* eksperimen sudut *chamfer* 15°

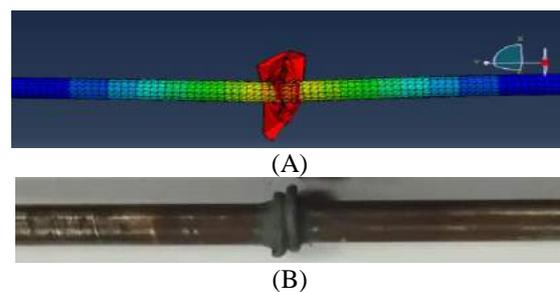


Gambar 13 Grafik distribusi termal eksperimental dan simulasi dengan sudut *chamfer* 15°

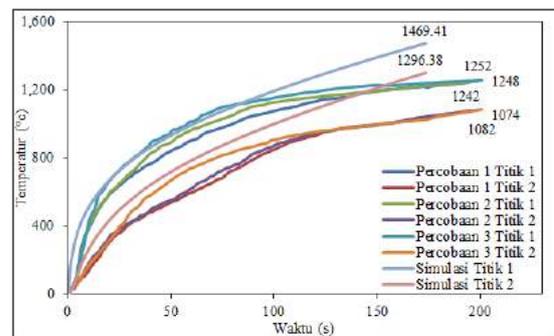
Gambar 12 memperlihatkan bentuk *flash* dari proses pengelasan gesek rotari akibat tekanan gesek sebesar 4 bar dan *forging* 6 bar yang

diberikan pada batang silinder yang saling bergesekan. Bentuk *flash* pada masing-masing pengujian simulasi dan eksperimen memperlihatkan bentuk yang sesuai pada daerah inti sambungan las.

Pada Gambar 13 menunjukkan hasil termal maksimal dan pendistribusian dengan menggunakan sudut *chamfer* 15° yang lebih kecil dari pada sudut *chamfer* 0° dengan kemiringan garis pada grafik yang tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh permukaan gesek yang kecil pada kedua buah spesimen. Hal ini juga berbanding lurus dengan waktu yang dibutuhkan dengan permukaan gesek kecil akan membutuhkan waktu yang lama. Dimana waktu yang dibutuhkan pada sudut *chamfer* 15° sebesar 119 detik pada percobaan 3 eksperimen dan 88,7 detik pada pengujian simulasi.



Gambar 14 (A) hasil *flash* simulasi (B) hasil *flash* eksperimen sudut *chamfer* 30°



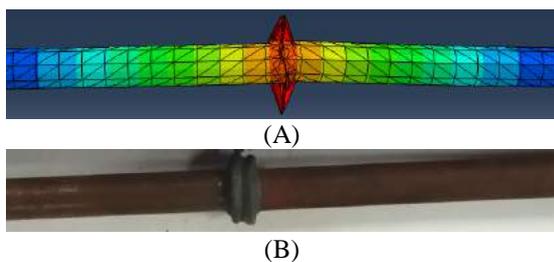
Gambar 15 Grafik distribusi termal eksperimental dan simulasi dengan sudut *chamfer* 30°

Pada pengaruh sudut *chamfer* seperti pada Gambar 14 menunjukkan hasil perubahan struktur yang berlebihan seiring pemberian tekanan gesek dan tekanan *forging* yang besar. Akibat pengaruh permukaan gesekan yang kecil mempersulitkan pengelasan gesek rotari dalam memusatkan panas dari pengelasan. Sehingga menimbulkan faktor *flash* yang besar dan kemiringan pada hasil penyambungan las pada pengujian simulasi dan eksperimen.

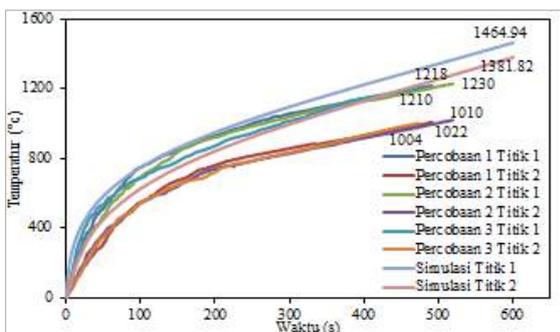
Sedangkan pada bentuk grafik distribusi termal menggunakan sudut *chamfer* 30° seperti pada Gambar 15 menunjukkan bentuk hasil grafik perbandingan yang tidak terlalu jauh dari segi distribusi termal dan durasi waktu. Dengan pemakaian sudut *chamfer* yang besar maka termal maksimal yang didapatkan akan semakin kecil,

begitu juga dengan durasi waktu yang didapatkan akan semakin lama. Hal ini dapat dilihat dari Gambar 12, Gambar 14, Gambar 16 dan Gambar 18. Pencapaian termal maksimal sebesar 1469 °C untuk simulasi dan 1252 °C pada titik 1 pengukuran termal. Untuk titik 2 pengukuran mendapatkan termal maksimal 1296 °C pada simulasi dan 1082 °C pada pengujian eksperimental. Kebutuhan waktu yang diperoleh pada titik 1 pengujian simulasi mendapatkan durasi waktu sebesar 173 detik dan 195 detik pada percobaan 1 eksperimen.

Akan tetapi pencapaian termal maksimum dari tiap pengujian sudah termasuk dalam ketentuan dari penelitian yang dilakukan oleh [10] temperatur difusi dari bahan *mild steel* dengan kisaran 0,6 sampai 0,7 yaitu berada pada termal 1071 °C terhadap titik leleh material 1530 °C.



Gambar 16 (A) Hasil *flash* simulasi (B) Hasil *flash* eksperimen sudut *chamfer* 45°



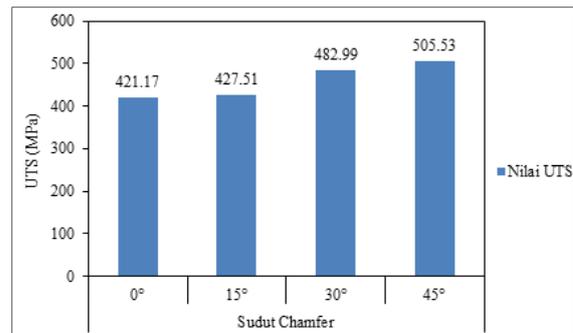
Gambar 17 Grafik distribusi termal eksperimental dan simulasi dengan sudut *chamfer* 30°

Pada Gambar 16 menunjukkan hasil fenomena yang sesuai dari pencapaian proses penyambungan mendapatkan *flash*. Hal ini akibat dari gesekan yang berlangsung terus menerus hingga panas yang dihasilkan dari gesekan menjadi maksimal hingga mencapai titik leleh dari bahan spesimen *mild steel*.

Pengaruh sudut *chamfer* yang besar yakni 45° mengakibatkan durasi waktu yang dibutuhkan pada pengujian ini menjadi lebih lama dari pengujian yang menggunakan sudut *chamfer* lainnya. Durasi waktu yang didapatkan sebesar 600 detik untuk simulasi dan 473 detik pada percobaan 3 eksperimen. Hal ini akan menimbulkan kerugian dari segi waktu pengelasan yang dicapai. Berdasarkan bentuk grafik dari Gambar 17

dapat dilihat pada durasi waktu untuk pengujian simulasi membutuhkan waktu yang lebih dari pada eksperimen mencapai *flash*. Hal ini dikarenakan dari panas yang dihasilkan dari gesekan saat keadaan eksperimental lebih optimal karena faktor sifat mekanik dari bahan dan temperatur ruangan.

Akan tetapi, material yang akan disambung dengan metode pengelasan gesek rotari meningkatkan nilai kekuatan tarik sambungan lasan benda kerja dari pada benda kerja dengan model permukaan kontak tanpa sudut *chamfer* [11]. Nilai kekuatan tarik pengelasan gesek rotari pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18 Hasil nilai kekuatan tarik maksimum terhadap hasil pengelasan menggunakan sudut variasi *chamfer*

Dapat diketahui nilai kekuatan tarik maksimum pada masing-masing variasi sudut *chamfer* dari Gambar 18 diperoleh bahwa nilai kekuatan tarik maksimum tertinggi pada spesimen hasil pengelasan menggunakan sudut *chamfer* 45° yang memiliki nilai rata-rata 505,53 MPa sedangkan nilai kekuatan tarik terendah diperoleh pada spesimen hasil pengelasan menggunakan sudut *chamfer* 0° yang memiliki nilai 421,17 MPa.

Dari data tersebut diketahui bahwa variasi sudut *chamfer* mempengaruhi nilai kekuatan tarik maksimum dari hasil pengelasan, hal ini dikarenakan variasi pemberian sudut *chamfer* mempengaruhi proses pengelasan dimana seperti diketahui semakin besar sudut *chamfer* maka semakin kecil luas penampang yang bergesekan untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk proses penyambungan las gesek rotari yang mengakibatkan durasi gesek yang dibutuhkan semakin lama, sehingga proses pengerjaan panas yang berlangsung selama proses pengelasan menjadi semakin lama yang menyebabkan kekuatan tarik maksimum rata dengan variasi sudut *chamfer* 45° menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan variasi sudut *chamfer*. Sehingga dapat dianalisa bahwa pada sudut 45° merupakan sudut *chamfer* yang ideal untuk digunakan pada spesimen uji dimana pada sudut *chamfer* 45° ini memiliki nilai

kekuatan tarik tertinggi dibandingkan sudut *chamfer* yang lain seperti pada sudut *chamfer* 0°, 15°, dan 30°.

4. Kesimpulan

Pengaruh variasi sudut *chamfer* yang diberikan, dari segi bentuk *flash* yang didapatkan menjadi berbeda-beda pada tiap variasi sudut *chamfer* dan bentuk *flash* eksperimental dapat dikatakan sesuai dengan hasil simulasi. Sedangkan dari segi hasil pendistribusian termal terhadap durasi waktu pengelasan untuk simulasi sudah mendekati dengan keadaan eksperimental dan dapat dikatakan valid. Untuk hasil pengujian tarik menggunakan sudut *chamfer* yang besar mendapatkan hasil nilai kekuatan tarik yang lebih tinggi dari pada menggunakan sudut *chamfer* yang kecil.

Daftar Pustaka

- [1] Suratman, M. 2001. *Teknik Mengelas*. Cetakan 1. Pustaka Grafika. Bandung.
- [2] Imawan, B. Irawawan, Y. S dan Soenoko, R, 2003. Pengaruh Sudut Chamfer dan Kekasaran Permukaan Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Gesek Al-Mg-Si. *Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Jurnal Mahasiswa Mesin. Volume V No: 021.8.1.04*.
- [3] Khany S E, K. N. Krishnan, M. A. Wahed. 2012. Study of Transient Temperature Distribution in a Friction Welding Process and its Effects on its Joints. *International Journal Of Computational Engineering Research* Vol. 2 Issue. 5.1645-1655.
- [4] Yohanes, Erikson Siregar, Anita Susilawati. Muftil Badri. 2018. Performance Analysis of Flywheel Addition on Drive System of Rotary Friction Welding Machine. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-Science and Engineering- Vol.1*
- [5] Efriyansyah, M. 2018. Studi Eksperimental Pengaruh Penambahan Flywheel Pada Sistem Penggerak Mesin Las Gesek Rotari Terhadap Hasil Pengelasan. *Skripsi. Fakultas Teknik. Universitas Riau*.
- [6] Nafis, M. 2019. Simulasi Pengaruh Sudut Chamfer Forging Terhadap Penyambungan Material Mild Steel Pada Las Gesek Rotari *Skripsi. Fakultas Teknik. Universitas Riau*.
- [7] Li, Wenya., S. Shi, F. Wan, Z. Zhang, T. Ma dan J. Li. 2012. *Numerical Simulation Of Friction Welding Processes Based on Abaqus Environment. Journal Of Engineering Science And Technology*. 5 (3):10-19.
- [8] Seli, Hazman., M. Zaky, A. Izani, E. Rachman. 2010. Characterization and Thermal Modelling of Friction Welded Alumina–Mild Steel With The Use of Al 1100 Interlayer. *Journal of Alloys and Compounds* 506 (2010) 703–709.
- [9] ASTM E8/E8M-11. 2012. Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials. USA
- [10] Kolarik, L., Janovcc J, M. Kolarikova dan P. Nachtnebl. 2015. Influence of Diffusion Welding Time on Homogenous Steel Joints. *Procedia Engineering* 1678 – 1685.
- [11] Lin, C.B. et al. 1999. The Effect of Joint Design and Volume Fraction on Friction Welding Properties of A360/Sic Composites”, *Welding Research Supplement, Department of Mechanical Engineering. Tamkang University, Taiwan*.