



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEKANAN AKSIAL
PADA *DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING* TERHADAP
TEMPERATUR DAN *TENSILE STRENGTH* DENGAN
MATERIAL POLIMER *POLYPROPYLENE***

**ADITYA DEWANGGA WARDHANA SUTOYO
NRP. 02111545000041**

**Dosen Pembimbing:
Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEKANAN AKSIAL
PADA *DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING* TERHADAP
TEMPERATUR DAN *TENSILE STRENGTH* DENGAN
MATERIAL POLIMER *POLYPROPYLENE***

ADITYA DEWANGGA WARDHANA SUTOYO
NRP. 0211154500041

Dosen Pembimbing:
Ir. YUSUF KAELANI, M.Sc.E

PROGRAM SARJANA
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TM141585

**EXPERIMENTAL STUDY EFFECT OF AXIAL PRESSURE
ON DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING IN THE
DIRECTION OF TEMPERATURE AND TENSILE
STRENGTH WITH POLYMER MATERIAL
POLYPROPYLENE**

ADITYA DEWANGGA WARDHANA SUTOYO
NRP. 0211154500041

Advisory Lecturer
Ir. YUSUF KAELANI, M.Sc.E

BACHELOR PROGRAM
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

LEMBAR PENGESAHAN

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEKANAN AKSIAL
PADA *DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING* TERHADAP
TEMPERATUR DAN *TENSILE STRENGTH* DENGAN
MATERIAL POLIMER *POLYPROPYLENE***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ADITYA DEWANGGA WARDHANA SUTOYO
NRP. 0211154500041

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- 1 Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E
NIP. 196511031996021001(Pembimbing)
- 2 Ir. Nur Husodo, M.S
NIP. 196104211987011001(Penguji I)
- 3 Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD
NIP. 198202102006041002(Penguji II)

SURABAYA
16 JANUARI 2018

STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEKANAN AKSIAL PADA *DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING* TERHADAP TEMPERATUR DAN *TENSILE STRENGTH* DENGAN MATERIAL POLIMER *POLYPROPYLENE*

Nama Mahasiswa : Aditya Dewangga Wardhana Sutoyo
NRP : 2115 105 041
Departemen : S1 Teknik Mesin FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

Abstrak

Friction welding merupakan salah satu metode pengelasan jenis solid state welding yang mana energi mekanik dari kedua material yang bergesekan tersebut menimbulkan panas pada interface. Proses pengelasannya mengkombinasikan antara panas dan tekanan tempa sehingga kedua material akan tersambung dengan homogen. Friction welding tidak membutuhkan filler dalam pengelasannya. Fusion terjadi karena gesekan antar material itu sendiri yang mana energi mekanik dikonversi menjadi energi panas. Untuk pengelasan material polimer saat ini masih kurang diperhatikan, namun material ini mampu menggantikan peran logam untuk menghindari terjadinya kerusakan karena substansi kimia. Pengelasan ini dipengaruhi berbagai variabel diantaranya kecepatan putar, durasi gesekan, tekanan gesek, dan tekanan tempa.

Penggunaan material polimer ini sering digunakan untuk industri makanan dan medis, terutama polimer polypropylene. Maka dalam penelitian ini akan mengkaji proses pengelasan friction welding terhadap polypropylene. Variasi yang digunakan dalam proses pengelasan ini untuk tekanan gesek 37,51 ; 56,26 ;

dan 75,02 Kgf/cm², kemudian dengan variabel tetap kecepatan putar 750 rpm, durasi waktu gesek 14 detik, tekanan tempa 112,53 Kgf/cm², dan durasi tempa 5 detik. Pengambilan data dari sampel uji difokuskan pada panas yang dihasilkan karena gesekan kedua material polypropylene tersebut, selain itu juga diuji sifat mekaniknya dengan pengujian tarik dibandingkan dengan kekuatan menggunakan lem perekat.

Sambungan dengan temperatur yang baik berasal dari temperatur tertinggi dimana setiap penggunaan tekanan gesek yang berbeda memberikan waktu yang berbeda-beda pula untuk mencapai temperatur yang baik. Tekanan gesek 37,51 Kgf/cm² mencapai temperatur 134 °C pada detik ke-16, tekanan gesek 56,26 Kgf/cm² mencapai temperatur 132 °C pada detik ke-14, dan tekanan gesek 75,02 Kgf/cm² mencapai temperatur 148 °C pada detik ke-12. Kekuatan tarik yang optimal sebesar 41,4821 MPa dari salah satu variabel tekanan gesek sebesar 56,265 kgf/cm² dengan temperatur interface 157 °C. Hasil kekuatan tarik dengan sambungan lem hanya menghasilkan sebesar 32,46 MPa, sehingga kekuatan tarik sambungan dengan metode friction welding lebih baik daripada sambungan lem. Distribusi temperatur pada jarak 5 mm dari interface memiliki kesesuaian antara eksperimen dan hasil analisa numerik dimana mencapai temperatur 40 °C yang merupakan temperatur transisi dari temperatur spesimen dengan temperatur pengaruh dari interface.

Kata Kunci : Friction Welding, Polypropylene, Tekanan Gesek, Temperatur, Kekuatan Tarik

EXPERIMENTAL STUDY EFFECT OF AXIAL PRESSURE ON DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING IN THE DIRECTION OF TEMPERATURE AND TENSILE STRENGTH WITH POLYMER MATERIAL POLYPROPYLENE

Name : Aditya Dewangga Wardhana Sutoyo
NRP : 2115 105 041
Department : S1 Teknik Mesin FTI – ITS
Advisory Lecturer : Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

Abstract

Friction welding is one of the solid state welding type methods that the mechanical energy of two materials rubbing each other causes heat to the interface. The welding process combines heat and forging force that both materials will be homogeneously joint. Friction welding doesn't require filler in welding. Fusion occurs because of the friction between the material itself that the mechanical energy is converted to heat energy. Polymer materials welding is currently underestimated, but this material is able to replace the role of metal to avoid damage due to chemical substances. This welding is influenced by various variables such as rotational speed, friction duration, friction pressure, and forging pressure.

Application of this polymeric material is often used for food and medical industries, especially polypropylene polymers. So in this study will examine the process of welding friction welding against polypropylene. Variations used in this welding process for frictional pressure 37,51 ; 56,26 ; dan 75,02 Kgf/cm², then with fixed variable 750 rpm rotational speed, friction time duration of 14 seconds, forging pressure of 112,53 Kgf/cm², and forging duration is 5 seconds. Data collected from the test sample focused on the heat generated due to the friction of the polypropylene materials, while also tested its mechanical

properties with tensile test compared to the strength of using adhesive glue.

The weld with a good temperature comes from the highest temperature where each use of different friction pressure gives different times to reach a good temperature. The frictional pressure of 37,51 Kgf/cm² reaches a temperature of 134 °C at 16 seconds, The frictional pressure of 56,26 Kgf/cm² reaches a temperature of 132 °C at 14 seconds, and frictional pressure of 75,02 Kgf/cm² reaches a temperature of 148 °C at 12 seconds. The optimal tensile strength of 41,4821 MPa from one of the frictional pressure variables 56,265 kgf/cm² with interface temperature 157 °C. The result of tensile strength with glue joints yields only 32.46 MPa, so that the tensile strength of the joint by the friction welding method is better than glue joint. Temperature distribution at a distance of 5 mm from the interface has a match between experiments and numerical analysis results which reach a temperature of 40 °C which is transition temperature of the specimen temperature with influence of interface temperature.

Key Words : Friction Welding, Polypropylene, Frictional Pressure, Temperature, Tensile Strength.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena rahmat dan hidayah-Nya, tugas akhir yang berjudul “***STUDI EKSPERIMEN PENGARUH TEKANAN AKSIAL PADA DIRECT-DRIVE FRICTION WELDING TERHADAP TEMPERATUR DAN TENSILE STRENGTH DENGAN MATERIAL POLIMER POLYPROPYLENE***” ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin ITS Surabaya, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan almamater dan masyarakat.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Allah SWT dan junjungan besar Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan ketenangan dalam jiwaku.
2. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Nur Husodo, M.S sebagai penguji yang telah memberi dukungan terlaksananya penelitian ini dan saran-saran yang telah diberikan.
4. Bapak dan Ibu, serta kakak-kakakku yang benar - benar memberikan semangat, cinta dan doa yang sangat berperan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

5. Dosen tim penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh dosen dan staf pengajar Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
7. Miftahul Ahzabuddin sebagai partner dalam pengerjaan Tugas Akhir.
8. Seluruh kawan-kawan S1 Teknik Mesin Lintas jalur 2015 yang senantiasa berbagi ilmu selama perkuliahan.
9. Mifta Hilda Tyasa yang selalu mendukung terlaksananya penelitian dan mendengar masalah-masalah selama penyusunan dan menjelang sidang Tugas Akhir.
10. Yeniar Prida Mukharomah yang telah membantu kelangsungan untuk keperluan presentasi.
11. Seluruh keluarga laboratorium mekanika benda padat yang telah memberikan bantuan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Amin.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa menyadari bahwa dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan dan kekurangan. Oleh karena itu, diharapkan kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, untuk mahasiswa Mesin khususnya.

Surabaya, 21 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN TEORI DASAR	7
2.1. Tinjauan Pustaka.....	7
2.1.1 Libin Yang.....	7
2.1.2 Sirajuddin, Khrisnan, dan Mohd Abdul.....	7
2.1.3 Ching-Bin Li, Li Cheng Wu, dan Yu Yao.....	9
2.1.4 Miftahul Ahzabudin.....	10
2.2. Pengelasan	11
2.3. <i>Solid State Welding</i>	12
2.4. Teknologi Pengelasan Gesek	13
2.5. <i>Direct-Drive Friction Welding</i>	14
2.6. Polimer.....	16
2.6.1 <i>Polypropylene</i>	17
2.7. Pengaruh Gaya Aksial Terhadap Energi Panas	20

2.8. Perpindahan Panas	22
2.8.1 Tahap Pemanasan	23
2.8.2 Tahap Pendinginan	24
2.9. Uji Tarik	24
BAB III METODOLOGI	29
3.1 Diagram Alir Penelitian	29
3.2 Material Benda Uji	31
3.3 Peralatan Yang Digunakan	32
3.4 Variabel Penelitian	36
3.4.1 Variabel Bebas	36
3.4.2 Variabel Respon	36
3.4.3 Variabel Yang Dikendalikan	36
3.5 Metode Pengujian	37
3.6 Pengujian Spesimen	39
3.6.1 Pengujian Tarik	39
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Data Temperatur <i>Friction Welding</i>	43
4.2 Data <i>Upset</i>	46
4.3 Data Pengujian Tarik	47
4.4 Analisa Numerik Temperatur <i>Friction Welding</i>	48
4.5 Analisa Data Temperatur	50
4.6 Analisa Data <i>Upset</i>	53
4.7 Analisa Data Pengujian Tarik	56
BAB V PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64

**DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN**

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 <i>Friction Welding Process</i>	1
Gambar 2.1 Grafik <i>Time vs Temperature</i>	8
Gambar 2.2 Skema Sistem <i>Spin-Friction Welding</i>	9
Gambar 2.3 Spesimen Material Untuk Pengujian Tarik	9
Gambar 2.4 Hasil Data <i>Bonding Strength PP-PP</i>	10
Gambar 2.5 Klasifikasi Pengelasan	12
Gambar 2.6 <i>Friction Welding</i>	13
Gambar 2.7 Grafik Fase <i>Direct-Drive Friction Welding</i>	15
Gambar 2.8 Struktur Rantai <i>Polypropylene</i>	18
Gambar 2.9 Konfigurasi <i>Isotactic</i>	18
Gambar 2.10 Konfigurasi <i>Syndiotactic</i>	19
Gambar 2.11 Konfigurasi <i>Atactic</i>	19
Gambar 2.12 Permukaan Gesekan dan Cincin Gesekan.....	21
Gambar 2.13 Propertis <i>Thermal Material Polypropylene</i>	24
Gambar 2.14 Kelakuan Tarikan Bahan Polimer	25
Gambar 2.15 Grafik <i>Stress-Strain PP dan Biocomposite</i>	25
Gambar 2.16 Kurva Tegangan-Regangan.....	26
Gambar 2.17 Spesimen Uji Silinder Pejal	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan.....	29
Gambar 3.2 Spesimen Uji <i>Polypropylene</i>	31
Gambar 3.3 Mesin <i>Direct-Drive Friction Welding</i>	32
Gambar 3.4 Mesin Potong <i>Cutting Wheel</i>	33
Gambar 3.5 Mesin Bubut.....	34
Gambar 3.6 <i>Infrared Sensor Temperature</i>	35
Gambar 3.7 Sensor Kecepatan Putar <i>Tachometer</i>	36
Gambar 3.8 Dimensi Spesimen.....	37
Gambar 3.9 Lem Perekat	39
Gambar 3.10 Mesin Uji Tarik	40

Gambar 3.11 Spesimen Uji Tarik.....	40
Gambar 4.1 Hasil <i>Direct-Drive Friction Welding</i>	43
Gambar 4.2 Titik Perekaman Temperatur Jarak 5 mm	24
Gambar 4.3 Grafik Temperatur Pada Waktu 14 Detik.....	48
Gambar 4.4 Grafik Data Temperatur <i>Interface</i> Spesimen .	50
Gambar 4.5 Grafik Data Temperatur Pada Jarak 5 mm	52
Gambar 4.6 Grafik Data <i>Upset</i>	53
Gambar 4.7 Ilustrasi <i>Flash</i> Pada Pengelasan Gesek	54
Gambar 4.8 Fenomena <i>Flash</i> dan <i>Burr</i> Spesimen	55
Gambar 4.9 Grafik Kekuatan Tarik.....	56
Gambar 4.10 Bagian Struktur <i>Tensile Morphology</i>	58
Gambar 4.11 <i>Tensile Morphology</i> Spesimen	59
Gambar 4.12 Grafik Kekuatan Tarik Tiap Spesimen.....	60
Gambar 4.13 Hasil <i>Friction Welding</i>	61

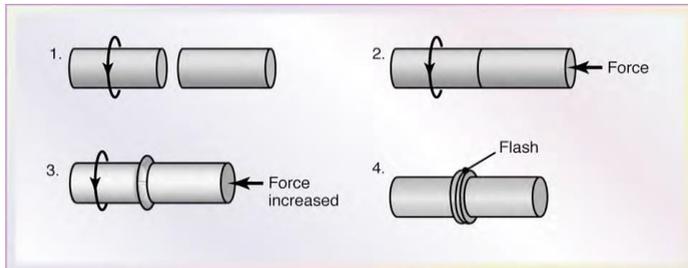
DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Properti <i>Polypropylene</i>	20
Tabel 3.1 Lembar Data Penelitian.....	41
Tabel 4.1 Hasil Data Temperatur Pada <i>Interface</i>	44
Tabel 4.2 Hasil Data Temperatur Jarak 5 mm	45
Tabel 4.3 Hasil Penelitian Miftahul Pada <i>Interface</i>	45
Tabel 4.4 Hasil Data Pengurangan Panjang (<i>Upset</i>).....	46
Tabel 4.5 Hasil Data Pengujian Tarik.....	47

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Metode las gesek (*friction welding*) adalah metode penyambungan dua buah material. Dalam metode ini panas dihasilkan dari perubahan energi mekanik kedalam energi panas pada bidang *interface* benda kerja karena adanya gesekan selama gerak putar dibawah tekanan [1]. Karena memerlukan putaran untuk menghasilkan panas, mesin *friction welding* didesain mirip dengan mesin bubut. Mesin *friction welding* memerlukan *spindle* yang bertenaga untuk memutar salah satu benda kerja pada kecepatan tinggi. Mesin ini juga harus bisa menggeser benda kerja secara aksial pada *chuck* yang tidak berputar.



Gambar 1.1 *Friction Welding Process*
(Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid)

Polimer merupakan material-material plastik *high molecular weight* sebagai suatu bahan rekayasa bukan logam yang mana memiliki berbagai aplikasi dalam masyarakat moderen, khususnya untuk diaplikasikan pada lingkungan temperatur rendah. Penggunaan polimer untuk menggantikan peran logam sangat efektif karena memiliki sifat yang ringan namun tangguh, tahan terhadap substansi kimia, tahan korosi, dan harga material yang

relatif jauh lebih murah. Saat ini bahan polimer telah banyak digunakan untuk bidang medis yaitu alat pengaduk dan industri makanan misalnya untuk *part handle* dan roda gigi. Polimer dikelompokkan berdasarkan respon mereka terhadap panas yaitu jenis termoplastik dan termoset.

Salah satu material polimer yang tergolong jenis termoplastik adalah *polypropylene*. Sifat termoplastik membawa keuntungan tersendiri karena respon material terhadap panas hingga melumer tidak mengubah sifat material setelah memadat dalam proses pendinginan [2]. Oleh sebab itu sangat memungkinkan untuk dilakukan proses penyambungan dua buah material *polypropylene*.

Dalam proses *friction welding* masih sangat jarang dilakukan penelitian terhadap material *polypropylene*, penggunaan material *polypropylene* dalam proses *friction welding* membutuhkan gaya tekan yang cukup tinggi untuk membangkitkan gaya gesek yang besar pada permukaan kontak material [3]. Sehubungan dengan fenomena di atas maka perlu diadakan pengkajian dan penelitian mengenai proses penyambungan dengan proses *friction welding* pada material *polypropylene* dan hubungan dengan berapa besar gaya tekan yang diperlukan untuk penyambungan *polypropylene* yang optimum.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi tekanan aksial terhadap panas yang dihasilkan pada proses

penyambungan material *polypropylene* dengan metode *direct-drive friction welding* ?

2. Bagaimana efek perubahan gaya aksial tersebut terhadap nilai uji tarik-?

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini memiliki keterbatasan yaitu :

1. Tidak melakukan karakterisasi fasa dan komposisi unsur pada daerah sambungan.
2. Kontak kedua benda kerja pada saat gesekan dan penempaan dianggap tidak terjadi *missalignment* dan kondisi permukaan material diasumsikan rata.
3. Kecepatan putaran *rotating chuck* dianggap konstan pada saat fase gesekan.
4. Tekanan gesek dianggap konstan pada saat fase gesekan.
5. Kondisi peralatan yang digunakan saat pengambilan data diasumsikan terkalibrasi dan seluruh pengukuran variabel pengelasan dianggap tepat seperti pada alat pengukuran.
6. Panas masukan dianggap konstan selama proses *friction welding*.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian *friction welding* ini adalah sebagai berikut:

1. Mengkaji pengaruh variasi tekanan normal terhadap panas yang dihasilkan pada proses penyambungan material *polypropylene* dengan metode *direct-drive friction welding*.

2. Menganalisa variasi tekanan tersebut terhadap nilai uji tarik pada proses penyambungan material *polypropylene* dengan metode *direct-drive friction welding*.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, dibuat suatu sistematika penulisan agar nantinya penulisan dapat terstruktur dengan baik. Dengan terstrukturnya penulisan ini diharapkan pembaca mudah memahami maksud dan tujuannya. Dalam penulisan ini, dibagi beberapa tahap sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas mengenai bagaimana latar belakang penulisan, permasalahan yang diangkat, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN TEORI DASAR

Membahas tentang teori serta konsep pengelasan, bahan polimer, masukan panas, dan uji kekuatan tarik yang berkaitan dalam eksperimen.

BAB III METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas tentang metodologi penelitian diagram alir, pengumpulan data serta tahap-tahapan proses eksperimen.

BAB IV PERHITUNGAN DAN PENGUJIAN

Membahas tentang perhitungan dan pengujian dalam bentuk data-data yang telah dikumpulkan dalam bentuk grafik-grafik.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Membahas tentang kesimpulan dari hasil analisis dan saran-saran penulis dalam penyusunan tugas akhir.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN TEORI DASAR

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1 Libin Yang, “Modelling Of The Inertia Welding Of Inconel 718”

Dalam penelitian pengelasan gesek terhadap material silinder inconel 718 yang dilakukan oleh Libin Yang, proses pengelasan ini dipelajari dengan menggunakan FEM dan pemodelan analisis termal yang mana sesuai dengan prosedurnya yaitu *heating stage*, *steady state stage*, dan *cooling stage*. menunjukkan bahwa ada gradien suhu yang curam pada *interface*.

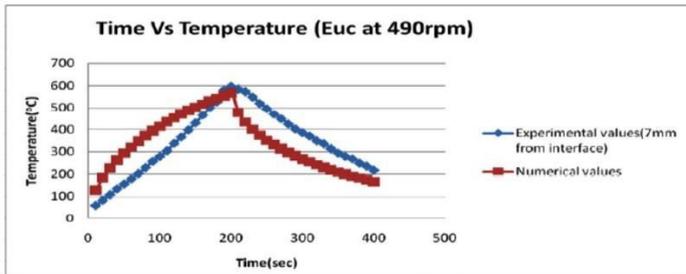
Hasil penelitian dari material inconel 718 yang didapatkan ini bahwa lebar zona yang terkena HAZ terpengaruh terhadap waktu saat pembentukan *flash*. Pada tahap *steady state* semakin lama waktu maka semakin luas jangkauan HAZ, dimana lama waktu saat *steady state* sangat mempengaruhi kualitas sambungan. Kemudian untuk *heat flux* keefektifannya akan menurun seiring meningkatnya atau lamanya waktu pengelasan untuk mempertahankan temperatur konstan pada *interface*.

2.1.2 Sirajuddin Elyas Khany, K.N.Krishnan, dan Mohd Abdul Wahed, “TRANSIENT TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A STEEL ROD SUBJECTED TO FRICTION WELDING”

Pada penelitian yang pernah dilakukan oleh Sirajuddin Elyas Khany, K.N.Krishnan, dan Mohd Abdul Wahed mengenai distribusi temperatur pada metode penyambungan *friction welding* dengan material *Stainless Steel 304* dan *Eutectoid Steel* yang mana memiliki diameter 15 mm dan panjang 80 mm. Proses penyambungannya dilakukan dengan variasi kecepatan putar 490 rpm dan 790 rpm, variasi tekanan gesek 5-8 bar dan tekanan tempa 11-15 bar. pengambilan data temperatur yang dilakukan pada 4

titik pada material yang *stationary* yang berjarak 7 mm, 14 mm, 21 mm, 28 mm dari *interface* dengan menggunakan sensor temperatur termokopel tipe K.

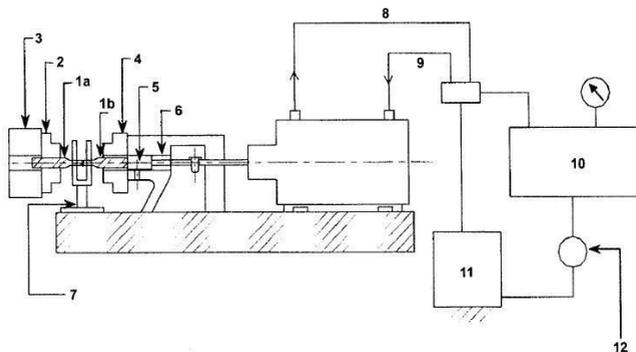
Studi eksperimental ini dilakukan dengan metode *continuous direct-drive friction welding*. Pada distribusi temperatur telah ditentukan pada jarak 7 mm dari *interface* dengan kecepatan putar 490 rpm dan 790 rpm didapatkan temperatur pemanasan untuk *stainless steel* 90 detik dan 40 detik sekitar 630 °C dan 410 °C, kemudian untuk *eutectoid steel* 200 detik dan 70 detik sekitar 578 °C dan 368 °C. Pendinginan dimulai seperti pada proses pemanasan dimana temperatur pemanasan yang terakhir digunakan untuk memulai proses pendinginan, kemudian proses yang sama dilakukan pada parameter jarak 14, 21, dan 28 mm dari *interface*. Temperatur meningkat dengan cepat pada *interface*, dan bertahap menuju pangkal silinder baja. Seiring meningkatnya kecepatan (rpm) maka temperatur yang dicapai semakin memerlukan waktu yang relatif pendek pada kedua baja silinder pejal.



Gambar 2.1 Grafik *Time vs Temperature* pada jarak 7mm dari *interface* dengan kecepatan 490 rpm pada material *Eutectoid Steel*.

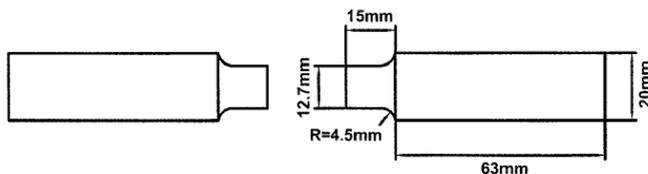
**2.1.3 Ching-Bin Lin, Li Cheng Wu, dan Yu Yao Chen,
“Friction Welding of Similar Materials : Polypropylene,
High Density Polyethylene, and Nylon-6”.**

Penelitian Ching-Bin Lin melakukan beberapa penyambungan polimer sejenis dengan pengelasan gesek salah satunya adalah material *polypropylene*. Pada gambar 2.2 telah disebutkan skema sistem mesin uji *spin-friction welding*.



Gambar 2.2 Skema sistem *spin-friction welding*: (1a, 1b): spesimen; (2) *chuck*; (3) *brake system*; (4) *fixed-clip*; (5) piston; (6) silinder; (7) *supporter*; (8) luaran pelumas; (9) masukan pelumas; (10) pengatur tekanan pelumas; (11) tangki pelumas; (12) pompa tekanan pelumas.

Ching-Bin Lin melakukan beberapa pengujian salah satunya adalah *bonding strength*. Bentuk spesimen yang digunakan adalah sebagai berikut pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Spesimen material untuk pengujian tarik

Percobaan yang dilakukan menggunakan kecepatan putar 460 rpm, tekanan gesek (0,98 ; 1,17 ; 1,37) MPa, dengan tiap variasi tekanan durasi gesekannya (16, 18, dan 20) detik. Tekanan tempa dilakukan selama 5 detik.

Friction pressure (MPa)	Friction time (s)	Bonding strength (MPa)
0.98	16	5.54
	18	6.03
	20	6.50
1.17	16	8.05
	18	6.23
	20	4.04
1.37	16	3.88
	18	2.76
	20	1.23

^a Friction pressure = forge pressure; forge time = 5 s.

Gambar 2.4 Hasil data *bonding strength polypropylene-polypropylene*.

Dari gambar 2.4 diatas dapat disimpulkan bahwa didapatkan bonding strength terbesar 8,05 MPa, maka dalam proses pengelasan gesek tersebut didapatkan hasil terbaik pada kecepatan putar 460 rpm, tekanan gesek 1,17 MPa pada detik ke-16.

2.1.4 Miftahul Ahzabuddin, “Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Terhadap Temperatur dan Tensile Strength pada Friction Welding dengan Material High Density Polyethylene”

Dalam penelitian Miftahul dilakukan sebuah eksperimen pengelasan gesek metode *direct-drive* dimana material yang digunakan adalah *high density polyethylene* dengan variasi yang diubah yaitu kecepatan putar. Penelitian ini memperhatikan

pengaruh variasi kecepatan putar terhadap energi panas yang dihasilkan pada *interface* dan pengaruh terhadap sifat mekanik yaitu kekuatan tarik.

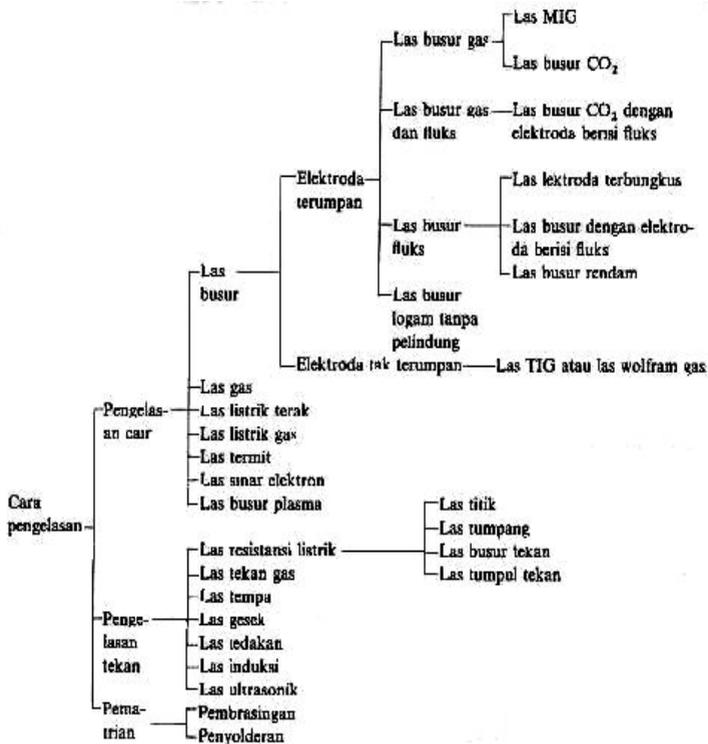
Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini bahwa analisa secara numerik yang dilakukan tidak mendekati dari hasil eksperimen, hal ini juga berlaku pada peneliti lain, dikatakan oleh Wang dan Naggapan bahwa temperatur pada *weldline* mencapai nilai puncaknya dalam 0,2 detik selama proses pengelasan gesek.

Temperatur 70 °C merupakan temperatur yang baik untuk penyambungan material *high density polyethylene* dengan kecepatan putar 520 rpm. Semakin besar temperatur pada *interface* dan penahanan temperatur yang baik saat pendinginan maka kekuatan tariknya semakin tinggi. Kekuatan tarik tertinggi dihasilkan sebesar 35,21 MPa dengan kecepatan putar 520 rpm menghasilkan *heat flux* 0,37 W/mm².

2.2. Pengelasan

Pengelasan adalah suatu proses penyambungan yang melibatkan peleburan lokal atau menghasilkan satu bagian yang menyatu dari dua bagian logam pada permukaan bagian dalam yang saling kontak (*Interface*) [4]. Beberapa proses pengelasan hanya dilakukan oleh panas saja tanpa tekanan, dilakukan dengan kombinasi panas dan penekanan, dan dilakukan hanya dengan tekanan tanpa panas dari luar. Dalam proses pengelasan *filler* dibutuhkan untuk memfasilitasi penyatuan dua material. Pengelasan seringkali digunakan untuk penyambungan logam, namun proses pengelasan juga digunakan untuk penyambungan plastik.

Mengacu pada AWS (*American Welding Society*) dalam proses pengelasan terbagi menjadi dua kategori utama yaitu *fusion welding* dan *solid state welding*. Berdasarkan proses pengelasannya untuk klasifikasi pengelasan dijelaskan pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



Gambar 2.5 Klasifikasi Pengelasan
(Wiryo Sumarto, 1994:8)

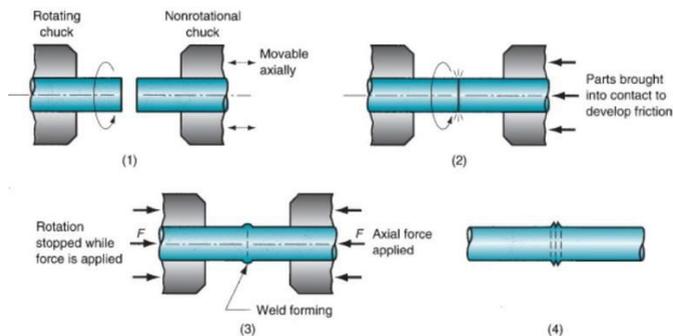
2.3. Solid State Welding

Solid State Welding adalah proses pengelasan dimana dua benda dalam keadaan padat yang bergabung dari perpaduan hasil penerapan penekanan atau kombinasi dari panas dan tekanan [4]. Jika komponen panas digunakan, maka temperatur dalam proses harus dibawah *melting point* dari material. *Solid state welding* sendiri tidak menggunakan *filler* dalam prosesnya. Beberapa proses pengelasan yang mewakili kategori *solid state welding* adalah *diffusion welding* (DFW), *ultrasonic welding* (USW), dan *friction welding* (FRW). Pada proses *solid state welding*, waktu juga

merupakan faktor penting jika panas dan tekanan digunakan namun jumlah panas yang dihasilkan tidak mencukupi untuk menyebabkan lumer pada permukaan kontak. *Solid state welding* memiliki kelemahan pada proses *loading* pengaturan benda yang akan disambungkan dimana dalam proses ini membutuhkan ketelitian yang sangat tinggi.

2.4. Teknologi Pengelasan Gesek

Pengelasan gesek merupakan proses yang komersial dimasyarakat luas. Prosesnya berkembang di Uni Soviet kemudian dikenalkan pada US sekitar tahun 1960. *Friction Welding* (FRW) merupakan proses *solid state welding* yang mana penyambungan (penyatuan) material dilakukan dengan panas akibat gesekan yang dikombinasikan dengan tekanan. Gesekan dihasilkan dari proses mekanik gesekan diantara dua permukaan, biasanya bagian satu berotasi relatif terhadap bagian yang lainnya untuk meningkatkan temperatur pada kontak interface sambungan. Kemudian bagian yang lainnya melakukan penekanan terhadap bagian yang berotasi hingga terjadi ikatan metalurgi.



Gambar 2.6 *Friction Welding* : (1) bagian berotasi, belum kontak; (2) kedua bagian mengalami kontak permukaan untuk membangkitkan panas akibat gesekan; (3) rotasi berhenti dan tekanan aksial dilakukan; (4) pengelasan yang dihasilkan.

(Mikell P Groover, 2010)

Operasional semua *friction welding* (FRW) menggunakan rotasi untuk meningkatkan panas akibat gesekan untuk pengelasan. Ada dua tipe dalam *friction welding* : (1) *continuous-drive friction welding* atau juga sering disebut *direct-drive friction welding*, dan (2) *inertia friction welding*. Pada *direct-drive friction welding*, *part* satu digerakkan dengan kecepatan rotasi secara konstan dan *part* lainnya (*stationary*) ditekan hingga kontak dengan *part* yang berotasi dengan tekanan tertentu sehingga panas akibat gesekan dibangkitkan pada kontak antar permukaan. Ketika temperatur *hot working* tercapai, pengereman dilakukan untuk menghentikan *part* yang berotasi, kemudian dengan cepat dilakukan penekanan tempa. Pada *inertia friction welding*, *part* yang berotasi terhubung dengan *flywheel*, yang mana untuk mencapai kecepatan yang telah ditentukan. Kemudian *flywheel* dilepaskan dari penggerak motor, dan kemudian *part* lainnya menekan *part* yang berputar. Energi kinetik tersimpan di *flywheel* berubah dalam bentuk panas akibat gesekan yang menyebabkan penyatuan kedua permukaan kontak. Total siklus untuk operasional ini adalah sekitar 20 detik.

Mesin yang digunakan untuk *friction welding* memiliki tampilan seperti mesin bubut. Dibutuhkan spindel bertenaga untuk memutar satu *part* pada kecepatan tinggi, dan terdapat sarana untuk menerapkan penekanan aksial antara *part* yang berotasi dan *part* yang tidak berotasi. Bagaimanapun juga setelah selesai dalam proses *friction welding*, *flash* harus dihilangkan biasanya dengan *turning* mesin bubut.

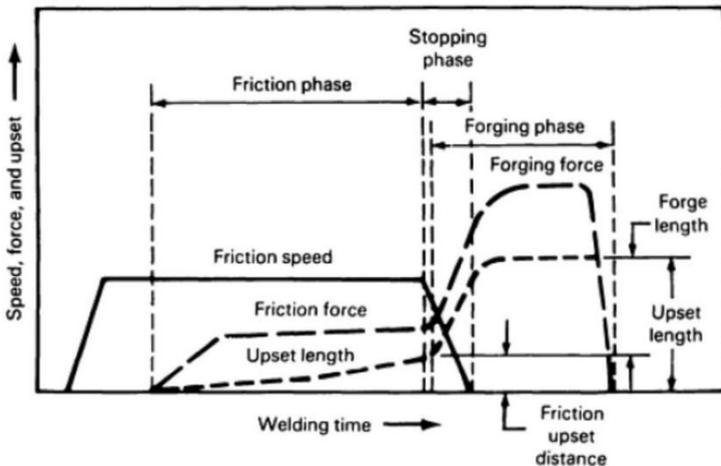
2.5. Direct-Drive Friction Welding

Didalam pengalasan kali ini, mesin yang digunakan adalah sebuah mesin yang mirip dengan mesin bubut dilengkapi dengan rem. Pengoperasian mesin ini terdiri dari sebuah fase gesekan panas yang dihasilkan, diakhiri dengan sebuah fase yang menghentikan rotasi dan sebuah fase penempaan dimana tekanan tempa diberikan untuk menyambung benda kerja. Hubungan di antara variabel-

variabel proses terdapat pada kecepatan putaran dan tekanan aksial (tekanan gesek dan tekanan tempa) sebagai fungsi waktu untuk mengelas.

Fase penempaan dimulai ketika tekanan yang lebih tinggi (yaitu tekanan penempaan yang lebih besar) diterapkan dalam siklus pengelasan. Jadi, sebenarnya fase penempaan dimulai dari suatu kondisi di mana setelah fase pengereman *rotating chuck*.

Friction speed mulai naik ketika mesin dinyalakan sampai mencapai kecepatan konstan, dalam kasus *direct-drive friction welding* terlihat kecepatan gesek akan tetap konstan meskipun diberikan tekanan gesek. Ketika tekanan gesek diberikan maka akan diikuti dengan peningkatan gaya gesek dan *upset length* yang lebih besar hingga mencapai *forging phase*. *Friction speed* akan menurun ketika temperatur tempa sudah tercapai dan tekanan tempa diberikan.



Gambar 2.7 Grafik *parameters versus time relative* pada tiga fase proses *direct-drive friction welding*.
(J.W. Elmer dan D.D.Kautz)

Dalam gambar 2.7 terlihat bahwa *friction speed* mulai naik ketika mesin dinyalakan sampai mencapai kecepatan konstan, dalam kasus *direct-drive friction welding* terlihat kecepatan gesek akan tetap konstan meskipun diberikan tekanan gesek. Ketika tekanan gesek diberikan maka akan diikuti dengan peningkatan gaya gesek dan *upset length* yang lebih besar hingga mencapai *forging phase*. *Friction speed* akan menurun ketika temperatur tempa sudah tercapai dan tekanan tempa diberikan. Gaya tempa akan semakin naik dengan diberikannya tekanan tempa untuk menyambung benda kerja. *Rotating chuck* pertama-tama diputar sampai kecepatan konstan yang telah ditetapkan, kemudian *chuck* yang tidak berputar di berikan tekanan gesek yang telah ditetapkan juga. Baik tekanan dan putaran dipertahankan secara spesifik dalam periode waktu yang telah ditentukan, sehingga gesekan akan meningkatkan temperatur panas di permukaan benda kerja yang cukup untuk membuat bahan menjadi plastis. Namun, pengelasan dari *direct-drive friction welding* hampir tidak pernah dibuat dengan menggunakan satu tingkat beban aksial. Mayoritas pengelasan dibuat menggunakan minimal dua tingkat gaya aksial. Beban aksial yang kedua pada dasarnya ditambahkan ke awal siklus las untuk menghasilkan fase *forging*. Pada saat *rotating chuck* dilepaskan dari unit mengemudi (putaran motor), dan rem diterapkan untuk membuat *rotating chuck* berhenti. Pada saat yang sama, tekanan aksial kedua (tekanan tempa) baik tetap atau dinaikkan digunakan untuk melengkapi pengelasan.

2.6. Polimer

Polimer merupakan makromolekul yang mana tiap molekulnya tersusun atas atom yang mengikat bersama ikatan kovalennya, mempunyai struktur dan sifat-sifat yang rumit disebabkan oleh jumlah atom pembentuk yang jauh lebih besar dibandingkan dengan senyawa yang berat atomnya rendah. Umumnya suatu polimer dibangun oleh satuan struktur tersusun secara berulang diikat oleh gaya tarik-menarik yang kuat yang disebut ikatan kovalen, dimana

setiap atom dari pasangan terikat menyumbangkan satu elektron untuk membentuk sepasang elektron [5].

Bahan polimer yang mempunyai berat molekul besar dan berikatan kovalen menunjukkan bahwa polimer memiliki sifat-sifat yang berbeda dari bahan organik yang mempunyai berat molekul rendah. Bahan yang memiliki berat molekul rendah berubah menjadi cair dengan viskositas yang rendah atau menguap jika dipanaskan, sedangkan bahan polimer mencair dengan sangat kental dan tidak menguap. Bahan yang tidak berfusi itu terurai karena panas menjadi karbon.

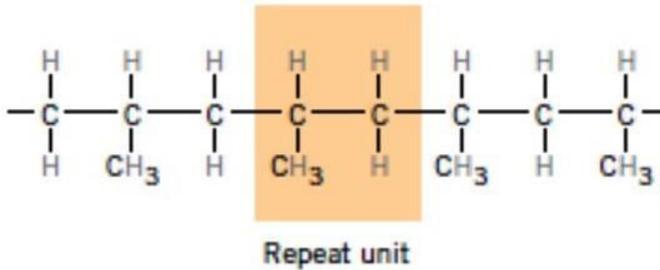
Polimer diklasifikasikan berdasarkan responnya terhadap panas. Ada dua tipe polimer yaitu termoplastik dan termoset. Polimer melumer oleh panas dan memadat pada pendinginan. Pada polimer termoplastik siklus pemanasan dan pendinginan dapat dilakukan beberapa kali waktu tanpa ada efek pada propertiesnya, sedangkan pada polimer termoset melumer hanya pada pertama kali dipanaskan, untuk pemanasan ulang berikutnya tidak melumer namun mengalami degradasi. Salah satu polimer bertipe termoplastik adalah *polypropylene*.

2.6.1 *Polypropylene*

Polypropylene adalah polimer semikristal dimana menunjukkan sifat mekanik yang sangat menarik seperti keuletan dan kekuatan pada suhu kamar [6]. *Polypropylene* dipertimbangkan sebagai salah satu produk polimer yang sangat penting yang mana berkembang sangat pesat diantara produk plastik lainnya. Alasannya adalah beberapa material seperti baja, kayu, kaca, kertas dan logam lainnya dapat digantikan dengan *polypropylene* dari segi keefektifan harga dan performa.

Produksi komersial *polypropylene* yang pertama dimulai di USA pada tahun 1957. Pada umumnya, polimerisasi dari *polypropylene* diselesaikan dengan mengontakkan *propylene* dan katalis Ziegler-Natta. Katalis *metallocene* dapat digunakan sebagai

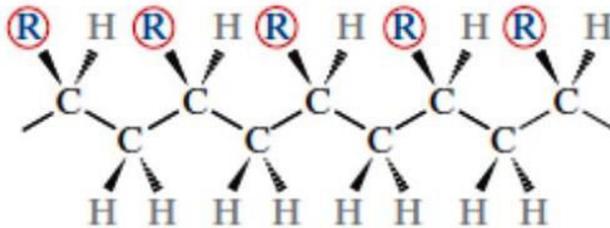
ganti katalis Ziegler-Natta [8]. Berikut adalah gambar struktur rantai *polypropylene*.



Gambar 2.8 Struktur Rantai *Polypropylene*
(William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, 2007)

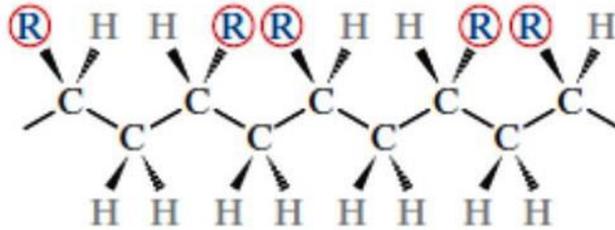
Struktur kimia dari *polypropylene* diwakili oleh *tacticity* yang mana dibentuk dengan jalan yang berbeda. Struktur kimia tersebut bergantung bagaimana pengganti disusun pada cabang punggung rantai polimer. Jadi *polypropylene* bisa *isotactic*, *syndiotactic* atau *atactic*.

Konfigurasi *Isotactic* menunjukkan keteraturan susunan atom dimana R adalah CH_3 untuk *polypropylene*.



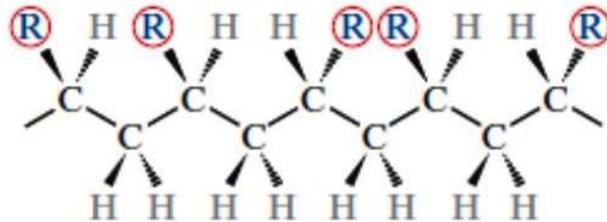
Gambar 2.9 Konfigurasi *Isotactic*.
(William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, 2007)

Konfigurasi *Syndiotactic* menunjukkan pergantian posisi antara atom R dan H pada setiap cabang rantai karbon.



Gambar 2.10 Konfigurasi *Syndiotactic*.
(William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, 2007)

Konfigurasi *Atactic* menunjukkan susunan posisi antara atom R dan H secara acak (*random*) pada setiap cabang rantai karbon.



Gambar 2.11 Konfigurasi *Atactic*.
(William D. Callister, Jr. dan David G. Rethwisch, 2007)

Polypropylene memiliki karakteristik yang khusus dimana densitasnya paling rendah 0.9 g/cm^3 , selain itu material ini tahan terhadap panas kurang dari 160 derajat celsius. *Polypropylene* tidak memiliki efek apapun ketika kontak dengan zat kimia seperti substansi *alkaline*, asam, serangan elektrolit, dll [8]. *Polypropylene* tidak mengalami kerusakan oleh air karena resapan kelembabannya sangat rendah. *Tensile strength* yang dimiliki cukup tinggi dan *polypropylene* bukanlah substansi yang beracun.

Tabel 2.1 Properti *Polypropylene*

Property	Test Method	Units	Polypropylene Homopolymer
Physical			
Density	ASTM D-792	lbs/ft ³	56.3
Water Absorption	ASTM D-570	%	.008
Mechanical			
Yield Point	ASTM D-638	psi	5,150
Elongation at Yield	ASTM D-638	%	11
Tensile Break	ASTM D-638	psi	5,150
Elongation at Break	ASTM D-638	%	400
Tensile Modulus	ASTM D-638	psi	190,240
Flexural Modulus	ASTM D-790	psi	212,425
Flexural Strength	ASTM D-790	psi	7,250
Izod Impact	ASTM D-4020	ft-lb/in	1.2
Tensile Impact	DIN 53448	ft-lbs/in ²	269
Hardness	ASTM D-2240	Shore D	78
Thermal			
Heat Deflection Temperature @ 66psi	ASTM D-648	°F	210
Maximum Long Term Operating Temp.	UL746B	°F	180
Coefficient of linear thermal expansion	ASTM D696	in/in/°F	4.3 x 10 ⁻⁶
Melt Point	ASTM D-3417	°F	329
Flammability	UL94		HB
Electrical			
Volume Resistivity	ASTM D-257	ohm-cm	>10 ¹⁵
Surface Resistivity	ASTM D-257	ohm	>10 ¹⁵

(Sumber: www.plasticsintl.com)

2.7. Pengaruh Gaya Aksial Terhadap Energi Panas

Pada *friction welding* terdapat hubungan antara torsi dan energi panas yang dapat diasumsikan bahwa tekanan gesekan antar kontak *interface* kedua material *uniform*. Energi panas yang dihasilkan pada persamaan sebagai berikut:

$$d\dot{Q} = \omega \cdot dM \text{ (W)} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

- ω = kecepatan sudut
- dM = diferensial torsi pada silinder

Torsi dM dapat dinyatakan sebagai:

$$dM = r \cdot dF_{gesek} \text{ (Nm)} \dots\dots\dots (2.2)$$

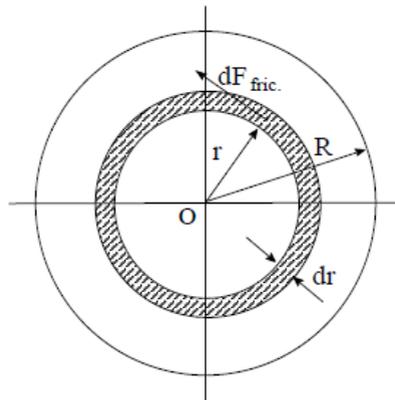
Dapat didefinisikan bahwa dF_{gesek} (gaya gesekan) sama dengan koefisien gesekan dikalikan dengan gaya normal dari suatu tekanan (P), seperti pada persamaan:

$$dF_{gesek} = \mu \cdot P \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \dots\dots\dots (2.3)$$

Persamaan (2.2) dan (2.3) dapat disubstitusikan pada persamaan (2.1) menjadi satu persamaan sebagai berikut:

$$d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \quad (W) \dots\dots\dots (2.4)$$

Dapat diambil kesimpulan bahwa total energi yang terjadi pada permukaan yang bergesekan adalah panas selama gesekan sehubungan dengan jarak r dan ketebalan dr dari rotasi sumbu aksis seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Permukaan gesekan dan cincin gesekan (dr)

Untuk memperoleh panas yang terjadi dipermukaan las dengan mengintegrasikan R pada persamaan 2.4 sebagai berikut:

$$\int_0^R d\dot{Q} = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots (2.5)$$

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^3 \dots\dots\dots (2.6)$$

Didapatkan torsi total dengan mengintegrasikan R dari persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$M = \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots (2.7)$$

$$M = \frac{2}{3} \pi \cdot \mu \cdot P \cdot R^3 \text{ (Nm)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Persamaan 2.6 dibandingkan dengan 2.8, panas yang terjadi di permukaan pengelasan sama dengan total torsi dikalikan dengan kecepatan sudut.

$$\dot{Q} = \omega \cdot M \text{ (W)} \dots\dots\dots (2.9)$$

Heat flux yang terjadi setiap titik pada jarak r dari sumbu rotasi adalah sebagai berikut:

$$\dot{q} = \frac{dQ}{(2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr)} = \frac{2 \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr}{(2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr)}$$

$$\dot{q} = \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r \dots\dots\dots (2.10)$$

Dimana :

- M = momen torsi yang timbul dipermukaan kontak (Nm)
- R = radius permukaan gesek (m)
- P = tekanan (Pa)
- ω = putaran (rad/sec)
- μ = koefisien gesek

2.8. Perpindahan Panas

Persamaan *Fourier* konduksi panas *non-steady* dalam permasalahan *thermo-mechanical* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\partial T / \partial t + u (\partial T / \partial x) = 1 / \rho C_p \partial / \partial x (k \partial T / \partial x) - h P / \rho C_p A (T - T_o) + q \dots (2.11)$$

Dimana :

- T = suhu
- T_o = Suhu lingkungan disekitar batang
- u = kecepatan

ρ	= massa jenis material
C_p	= Spesifik kapasitas panas
A	= luas penampang
P	= perimeter batang
k	= konduktivitas termal
h	= koefisien konveksi
x	= jarak dari permukaan gesekan
t	= waktu

Pada persamaan 2.11 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\partial T / \partial t + u (\partial T / \partial x) = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2) - \beta (T - T_0) + q \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana, $\alpha = k / \rho C_p$ dan $\beta = hP / \rho C_p A$

Pada persamaan *one-dimensional*, diasumsikan tidak ada panas yang hilang melalui radiasi pada permukaan yang bergesekan serta tidak ada kecepatan ($u=0$). Penyederhanaan untuk penghitungan suhu, $T = T(x,t)$ dilakukan dengan dua tahap. Tahap pertama adalah proses pemanasan sedangkan kedua adalah pendinginan. Kondisi awal dan batas (*boundary condition*) untuk persamaan 2.12 diuraikan dalam dua tahap [8].

2.8.1 Tahap Pemanasan

Distribusi temperatur dihitung untuk pemanasan secara terpisah pada panjang (L) batang dengan asumsi panas rata-rata yang dihasilkan antar permukaan sama. Pada tahap pemanasan, kondisi awal dan *boundary condition* pada persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$T\{x, t\} = T_0 + \frac{q}{k} \left(2 \sqrt{\frac{\alpha t}{\pi}} \exp\left\{\frac{-x^2}{4\alpha t}\right\} - x \operatorname{erfc}\left\{\frac{x}{\sqrt{4\alpha t}}\right\} \right) \dots \dots \dots (2.13)$$

2.8.2 Tahap Pendinginan

Pada tahap ini, batang sudah menempel dan dianggap sebagai batang baru untuk perhitungan. Dimana kondisi awal dan *boundary condition* pada persamaan 2.12 sebagai berikut:

$$T\{x, t\} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\alpha t}} \int_0^\infty f\{\xi\} \left[\exp\left\{\frac{-(x-\xi)^2}{4\alpha t}\right\} + \exp\left\{\frac{-(x+\xi)^2}{4\alpha t}\right\} \right] d\xi \quad ..(2.14)$$

Thermal Properties		
DSC Melting Point		
Homopolymer	320 - 329 °F	160 - 165 °C
Copolymer	275 - 318 °F	135 - 159 °C
Specific Heat (@ 23°C)		
		70 - 80 J/K/mol
Heat of Fusion		
	37.8 Btu/lb	88 kJ/kg
Thermal Conductivity (solid)		
		0.17 - 0.22 W/m °K
Thermal Conductivity (melt)		
		0.16 W/m /°K
Coefficient of Linear Thermal Expansion		
Homopolymer	4 - 6 x 10 ⁻⁵ in/(in °F)	8 - 10 x 10 ⁻⁵ cm/(cm °C)
Copolymer	3 - 5 x 10 ⁻⁵ in/(in °F)	6 - 9 x 10 ⁻⁵ cm/(cm °C)
Shrinkage		
Homopolymer	0.018 - 0.020 in/in	0.046 - 0.051 cm/cm
Copolymer	0.015 - 0.019 in/in	0.038 - 0.048 cm/cm
Vicat Softening Temperature		
Homopolymer	305 °F	152 °C
Copolymer	289 - 304 °F	143 - 151 °C

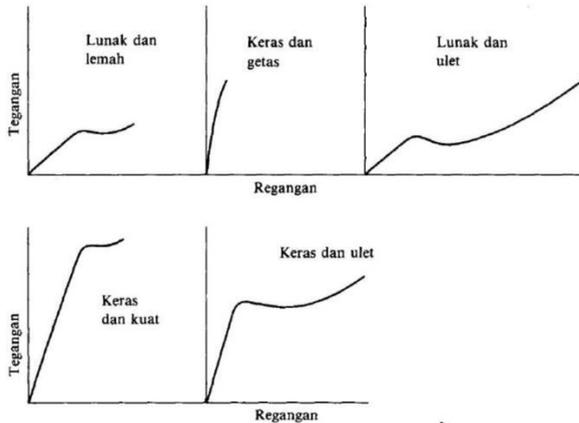
Gambar 2.13 Propertis *Thermal* material
Polypropylene
(www.ineos.com)

2.9. Uji Tarik

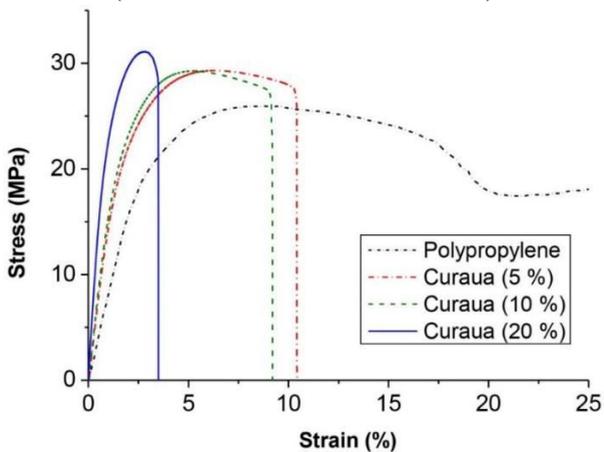
Kekuatan tarik adalah salah satu sifat dasar dari bahan. Hubungan tegangan-regangan pada tarikan memberikan nilai yang cukup berubah tergantung pada laju tegangan, temperatur, kelembaban, dst, sebab dalam bahan polimer sifat-sifat *viscoelastic* mempunyai ciri khas tersendiri [5]. Pada bahan termoplastik kelakuan demikian sangat berubah dengan penyearahan molekul rantai dalam bahan.

Pada gambar 2.14 menunjukkan kelakuan tarikan dari bahan polimer dalam bentuk kurva tegangan-regangan menurut ciri

khasnya lunak atau besar, lemah atau kuat, getas atau ulet, kemudian pada gambar 2.15 terdapat grafik tegangan-regangan polypropylene beserta campuran komposisi serat curaua.



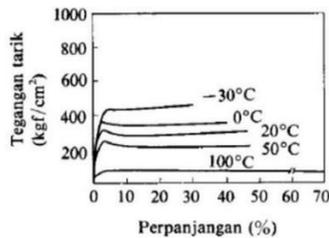
Gambar 2.14 Kelakuan tarikan bahan polimer (Surdia T dan Shinroku S, 1995)



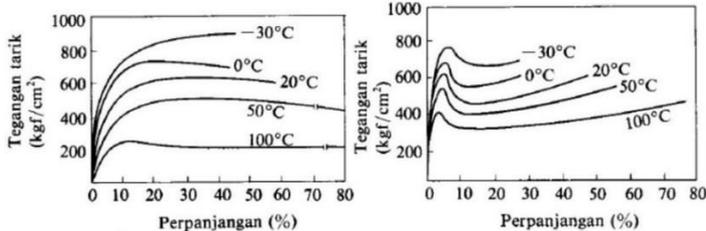
Gambar 2.15 Grafik *Stress-Strain* Polypropylene dan *biocomposite*.

(Sistanley jones, Raimundo carlos, dan Eve maria, 2015)

Telah dikemukakan berkali-kali bahwa pengaruh temperatur pada resin termoplastik sangat besar [5]. Kalau temperatur dinaikkan kekuatan tariknya turun. Kurva tegangan-regangan berubah banyak seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16 (a), (b), dan (c). Pada setiap temperatur tertentu (titik lunak, titik transisi gelas) sebagai batas, deformasi karena tarikan meningkat cepat dan tegangan patahnya serta modulus elastisnya menurun. Berlawanan dengan itu dibawah temperatur tersebut, tegangan patah dan modulus elastisnya meningkat dan regangan patahnya kecil. Jadi pada bahan polimer perlu mengenal jenis temperatur khas tersebut (titik lunak, titik transisi gelas). Walaupun pada temperatur dekat pada temperatur kamar, perubahan tiba-tiba bisa terjadi pada polimer termoplastik, oleh karena itu perlu berhati-hati.



(a) ABS



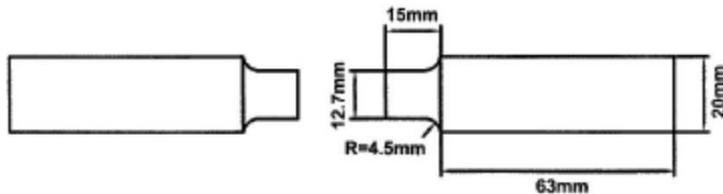
(b) Poliasetal

(c) Polikarbonat

Gambar 2.16 Kurva tegangan-regangan (a) ABS, (b) Poliasetal, dan (c) Polikarbonat (Surdia T dan Shinroku S, 1995)

Selain sensitif terhadap temperatur, polimer juga dapat terpengaruh oleh kelembaban serupa dengan pengaruh temperatur. Meningkatnya kadar air yang terabsorpsi cenderung memberikan hubungan tegangan-regangan serupa dengan pengaruh temperatur [5]. Bertambahnya absorpsi air tegangan patah dan modulus elastisnya menurun sedangkan regangan patah meningkat. Namun pengaruh tersebut kurang dibandingkan dengan pengaruh temperatur.

Uji tarik yang dilakukan untuk bahan polimer mengikuti pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ching-Bin. Berikut keterangan skema spesimennya pada gambar 2.17.



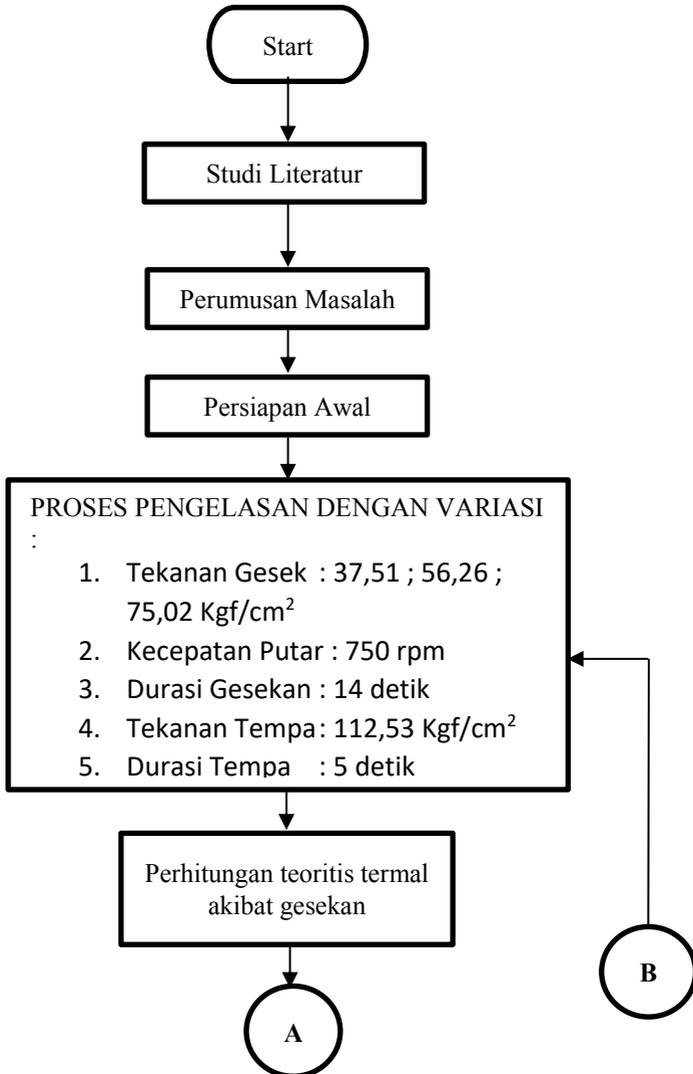
Gambar 2.17 Spesimen uji silinder pejal
(Ching-Bin Lin, Li Cheng Wu, dan Yu Yao Chen, 2003)

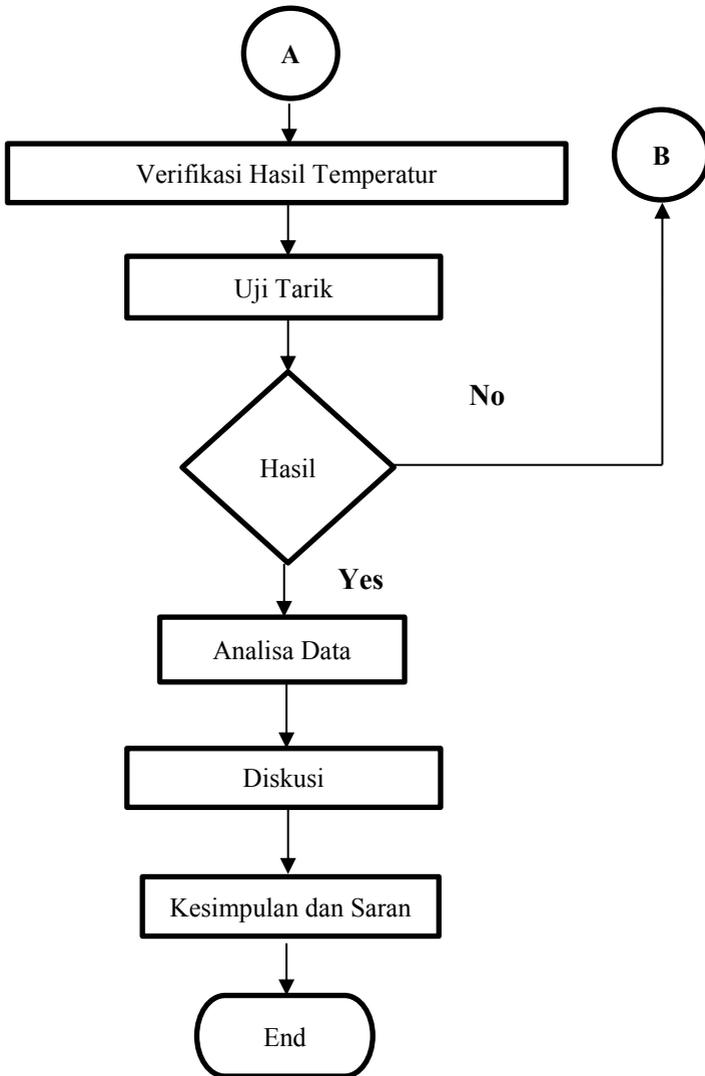
Semi-kristal polimer seperti *polypropylene*, ada tiga tahap saat deformasi. Kondisi awal menunjukkan daerah elastis sebelum *yield*. Seiring beban meningkat dengan bertambahnya regangan sampai keadaan *yield*. Setelah *yield*, spesimen uji mengalami deformasi ulet (*ductile*). Pada kondisi *ductile*, tingkat beban relatif konstan sampai terjadinya pengerasan regangan (*strain hardening*) ketika spesimen sepenuhnya ditarik. Dalam kondisi *strain hardening*, beban meningkat lagi dengan bertambahnya panjang sampai spesimen putus.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

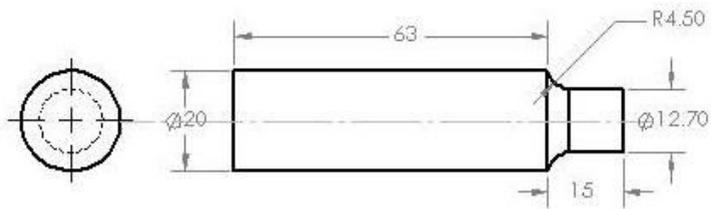




Gambar 3.1 Diagram Alir Percobaan

3.2 Material Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada percobaan ini adalah *Polypropylene* dengan diameter 20 mm. *Polypropylene* merupakan jenis termoplastik yang terbuat dari monomer propilena yang memiliki sifat kaku. *Polypropylene* ini memiliki ketahanan terhadap substansi kimia pelarut, asam, dan basa. *Polypropylene* banyak digunakan sebagai komponen otomotif, keperluan medis, mainan, dan perabotan rumah tangga.



Gambar 3.2 Spesimen Uji *Polypropylene*

3.3 Peralatan yang digunakan

Untuk memenuhi kelangsungan dalam percobaan diperlukan berbagai alat dan pendukung untuk mengambil data selama proses penyambungan silinder *polypropylene*, berikut ini adalah beberapa alat dan pendukungnya :

1. Mesin bubut yang dimodifikasi

Dalam proses eksperimen, alat ini sebagai inti dari percobaan yaitu untuk menyambungkan kedua buah material. Di Indonesia mesin *direct-drive friction welding* dengan operasional yang otomatis sangat jarang ditemui. Maka digunakan mesin bubut yang telah dimodifikasi menjadi mesin *direct-drive friction welding*, dimana kepala lepas dimodifikasi untuk pemasangan *non-rotating chuck* sebagai pencekam dilengkapi dengan pendorong hidraulik sebagai fungsi tekanan gesek aksial pada waktu proses pengelasan.



Gambar 3.3 Mesin *Direct-drive friction welding*

Berikut ini adalah spesifikasinya :

- Motor penggerak
Putaran : 1400 rpm
Daya : 2 Hp
- Hidraulik
Diamter piston : 50 mm
Diameter rod : 28 mm
Stroke : 300 mm
Piping size : 9,5 mm
Efisiensi silinder : 0,85
Tekanan maksimal: 80 kg/cm²

2. Peralatan Potong

Peralatan yang digunakan untuk memotong material sebelum proses pengelasan dan pembentukan spesimen uji tarik antara lain *cutting wheel* dan mesin bubut.



Gambar 3.4 Mesin Potong *Cutting Wheel*

3. Mesin Bubut

Mesin bubut merupakan suatu mesin perkakas yang digunakan untuk memotong benda yang diputar, terlebih untuk benda berbentuk silinder. Proses perautannya dengan cara memutar benda kerja kemudian dikenakan pada pahat yang digerakkan secara translasi yang sejajar dengan sumbu putar dari benda kerja. Maka mesin bubut ini digunakan untuk membentuk spesimen uji yang berbentuk silinder sebelum dilakukannya penyambungan kedua material dengan metode *direct-drive friction welding*.



Gambar 3.5 Mesin Bubut

4. Sensor Temperatur

Sensor temperatur yang akan digunakan adalah *Infrared Thermograph* untuk digunakan mengambil data temperatur pada kontak *interface* material pada saat awal proses pengelasan hingga akhir, pengambilan data temperatur dilakukan pada *interface*.



Gambar 3.6 *Sensor Infrared Sensor Temperature*

Keterangan:

1. *Laserpointer beam.*
2. *IR sensor.*
3. *LCD display.*
4. *Mode button.*
5. *Measurement trigger.*
6. *Handle grip.*
7. *Battery cover.*

Keunggulan alat ini adalah mampu digunakan untuk mengukur temperatur tanpa harus bersentuhan langsung dengan benda kerja yang akan diukur suhunya dengan cara menekan tombol *Measurement trigger* yang terdapat pada alat tersebut. Pengukuran temperatur material *polypropylene* pada titik 5 mm dari *interface* diukur menggunakan sensor temperatur ini.

5. Sensor Kecepatan Putar

Sensor kecepatan putar yang akan digunakan adalah *Tachometer* untuk digunakan mengecek putaran *rotating chuck* dalam pengaturan awal sebelum dilakukannya proses pengelasan. Pengecekan putaran dilakukan secara berkala untuk memastikan putaran tidak terlampaui jauh dari yang telah ditentukan.



Gambar 3.7 Sensor Kecepatan Putar *Tachometer*

3.4 Variabel Penelitian

3.4.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum dilakukan penelitian. Variabel bebas yang digunakan adalah tekanan gesek sebesar 37,51; 56,265; 75,02 Kgf/cm².

3.4.2 Variabel Respon

Variabel respon adalah variabel yang besar nilainya tergantung oleh variabel bebas. Dalam penelitian ini yang menjadi variabel respon adalah data distribusi temperatur akibat gesekan dan uji kekuatan tarik.

3.4.3 Variabel yang dikendalikan

Variabel yang besarnya dikendalikan selama penelitian yaitu :

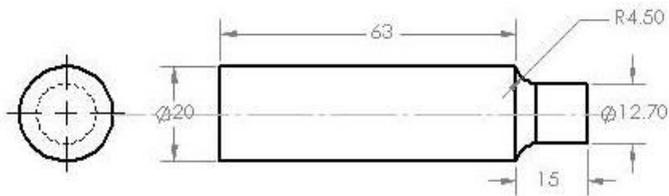
- Putaran *rotating chuck* : 750 rpm
- Durasi gesek : 14 detik
- Tekanan tempa : 112,53 Kgf/cm²
- Durasi tempa : 5 detik

Penentuan durasi gesek ini berdasarkan percobaan awal yaitu nilai temperatur tertinggi pada tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²

3.5 Metode Pengujian

Pelaksanaan penelitian ini sebelum melakukan eksperimen terdapat metode pengujian yang harus dilakukan untuk mencapai hasil yang maksimal. Dalam penelitian ini terdapat total jumlah material spesimen 9 pasang untuk dilas gesek dan 3 pasang spesimen untuk disambung dengan lem perekat dextone. Berikut metode yang akan dilakukan sebelum proses pengelasan :

1. Material dipotong sepanjang 100 mm sebanyak 24 batang.
2. Kemudian 24 material tersebut diproses bubut untuk membentuk geometri separuh dimensi spesimen uji tarik seperti pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Dimensi spesimen

3. Ujung permukaan spesimen dibersihkan dari kotoran.

4. Pemasangan kedua silinder pada *chuck* dimana diameter yang besar dicekam, masing-masing dipasang pada *non rotating chuck* dan *rotating chuck*.
5. Kecepatan putar *rotating chuck* telah diatur 750 rpm.
6. Tekanan gesek dilakukan oleh *non rotating chuck* sebesar 37,51 Kgf/cm².
7. Selama proses pengelasan dilakukan perekaman temperatur dengan menggunakan termokopel tipe K dan *termograph* hingga detik ke-19. Dimana termokopel ditempelkan ujungnya tepat pada *interface* material yang bergesekan, dan untuk *termograph* ditembakkan pada material yang tidak ikut berputar sejauh 5 mm dari *interface* yang bergesekan.
8. Dalam detik ke-14 dilakukan pengereman, sesaat kemudian dilakukan tekanan tempa sebesar 112,53 Kgf/cm² dengan waktu tahan selama 5 detik.
9. Bila telah mencapai 5 detik, benda kerja yang telah menyatu dilepaskan dari *rotating chuck* dan *non rotating chuck*.

Untuk tekanan gesek 56,265 Kgf/cm² dan 75,02 Kgf/cm² dilakukan seperti metode diatas dengan urutan yang sama. Data temperatur yang didapat dari ketiga variasi tersebut akan digunakan sebagai media untuk menyimpulkan pengaruh dari ketiga variabel bebas tersebut. Kemudian 3 pasang spesimen sisanya dilakukan penyambungan dengan menggunakan lem perekat yang mana nantinya akan dibandingkan dengan hasil pengelasan dalam proses uji tarik.



Gambar 3.9 Lem Perekat

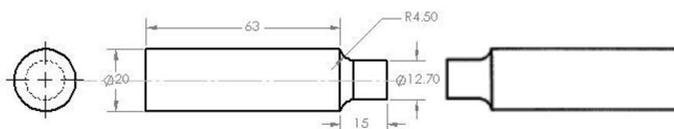
3.6 Pengujian Spesimen

3.6.1 Pengujian Tarik

Uji tarik dilakukan dengan membuat spesimen dengan bentuk standar uji tarik yang pernah dilakukan oleh Ching-Bin Lin, Li Cheng Wu, dan Yu Yao Chen seperti yang terlihat pada gambar 3.10. Mesin uji tarik yang digunakan adalah mesin uji tarik *Universal Testing Machine* GOTECH dengan kapasitas 2000 kN. Hasil data yang diperoleh setelah dilakukan uji tarik adalah berupa data grafik tegangan-regangan dari mesin uji tarik tipe ini.



Gambar 3.10 Mesin Uji Tarik



Gambar 3.11 Spesimen Uji Tarik

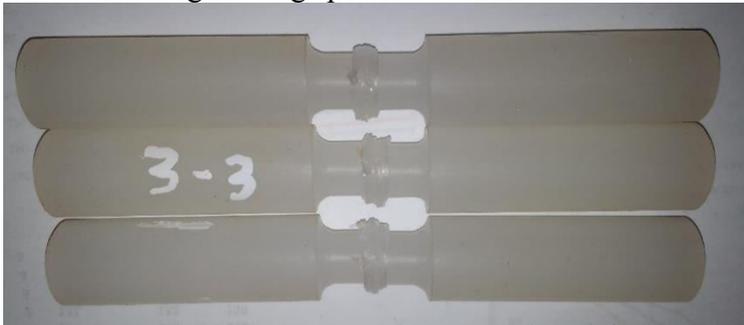
Tabel 3.1 Lembar Data Penelitian

No	Tahap Gesekan			Tahap Penempaan		Data Percobaan		Data Upset (mm)	Tensile Strength (MPa)			
	Tekanan Gesek (Kgf/cm ²)	Kecepatan Putar (rpm)	Durasi (detik)	Tekanan Tempa (Kgf/cm ²)	Durasi (detik)	Temperatur (°C)	Temperatur (x = 5 mm) (°C)					
1	37,51	750	14	112,53	5							
2												
3												
4	56,265											
5												
6												
7	75,02											
8												
9												
10	SAMBUNGAN DENGAN LEM PEREKAT											
11												
12												
13	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK											
14												
15												

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas dan dianalisa hasil dari percobaan pengelasan metode *Direct Drive Friction Welding* pada material silinder polimer *polypropylene-polypropylene* dengan variasi tekanan yang telah ditentukan. Dari percobaan ini diperoleh data temperatur dan sifat mekanik kekuatan tarik dari masing-masing spesimen.



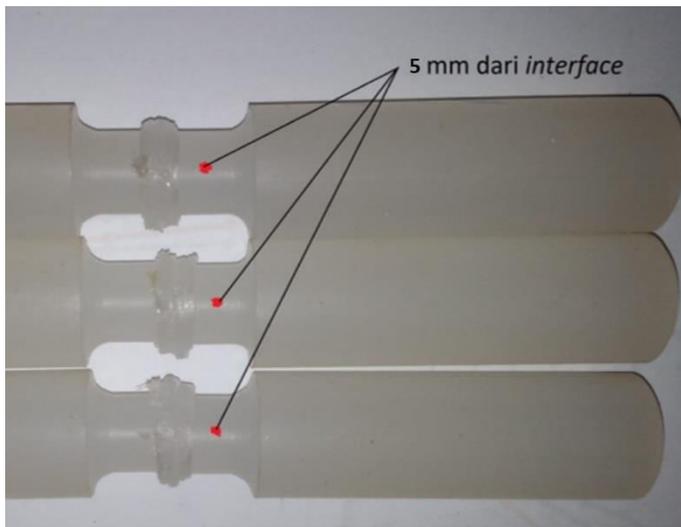
Gambar 4.1 Hasil penyambungan *direct-drive friction welding*.

4.1 Data Temperatur *Friction Welding*

Pada percobaan dalam pengambilan data temperatur cara perekamannya digunakan instrumen termokopel tipe K tepat pada *interface* yang bergesekan yaitu $x = 0$, kemudian digunakan *infrared* termometer pada jarak 5 mm dari *interface* yang bergesekan pada benda yang tidak berputar, bisa dilihat pada gambar 4.2. Data ini diambil masing-masing pada 9 pasang spesimen dengan variasi tekanan yang telah ditentukan. Berikut ini adalah data yang didapat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Tabel 4.1 Hasil data temperatur pada *interface* ($x = 0$ mm).

Durasi (detik)	Tekanan Gesek											
	37,51 kgf/cm ²				56,265 kgf/cm ²				75,02 kgf/cm ²			
	Temperatur (°C)											
	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata
0	31	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32
2	45	46	50	47	52	50	41	48	74	63	62	66
4	67	61	72	67	81	88	72	80	107	92	106	102
6	90	87	87	88	110	115	68	98	126	90	128	115
8	113	98	96	102	122	135	80	112	144	83	144	124
10	121	102	105	109	124	138	94	119	145	126	153	141
12	110	102	115	109	138	139	88	122	147	136	160	148
14	112	119	119	117	157	140	100	132	136	134	165	145
16	132	135	135	134	153	144	98	132	127	132	157	139
18	119	100	125	115	148	133	97	126	120	130	147	132



Gambar 4.2 Titik perekaman temperatur jarak 5 mm dari *interface* pada sisi benda yang diam.

Tabel 4.2 Hasil data temperatur pada permukaan $x = 5$ mm.

Durasi (detik)	Tekanan Gesek											
	37,51 kgf/cm ²				56,265 kgf/cm ²				75,02 kgf/cm ²			
	Temperatur (°C)											
	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata	1	2	3	Rata-rata
0	28	28	28	28,0	28	29	29	28,7	29	29	29	29,0
2	29	29	29	29,0	29	30	30	29,7	30	31	29	30,0
4	31	29	30	30,0	31	31	31	31,0	32	31	30	31,0
6	31	30	31	30,7	31	31	31	31,0	33	33	32	32,7
8	33	31	31	31,7	32	33	33	32,7	34	34	33	33,7
10	35	32	32	33,0	33	35	34	34,0	36	34	34	34,7
12	35	34	34	34,3	38	35	37	36,7	37	35	35	35,7
14	34	36	34	34,7	37	37	39	37,7	38	35	38	37,0
16	34	33	34	33,7	36	36	40	37,3	39	35	37	37,0
18	35	33	33	33,7	35	35	39	36,3	38	34	37	36,3

Penelitian yang pernah dilakukan oleh Miftahul dengan material HDPE (*High Density Polyethylene*) variabel tekanan 37,51 kgf/cm² dan kecepatan putar 750 rpm menghasilkan data sebagai berikut pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil penelitian Miftahul data temperatur pada *interface*.

Durasi (detik)	37,51 kgf/cm ²			
	750 rpm			
	Temperatur (°C)			
	1	2	3	Rata-rata
1	33	35	31	33
3	36	40	39	38
6	50	55	78	61
9	74	76	102	84
12	91	94	109	98
15	94	95	109	99
18	95	90	108	97
21	92	87	104	94
25	91	85	100	92

Hasil data yang diperoleh Miftahul dengan material HDPE jika dibandingkan dengan data penelitian material *polypropylene* dilakukan dengan variabel yang sama didapatkan bahwa kenaikan temperatur *polypropylene* lebih

cepat dibandingkan dengan HDPE. Hal ini terjadi karena memang *heat flux* yang dihasilkan material *polypropylene* jauh lebih besar yaitu sebesar $0,8071 \text{ W/mm}^2$ dibandingkan dengan HDPE hanya sebesar $0,5319 \text{ W/mm}^2$ dimana titik leleh HDPE sendiri hingga $127 \text{ }^\circ\text{C}$ sedangkan *polypropylene* hingga $160 \text{ }^\circ\text{C}$. Penyebab dari berbedanya *heat flux* oleh perbedaan material ini terletak pada nilai koefisien geseknya dimana *polypropylene* memiliki koefisien gesek yang lebih besar dibandingkan dengan HDPE.

4.2 Data Upset

Dari hasil penyambungan spesimen dengan menggunakan metode *direct-drive friction welding* dihasilkan upset pada spesimen akibat dari variasi tekanan proses penyambungan yang memanfaatkan gesekan. Berikut adalah data *upset* pada tabel 4.4 dibawah ini:

Tabel 4.4 Hasil data pengurangan panjang (*upset*).

Spesimen	Tekanan (kgf/cm^2)	Upset (mm)	rata-rata (mm)
1	37,51	2,25	2,1
2		1,95	
3		2,1	
1	56,265	2,25	2,2
2		2	
3		2,25	
1	75,02	3,15	2,6
2		2,3	
3		2,45	

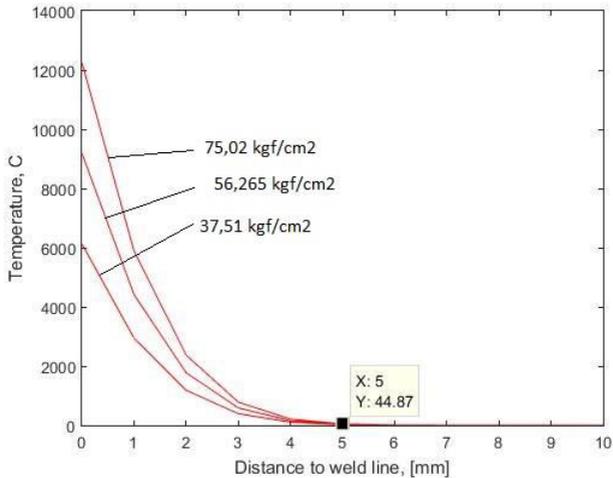
4.3 Data Pengujian Tarik

Pengambilan data uji tarik dilakukan pada 9 pasang spesimen dengan parameter variasi tekanan yang telah ditentukan, 3 pasang spesimen dengan penyambungan lem, dan 3 buah spesimen tanpa penyambungan. Material spesimen yang dijelaskan diatas dilakukan dengan material yang sama yaitu *polypropylene*. Dari pengujian tarik didapatkan kekuatan tarik *Ultimate Tensile Strength* (UTS) pada tabel 4.5 dibawah ini.

Tabel 4.5 Hasil data pengujian tarik

No	Tekanan Aksial (kgf/cm ²)	UTS (MPa)	UTS rata-rata (MPa)	Daerah Patahan
1	37,51	38,1479	39,16123	HAZ
2		39,4227		Interface
3		39,9131		Interface
1	56,265	41,4821	40,50147	HAZ
2		40,5015		HAZ
3		39,5208		Interface
1	75,02	39,815	38,0825	Interface
2		38,9324		Interface
3		35,5001		Interface
1	LEM	32,1658	32,3129	Interface
2		32,4665		Interface
3		32,3129		Interface
1	POLYPROPYLENE TANPA PENYAMBUNGAN	51,7791	51,35417	NONE
2		50,7004		
3		51,583		

4.4 Analisa Numerik Temperatur Proses *Friction Welding*



Gambar 4.3 Grafik temperatur pada waktu 14 detik

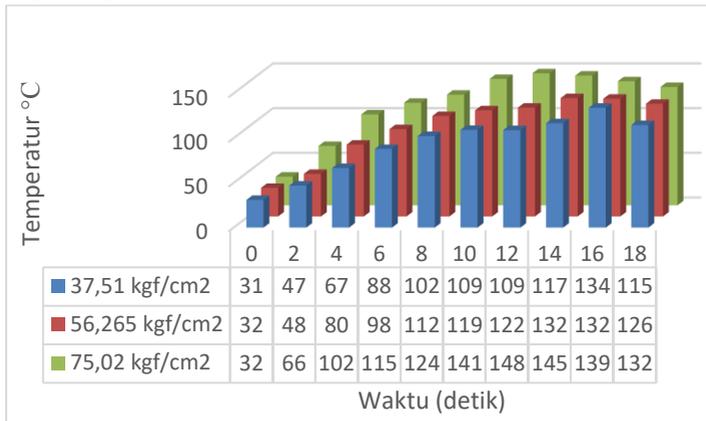
Hasil analisa yang telah dilakukan pada gambar 4.3 menggunakan persamaan 2.13 didapatkan hasil grafik berupa temperatur pada spesimen. Pada grafik tersebut dianalisa selama tahap pemanasan dimana *interface* yang bergesekan telah melebihi dari temperatur leleh *polypropylene* sebesar $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ oleh masing-masing variasi tekanan gesek yaitu 37,51 ; 56,265 ; 75,02 kgf/cm^2 selama 14 detik. Dalam proses pengelasan gesek, penggunaan tekanan gesek sebesar 37,51 kgf/cm^2 selama 14 detik menghasilkan nilai *heat flux* sebesar $0,8071\text{ W/mm}^2$, sedangkan untuk mencapai temperatur lelehnya hanya membutuhkan waktu 0,01 detik, pendekatan secara teori ini wajar karena dalam pengelasan gesek

temperatur yang tinggi didapatkan dalam waktu yang sangat singkat. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Miftahul dengan material HDPE didapatkan titik lelehnya $127\text{ }^{\circ}\text{C}$ hanya dalam $0,3$ detik dengan nilai *heat flux* sebesar $0,2212\text{ W/mm}^2$ [15]. Soucail juga menyatakan bahwa hanya dengan durasi 1 detik sudah mencapai temperatur $1280\text{ }^{\circ}\text{C}$ dalam pengelasan inersia [14].

Pendekatan secara teori ini dinyatakan bahwa *heat flux* yang ada diasumsikan konstan pada luas area penampang *interface* spesimen. Persamaan yang digunakan berupa *semi-infinite one-dimensional* secara konduksi dimana hanya dipantau satu koordinat saja dan tidak memperhatikan koordinat lainnya serta mengabaikan konveksi yang ada. *Polypropylene* merupakan bahan tahan panas atau tidak menyerap panas (*isolator*). Informasi yang terdapat pada hasil analisa grafik diatas menunjukkan bahwa pada jarak 5 mm dari *interface* terjadi perubahan antara temperatur akibat gesekan dan temperatur spesimen yaitu didapat temperatur sekitar $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan begitu untuk semua variasi tekanan gesek yang telah ditentukan pada jarak 5 mm merupakan titik transisi panas dari gesekan permukaan dengan temperatur lingkungan. Hasil analisa dan eksperimen ini memiliki kesesuaian dikarenakan data hasil eksperimen didapatkan temperatur tertinggi hingga $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.5 Analisa Data Temperatur Terhadap Variasi Tekanan Aksial

Untuk melakukan analisa akan diambil data tabel 4.1 hasil dari percobaan temperatur pada *interface*. Hubungan dalam data ini akan digunakan pengaruh temperatur terhadap durasi selama proses pemanasan dalam pengelasan gesek. Untuk memudahkan dalam menganalisa maka akan dibuat grafik pada gambar 4.4 dibawah ini.



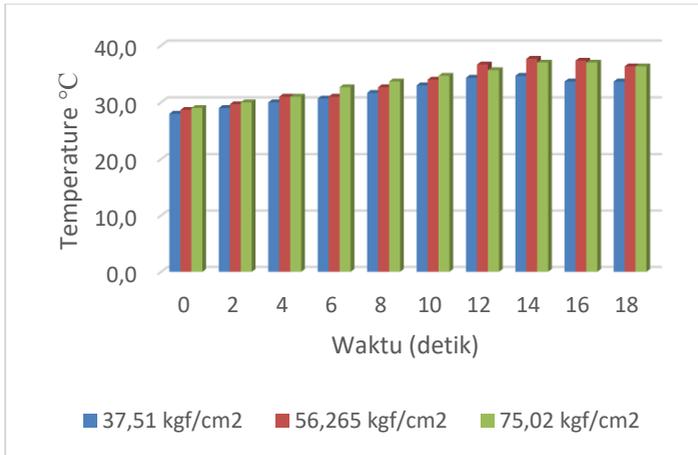
Gambar 4.4 Data temperatur pada *interface* spesimen

Telah diketahui bahwa tekanan gesek dilakukan hingga detik ke-14. Pada grafik diatas memberikan informasi bahwa pada tekanan 37,51; 56,265; dan 75,02 kgf/cm² mengalami kecenderungan kenaikan temperatur pada *interface* dari awal durasi gesekan hingga detik ke-14. Diketahui pada tekanan gesek 37,51 kgf/cm² didapatkan temperatur gesekan terbesar 117 °C. Pada tekanan gesek 56,265 kgf/cm² menunjukkan temperatur gesek yang tertinggi 132 °C, kemudian pada

tekanan gesek terbesar yaitu $75,02 \text{ kgf/cm}^2$ dihasilkan temperatur gesek tertinggi sebesar $148 \text{ }^\circ\text{C}$. Saat fase gesekan berakhir diikuti langsung dengan fase penempaan dimana temperatur akan cenderung mengalami penurunan untuk semua variasi tekanan gesek.

Hasil analisa numerik pada gambar 4.3 jika dibandingkan dengan data percobaan temperatur pada *interface* spesimen sangat berbeda, hal ini terjadi karena pengambilan atau pengukuran data temperatur gesekan *interface* dilakukan dengan termokopel dimana yang terukur bagian lingkaran terluar dari *interface*. Dalam proses pengukuran juga secara tidak langsung terpengaruh oleh faktor-faktor perpindahan panas. Setelah fase tekanan gesek berakhir sesaat kemudian diikuti fase penempaan untuk mempertahankan temperatur agar tidak cepat mengalami penurunan temperatur, namun pada tekanan $37,51 \text{ kgf/cm}^2$ terjadi kenaikan pada detik ke-16, hal tersebut dikarenakan pergantian fase gesekan ke fase penempaan terjadi perlambatan kecepatan gesekan sesaat sebelum berhenti diikuti penambahan tekanan tanpa dimana energi yang dihasilkan jauh lebih besar melampaui penahanan penurunan temperatur. Penelitian yang dilakukan oleh Ruben pada tahun 2016 dikatakan bahwa gesekan dapat saja mempunyai gabungan antara statis dan kinetis. Gesekan itu *stick slip friction*. *Stick-slip friction* juga terjadi ketika gerakan suatu benda mencapai kecepatan nol atau diam seketika kemudian bergerak kembali [16]. Hal ini masuk akal dikarenakan

koefisien gesek statis nilainya jauh lebih besar dibandingkan nilai koefisien gesek kinetis.



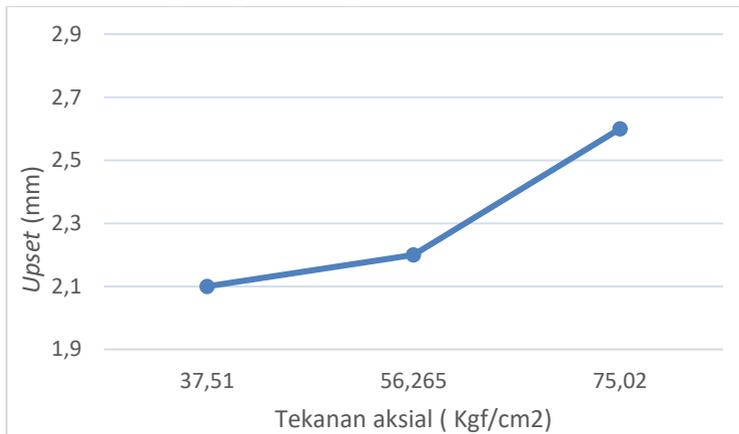
Gambar 4.5 Data temperatur pada jarak 5 mm dari *interface* spesimen

Polimer *polypropylene* merupakan bahan tahan panas yang mana sering disebut sebagai *isolator*. Pada gambar 4.5 adalah grafik data temperatur pada jarak 5 mm dari *interface* spesimen. Grafik tersebut memberikan informasi hubungan durasi gesekan dengan nilai temperatur pada jarak 5 mm, kenaikan temperatur tersebut memiliki kecenderungan pada temperatur lingkungan, berkisar antara 29 °C hingga 37,7 °C. Hal ini dibenarkan pada gambar 4.3 grafik yang dihasilkan dari analisa numerik menunjukkan bahwa pada jarak 5 mm merupakan transisi temperatur antara yang terpengaruh panas

dari permukaan yang bergesekan dengan temperatur lingkungan.

4.6 Analisa Data Upset Terhadap Variasi Tekanan Aksial

Material yang bergesekan akan mengalami keausan, namun pada pengelasan gesek berikut ini disebut sebagai *upset* yaitu berkurangnya panjang material setelah proses pengelasan gesek. Pada gambar 4.6 memberikan informasi grafik hubungan *upset* dengan variasi tekanan aksial.

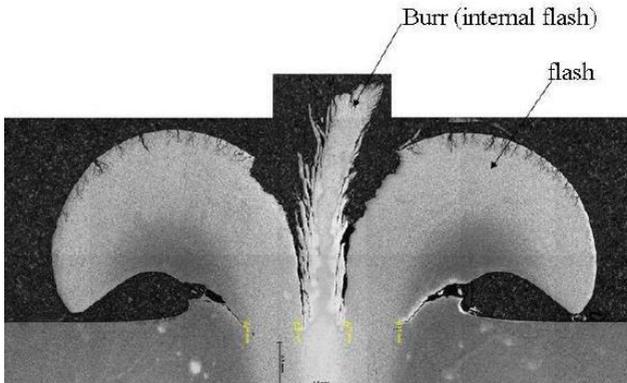


Gambar 4.6 Grafik *upset* terhadap variasi tekanan aksial.

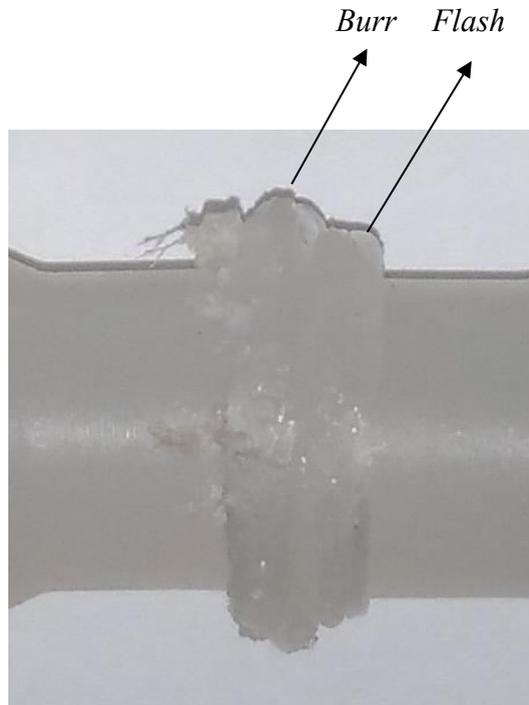
Telah ditunjukkan pada grafik gambar 4.6 bahwa semakin besar variasi tekanan aksial *trendline* upset cenderung mengalami kenaikan. Nilai *upset* terendah ditunjukkan pada tekanan 37,51 Kgf/cm² yaitu sebesar 2,1 mm, kemudian diikuti *upset* sebesar 2,2 mm dengan tekanan

aksial $56,265 \text{ Kgf/cm}^2$. Nilai *upset* tertinggi terletak pada tekanan aksial sebesar $75,02 \text{ Kgf/cm}^2$ sebesar 2,6 mm.

Upset terjadi karena pergerakan volume meleleh yang disebabkan oleh panas akibat gesekan dan tekanan aksial sehingga material terekstrusi dimana volume tersebut menjadi *flash* dan beberapa menjadi *burr* disekitar area *weld line*. Semakin tinggi panas yang dihasilkan oleh gesekan maka akan semakin besar *upset* yang terjadi.



Gambar 4.7 Ilustrasi *flash* material logam pada pengelasan gesek
(Libin Yang, 2010)



Gambar 4.8 Fenomena *flash* dan *burr* pada spesimen dengan tekanan $75,02 \text{ Kg/cm}^2$

Pada gambar 4.8 merupakan hasil pengelasan gesek dengan material polimer *polypropylene* dengan variasi tekanan gesek sebesar $75,02 \text{ Kg/cm}^2$. *Polypropylene* ini memiliki karakteristik yang sangat berbeda dengan material logam, karakteristik material *polypropylene* sangat cepat meleleh, sehingga penampakan *flash* dan *burr* tidak begitu kontras jika diperhatikan.

4.7 Analisa Data Pengujian Tarik Terhadap Variasi Tekanan Gesek

Dari data pengujian tarik pada tabel 4.5 disajikan dalam bentuk grafik sehingga mudah untuk menyampaikan informasi terkait hubungan antara variasi tekanan gesek terhadap kekuatan tarik (*ultimate tensile strength*). Berikut ini akan dijelaskan pada gambar 4.9:

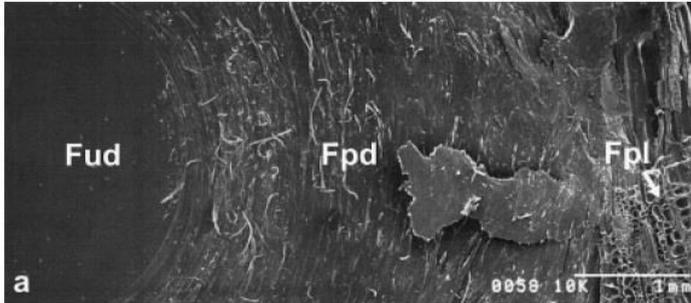


Gambar 4.9 Grafik hubungan kekuatan tarik terhadap variasi tekanan gesek

Grafik pada gambar 4.9 diketahui bahwa pengaplikasian variasi tekanan gesek yang diberikan memiliki pengaruh terhadap sifat mekanik kekuatan tarik dari material

polypropylene. Variasi gesek yang diberikan dalam sebesar 37,51 ; 56,265 ; dan 75,02 Kgf/cm², kekuatan tarik rata-rata yang paling besar adalah 40,5014 MPa dimana hasil tersebut dilakukan saat pengelasan gesek dengan menggunakan variasi tekanan gesek sebesar 56,265 Kgf/cm². Pada tekanan gesek 37,51 Kgf/cm² hasil kekuatan tarik rata-ratanya dibawah 40,5014 MPa yaitu sebesar 39,161 Kgf/cm² namun pengaplikasian tekanan gesek 75,02 Kgf/cm² lebih rendah lagi yaitu sebesar 38,082 Kgf/cm². Hal ini dapat diambil informasi bahwa dengan variabel tetap yang telah ditentukan memberikan pengaruh terbaik pada kekuatan tarik dengan variasi tekanan gesek sebesar 56,265 Kgf/cm². Penggunaan variasi tekanan gesek ini tidak akan berlaku jika digunakan variabel tetap yang berbeda.

Material polimer terutama pada *polypropylene* ikatan-ikatannya akan berubah setelah mengalami proses penyambungan dengan *friction welding* akibat gesekan dan panas yang ditimbulkan, sehingga permukaan sambungan lasan yang telah putus akibat uji tarik memiliki struktur tertentu. *Tensile morphology* yang dilakukan peneliti Ching-Bin Lin bisa dilihat pada gambar 4.10 dengan metode penyambungan pengelasan gesek material *polypropylene*.



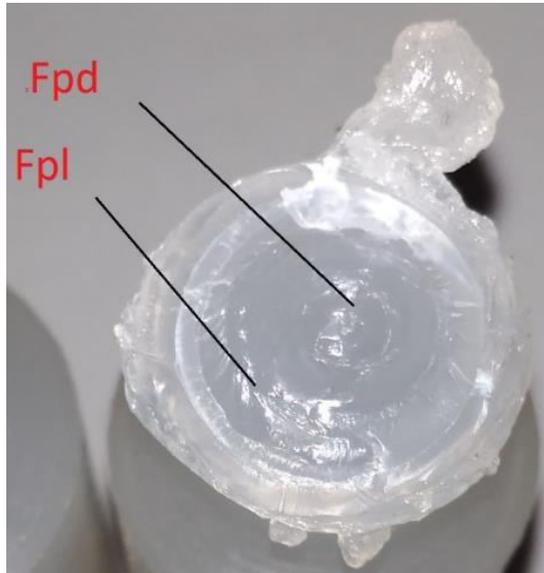
Gambar 4.10 Tiga bagian struktur dalam *Tensile morphology*.

(Ching-Bin Lin, 2003)

Fud merupakan zona pusat dimana tidak terjadi ikatan plastis namun hanya terjadi permukaan yang aus, sedangkan Fpd merupakan sebagian area yang terjadi ikatan plastis yang ditandai dengan berupa titik. Fpl merupakan ikatan plastis yang ditandai dengan adanya kawah atau seperti ombak (gelombang kecil) lebih mirip dengan bentuk lesung pipi. Hasil lasan material polimer dengan metode penyambungan las gesek memberikan karakter morfologi seperti pada gambar 4.10.

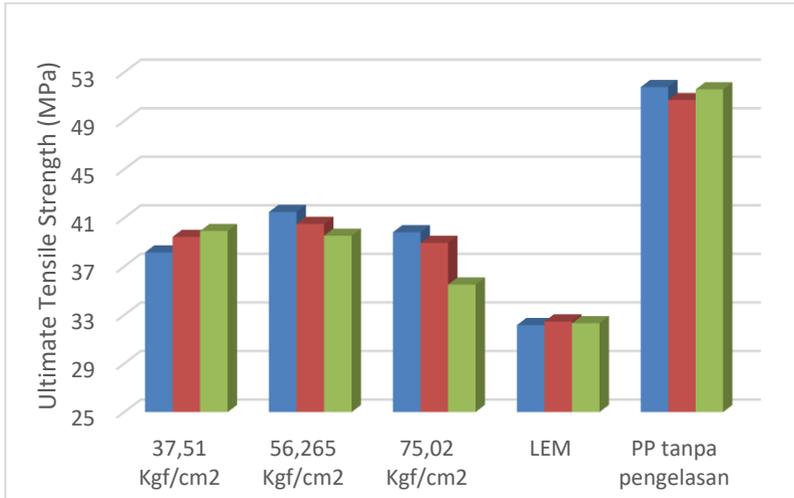
Penyebab terjadinya Fud dikarenakan pada titik pusat tersebut paling sedikit menerima gesekan dimana hanya sampai terjadi keausan sedangkan pada area Fpd dan Fpl keausan karena gesekan yang didapat sangat besar sehingga mampu membangkitkan panas. Perbedaan ini terjadi karena pengelasan gesek jenis ini merupakan gesekan satu arah atau sering disebut dengan *one directional friction*. Hal ini terjadi karena semakin kecil jari-jari lingkaran hingga ke

pusat titik putar hanya menerima sedikit gesekan. Kekuatan tarik tertinggi terdapat pada 40,5014 MPa dimana pada spesimen tersebut banyak ditandai Fpl, bisa dilihat pada gambar 4.11.



Gambar 4.11 *Tensile morphology* pada spesimen dengan tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²

Pada gambar 4.11 diatas memberikan informasi bagian area yang mengalami ikatan plastis dimana bagian pusat tidak ditandai munculnya Fud. Pada permukaan tersebut banyak ditemui gelombang-gelombang diarea luar dari pusat dan titik-titik pada sekitar pusat. Hal ini yang menjadi perhatian dan akibat untuk mencapai nilai kekuatan tarik yang tinggi. Foto mikrostruktur perbesaran 50 kali ada pada lampiran 26.



Gambar 4.12 Diagram pengaruh kekuatan tarik tiap spesimen terhadap variasi tekanan gesek, lem, dan *polypropylene* tanpa pengelasan.

Pada gambar 4.12 memberikan informasi hasil uji tarik dari tiap-tiap spesimen dengan berbagai variasi diantaranya adalah tekanan gesek, penyambungan menggunakan lem, dan material *polypropylene* tanpa penyambungan. Penyambungan dengan metode *friction welding* menghasilkan sambungan yang jauh lebih kuat dibandingkan dengan sambungan lem *epoxy*. Kekuatan tarik pada jenis lem *epoxy* ini memiliki rata-rata sebesar 32,312 MPa. Jika dibandingkan dengan kekuatan asli dari spesimen tanpa penyambungan sangat berbeda jauh yaitu

rata-rata kekuatannya sebesar 51,35 MPa. Patahan yang terjadi untuk sambungan lem keseluruhannya patah pada sambungan, beberapa bekas lem juga terlepas dari permukaan spesimen. Nilai rata-rata uji tarik tertinggi dengan proses *friction welding* terdapat pada variasi tekanan gesek sebesar 56,265 Kgf/cm², bisa dilihat pada gambar 4.13. Hasil uji tarik dari variasi tekanan gesek 37,51 Kgf/cm² dan 75,02 Kgf/cm² untuk keseleruhan spesimennya masih dibawah 40 MPa



Gambar 4.13 Sambungan hasil *friction welding* dengan tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²

Nilai uji tarik tertinggi dengan *friction welding* pada ketiga variasi tekanan gesek dihasilkan oleh spesimen pertama dari pengaplikasian tekanan gesek sebesar 56,265 Kgf/cm² yaitu sebesar 41,4821 MPa kemudian diikuti spesimen kedua dimana kekuatannya sebesar 40,5015 MPa. Pada spesimen ketiga terjadi penyebaran temperatur yang tidak merata hal itu menyebabkan spesimen tersebut hanya memiliki kekuatan tarik sebesar 39,5208 MPa.

Pada proses *friction welding* untuk mendapatkan sambungan yang homogen saat tahap pemanasan diharapkan mampu membangkitkan panas yang bisa terdistribusi dengan baik kemudian saat proses pendinginan dilakukan tahap penekanan tempa untuk menahan penurunan temperatur lebih lambat agar memberi kesempatan ikatan-ikatan molekul pada *interface* bisa menyesuaikan ikatan yang kuat sebelum mendingin.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dihasilkan dari analisa-analisa yang dilakukan dalam penelitian setelah dilakukannya eksperimen proses *friction welding* terhadap material *polypropylene* adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh aplikasi variasi tekanan gesek dalam proses *friction welding* terhadap material *polypropylene*:
 - a. Tekanan gesek 37,51 kgf/cm² didapatkan temperatur penyambungan yang baik pada detik ke-16 sebesar 134 °C sedangkan untuk tekanan gesek 56,265 kgf/cm² didapatkan temperatur yang baik sebesar 132 °C pada detik ke-14, kemudian untuk tekanan gesek 75,02 kgf/cm² paling baik temperatur penyambungan pada detik ke-12 yaitu sebesar 148 °C. Penggunaan variasi tekanan gesek menghasilkan temperatur terbaik dengan waktu yang berbeda-beda.
 - b. Temperatur pada jarak 5 mm dari *interface* merupakan temperatur transisi dari pengaruh panas akibat gesekan dengan temperatur lingkungan yaitu sekitar 28 °C hingga 37,7 °C
 - c. *Upset* terbesar terjadi pada aplikasi tekanan gesek sebesar 75,02 Kgf/cm² rata-rata 2,6 mm
2. Aplikasi tekanan gesek yang menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 41,4821 MPa yaitu 56,265 Kgf/cm² dengan durasi 14 detik dan kecepatan putar sebesar 750 rpm. Penggunaan tekanan gesek sebesar

56,265 Kgf/cm² memberi dampak pada *heat flux* yang dihasilkan sebesar 1,2108 W/mm². Sementara itu untuk tekanan gesek sebesar 37,51 dan 75,02 Kgf/cm² masing-masing menghasilkan kekuatan tarik sebesar 39,161 dan 38,082 MPa. Seluruh kekuatan tarik dari proses pengelasan gesek jauh lebih baik daripada kekuatan tarik dari proses penyambungan dengan lem perekat yang hanya sebesar 32,46 MPa.

5.2 Saran

1. Untuk menghindari *misalignment* gunakan *centering* yang baik sehingga dalam pengaturan *loading* benda kerja saat penyambungan tidak begitu lama.
2. Dalam meneliti pemodelan distribusi temperatur pada proses *friction welding* bisa dikembangkan dengan pemodelan lain dengan berbagai *software* aplikasi pengelasan gesek.
3. Hubungan tingkat laju keausan karena gesekan dengan panas yang dibangkitkan hingga mencapai titik leleh bisa diteliti lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kalpakjian, Serope, dan Steven R. Schmid. 2009. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Sixth edition. Pearson Prentice Hall International.
- [2] Anil Kumar, Rakesh K Gupta. 2003. "*Fundamentals of Polymer Engineering*", Second edition. New York : Marcel Dekker, Inc.
- [3] D. Grewell, A. Benatar. 2007. "*Welding of Plastics*". Munich: Carl Hanser Verlag.
- [4] Mikell P. Groover. 2010. "*Fundamentals of Modern Manufacturing , Materials, Processes, and Systems*", 4th edition, JOHN WILEY & SONS, INC.
- [5] Surdia,T., Shinroku S. 1995. **Pengetahuan Bahan Teknik**. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [6] Eiras, Daniel, dan Luiz A Pessan. 2009. *Mechanical Properties of Polypropylene/Calcium Carbonate Nanocomposites*.
- [7] Sistanley, Raimundo, dan Eve. 2015. *Mechanical Properties Analysisof Polypropylene Biocomposites Reinforced with Curaua Fiber*. Brazil.
- [8] Saravanan, dan Sulaiman, Khalid A. 2014. *A Study on the Process Plant Design for the Production of Polypropylene Plant*.
- [9] Callister, William D, dan Rethwisch, David G. 2007. "*Fundamentals of Materials Science and Engineering*". John Willey & Sons,Inc. USA.

- [10] Ching-Bin, Li Cheng, dan Yu Yao. 2003. *Friction Welding of Similar Materials: Polypropylene, High-Density Polyethylene, and Nylon-6*. Taipei, Republik China.
- [11] Sirajuddin, Krishnan, dan Abdul Wahed. 2011. *Transient Temperature Distribution In Steel Rod Subjected to Friction Welding*. India.
- [12] J.W. Elmer dan D.D. Kautz. *Fundamentals of Friction Welding*.
- [13] Beer, F.P, Johnston, E.R. Dewolf, J.T., Mazurek, D.F. 2012. *“Mechanics of Materials, 6th edition”*. New York: McGraw-Hill.
- [14] Yang, Libin. 2010. *Modelling Of The Inertia Welding Of Inconel 718*. Inggris: The University Of Birmingham.
- [15] Ahzabuddin, Miftahul. 2017. Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Kecepatan Putar Terhadap Temperatur dan *Tensile Strength* pada *Friction Welding* dengan Material *High Density Polyethylene*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [16] Simatupang, Ruben. 2016. Studi Eksperimen Analisa Koefisien Gesek Pada Saat Terjadi Fenomena *Stick-Slip Friction* Pada *Reciprocating Contact*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

LAMPIRAN 1. Tabel Konversi Satuan

TABLE 1. Conversion Factors	
Area	
1 mm ² = 1.0 × 10 ⁻⁶ m ²	1 ft ² = 144 in. ²
1 cm ² = 1.0 × 10 ⁻⁴ m ² = 0.1550 in. ²	1 in. ² = 6.4516 cm ² = 6.4516 × 10 ⁻⁴ m ²
1 m ² = 10.7639 ft ²	1 ft ² = 0.092 903 m ²
Conductivity	
1 W/m-K = 1 J/s-m-K = 0.577 789 Btu/h-ft-R	1 Btu/h-ft-R = 1.730 735 W/m-K
Density	
1 kg/m ³ = 0.06242797 lbm/ft ³	1 lbm/ft ³ = 16.018 46 kg/m ³
1 g/cm ³ = 1000 kg/m ³	
1 g/cm ³ = 1 kg/L	
Energy	
1 J = 1 N-m = 1 kg-m ² /s ²	
1 J = 0.737 562 lbf-ft	1 lbf-ft = 1.355 818 J
1 cal (Int.) = 4.1868 J	= 1.28507 × 10 ⁻³ Btu
	1 Btu (Int.) = 1.055 056 kJ
1 erg = 1.0 × 10 ⁻⁷ J	= 778.1693 lbf-ft
1 eV = 1.602 177 33 × 10 ⁻¹⁹ J	
Force	
1 N = 0.224809 lbf	1 lbf = 4.448 222 N
1 kp = 9.80665 N (1 kgf)	
Gravitation	
g = 9.80665 m/s ²	g = 32.17405 ft/s ²
Heat capacity, specific entropy	
1 kJ/kg-K = 0.238 846 Btu/lbm-R	1 Btu/lbm-R = 4.1868 kJ/kg-K
Heat flux (per unit area)	
1 W/m ² = 0.316 998 Btu/h-ft ²	1 Btu/h-ft ² = 3.15459 W/m ²
Heat transfer coefficient	
1 W/m ² -K = 0.176 11 Btu/h-ft ² -R	1 Btu/h-ft ² -R = 5.67826 W/m ² -K
Length	
1 mm = 0.001 m = 0.1 cm	1 ft = 12 in.
1 cm = 0.01 m = 10 mm = 0.3970 in.	1 in. = 2.54 cm = 0.0254 m
1 m = 3.28084 ft = 39.370 in.	1 ft = 0.3048 m
1 km = 0.621 371 mi	1 mi = 1.609344 km
1 mi = 1609.3 m (US statute)	1 yd = 0.9144 m

LAMPIRAN 2. Tabel Konversi Satuan (Lanjutan)

TABLE (Continued) Conversion Factors	
Mass	
1 kg = 2.204 623 lbm	1 lbm = 0.453 592 kg
1 tonne = 1000 kg	1 slug = 14.5939 kg
1 grain = 6.47989 × 10 ⁻⁵ kg	1 ton = 2000 lbm
Moment (torque)	
1 N·m = 0.737 562 lbf·ft	1 lbf·ft = 1.355 818 N·m
Momentum (mV)	
1 kg·m/s = 7.232 94 lbm·ft/s = 0.224809 lbf·s	1 lbm·ft/s = 0.138 256 kg·m/s
Power	
1 W = 1 J/s = 1 N·m/s	1 lbf·ft/s = 1.355 818 W
	= 0.737 562 lbf·ft/s
1 kW = 3412.14 Btu/h	1 Btu/s = 1.055 056 kW
1 hp (metric) = 0.735 499 kW	1 hp (UK) = 0.7457 kW
	= 550 lbf·ft/s
	= 2544.43 Btu/h
1 ton of refrigeration = 3.516 85 kW	1 ton of refrigeration = 12 000 Btu/h
Pressure	
1 Pa = 1 N/m ² = 1 kg/m·s ²	1 lbf/in. ² = 6.894 757 kPa
1 bar = 1.0 × 10 ⁵ Pa = 100 kPa	
1 atm = 101.325 kPa	1 atm = 14.695 94 lbf/in. ²
	= 29.921 in. Hg [32 F]
	= 33.899 5 ft H ₂ O [4°C]
	1 bar = 0.986 923 bar
1 torr = 1 mm Hg [0°C]	1 in. Hg [0°C] = 0.49115 lbf/in. ²
1 m m Hg [0°C] = 0.133 322 kPa	1 in. H ₂ O [4°C] = 0.036126 lbf/in. ²
1 m H ₂ O [4°C] = 9.806 38 kPa	
Specific energy	
1 kJ/kg = 0.42992 Btu/lbm	1 Btu/lbm = 2.326 kJ/kg
= 334.55 lbf·ft/lbm	1 lbf·ft/lbm = 2.98907 × 10 ⁻³ kJ/kg
	= 1.28507 × 10 ⁻³ Btu/lbm

LAMPIRAN 3. Perhitungan Tekanan Gesek

Diketahui

$P_{\text{gauge}} = 2 \text{ kgf/cm}^2$ (setiap kenaikan satu strip pada gauge kelipatan 2 kgf/cm^2)

$r_{\text{piston}} = 2,7 \text{ cm}$

$r_{\text{spesimen}} = 0,635 \text{ cm}$

maka didapatkan gaya dari persamaan $P = \frac{F}{A}$ dibawah ini sebagai berikut:

$$\begin{aligned} F &= P_{\text{gauge}} \times A \\ &= P_{\text{gauge}} \times \pi (r_{\text{piston}})^2 \\ &= 2 \text{ kgf/cm}^2 \times 3,14(2,75 \text{ cm})^2 \\ &= 47,52 \text{ kgf} \end{aligned}$$

Setelah didapatkan gaya penekanan pada hidraulik, maka bisa didapatkan tekanan gesek pada proses friction welding dengan luasan penampang spesimen.

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{47,52 \text{ kgf}}{\pi (0,635 \text{ cm})^2}$$

$$P = 37,51 \text{ kgf/cm}^2$$

Sehingga didapatkan tekanan gesek P_{gesek} sebesar $37,51 \text{ kgf/cm}^2$.

LAMPIRAN 4. Perhitungan Efek *Buckling*

Untuk menghindari efek *buckling*, maka dilakukan analisa sebagai berikut [13]:

Tensile Modulus of Elasticity (E) = 1100 MPa

Yield Strength (σ_Y) = 35 MPa

Aplikasi formula *Euler*, nilai K = 2

Moment of Inertia (I) = $7,85 \times 10^{-9} \text{ m}^4$

Luas, (A) = $3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$\begin{aligned} P_{\max} &= P_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \\ &= \frac{\pi^2 \cdot 1100 \times 10^6 \cdot 7,85 \times 10^{-9}}{(2 \cdot 78 \times 10^{-3})^2} = 3,498 \times 10^3 \text{ N} \end{aligned}$$

Tegangan kritis, menggunakan formula Euler dengan kondisi

$\sigma_{\text{cr}} < \sigma_Y$ akan berlaku.

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{cr}} &= \frac{P_{\text{cr}}}{A} \\ &= \frac{3,498 \times 10^3 \text{ N}}{3,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 11140127,39 \text{ N/m}^2 = 11,1 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Besaran tegangan kritis masih dibawah *yield strength*.

LAMPIRAN 5. Perhitungan *Heat Flux*

Untuk menganalisa nilai *heat flux* digunakan persamaan 2.10, berikut perhitungan analisisnya:

- Tekanan gesek sebesar 37,51 kgf/cm²

$$\dot{q} = \mu \times \omega \times P \times r$$

$$\dot{q} = 0,44 \times 78,5398 \text{ rad/s} \times 3678000 \text{ Pa} \times 0,00635 \text{ m}$$

$$\dot{q} = 807101,06 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{q} = 0,8071 \text{ W/mm}^2$$

- Tekanan gesek sebesar 56,265 kgf/cm²

$$\dot{q} = \mu \times \omega \times P \times r$$

$$\dot{q} = 0,44 \times 78,5398 \text{ rad/s} \times 5517710 \text{ Pa} \times 0,00635 \text{ m}$$

$$\dot{q} = 1210807,393 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{q} = 1,2108 \text{ W/mm}^2$$

- Tekanan gesek sebesar 75,02 kgf/cm²

$$\dot{q} = \mu \times \omega \times P \times r$$

$$\dot{q} = 0,44 \times 78,5398 \text{ rad/s} \times 7356950 \text{ Pa} \times 0,00635 \text{ m}$$

$$\dot{q} = 1614410,588 \text{ W/m}^2$$

$$\dot{q} = 1,6144 \text{ W/mm}^2$$

Nilai *heat flux* yang telah didapatkan karena akibat variasi tekanan gesek digunakan untuk memasukkan pada persamaan 2.13 sehingga dapat diketahui distribusi temperatur selama proses *friction welding* terhadap jarak sepanjang spesimen dari *interface*.

LAMPIRAN 6. Kode analisa pemodelan tahap pemanasan *Friction Welding*

```
function [re]=heating_stage(q,t2)
% calculating exact analytical solution for
semi-infinite media for heating stage
% surface x=0 with prescribed heat flux q
% initial temperature T(x,0)=0
% for length of rod in calculation l=10mm
% t2 is the time for heating stage
k=0.000202; % heat conductivity
jj=1;
temp=zeros(size([0:1:10]));
syms x l t x1 ak Tx1 Tx2;
Tx2=int(exp(-x^2)/x^2*q,x,x1/2/sqrt(ak*t),inf);
Tx2=Tx2*x1/k/sqrt(pi);
i=t2;
j=1;
for i1=0.000001:1:10.1
Ttx2=subs(Tx2,{t,x1,ak},{i,i1,0.1320});
Tx=double(Ttx2);
temp(1,j)=Tx;
j=j+1;
jj=jj+1;
end
x2=[0:1:10];
figure(1);
plot(x2,temp(1,:), 'r');
hold on;
xlabel('Distance to weld line, [mm]');
ylabel('Temperature, C');
end
```

LAMPIRAN 7. Tabel Hasil Pengujian

No	Tahap Gesekan			Tahap Penempaan		Data Percobaan		Data Upset (mm)	Tensile Strength (MPa)
	Tekanan Gesek (Kgf/cm ²)	Kecepatan Putar (rpm)	Durasi (detik)	Tekanan Tempa (Kgf/cm ²)	Durasi (detik)	Temperatur (°C)	Temperatur (x = 5 mm) (°C)		
1						112	34	2,25	38,1479
2	37,51					119	36	1,95	39,4227
3						119	34	2,1	39,9131
4		750	14	112,53	5	157	37	2,25	41,4821
5	56,265					140	37	2	40,5015
6						100	39	2,25	39,5208
7						136	38	3,15	39,815
8	75,02					134	35	2,3	38,9324
9						165	38	2,45	35,5001
10	SAMBUNGAN DENGAN LEM PEREKAT								
11	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK								
12	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK								
13	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK								
14	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK								
15	MATERIAL POLYPROPYLENE TANPA PENGELASAN GESEK								

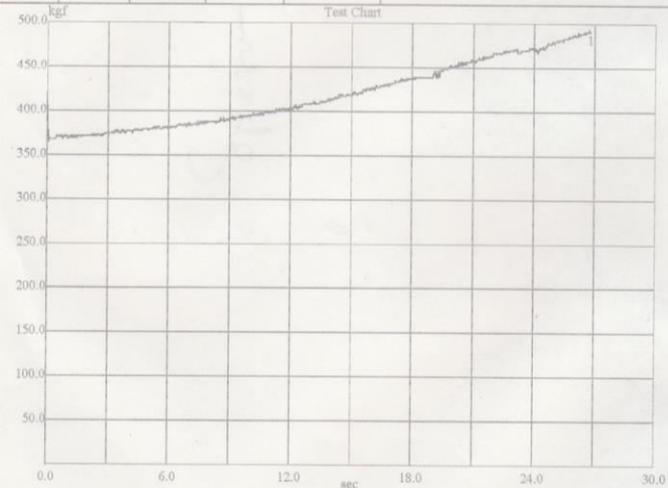
LAMPIRAN 8. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 37,51 Kgf/cm²

BLKI
SURABAYA

Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya

TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %
1	21.00	492.62	3.89	32.08
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
Average	21.00	492.62	3.89	32.08



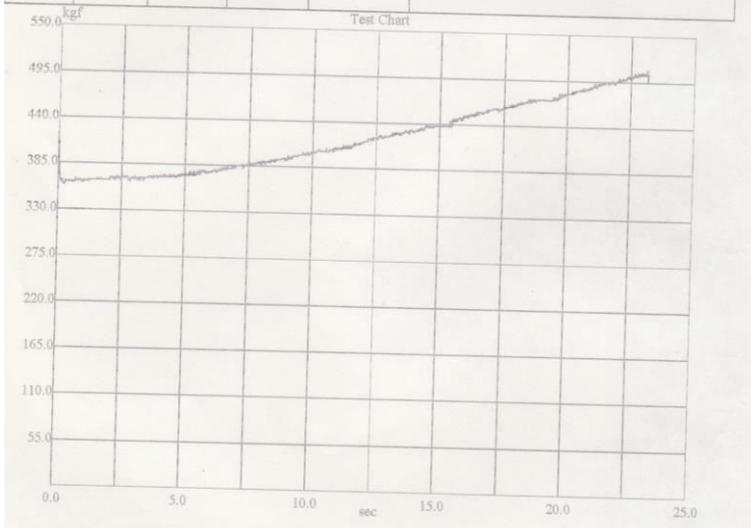
LAMPIRAN 9. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 37,51 Kgf/cm² (Lanjutan)

BLKI
SURABAYA

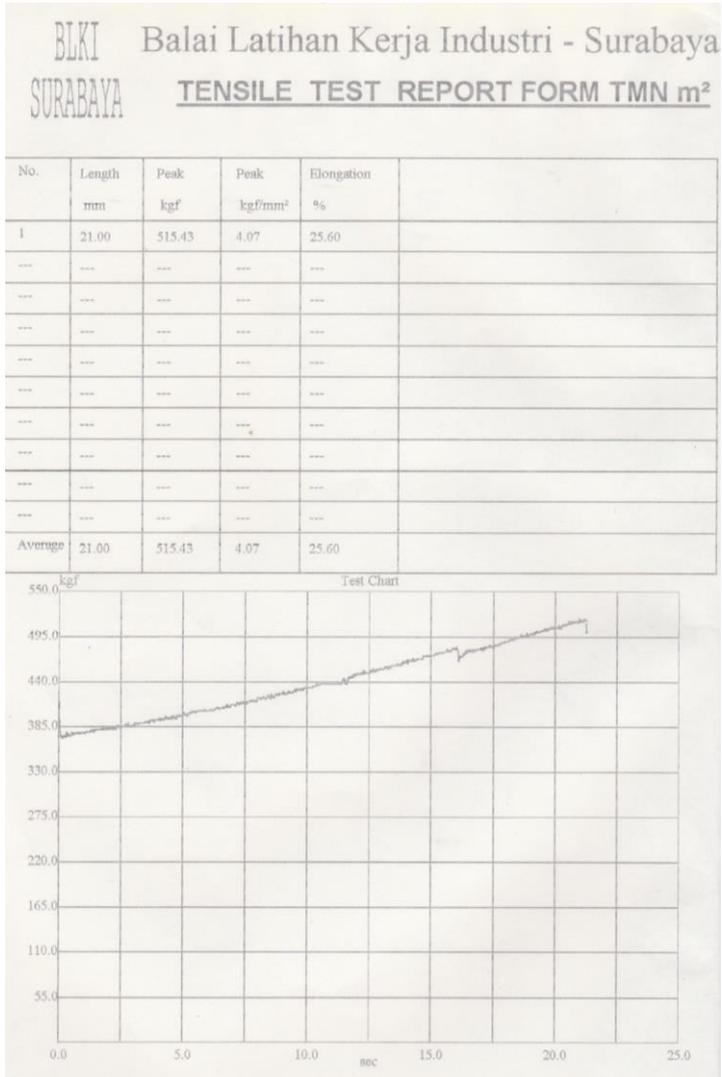
Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya

TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %
1	21.00	508.67	4.02	28.33
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
Average	21.00	508.67	4.02	28.33



LAMPIRAN 10. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 37,51 Kgf/cm² (Lanjutan)



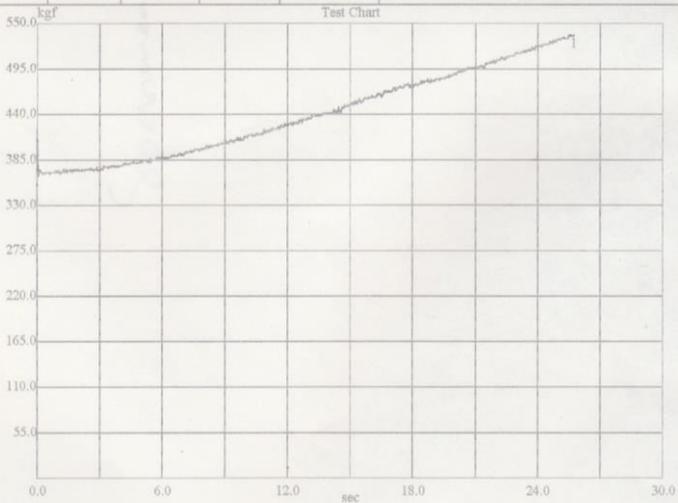
LAMPIRAN 11. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 56,265 Kgf/cm²

BLKI
SURABAYA

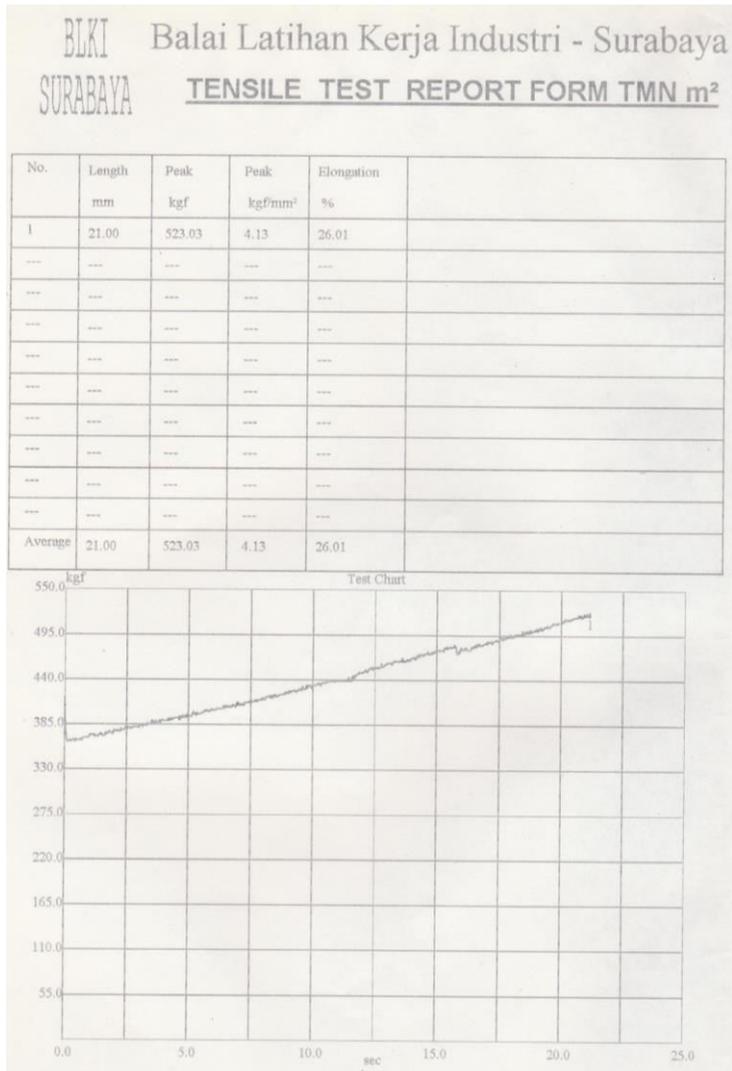
Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya

TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %
1	21.00	535.71	4.23	31.19
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
Average	21.00	535.71	4.23	31.19

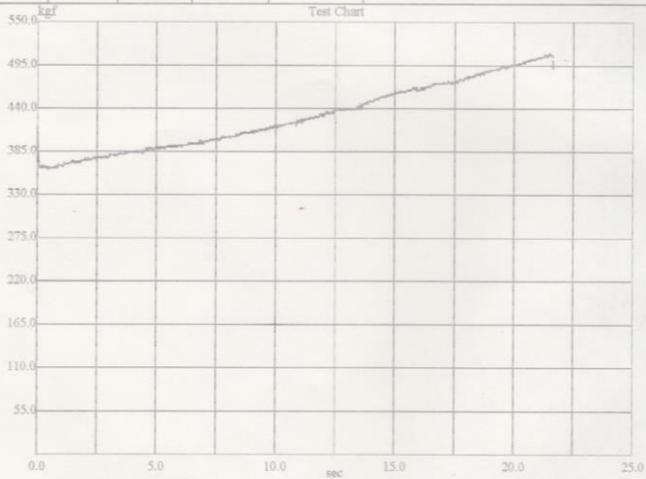


LAMPIRAN 12. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 56,265 Kgf/cm² (Lanjutan)



LAMPIRAN 13. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 56,265 Kgf/cm² (Lanjutan)

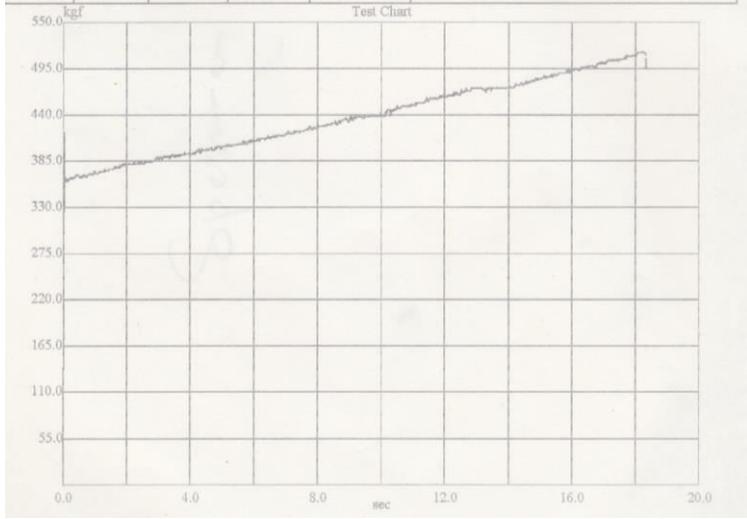
No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %
1	21.00	510.36	4.03	26.85
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
---	---	---	---	---
Average	21.00	510.36	4.03	26.85



LAMPIRAN 14. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 75,02 Kgf/cm²

BLKI Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya
 SURABAYA TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %	
1	21.00	514.58	4.06	22.86	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
Average	21.00	514.58	4.06	22.86	



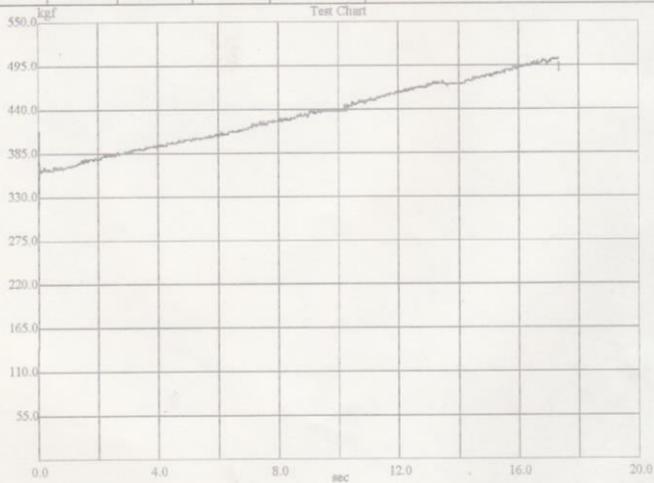
LAMPIRAN 16. Hasil Uji Tarik Tekanan Gesek 75,02 Kgf/cm² (Lanjutan)

BLKI
SURABAYA

Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya

TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

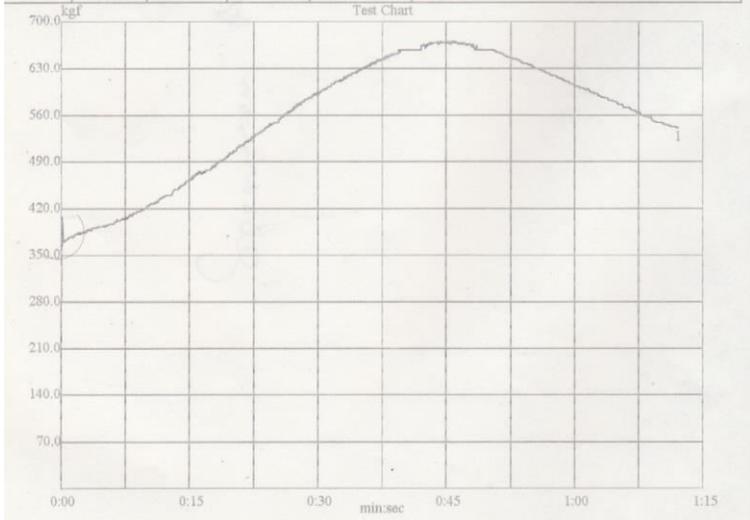
No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %	
1	21.00	502.76	3.97	21.85	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
Average	21.00	502.76	3.97	21.85	



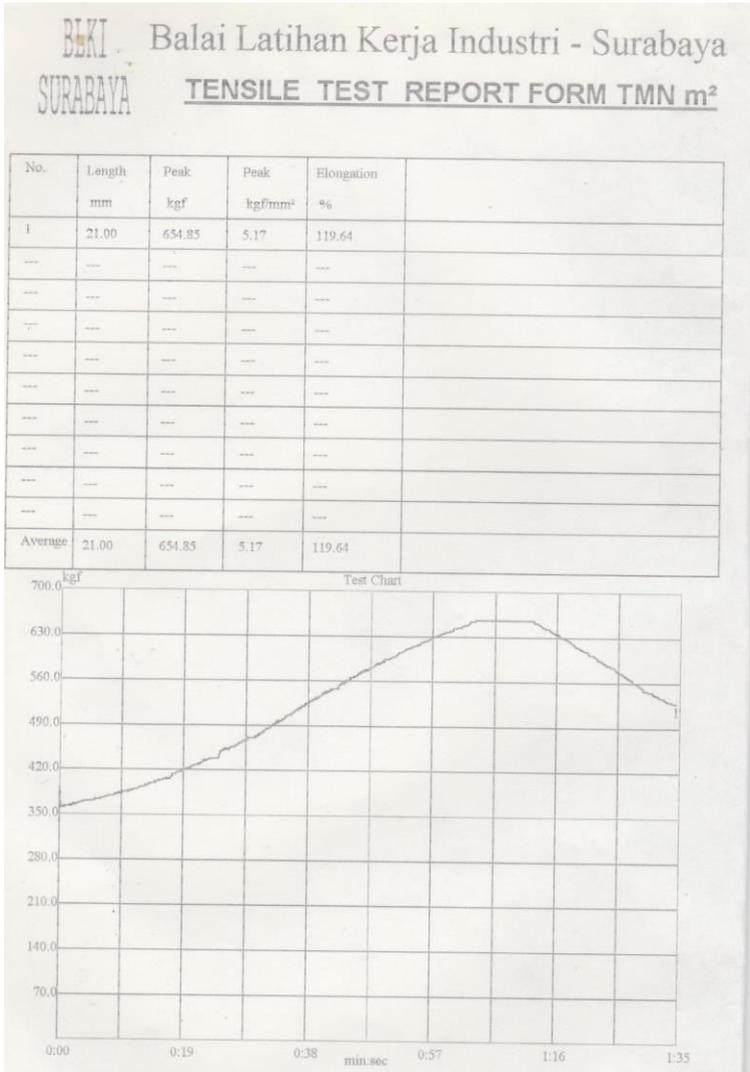
LAMPIRAN 19. Hasil Uji Tarik Material Tanpa Sambungan

BLKI Balai Latihan Kerja Industri - Surabaya
 SURABAYA TENSILE TEST REPORT FORM TMN m²

No.	Length mm	Peak kgf	Peak kgf/mm ²	Elongation %	
1	21.00	668.37	5.28	87.71	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
---	---	---	---	---	
Average	21.00	668.37	5.28	87.71	

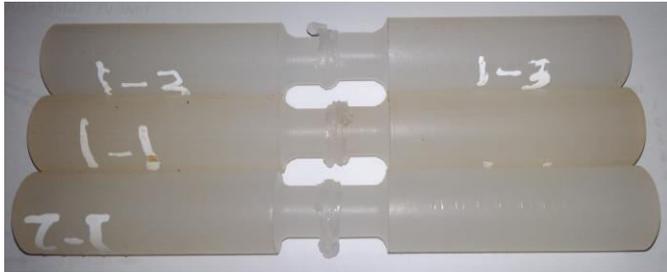


LAMPIRAN 20. Hasil Uji Tarik Material Tanpa Sambungan (Lanjutan)

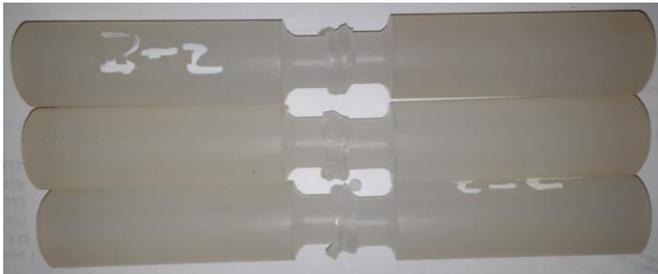


LAMPIRAN 22. Gambar hasil penyambungan spesimen

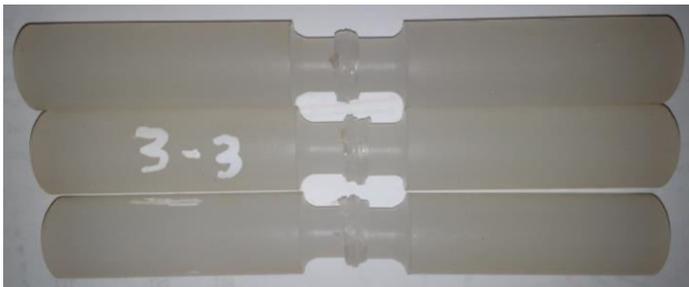
Tekanan gesek 37,51 Kgf/cm²



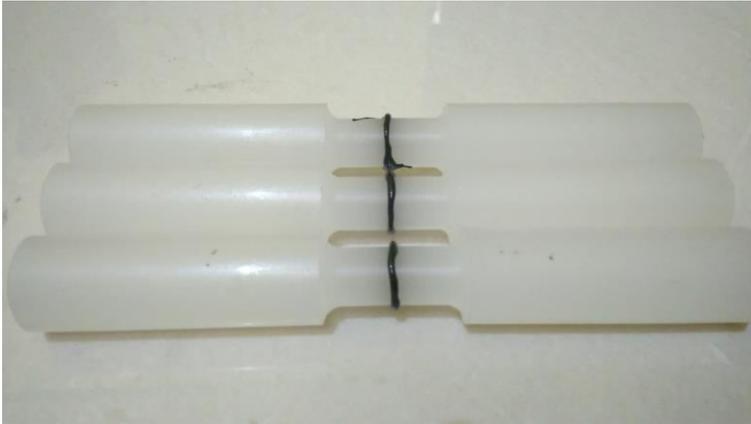
Tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²



Tekanan gesek 75,02 Kgf/cm²



LAMPIRAN 23. Gambar hasil penyambungan spesimen dengan lem perekat



LAMPIRAN 24. Gambar Hasil Uji Tarik Spesimen

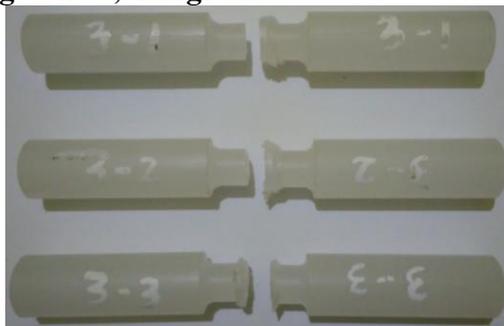
Tekanan gesek 37,51 Kgf/cm²



Tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²



Tekanan gesek 75,02 Kgf/cm²

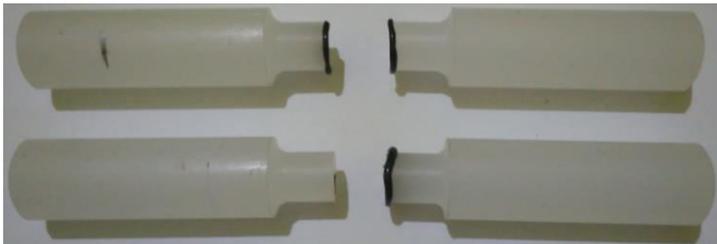


LAMPIRAN 25. Gambar Hasil Uji Tarik Spesimen (Lanjutan)

Material *Polypropylene* Tanpa Sambungan



Sambungan Lem Perekat

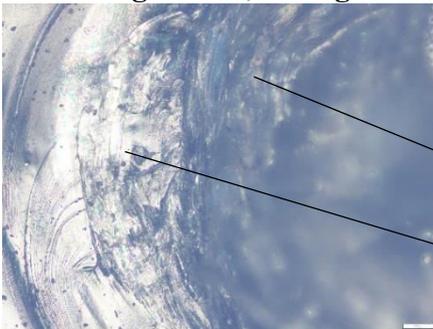


LAMPIRAN 26. Foto Mikrostruktur Permukaan Hasil Uji Tarik Spesimen Tekanan gesek 37,51 Kgf/cm²



Fud

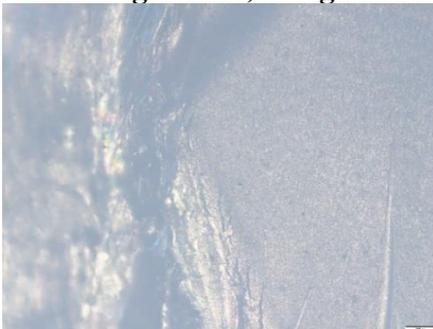
Tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²



Fpd

Fpl

Tekanan gesek 75,02 Kgf/cm²



**LAMPIRAN 27. Foto Permukaan Hasil Uji Tarik
Tekanan gesek 37,51 Kgf/cm²**



**LAMPIRAN 28. Foto Permukaan Hasil Uji Tarik
(Lanjutan)
Tekanan gesek 56,265 Kgf/cm²**



**LAMPIRAN 29. Foto Permukaan Hasil Uji Tarik
(Lanjutan)
Tekanan gesek 75,02 Kgf/cm²**



BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan dari keluarga sederhana di Surabaya, 27 Oktober 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara pasangan Bapak Sutoyo dengan Ibu Lilik Sukismi, yang beralamat di Desa Pepelegi, Kecamatan Waru, Kabupaten Sidoarjo. Pendidikan formal pertama adalah SDN 1 Kedungrejo Waru, SMP Muhammadiyah 2 Taman, dan SMAN 1 Kota Mojokerto. Kemudian penulis lulus dan diterima di Jurusan D-3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-DISNAKERTRANSDUK Prov. Jawa Timur melalui seleksi ujian masuk D-3 pada tahun 2012 dan terdaftar dengan Nomor Registrasi Pokok (NRP) 2112039002. Penulis sempat mendapatkan pengalaman kerja praktek di PT. PAL Indonesia pada tahun 2014 dan aktif dalam organisasi dalam kampus yaitu Bendahara I dan juga aktif diluar organisasi kampus yaitu komunitas bercocok tanam hidroponik dan komunitas olahraga lari.

Pada Tahun 2015 penulis lulus D-3 ITS kemudian melanjutkan kuliah lintas jalur dan diterima di Jurusan S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan nomor pokok mahasiswa 2115105041. Penulis merupakan anggota Laboratorium Mekanika Benda Padat. Penulis mengambil tugas akhir di bidang desain tepatnya tribologi mengenai proses pengelasan gesek. Informasi mengenai tugas akhir ini bisa dihubungi melalui aditya.dewangga.w.s@gmail.com