

**PENGARUH WAKTU DAN TEKANAN GESEK TERHADAP
KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN *DISSIMILAR METALS* PADA
PENGELASAN GESEK**

TESIS

**PROGRAM MAGISTER TEKNIK MESIN
MINAT MATERIAL DAN MANUFAKTUR**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Magister Teknik



**JACK CAROL ADOLF PAH
NIM. 126060200111013**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

TESIS

**PENGARUH WAKTU DAN TEKANAN GESEK TERHADAP KEKUATAN
TARIK SAMBUNGAN *DISSIMILAR METALS* PADA PENGELASAN GESEK**

Oleh :

JACK CAROL ADOLF PAH
NIM. 126060200111013

telah dipertahankan didepan penguji
Pada tanggal 8 Januari 2018
dinyatakan telah memenuhi syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik

Komisi Pembimbing,

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.



Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT.Met.

Malang,

Universitas Brawijaya
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin
Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Lilis Yuliati, S.T., M.T.
TEKNIP. 197507022000032001

JUDUL TESIS: PENGARUH WAKTU DAN TEKANAN GESEK TERHADAP KEKUATAN TARIK SAMBUNGAN *DISSIMILAR METALS* PADA PENGELASAN GESEK

Nama Mahasiswa : Jack Carol Adolf Pah
NIM : 126060200111013
Program Magister : Teknik Mesin
Minat : Material dan Manufaktur

KOMISI PEMBIMBING :

Ketua : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng.
Anggota : Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT. Met.

TIM DOSEN PENGUJI :

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng, Sc.
Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Moch Agus Choiron, ST.,MT.
SK Penguji : Surat Keputusan Dekan Fakultas Teknik Universitas
Brawijaya
Nomor 29 Tahun 2018
Tanggal 3 Januari 2018

PERNYATAAN ORISINALITAS TESIS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Tesis ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Tesis dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan pasal 70)

Malang, 8 Januari 2018

Mahasiswa,



Nama : Jack Carol Adolf Pah

NIM : 126060200111013

RIWAYAT HIDUP

Jack Carol Adolf Pah, lahir di Kupang 4 Maret 1972, anak dari ayah Daniel Nemuel Pah (almarhum) dan ibu Strina Pah-Ndun (almarhumah). SD sampai SMA di Kota Kupang-NTT. Lulus SMA Negeri 1 Kupang-NTT tahun 1991. Studi di Universitas Kristen Petra Surabaya Jurusan Teknik Mesin pada tahun 1991 hingga kemudian meraih gelar S1. Bekerja di berbagai usaha mandiri sejak tahun 1995 di Surabaya, Plan International Program Unit Kupang, dan berbagai proyek infrastruktur pemerintah sampai 2006. Saat ini sebagai staf pengajar di Universitas Nusa Cendana Kupang Jurusan Teknik Mesin.

Malang, Januari 2018

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M. Eng, selaku Pembimbing 1.
2. Dr. Ir. Wahyono Suprpto, MT. Met, selaku Pembimbing 2.
3. Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT, yang adalah Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
4. Prof. Dr. Ir. Rudy Soenoko, M. Eng, Sc, selaku Penguji 1.
5. Dr. Eng. Moch Agus Choiron, ST.,MT, seelaku Penguji 2.
6. Defmit Riwu dan Adi Y. Tobe, dan teman-teman mahasiswa lainnya diantaranya Pungki, Halman, Rusdin, Willy, Hilmi, dll, yang telah membantu dalam proses penyusunan tesis ini.
7. Ir. Jusuf J. S. Pah, Msc, dan Nemuel Daniel Pah, ST., M.Eng., Ph.D, sebagai saudara sekandung yang selalu mendukung dalam doa dan *financial*.
8. Magdalena Yuanita Wake-Pah, sebagai istri tercinta.

Malang, 4 Januari 2018

Penulis

RINGKASAN

Jack carol Adolf Pah, Program Studi Magister Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Barawijaya, Januari 2018, *Pengaruh Waktu dan Tekanan Gesek terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Dissimilar Metals Pada Pengelasan Gesek*, Dosen Pembimbing: Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng dan Dr. Ir. Wahyono Suprpto, M. Met.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan pengaruh variabel waktu gesek dan tekanan gesek terhadap kekuatan tarik sambungan dua material tidak sejenis, aluminium paduan AA6061 dan baja karbon, pada las gesek *continuous drive*. Variasi waktu gesek yang diterapkan yaitu 5 detik, 7 detik, 9 detik, 11 detik, pada setiap variasi tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa. Variabel terkontrol dalam proses pengelasan gesek ini yaitu kecepatan putar 1600 rpm, tekanan tempa 79 MPa yang diterapkan selama 60 detik, dan diameter permukaan gesek spesimen 15 mm.

Kekuatan dari sambungan yang terbentuk, dievaluasi berdasarkan kekuatan tarik sambungan. Pengamatan terhadap perubahan temperatur selama proses pengelasan, distribusi nilai kekerasan *Vickers* disekitar daerah sambungan, dan foto mikro, digunakan sebagai data-data penunjang dalam analisa.

Hasil penelitian menunjukkan semakin lama waktu gesek diterapkan, akan menyebabkan kekuatan tarik sambungan meningkat sampai nilai maksimum dan kemudian kekuatannya kembali menurun. Peningkatan kekuatan tarik sambungan tidak bertambah kuat secara linier, akibat variasi tekanan gesek, di waktu gesek 9 detik dan 11 detik. Pada waktu gesek 5 detik dan 7 detik, pembesaran tekanan gesek, menyebabkan peningkatan kekuatan tarik sambungan yang linier. Terjadi peningkatan ketebalan dari suatu lapisan yang bersifat getas pada batas sambungan, akibat dari semakin tinggi temperatur pada proses pengelasan. Peningkatan ketebalan lapisan getas ini menyebabkan kekuatan tarik sambungan semakin melemah.

Kata Kunci: las gesek, waktu gesek, tekanan gesek, kekuatan tarik, AA6061, baja karbon

SUMMARY

Jack Carol Adolf Pah, *Master Program of Engineering, Faculty of Engineering, University of Barawijaya, January 2018, The Effect of Friction Time and Friction Pressure on The Tensile Strength of The Friction Weld Joint of Dissimilar Metals, Academic Supervisor: Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng and Dr. Ir. Wahyono Suprpto, M. Met.*

The objective of this research was to get the effect of friction time and friction pressure on the tensile strength of the joining of two dissimilar materials, aluminum alloy AA6061 and carbon steel, with continuous drive friction welding process. Variations of friction time were 5 seconds, 7 seconds, 9 seconds, and 11 seconds, at each variation of friction pressures, 24 MPa, 32 MPa, and 40 MPa. Controlled variables in this friction welding process were rotational speed of 1600 rpm, upset pressure of 79 MPa which was applied for 60 seconds and diameter of friction surface of specimens which were 15 mm.

The resulting strength of the bonding were than evaluated on the basis of tensile strength. Observations of temperature change during the welding process, the distribution of Vickers hardness values around the bonds area, and micro photographs, were used as support to the analysis.

The results showed that the longer friction time was applied, the higher tensile strength of the bonds would be, until it began to decrease after a certain maximum value of the tensile strength had been reached. Increased of the tensile strength of the bonding did not occur linearly due to the variation of friction pressure at 9 seconds and 11 seconds of friction time. At 5 seconds and 7 seconds of friction time, increase of friction pressure caused a linear increase of tensile strength. Higher temperatures in the welding process increased the thickness of brittle layer at the bonds boundary. The increase of the brittle layer thickness causes decrease of the tensile strength of the bonds.

Keywords: friction welding, friction time, friction pressure, tensile strength, AA6061, carbon steel

KATA PENGANTAR

Tesis adalah salah satu syarat dalam merampungkan studi dijenjang magister di Indonesia. Di Program Magister Teknik Mesin Universitas Brawijaya-Malang, khususnya pada minat Material Manufaktur, subjek tesis tentunya diarahkan pada kedua kumpulan subjek, yakni yang menyangkut berbagai penelitian di bidang material dan juga pada bidang yang menyangkut pemrosesannya. Las gesek merupakan salah satu subjek penelitian tesis dalam bidang material manufaktur. Tujuan utama proses las gesek adalah menyambungkan 2 atau lebih komponen/ bagian dengan memanfaatkan proses gesekan. Kekuatan sambungan menjadi suatu pokok persoalan dalam proses las gesek, serta apa yang menyebabkan dan berpengaruh dalam proses sehingga terjadi suatu proses penyambungan yang baik dan kuat.

Suatu penelitian yang baik dalam bidang keteknikan, harus disusun berdasarkan suatu rangkaian tahapan-tahapan ilmiah. Didahului dengan adanya suatu persoalan keteknikan yang nyata, adanya ide-ide pemecahan persoalan tadi secara ilmiah melalui suatu penelitian. Pembuatan proposal penelitian, pelaksanaan penelitian untuk mendapatkan data hasil penelitian, analisa dan penarikan kesimpulan, yang mana kemudian dituangkan dalam suatu karya ilmiah dalam hal ini adalah tesis. Suatu tesis perlu untuk diuji/ dievaluasi sebagai suatu sarana umpan balik, demi menyempurnakannya. Mempublikasi suatu tesis, dalam bentuk jurnal atau lainnya, merupakan salah satu cara untuk memberi efek kegunaan bagi kalangan yang lebih luas.

Terima kasih yang tulus disampaikan pada dosen-dosen pembimbing, pimpinan serta staf dosen dan staf administrasi pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Barawijaya Malang, dan teman-teman khususnya Defmit Riwu, Adi Tobe, yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih juga untuk dukungan doa dari istri tercinta, Magdalena Yuanita. Suatu masukan dalam bentuk kritikan yang positif, yang didasari niat yang baik dan tulus, harus ditanggapi dengan baik, dan dengan rasa penuh terima kasih, yang mana berguna bagi penyempurnaan dan pengembangan subjek pada tesis ini.

Kiranya tesis ini, dengan subjek las gesek pada *dissimilar metals*, dapat menyumbangkan sesuatu yang bernilai positif dalam dunia studi keteknikan yang berhubungan dengan material dan manufaktur. Semoga!

Malang, 4 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Aluminium Paduan	8
2.3 Baja	9
2.4 Perbandingan Sifat-Sifat Aluminium dan Besi	11
2.5 Pengelasan	13
2.6 Tipe Las gesek	13
2.7 Prinsip Las gesek <i>Continuous Drive</i>	14
2.8 Fase Proses Las gesek <i>Continuous Drive</i>	16
2.8.1 Fase Penggosokan (<i>Rubbing Phase</i>)	16
2.8.2 Fase penggesekan (<i>Friction Phase</i>)	16
2.8.3 Fase Pengereman (<i>Braking Phase</i>)	17
2.8.4 Fase Penempaan (<i>Forging Phase</i>)	17
2.9 Mekanisme Pengikatan Pada Las gesek	17
2.10 Proses Difusi	19
2.11 Energi Termal yang Dibangkitkan pada Proses Penggesekan	20
2.12 Persoalan pada Penyambungan Material Tidak Sejenis	23
2.13 Daerah Pengaruh Panas (HAZ)	25
2.14 Evaluasi Hasil Las gesek	26
2.15 Kelebihan dan Kekurangan Las Gesek <i>Continuous Drive</i>	27
2.16 Aplikasi Las Gesek	27
BAB III KERANGKA KONSEP PENELITIAN	31
3.1 Kerangka Pemikiran	31
3.2 Hipotesis	33
BAB IV METODE PENELITIAN	35
4.1 Variabel Penelitian	35
4.2 Tempat Penelitian	37

4.3	Bahan dan Peralatan Penelitian	38
4.3.1	Bahan Benda Kerja.....	38
4.3.2	Peralatan Penelitian	38
4.4	Prosedur Penelitian	39
4.4.1	Prosedur Las gesek.....	39
4.4.2	Prosedur Pengujian Tarik Hasil Pengelasan.....	42
4.4.3	Pengujian Tarik pada Material Logam Benda Kerja.....	44
4.4.4	Pengujian Kekasaran Permukaan Kontak Benda Kerja	45
4.4.5	Pengujian Komposisi Kimiawi Bahan Benda Kerja	45
4.4.6	Pengukuran Temperatur Proses Penggesekan.....	46
4.4.7	Prosedur Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	47
4.4.8	Pengujian Foto Mikro.....	47
4.4.9	Pengujian dengan Foto Makro	49
4.5	Pengolahan Data, Analisa, dan Penarikan Kesimpulan.....	50
4.6	Diagram Alir Penelitian	50
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		53
5.1	Data Hasil Uji Kekasaran Permukaan Kontak.....	53
5.2	Hasil Uji Komposisi Kimiawi dan Kekuatan Tarik Material Benda Kerja	54
5.2.1	Data Hasil Uji Komposisi Kimiawi	54
5.2.2	Kekuatan Tarik Material Benda Kerja	55
5.2.3	Analisis Mengenai Jenis Material Benda	56
5.3	Hasil Uji Tarik pada Sambungan Las gesek.....	57
5.4	Temperatur pada Proses Pengelasan.....	63
5.5	Kekuatan Tarik Sambungan dan Temperatur Proses.....	66
5.6	Material yang Terdeformasi Menjadi <i>Flash</i>	69
5.7	Burn of Length (BOL) dan Kekuatan Tarik Sambungan	71
5.8	Hasil Pengujian Kekerasan	74
5.9	Hasil Foto Mikro.....	75
5.10	Hasil Foto Makro	84
5.11	Pembahasan	86
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....		89
6.1	Kesimpulan	89
6.2	Saran	89
DAFTAR PUSTAKA		91
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Parameter Pengujian Sahin.....	5
Tabel 2.2. Parameter Pengujian Shubharvardhan.....	6
Tabel 2.3. Parameter Pengujian Taban.....	7
Tabel 2.4. Parameter Pengujian Alves.....	8
Tabel 4.1. Besar Tekanan pada Permukaan Kontak Benda Kerja.....	37
Tabel 4.2. Jumlah Benda Uji yang Dilas Gesek dan Variasi Variabel Bebas	42
Tabel 4.3. Jumlah Benda Uji yang Diuji Tarik.....	44
Tabel 4.4. Jumlah Benda Uji Tarik Material Logam Benda Kerja.....	44
Tabel 4.5. Jumlah Benda Uji untuk kekasaran Permukaan	45
Tabel 4.6. Jumlah Benda Uji untuk Komposisi Kimiawi.....	45
Tabel 5.1. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Kontak Benda Kerja.....	53
Tabel 5.2. Komposisi Kimiawi Material Benda AA6061	54
Tabel 5.3. Komposisi Kimiawi Material Benda kerja Baja Karbon.....	55
Tabel 5.4. Besar Tegangan Maksimum, Tegangan Luluh, Tegangan Putus, dan Rentang Nilai Tegangan pada Benda Uji.....	56
Tabel 5.5. Data Standar AA6061 dan Data Material Benda Kerja 1.....	57
Tabel 5.6. Data Standar Baja Karbon Sedang dan Data Material Benda Kerja 2	57
Tabel 5.7. Rata-Rata Kekuatan Tarik Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek dan Waktu Gesek	59
Tabel 5.8. Rata-Rata Regangan Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek dan Waktu Gesek	62
Tabel 5.9. Temperatur Maksimum pada Proses terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek.....	65
Tabel 5.10. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 40 MPa	69
Tabel 5.11. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 32 MPa	70
Tabel 5.12. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 24 MPa	70
Tabel 5.13. Foto Makro Sambungan Las Gesek AA6061 dan Baja Karbon pada Tekanan Gesek 40 MPa.....	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram Kesetimbangan Fasa Besi-Karbida Besi.....	10
Gambar 2.2.	Tahapan Proses Las gesek <i>Continous Drive</i>	15
Gambar 2.3.	Karakteristik Variabel Las gesek.....	16
Gambar 2.4.	Tahapan-Tahapan Proses Pengikatan Las gesek	18
Gambar 2.5.	Perpindahan Atom pada Difusi.....	19
Gambar 2.6.	Permukaan Kontak dengan Gaya gesek pada Luasan dA	21
Gambar 2.7.	Diagram Kesetimbangan Fasa Fe-Al.....	24
Gambar 2.8.	Daerah Pengaruh Panas pada Las gesek.....	25
Gambar 2.9.	Bentuk Flash dan HAZ pada <i>Dissimilar Friction Welding</i>	26
Gambar 2.10.	Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Aluminium-Baja pada Rangka Mobil.....	28
Gambar 2.11.	Penyambungan Las gesek antara Aluminium-Baja pada <i>Transition Joint</i> untuk Peralatan <i>Cryogenic</i>	28
Gambar 2.12.	Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Aluminium-Baja pada <i>Copier Fuser Roller</i>	29
Gambar 2.13.	Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Selinder Aluminium Pejal-Pipa Baja untuk Sistem Perpipaian	29
Gambar 3.1.	Diagram Kerangka Pemikiran	33
Gambar 4.1.	Variabel Pengujian pada Waktu Gesek 5 Detik untuk 3 Variasi Tekanan Gesek.....	36
Gambar 4.2.	Sistem Penekan Hidrolik yang Digunakan	36
Gambar 4.3.	Peralatan Las gesek yang Digunakan	38
Gambar 4.4.	Ukuran Benda kerja 1, Benda kerja 2 dan Ring	40
Gambar 4.5.	Posisi Ring pada Benda Kerja	40
Gambar 4.6.	Spesimen Sebelum Pengelasan.....	41
Gambar 4.7.	Pemasangan Benda kerja 1 dengan Ring pada Pencekam.....	41
Gambar 4.8.	Benda kerja 1 dan Benda kerja 2 pada Mesin Las Gesek.....	41
Gambar 4.9.	Hasil Pengelasan pada Proses	42
Gambar 4.10.	Dimensi Standar Spesimen Uji Tarik.....	43
Gambar 4.11.	Mesin Uji Tarik yang Digunakan	43
Gambar 4.12.	Sepesimen Uji Tarik	43
Gambar 4.13.	Benda Uji Tarik untuk Logam Induk.....	44
Gambar 4.14.	Spesimen Uji untuk Pengujian Komposisi Kimiawi	46
Gambar 4.15.	Lubang Peletakan Ujung Termokopel pada Benda kerja 2	46
Gambar 4.16.	Proses Pengukuran Temperatur pada Saat Proses Pengelasan	46
Gambar 4.17.	Skema Pengujian Kekerasan pada Benda Kerja.....	47
Gambar 4.18.	Potongan Sambungan pada Benda Kerja setelah Dicitak pada Resin	48
Gambar 4.19.	Benda kerja untuk Foto Mikro.....	49
Gambar 4.20.	Proses Perendaman pada Cairan Etsa	49
Gambar 4.21.	Diagram Alir Penelitian.....	51
Gambar 5.1.	Grafik Tegangan-Regangan Benda Uji AA6061.....	55
Gambar 5.2.	Grafik Tegangan-Regangan Benda Uji 2 Baja Karbon Sedang	56
Gambar 5.3.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik	58
Gambar 5.4.	Rata-rata Tegangan Tarik Maksimum pada Variasi Waktu Gesek	60
Gambar 5.5.	Rata-rata Tegangan Tarik Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek	61

Gambar 5.6. Rata-rata Regangan Maksimum pada Variasi Waktu Gesek	63
Gambar 5.7. Grafik Temperatur pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik	64
Gambar 5.8. Grafik Temperatur Maksimum Proses terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek	65
Gambar 5.9. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa.....	66
Gambar 5.10. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa.....	66
Gambar 5.11. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa.....	67
Gambar 5.12. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa	67
Gambar 5.13. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa	68
Gambar 5.14. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa	68
Gambar 5.15. Grafik Rata-Rata BOL terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek	71
Gambar 5.16. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa	72
Gambar 5.17. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa	72
Gambar 5.18. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa	73
Gambar 5.19. Grafik Nilai Kekerasan Vickers pada Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 7 detik	74
Gambar 5.20. Grafik Nilai Kekerasan Vickers pada Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 11 detik	74
Gambar 5.21. Foto Mikro Daerah Batas Sambungan pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061	76
Gambar 5.22. Foto Mikro Daerah HAZ pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061	76
Gambar 5.23. Foto Mikro Daerah <i>Base Metal</i> pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061.....	77
Gambar 5.24. Foto Mikro Daerah Sambungan untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja	78
Gambar 5.25. Foto Mikro Daerah HAZ untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja	78
Gambar 5.26. Foto Mikro Daerah <i>Base</i> untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja	79
Gambar 5.27. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 7 Detik	80
Gambar 5.28. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 11 Detik	80
Gambar 5.29. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 32 MPa, Waktu Gesek 9 Detik	81
Gambar 5.30. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 32 MPa, Waktu Gesek 11 Detik	82

Gambar 5.31. Foto Mikro Sambungan dengan Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 9 Detik	83
Gambar 5.32. Foto Mikro Sambungan dengan Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 11 Detik	83
Gambar 5.33. Batas Sambungan pada Proses Las gesek dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik	86

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Report of Analysis SEM FEI Inspect S-50 EDS.....	95
Lampiran 2.	Mikroanalisis Komposisi Kimia AA6061.....	96
Lampiran 3.	Mikroanalisis Komposisi Kimia Baja Karbon	97
Lampiran 4.	Grafik Tegangan-Regangan AA6061 Benda Uji ke 2 dan 3	98
Lampiran 5.	Grafik Tegangan-Regangan Baja Karbon Benda Uji ke 2 dan 3.....	99
Lampiran 6.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	100
Lampiran 7.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	101
Lampiran 8.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	102
Lampiran 9.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	103
Lampiran 10.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	104
Lampiran 11.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	105
Lampiran 12.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	106
Lampiran 13.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik Benda Uji 2 dan 3	107
Lampiran 14.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	108
Lampiran 15.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 2 dan 3.....	109
Lampiran 16.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	110
Lampiran 17.	Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.....	111
Lampiran 18.	Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 24 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, dan 7 Detik	112
Lampiran 19.	Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 24 MPa untuk Waktu Gesek 9 Detik, dan 11 Detik	113
Lampiran 20.	Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 32 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, dan 7 Detik	114
Lampiran 21.	Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 32 MPa untuk Waktu Gesek 9 Detik, dan 11 Detik	115
Lampiran 22.	Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 40 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, 9 Detik dan 11 Detik	116
Lampiran 23.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji A.....	117
Lampiran 24.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji B	118
Lampiran 25.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji C.	119
Lampiran 26.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji A.....	120
Lampiran 27.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji B.	121
Lampiran 28.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji C	122
Lampiran 29.	Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji A.....	123

Lampiran 30. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji B	124
Lampiran 31. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji C	125
Lampiran 32. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 1 Lokasi Uji A ..	126
Lampiran 33. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 1 Lokasi Uji B ..	127
Lampiran 34. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 1 Lokasi Uji C ..	128
Lampiran 35. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji A ..	129
Lampiran 36. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji B ..	130
Lampiran 37. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji C ..	131
Lampiran 38. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji A ..	132
Lampiran 39. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji B ..	133
Lampiran 40. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji C ..	134
Lampiran 41. Surat Keterangan Pengujian Tarik	135
Lampiran 42. Foto Spesimen untuk Uji Tarik	136
Lampiran 43. Foto Spesimen untuk Foto Mikro	137
Lampiran 44. Foto Proses dan Peralatan Pengelasan Gesek	138

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan energi yang efisien dalam suatu aplikasi teknologi, sudah merupakan suatu keharusan pada saat ini, untuk mengantisipasi kelangkaan energi mineral. Berbagai penelitian dan pengembangan teknologi, terfokus pada isu penghematan energi. Dalam bidang teknologi material, penerapan berbagai material baru dalam mensubsitusi penggunaan material-material yang konvensional, semakin sering dilakukan. Hal ini dapat dilihat pada peralatan-peralatan transportasi yang menggunakan berbagai material-material lainnya yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat (*strength to weight ratio*) yang lebih besar, tanpa mengabaikan syarat-syarat desain lainnya.

Penerapan material yang dengan massa jenis yang kecil, dan juga material yang mempunyai sifat-sifat lain, yang paling tepat pada suatu komponen peralatan, merupakan salah satu cara dalam penggunaan energi yang lebih efisien (Shubharvardhan, 2012, p. 200). Berbagai jenis material digunakan bersama pada satu struktur peralatan dikarenakan masing-masing material memiliki sifat-sifat mekanik, kimiawi yang berbeda-beda. Dengan demikian, penggunaan berbagai jenis material dalam suatu peralatan dapat meningkatkan nilai keefektifan, nilai ekonomis, dan meningkatkan kemampuan suatu peralatan, yang mana disebabkan oleh sifat-sifat khusus yang dimiliki setiap material (Uzkut, 2011, p. 815), (Satyanarayana, 2005, p. 128). Penggantian material suatu komponen peralatan, dengan material yang lain yang lebih tepat, dan juga penerapan berbagai material-material tidak sejenis dalam suatu komponen peralatan, melalui suatu proses penyambungan, dapat merupakan suatu cara untuk penghematan energi, melalui peningkatan nilai keefektifan, nilai ekonomis, dan nilai kegunaan suatu peralatan atau komponen peralatan.

Secara umum, telah diketahui bahwa berbagai struktur peralatan atau komponen peralatan terdahulu, umumnya terbuat dari material berbasah dasar besi (*ferrous*). Suatu struktur peralatan yang sebelumnya terbuat dari besi, belum tentu dapat digantikan secara menyeluruh oleh logam lain yang memiliki massa jenis lebih kecil seperti aluminium dan paduannya, berkaitan dengan perbedaan sifat kekuatan mekaniknya, kemampuan untuk dilas dan juga berbagai faktor ekonomis (Shubharvardhan, 2012, p. 200). Walaupun demikian,

tetap dimungkinkan untuk menggantikan beberapa bagian dari suatu komponen peralatan, oleh jenis material lainnya, dari keseluruhan material peralatan itu sebelumnya (Shubharvardhan, 2012, p. 200). Menjadi suatu konsekuensi logis, dari penerapan berbagai material yang tidak sejenis dalam suatu struktur peralatan, adalah proses penyambungan dua atau lebih material yang tidak sejenis. Sebagai contoh adalah penyambungan antara paduan aluminium, dengan material berbahan dasar besi.

Berbagai metode penyambungan dapat diterapkan untuk menyambung dua logam tidak sejenis pada satu struktur komponen. Penyambungan antara aluminium dan baja dapat disambungkan dengan baik, pada beberapa aplikasi dengan menggunakan pengikatan mekanis, dan juga menggunakan pengikatan adesif. Kedua metode pengikatan seperti di atas memiliki keterbatasan pada kekuatan spesifik sambungan dan juga geometri pada daerah sambungan, seperti harus adanya bentuk pangkuan sambungan (*lap geometry*) yang cukup luas (Taban, 2010, p. 2305). Metode lainnya adalah metode pengelasan, yang dapat dibedakan menjadi pengelasan fusi (konvensional) dan pengelasan *solid-state*.

Metode penyambungan dengan las gesek merupakan suatu pilihan metode untuk penyambungan dua jenis logam berbeda, yang mana pada proses ini, penyambungan kedua jenis logam terjadi pada fase solid, tanpa membutuhkan logam pengisi (*filler metal*), *flux*, dan gas pelindung (Shubharvardhan, 2012, p. 200). Metode las gesek telah digunakan untuk menyambungkan, baik pada logam besi dan paduannya, logam-logam bukan besi dan paduannya, dan juga berbagai logam-logam lain yang tidak sejenis, yang berbeda sifat-sifat termal dan sifat-sifat mekanisnya (Sahin, 2010, p. 131). Bahkan Las gesek juga merupakan suatu metode manufaktur untuk menyambungkan logam dan bukan logam dengan menggunakan pembangkitan panas akibat gesekan pada bagian-bagian yang akan disambung (Irawan, 2017, p. 78).

Las gesek ditinjau dari sisi cara mentransfer energi mekaniknya, dapat diklasifikasikan secara praktis menjadi las gesek *continuous drive*, dan las gesek *inertia* (Sahin, 2013, p. 278). Las gesek *continuous drive* merupakan metode las gesek yang digunakan untuk menyambungkan logam berbentuk selinder dimana terjadi pembangkitan panas akibat gesekan pada permukaan kontak (Irawan, 2016, p. 1178).

Pada las gesek *continuous drive*, terdapat variabel-variabel operasi utama seperti (Sahin, 2013, p. 278), (Alves, 2010, p. 302):

1. Kecepatan Putar (*rotation speed*).
2. Waktu Gesek (*friction time*).
3. Tekanan Gesek (*friction pressure*).

4. Tekanan Tempa (*upset pressure*).
5. Waktu Tempa (*upset time*).

Selain variabel-variabel utama tadi, terdapat variabel-variabel lain, yang berkorelasi dengan hasil penyambungan pada proses las gesek *continuous drive* seperti jenis material yang disambungkan dalam proses las gesek (Sahin, 2013, p. 278), geometry permukaan kontak dan diameter permukaan kontak (Irawan, 2017, p. 78), kekesaran permukaan kontak (Irawan, 2016, p. 1178). Kombinasi dari variabel-variabel las gesek akan dapat memberikan pembangkitan panas yang memadai untuk menghasilkan penyambungan dengan kekuatan tarik yang maksimum (Irawan, 2012, p. 762). Kombinasi dari variabel-variabel dalam suatu proses las gesek menentukan kualitas dari hasil penyambungan yang dihasilkannya.

Kualitas sambungan dapat ditinjau dari kekuatan mekanis sambungan dan juga dari sisi metalurginya, baik itu struktur mikro pada daerah sambungan, keadaan makro pada daerah sambungan, dan sebagainya. Dengan diketahuinya pengaruh dari masing-masing variabel operasi las gesek, maka akan didapat variasi parameter operasi yang menghasilkan kualitas sambungan yang optimum untuk berbagai variasi material yang disambung dalam proses las gesek.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada bagian latar belakang, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

Bagaimana pengaruh perubahan waktu gesek dan tekanan gesek, terhadap kekuatan tarik sambungan antara paduan aluminium dan baja karbon, pada proses las gesek *continuous drive*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah untuk penelitian ini sebagai berikut:

1. Proses las gesek ini hanya dilakukan antara material paduan aluminium dan baja karbon, yang mana kekuatan tarik dan komposisi kimiawi dari material-material ini sesuai hasil pengujian.
2. Kekasaran permukaan kontak benda kerja.
3. Pengujian ini hanya menggunakan 3 variasi tekanan gesek dan juga 4 variasi waktu gesek sebagai variabel bebas.
4. Pengujian hasil las gesek dalam penelitian ini hanya meliputi: pengujian tarik, pengujian kekerasan *vickers* pada spesimen yang mempunyai kekuatan tarik tertinggi dan terendah, foto makro termasuk pengamatan bentuk *flash*, dan foto mikro.

1.4 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah dan batasan masalah maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan hubungan pengaruh antara waktu gesek, terhadap kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk pada proses las gesek *continuous drive*, antara paduan aluminium dan baja karbon.
2. Mendapatkan hubungan pengaruh antara tekanan gesek, terhadap kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk pada proses las gesek *continuous drive*, antara paduan aluminium dan baja karbon.
3. Mendapatkan kombinasi waktu gesek dan tekanan gesek, yang menghasilkan kekuatan tarik terkuat, pada sambungan yang terbentuk pada proses las gesek *continuous drive*, antara paduan aluminium dan baja karbon.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh dari kombinasi variabel-variabel waktu gesek dan tekanan gesek, terhadap kekuatan tarik dari sambungan, pola pembangkitan temperatur, kondisi makro dan mikro struktur yang terjadi, pada pengelasan paduan aluminium dengan baja karbon, pada proses las gesek *continuous drive*.
2. Dapat digunakan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian lebih lanjut mengenai las gesek.
3. Penelitian ini merupakan sarana, dan sebagai motivasi positif untuk mengembangkan diri dalam pengetahuan mengenai ilmu material.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

(Sahin, 2013) meneliti mengenai parameter operasi pada las gesek *continuous drive* untuk mendapatkan parameter optimum, ditinjau pada kekuatan tarik sambungan, pada proses pengelasan baja-aluminium dan aluminium-tembaga. Pada pengujian pengelasan baja-aluminium, diuji kekuatan tarik pada sambungan, distribusi kekerasan, dan mikrografi pada daerah pengaruh panas, dengan variasi tekanan gesek, dan waktu gesek. Parameter-parameter pelaksanaan pengujian ini ditabelkan seperti Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Parameter Pengujian Sahin

Material	Baja <i>Austenitic</i> AISI 304 - Aluminium									
Diameter Benda Kerja (mm)	10									
Tekanan Penempaan (MPa)	60									
Waktu Penempaan (detik)	12									
Putaran (rpm)	1410									
Variasi Tekanan Gesek (MPa)	20	25	30	35	40	45				
Variasi Waktu Gesek (detik)	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini, mengenai penyambungan baja-aluminium adalah:

1. Parameter las gesek yang optimum, tergantung pada material-material yang disambung. Parameter optimum terhadap kekuatan tarik pada penelitian ini, didapat pada tekanan gesek 30 MPa dan lamanya gesek 4 detik.
2. Dengan bertambah lama waktu gesek, kekuatan tarik sambungn bertambah besar sampai pada waktu gesek tertentu, dan kemudian kembali menurun.

(Shubharvardhan, 2012) meneliti mengenai parameter operasi pada las gesek *continuous drive* untuk mendapatkan parameter optimum pada proses pengelasan baja-aluminium. Pada pengujian ini, diuji kekuatan tarik pada sambungan, distribusi kekerasan, uji kelelahan, uji impak, dan mikrografi pada daerah pengaruh panas, dengan variasi tekanan gesek, dan waktu gesek. Tabel 2.2 menunjukkan parameter-parameter pelaksanaan dalam pengujian ini.

Tabel 2.2. Parameter Pengujian Shubharvardhan

Material	Baja <i>Austenitic</i> AISI 304 – Paduan Aluminium 6082		
Diameter Benda Kerja	Baja <i>Austenitic</i> AISI 304 dengan Pemotongan bertingkat: Diameter kontak 14 mm, dan bertambah besar menjadi 18 mm, dengan panjang 100 mm	Paduan Aluminium 6082 dengan Pemotongan bertingkat: Diameter kontak 15 mm, dan bertambah besar menjadi 17 mm, dengan panjang 100 mm	
Tekanan Penempaan (MPa)	210		
Waktu Penempaan (detik)	6		
Putaran (rpm)	1400		
Variasi Tekanan Gesek (MPa)	65	104	156
Variasi Waktu gesek (detik)	3	5	7

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini, mengenai penyambungan baja-aluminium adalah:

1. Dengan bertambah tekanan gesek, kekuatan tarik sambungn bertambah besar sampai pada waktu tekanan gesek tertentu, dan kemudian kembali menurun. Begitu juga dengan waktu gesek terhadap kekuatan tarik sambungan.
2. Pada tekanan gesek 104 MPa dan lama gesek 5 detik, didapat kekuatan tarik sambungan maksimum sebesar 188,4 MPa.
3. Distribusi kekerasan pada sisi baja terjadi peningkatan kekerasan dari arah sambungan, menuju kearah sisi baja. Pada sisi aluminium, variasi kekerasan dari daerah sambungan kearah sisi aluminium tidak tampak variasi yang besar.
4. Pada pengujian kelelahan sambungan, pada saat kekuatan tarik maksimum, maka besar jumlah siklus patah juga maksimum, yakni pada tekanan gesek 104 MPa dan lama gesek 5 detik.
5. Begitu juga pada pengujian impak sambungan, pada saat kekuatan tarik maksimum, maka besar energi yang diserap untuk mematahkan sambungan juga maksimum, yakni pada tekanan gesek 104 MPa dan lama gesek 5 detik.

(Taban, 2010), meneliti mengenai profil temperatur pada daerah pengaruh panas, pada las gesek inersia, untuk proses pengelasan baja-aluminium. Pada pengujian ini, diuji kekuatan tarik pada sambungan, distribusi kekerasan, uji mikrografi pada daerah pengaruh panas, dengan menggunakan dua variasi tekanan penempaan dan waktu penempaan. Profil

temperatur pada daerah pengaruh panas dilihat pada variasi waktu gesek. Parameter-parameter pelaksanaan pengujian ini seperti Tabel 2.3.

Hasil yang didapat pada penelitian ini, mengenai penyambungan baja-aluminium adalah:

1. Profil temperatur pada bidang kontak antara sisi aluminium dan sisi baja, menunjukkan profil yang hampir sama. Temperatur maksimum dicapai pada waktu gesek yang kurang dari 5 detik. Temperatur maksimum pada sisi baja mencapai 383°C , dan pada sisi aluminium mencapai 418°C .
2. Dari kedua variasi tekanan penempaan dan waktu penempaan yang digunakan, maka didapat bahwa pada saat tekanan penempaan 60 MPa selama 5 detik, menghasilkan kekuatan tarik sambungan yang lebih besar dari tekanan penempaan 50 MPa selama 2 detik.
3. Terdapat fase campuran yang bersifat getas, pada sambungan dengan ketebalan 350 nm yang berbentuk FeAl dan Fe_2Al_5 .

Tabel 2.3. Parameter Pengujian Taban

Material	Baja AISI 1018 – Paduan Aluminium 6061-T6	
Diameter Benda Kerja (mm)	12,5	
Putaran (rpm)	4200	
Tekanan Gesek (MPa)	23	
Variasi Waktu Gesek (detik) untuk Profil Temperatur	1 sampai 32	
Waktu Gesek (detik) untuk pengujian mekanis	1	
Variasi Tekanan Penempaan (MPa)	50	60
Variasi Waktu Penempaan (detik)	2	5

(Alves, 2010), menguji pengikatan pada sambungan yang terjadi pada permukaan kontak antara aluminium-baja yang disambung dengan las gesek *continuous drive*. Setelah mendapat parameter yang optimum, yang ditinjau dari kekuatan tarik sambungan pada proses las gesek *continuous drive*, maka dilakukan analisa ikatan pada sambungan di permukaan kontak. Analisa ikatan sambungan di permukaan kontak menggunakan mikroskop optik, mikroskop elektron, dan pengujian kekerasan *vickers*. Parameter-parameter pelaksanaan pengujian ini, ditampilkan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4. Parameter Pengujian Alves

Material	Baja AISI 304 – Paduan Aluminium 1050			
Diameter Benda Kerja (mm)	14,8			
Putaran (rpm)	3200			
Tekanan Gesek (MPa)	2,1			
Waktu Gesek (detik) untuk pengujian mekanis	7	17	32	
Tekanan Penempaan (MPa)	0,7	1,4	2,1	2,8
Variasi Waktu Penempaan (detik)	1		2	

Kesimpulan yang didapat pada penelitian ini, mengenai penyambungan baja-aluminium adalah:

1. Kekuatan tarik sambungan maksimum didapat sebesar 80,08 MPa dengan menggunakan variasi parameter-parameter pengujian seperti pada Tabel 2.4 dengan angka-angka merah.
2. Nilai kekerasan *vickers* pada daerah sambungan di bidang kontak lebih tinggi dari pada nilai kekerasan di logam induk, baik sisi baja maupun pada sisi aluminium. Nilai kekerasan *vickers* berangsur-angsur menurun dari nilai kekerasan pada daerah sambungan di bidang kontak, kearah kedua sisi, baik baja maupun aluminium, sampai mencapai kekerasan reverensi pada kedua logam induk. Perbedaan kekerasan pada sisi aluminium, menunjukkan variasi nilai yang lebih kecil dibandingkan pada sisi baja.

2.2 Aluminium Paduan

Aluminium yang dipadukan dengan material-material lainnya menjadi suatu aluminium paduan. Tujuan dari penambahan berbagai material lain pada paduan aluminium ini, agar mendapatkan material paduan aluminium dengan sifat-sifat mekanis, dan metalurgi tertentu.

Aluminium paduan dibagi menjadi dua kategori besar yaitu paduan aluminium tuang (*cast*) dan paduan aluminium tempa (*wrought*). Pembagian ini didasari mekanisme yang digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat dari suatu paduan aluminium. Kebanyakan paduan aluminium tempa, cocok untuk dilakukan pengerjaan dingin, yang dipadukan dengan proses *annealing* untuk mendapat sifat-sifat mekanis yang tertentu (ASM, 1992, p. 22).

Aluminium paduan AA6061 adalah aluminium paduan seri 6 yang pada umumnya adalah paduan aluminium tempa. Unsur paduan utama dari AA6061 adalah magnesium dan silikon dalam bentuk senyawa *magnesium silicide* (Mg_2Si). Paduan aluminium ini mempunyai kemampuan tahan terhadap korosi dan juga mempunyai kekuatan luluh yang

sebanding dengan kekuatan luluh baja karbon sedang, dan cukup luas penggunaannya pada konstruksi bangunan dan struktur permesinan (Wessel, 2004, p. 327).

2.3 Baja

Baja dapat diklasifikasikan dengan menggunakan berbagai cara/ metode. Ditinjau dari cara membuat (*method manufacture*), baja dapat diklasifikasikan dalam baja *Bessemer*, baja *open-hearth*, baja *electric-furnace*, baja *curicible*, dll. Ditinjau dari penggunaannya, baja dapat diklasifikasikan dalam *machine steel*, *spring steel*, *boiler steel*, *structural steel* atau *tool steel*. Baja juga dapat diklasifikasikan menurut komposisi kimia dari unsur-unsur paduan penting pada baja seperti sulfur, nikel, magnesium, *molybdenum*, kromium, dll. Pengklasifikasian baja juga dapat dilakukan dengan menggunakan besar persentase kandungan karbon pada baja, terhadap berat keseluruhannya (Avner, 1974, p. 244).

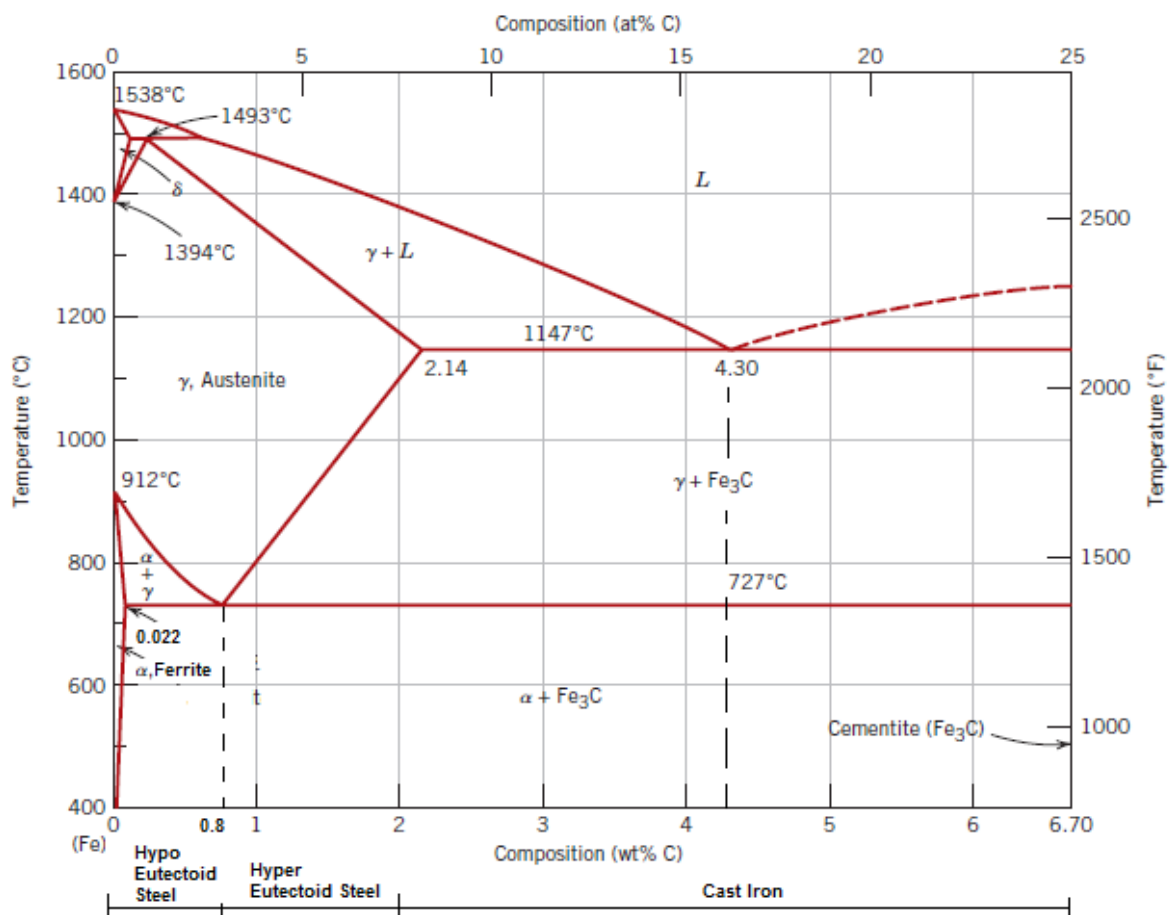
Sifat dan struktur mikro baja, dipengaruhi komposisi kimiawai terutama komposisi karbon, dan juga berbagai perlakuan yang diterima seperti perlakuan panas. Dilihat dari kadar karbon, baja dapat diklasifikasikan menjadi baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi (Avner, 1974, p. 248), (Wayman, 2003, p. 63), (Callister, 2007, p. 360). Berdasarkan komposisi kimiawi, baja adalah paduan berbahan dasar besi (Fe) dengan karbon yang berkadar kecil, umumnya dibawah 1% dari berat keseluruhan, dan ditambah berbagai paduan lainnya (Callister, 2007, p. 360).

Baja karbon rendah mengandung kadar karbon sampai 0,25% dari total berat keseluruhan. Penguatan pada baja karbon rendah, lebih sering dilakukan dengan mekanisme pengerjaan dingin, dibanding dengan perlakuan panas, dikarenakan adanya fasa *martensite* pada proses pemanasannya. Baja karbon rendah mempunyai sifat mekanis yang relatif lunak, mempunyai sifat keuletan dan ketangguhan yang tinggi, dan kemampuan untuk dimesin (*machinable*) dan dilas (*weldable*) yang baik, jika dibandingkan dengan baja karbon yang lain. Pada temperatur ruang, struktur mikro baja karbon rendah adalah *ferrite* dan *pearlite* yang memberi pengaruh pada sifat-sifat mekanisnya itu (Avner, 1974, p. 245).

Baja karbon sedang adalah paduan baja dengan kadar karbon lebih besar dari 0,25% sampai 0,55% dari berat keseluruhan (Avner, 1974, p. 245). Baja karbon sedang (menengah) ini dapat ditingkatkan kekuatan mekanisnya melalui perlakuan panas seperti di-*austenitizing*, di-*quenching*, dan kemudian di-*tempering*. Penambahan unsur *chromium*, *molibdenum*, dan nikel akan meningkatkan kemampuan baja karbon sedang untuk diperlakukan panas. Baja karbon sedang yang diperlakukan panas, akan menjadi lebih kuat dari

baja karbon rendah, tetapi disisi lain, keuletan dan ketangguhannya akan menurun (Callister, 2007, p. 362).

Baja karbon tinggi adalah paduan baja dengan kadar karbon lebih besar dari 0,55% sampai 2%, dari berat keseluruhan (Avner, 1974, p. 245). Baja karbon tinggi merupakan baja yang mempunyai kekuatan mekanis yang paling kuat, paling keras, dibandingkan baja karbon rendah dan sedang. Di sisi keuletan, baja karbon tinggi, adalah yang paling rendah jika dibandingkan dengan baja karbon rendah dan sedang. Baja karbon tinggi yang dipakai pada aplikasi, umumnya telah dikeraskan dan di-*tempering* sehingga sangat tahan terhadap keausan. Penambahan unsur paduan *chromium, tungsten, molybdenum, vanadium*, yang berkombinasi dengan karbon, akan membuat baja karbon tinggi sangat keras, dan sangat tahan terhadap keausan, dan banyak digunakan sebagai pahat (*tool*) dan cetakan (*die*) untuk proses *forming* (Callister, 2007, p. 362).



Gambar 2.1. Diagram Kesetimbangan Fasa Besi-Karbida Besi
Sumber: Avner (1974, p.233)

Berdasarkan struktur mikro dari diagram kesetimbangan besi-karbida besi, maka baja dapat diklasifikasikan menjadi baja *hypo-eutectoid* dan baja *hyper-eutectoid*. Dari 0°C

sampai 727⁰C, baja *hypo-eutectoid* berstruktur *ferrite* dengan bentuk kristal BCC (*body centered cubic*) dengan kadar karbon maksimum mencapai 0,025%. Pada kadar karbon 0,022% sampai 0,8%, umumnya berstruktur campuran *ferrite* dan *cementite* disebut dengan *pearlite*. Pada kadar karbon 0,8% sampai 2%, disebut dengan baja *hyper-eutectoid* yang juga berstruktur *pearlite*. Pada saat kadar karbon bertambah, maka struktur *cementite* yang terbentuk juga semakin banyak. Pada kadar karbon diatas 2% sampai 6,67% bukan merupakan baja lagi, tetapi disebut dengan *cast iron*, dimana struktur *cementite* semakin bertambah dengan bertambahnya kadar karbon (Avner, 1974, p. 234).

Struktur *ferrite* mempunyai kekuatan tarik yang lebih rendah dari *pearlite* tetapi mempunyai *elongation* yang lebih besar, yang menunjukkan bahwa sifat keuletannya lebih besar. Semakin banyak struktur *cementite* menyebabkan baja menjadi kuat dan keras, tetapi keuletannya menurun (Avner, 1974, p. 234).

2.4 Perbandingan Sifat-Sifat Aluminium dan Besi

Aluminium mempunyai sifat-sifat yang berbeda dengan material berbasis besi. Untuk memahami sifat-sifat aluminium dan material berbasis besi ini, maka ditampilkan perbandingan sifat-sifat fisik dan mekanis, secara umum antara aluminium, dan baja, yang didapat dari beberapa sumber (Mathers, 2002), (Wessel, 2004), (ASM, 1992). Beberapa perbandingan karakteristik, diuraikan sebagai berikut:

1. Adanya perbedaan temperatur leleh, yang besar antara aluminium dan aluminium oksida, disisi lain, besi dan besi oksida tidak memiliki perbedaan yang besar pada temperatur lelehnya. Aluminium oksida leleh pada temperature 2060⁰C, atau dapat dikatakan lebih tinggi 1400⁰C dari titik leleh aluminium. Oksida besi memiliki temperatur leleh yang mendekati atau juga dibawah temperatur leleh besi itu sendiri.
2. Aluminium sangat cepat bereaksi dengan oksigen membentuk suatu lapisan tipis aluminium oksida yang kuat, dan dapat bertahan lama, yang kemudian akan mencegah reaksi oksidasi lanjutan pada aluminium. Inilah yang membuat aluminium tahan terhadap korosi. Pada material berbasis besi, tidak didapat kecenderungan ini.
3. Kofesien pemuaiian akibat panas dari aluminium, secara umum dapat lebih besar 2 kali, jika dibandingkan koefisien pemuaiian akibat panas dari baja. Pada proses pengelasan yang mana melibatkan panas, maka kemungkinan melengkung (*buckling*) dan terjadinya distorsi pada aluminium lebih besar dari baja.
4. Kemampuan memindahkan panas dari aluminium secara umum lebih besar 6 kali dari kemampuan memindahkan panas pada baja. Pada proses pengelasan fusi dan metode

pengelasan lain yang melibatkan panas, karakteristik ini akan menyulitkan proses karena dapat terjadi kekurangan panas pada beberapa bagian yang disebabkan panas berpindah terlalu cepat pada aluminium.

5. Kemampuan menghantar listrik pada aluminium, secara umum dapat lebih besar 6 kali jika dibandingkan kemampuan penghantar listrik pada baja.
6. Nilai panas spesifik aluminium secara umum, lebih besar 2 kali dari baja.
7. Aluminium tidak menampilkan perubahan warna yang mencolok pada saat temperaturnya naik. Pada baja, perubahan temperatur menyebabkan adanya perubahan warna yang dapat dilihat/ diamati. Pada besi, sifat ini memudahkan pengamatan pada proses-proses yang melibatkan panas seperti pada proses pengelasan.
8. Aluminium bukan logam yang bersifat magnetik. Baja, dan material berbasis besi bersifat magnetik.
9. Secara umum, aluminium lebih kaku jika dibandingkan baja. Modulus elastisitas aluminium dapat lebih besar tiga kali, dari modulus elastisitas baja.
10. Struktur kristal aluminium adalah FCC (*face centre cubic*) dan tidak *allotropy*. Besi bersifat *allotropy*. Aluminium tidak menunjukkan perubahan struktur kristal pada pemanasan dan pendinginan, sehingga pemanasan dan kemudian menerapkan laju pendinginan yang berbeda-beda tidak menunjukkan pengaruh pada aluminium. Pada besi, terjadi transformasi kristal atau fase pada proses pemanasan dan pendinginan dengan laju pendinginan tertentu.
11. Aluminium tidak menjadi getas pada saat temperatur rendah (dibawah $0^{\circ}C$). Besi menjadi getas pada saat temperatur rendah (dibawah $0^{\circ}C$). Inilah yang menyebabkan aluminium dapat digunakan pada temperatur *cryogenic*, dan dianggap sebagai material *cryogenic*. Besi bukan material *cryogenic*.
12. Massa jenis aluminium secara umum, adalah $\frac{1}{3}$ dari massa jenis baja.
13. Perbandingan kekuatan terhadap berat, dari aluminium, lebih besar dari perbandingan kekuatan terhadap berat, dari baja. Kekuatan tarik aluminium paduan dapat mencapai 700 MPa dan dapat menyamai kekuatan tarik baja karbon sedang. Disisi lain, massa jenis paduan aluminium lebih kecil dari baja karbon sedang. Kombinasi dari kekuatan dan massa jenis yang kecil ini menyebabkan aluminium merupakan material kompetitif untuk diaplikasikan pada berbagai bidang seperti pada otomotif, pesawat, dll.
14. Perbandingan kemampuan penghantar listrik terhadap masa jenis, dan kemampuan penghantar panas terhadap masa jenis dari aluminium, lebih besar dari perbandingan

yang sama pada besi. Perbedaan nilai dari perbandingan sifat-sifat ini, memberikan pertimbangan pemilihan aluminium pada penggunaan yang berhubungan dengan perpindahan listrik atau juga perpindahan panas, apabila faktor berat turut menjadi pertimbangan desain, jika dibandingkan dengan material berbasis besi.

2.5 Pengelasan

Pengelasan dapat diartikan dengan berbagai cara. Pada intinya, pengelasan dapat diartikan sebagai penggabungan dua komponen melalui penyatuan dua permukaan komponen, yang saling kontak satu sama lainnya. Penyatuan dua permukaan komponen yang saling kontak satu sama lainnya ini dapat dilakukan dalam dua cara, yaitu dengan mencairkan kedua permukaan, dan dengan menekan kedua permukaan, baik dengan melibatkan panas maupun tidak. Cara pertama disebut dengan pengelasan fusi (*fusion welding*) dan cara kedua disebut dengan pengelasan yang masih pada fasa padat (*solid phase welding*) (Mathers, 2002, p. 6).

2.6 Tipe Las gesek

Metode las gesek diklasifikasikan oleh *American Welding Society*, sebagai metode pengelasan yang *solid-state* (Shubharvardhan, 2012, p. 201). Proses penyambungan pada las gesek terjadi pada temperatur dibawah temperatur leleh logam induk, dimana panas yang dibangkitkan pada proses ini, diakibatkan adanya tekanan antara permukaan benda kerja, dan gerakan relatif antara kedua permukaan kontak (Shubharvardhan, 2012, p. 201), (Yilbas, 1995, p. 431).

Tipe-tipe las gesek dapat diklasifikasikan menurut bagaimana energi diteruskan dalam proses las gesek dan menurut gerakan relatif antara benda kerja. Menurut bagaimana energi diteruskan dalam proses las gesek, maka las gesek dibedakan menjadi (Mayer, 2003, p. 3):

1. Las gesek *continuous drive*. Pada tipe ini, energi kinetik dipasok dari motor melalui peralatan transmisi, langsung pada sistem pemegang benda kerja tanpa melalui komponen penyimpanan energi.
2. Las gesek inersia. Energi kinetik dipasok melalui penyimpanan energi kinetik seperti roda gila atau penyimpanan energi kinetik dengan menggunakan sistem fluida.

Berdasarkan gerakan relatif antara benda kerja, maka las gesek dibedakan menjadi (Mayer, 2003, p. 4):

1. Las gesek dengan gerakan berputar. Satu permukaan gesek bergerak berputar relatif terhadap permukaan yang lainnya untuk menimbulkan gesekan.

2. Las gesek linier. Salah satu benda kerja bergerak dengan gerakan linier yang berosilasi relatif terhadap benda kerja kedua.
3. Las gesek *angular*. Salah satu benda kerja bergerak dengan gerakan *angular* yang berosilasi relatif terhadap benda kerja kedua.
4. Las gesek *orbital*. Salah satu benda kerja bergerak dengan gerakan *orbital* relatif pada benda kerja kedua, yakni gerakan berputar membentuk lingkaran-lingkaran yang kecil, sambil berputar juga pada sumbunya.

2.7 Prinsip Las gesek *Continuous Drive*

Prinsip dari proses las gesek *continuous drive* ini juga merupakan prinsip dasar dari semua tipe las gesek. Proses las gesek terjadi masih pada fasa padat, dimana panas yang dibutuhkan pada proses ini dibangkitkan oleh gesekan, akibat dari adanya gerakan relatif antara kedua permukaan, yang akan dilas. Pada proses ini, terjadi konversi dari energi mekanik ke energi termal tanpa melibatkan sumber energi termal dari luar. Pada keadaan yang normal, tidak akan terjadi peleburan logam pada kedua permukaan yang akan disambung ini (ASM, 1993, p. 504).

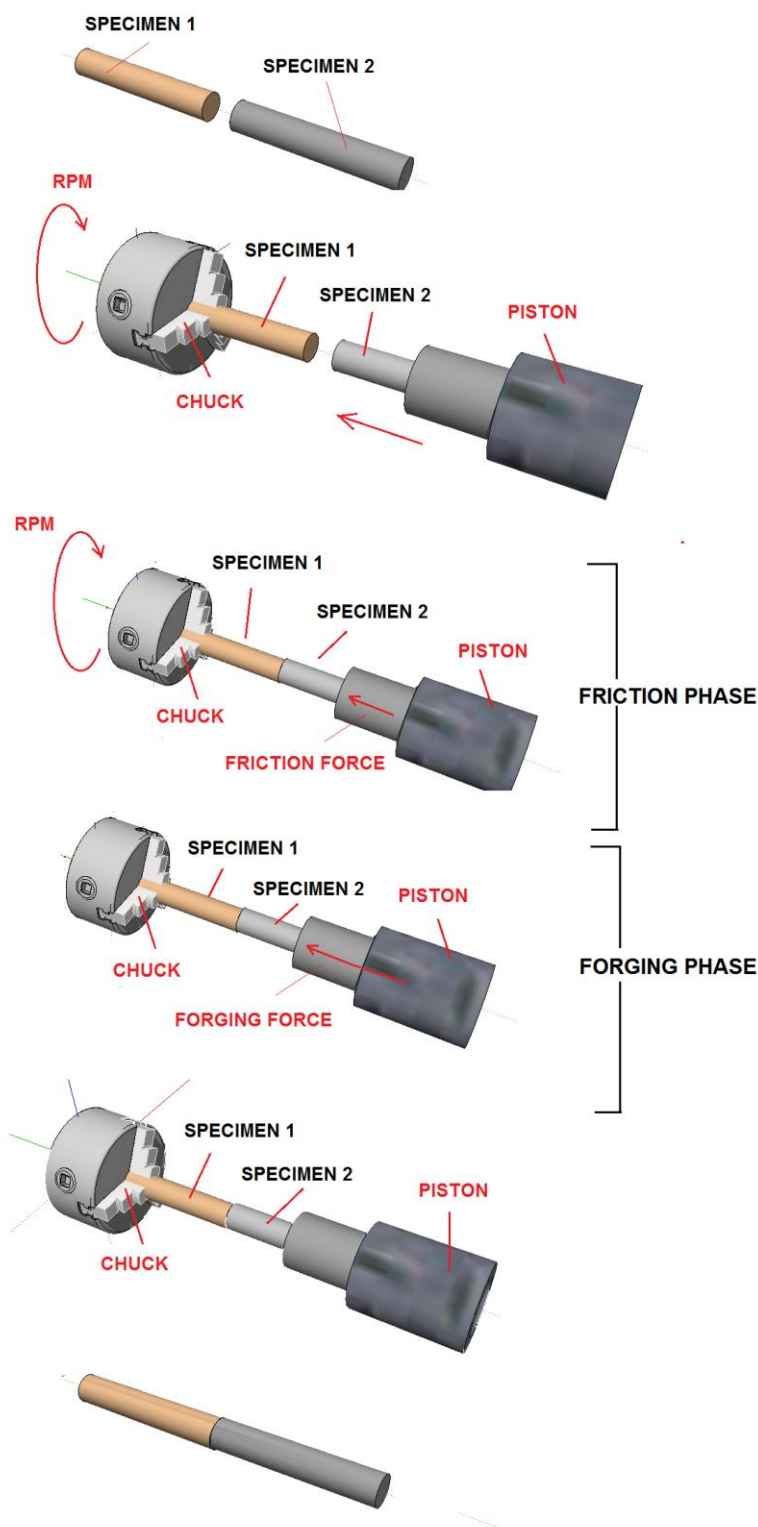
Benda kerja yang tidak berputar, didekatkan ke arah benda kerja yang berputar, sampai terjadi kontak antara kedua permukaan. Akibat adanya tekanan aksial dan adanya gerakan relatif antara kedua permukaan yang menimbulkan gesekan, maka panas akan dibangkitkan pada permukaan itu, sampai mencapai temperatur pengelasan. Temperatur permukaan dikontrol oleh parameter-parameter gerakan relatif antara permukaan kedua benda kerja (permukaan kontak), tekanan aksial yang diterapkan pada permukaan gesek, dan lama penerapannya (ASM., 1993, p. 504).

Setelah kedua permukaan mencapai temperatur pengelasan, gerakan relatif di permukaan kontak dihentikan, tekanan aksial dengan besar tertentu akan diterapkan dan menyebabkan terjadinya kontak yang mendalam diantara kedua permukaan. Pada tahap ini, terjadi proses difusi antara atom-atom kedua material, pada permukaan kontakannya, sehingga terjadi pengikatan antara kedua benda kerja itu (ASM, 1993, p. 506).

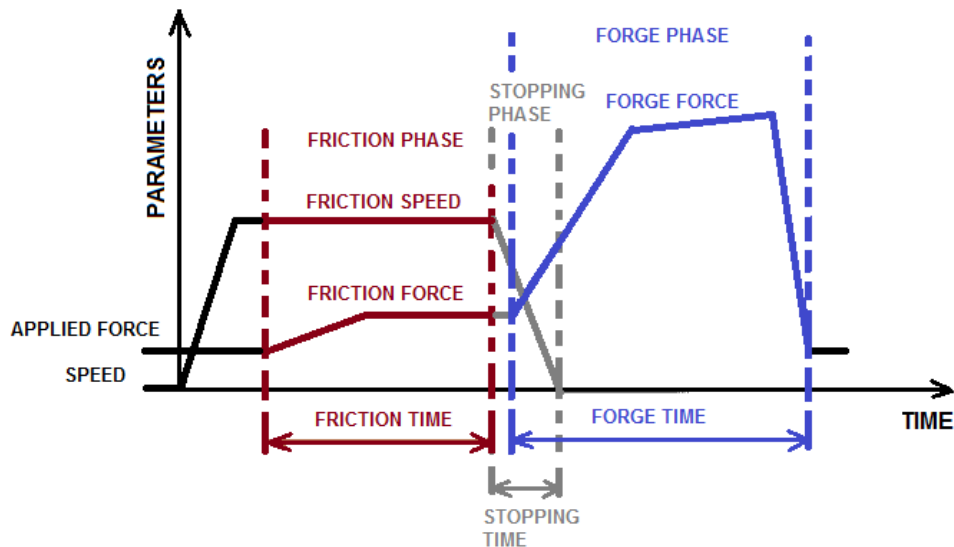
Pada proses las gesek terjadi beberapa proses yaitu, terjadi pembangkitan temperatur melalui mekanisme gesekan, disisi lain terjadi proses kehilangan panas (*heat dissipation*), terjadinya deformasi plastis, dan terjadinya proses difusi antara atom-atom kedua material (ASM, 1993, p. 504).

Tahapan pelaksanaan proses las gesek, dapat dibagi dalam tahap sebelum penggesekan, tahap penggesekan, tahap penempaan, dan terjadinya penyambungan (Shubharvardha, 2012,

p. 200). Tahapan las gesek *continuous drive* yang digambarkan sesuai tahapan proses seperti pada Gambar 2.2. .Karakteristik parameter pada proses las gesek seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2. Tahapan Proses Las gesek *Continuous Drive*
Sumber: Alves (2010, p.302)



Gambar 2.3. Karakteristik Variabel Las gesek
Sumber: Yilbas (1995, p.433)

2.8 Fase Proses Las gesek *Continuous Drive*

Fase-Fase pada proses las gesek *continuous drive*, menjelaskan mekanisme yang terjadi pada rangkaian proses las gesek *continuous drive*. Berikut ini adalah penguraian fase-fase las gesek *continuous drive* berdasar pada uraian pada (ASM, 1993), dan (Mayer, 2003).

2.8.1 Fase Penggosokan (*Rubbing Phase*)

Fase penggosokan juga disebut dengan fase penggesekan pertama (*first friction phase*). Fase ini dimulai pada saat panas mulai dibangkitkan melalui gesekan antar permukaan benda kerja. Pada awal fase ini, tidak semua permukaan kontak saling bergesekan. Hal ini disebabkan permukaan kontak yang masih kasar. Deformasi plastis terjadi dalam fase ini yang berakibat pada penghalusan permukaan gesek, dan meluasnya bidang kontak gesek.

Torsi akibat gaya gesek yang terjadi, akan naik dengan cepat pada awal proses dan mencapai puncaknya. Fase ini berakhir beberapa saat setelah torsi penggesekan mencapai puncaknya. Kenaikan torsi yang tajam pada awal proses dan kemudian menurun, berhubungan dengan keadaan saling menguncinya (*interlocking*) pada permukaan gesek akibat kekasaran permukaan, dan adanya proses *thermal softening* pada permukaan gesek.

2.8.2 Fase penggesekan (*Friction Phase*)

Fase penggesekan juga disebut dengan fase pemanasan (*heating phase*) Pada fase ini, terjadi peningkatan temperatur, dan deformasi plastis meningkat. Pada permukaan gesek terluar, material tertekan keluar dari permukaan gesek membentuk *flash*. Pada fase ini torsi gesek cenderung konstan. Terjadinya dua proses yang berjalan bersamaan. Proses penerunan kekuatan dan kekerasan pada benda kerja akibat meningkatnya temperatur (*thermal*

softening), dan adanya deformasi plastis dibawah temperatur leleh (*strain hardening*). Pada saat torsi penggesekan pada fase ini cenderung konstan, maka hal ini menunjukkan pada kondisi yang mana telah terjadinya kesetimbangan antara kedua proses itu.

2.8.3 Fase Pengereman (*Braking Phase*)

Fase pengereman, dimulai pada saat putaran benda kerja mulai dihentikan. Temperatur permukaan gesek mulai menurun. Hambatan geser (*shear resistance*) meningkat, deformasi yang terjadi mulai menurun. Torsi gesek meningkat tajam, mencapai puncak dan kemudian menurun tajam. Torsi gesek yang meningkat tajam dan kemudian menurun sampai bernilai nol dipengaruhi oleh saat dimana gaya penempaan diterapkan.

Pada fase pengereman, terdapat dua model kasus. Pada kasus pertama, gaya penempaan diterapkan pada saat benda kerja mulai mengurangi kecepatannya (benda kerja masih berputar). Ini menyebabkan timbulnya torsi pada saat penerapan gaya penempaan pada permukaan kontak. Besar torsi akan naik dan menurun pada saat benda kerja berhenti. Pada kasus pertama, gaya penempaan dipengaruhi torsi yang timbul sesaat. Pada kasus kedua, gaya penempaan diterapkan pada saat benda kerja telah berhenti berputar sepenuhnya, sehingga gaya penempaan pada fase penempaan, tidak dipengaruhi torsi sesaat itu.

2.8.4 Fase Penempaan (*Forging Phase*)

Fase penempaan juga disebut dengan fase pengikatan (*bonding phase*). Fase penempaan dimulai saat gaya penempaan (*forging force*) diterapkan. Pada fase ini terjadi proses pengikatan (*bonding*) antara kedua benda kerja. Sebernanya, proses pengikatan telah dimulai pada saat fase penggesekan, tetapi pengikatannya tidak homogen. Pengikatan yang lebih homogen antara kedua benda kerja terjadi pada fase ini.

Pada saat temperatur benda kerja mulai berangsur-angsur menurun dan penekanan aksial diterapkan, maka kedua permukaan akan saling kontak dengan mendalam. Atom-atom kedua material akan semakin dekat dan terjadi pengikatan metalurgi melalui mekanisme difusi. Proses-proses lain pada fase ini seperti terjadinya rekristalisasi dan regenerasi kristal pada kedua logam, dan juga *creep*.

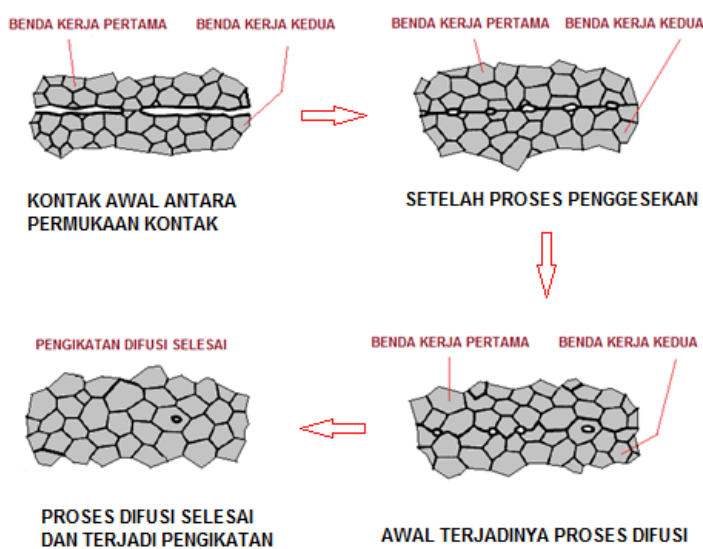
2.9 Mekanisme Pengikatan Pada Las gesek

Mekanisme pengikatan pada las gesek diuraikan sebagai berikut (ASM, 1993), (Mayer, 2003):

1. Pada tahap pertama terjadi pertumbuhan luasan daerah kontak. Permukaan kontak antara kedua logam tidak benar-benar bersih dan rata. Pada bidang kontak, akibat adanya kekasaran permukaan dan tidak bersihnya permukaan, maka hanya sebagian saja

dari bidang kontak ini, yang benar-benar saling kontak. Pada permukaan kontak akan tampak sebagai beronga-ronga pada bidang batas, antar permukaan kontak. Ini disebabkan karena adanya kekasaran permukaan pada kedua bidang kontak. Gaya aksial penggesekan, dan putaran relatif antara permukaan kontak kedua benda kerja, yang diterapkan dalam durasi waktu tertentu, menyebabkan deformasi plastis terjadi pada permukaan kontak. Deformasi plastis ini yang menyebabkan luas bidang kontak meningkat. Deformasi plastik disini melalui dua mekanisme, deformasi plastis akibat *strain hardening*, dan disisi lain, terjadi pelunakan oleh *termal softening*, akibat adanya pembangkitan energi termal pada bidang kontak.

2. Terjadi perpindahan atom-atom di dalam masing-masing logam induk dan perpindahan atom-atom melewati/ menembusi permukaan kontak, melalui mekanisme difusi. Atom-atom yang berpindah melalui mekanisme difusi, dimana atom-atom ini berpindah diantar butiran-butiran, melewati batas butir di permukaan kontak. Proses difusi ini terjadi melalui adanya temperatur tertentu akibat dari meningkatnya energi termal dan durasi waktu penerapan temperatur ini, yang masih memungkinkan proses difusi ini terjadi. Batas butir pada permukaan kontak, juga berpindah melewati permukaan kontak sampai terjadi suatu konfigurasi baru yang seimbang (*equilibrium*). Batas antara kedua logam berubah oleh karena penetrasi secara atomik dari material pertama ke material kedua dan sebaliknya. Proses ini memerlukan waktu tertentu, untuk dapat mencapai suatu kekuatan sambungan yang baik. Gambar 2.4 menunjukkan mekanisme pengikatan pada las gesek.

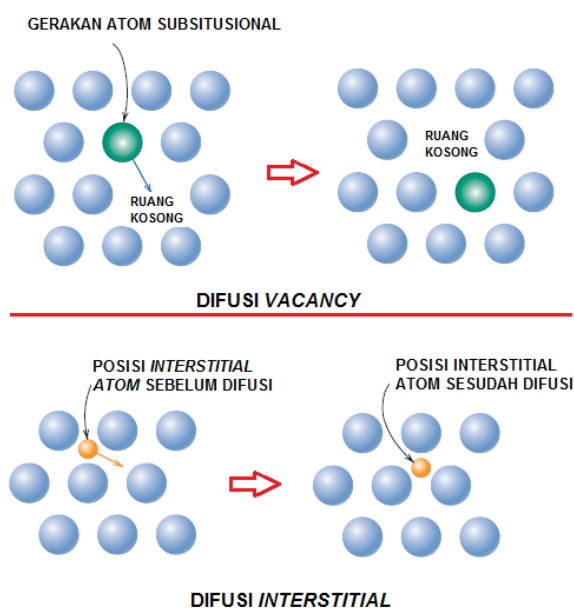


Gambar 2.4. Tahapan-Tahapan Proses Pengikatan Las gesek
Sumber: ASM (1993, p.520)

2.10 Proses Difusi

Difusi adalah suatu proses perpindahan massa melalui perpindahan atom-atom yang masih dalam fase *solid*, dikarenakan adanya tingkatan temperatur tertentu dan lama durasi waktu dalam penerapan temperatur itu. Pada las gesek, difusi dipandang sebagai penggambungan atau perpaduan secara atomik diantara dua permukaan melalui fenomena perpindahan atom-atom, sehingga memungkinkan terjadinya ikatan antara dua permukaan itu. Kedua permukaan itu harus berada dalam jarak yang memungkinkan terjadinya perpindahan atom-atom (ASM, 1993, p. 521).

Pada las gesek antara material logam dengan logam, perpindahan atom-atom terjadi melalui mekanisme difusi yang menyebabkan terjadinya ikatan antara dua permukaan (ASM, 1993, p. 521). Ada dua model perpindahan atom-atom pada proses difusi pada logam, yaitu difusi *vacancy* (*vacancy diffusion*) dan difusi *interstitial* (*interstitial diffusion*) (Callister, 2007, p. 112).



Gambar 2.5. Perpindahan Atom pada Difusi
 Sumber: Callister (2007, p.112)

Pada difusi *vacancy*, terjadi pertukaran tempat yang dilakukan antara atom pada *lattice* dengan posisi yang kosong pada *lattice* yang berdekatan. Akibat posisi yang kosong tadi terisi oleh atom yang berdekatan maka terjadi perpindahan antara atom, dan perpindahan posisi *lattice* yang kosong. Posisi *lattice* yang kosong yang telah bertukar tempat itu kemudian diisi lagi oleh atom lain yang berdekatan. Syarat utama proses difusi ini terjadi

yaitu apabila ada kekosongan atom-atom pada *lattice*. Semakin banyak posisi kosong atom-atom pada *lattice*, maka model difusi ini semakin mudah terjadi. Pada logam, jumlah posisi atom-atom yang kosong pada *lattice* akan meningkat dengan meningkatnya temperatur (Callister, 2007, p. 112).

Pada difusi *interstitial* terjadi perpindahan atom-atom ke celah-celah kosong diantara atom-atom yang berdekatan. Ini terjadi antara dua material dengan ukuran atom yang tidak sama, dimana yang satu besar dan yang lainnya lebih kecil sehingga atom yang kecil ini bisa menyisip masuk pada celah atom-atom yang lebih besar. Mekanisme difusi ini terdapat pada proses difusi dari pengotor (*impurity*) pada logam, seperti difusi hidrogen, karbon, nitrogen dan oksigen pada logam (Callister, 2007, p. 112).

Ada dua tipe difusi atomik, difusi *steady-state*, dan difusi bukan *steady-state*. Pada difusi *steady-state*, laju jumlah atom yang terdifusi terjadi dalam laju yang konstan selama waktu proses difusi. Pada difusi bukan *steady-state*, laju jumlah atom yang terdifusi terjadi tidak dalam laju yang konstan selama waktu proses difusi (Callister, 2007, p. 112). Faktor temperatur, sangat mempengaruhi laju difusi atomik. Kenaikan temperatur akan meningkatkan energi aktivasi (*activation energy*) yang menyebabkan jumlah massa atom yang terdifusi semakin besar (Callister, 2007, p. 119).

2.11 Energi Termal yang Dibangkitkan pada Proses Penggesekan

Energi termal dibangkitkan selama fase penggesekan pada proses las gesek. Energi mekanis sebagai energi *input* akan dikonversikan melalui gesekan, untuk menjadi energi termal pada permukaan kontak. Hubungan antara tekan aksial penggesekan, kecepatan putar, jari-jari permukaan kontak, dan besar pembangkitan energi termal pada permukaan kontak, diuraikan pada uraian berikut ini.

Energi mekanis, yang merupakan energi *input* pada las gesek, adalah besar gaya yang bekerja pada sesuatu benda dikali, jarak perpindahan benda itu, akibat dari penerapan gaya tadi. Laju perubahan energi atau daya dapat dikatakan sebagai besarnya kerja, dibagi lamanya proses. Pada proses las gesek *continuous drive*, besar energi termal yang dibangkitkan akibat dari energi *input* mekanis dalam bentuk diferensial adalah

$$dQ = x dF_g$$

x adalah perpindahan linier akibat dari penerapan gaya sebesar F_g .

Laju pembangkitan energi termal ($d\dot{Q}$) pada permukaan kontak (dA) adalah besar energi termal yang dibangkitkan (dQ), dibagi lamanya proses penggesekan (t_f).

$$d\dot{Q} = \frac{dQ}{t_f} = \frac{x}{t_f} dF_g$$

$$d\dot{Q} = v \cdot dF_g$$

v adalah kecepatan linier, dimana hubungannya dengan kecepatan angular

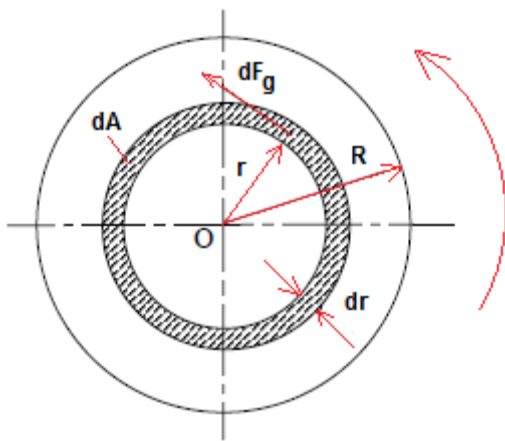
$$v = \omega \cdot r$$

Sehingga

$$d\dot{Q} = \omega \cdot r \cdot dF_g \quad (2.1)$$

Dimana ω adalah kecepatan angular dan dF_g adalah gaya gesek yang timbul pada permukaan kontak dengan luas dA . Besar dF_g adalah besar gaya normal yang bekerja tegak lurus pada luasan dA , dikali koefisien gesek permukaan kontak.

$$dF_g = \mu \cdot dN$$



Gambar 2.6. Permukaan Kontak dengan Gaya gesek pada Luasan dA
Sumber: Can (2010, p.139)

Besar gaya normal (dN) sama dengan besar gaya aksial penekanan pada las gesek (f_f) sehingga

$$dF_g = \mu \cdot df_f$$

Besar tekanan penggesekan (P_f) pada luasan dA adalah

$$P_f = \frac{df_f}{dA} \rightarrow df_f = P_f \cdot dA$$

Disubstitusi untuk mendapatkan

$$dF_g = \mu \cdot P_f \cdot dA \quad (2.2)$$

P_f adalah tekanan gesek pada fase penggesekan las gesek, akibat dari penerapan gaya aksial (f_f) pada fase penggesekan.

Substitusi Persamaan (2.2) ke Persamaan (2.1) didapat

$$d\dot{Q} = \omega \cdot r \cdot \mu \cdot P_f \cdot dA \quad (2.3)$$

Luas permukaan kontak (dA) adalah

$$dA = \pi((r + dr)^2 - r^2)$$

$$dA = 2\pi r dr$$

Besar dA seperti diatas, disubsitusikan ke Pers (2.3) didapat

$$d\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P_f \cdot r^2 dr$$

Diintegalkan dari 0 sampai ke R untuk keseluruhan permukaan kontak

$$\int_0^R d\dot{Q} = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P_f \cdot r^2 dr$$

Sehingga didapat

$$\dot{Q} = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P_f \cdot R^3 \quad (2.4)$$

Dengan:

\dot{Q} = laju energi termal yang dibangkitkan (W)

ω = kecepatan sudut ($\frac{\text{putaran}}{\text{detik}}$)

R = jari – jari permukaan kontak (m)

μ = kofisien gesek antara permukaan kontak

P_f = tekanan aksial ($\frac{N}{m^2}$)

Karena laju dari energi termal (\dot{Q}) yang dibangkitkan pada proses penggesekan dapat ditulis sebagai :

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t_f} \rightarrow Q = \dot{Q} \cdot t_f$$

Pers (2.4) disubsitisi pada persamaan $Q = \dot{Q} \cdot t_f$ sehingga didapat, energi termal yang dibangkitkan (Q) selama proses penggesekan adalah

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P_f \cdot t_f R^3 \quad (2.5)$$

Dengan:

Q = energi termal yang dibangkitkan ($joule$)

ω = kecepatan sudut ($\frac{\text{putaran}}{\text{detik}}$)

R = jari – jari permukaan kontak (m)

μ = koefisien gesek antara permukaan kontak

P_f = tekanan aksial $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

t_f = waktu gesek (detik)

Karena

$$1 \text{ joule} \approx \frac{1}{4,86} \text{ kalori}$$

Maka persamaan (2.5) dalam satuan kalori adalah

$$Q = \frac{1}{7,29} \cdot \pi \cdot \omega \cdot \mu \cdot P_f \cdot t_f R^3 \quad (2.6)$$

Dengan:

Q = energi termal yang dibangkitkan (kalori)

ω = kecepatan sudut $\left(\frac{\text{putaran}}{\text{detik}}\right)$

R = jari – jari permukaan kontak (m)

μ = koefisien gesek antara permukaan kontak

P_f = tekanan aksial $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

t_f = waktu gesek (detik)

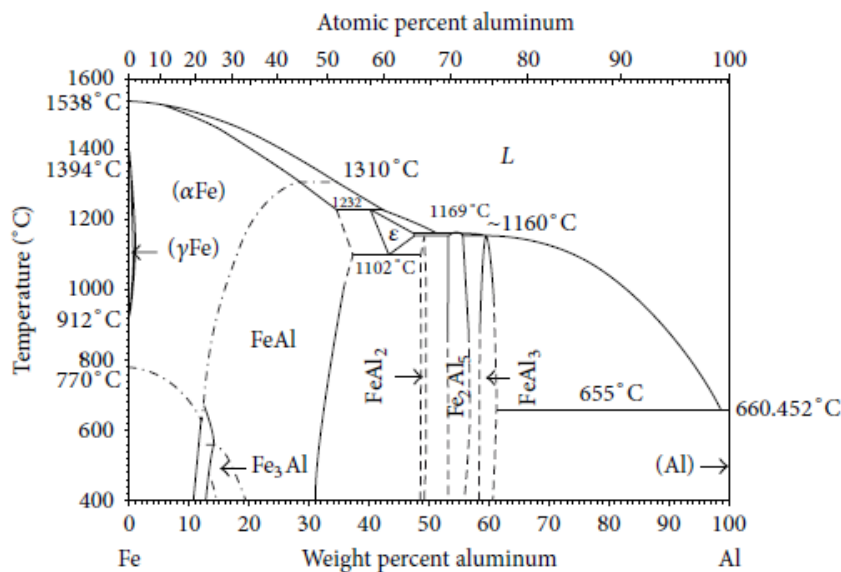
Persamaan (2.4) dan (2.6) didapat dengan asumsi bahwa koefisien gesek konstan dan seragam (*uniform*) pada seluruh bidang kontak, seluruh energi mekanis sebagai energi *input* dikonversikan menjadi energi termal. Asumsi itu sebagai suatu idealisasi. Pada kondisi sebenarnya, koefisien gesek antara permukaan kontak bisa saja tidak seragam dan bernilai tidak konstan selama proses penggesekan. Energi mekanis sebagai energi *input* tidak semata-mata dikonversikan menjadi energi termal saja. Selain dari besar energi termal akibat dari energi mekanis *input*, penyerapan energi panas, perpindahan panas, baik konduksi, konveksi, dan radiasi, turut berpengaruh pada perubahan temperatur di permukaan kontak.

2.12 Persoalan pada Penyambungan Material Tidak Sejenis

Persoalan-persoalan yang timbul pada las gesek antara dua logam yang tidak sejenis, diuraikan sebagai berikut (ASM, 1993, pp. 511-514), (Yilbas, 1995, p. 432):

1. Terbentuknya oksida logam dan adanya pengotor-pengotor pada permukaan kontak yang akan mengurangi kekuatan pengikatan antara permukaan kontak.
2. Terbentuknya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas. Kombinasi dari dua logam yang berbeda pada proses las gesek, dapat menghasilkan suatu paduan pada daerah sambungan yang bersifat getas sehingga dapat menurunkan kualitas hasil pengelasan.

3. Perbedaan sifat fisik. Perbedaan koefisien pemuaian panas yang besar pada kedua logam induk, maka pada saat pendinginan di daerah sambungan akan terjadi tegangan yang besar akibat dari penyusutan yang tidak sama. Perbedaan kekerasan antara kedua logam induk, juga menimbulkan persoalan pada proses las gesek berhubungan dengan kemampuan untuk mengalami deformasi dan juga pelunakan akibat panas yang berbeda pada kedua logam induk. Perbedaan yang terlalu besar pada temperatur leleh, juga menimbulkan berbagai kesulitan pada proses las gesek.



Gambar 2.7. Diagram Kesetimbangan Fasa Fe-Al

Sumber: Ambroziak (2014, p.4)

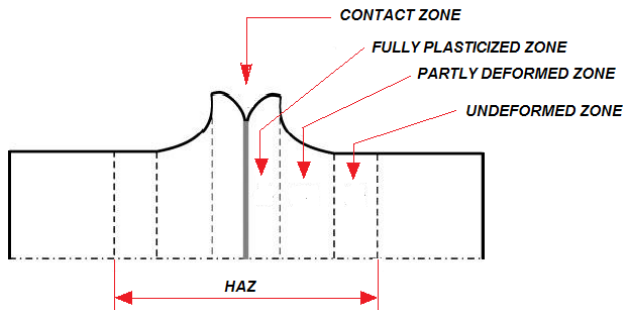
Pada penyambungan aluminium dengan besi pada las gesek, akan timbul persoalan dengan terbentuknya *intermetallic* Fe-Al yang getas yang mana menurunkan kekuatan sambungan. Waktu penerapan panas, dan seberapa tinggi temperatur dari panas itu berpengaruh pada formasi *intermetallic* Fe-Al yang terbentuk. Pada proses las gesek antara aluminium dengan besi yang mana masih dalam fase padat, difusi antara Fe dan Al akan terjadi, pada saat panas yang dibangkitkan dan waktu penerapan panas itu, memadai untuk terjadinya proses difusi. Oleh karena itu, saat menggunakan las gesekan, lapisan *intermetallic* terbentuk, meski proses penggabungan kedua material masih dalam fase padat (Ambroziak, 2014, p. 2). Dari diagram kesetimbangan fasa Fe-Al, dapat dilihat bahwa bentuk *intermetallic* Fe-Al yang terbentuk dapat berupa FeAl, Fe₃Al, FeAl₂, FeAl₃, dan sebagainya, tergantung pada persen atomik Fe dan Al yang terdifusi dan juga temperatur pemanasan yang terjadi.

(Jessop, 1978), menyelidiki las gesek aluminium dengan baja austenitik, menemukan bahwa terdapat lapisan *intermetallic* Fe-Al dengan berbagai ketebalan dari 0,2 μm -1 μm , 2 μm - 3 μm , dan diatas 3 μm , dimana dengan semakin tebal lapisan *intermetallic* ini, kekuatan geser sambungan menurun.

(Yilbas, 1995), menyelidiki las gesek aluminium dengan baja karbon pada variasi putaran, tekanan gesek dan waktu gesek, menemukan bahwa adanya lapisan *intermetallic* Fe-Al pada batas sambungan. Terdapat lapisan *intermetallic* Fe-Al dengan ketebalan 0,1 μm sampai 1 μm di batas sambungan, pada sepesimen dengan kekuatan tarik sambungan yang terkuat. Semakin tebal lapisan *intermetallic*, akan menurunkan kekuatan tarik sambungan.

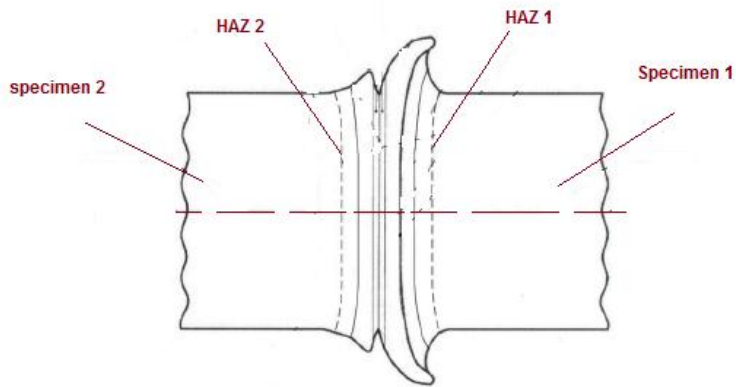
2.13 Daerah Pengaruh Panas (HAZ)

Daerah pengaruh panas pada las gesek dapat didefinisikan sebagai daerah yang mengalami perubahan mikrostruktur, akibat dari perubahan temperatur dan tegangan yang terjadi pada proses las gesek. Pembagian daerah pengaruh panas (HAZ) dari proses las gesek dapat dilihat pada Gambar 2.8. Daerah HAZ dibagi menjadi empat bagian yaitu *contact zone*, *fully plasticized zone*, *partly deformed zone*, dan *undeformed zone* (Rombaut, 2011, p. 8).



Gambar 2.8. Daerah Pengaruh Panas pada Las gesek
Sumber: Rombaut (2011, p.8)

Bentuk *flash* pada permukaan kontak pada penyambungan dua logam tidak sejenis dengan las gesek *continuous drive*, akan menunjukkan ketidak-simetri bentuk. Hal ini disebabkan perbedaan sifat-sifat dari kedua jenis logam, seperti sifat sifat termal, dan kekuatan mekanis yang berbeda. Bentuk *flash* yang tidak simetris menunjukkan daerah pengaruh panas yang juga tidak simetris pada kedua sisi logam benda kerja. Gambar 2.9 menunjukkan bentuk flash dan daerah pengaruh panas yang tidak simetris pada kedua sisi benda kerja yang disambungkan melalui proses las gesek.



Gambar 2.9. Bentuk Flash dan HAZ pada *Dissimilar Friction Welding*
 Sumber: Savic (2008, p.96)

2.14 Evaluasi Hasil Las gesek

Ada berbagai metode untuk mengevaluasi kualitas hasil penyambungan pengelasan, baik dengan cara visual, maupun dengan berbagai pengujian yang merusak benda kerja maupun yang tidak. Beberapa indikator penting dalam menilai kualitas hasil pengelasan adalah sebagai berikut ini (AWS, 1998, p. 350):

1. Bentuk dan keadaan kontur permukaan sambungan pengelasan, dan ukuran pengelasan.
2. Penetrasi yang terjadi diantara dua logam yang disambung.
3. Kekuatan sambungan.
4. Keuletan sambungan.
5. Persoalan-persoalan yang menyangkut *discontinuities* dari sambungan pengelasan.

Berbagai pengujian mekanis dilakukan untuk mengevaluasi kualitas sambungan hasil las. Pengujian-pengujian ini, selain akan memberikan data hasil pengujian, sesuai sifat pengujiannya, juga akan memberikan informasi mengenai perubahan-perubahan yang terjadi secara metalurgi akibat dari proses pengelasan. Berbagai pengujian mekanis ini antara lain sebagai berikut (AWS, 1998, p. 387):

1. Pengujian tarik. Pengujian ini untuk mengetahui kekuatan tarik dan keuletan pada suatu hasil pengelasan.
2. Pengujian geser. Pengujian ini untuk mendapatkan kekuatan geser sambungan lasan.
3. Pengujian tekuk. Pengujian ini untuk mendapatkan keuletan dari sambungan lasan.
4. Pengujian kekerasan. Pengujian untuk mengetahui kekerasan dan distribusi kekerasan pada daerah sambungan lasan.
5. Pengujian-pengujian yang berhubungan dengan ketangguhan terhadap keretakan dan patahan seperti pengujian impak *V-notch*, *drop-wight test*.

Selain pengujian-pengujian mekanis, evaluasi mikrostruktur dapat dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik, *Scening Electron Microscopy* (SEM). Evaluasi makro dapat dilakukan dengan pengamatan visual, atau menggunakan peralatan foto makro.

2.15 Kelebihan dan Kekurangan Las Gesek *Continuous Drive*

Beberapa kelebihan dari metode las gesek *continuous drive* adalah sebagai berikut ini (Mayer, 2003, p. 21):

1. Panas yang dibangkitkan terkonsentrasi pada bidang yang bergesekan dan waktu pembangkitan panas yang relatif singkat, sehingga dapat diminimalisasi meluasnya daerah pengaruh panas.
2. Panas yang dibangkitkan belum mencapai temperatur leleh sehingga proses pengelasan masih dalam kondisi *solid state*.
3. Bisa dilakukan tanpa menggunakan logam lain atau material lain sebagai logam pengisi.
4. Dapat melakukan penyambungan berbagai jenis material yang sejenis maupun tidak sejenis.

Kekurangan atau batasan pada las gesek *continuous drive* adalah sebagai berikut ini (Mayer, 2003, p. 21):

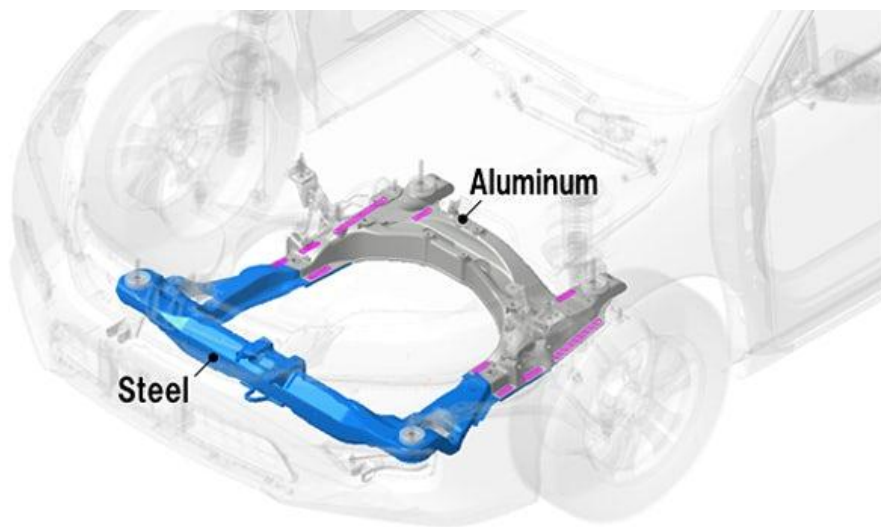
1. Sekurang-kurangnya satu benda kerja harus dapat berputar, dan berputarnya benda kerja ini harus simetri terhadap benda kerja yang lain. Ini akan membatasi tipe bentuk benda kerja yang dapat dilakukan las gesek *continuous drive*. Bentuk benda kerja yang dapat dikerjakan dengan cara las gesek *continuous drive* adalah silender-silender, silender-pipa, silender-plat, pipa-pipa, dan pipa-plat.
2. Tidak dapat menggunakan las gesek *continuous drive* untuk pengelasan yang lurus memanjang, bersudut atau berbelok-belok (*angular*), dan berbentuk kerucut (*conical*) pada *butt joint*.
3. Sekurang-kurangnya salah satu material benda kerja harus dapat mengalami deformasi plastis pada proses las gesek *continuous drive*. Sebagai contoh: alumina dapat dilas gesek dengan aluminium, tetapi alumina tidak dapat dilas gesek dengan alumina.
4. Persiapan benda kerja, terutama permukaan gesek setiap benda kerja, harus seragam, untuk dapat membangkitkan gesek yang seragam dan juga panas yang seragam pada permukaan gesek masing-masing benda kerja.

2.16 Aplikasi Las Gesek

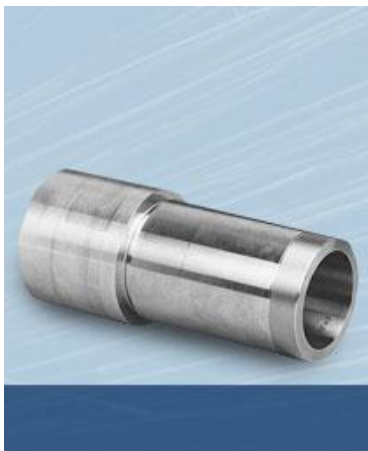
Aplikasi dari las gesek dengan material yang berbeda, meliputi banyak bidang teknologi. Pada bidang penerbangan, pada peralatan-peralatan militer, pada peralatan-

peralatan *bi-metallic*, otomotif, peralatan pertambangan, dan lainnya (MTI, 1999: 12). Aplikasi las gesek untuk menyambung aluminium dan baja, antara lain terdapat rangka (*frame*) mobil, seperti terlihat pada Gambar 2.10. Penyambungan antara aluminium dan baja pada rangka mobil ini, bertujuan untuk mereduksi berat dari rangka.

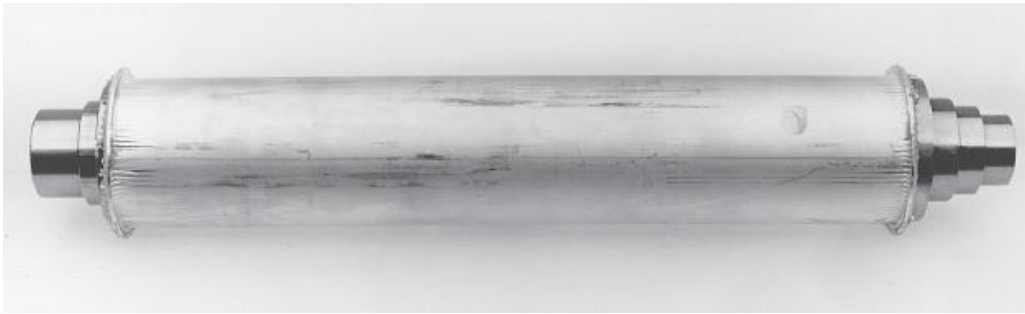
Penyambungan aluminium baja pada komponen *transition joint* yang diterapkan pada peralatan-peralatan *cryogenic* dapat dilihat pada Gambar 2.11. Penyambungan aluminium-baja juga digunakan pada *copier fuser roller* seperti pada Gambar 2.12. Batang pejal aluminium disambungkan dengan pipa baja, dengan menggunakan las gesek, untuk berbagai peralatan perpipaan seperti terlihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.10. Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Aluminium-Baja pada Rangka Mobil
sumber: Gizmag (2018)



Gambar 2.11. Penyambungan Las gesek antara Aluminium-Baja pada *Transition Joint* untuk Peralatan *Cryogenic*
sumber: Manufacturing Technology (2018)



Gambar 2.12. Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Aluminium-Baja pada *Copier Fuser Roller*
sumber: MTI (1999, p.23)



Gambar 2.13. Penyambungan Menggunakan Las gesek antara Selinder Aluminium Pejal-Pipa Baja untuk Sistem Perpipaan
sumber: Manufacturing Technology (2018)

BAB III

KERANGKA KONSEP PENELITIAN

3.1 Kerangka Pemikiran

Adanya berbagai kesulitan dalam proses penyambungan dua logam tidak sejenis, dengan menggunakan proses pengelasan fusi, yang diakibatkan oleh perbedaan sifat antara kedua logam seperti perbedaan sifat termal, sifat mekanis, dan sifat kimiawi. Proses pengelasan fusi yang melibatkan energi termal antara aluminium dan baja karbon yang mana memiliki perbedaan temperatur leleh, perbedaan koefisien pemuaian, perbedaan kemampuan pemindahan panas, menimbulkan berbagai persoalan pada las fusi. Koefisien perpindahan panas yang tinggi dari aluminium menyebabkan panas yang tinggi pada proses las fusi akan menyebar dan meluaskan daerah pengaruh panas yang menyulitkan proses pengelasan ini. Suatu proses pengelasan yang mana temperatur pengelasannya masih dibawa temperatur leleh kedua logam, seperti las gesek, dapat dipandang sebagai salah satu jalan pemecahan yang dapat meminimalisasi persoalan ini.

Di sisi lain, proses las gesek yang melibatkan banyak variabel-variabel operasi, juga merupakan suatu permasalahan tersendiri, yang mana semua variabel-variabel tadi, berpengaruh secara simultan terhadap kualitas sambungan. Ketepatan nilai variasi dari variabel-variabel proses las gesek antara aluminium dan baja karbon akan meningkatkan kualitas sambungan kedua benda kerja, ketinggian yang lebih optimum.

Untuk mengetahui pengaruh masing-masing variabel proses las gesek, terhadap kualitas sambungan terutama kekuatan tarik sambungan, maka dapat dilakukan dengan memvariasikan nilai-nilai variabel yang ingin diketahui hubungan pengaruhnya terhadap kekuatan tarik hasil sambungan, pada saat variabel yang lainnya dibuat bernilai tetap. Ini akan memberikan informasi, seberapa besar pengaruh, dan bagaimana pola pengaruh dari variabel itu, terhadap kekuatan tarik hasil proses las gesek.

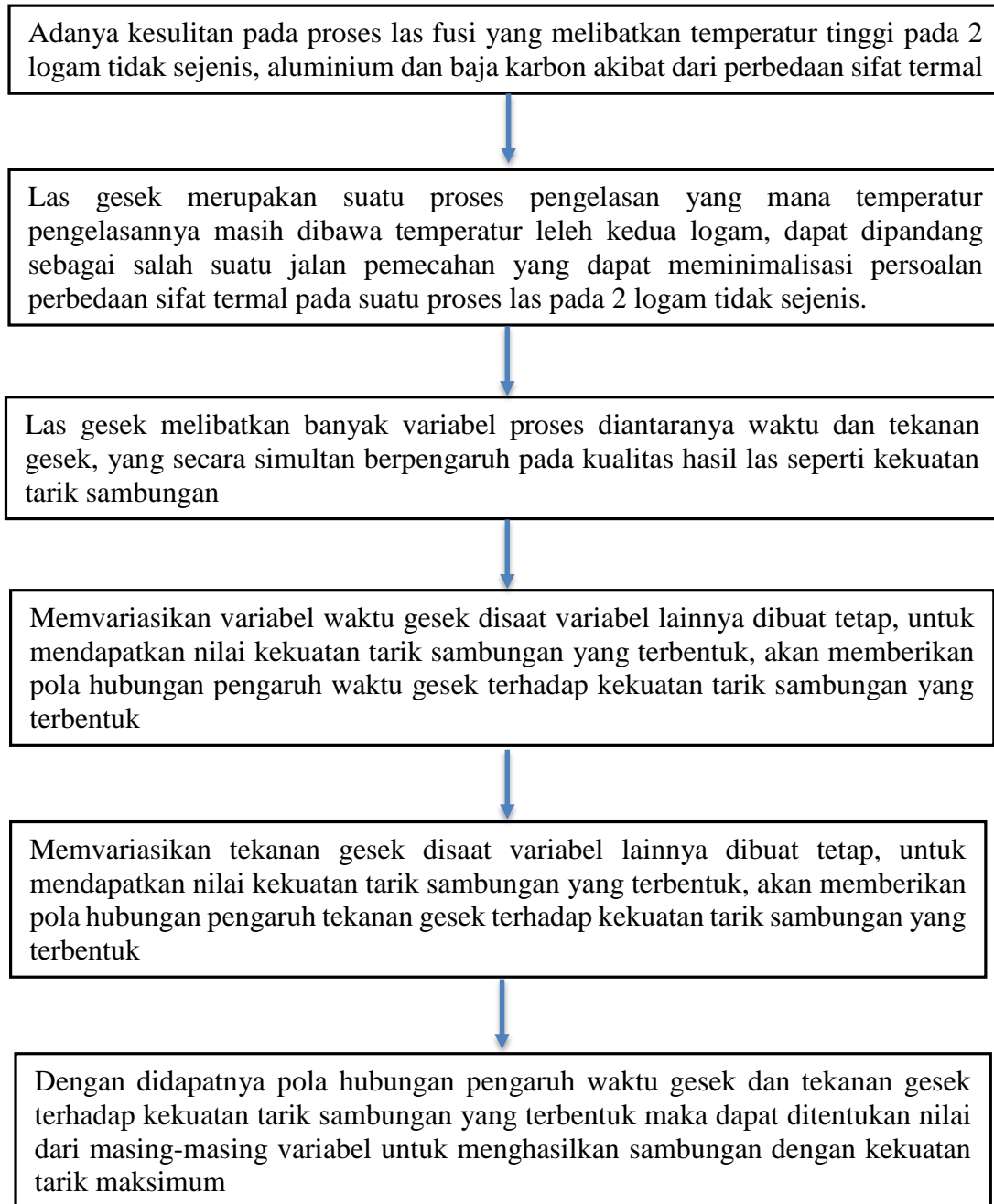
Waktu gesek dan tekanan gesek, secara simultan berpengaruh terhadap besarnya pembangkitan panas pada bidang kontak, yang berakibat naiknya temperatur, proses deformasi plastis yang terjadi, dan pelunakan termal, yang mempengaruhi kesiapan kedua permukaan benda kerja untuk mengalami pengikatan melalui proses difusi atomik. Waktu gesek dan tekanan gesek yang tidak cukup akan menyebabkan panas yang dibangkitkan

tidak cukup, tidak merata pada kedua permukaan kontak, pelunakan permukaan yang tidak cukup, deformasi plastis tidak mencukupi pada permukaan kontak, pembersihan permukaan gesek dari lapisan-lapisan oksida aluminium, oksida besi dan pengotor lainnya yang tidak tuntas.

Waktu gesek dan tekanan gesek yang berlebihan akan membangkitkan panas yang terlalu tinggi dalam waktu yang lama, penyerapan panas oleh material benda kerja yang semakin banyak, dan juga penyebaran panas pada kedua sisi benda kerja yang semakin meluas, yang mana akan menyebabkan perluasan daerah pengaruh panas, perubahan struktur mikro, perubahan kimiawi, perubahan sifat mekanis, pada daerah pengaruh panas. Waktu gesek yang terlalu lama, justru akan menurunkan nilai pembangkitan panas akibat dari menurunnya kekasaran permukaan kontak dan semakin melunaknya permukaan kontak. Berbagai kombinasi nilai kedua variabel-variabel ini yaitu waktu dan tekanan gesek, terbatas juga oleh sifat-sifat material seperti kekuatan mekanis material dalam menerima pembebanan tekan, dan nilai temperatur leleh.

Dengan didapatnya pola pengaruh dari variabel waktu dan tekanan gesek terhadap kekuatan tarik sambungan las gesek maka akan diketahui nilai masing-masing variabel untuk menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang maksimal.

Pada Gambar 3.1 digambarkan alur kerangka pemikiran dalam bentuk diagram.



Gambar 3.1. Diagram Kerangka Pemikiran

3.2 Hipotesis

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan penelitian pada Bab I, uraian pada Bab II, dan kerangka pemikiran, maka dirumuskan hipotesis pada penelitian ini sebagai berikut:

- Dapat diduga bahwa, dengan semakin lamanya waktu gesek yang diterapkan, pada kecepatan putar, tekanan gesek, waktu tempa dan tekanan tempa yang tetap, dalam proses las gesek *continuous drive*, maka akan meningkatkan kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk, sampai mencapai nilai maksimum, dan setelah itu, kekuatan

tarik sambungan akan kembali menurun dengan terus bertambah lamanya waktu gesek. Korelasi waktu gesek dengan kekuatan tarik sambungan, tidak linier.

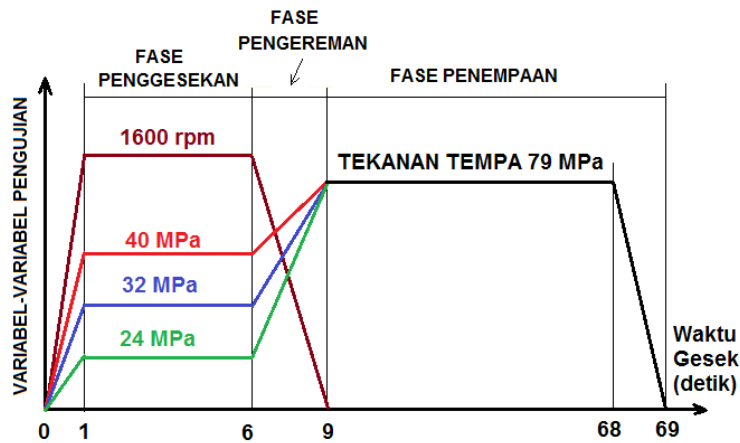
- Dapat diduga bahwa, dengan semakin besarnya tekanan gesek yang diterapkan, pada kecepatan putar, waktu gesek, waktu tempa dan tekanan tempa yang tetap dalam proses las gesek *continuous drive*, maka akan meningkatkan kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk, sampai mencapai nilai maksimum, dan setelah itu, kekuatan tarik sambungan akan kembali menurun dengan terus bertambah besarnya tekanan gesek. Korelasi tekanan gesek dengan kekuatan tarik sambungan, tidak linier.

BAB IV METODE PENELITIAN

4.1 Variabel Penelitian

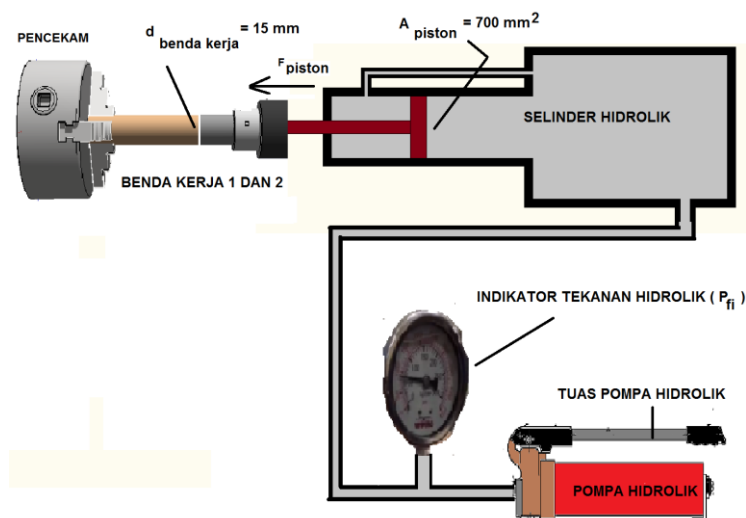
Variabel-variabel yang dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Variabel-variabel bebas (*independen*) adalah variabel-variabel yang ditetapkan nilai-nilainya pada penelitian ini. Pada penelitian ini, variabel-variabel bebasnya adalah:
 - Variasi variabel waktu gesek (t_f): 5 detik, 7 detik, 9 detik, 11 detik
 - Variasi variabel tekanan gesek pada indikator hidrolis (P_{fi}): $60 \frac{kg}{cm^2}$, $80 \frac{kg}{cm^2}$, $100 \frac{kg}{cm^2}$.
2. Variabel terikat (*dependent*) dalam penelitian ini adalah kekuatan tarik sambungan.
3. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:
 - Kecepatan putar relatif pada permukaan kontak (s) sebesar 1600 rpm.
 - Waktu tempa (t_u) = 60 detik.
 - Tekanan penempaan pada indikator hidrolis (P_{ui}) = $200 \frac{kg}{cm^2}$.
 - Diameter permukaan kontak, kedua benda kerja (D_k) pada saat proses pengelasan sebesar 15 mm.
 - Diameter permukaan kontak, kedua benda kerja (D_k) pada saat proses pengujian tarik sebesar 13 mm.
 - Besar sudut *chamfer* sebesar 0° .
 - Kondisi kerataan, kehalusan, kebersihan permukaan kontak benda kerja dianggap baik dan seragam untuk setiap benda uji.



Gambar 4.1. Variabel Pengujian pada Waktu Gesek 5 Detik untuk 3 Variasi Tekanan Gesek

Besar tekanan gesek pada indikator hidrolis (P_{fi}) dan tekanan penempaan pada indikator hidrolis (P_{ui}), bukan merupakan tekanan sebenarnya yang terjadi pada permukaan kontak benda kerja, pada saat proses pengelasan dan penempaan.



Gambar 4.2. Sistem Penekan Hidrolis yang Digunakan

Perhitungan tekanan gesek yang terjadi pada permukaan kontak, berdasarkan luas bidang tekan pada piston hidrolis, yang digunakan sebagai berikut.

Diketahui:

$$d_{\text{benda kerja}} = 15 \text{ mm}$$

$$A_{\text{piston}} = 700 \text{ mm}^2$$

$$P_{fi1} = 60 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 6 \text{ MPa}$$

$$P_{fi2} = 80 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 8 \text{ MPa}$$

$$P_{fi3} = 100 \frac{kg}{cm^2} = 10 \frac{N}{mm^2} = 10 MPa$$

$$P_{ui} = 200 \frac{kg}{cm^2} = 20 \frac{N}{mm^2} = 20 MPa$$

Luas permukaan kontak antara benda kerja I dan 2:

$$A_{benda\ kerja} = \frac{\pi \cdot 15^2}{4} = 176.62 mm^2$$

Gaya tekan pada batang piston untuk tekanan gesek indikator

$$P_{fi1} = 6 \frac{N}{mm^2} F_{piston} = P_{fi1} \cdot A_{piston} \rightarrow F_{piston} = 6 \frac{N}{mm^2} \cdot 700 mm^2$$

$$F_{piston} = 4200 N$$

Tekanan pada permukaan kontak benda kerja (P_{f1}):

$$P_{f1} = \frac{F_{piston}}{A_{benda\ kerja}} \rightarrow P_{f1} = \frac{4200 N}{176.62 mm^2}$$

$$P_{f1} = 23,78 \frac{N}{mm^2} = 23,78 MPa \approx 24 MPa$$

Dengan cara yang sama dihitung tekanan gesek dan tempa, pada permukaan kontak benda kerja, untuk masing-masing tekanan gesek indikator P_{fi2} , P_{fi3} , dan tekanan tempa indikator P_{ui} , didapat:

$$P_{f2} = 32 MPa$$

$$P_{f3} = 40 MPa$$

$$P_u = 79 MPa$$

Besar tekanan yang terjadi pada permukaan kontak benda kerja, akibat dari adanya tekanan oleh piston hidrolik dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Besar Tekanan pada Permukaan Kontak Benda Kerja

Tekanan Gesek Ke 1	Tekanan Gesek Ke 2	Tekanan Gesek Ke 3	Tekanan Tempa
24 MPa	32 MPa	40 MPa	79 MPa

4.2 Tempat Penelitian

Tempat penelitian dilakukan di Universitas Brawijaya Malang yaitu pada Laboratorium Teknik Produksi, dan Laboratorium Pengujian Bahan Universitas Brawijaya Malang. Pengujian tarik spesimen dilakukan di Universitas Negri Malang.

4.3 Bahan dan Peralatan Penelitian

4.3.1 Bahan Benda Kerja

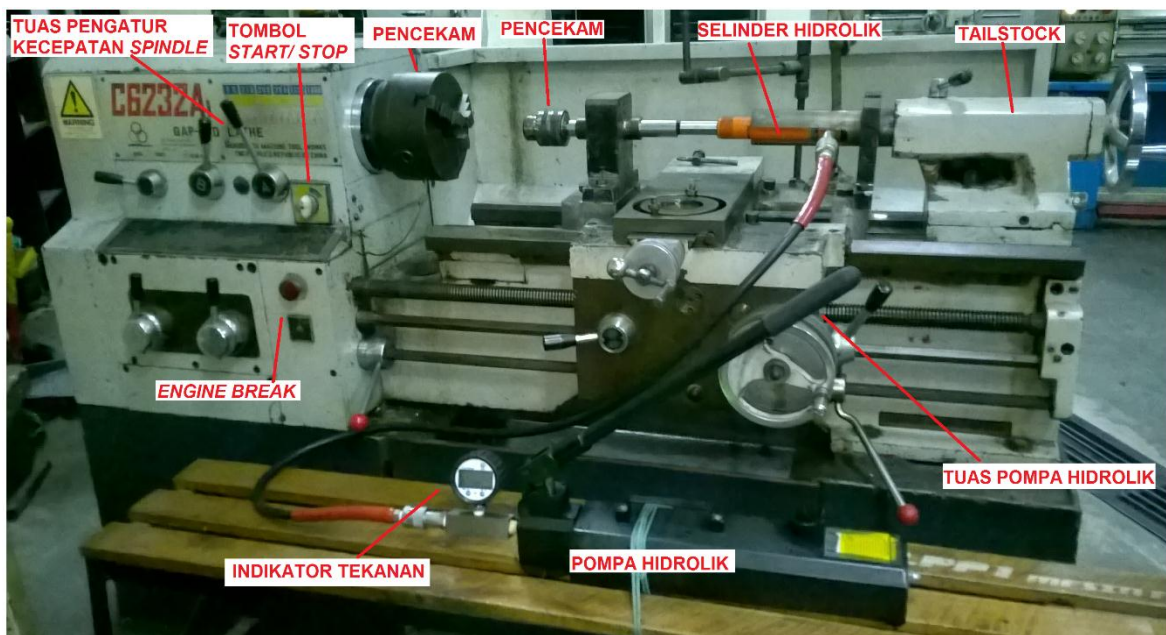
Bahan benda kerja dalam penelitian ini terbagi menjadi dua jenis:

1. Bahan benda kerja 1 adalah paduan aluminium AA6061.
2. Bahan benda kerja 2 adalah baja karbon.

4.3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan-peralatan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Peralatan las gesek.
2. *Stop watch*.
3. Jangka sorong.
4. Mesin bubut.
5. Mesin *power hacksaw*.
6. Kamera digital.
7. Peralatan uji tarik.
8. Termokopel pengukur temperatur.
9. Peralatan foto makro dan mikro.
10. Aceton, dan cairan etsa.
11. Kertas amplas.
12. Alat-alat bantu lain.



Gambar 4.3. Peralatan Las gesek yang Digunakan

4.4 Prosedur Penelitian

4.4.1 Prosedur Las gesek

Proses las gesek ini dilakukan menggunakan peralatan las gesek, dimana peralatan las gesek yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.3. Langkah-langkah pelaksanaan proses penelitian, secara garis besar adalah sebagai berikut ini:

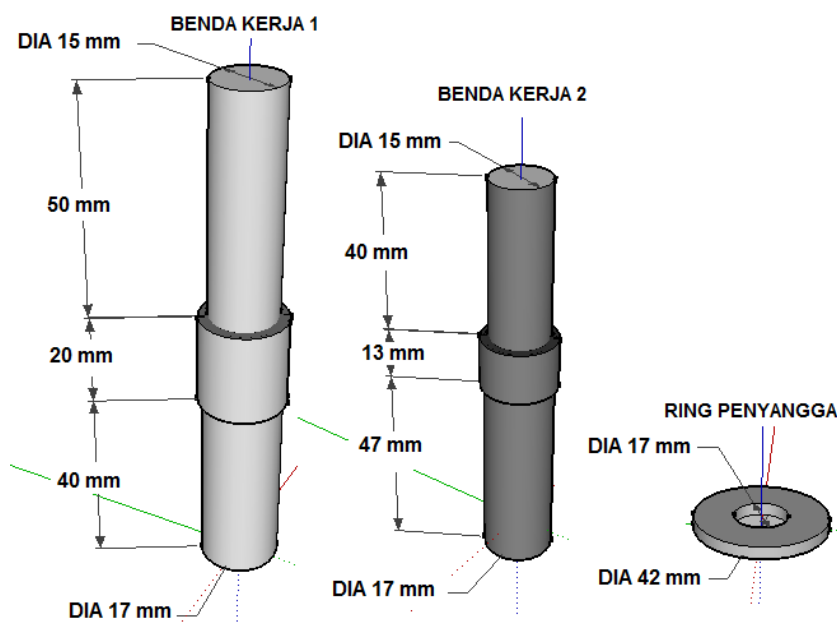
1. Benda kerja dibentuk sesuai bentuk benda kerja menggunakan mesin bubut dan mesin *power hacksaw*.
2. Pembersihan dan penghalusan permukaan kontak kedua benda kerja dilakukan dengan menggunakan kertas amplas *grade* 1000 selama 5 menit.
3. Pemasangan benda kerja 1 pada pencekam (*chuck*). Pemasangan benda kerja 2 pada pencekam yang dihubungkan dengan penekan selinder hidrolik. Pemasangan benda kerja 1 pada pencekam menggunakan ring penyangga agar tidak bergeser pada pencekam pada saat tekanan tinggi diterapkan.
4. Melakukang pembersihan permukaan kontak dengan menggunakan cairan *acetone*.
5. Peralatan gesek dihidupkan dan pencekam benda kerja 1 berputar.
6. Mengatur kecepatan putar *spindle* pada 1600 rpm.
7. Medekatkan peralatan penekan sehingga permukaan benda kerja 1 dan 2 berada dalam jarak yang dekat. Menunggu sampai putaran *spindle* stabil pada 1600 rpm.
8. Menekan tuas hidrolik sehingga terjadi langkah maju pada benda kerja 2, sampai permukaan kontak kedua benda kerja hampir bersentuhan.
9. Penekanan tuas hidrolik diterapkan, bersamaan dengan pengaktifan pengukur waktu. Durasi waktu untuk meningkatkan tekanan gesek pada indikator hidrolik ke tekanan gesek indikator yang ditentukan adalah 1 detik, untuk setiap pasangan benda uji. Lama penekanan pada proses penggesekan sesuai waktu gesek untuk masing-masing pasangan benda uji.
10. Sesuai waktu gesek yang ditunjukkan pengukur waktu, putaran *spindle* dimatikan.
11. Tekanan ditingkatkan ke tekanan tempa pada indikator, sesuai waktu gesek untuk masing-masing pasangan benda uji. Durasi waktu untuk meningkatkan tekanan dari tekanan gesek ke tekanan tempa, sebesar 3 detik dan waktu untuk menurunkan tekanan penempaan hingga $0 \frac{kg}{cm^2}$ sebesar 1 detik, untuk setiap pasangan benda uji setelah waktu penempaan 60 detik.
12. Melepaskan benda kerja 1 dan benda kerja 2 dari pencekam.
13. Pengecekan hasil lasan.

14. Mengulangi langkah-langkah 1 sampai 13 sesuai jumlah benda uji.

Dimensi benda kerja yang akan digunakan proses las gesek pada penelitian ini adalah:

1. Benda kerja 1 dari material aluminium AA6061 berbentuk silinder pejal dengan diameter permukaan kontak 15 mm.
2. Benda kerja 2 dari material baja karbon berbentuk silinder pejal dengan diameter permukaan kontak 15 mm.

Ukuran benda kerja 1 dan 2 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Ukuran Benda kerja 1, Benda kerja 2 dan Ring



Gambar 4.5. Posisi Ring pada Benda Kerja



Gambar 4.6. Spesimen Sebelum Pengelasan



Gambar 4.7. Pemasangan Benda kerja 1 dengan Ring pada Pencekam



Gambar 4.8. Benda kerja 1 dan Benda kerja 2 pada Mesin Las Gesek



Gambar 4.9. Hasil Pengelasan pada Proses

Jumlah total pasangan benda uji yang dilas gesek seperti dalam tabel berikut ini

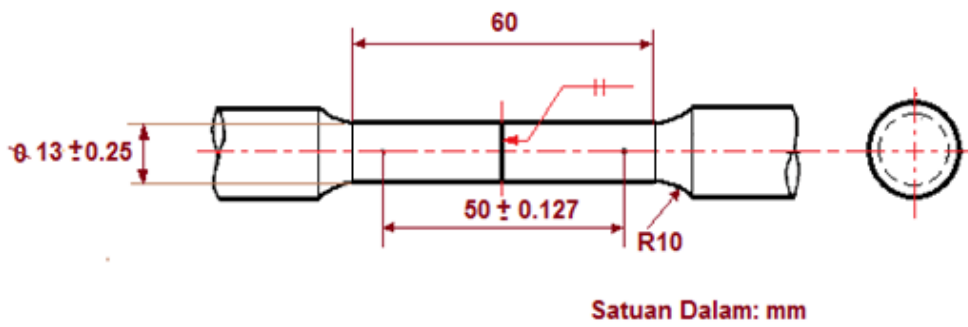
Tabel 4.2. Jumlah Benda Uji yang Dilas Gesek dan Variasi Variabel Bebas

Variabel Bebas	Tekanan Gesek			JUMLAH
	24 MPa	32 MPa	40 MPa	
Waktu Gesek (detik)	Jumlah Spesimen			
5	6	6	6	18
7	6	6	6	18
9	6	6	6	18
11	6	6	6	18
Total Jumlah				72

4.4.2 Prosedur Pengujian Tarik Hasil Pengelasan

Prosedur pengujian tarik hasil las secara garis besar adalah sebagai berikut ini:

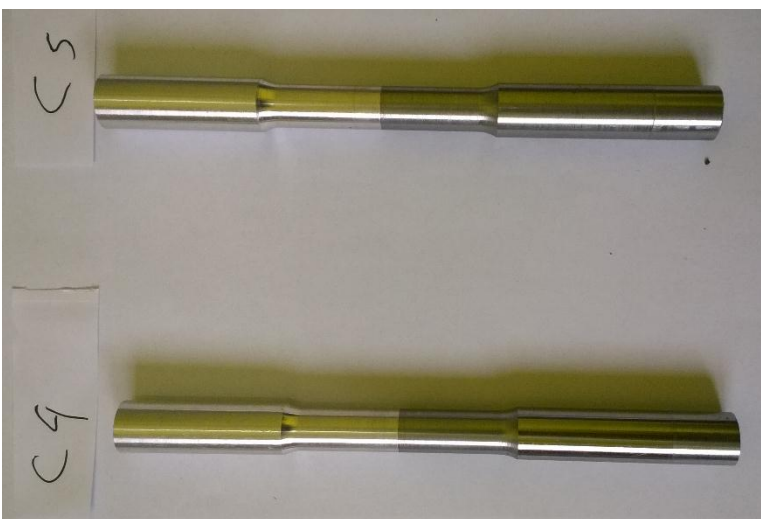
1. Menyiapkan benda uji sesuai ukuran standar AWS B4.0 seperti pada Gambar 4.10.
2. Menyiapkan mesin uji yang digunakan.
3. Memasang benda kerja pada pencekam mesin uji, dan memastikan bahwa tidak akan terjadi *slip* pada saat dilakukan pengujian.
4. Mengatur kecepatan tarik mesin penguji.
5. Menjalankan mesin untuk melakukan pengujian tarik.
6. Mendapatkan hasil pengujian tarik dalam data komputer.
7. Memberikan nomor kode pada setiap benda uji yang telah diuji dan disesuaikan dengan nomor data hasil pengujian.
8. Mengulang langkah-langkah 1 sampai 7 untuk setiap benda uji.



Gambar 4.10. Dimensi Standar Spesimen Uji Tarik
Sumber: AWS B4.0(2003, p.18)



Gambar 4.11. Mesin Uji Tarik yang Digunakan



Gambar 4.12. Sepesimen Uji Tarik

Mesin uji tarik yang digunakan mempunyai kemampuan pembebanan sampai 100 ton dan terhubung pada komputer. Hasil pengujian yang didapat dalam bentuk data komputer harus dikurangi beban koreksi dari peralatan tarik dengan besaran antara 12 kN sampai 14 kN.

Tabel 4.3. Jumlah Benda Uji yang Diuji Tarik

Variabel Bebas	Tekanan Gesek			JUMLAH
	24 MPa	32 MPa	40 MPa	
Waktu Gesek (detik)	Jumlah Spesimen			
5	4	4	4	12
7	4	4	4	12
9	4	4	4	12
11	4	4	4	12
Total Jumlah				48

4.4.3 Pengujian Tarik pada Material Logam Benda Kerja

Pengujian tarik untuk material logam benda kerja 1 dan benda kerja 2, untuk mengetahui kekuatan tarik masing-masing logam induk yang digunakan sebagai benda uji pengelasan. Langkah dari prosedur pengujian secara garis besar sama dengan langkah-langkah pada sub bab 4.4.2, begitu juga dengan mesin uji tarik yang digunakan.

Tabel 4.4. Jumlah Benda Uji Tarik Material Logam Benda Kerja

Bahan	JUMLAH
AA 6061	4 spesimen
Baja Karbon	4 spesimen
Total Jumlah	8 spesimen
Dari 4 spesimen, 1 spesimen adalah cadangan dan diambil nilai dari 3 spesimen terbaik setiap variasi variabel bebas untuk digunakan selanjutnya	



Gambar 4.13. Benda Uji Tarik untuk Logam Induk

4.4.4 Pengujian Kekasaran Permukaan Kontak Benda Kerja

Pengujian kekasaran permukaan kontak benda kerja, dilakukan pada 3 spesimen yang berbeda dari masing masing benda kerja 1 dan 2 pada permukaan kontak setiap spesimen, di 3 lokasi yang berbeda pada permukaannya. Pengujian menggunakan mesin uji kekasaran Mitoyo.

Prosedur pengujian:

1. Dilakukan penggosokan permukaan untuk menghaluskan pada semua spesimen yang akan dilakukan pengelasan gesek. Penggosokan dilakukan bertahap dari ukuran kertas gosok nomor 500 sampai 1000 dalam waktu 5 menit.
2. Permukaan dibersihkan dengan *acetone*.
3. Diambil 3 spesimen secara acak dari benda kerja 1, dan 3 spesimen secara acak dari benda kerja 2, untuk diuji kekasaran permukaannya.
4. Pengujian untuk masing-masing spesimen dilakukan pada 3 lokasi yang berbeda pada permukaan kontak, untuk mendapatkan rata-rata kekasaran permukaan (R_a) dalam satuan mikro meter (μm).

Tabel 4.5. Jumlah Benda Uji untuk kekasaran Permukaan

Material	Jumlah Spesimen	Lokasi Uji per Spesimen	Jumlah Pengujian
AA 6061	3	3	6
BAJA KARBON	3	3	6
JUMLAH	6	6	12

4.4.5 Pengujian Komposisi Kimiawi Bahan Benda Kerja

Pengujian komposisi kimiawi dilakukan dengan menggunakan peralatan SEM FEI Inspect S-50, EDS Merk EDAX AMETEK. Tahapan proses pengujian sesuai yang disyaratkan oleh standar pengujian menurut peralatan uji yang digunakan.

Tabel 4.6. Jumlah Benda Uji untuk Komposisi Kimiawi

Material	Jumlah Spesimen	Lokasi Uji per Spesimen	Jumlah Pengujian
AA 6061	1	3	3
BAJA KARBON SEDANG	1	3	3
Total	2	6	6



Gambar 4.14. Spesimen Uji untuk Pengujian Komposisi Kimiawi

4.4.6 Pengukuran Temperatur Proses Penggesekan

Pengukuran temperatur proses penggesekan menggunakan *Digital Thermometer* Krisbow KW06-283 dengan kemampuan mengukur sampai 1300°C . Nilai temperatur setiap saat direkam dengan menggunakan *camera digital*. Ujung *thermocopel* diletakan pada lubang dengan diameter 1 mm dan kedalaman 2 mm, dengan jarak titik pusat lubang sebesar 2 mm dari permukaan kontak benda kerja 2.



Gambar 4.15. Lubang Peletakan Ujung Termokopel pada Benda kerja 2

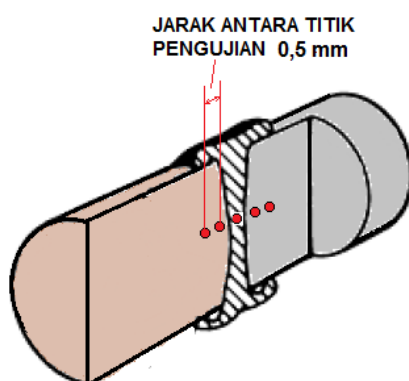


Gambar 4.16. Proses Pengukuran Temperatur pada Saat Proses Pengelasan

4.4.7 Prosedur Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan *vickers* sesuai standar ASTM E 92-82. Prosedur pengujian secara garis besar sebagai berikut:

1. Benda kerja dipotong melintang sejajar sumbu axialnya seperti pada Gambar 4.17.
2. Permukaan benda kerja yang akan dipakai untuk pengujian kekerasan *vickers* dibersihkan dengan baik dan digosok dengan kertas penggosok halus. Tujuannya agar permukaan benda kerja yang akan diuji menjadi bersih dan rata, sehingga dapat terlihat dan terukur dengan baik sampai ukuran $\pm 0,0005 \text{ mm}$, atau sampai ukuran sesuai standar dari mesin pengujian *vickers* yang digunakan.
3. Benda kerja diletakan pada mesin pengujian.
4. Titik pengujian dilakukan pada daerah pengaruh panas (HAZ), baik ke sisi benda kerja 1 maupun ke sisi benda kerja 2. Jarak interval antara setiap titik pengujian 0,5 mm.
5. Pengujian kekerasan tidak dilakukan pada setiap benda kerja, pada setiap variasi dari variabel bebas, tetapi hanya dilakukan pada benda kerja yang menunjukkan kekuatan tarik terendah, kekuatan tarik tertinggi, atau yang lain yang dipandang perlu.



Gambar 4.17. Skema Pengujian Kekerasan pada Benda Kerja

4.4.8 Pengujian Foto Mikro

Pengujian dengan foto mikro pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui patahan dan keretakan, dan keadaan lain pada sambungan, ukuran butir pada daerah pengaruh panas.

Prosedur pengujian foto mikro secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Pemotongan benda kerja sejajar sumbu benda kerja pada daerah pengaruh panas.
2. Penyesuaian ukuran benda kerja agar sesuai dengan ruang yang tersedia pada peralatan pengujian.

3. Membersihkan permukaan uji pada benda kerja agar benar-benar bersih dari pengotor-pengotor yang dapat mengganggu keakuratan hasil pengujian. Langkah pembersihan dapat dilakukan dengan pemolesan, pembersihan dengan memakai larutan kimia pembersih.
4. Memberikan nomor kode pada setiap hasil pengujian untuk menandai benda uji dan hasil pengujian..
5. Pencetakan potongan benda kerja yang akan difoto mikro dalam cetakan resin.
6. Melakukan penggosokan permukaan benda kerja yang akan difoto dengan menggunakan kertas amplas bernomor berturut-turut 350, 500, 600, 1000, 1500, 2000, dan 2500.
7. Melakukan proses etsa kimiawi menggunakan cairan:
 - *Keller's Reagent* ($\text{HF}+\text{HCl}+\text{HNO}_3$ dilarutkan pada H_2O) pada pelarut air selama 3 menit untuk sisi AA 6061
 - Nital pada pelarut alkohol selama 1 menit untuk sisi Baja karbon.
8. Pengujian foto mikro hanya dilakukan pada beberapa benda kerja saja dipandang perlu, misalnya yang menunjukkan kekuatan tarik terendah, kekuatan tarik tertinggi, pada variasi variabel bebas.
9. Pembesaran foto mikro 200 kali.



Gambar 4.18. Potongan Sambungan pada Benda Kerja setelah Dicetak pada Resin



Gambar 4.19. Benda kerja untuk Foto Mikro



Gambar 4.20. Proses Perendaman pada Cairan Etsa

4.4.9 Pengujian dengan Foto Makro

Pengujian dengan makro foto pada penelitian ini untuk melihat bentuk *flash* yang terjadi dan korelasi bentuk *flash* dengan proses pengelasan. Pengujian dengan foto makro juga untuk mengamati kontur, dan keretakan-keretakan makro yang terjadi, pada permukaan *flash* pada daerah sambungan.

Prosedur pengujian foto makro secara garis besar adalah sebagai berikut:

1. Membersihkan benda uji.
2. Meletakkan benda uji pada latar yang berwarna terang dan kontras dengan warna pada benda uji agar hasil yang didapat terlihat jelas.
3. Memberikan nomor kode pada setiap hasil pengujian dan benda uji untuk menandai hasil pengujian dan benda uji.

4. Pada foto makro untuk bentuk *flash*, menggunakan pembesaran yang sama untuk setiap benda kerja agar perbedaan ukuran dapat diperkirakan dari hasil foto makro.

4.5 Pengolahan Data, Analisa, dan Penarikan Kesimpulan

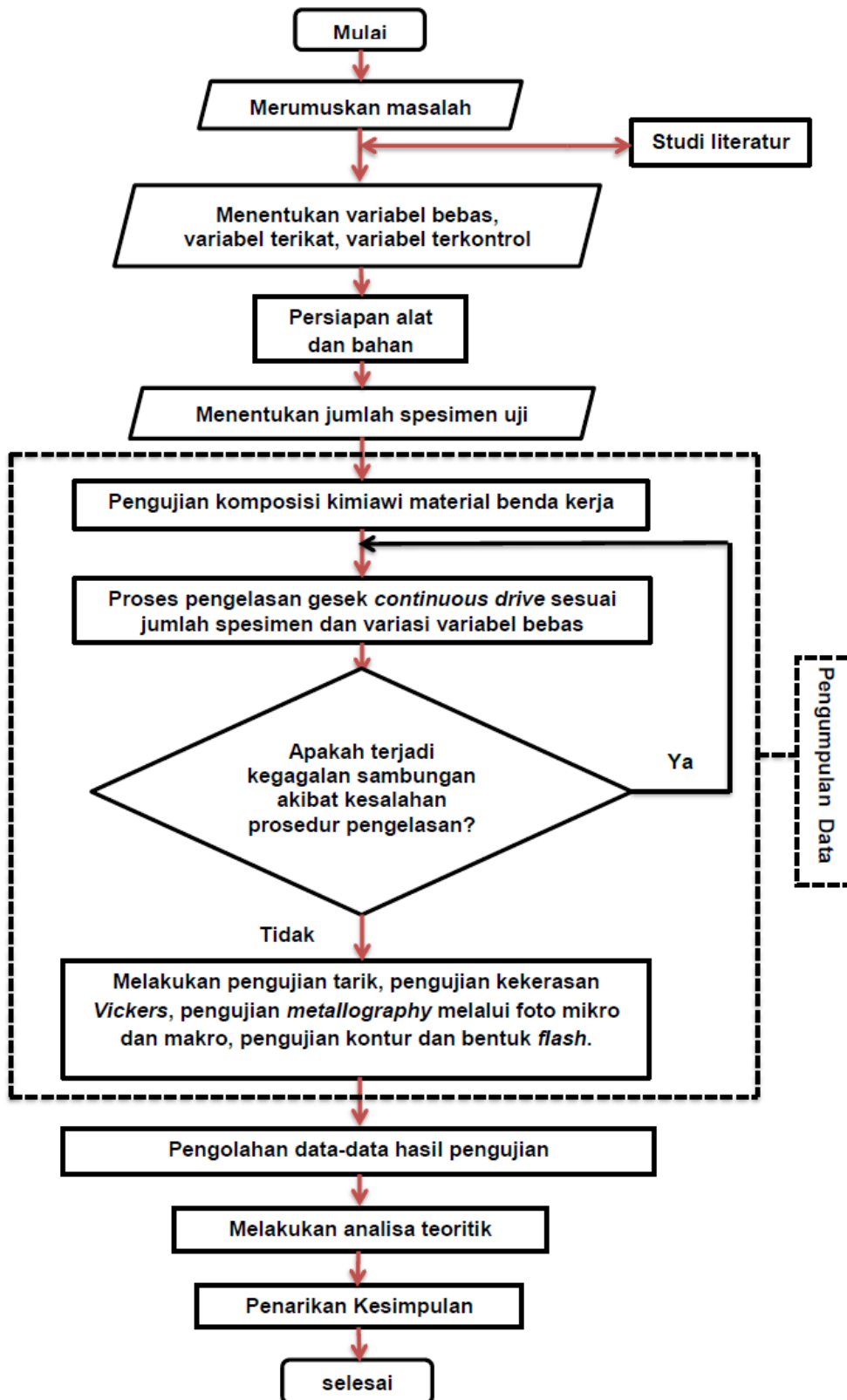
Data-data yang didapat dari hasil pengujian dikelola lebih lanjut dalam bentuk grafik, seperti grafik kekuatan tarik putus terhadap variasi waktu gesek, grafik kekuatan tarik putus terhadap variasi tekanan gesek, dan juga penggambaran grafik untuk melihat pengaruh kedua variabel bebas pada kekuatan tarik putus. Data-data hasil pengujian sebagai data primer, yang mana dapat dikelola untuk mendapatkan data-data sekunder lainnya, sesuai yang dibutuhkan.

Analisa dilakukan untuk menjelaskan secara teoritik, hubungan sebab-akibat dari perubahan variabel bebas terhadap variabel terikat. Menjelaskan secara teoritik fenomena-fenomena metalurgi yang terjadi pada proses pengujian.

Penarikan kesimpulan dilakukan berdasarkan tujuan-tujuan dan batasan-batasan persoalan pada penelitian ini, berdasarkan data-data, hasil pengolahan data, dan analisa teoritik.

4.6 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini, dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Diagram Alir Penelitian


BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Data Hasil Uji Kekasaran Permukaan Kontak

Data hasil uji kekasaran permukaan gesek, pada 3 benda uji dengan masing-masing di 3 lokasi uji yang berbeda, pada benda kerja AA6061 dan baja karbon dapat dilihat pada Tabel 5.1. Hasil lengkap pengujian kekasaran permukaan pada lampiran.

Tabel 5.1. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Kontak Benda Kerja

MATERIAL	LOKASI UJI PADA	BENDA UJI KE	$R_a (\mu m)$	$\bar{R}_a (\mu m)$	STANDAR DEVIASI (μm)
AA 6061	A	1	0,271	0,269	0,002
		2	0,269		
		3	0,267		
	B	1	0,667	0,668	0,003
		2	0,665		
		3	0,671		
	C	1	0,849	0,849	0,002
		2	0,852		
		3	0,847		
BAJA KARBON SEDANG	A	1	0,333	0,330	0,003
		2	0,327		
		3	0,329		
	B	1	0,592	0,596	0,005
		2	0,602		
		3	0,594		
	C	1	0,686	0,687	0,002
		2	0,689		
		3	0,687		
KETERANGAN					
Lokasi pada permukaan kontak, yaitu lokasi uji A, B, C seperti gambar					
Standar Deviasi dihitung dengan persamaan	$\text{standar deviasi} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_{ai} - \bar{R}_a)^2}$				

Dari data hasil uji kekasaran permukaan pada Tabel 5.1 menunjukkan nilai kekasaran permukaan (R_a) yang cenderung seragam. Nilai kekasaran permukaan pada lokasi yang sama, mempunyai rata-rata penyimpangan, dari nilai rata-rata kekasaran permukaan ($\overline{R_a}$), sebesar nilai standar deviasi masing-masing kelompok uji. Nilai standar deviasi yang kecil pada pengujian ini, yaitu bernilai dari $\frac{2}{1000} \mu m$ sampai $\frac{5}{1000} \mu m$, menunjukkan bahwa rata-rata kekasaran permukaan ($\overline{R_a}$) untuk setiap lokasi uji, dapat dipercaya mewakili nilai kekasaran permukaan (R_a) dari seluruh benda uji, pada lokasi uji itu.

Pengambilan benda uji dilakukan secara acak dari masing-masing kelompok benda uji. Setiap benda uji mengalami proses penghalusan permukaan dengan prosedur yang sama. Hasil pengujian kekasaran permukaan menunjukkan cenderung bervariasi dengan nilai yang kecil, seperti yang dinyatakan dari nilai standar deviasi masing-masing kelompok uji. Ketiga hal ini, menunjukkan bahwa, hasil pengujian ini dapat dipercaya, dan mewakili seluruh populasi benda kerja AA6061 dan baja karbon.

Nilai rata-rata kekasaran permukaan ($\overline{R_a}$), mewakili nilai kekasaran permukaan seluruh benda kerja pada penelitian ini. Sehingga dapat dikatakan bahwa, kekasaran permukaan yang merupakan variabel terkontrol dalam penelitian ini, bernilai sesuai nilai rata-rata kekasaran permukaan seperti tertera pada Tabel 5.1, untuk keseluruhan benda kerja.

5.2 Hasil Uji Komposisi Kimiawi dan Kekuatan Tarik dari Material Benda Kerja

5.2.1 Data Hasil Uji Komposisi Kimiawi

Hasil uji komposisi kimiawi dengan peralatan SEM FEI Inspect S-50, EDS pada 3 titik berbeda pada material benda kerja 1 dan 2, untuk berbagai unsur kimia, dapat dilihat pada

Tabel 5.2 dan Tabel 5.3. Laporan hasil pengujian SEM EDS dan foto SEM pada Lampran 2 dan Lampiran 3.

Tabel 5.2. Komposisi Kimiawi Material Benda AA6061

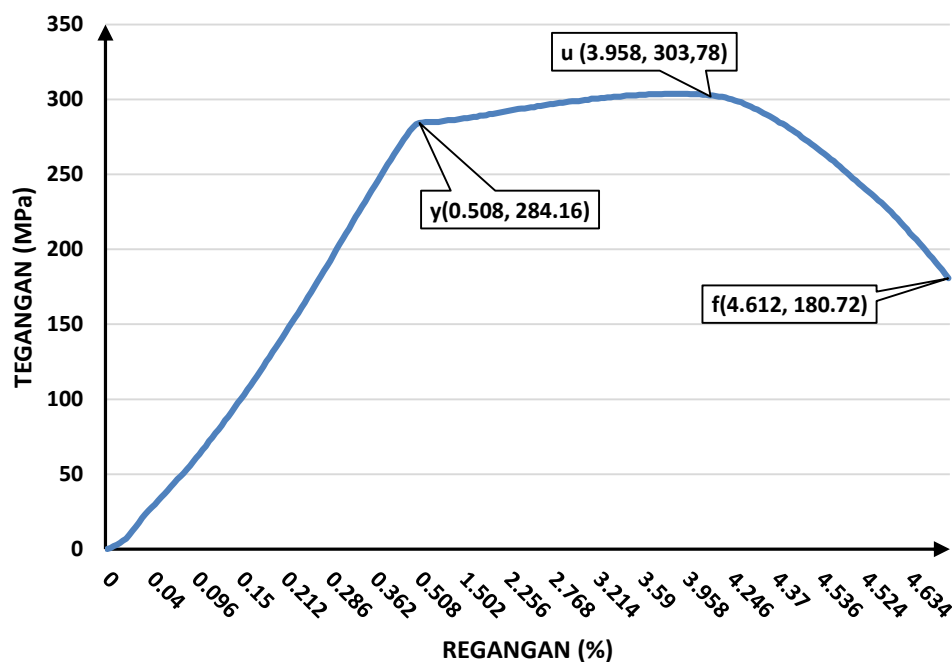
AA6061							
UNSUR KIMIA	TITIK UJI 1		TITIK UJI 2		TITIK UJI 3		RATA-RATA PERSEN BERAT (\overline{W}_t %)
	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	
Magnesium (Mg)	01,08	01,18	01,05	00,95	01,06	00,96	01,06
Silikon (Si)	00,74	00,70	00,61	00,48	00,78	00,62	00,71
Aluminium (Al)	96,83	96,64	96,03	95,78	97,03	96,43	96,93
Besi (Fe)	00,68	00,32	00,50	00,20	00,76	00,30	00,65
Karbon (C)			00,04	00,11	00,14	01,37	00,09
Oksigen (O)	00,66	01,15	01,77	02,48	00,22	00,31	00,88

Tabel 5.3. Komposisi Kimiawi Material Benda kerja Baja Karbon

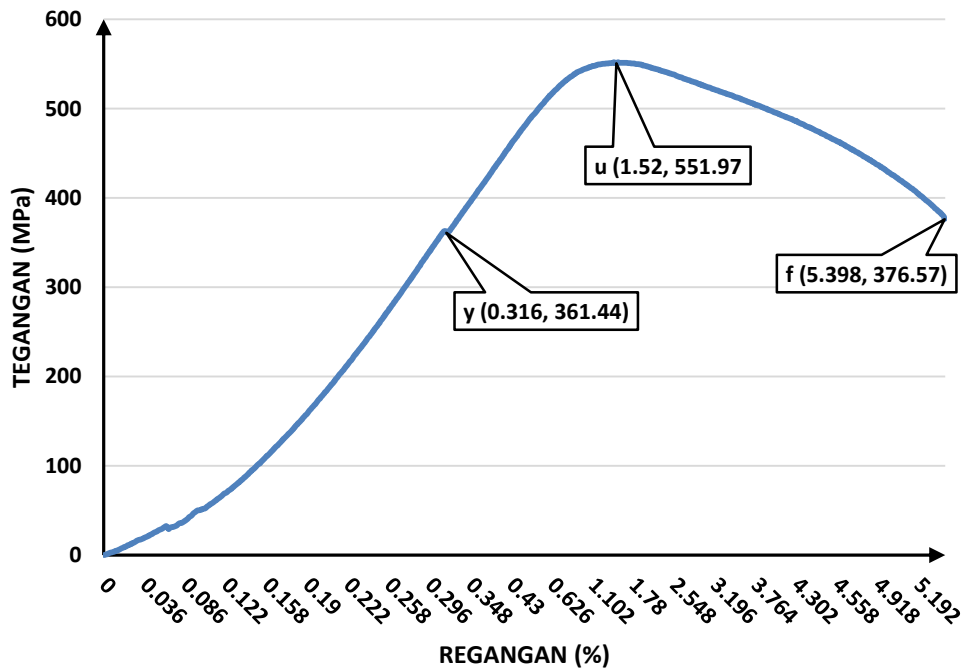
BAJA KARBON SEDANG							
UNSUR KIMIA	TITIK UJI 1		TITIK UJI 2		TITIK UJI 3		RATA-RATA PERSEN BERAT (W_t %)
	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	PERSEN BERAT (W_t %)	PERSEN ATOMIK (A_t %)	
Mangan (Mn)			00,56	00,46	00,53	00,37	00,55
Silikon (Si)	00,23	00,29	00,35	00,56	00,19	00,26	00,26
Aluminium (Al)	00,56	00,72					00,56
Besi (Fe)	98,72	97,64	98,93	98,23	98,63	97,58	98,76
Karbon (C)	00,16	00,77	00,15	00,74	00,17	00,86	00,16
Oksigen (O)	00,06	00,14			00,07	00,18	00,07
Fluorid (F)	00,12	00,22			00,14	00,29	00,06
Natrium (Na)	00,14	00,21			00,27	00,45	00,21

5.2.2 Kekuatan Tarik Material Benda Kerja

Pengujian tarik disini untuk mengetahui sifat mekanis, terutama kekuatan tarik dari material benda kerja AA6061 dan material baja karbon. Pengujian tarik ini dilakukan pada 3 benda uji, untuk masing-masing jenis bahan. Grafik hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 5.1 dan Gambar 5.2. Grafik yang lain pada Lampiran 5 dan Lampiran 5.



Gambar 5.1. Grafik Tegangan-Regangan Benda Uji AA6061



Gambar 5.2. Grafik Tegangan-Regangan Benda Uji 2 Baja Karbon Sedang

Dari grafik tegangan-regangan, dicari tegangan maksimum (*ultimate stress*), tegangan luluh (*yield stress*), dan tegangan putus (*fracture stress*). Ketiga tegangan ini, pada setiap benda uji ditabelkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Besar Tegangan Maksimum, Tegangan Luluh, Tegangan Putus, dan Rentang Nilai Tegangan pada Benda Uji

MATERIAL BENDA KERJA	BENDA UJI KE	TEGANGAN MAKSIMUM (σ_u) (MPa)	TEGANGAN LULUH (σ_y) (MPa)	TEGANGAN PUTUS (σ_f) (MPa)
AA6061	1	303,78	284,16	180,72
	2	302,97	283,35	178,27
	3	306,65	287,43	182,35
	RATA-RATA NILAI TEGANGAN	304,47	284,98	180,45
BAJA KARBON SEDANG	1	524,17	368,94	378,21
	2	551,97	361,44	376,57
	3	553,60	364,30	381,06
	RATA-RATA NILAI TEGANGAN	543,25	364,89	378,61

5.2.3 Analisis Mengenai Jenis Material Benda

Data komposisi kimiawi dan kekuatan mekanis material AA6061, dibandingkan dengan data standar AA6061 (ASM Hand Book Vol.2, 1992), untuk beberapa kekuatan mekanis dan kandungan unsur kimia dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5. Data Standar AA6061 dan Data Material Benda Kerja 1

SIFAT		AA6061 STANDAR	MATERIAL BENDA KERJA 1 (AA6061)
KANDUNGAN	Aluminium (Al)	95,8%-98,6%	96,93%
	Magnesium (Mn)	0,80%-1,20%	1,06%
	Silikon (Si)	0,40%-0,80%	0,071%
	Besi (Fe)	<= 0,70%	0,65%
KEKUATAN TARIK MAKSIMUM RATA-RATA		310 MPa	304,47 MPa
KEKUATAN TARIK LULUH RATA-RATA		276 MPa	284,98 MPa

Dari perbandingan komposisi kimia dan kekuatan mekanik pada Tabel 5.5, maka material benda kerja 1 yang digunakan dalam penelitian ini, adalah aluminium paduan AA6061 dengan kekuatan tarik maksimum rata-rata 304,47 MPa dan kekuatan tarik luluh rata-rata 284,98 MPa. Perbandingan komposisi kimiawi dan kekuatan mekanik material benda kerja 2, dengan data standar dari baja karbon sedang (MatWab, 2017) dapat dilihat pada Tabel 5.6.

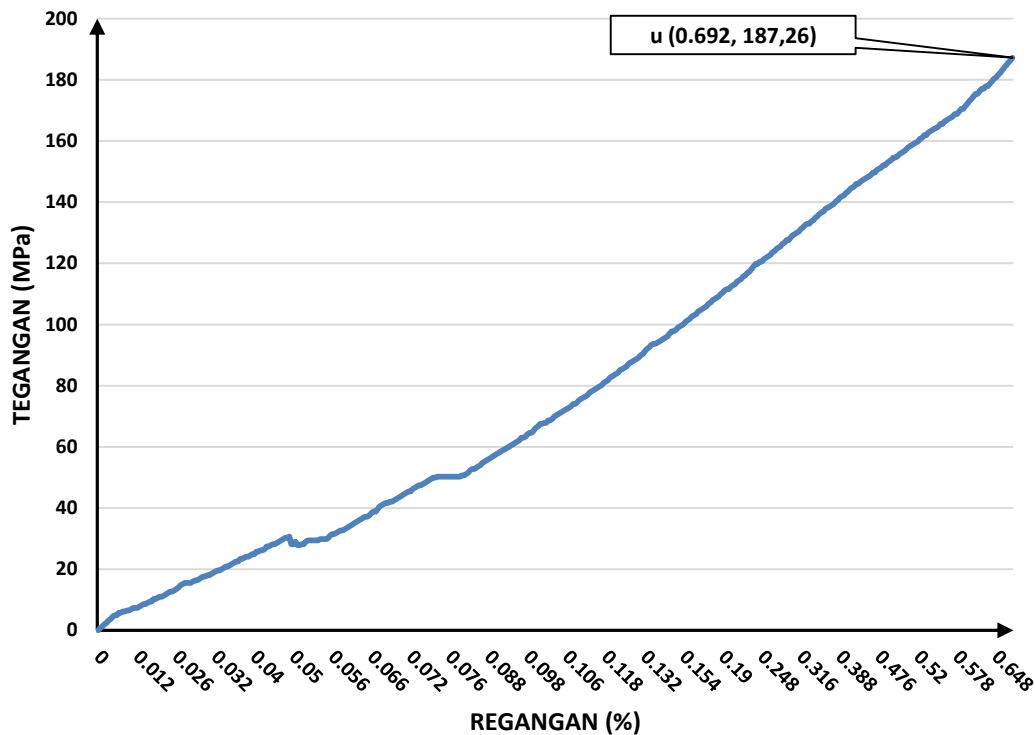
Tabel 5.6. Data Standar Baja Karbon Sedang dan Data Material Benda Kerja 2

SIFAT		BAJA KARBON SEDANG STANDAR	MATERIAL BENDA KERJA 2
KANDUNGAN	Besi (Fe)	78,7%-100%	98,76%
	Karbon (C)	0,10%-1,29%	0,16%
	Mangan (Mn)	0,10%-3,00%	0,50%
	Silikon (Si)	0,05%-2,20%	0,26%
	Aluminium (Al)	0,02%-1,15%	0,56%
KEKUATAN TARIK MAKSIMUM		450 MPa-2730 MPa	543,25 MPa
KEKUATAN TARIK LULUH		245 MPa-1740 MPa	364,89 MPa

Dari perbandingan kandungan unsur kimia dan kekuatan tarik maksimum dan kekuatan tarik luluh, seperti pada Tabel 5.6, maka material benda kerja 2 dalam penelitian ini adalah baja karbon sedang dengan kandungan karbon rata-rata 0,16%, kekuatan tarik maksimum 543,25 MPa dan kekuatan tarik luluh 364,89 MPa.

5.3 Hasil Uji Tarik pada Sambungan Las gesek

Grafik tegangan-regangan sambungan terkuat yang didapat pada tekanan gesek 40 MPa dan waktu gesek 7 detik seperti pada Gambar 5.3. Grafik tegangan-regangan sambungan pada tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa, untuk masing-masing waktu gesek 5 detik, 7 detik, 9 detik, dan 11 detik, untuk setiap benda uji 1,2, dan 3 ada pada Lampiran 6 sampai Lampiran 17.



Gambar 5.3. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik

Dari bentuk grafik hasil pengujian tarik pada Gambar 5.3 dan Lampiran, terlihat bahwa tegangan maksimum terjadi pada titik *ultimate* yang berimpitan dengan titik putus, artinya tegangan maksimum sama dengan tegangan putus, pada sambungan-sambungan ini. Tidak adanya *yield* setelah tegangan maksimum tercapai. Regangan maksimum yang terjadi pada saat sambungan-sambungan ini putus, adalah dari 0,148% sampai 0,72%. Hal-hal ini menunjukkan bahwa sambungan-sambungan ini bersifat getas.

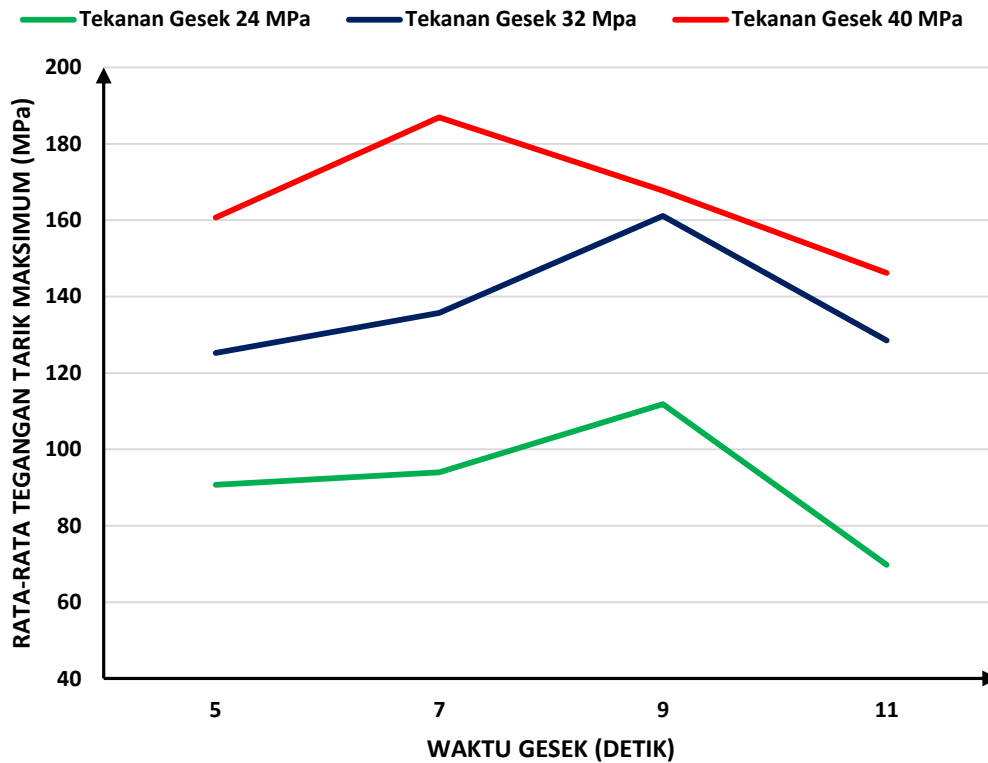
Kekuatan tarik sambungan dari benda uji yang terkuat pada penelitian ini yaitu 187,26 MPa, yang mana masih lebih lemah dari kekuatan tarik material benda uji AA6061.

Kekuatan tarik maksimum dan rata-rata kekuatan tarik maksimum dari semua spesimen uji, seperti pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7. Rata-Rata Kekuatan Tarik Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek dan Waktu Gesek

TEKANAN GESEK (MPa)	WAKTU GESEK (detik)	BENDA UJI	TEGANGAN TARIK MAKSIMUM (MPa)	RATA-RATA TEGANGAN TARIK MAKSIMUM (MPa)
24	5	1	91,176	90,77
		2	91,997	
		3	89,126	
	7	1	94,454	94,04
		2	93,625	
		3	94,039	
	9	1	112,027	111,89
		2	112,849	
		3	110,806	
	11	1	70,324	69,77
		2	69,917	
		3	69,081	
32	5	1	123,881	125,25
		2	124,295	
		3	127,566	
	7	1	135,335	135,74
		2	135,735	
		3	136,149	
	9	1	161,907	161,09
		2	159,864	
		3	161,500	
	11	1	128,794	128,52
		2	127,159	
		3	129,608	
40	5	1	161,477	160,68
		2	159,872	
		3	160,678	
	7	1	186,443	186,99
		2	187,234	
		3	187,257	
	9	1	167,054	167,72
		2	167,634	
		3	168,455	
	11	1	147,197	146,24
		2	147,189	
		3	144,333	

Grafik hubungan rata-rata tegangan tarik maksimum, pada variasi waktu gesek untuk masing-masing tekanan gesek, seperti pada Gambar 5.4.

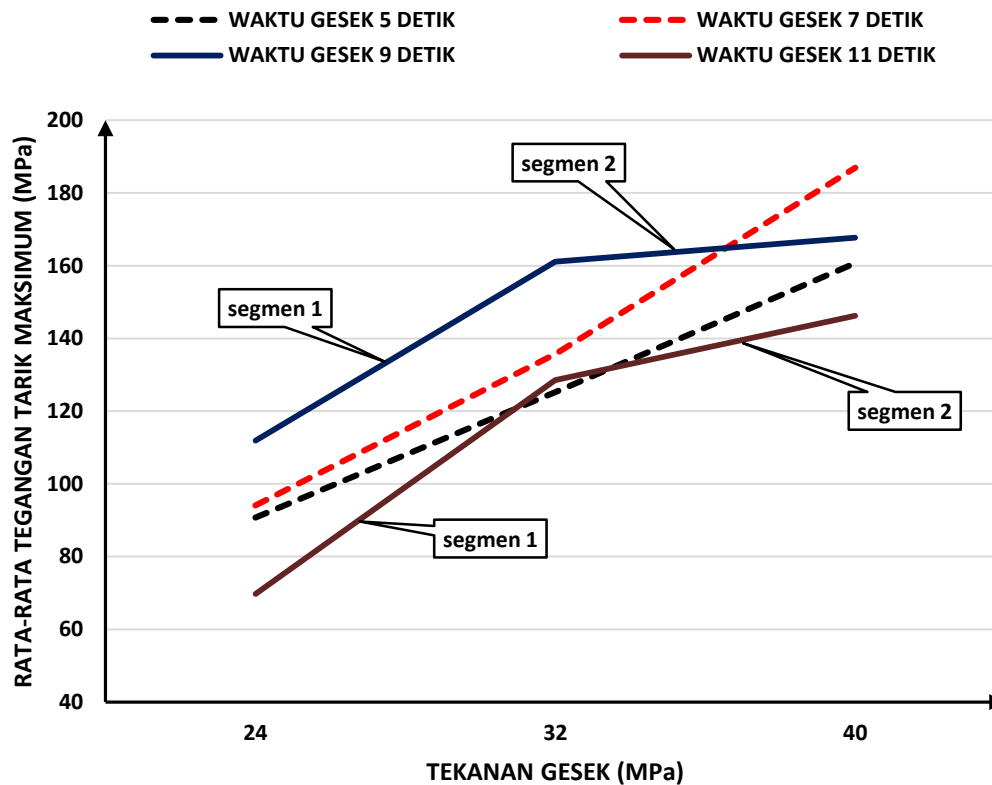


Gambar 5.4. Rata-rata Tegangan Tarik Maksimum pada Variasi Waktu Gesek

Rata-rata kekuatan tarik terbesar dari sambungan las gesek ini adalah 186,99 MPa, yaitu pada tekanan gesek 40 MPa dan waktu gesek selama 7 detik. Pada waktu gesek yang lebih lama, yakni 9 dan 11 detik, kekuatan tariknya terus menurun. Pada Tekanan Gesek yang lebih kecil dari 40 MPa, yakni pada tekanan gesek 32 MPa dan 24 MPa, kekuatan tarik terkuat tercapai pada waktu gesek 9 detik, dan untuk waktu gesek 11 detik, kekuatan tariknya lebih kecil dari kekuatan tarik pada waktu gesek 9 detik. Kekuatan tarik terkuat pada tekanan gesek 40 MPa, lebih besar dari kekuatan tarik terkuat pada tekanan gesek 32 MPa, dan kekuatan tarik terkuat pada tekanan gesek 32 MPa, lebih besar dari kekuatan tarik terkuat pada tekanan gesek 24 MPa. Tekanan gesek yang lebih besar menghasilkan kekuatan tarik sambungan yang lebih kuat.

Kekuatan tarik sambungan akan meningkat dengan diperbesarnya durasi waktu gesek, sampai mencapai kekuatan tarik terkuat, dan kemudian kekuatan tariknya akan menurun, pada saat durasi waktu geseknya terus diperbesar. Pada tekanan gesek yang lebih besar, kekuatan tarik terkuatnya, akan dicapai pada waktu gesek yang lebih singkat.

Hubungan rata-rata tegangan tarik maksimum, pada variasi tekanan gesek untuk masing-masing waktu gesek, seperti pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5. Rata-rata Tegangan Tarik Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek

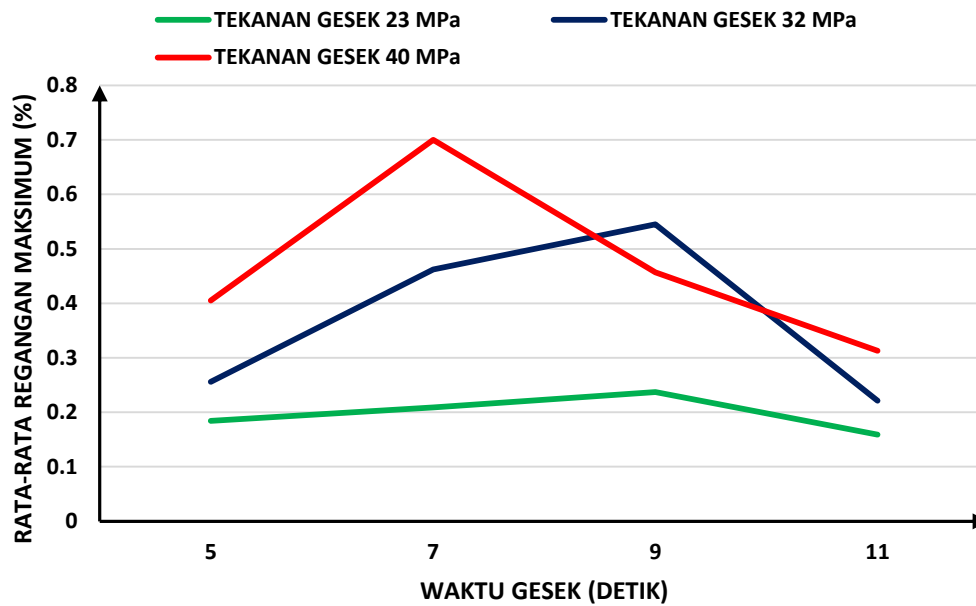
Pada waktu gesek 5 detik dan 7 detik, setiap kenaikan tekanan gesek, akan menyebabkan kekuatan tarik sambungan menguat, dengan laju peningkatan yang cenderung konstan. Hal ini terlihat pada grafik Gambar 5.5 dimana grafik tegangan tarik maksimum untuk waktu gesek 5 dan 7 detik, tampak sebagai sebuah garis lurus dengan kemiringan tertentu. Untuk waktu gesek 9 detik dan 11 detik, terlihat sebagai 2 segmen garis dengan kemiringan tiap segmen garis berbeda, dimana kemiringan garis segmen 1 lebih besar dari kemiringan garis segmen 2. Pada waktu gesek 9 dan 11 detik, kenaikan kekuatan tarik sambungan tidak lagi linier terhadap peningkatan tekanan gesek. Pada tekanan gesek yang lebih besar, akan menunjukkan laju peningkatan kekuatan tarik sambungan yang mengecil.

Besar regangan yang terjadi pada sambungan, pada saat tegangan maksimum, disebut dengan regangan maksimum. Data regangan maksimum, pada variasi tekanan gesek dan waktu gesek seperti pada Tabel 5.8.

Tabel 5.8. Rata-Rata Regangan Maksimum pada Variasi Tekanan Gesek dan Waktu Gesek

TEKANAN GESEK (MPa)	WAKTU GESEK (detik)	BENDA UJI	REGANGAN MAKSIMUM (%)	RATA-RATA REGANGAN MAKSIMUM (%)
24	5	1	0,186	0,184
		2	0,182	
		3	0,184	
	7	1	0,212	0,209
		2	0,200	
		3	0,216	
	9	1	0,232	0,237
		2	0,238	
		3	0,242	
	11	1	0,156	0,159
		2	0,148	
		3	0,172	
32	5	1	0,254	0,256
		2	0,258	
		3	0,256	
	7	1	0,442	0,462
		2	0,476	
		3	0,468	
	9	1	0,546	0,545
		2	0,582	
		3	0,508	
	11	1	0,210	0,221
		2	0,222	
		3	0,232	
40	5	1	0,408	0,405
		2	0,412	
		3	0,396	
	7	1	0,688	0,700
		2	0,692	
		3	0,720	
	9	1	0,478	0,457
		2	0,438	
		3	0,456	
	11	1	0,296	0,313
		2	0,334	
		3	0,308	

Grafik hubungan rata-rata regangan maksimum, pada variasi waktu gesek untuk masing-masing tekanan gesek, seperti pada Gambar 5.6.



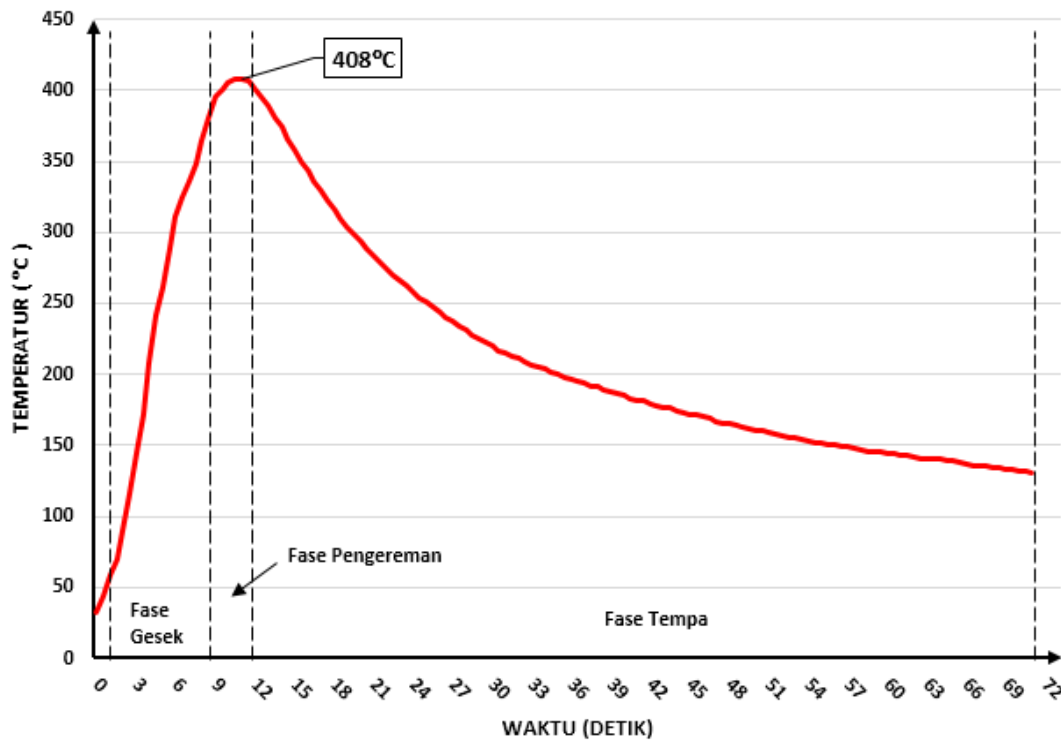
Gambar 5.6. Rata-rata Regangan Maksimum pada Variasi Waktu Gesek

Dari grafik pada Gambar 5.6, terlihat bahwa regangan maksimum terbesar yang terjadi pada sambungan las gesek dalam penelitian ini, sebesar 0,7%, yakni pada tekanan gesek 40 MPa, dan waktu gesek 7 detik. Regangan maksimum terbesar terjadi pada saat kekuatan tarik sambungan terbesar untuk setiap tekanan gesek.

Grafik regangan maksimum terhadap variasi waktu gesek, mempunyai pola yang sama dengan grafik kekuatan tarik maksimum terhadap variasi waktu gesek. Regangan maksimum membesar dengan semakin lamanya waktu gesek, hingga mencapai waktu gesek tertentu yang menghasilkan sambungan dengan regangan terbesar. Penambahan durasi waktu gesek setelah itu, akan menyebabkan regangan maksimum sambungan, mengecil. Semakin tingginya tekanan gesek, Nilai regangan maksimumnya juga bertambah besar. Kecenderungan yang sama seperti ini juga terdapat pada hubungan antara kekuatan tarik terhadap variasi waktu gesek.

5.4 Temperatur pada Proses Pengelasan

Grafik temperatur proses las gesek pada tekanan gesek 40 MPa pada waktu gesek 7 detik dengan kekuatan tarik rata-rata 186,99 MPa seperti pada Gambar 5.7. Garfik temperatur proses lainnya untuk tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa, 40 MPa, untuk setiap variasi waktu gesek, seperti pada Lampiran 18 sampai Lampiran 22.



Gambar 5.7. Grafik Temperatur pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik

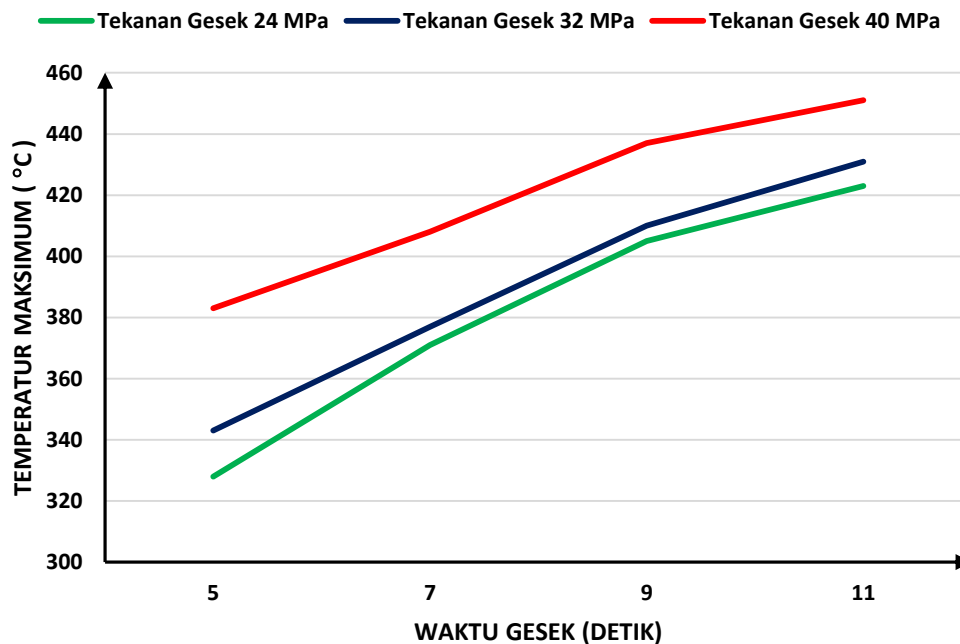
Dari grafik temperatur proses, terlihat bahwa pola perubahan temperatur terhadap waktu proses, menunjukkan pola yang sama untuk setiap variasi tekanan gesek dan variasi waktu gesek. Temperatur tertinggi yang terjadi, berbeda-beda untuk setiap variasi tekanan gesek dan waktu gesek. Waktu dan tekanan gesek pada setiap proses pengelasan gesek ini, berbanding lurus dengan besar energi termal yang dibangkitkan, seperti ditunjukkan pada persamaan (2.5). Besar energi termal yang dibangkitkan terlihat pada kenaikan temperatur yang terukur pada masing-masing proses ini.

Temperatur tertinggi selalu terjadi pada beberapa saat, setelah fase gesek, yakni terjadi pada fase pengereman. Hal ini terjadi karena pada saat pengereman, tekanan gesek dinaikan untuk mencapai tekanan tempa, dan masih terdapat sisa putaran pada permukaan gesek. Torsi perlawanan pada permukaan gesek meningkat, akibat meningkatnya gaya tekan normal, pada permukaan gesek.

Temperatur maksimum proses pada setiap variasi waktu gesek untuk Setiap tekanan gesek seperti Tabel 5.9 dan grafik pada Gambar 5.8.

Tabel 5.9. Temperatur Maksimum pada Proses terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek

WAKTU GESEK	TEMPERATUR MAKSIMUM PADA TEKANAN GESEK 24 MPa	TEMPERATUR MAKSIMUM PADA TEKANAN GESEK 32 MPa	TEMPERATUR MAKSIMUM PADA TEKANAN GESEK 40 MPa
5	328°C	343°C	383°C
7	371°C	377°C	408°C
9	405°C	410°C	437°C
11	423°C	431°C	451°C



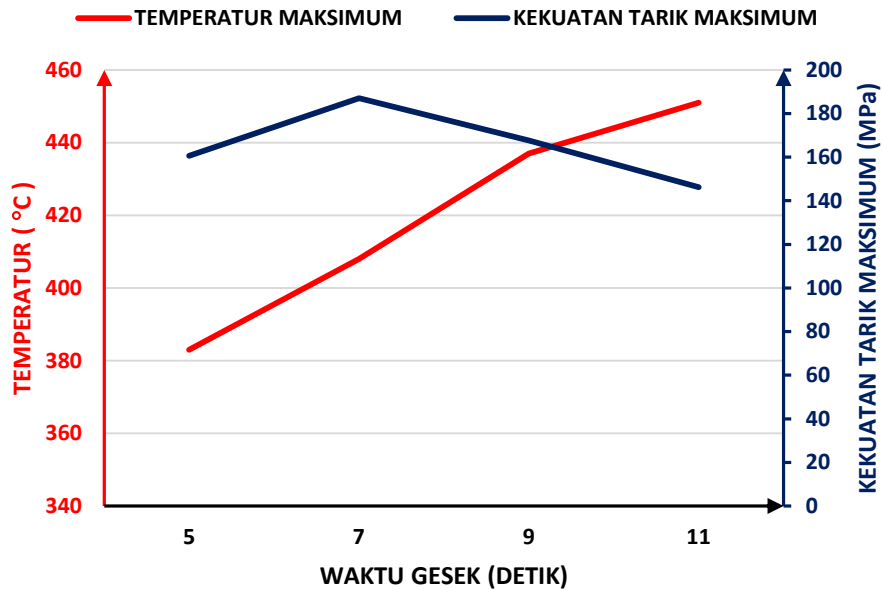
Gambar 5.8. Grafik Temperatur Maksimum Proses terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek

Temperatur maksimum proses, untuk setiap tekanan gesek, akan terus naik dengan semakin lamanya waktu gesek. Pada grafik Gambar 5.8, terlihat bahwa kenaikan temperatur setelah waktu gesek 9 detik, mengalami kenaikan dengan laju yang lebih kecil, dari laju kenaikan temperatur dibawah waktu gesek 9 detik, untuk setiap tekanan gesek. Proses gesek yang semakin lama menyebabkan kekasaran permukaan gesek menurun, koefisien gesek kinetis mengecil, dan temperatur yang semakin tinggi, menyebabkan terjadinya pelunakan pada permukaan gesek. Semakin lama waktu gesek, juga menyebabkan panas yang dihasilkan dari proses gesekan, akan semakin menyebar ke keseluruhan badan benda kerja. Hal-hal ini menyebabkan laju kenaikan temperatur setelah waktu gesek 9 detik, menjadi lebih kecil.

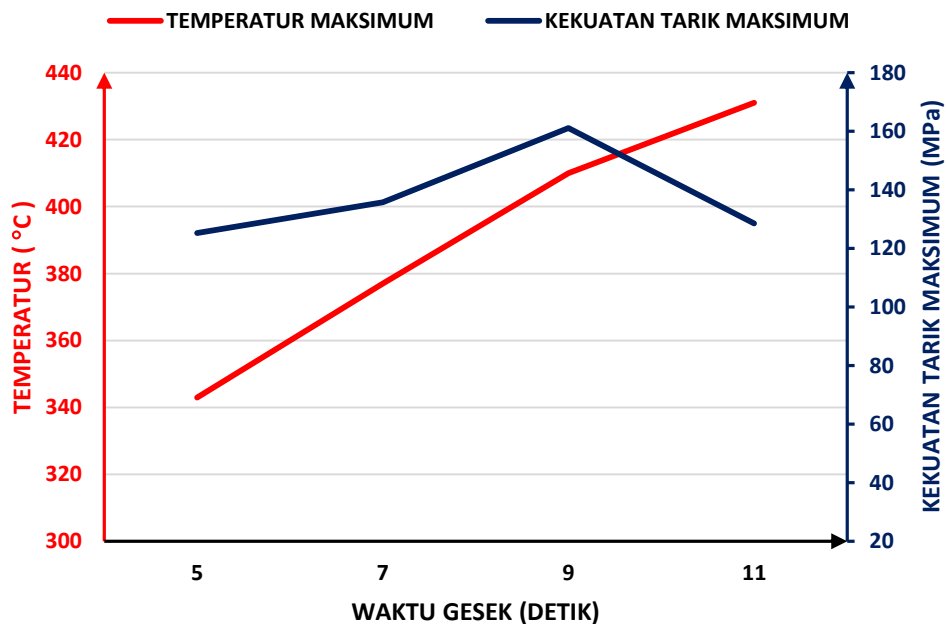
Tekanan gesek yang lebih tinggi, menghasilkan temperatur proses, yang lebih tinggi, untuk setiap waktu gesek yang sama.

5.5 Kekuatan Tarik Sambungan dan Temperatur Proses

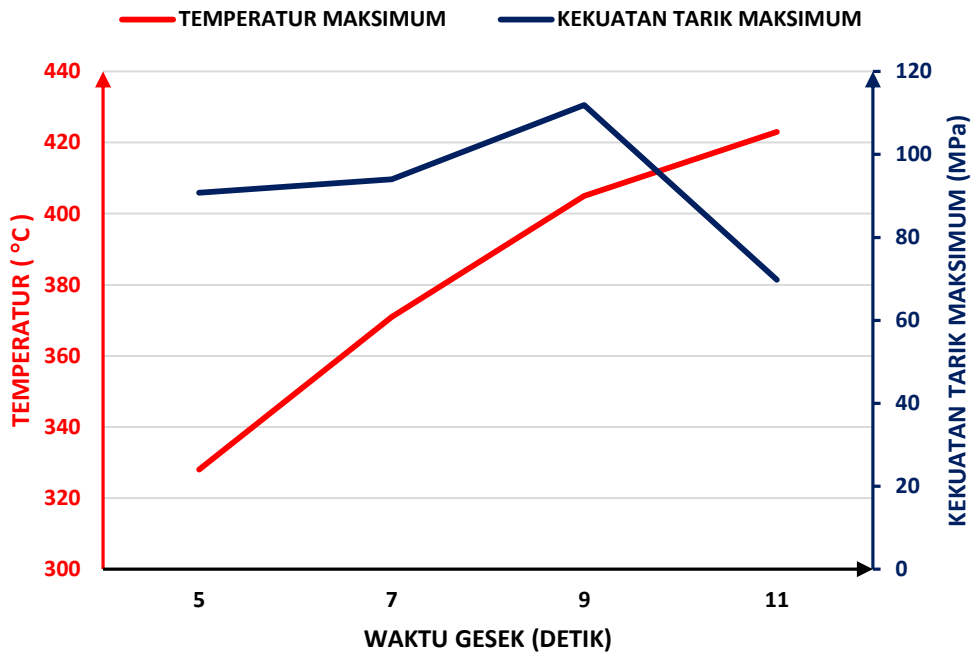
Untuk melihat hubungan temperatur proses, terhadap kekuatan tarik sambungan, pada variasi waktu gesek, dapat dilihat pada grafik Gambar 5.9 sampai Gambar 5.11.



Gambar 5.9. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa

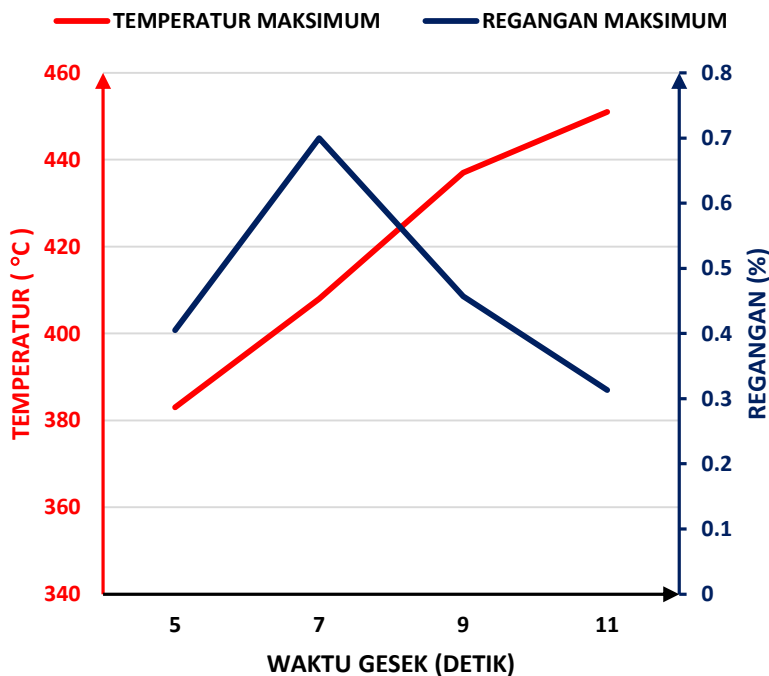


Gambar 5.10. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa

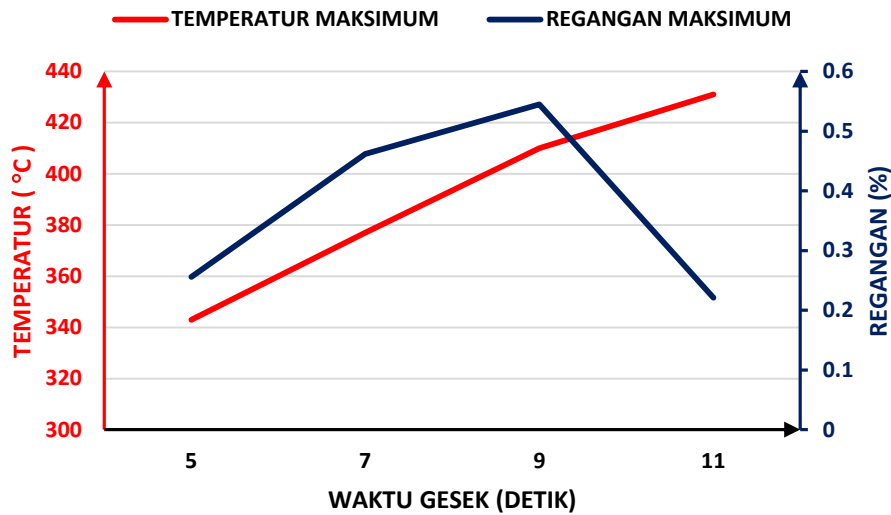


Gambar 5.11. Temperatur Maksimum dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa

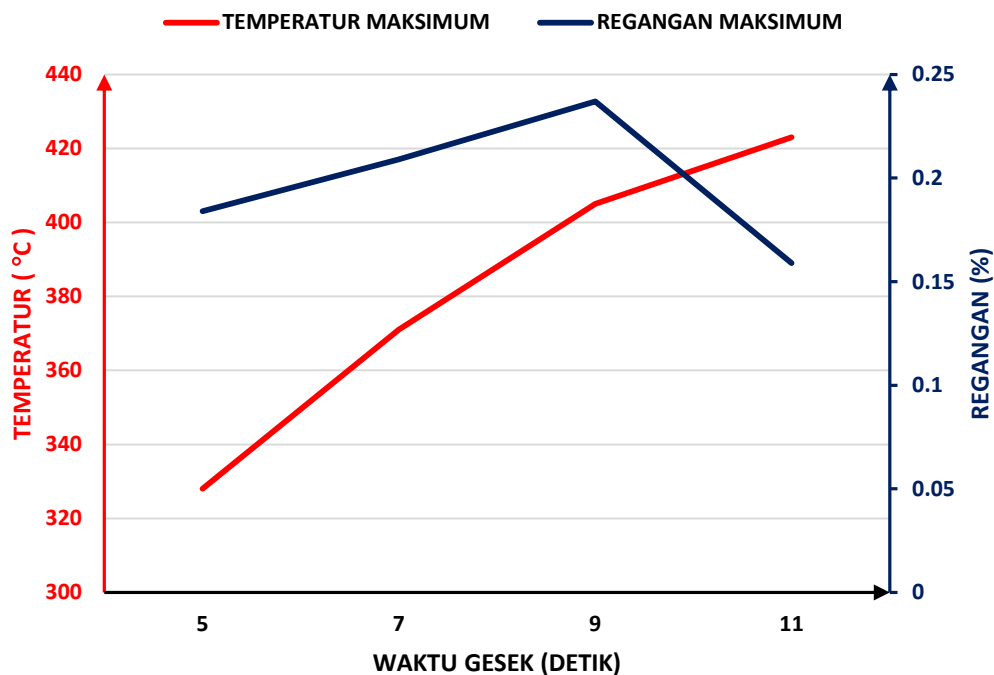
Hubungan temperatur proses, terhadap regangan maksimum sambungan, pada variasi waktu gesek, dapat dilihat pada grafik Gambar 5.12 sampai Gambar 5.14.



Gambar 5.12. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa



Gambar 5.13. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa



Gambar 5.14. Temperatur Maksimum dan Regangan Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa

Kekuatan tarik terbesar dari sambungan, tidak terjadi pada proses las gesek dengan temperatur proses yang tertinggi. Untuk tekanan gesek 40 MPa, kekuatan tarik sambungannya sebesar 186,99 MPa, yang terjadi pada proses las gesek dengan waktu gesek 7 detik, dengan temperatur maksimum proses 408°C. Temperatur maksimum proses, terus meningkat menjadi 437°C untuk waktu gesek 9 detik, dan menjadi 451°C, untuk waktu

gesek 11 detik, tetapi kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk, justru menurun menjadi 167,71 MPa untuk waktu gesek 9 detik, dan 146,24 MPa untuk waktu gesek 11 detik. Untuk tekanan gesek 32 MPa, dan 24 MPa, juga menunjukkan hubungan yang sama. Kekuatan tarik sambungan terbesar terjadi pada proses dengan waktu gesek 9 detik, dan penerapan waktu gesek yang lebih lama yaitu 11 detik, akan menghasilkan temperatur proses yang lebih tinggi, tetapi kekuatan tarik dari sambungannya menurun.

Regangan maksimum yang terbesar dari sambungan, juga tidak terjadi pada proses las gesek, dengan temperatur proses yang tertinggi. Untuk tekanan gesek 40 MPa, regangan maksimum sambungan sebesar 0,7% yang terjadi pada proses las gesek dengan waktu gesek 7 detik, dengan temperature maksimum 408⁰C. Pada proses las gesek dengan waktu gesek yang lebih lama dari 7 detik, temperatur maksimum proses meningkat menjadi 437⁰C dan 451⁰C, tetapi regangan maksimum sambungan, menurun menjadi 0,407% dan 0,313%.

5.6 Material yang Terdeformasi Menjadi *Flash*

Laju material yang terdeformasi menjadi *flash* dalam las gesek dapat diamati dari perubahan panjang benda kerja, sebelum dan sesudah proses las gesek, disebut dengan *burn of length* (BOL).

Tabel 5.10. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 40 MPa

WAKTU GESEK (DETIK)	BENDA UJI	PANJANG BENDA UJI BAJA KARBON (mm)	PANJANG BENDA UJI AA6061 (mm)	PANJANG SEBELUM PENGELASAN (mm)	PANJANG SETELAH PENGELASAN (mm)	BURN OF LENGTH (BOL) (mm)	RATA-RATA BOL (mm)
5	1	110,3	101,1	211,4	198,8	12,6	13,2
	2	110,3	101,4	211,7	198,1	13,6	
	3	110,2	97,8	208	194,9	13,1	
	4	110,2	101,1	211,3	198,8	12,5	
	5	110,1	101,2	211,3	197,2	14,1	
7	1	110,8	99,5	210,3	188,1	22,2	22,4
	2	110,2	100,3	210,5	188,6	21,9	
	3	110,2	98,6	208,8	186,5	21,3	
	4	108,5	100,2	208,7	186,3	22,4	
	5	109,1	100,2	209,3	186,1	23,2	
9	1	110,3	99,5	209,8	184,9	24,9	25,5
	2	110,3	100,4	210,7	184,5	26,2	
	3	110,1	99,5	209,6	184,1	25,5	
	4	110,2	99,5	209,7	184,3	25,4	
	5	110,2	110,3	220,5	194,9	25,6	
11	1	110,3	100,1	210,4	180,2	30,2	29,9
	2	110,1	99,8	209,9	180,2	29,7	
	3	110,2	100,2	210,4	180,3	29,7	
	4	110,1	99,8	209,9	179,6	30,3	
	5	110,1	100,1	210,2	180,3	29,6	

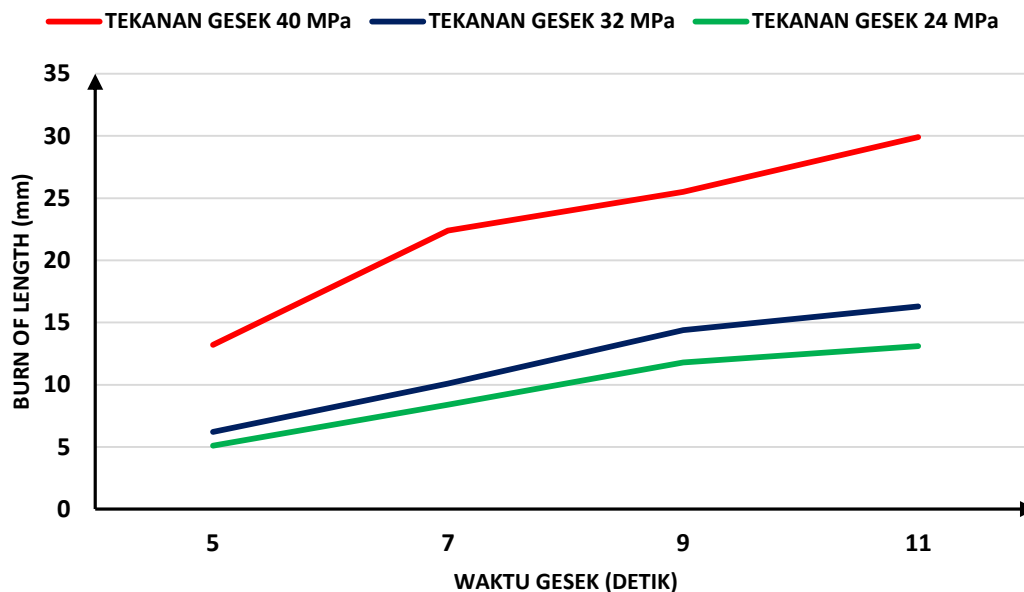
Tabel 5.11. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 32 MPa

WAKTU GESEK (DETIK)	BENDA UJI	PANJANG BENDA UJI BAJA KARBON (mm)	PANJANG BENDA UJI AA6061 (mm)	PANJANG SEBELUM PENGELASAN (mm)	PANJANG SETELAH PENGELASAN (mm)	BURN OF LENGTH (BOL) (mm)	RATA-RATA BOL (mm)
5	1	110,5	101,8	212,3	205,8	6,5	6,2
	2	111,1	101,7	212,8	207,4	5,4	
	3	110,3	102,0	212,3	206,1	6,2	
	4	110,6	101,9	212,5	205,2	7,3	
	5	110,1	101,4	211,5	206,1	5,4	
7	1	110,1	87,1	197,2	188,1	9,1	10,1
	2	110,3	101,1	211,4	199,8	11,6	
	3	110,1	102,0	212,1	202,2	9,9	
	4	109,8	101,9	211,7	201,8	9,9	
	5	110,6	101,9	212,5	202,3	10,2	
9	1	110,4	101,1	211,5	197,5	14,0	14,4
	2	110,7	101,9	212,6	198,1	14,5	
	3	110,7	101,8	212,5	198,9	13,6	
	4	110,6	101,8	212,4	197,7	14,7	
	5	110,6	101,8	212,4	197,3	15,1	
11	1	109,8	90,3	200,1	184,1	16,0	16,3
	2	110,4	101,1	211,5	195,4	16,1	
	3	110,1	101,8	211,9	195,6	16,3	
	4	110,8	101,7	212,5	196,4	16,1	
	5	110,1	102,3	212,4	195,2	17,2	

Tabel 5.12. Panjang Material yang Terdeformasi pada Tekanan Gesek 24 MPa

WAKTU GESEK (DETIK)	BENDA UJI	PANJANG BENDA UJI BAJA KARBON SEDANG (mm)	PANJANG BENDA UJI AA6061 (mm)	TOTAL PANJANG SEBELUM PENGELASAN (mm)	PANJANG SETELAH PENGELASAN (mm)	BURN OF LENGTH (BOL) (mm)	RATA-RATA BOL (mm)
5	1	110,4	101,1	211,5	206,4	5,1	5,1
	2	109,1	101,2	210,3	205,1	5,2	
	3	110,0	101,2	211,2	206,3	4,9	
	4	109,3	101,4	210,7	205,9	4,8	
	5	110,5	101,2	211,7	206,4	5,3	
7	1	110,8	101,2	212,0	203,4	8,6	8,4
	2	110,1	85,5	196,6	188,3	8,3	
	3	110,3	100,8	211,1	201,9	9,2	
	4	110,4	101,2	211,6	204,3	7,3	
	5	110,0	101,1	211,1	201,6	8,5	
9	1	110,3	101,2	211,5	199,6	11,9	11,8
	2	115,5	87,3	202,8	191,1	11,7	
	3	112,3	101,4	213,7	201,8	11,9	
	4	110,4	101,2	211,6	199,8	11,8	
	5	110,0	101,1	211,1	199,4	11,7	
11	1	110,2	101,2	211,4	198,6	12,8	13,1
	2	110,2	101,4	211,6	198,7	12,9	
	3	110,0	101,1	211,1	197,8	13,3	
	4	109,4	101,3	210,7	197,5	13,2	
	5	110,4	101,5	211,9	198,8	13,1	

Grafik rata-rata BOL untuk setiap variasi waktu gesek, pada masing-masing tekanan gesek, seperti pada Gambar 5.15.



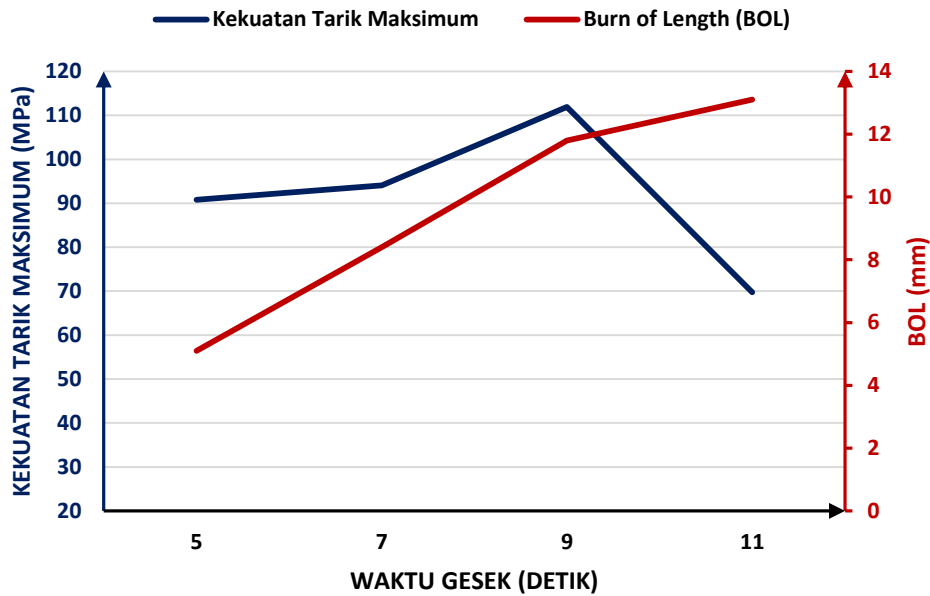
Gambar 5.15. Grafik Rata-Rata BOL terhadap Variasi Waktu Gesek untuk Setiap Tekanan Gesek

Dari Grafik pada Gambar 5.15, dapat diketahui bahwa BOL bertambah besar dengan semakin besarnya waktu gesek, baik untuk tekanan gesek 24 MPa, 32 MPa dan 40 MPa. BOL lebih besar untuk tekanan gesek yang lebih besar.

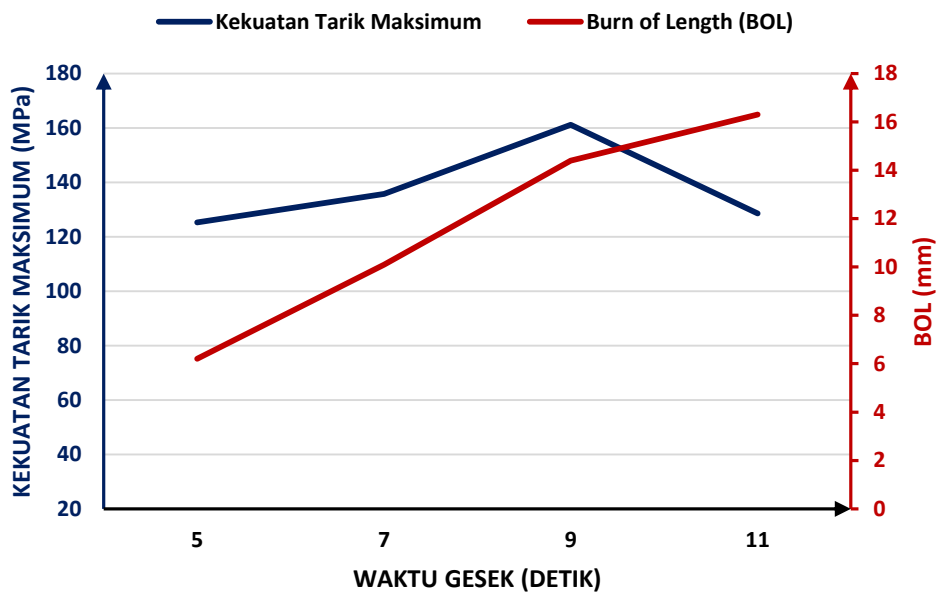
Laju pertambahan BOL tidak konstan selama waktu gesek 5 sampai 11 detik. Pada tekanan gesek 40 MPa, laju pertambahan BOL pada saat waktu gesek 5 detik sampai 7 detik lebih besar dari laju pertambahan BOL dalam selang waktu gesek 7 detik sampai 11 detik. Pada tekanan gesek 24 MPa dan 32 MPa, laju pertambahan BOL terbesar terjadi selama selang waktu gesek 5 detik sampai 9 detik.

5.7 Burn of Length (BOL) dan Kekuatan Tarik Sambungan

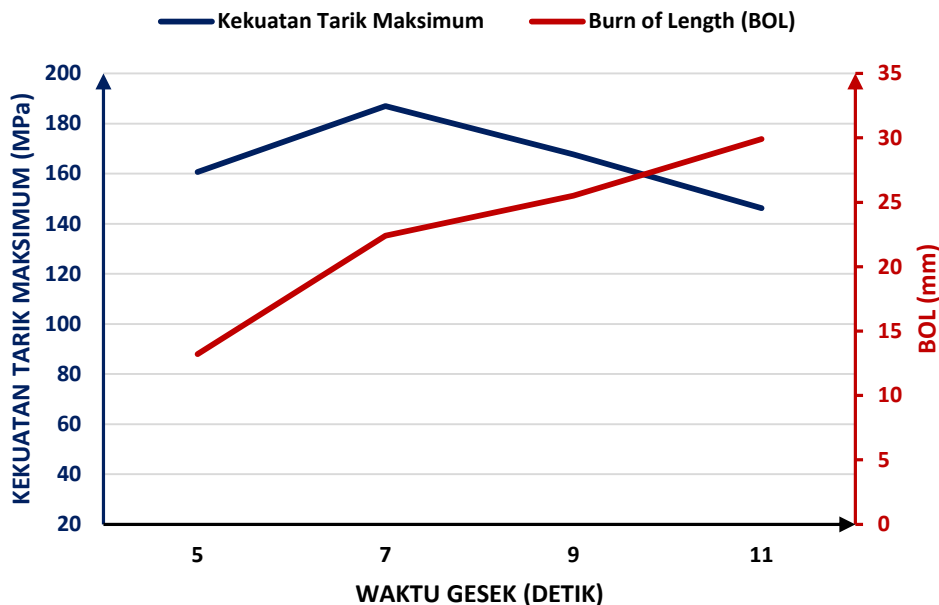
Hubungan antara BOL, terhadap kekuatan tarik sambungan, dapat dilihat pada grafik Gambar 5.16 sampai Gambar 5.18.



Gambar 5.16. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 24 MPa



Gambar 5.17. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 32 MPa



Gambar 5.18. Grafik BOL dan Kekuatan Tarik Maksimum terhadap Variasi Waktu Gesek pada Tekanan Gesek 40 MPa

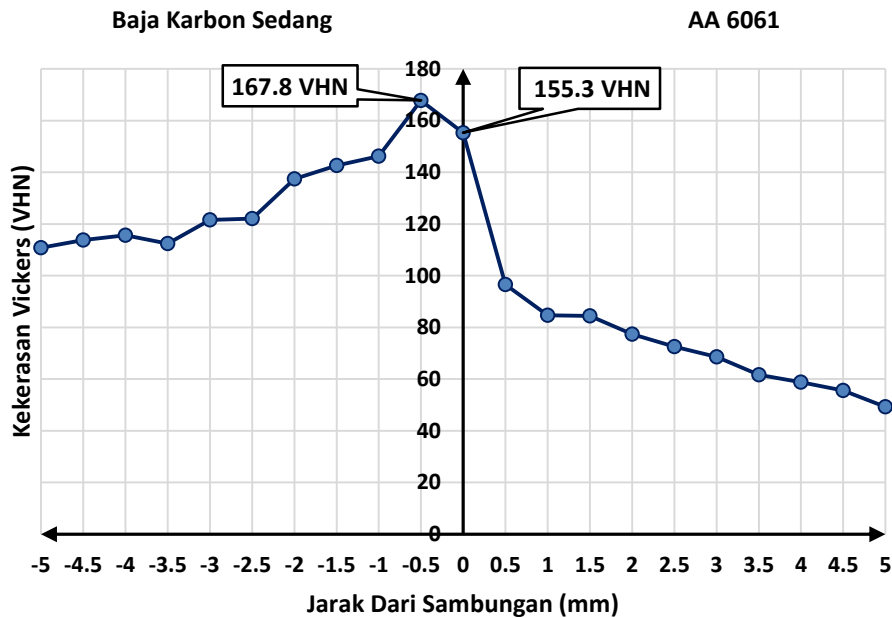
Dari grafik BOL dan kekuatan tarik sambungan, terhadap variasi waktu gesek, terlihat bahwa laju pertambahan BOL akan mengecil setelah sambungan mencapai kekuatan tarik yang terkuat. Pada tekanan gesek 40 MPa, kekuatan tarik sambungan terkuat terjadi pada proses pengelasan dengan waktu gesek 7 detik, dan pada proses pengelasan dengan waktu gesek 9 dan 11 detik, akan menghasilkan sambungan dengan kekuatan tarik yang lebih kecil. Laju pertambahan BOL pada proses pengelasan dalam selang waktu gesek 7 detik sampai 11 detik, tidak sebesar laju pertambahan BOL pada proses pengelasan dengan waktu gesek 5 detik sampai 7 detik.

Pada proses pengelasan dengan tekanan gesek 32 MPa dan 24 MPa, kekuatan tarik terkuat dari sambungan terjadi pada proses pengelasan dengan waktu gesek 9 detik, dan pada proses pengelasan dengan waktu gesek 11 detik, kekuatan tarik sambungannya menjadi lebih kecil. Laju pertambahan BOL dari proses pengelasan dalam selang waktu gesek 9 sampai 11 detik, lebih kecil dari laju pertambahan BOL pada proses pengelasan dengan waktu gesek 5 sampai 9 detik.

Laju pertambahan BOL akan mulai mengecil, pada waktu gesek tertentu, setelah proses pengelasan mencapai kekuatan tarik sambungan yang terkuat, untuk setiap variasi tekanan gesek.

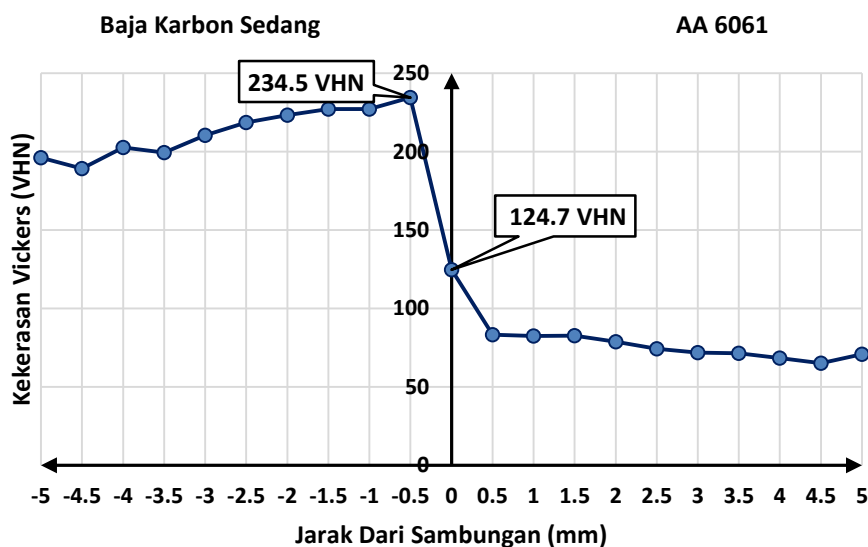
5.8 Hasil Pengujian Kekerasan

Grafik hasil pengujian kekerasan *vickers* pada sambungan benda uji dengan kekuatan tarik terkuat, yakni pada benda uji dengan tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, pada temperatur maksimum yang terjadi 408°C , seperti Gambar 5.19.



Gambar 5.19. Grafik Nilai Kekerasan Vickers pada Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 7 detik

Grafik hasil pengujian kekerasan *vickers* pada sambungan benda uji dengan kekuatan tarik terlemah, yakni pada benda uji dengan tekanan gesek 24 MPa, waktu gesek 11 detik, dan temperatur maksimum yang terjadi 423°C , seperti Gambar 5.20.



Gambar 5.20. Grafik Nilai Kekerasan Vickers pada Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 11 detik

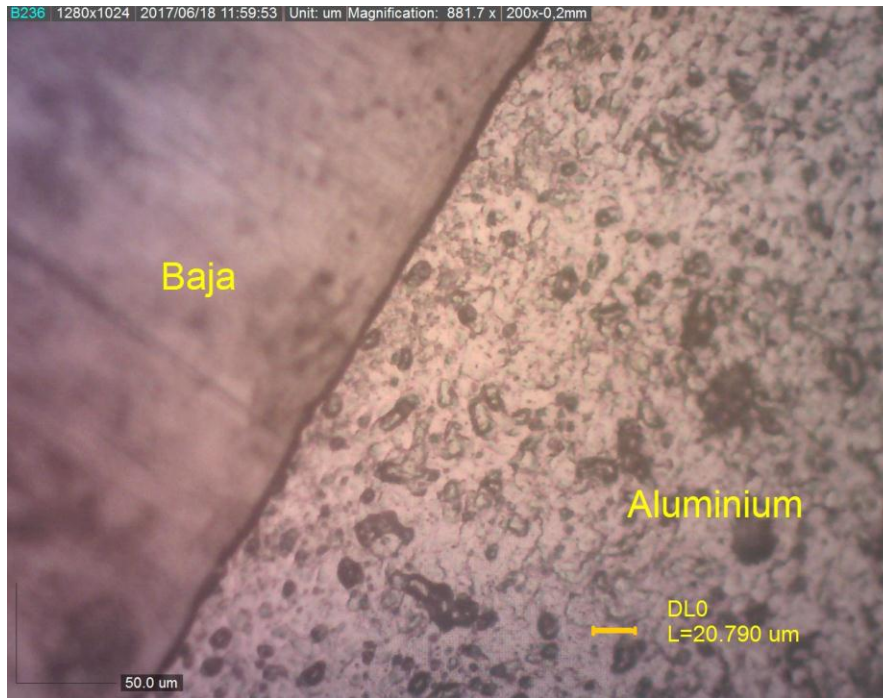
Dari kedua grafik hasil pengujian kekerasan *vickers* pada sambungan pengelasan dengan kekuatan tarik terkuat dan terlemah, terlihat bahwa nilai kekerasan *vickers* pada titik tepat pada batas sambungn pengelasan, untuk benda uji dengan kekuatan tarik terkuat adalah sebesar 155,3 VHN, dan untuk benda uji dengan kekuatan tarik terlemah adalah sebesar 124,7 VHN. Benda uji dengan kekuatan tarik terkuat, mempunyai nilai kekerasan pada titik di daerah sambungan, yang lebih tinggi dari nilai kekerasan benda uji dengan kekuatan tarik terlemah.

Nilai kekerasan *vickers*, pada batas sambungan dengan kekuatan tarik terkuat yakni 155,3 VHN, dihasilkan pada proses dengan temperatur maksimum 408°C pada waktu gesek 7 detik, sedangkan pada sambungan terlemah, nilai kekerasan *vickers* nya lebih kecil yakni 124,7 VHN, dengan temperatur proses maksimum yang lebih besar yakni 423°C , yaitu pada waktu gesek 11 detik. Pada titik yang tepat pada daerah sambungan, untuk benda kerja dengan kekuatan tarik yang lebih besar, nilai kekerasannya akan lebih besar. Pada titik yang tepat di daerah sambungan, temperatur maksimum proses pengelasan yang lebih tinggi, tidak menghasilkan sambungan dengan nilai kekerasan yang lebih tinggi juga.

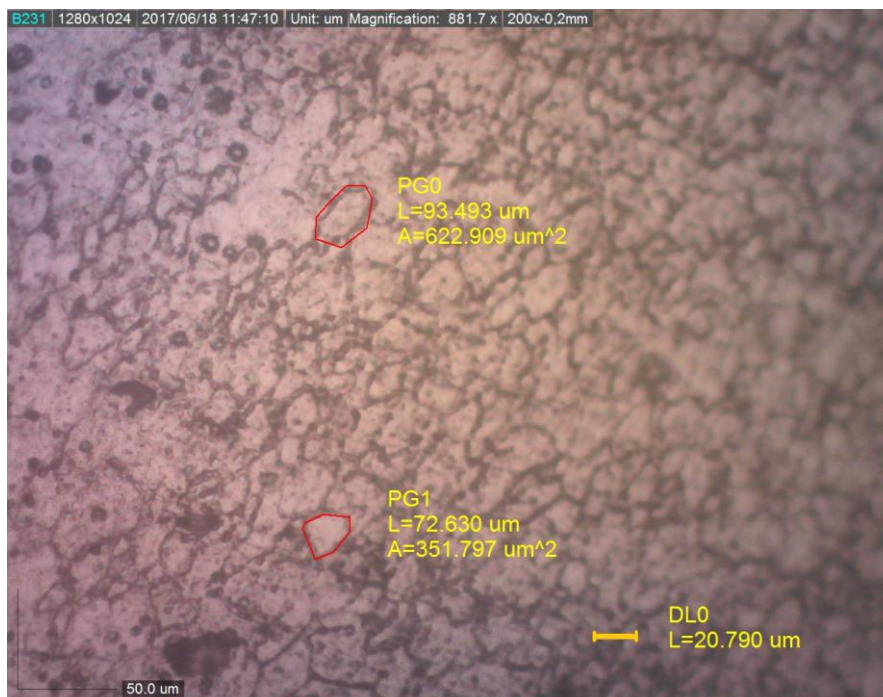
Pada titik-titik diluar batas sambungan, temperatur maksimum yang terjadi pada proses pengelasan dan lamanya proses gesek, berpengaruh terhadap nilai kekerasan *vickers* yang maksimum, dan laju penurunan nilai kekerasan pada daerah yang semakin jauh dari batas sambungan. Semakin tinggi temperatur proses dan semakin lama proses penggesekan, maka nilai kekerasan maksimum diluar daerah batas sambungan, akan semakin tinggi, dan laju penurunan nilai kekerasannya lebih kecil, jika dibandingkan dengan suatu proses, dengan temperatur proses yang lebih rendah dengan lama proses penggesekan yang lebih singkat. Pada proses penggesekan yang lebih singkat, nilai kekerasan pada titik-titik yang menjauh daerah batas, dengan cepat menurun nilai kekerasannya. Semakin tinggi temperatur maksimum proses dan semakin lama proses gesek, akan menyebabkan penyebaran panas yang semakin merata, menjauhi permukaan gesek, yang mana ini ditunjukan oleh distribusi nilai kekerasan yang cenderung merata pada titik-titik yang menjauh dari batas sambungan, pada kedua sisinya.

5.9 Hasil Foto Mikro

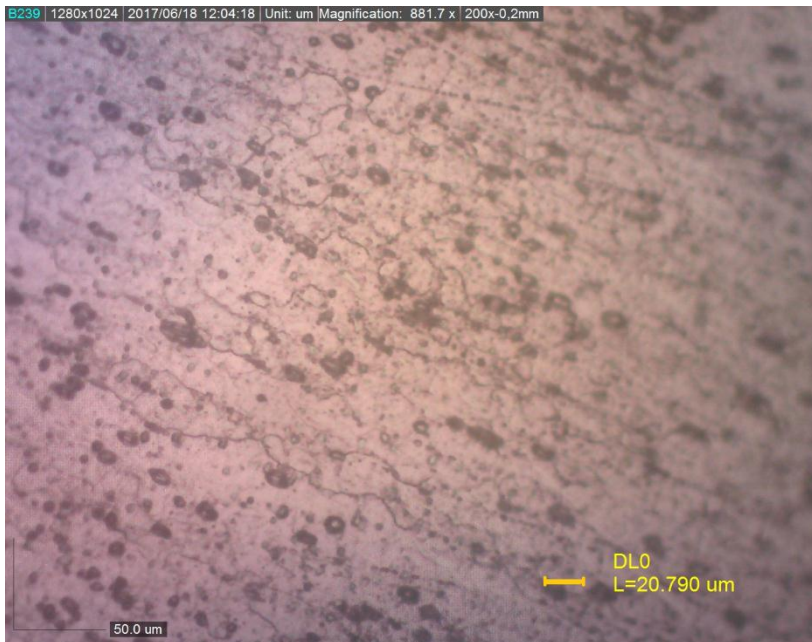
Foto mikro dilakukan dengan pembesaran 200 kali. Foto mikro pada benda uji untuk proses dengan tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum 408°C , pada sisi AA6061 seperti Gambar 5.21 sampai Gambar 5.23.



Gambar 5.21. Foto Mikro Daerah Batas Sambungan pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061



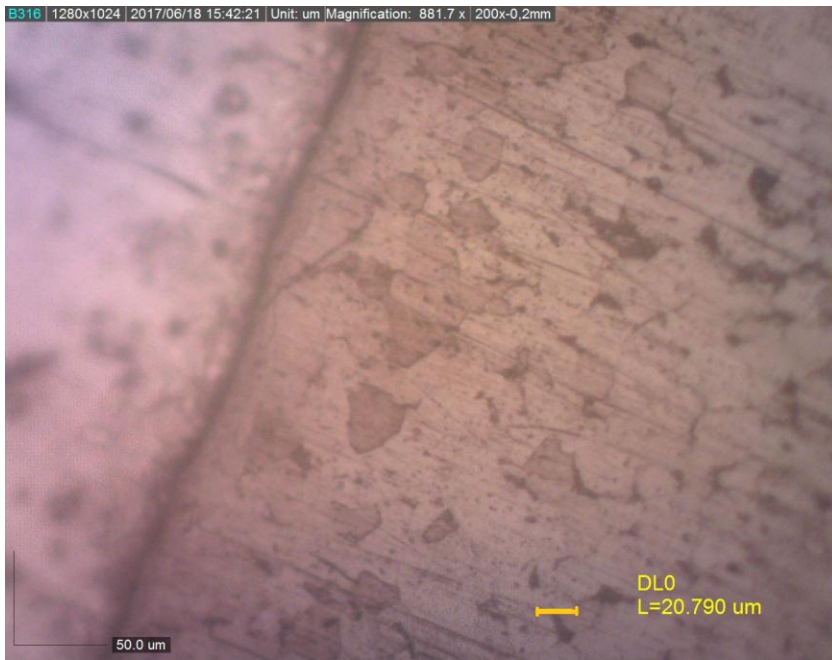
Gambar 5.22. Foto Mikro Daerah HAZ pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061



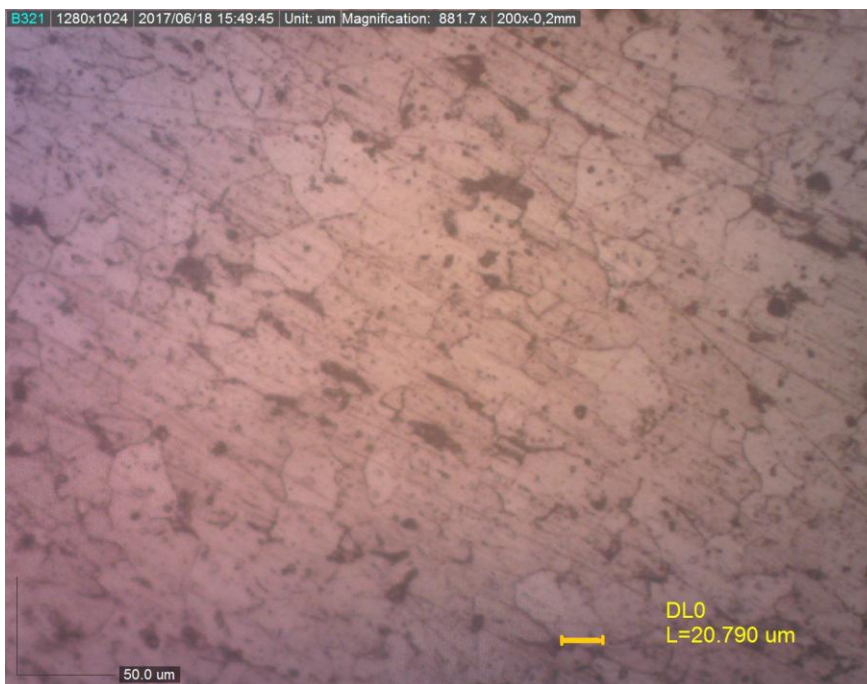
Gambar 5.23. Foto Mikro Daerah *Base Metal* pada Proses dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi AA 6061

Ukuran butiran pada daerah sekitar batas di sisi AA6061, lebih kecil dan merata, jika dibandingkan dengan ukuran butiran pada daerah pengaruh panas (HAZ). Ukuran butiran pada daerah HAZ lebih kecil jika dibandingkan dengan ukuran butiran pada *base metal*. Pada daerah batas sambungan, mengalami panas dengan temperatur yang lebih tinggi, dan juga laju pendinginan yang lebih cepat, jika dibandingkan pada daerah HAZ dan *base metal*.

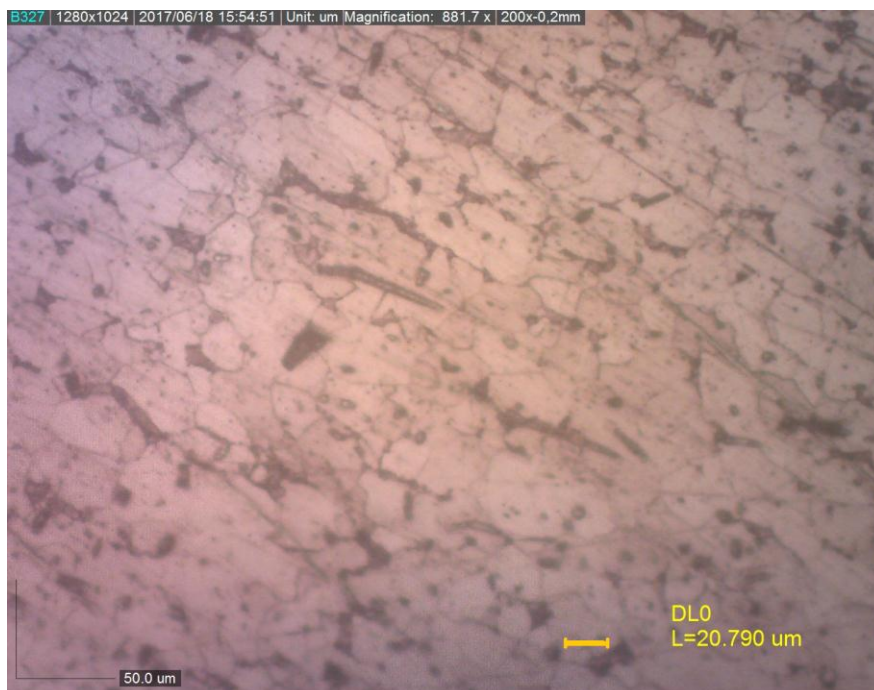
Foto mikro pada benda uji untuk proses dengan tekanan gesek 40 MPa, waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum 408°C , pada sisi baja karbon seperti Gambar 5.24 sampai Gambar 5.26.



Gambar 5.24. Foto Mikro Daerah Sambungan untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja



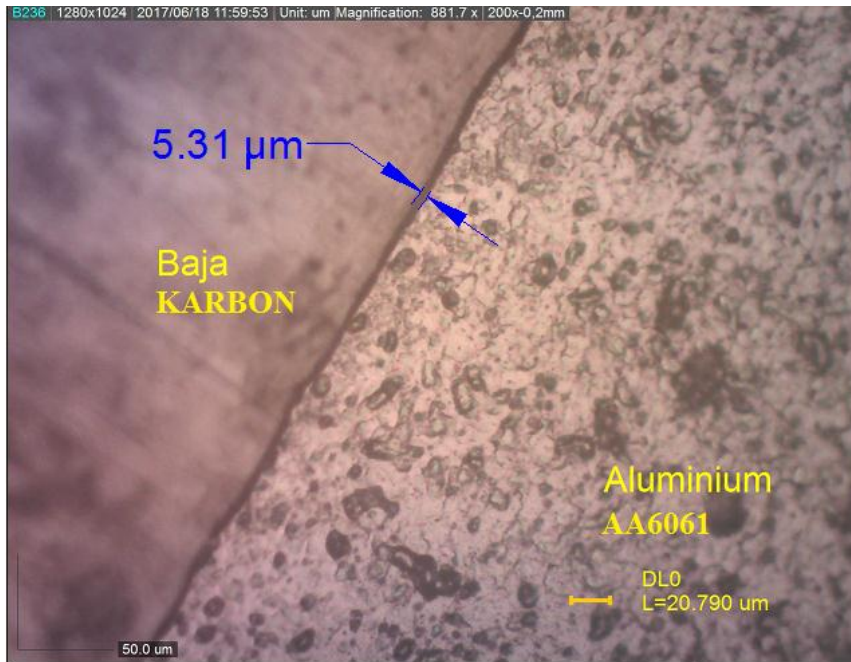
Gambar 5.25. Foto Mikro Daerah HAZ untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja



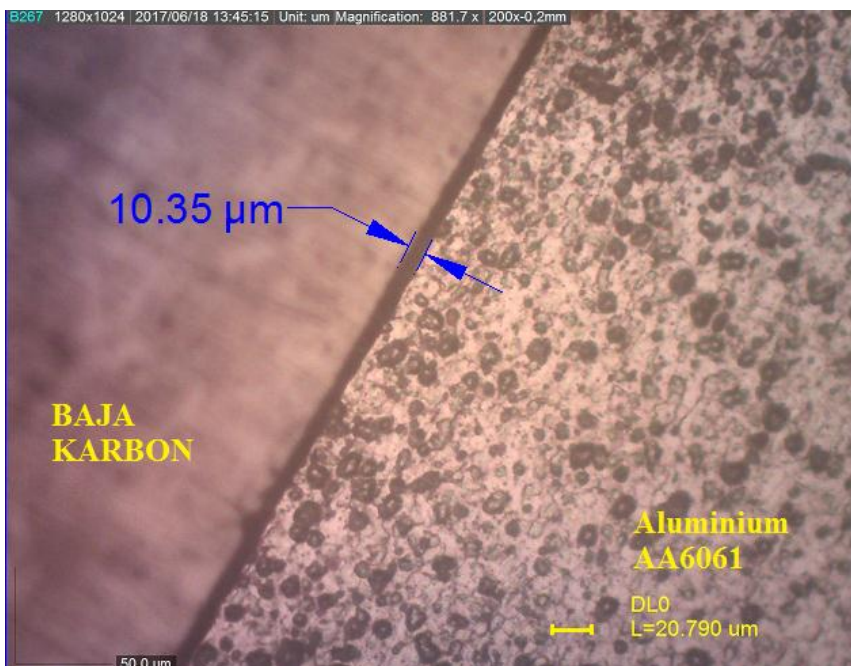
Gambar 5.26. Foto Mikro Daerah *Base* untuk Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik pada Sisi Baja

Pada sisi baja karbon, baik pada daerah sekitar batas sambungan, HAZ dan *base metal*, tidak terlalu tampak adanya perubahan ukuran butiran. Pada sisi baja karbon, tingkat panas, lamanya pemanasan, dan laju pendinginnya belum signifikan dalam mempengaruhi ukuran butirannya.

Untuk proses dengan tekanan gesek 40 MPa, foto mikro daerah batas sambungan pada proses dengan waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum 408°C , yang menghasilkan kekuatan tarik rata-rata dari sambungan terbesar 186,99 MPa (Gambar 5.27), dibandingkan dengan proses pada waktu gesek 11 detik, temperatur maksimum 451°C , yang menghasilkan kekuatan tarik rata-rata dari sambungan 128,52 MPa (Gambar 5.28).



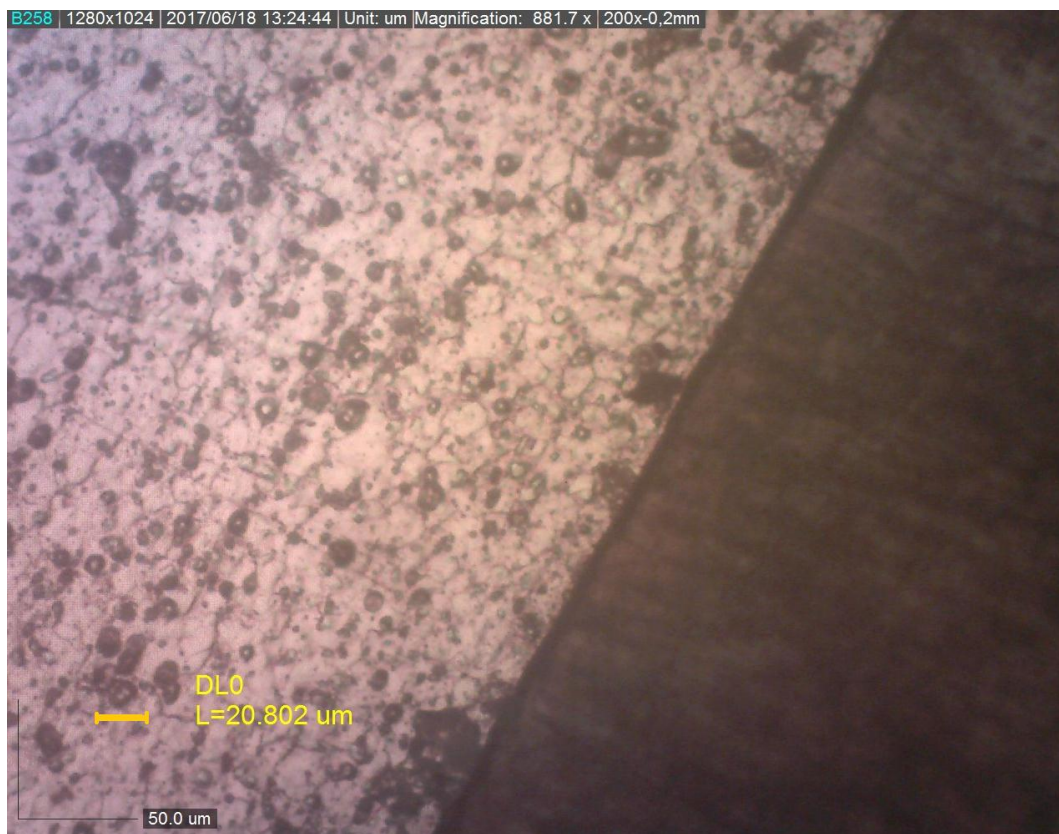
Gambar 5.27. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 7 Detik



Gambar 5.28. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 40 MPa, Waktu Gesek 11 Detik

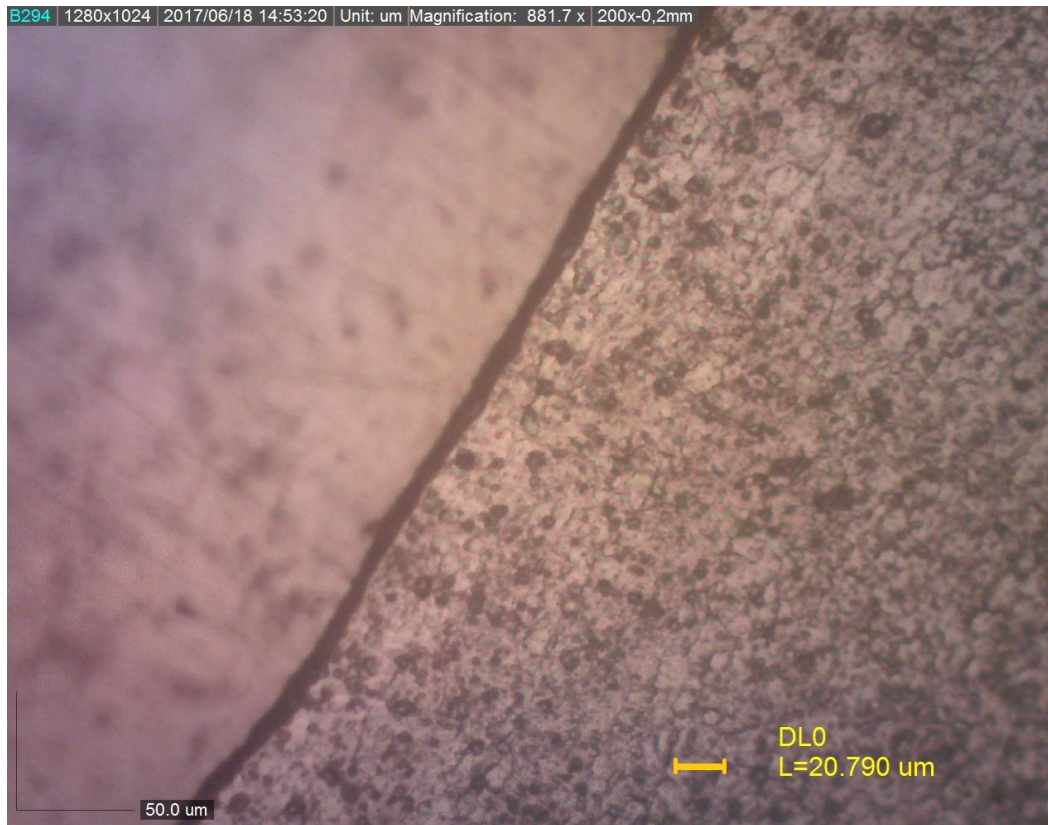
Pada Gambar 5.27 dan Gambar 5.28, pada batas sambungan dari proses dengan tekanan gesek 40 MPa, terlihat sebagai suatu garis berwarna gelap yang memanjang. Pada proses dengan waktu gesek 7 detik dan temperatur proses maksimum 408°C , garis warna gelap yang memanjang itu memiliki ketebalan $5,31 \mu\text{m}$ dan lebih tipis dari yang terdapat pada proses yang lebih lama, yakni pada proses dengan waktu gesek 11 detik, dengan temperatur

maksimum proses yang lebih tinggi, yaitu sebesar 451°C . Ketebalan lapisan ini $10,35\ \mu\text{m}$. Semakin tebal garis berwarna gelap yang memanjang pada batas sambungan, mengidentifikasi adanya suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas pada batas sambungannya. Lapisan yang bersifat getas ini, akan semakin banyak terbentuk pada batas sambungan, dari suatu proses dengan temperatur yang semakin.



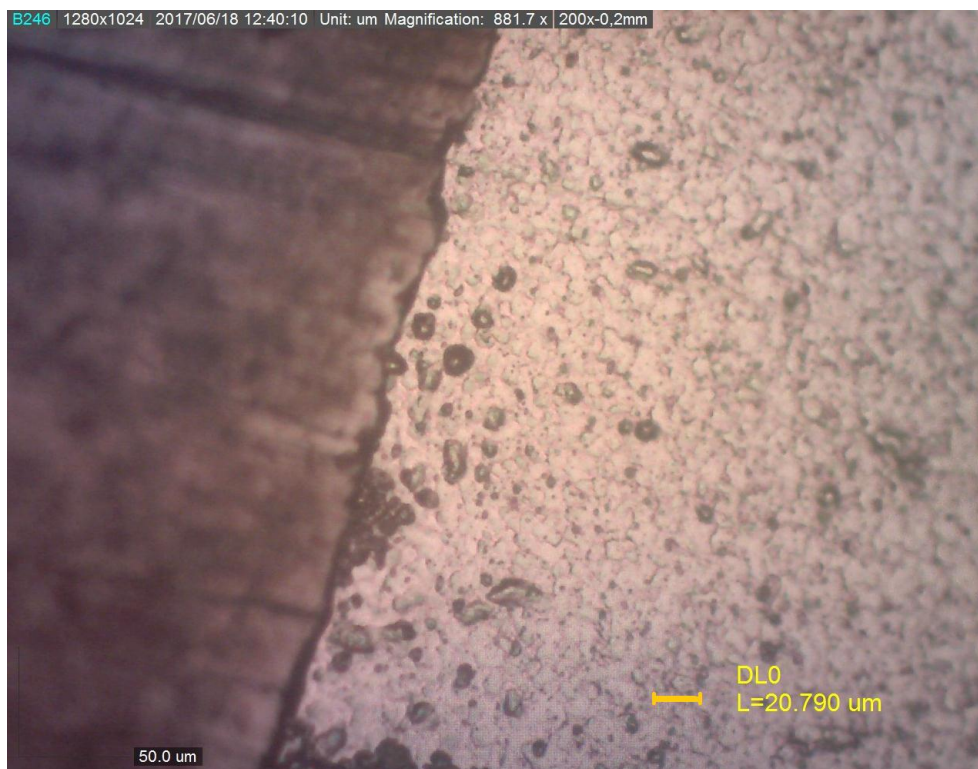
Gambar 5.29. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 32 MPa, Waktu Gesek 9 Detik

Terbentuknya lapisan yang bersifat getas ini, pada batas sambungan juga terlihat pada proses dengan tekanan gesek 32 MPa, lama penggesekan 9 detik, temperatur maksimum proses 410°C (Gambar 5.29), dan pada proses dengan lama penggesekan 11 detik, temperatur maksimum proses 431°C (Gambar 5.30), yang mana juga menunjukkan bahwa garis warna gelap yang memanjang pada batas sambungan, terlihat lebih tipis pada proses dengan waktu gesek 9 detik, jika dibandingkan dengan yang terdapat pada proses yang lebih lama, yakni pada proses dengan waktu gesek 11 detik dengan temperatur proses yang lebih tinggi.

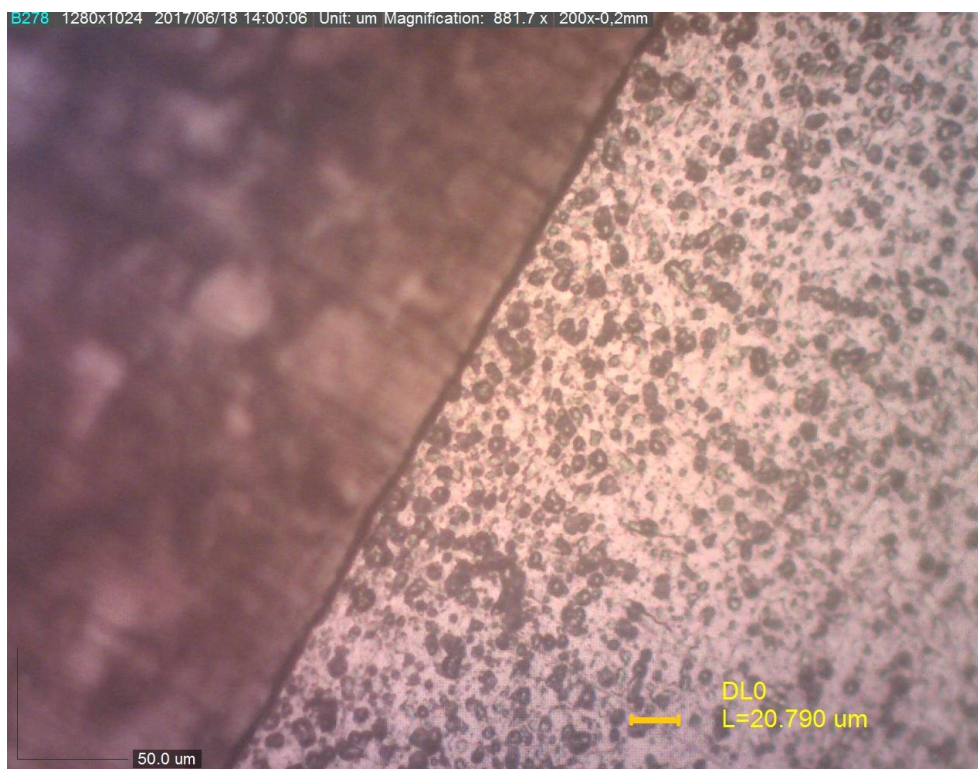


Gambar 5.30. Foto Mikro pada Batas Sambungan dengan Tekanan Gesek 32 MPa, Waktu Gesek 11 Detik

Pada tekanan gesek yang paling rendah dalam pengujian ini, yaitu 24 MPa, waktu gesek 9 detik, temperatur maksimum proses 405°C (Gambar 5.31), menunjukkan garis warna gelap yang memanjang pada batas sambungan, tidak merata ketebalannya. Pada batas sambungan yang tidak rata, pada belokang, atau tekukan batas sambungan, akan terjadi penimbunan panas. Akibatnya, akan terbentuknya lapisan yang bersifat getas dengan ketebalan yang tidak merata pada batas sambungan, akibat dari terjebaknya panas pada belokan atau tekukan batas sambungan. Pada proses dengan waktu gesek 11 detik, temperatur maksimum proses 423°C (Gambar 5.32), dengan batas sambungan yang rata tanpa belokan dan tekukan, maka lapisan yang bersifat getas ini, juga terbentuk secara merata disepanjang batas sambungan.



Gambar 5.31. Foto Mikro Sambungan dengan Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 9 Detik



Gambar 5.32. Foto Mikro Sambungan dengan Tekanan Gesek 24 MPa, Waktu Gesek 11 Detik

Lapisan yang bersifat getas ini, akan semakin tebal pada batas sambungan, dengan semakin tingginya temperatur yang terjadi pada batas sambungan, dan semakin lama panas itu diterapkan. Lapisan *intermetallic* yang bersifat getas ini, menurunkan kekuatan tarik dan meningkatkan kegetasan sambungan.

Senyawa *intermetallic* yang terbentuk pada sambungan tergantung dari tingginya temperatur dan persentasi atom Al dan Fe yang terdifusi pada daerah sambungan. Pada penelitian ini, temperatur proses las gesek berkisar dari 328⁰C sampai 451⁰C. Mengacu pada diagram kesetimbangan fasa Fe-Al pada Gambar 2.7, maka senyawa *intermetallic* yang terbentuk dapat berupa Fe₃Al, FeAl, FeAl₂, Fe₂Al₂, dan FeAl₃, yang tergantung dari persentasi atom Al dan Fe yang terdifusi.

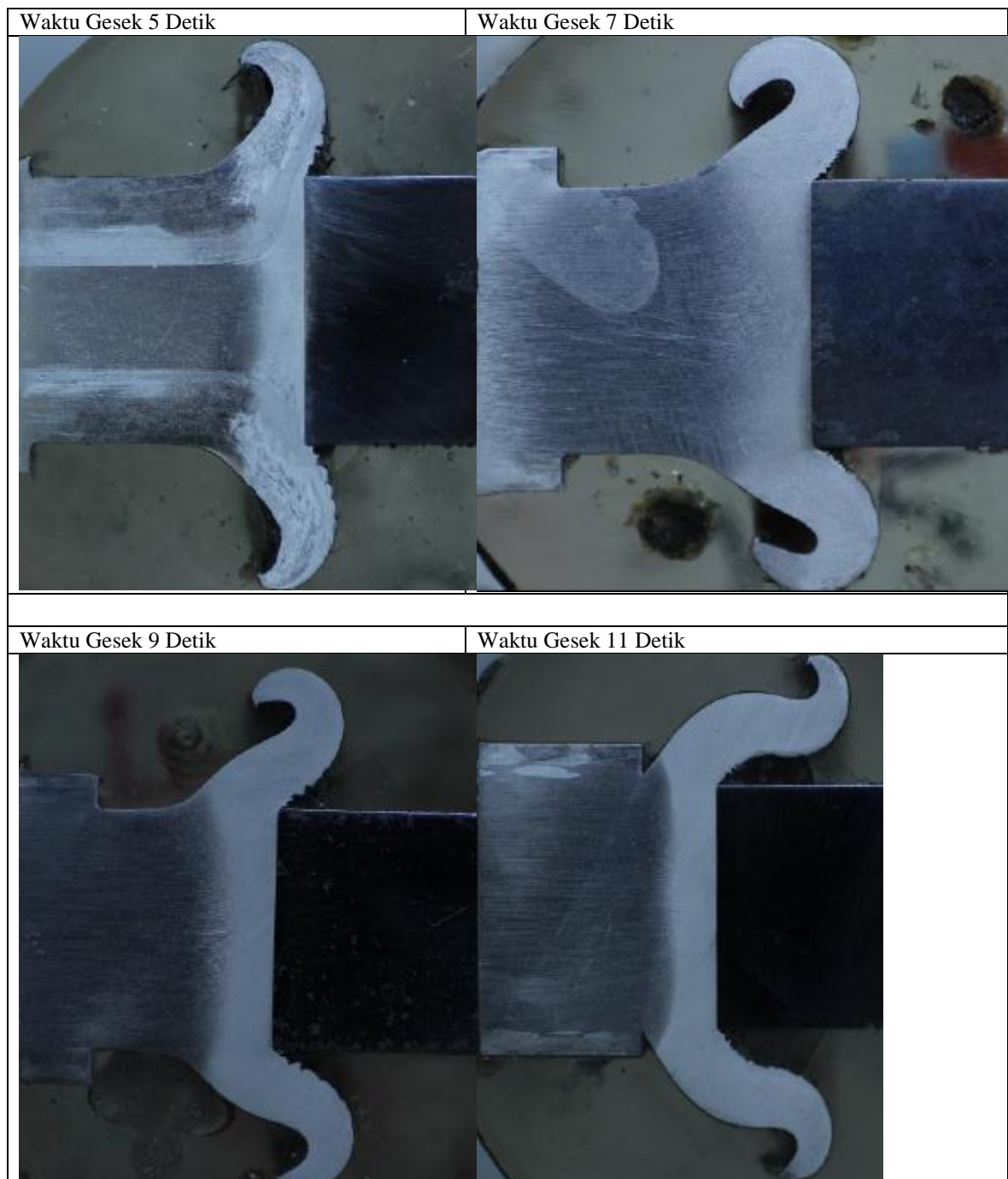
5.10 Hasil Foto Makro

Hasil foto makro sambungan las gesek AA6061 dan baja karbon pada tekanan gesek 40 MPa, pada variasi waktu gesek 5, 7, 9, dan 11 detik seperti foto pada Tabel 5.13.

Dari gambar-gambar pada Tabel 5.13, terlihat bahwa *flash* yang terjadi hanya pada bahan AA6061, dan pada baja karbon, tidak terbentuk *flash*. Hal ini disebabkan karena temperatur leleh AA6061 lebih rendah dari temperatur leleh baja karbon, dan kemampuan memindahkan panas pada AA6061 lebih besar dari kemampuan memindahkan panas baja karbon. Pada saat panas dibangkitkan di permukaan gesek, maka panas akan dengan cepat diserap ke sisi AA6061, dan pada AA 6061 akan cepat terjadi pelunakan. Akibat gaya tekan, maka material AA6061 yang telah terjadi pelunakan, akan mengalami deformasi yang membentuk *flash*, sedangkan pada sisi baja karbon, belum terjadi deformasi ini.

Bentuk *flash* yang simetris ini menunjukkan bahwa pada saat proses las gesek dilakukan, kedua benda kerja terletak sesumbu (kosentris), dan kedua permukaan gesek benda kerja, tegak lurus sumbu putar. Pada Gambar 5.33, tidak terlihat adanya keretakan makro, atau kecacatan lainnya seperti adanya lubang atau rongga yang besar pada batas sambungan.

Tabel 5.13. Foto Makro Sambungan Las Gesek AA6061 dan Baja Karbon pada Tekanan Gesek 40 MPa





Gambar 5.33. Batas Sambungan pada Proses Las gesek dengan Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik

5.11. Pembahasan

Proses las gesek *continuous drive* antara AA6061 dengan baja karbon, dimana variabel terkontrol dibuat bernilai tetap yaitu kecepatan putar permukaan gesek 1600 rpm, waktu tempa 60 detik, tekanan tempa 79 MPa dan variabel bebas yakni waktu gesek, dibuat bervariasi dari 5 detik, 7 detik, 9 detik, 11 detik untuk setiap variabel tekanan gesek, dan variabel terikatnya adalah kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk, maka kita akan mendapatkan hubungan pengaruh perubahan waktu gesek terhadap kekuatan tarik sambungan untuk setiap variasi tekanan gesek.

Untuk tekanan gesek 40 MPa, proses las gesek dengan waktu gesek 5 detik, temperatur maksimum proses 383°C , kekuatan tarik rata-rata dari sambungan 160,68 MPa. Pada proses ini, belum keseluruhan bidang kontak/ bidang gesek menjadi benar-benar rata. Luas dari bidang yang saling kontak belum merata diseluruh permukaan kontak. Panas yang dihasilkan dan lamanya pemanasan ini diterapkan pada permukaan kontak, sudah menyebabkan adanya

perpindahan atom-atom melewati/ menembusi permukaan kontak, melalui mekanisme difusi. Terjadi pengikatan antara kedua bidang kontak secara pengikatan difusi. Walau demikian, pengikatan yang terjadi, belum benar-benar kuat dimana difusi atom yang terjadi belum merata dan mendalam. Laju deformasi plastik (pembentukan *flash*) yang cepat, yang mana menunjukkan bahwa belum terjadi suatu kondisi setimbang (*equilibrium*) antara *strain hardening*, dan *termal softening*. Proses perataan yang belum cukup, panas yang dibangkitkan belum cukup, dan durasi pembangkitan panas, yang belum cukup untuk menghasilkan suatu pengikatan difusi yang kuat dan merata diseluruh bidang kontak.

Untuk Tekanan Gesek 40 MPa, proses las gesek dengan waktu gesek 7 detik, temperatur maksimum proses 408°C , kekuatan tarik rata-rata dari sambungan 186,99 MPa, yang merupakan kekuatan tarik terkuat dalam penelitian ini. Lama proses penggesekan sudah cukup untuk meratakan permukaan kontak, dan juga dengan lama proses penggesekan 7 detik, panas yang dibangkitkan menjadi lebih besar, jika dibandingkan proses dengan waktu gesek 5 detik. Terbentuk daerah kontak yang luas diantara kedua bidang kontak, akibat perataan bidang kontak oleh proses gesekan dengan durasi waktu yang cukup. Terjadinya kondisi yang *equilibrium* antara *strain hardening*, dan *termal softening* yang ditunjukkan dengan menurunnya laju pembentukan *flash* pada bidang kontak (grafik pada Gambar 5.18). Kondisi *equilibrium* ini adalah kondisi ideal untuk terjadinya proses difusi atomik antara kedua permukaan kontak. Dengan nilai panas yang dibangkitkan, dan durasi penerapan panas pada permukaan kontak yang cukup, menyebabkan terjadinya penetrasi secara atomik diantara batas kontak, secara merata dan dalam, melalui proses difusi. Atom-atom *interstitial* ini berpindah diantar butiran-butiran, melewati batas butir di permukaan kontak, dan juga terjadi perpindahan/ pergeseran batas butir pada permukaan kontak, yang mana menghasilkan suatu ikatan difusi yang kuat. Penetrasi atom-atom diantara batas kontak yang lebih merata dan lebih dalam, dibandingkan dengan pada proses dimana waktu geseknya 5 detik. Hal ini ditunjukkan dengan kekuatannya yang lebih besar dan juga regangan putus yang lebih besar, jika dibandingkan dengan sambungan pada waktu gesek 5 detik, seperti pada grafik Gambar 5.4 dan Gambar 5.6.

Pada durasi waktu gesek 9 detik dan 11 detik pada tekanan gesek 40 MPa, panas yang dihasilkan pada permukaan kontak, terus meningkat menjadi 437°C dan 451°C , tetapi disisi lain, kekuatan tarik rata-rata, menurun menjadi 167,71 MPa dan 146,24 MPa, dan regangan putus dari sambungan juga menurun, seperti pada grafik Gambar 5.9 dan Gambar 5.12. Pada permukaan kontak terbentuk suatu lapisan *intermetallic* yang bersifat getas, yang terus menebal dengan semakin tinggi temperatur dan semakin lama panas diterapkan pada

permukaan kontak. Lapisan getas ini mengganggu kelanjutan proses difusi atomik. Lapisan getas yang terbentuk pada batas sambungan menyebabkan turunya kekuatan tarik sambungan dan meningkatnya kegetasan sambungan, yang terkonfirmasi pada peningkatan kegetasan dan penurunan kekakuan tarik, disaat temperatur proses terus meningkat (Grafik Gambar 5.9 sampai Grafik Gambar 5.14).

Pada tekanan gesek yang lebih rendah dari 40 MPa, yakni pada tekanan gesek 32 MPa, dan 24 MPa, kekuatan tarik rata-rata terkuat, dan regangan putus terbesar, terjadi pada waktu gesek 9 detik, yang lebih lama dari waktu gesek yang menghasilkan kekuatan tarik rata-rata terkuat pada tekanan gesek 40 MPa. Kekuatan tarik yang dihasilkan oleh tekanan gesek 32 MPa, lebih rendah dari kekuatan tarik yang dihasilkan pada tekanan gesek 40 MPa, begitu juga untuk tekanan gesek 24 MPa. Untuk mencapai kondisi yang tepat (panas pada permukaan kontak yang cukup) untuk terjadinya difusi atomik yang menghasilkan kekuatan tarik yang kuat, dicapai pada waktu gesek yang lebih lama, jika dibandingkan dengan waktu gesek pada tekanan gesek yang lebih tinggi.

Untuk proses dengan tekanan gesek yang lebih rendah, temperatur maksimum proses, juga lebih rendah, jika dibandingkan dengan temperatur pada proses dengan tekanan gesek yang lebih tinggi. Inilah yang menyebabkan kekuatan tarik dari sambungan untuk proses dengan tekanan gesek yang lebih rendah, juga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih rendah, jika dibandingkan dengan proses pada tekanan gesek yang lebih tinggi. Pada tekanan gesek yang lebih rendah, difusi atomik yang terjadi tidak merata dan sedalam, difusi atomik pada tekanan gesek yang lebih tinggi, yang mana dapat mencapai temperatur permukaan kontak yang lebih tinggi, dalam waktu yang lebih singkat. Semakin lama proses pembangkitan panas, juga menyebabkan timbulnya lapisan yang getas, yang menurunkan kekuatan tarik dan membuat sambungan menjadi semakin getas.

Tekanan gesek dalam proses las gesek *continuous drive*, akan meningkatkan kekerasan dari material benda kerja dikarenakan proses *strain hardening*. Pada saat proses penggesekan, terjadi pembangkitan panas terjadi, sehingga terjadi pelunakan oleh proses *termal softening*. Keseimbangan (*equilibrium*) antara *strain hardening* dan *termal softening* menjadi kondisi ideal untuk terjadi suatu proses pengikatan difusi. Pada tekanan gesek yang tinggi akan membutuhkan waktu gesek yang lebih lama untuk terjadi kondisi *equilibrium* ini.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian dan analisa maka dapat disimpulkan bahwa dengan semakin lama waktu gesek yang diterapkan pada kecepatan putar, tekanan gesek, waktu tempa dan tekanan tempa, yang bernilai tetap, dalam proses las gesek *continuous drive* antara paduan aluminium AA6061 dan baja karbon, maka akan meningkatkan kekuatan tarik dari sambungan yang terbentuk, sampai mencapai nilai maksimum, dan setelah itu, kekuatan tarik sambungan akan kembali melemah dengan terus bertambah lamanya waktu gesek. Korelasi waktu gesek dengan kekuatan tarik sambungan, tidak linier.

Pertambahan besarnya tekanan gesek juga akan menyebabkan semakin kuat kekuatan tarik sambungan yang terbentuk. Pada waktu gesek 5 dan 7 detik, pembesaran tekanan gesek, menyebabkan meningkatnya kekuatan tarik sambungan secara linier. Pada waktu gesek 9 dan 11 detik, pembesaran tekanan gesek, menyebabkan peningkatan kekuatan tarik sambungan yang tidak linier lagi, dimana laju peningkatan kekuatan tarik sambungan semakin mengecil, dengan semakin besarnya tekanan gesek.

Kekuatan tarik terbesar dari sambungan antara AA6061 dengan baja karbon dalam penelitian ini adalah sebesar 186,99 MPa, yang dihasilkan dari proses las gesek *continuous drive*, dengan tekanan gesek 40 MPa dan waktu gesek 7 detik.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian ini, dapat disarankan:

1. Untuk mendapatkan hubungan antara tekanan gesek dan kekuatan tarik sambungan antara AA6061 dengan baja karbon pada las gesek *continuous drive*, maka perlu diperbesar jangkauan dari variabel tekanan gesek yang lebih tinggi dari 40 MPa, sehingga dapat diketahui nilai terkuat dari kekuatan tarik sambungan, terhadap variasi tekan gesek.
2. Untuk mengurangi lamanya waktu pembangkitan panas pada proses las gesek *continuous drive* antara AA6061 dengan baja karbon, maka perlu untuk memperbesar kecepatan putar relatif pada permukaan kontak yang lebih besar dari 1600 rpm, sehingga nilai panas yang sama, dapat dihasilkan dalam waktu yang lebih singkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alves, Paduan Edar., Neto, Francisco Piarino., Ying An Chen. 2010. *Welding of AA 1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel by Rotary Friction Welding Process. Aersop Technol Manag* (Sao Jose Dos Campos) Vol. 2 (3). pp. 301-306. doi:10.5028/Jatam.2010.02037110.
- Ambroziak, A., Korzeniowski, M., Kustron, P., Winnicki, M., Sokolowski, P., & Harapinska, E. (2014). *Friction Welding of Aluminium and Aluminium Alloy with Steel*. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2014. pp. 1-15.
- ASM E 8M-034. 2000. *Mechanical Testing and Evaluation*. Vol. 8. ASM International.
- ASM Handbook 02. 1992. *Properties and Selection: Nonferrous Alloy and Special-Purpose Materials*. Vol. 2. ASM International.
- ASM Handbook 06. 1993. *Welding Brazing and Soldering*. Vol. 06. ASM International.
- ASM Handbook 08. 2003. *Mechanical Testing and Evaluation*. Vol. 08. ASM International.
- AWS. 1998. *Welding Handbook-Welding Technology*. Ed. 8th. Vol. 1. American Welding Society Inc.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction to Physical Metallurgy*. Ed. 2nd. McGraw-Hill. New York.
- AWS B4.0-98, 2003. *Standard Methods for Mechanical Testing of Weld*. American Welding Society, Miami
- Callister, William D Jr. 2007. *Material Science and Engineering; An Introduction*. Ed. 7th. Jhon Wiley & Sons Inc.
- Can Ahmed., Sahin, Mumin., Kucuk Mahmud. 2010. *Modelling of Friction Welding*. UNITECH. Vol. II. pp. 135-142
- Gizmag PTY LTD (2018). *New Atlas. Honda Develops New Technology to Weld Steel and Aluminum Together*. <https://newatlas.com/honda-steel-aluminum-welding/24096/>. Diakses tanggal 5 Januari 2018.
- Irawan, Y.S., Wirohardjo, M., & Ma'arif, S. (2012). *Tensile Strength of Weld Joint Produced by Spinning Friction Welding of Round Aluminum A6061 with Various Chamfer Angles*. *Advanced Materials Research*, Vol. 576. pp. 761-765.

- Irawan, Y.S., Suprpto, W., Oerbandono, T., January, A.R., Kekar, A., Wijaksono, M & Fauzan, R. (2017). *Torsion Strength of Round Bar A6061 Friction Weld Joint Influenced by Friction Time, Upset Force, and One-Side Cone Geometry*. Journal of Environmental Engineering & Sustainable Technology, Vol. 4, No. 2. pp. 78-84.
- Irawan, Y.S., Imawan, B., Soenoko, R., & Purnomo, H. (2016). *Effect of Surface Roughness and Chamfer Angle on Tensile Strength of Round Aluminum A6061 Produced by Continuous Drive Friction Welding*. Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 11. No. 6. Pp. 1178-1185.
- Jessop, T. J., Nicholas, E. D., & Disndale, W. O. (1978). *Friction Welding Dissimilar Metals*. Advances in Welding Processes, in Proceedings 4th International Conference. The Welding Institute, Harogate, England. 1978. pp. 23-36.
- Manufacturing Technology Inc (2018). *All Geometry Sample Parts*. http://www.mtiwelding.com/parts/?results_per_page=24&materials=aluminum-alloys. Diakses tanggal 5 Januari 2018.
- Mathers, Gene. 2002. *The Welding of Aluminium and Its Alloy*. Woodhead.
- Mayer, A. 2003. *Friction Hidro Pillar Proccesing: Bonding Mechanism and Properties*. Geesthacht: GKSS-Forschungszentrum GeesthachtGmbH.
- MTI Manufacturing Technology Brosure. 1999. Friction Welding. www.mtiwelding.com.
- Paventhan,R., Lakshminarayanan, P, R., Balasubramanian. 2011. *Prediction and Optimization of Friction Welding Parameters for Joining Aluminium Alloy and Stainless Steel*. (ELSEVIER). Vol. 21. pp. 1480-1485.
- Rombaut, Pieter. 2011. *Joining of Disimilar Materials throught Rotary Friction Welding*. Thesis. Universiteit Gen.
- Sahin, Mumin., Cenk Misirli. 2010. *Aluminum Alloys New Trends in Fabrication and Applications*. Edited. Zaki Ahmad. INTECH. pp. 277-300.
- Sahin, Mumin., Cenk Misirli. 2013. *Mechanical and Metalurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints*. Edited. Zaki Ahmad. INTECH (In Tech). pp. 278-300.
- Satyanarayana, V V., G Madhusudhan Reddy., T Mohandas. 2005. *Dissimilar Metal Friction Welding of Austenitic-Ferrite Stainless Steel. Materials Processing Technology* (ELSEVIER). Vol. 160. pp. 128-137.
- Shubhavardhan, R, N, and S Surendran. 2012. "Friction Welding to Joint Dissimilar Metals." *IJETAE*. Vo. 2 (7). pp. 200-210

- Savic, Biljana., Markovic, Svetislav., Ciric, Radovan. 2008. *Physical Model of The Friction Welded Joint of Differential Types of Steel*. FME Transactions. Vol. 36 (2). pp. 93-97.
- Taban, Emel., Jerry E Gould., Jhon C Lippold. 2010. *Dissimilar Friction Welding of 6061-T6 Aluminum and AISI 1018 Steel*. *Materials and Design* (ELSEVIER) Vo. 31. pp. 2305-2311
- Uzkut, Mehmet., Bekir Sadik Unlu., Mustafa Akdag. 2011. *Determination of Optimum Welding Parameters in Connecting High Alloyed X53CrMnNiN219 and X45CrSi93 by Friction Welding*. (Indian Academy of Sciences). Vo. 34 (4). pp. 815-823.
- Wayman, L, Michael. 2003. *Metals Black Book European Ferrous Data*. Ed. 2nd. Edmonton, Alberta: CASTI Publishing Inc.
- Wessel, James K, ed. 2004. *Handbook of Advanced Materials*. New Jersey, Tennessee: A Jhon Wiley & Sons.
- Yilbas, Bekir S., Ahmed Z Sahin., Nafiz Kharman., Ahmed Z Al-Garni. 1995. *Friction Welding of St-Al and Al-Cu Materials*. *Materials Processing* (ELSEVIER). Vol. 49. pp. 431-443.

Lampiran 1. Report of Analysis SEM FEI Inspect S-50 EDS



LABORATORIUM MINERAL DAN MATERIAL MAJU (LAB SENTRAL)
FMIPA UNIVERSITAS NEGERI MALANG (UM)
 Jl. Semarang 5 Malang, Telp. (0341) 551312 (psw 200) / (0341) 574895 / 085106001088
 Email: laboratoriumsentralum@yahoo.co.id ; Website : central-laboratory.um.ac.id

REPORT OF ANALYSIS	
<u>Principal</u> <i>Pemberi Order</i>	: Jack Carol Pah – UB
<u>Subject</u> <i>Hal</i>	: Elemental Analysis / Analisis Unsur
<u>Equipment Used</u> <i>Peralatan uji</i>	: SEM FEI Inspect S-50 , EDS Merk EDAX AMETEK
<u>Application</u>	: < Standardless >
Measurement time	: March 8, 2017
<u>Order Number</u> <i>Nomor Order</i>	: LSUM.00025. 2017
SPECIMEN DESCRIPTION	
<u>Type</u> <i>Jenis</i>	: Padat / Solid 2 Samples February 23, 2017
<u>Labels</u> <i>Label</i>	: Bei Karbon (Fe) dan Alumunium Paduan (Al)
OPERATOR, ANALYZER & SUPERVISOR	
<u>Operator</u>	: Siti Alfiah I, S. Si
<u>Analyzer</u>	: Drs. Abdulloh Fuad, M.Si
<u>Supervisor</u>	: Drs. Abdulloh Fuad, M.Si
RESULTS	
<u>Remark</u> <i>Hasil</i>	: Enclosed (terlampir)

Malang, 13 Maret 2017

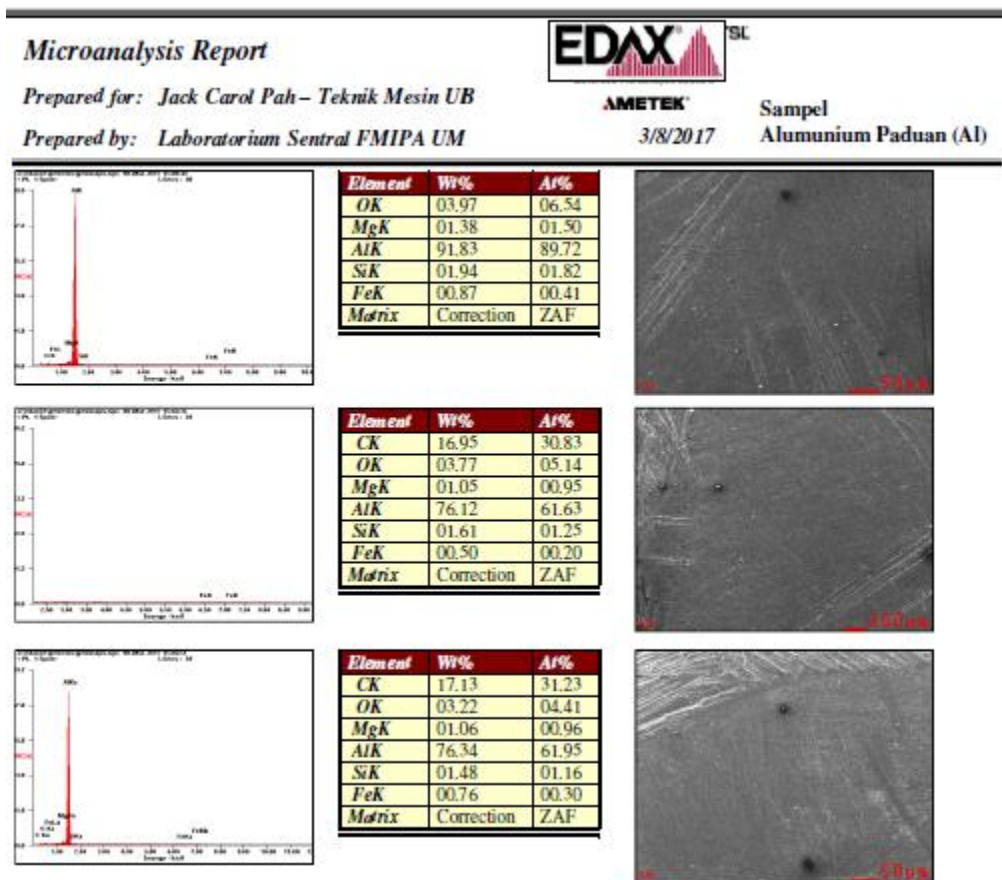
a.n Dekan,

Wakil Dekan I

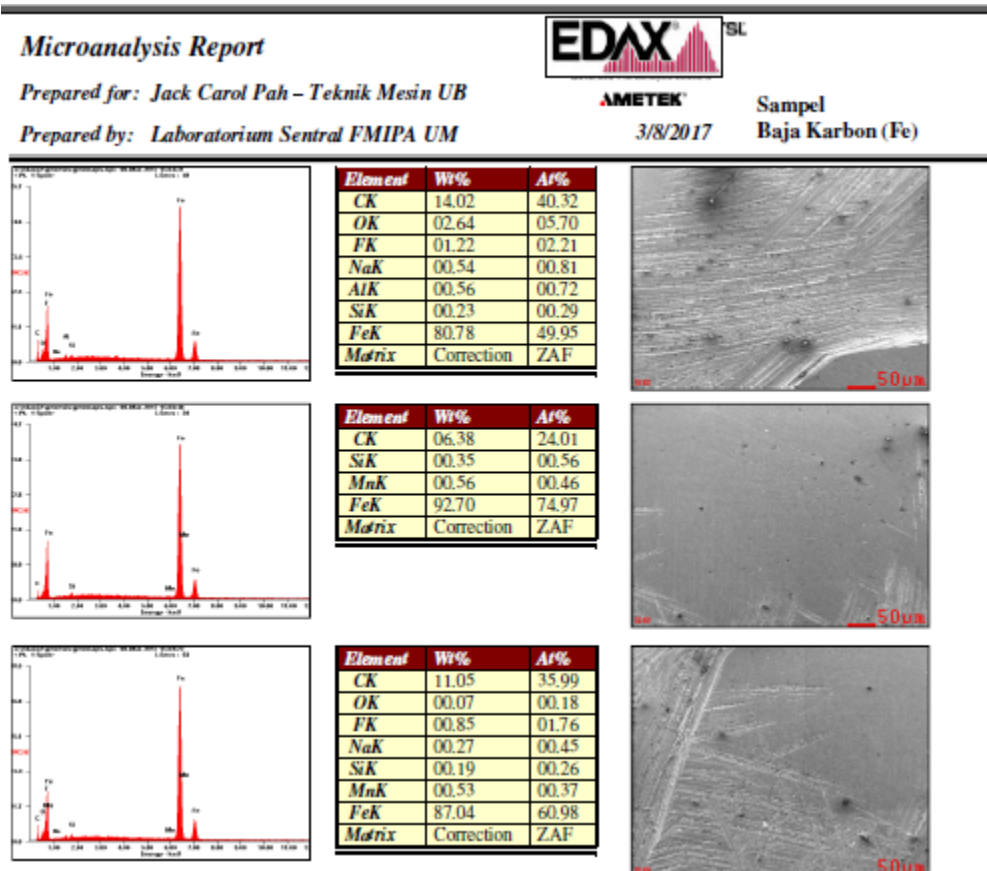
dan Kepala Lab. Mineral dan Material Maju,



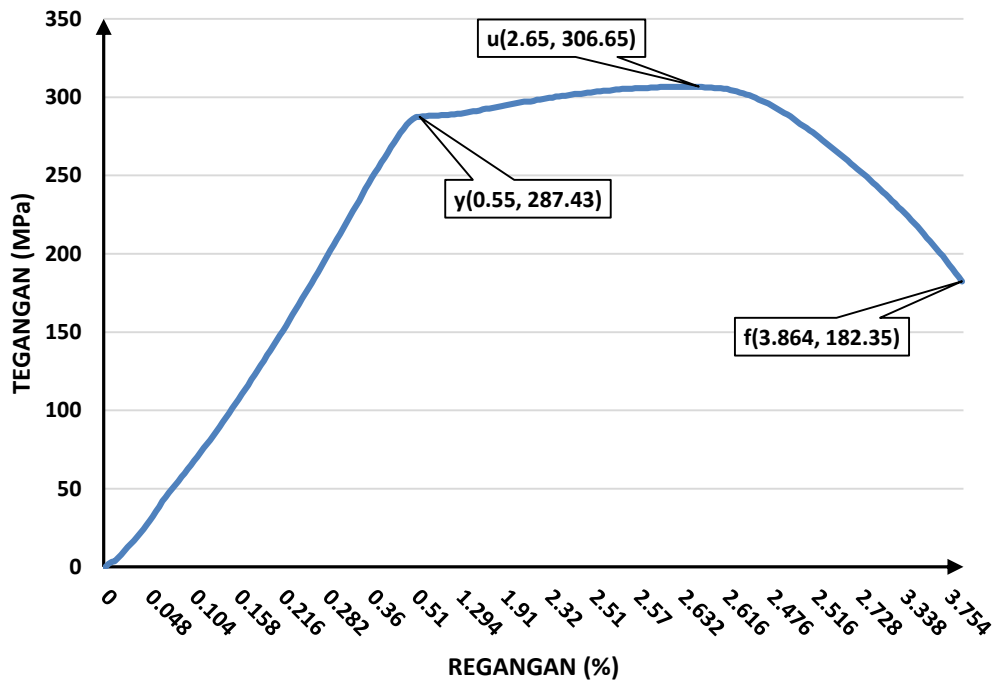
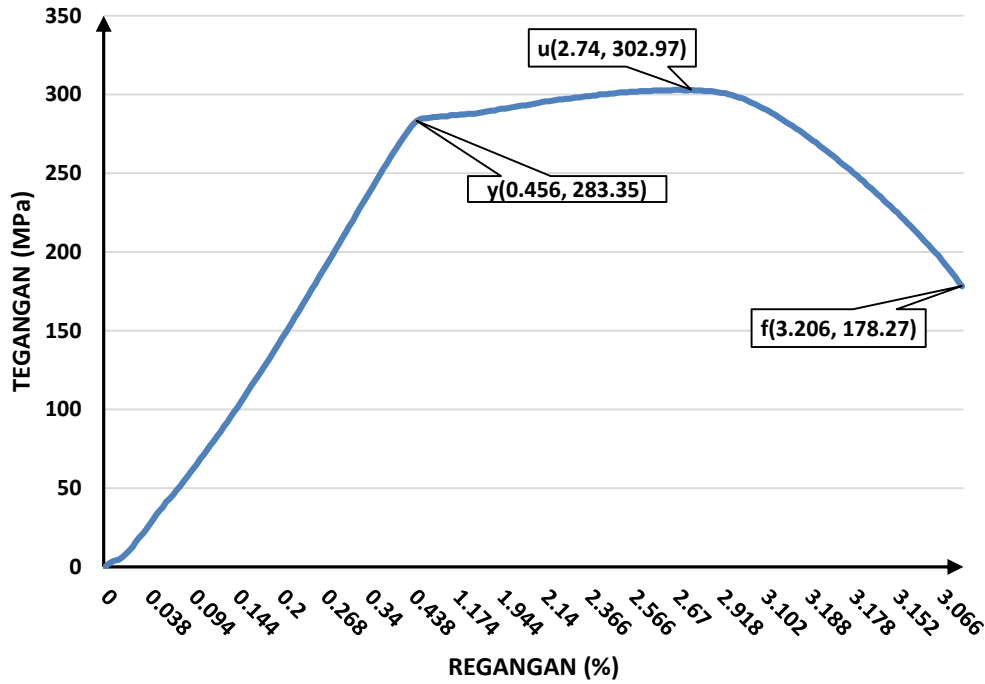
Lampiran 2. Mikroanalisis Komposisi Kimia AA6061



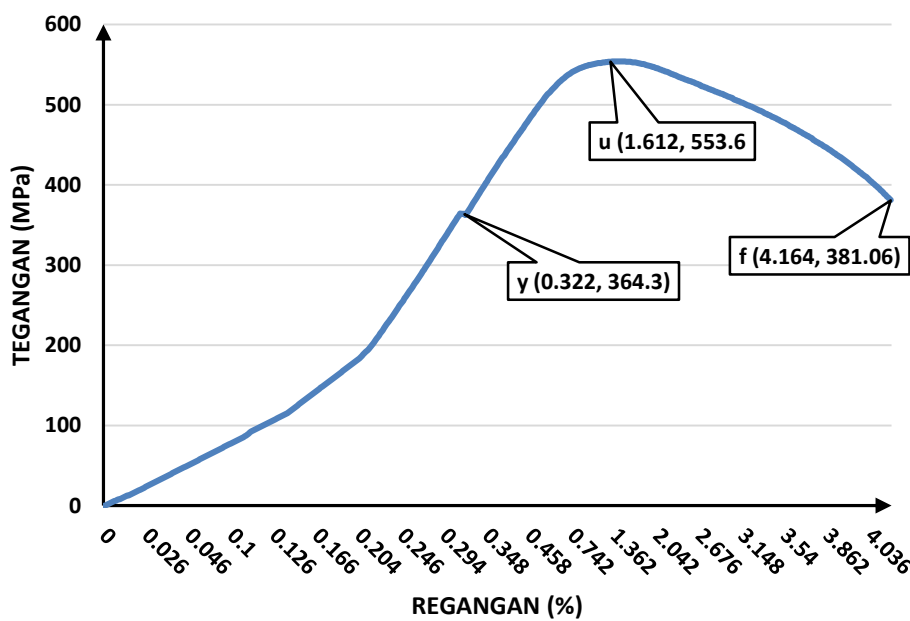
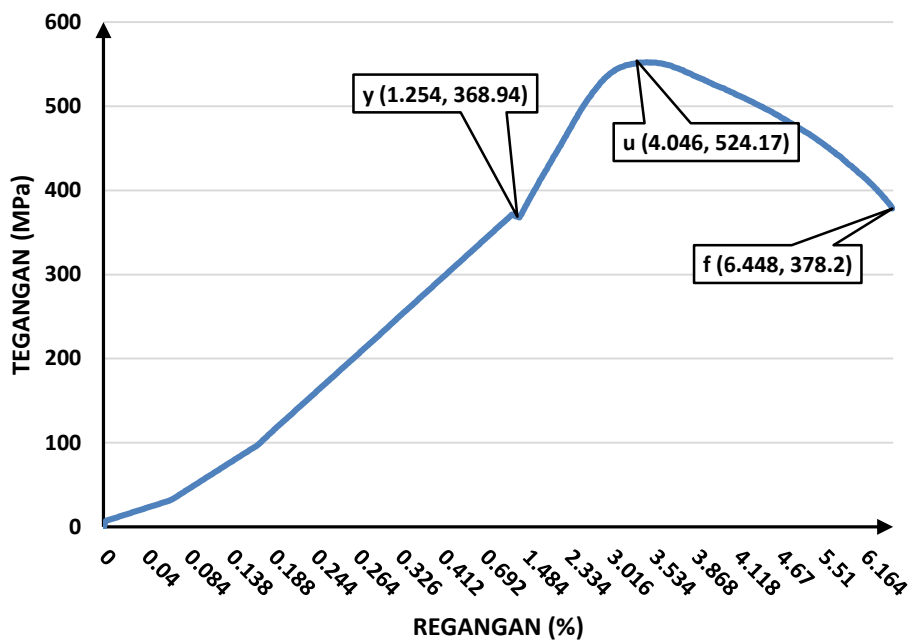
Lampiran 3. Mikroanalisis Komposisi Kimia Baja Karbon



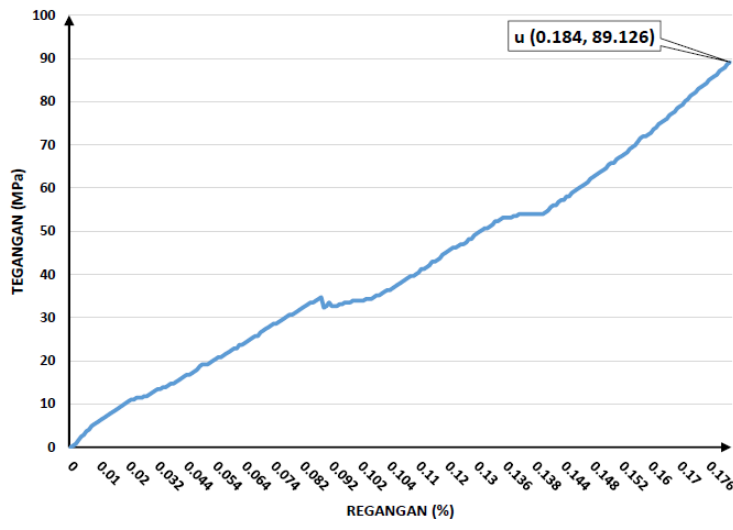
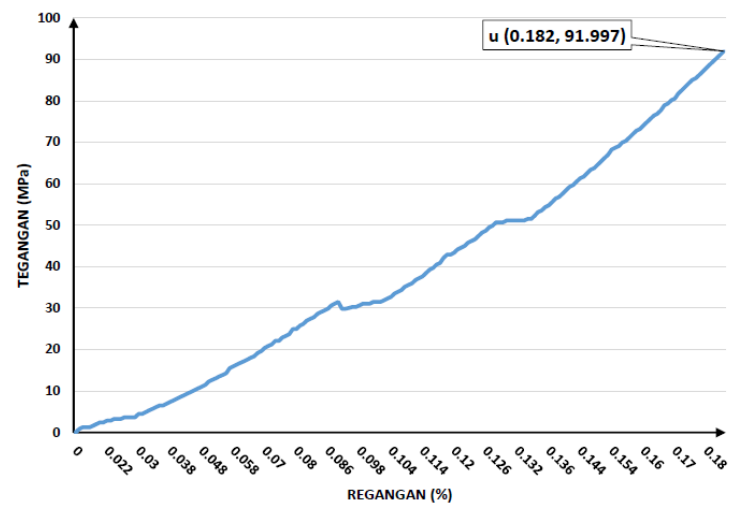
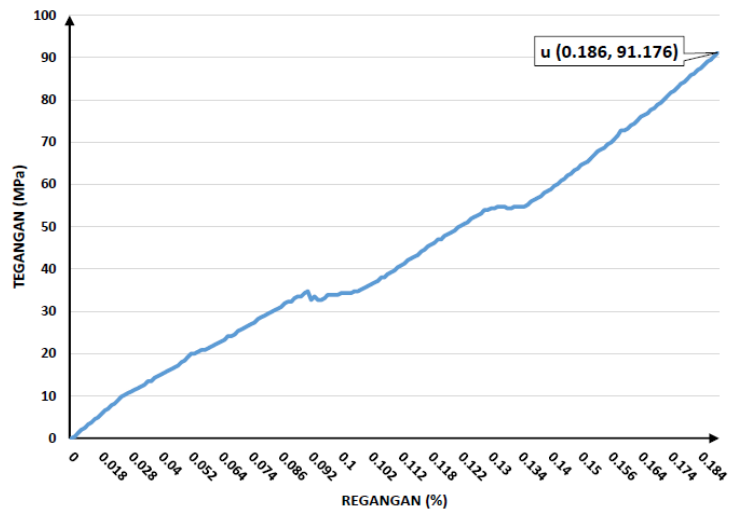
Lampiran 4. Grafik Tegangan-Regangan AA6061 Benda Uji ke 2 dan 3



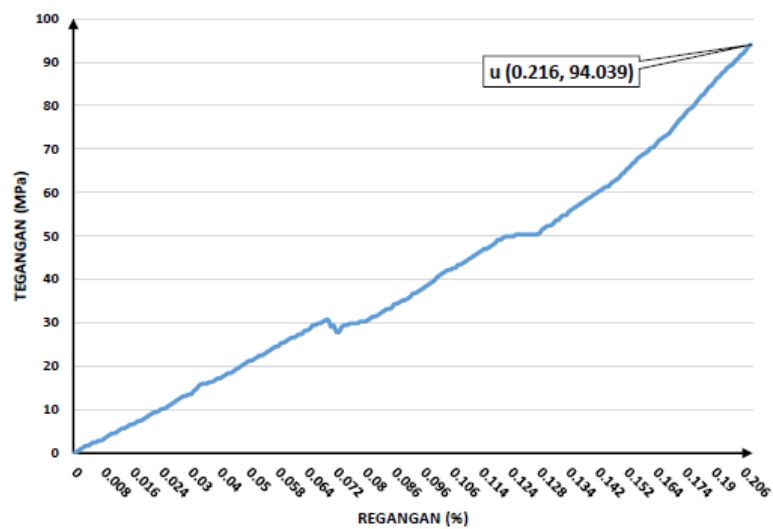
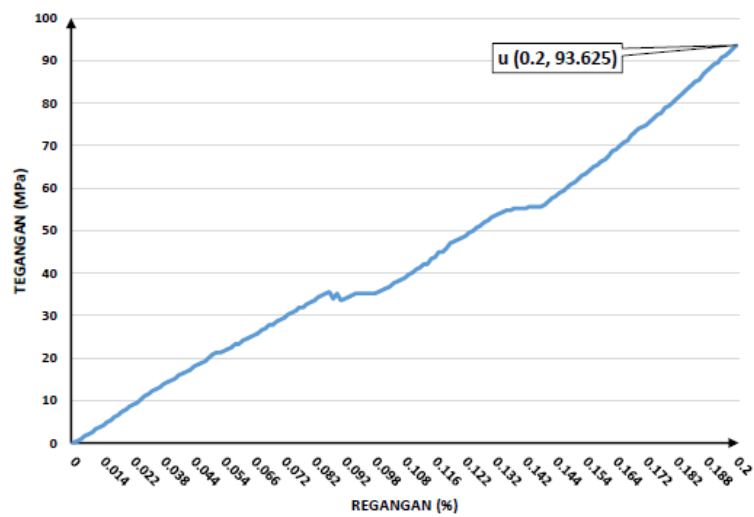
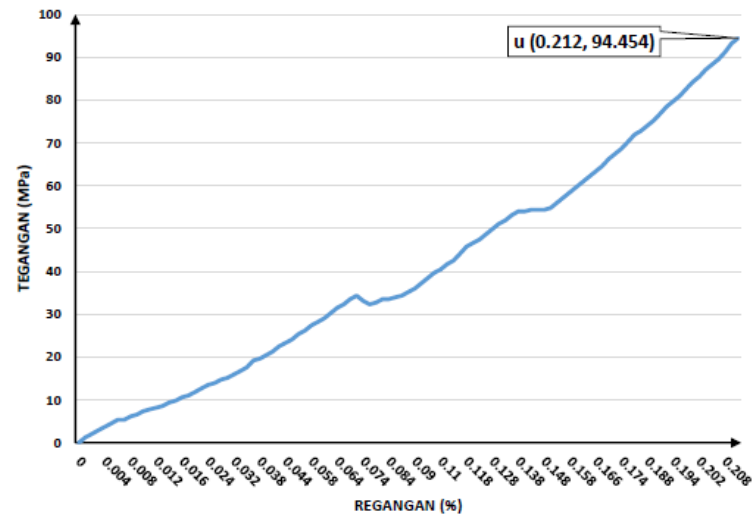
Lampiran 5. Grafik Tegangan-Regangan Baja Karbon Benda Uji ke 2 dan 3



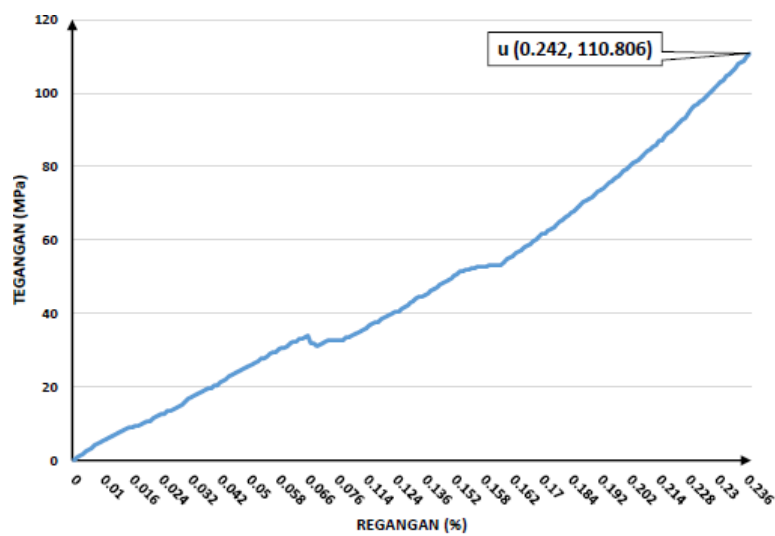
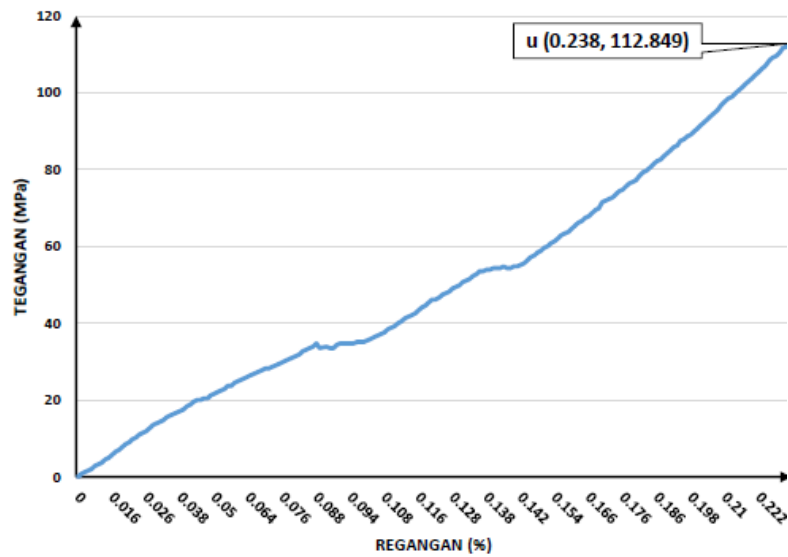
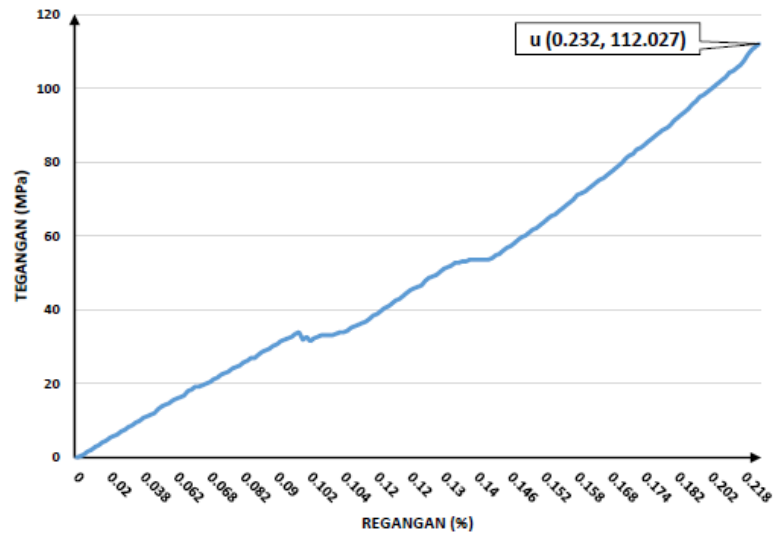
Lampiran 6. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



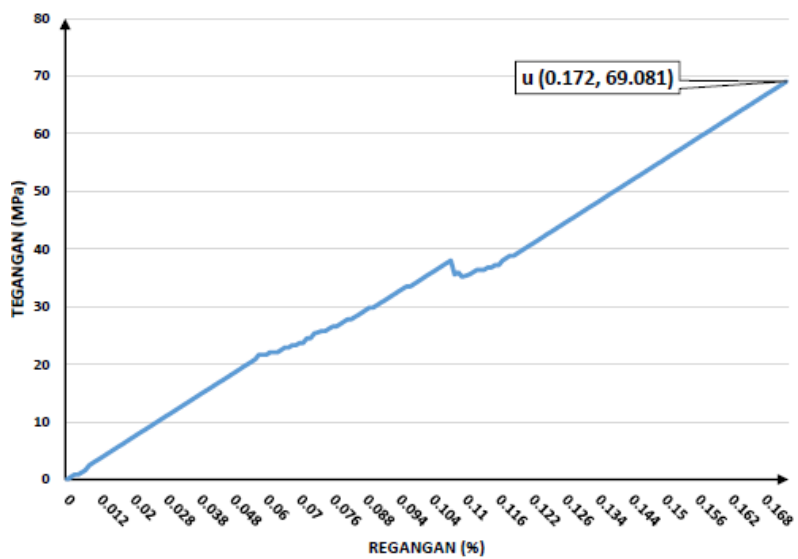
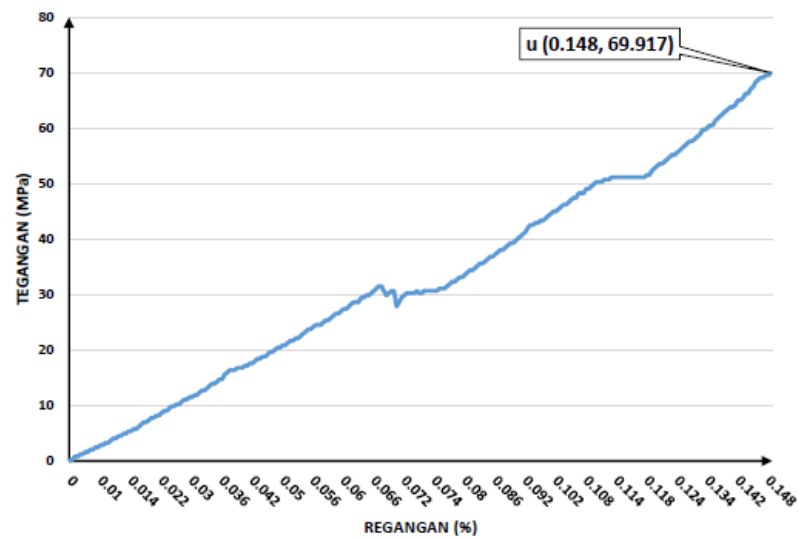
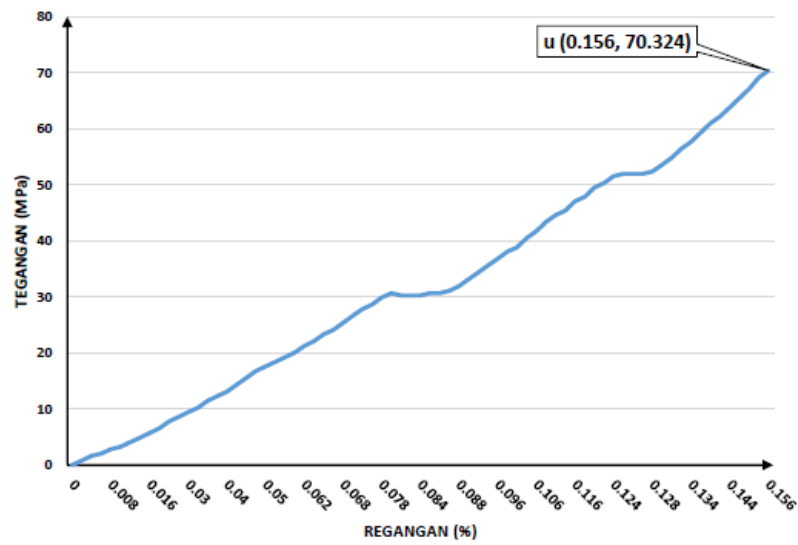
Lampiran 7. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



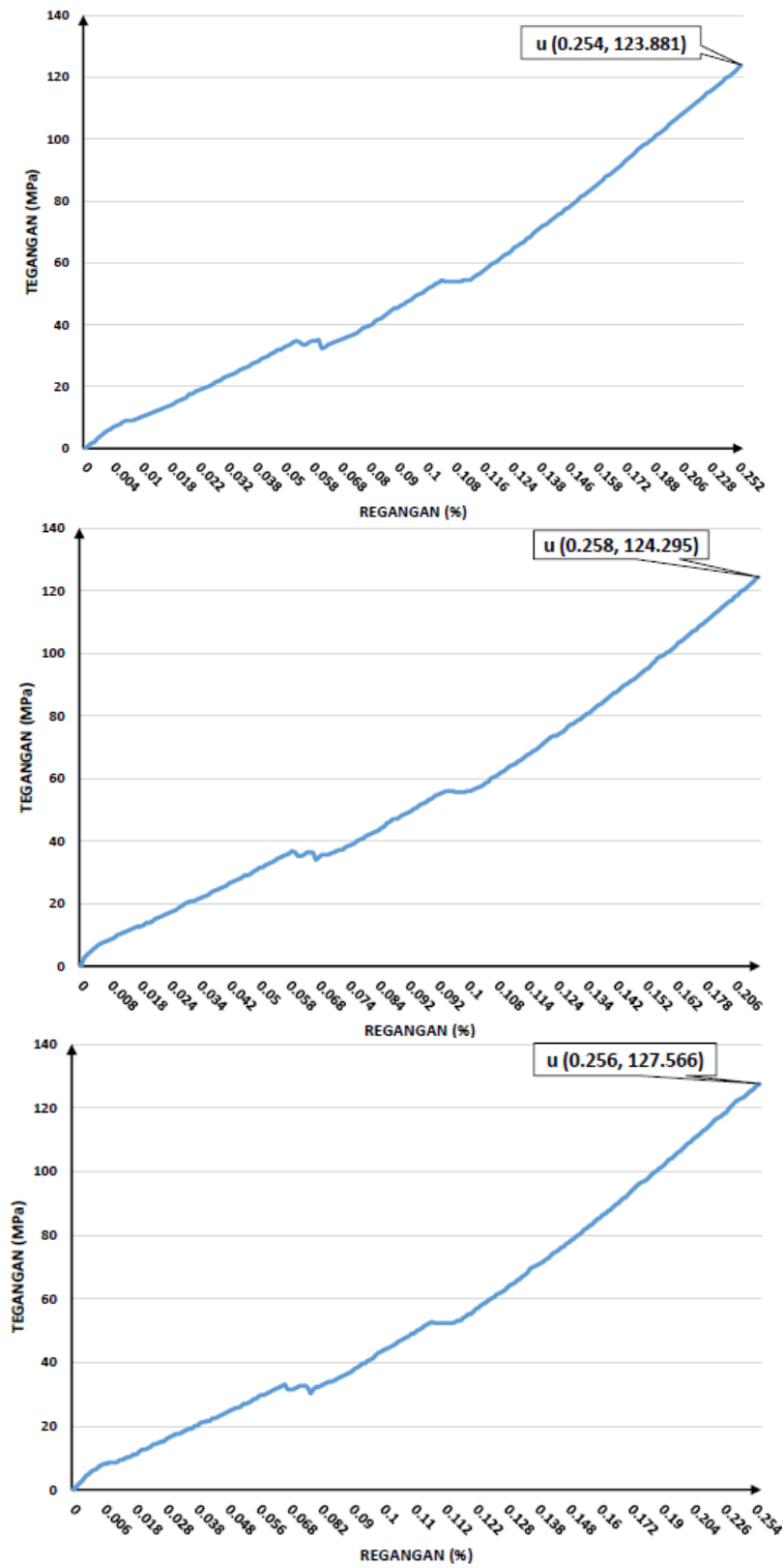
Lampiran 8. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



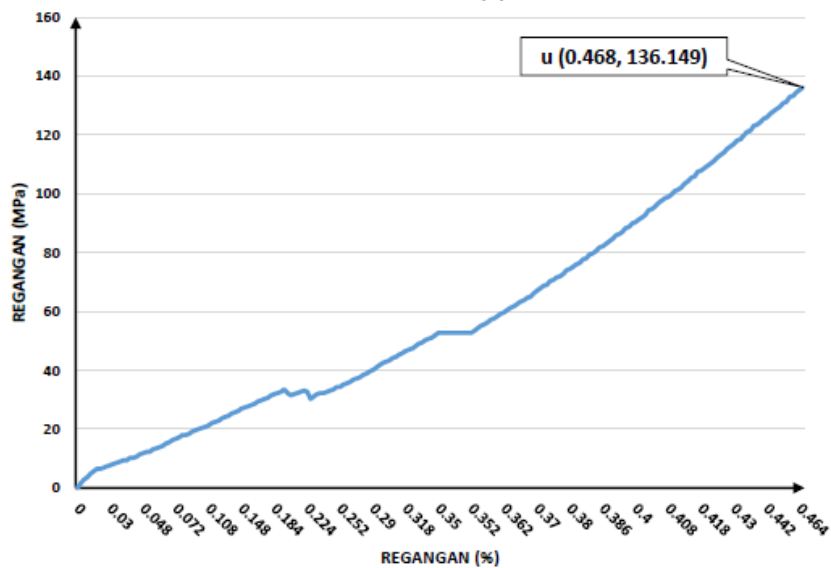
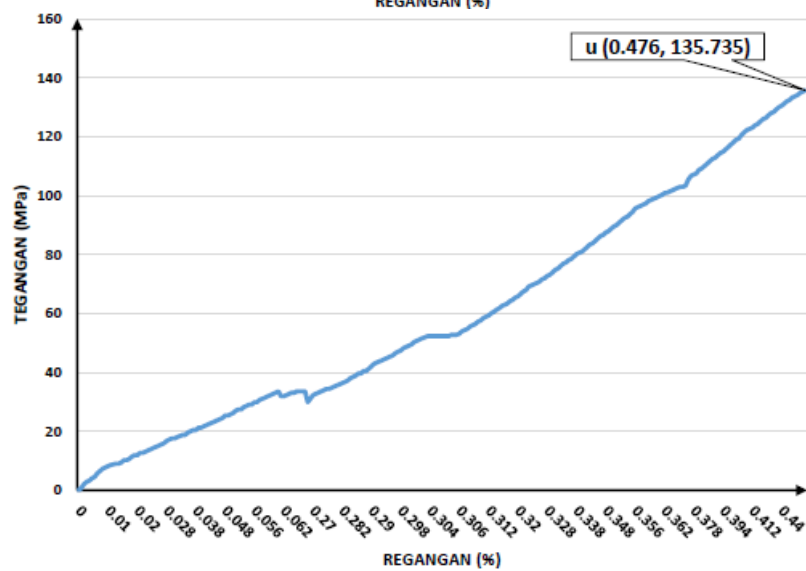
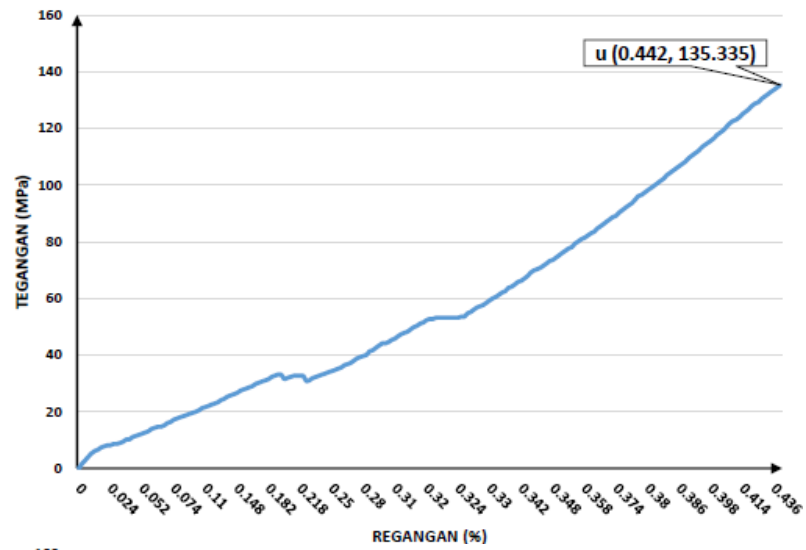
Lampiran 9. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 24 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



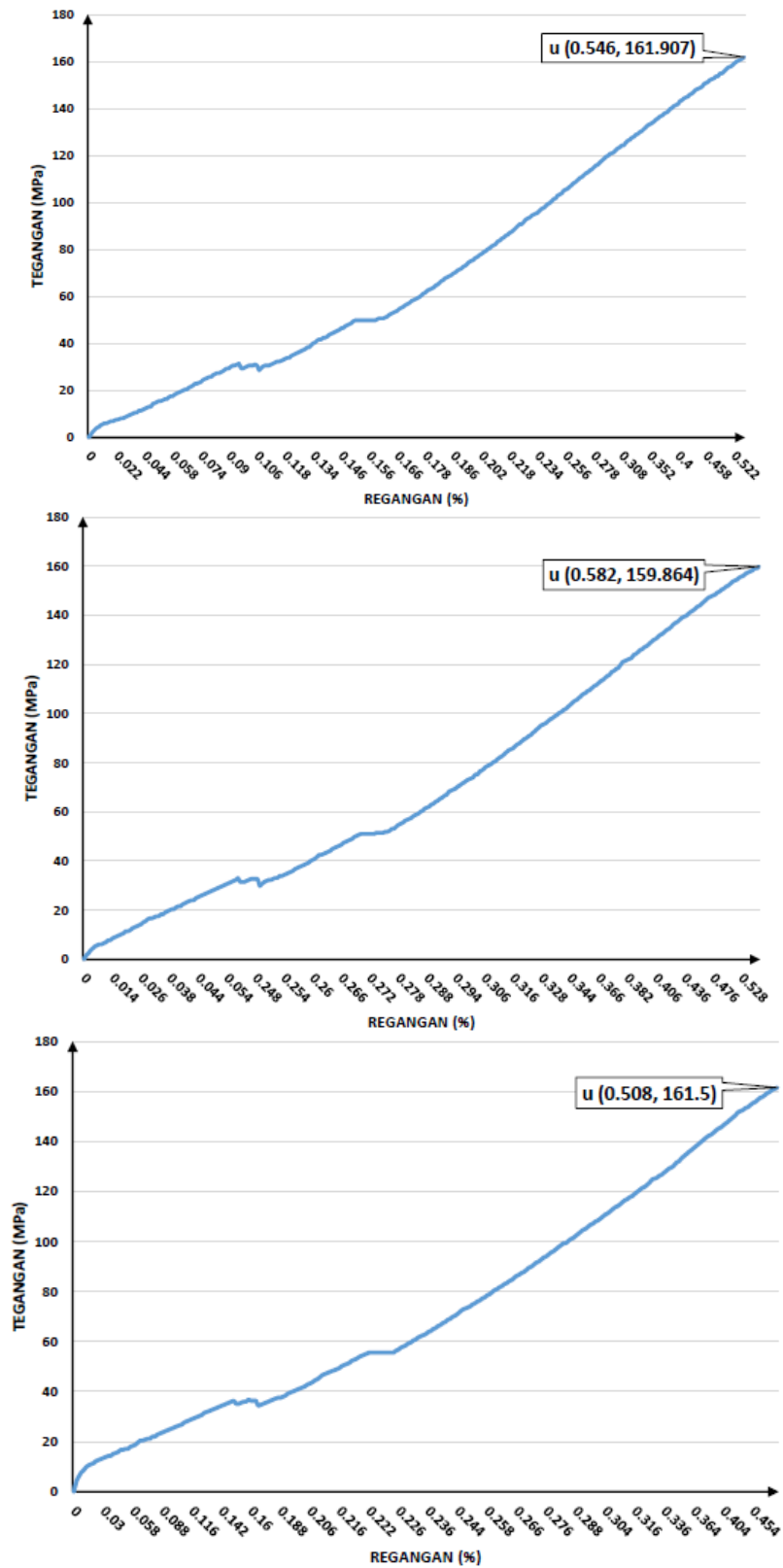
Lampiran 10. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



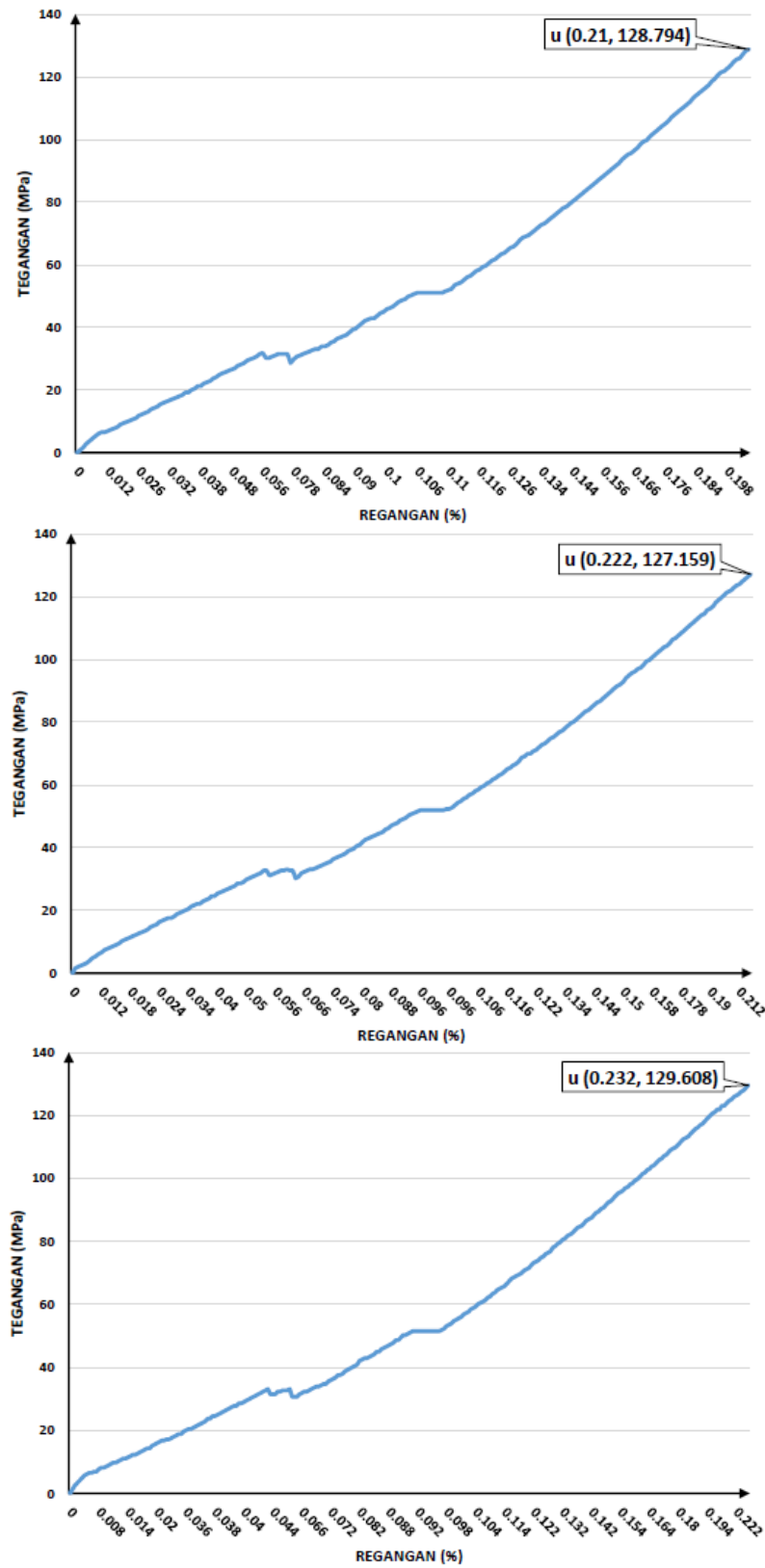
Lampiran 11. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



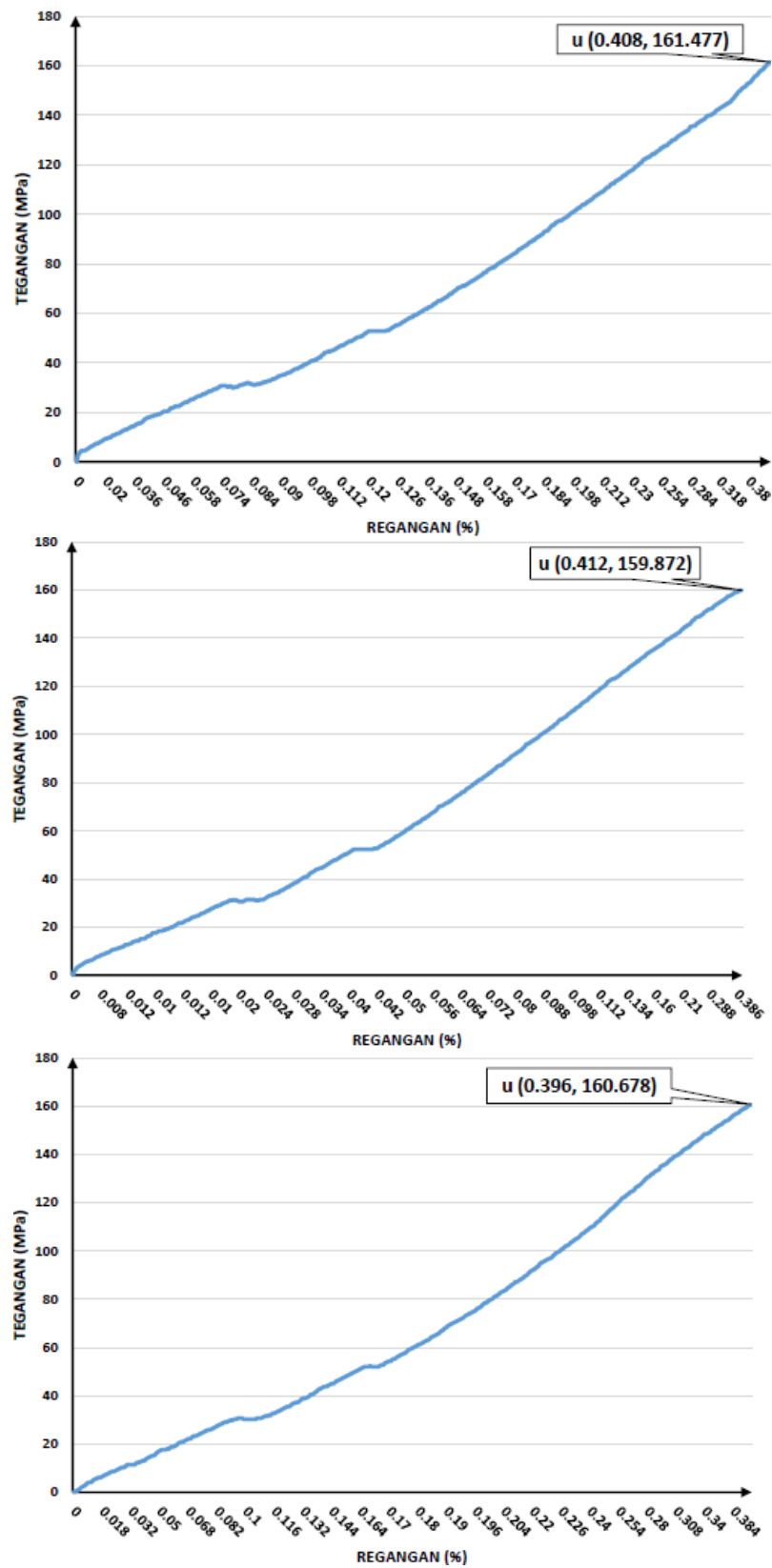
Lampiran 12. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3



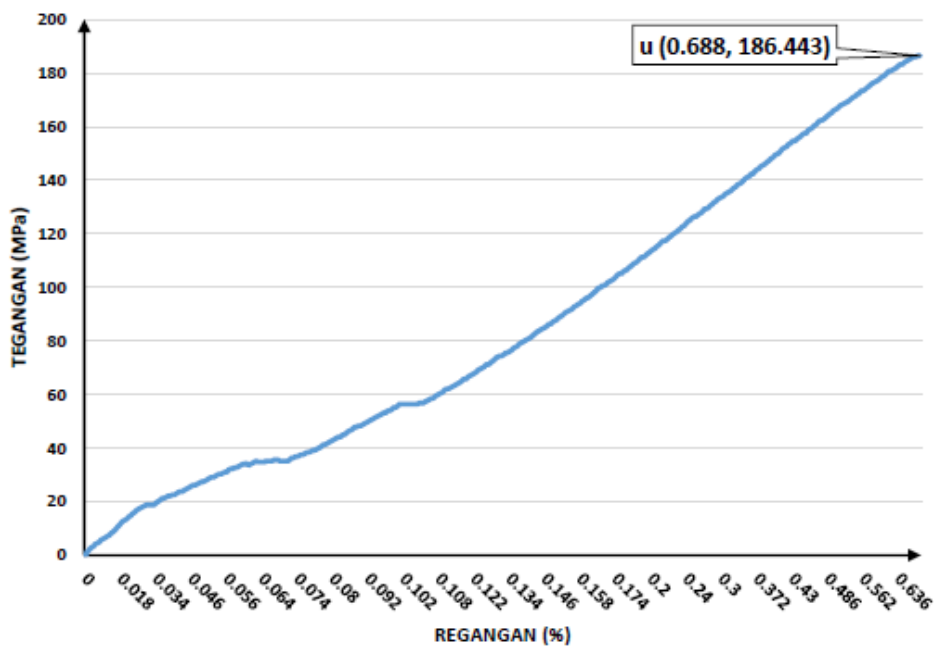
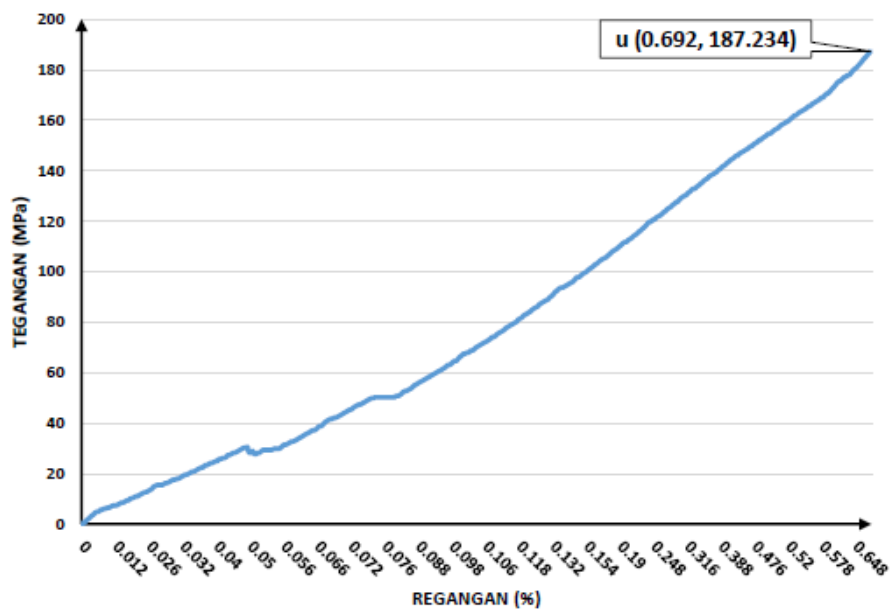
Lampiran 13. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 32 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik Benda Uji 2 dan 3



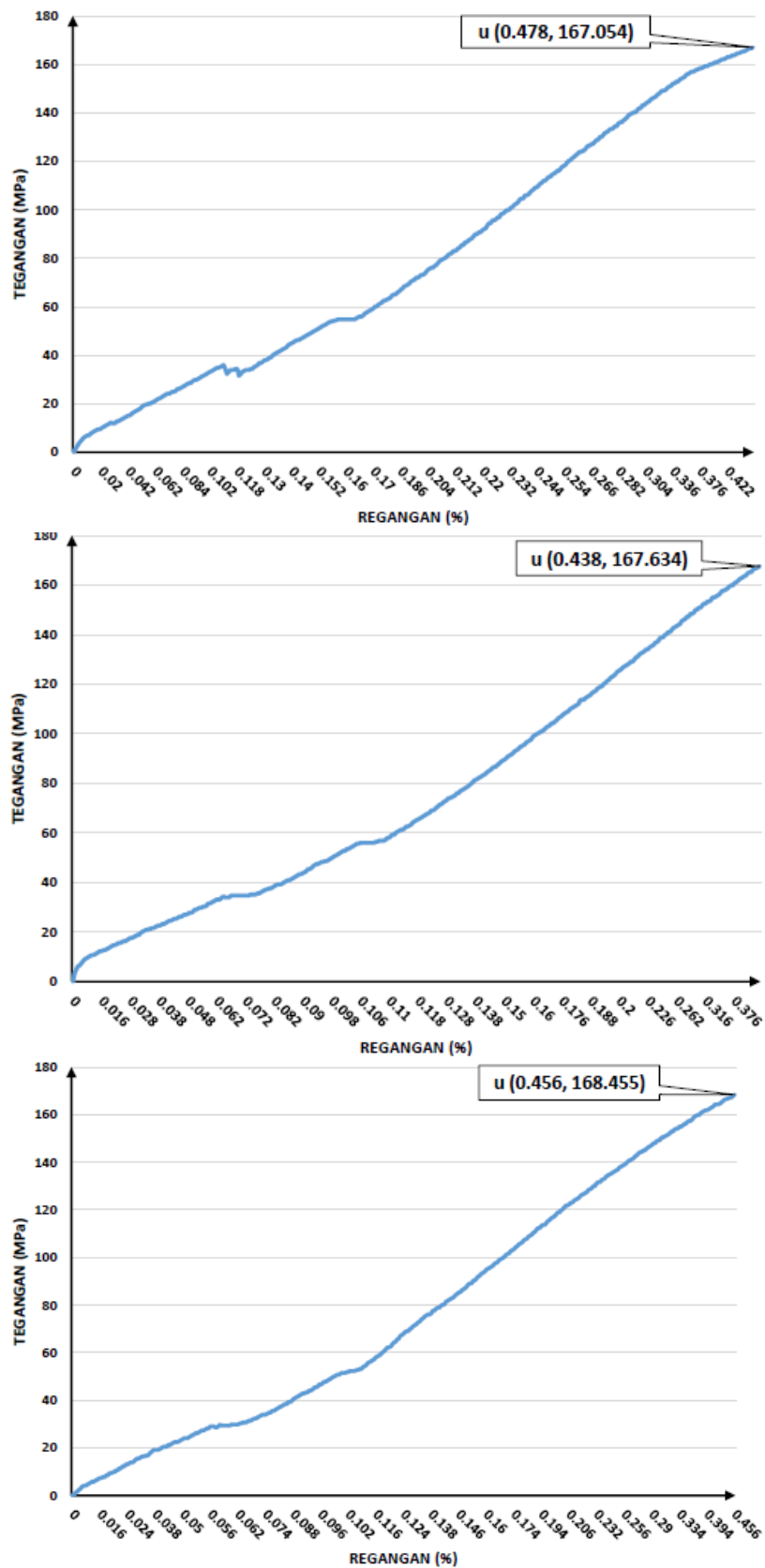
Lampiran 14. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 5 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.



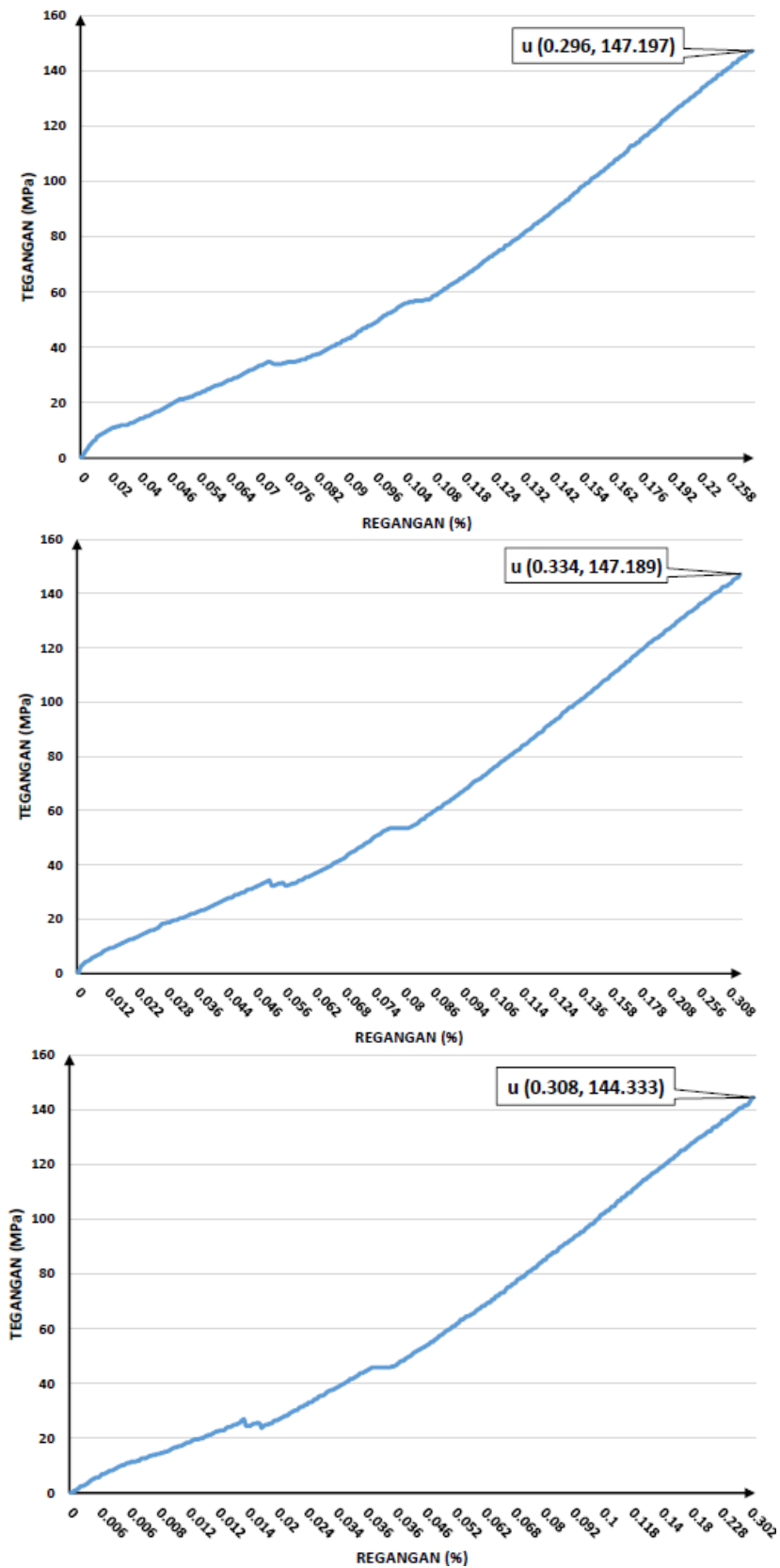
Lampiran 15. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 7 Detik untuk Benda Uji 2 dan 3.



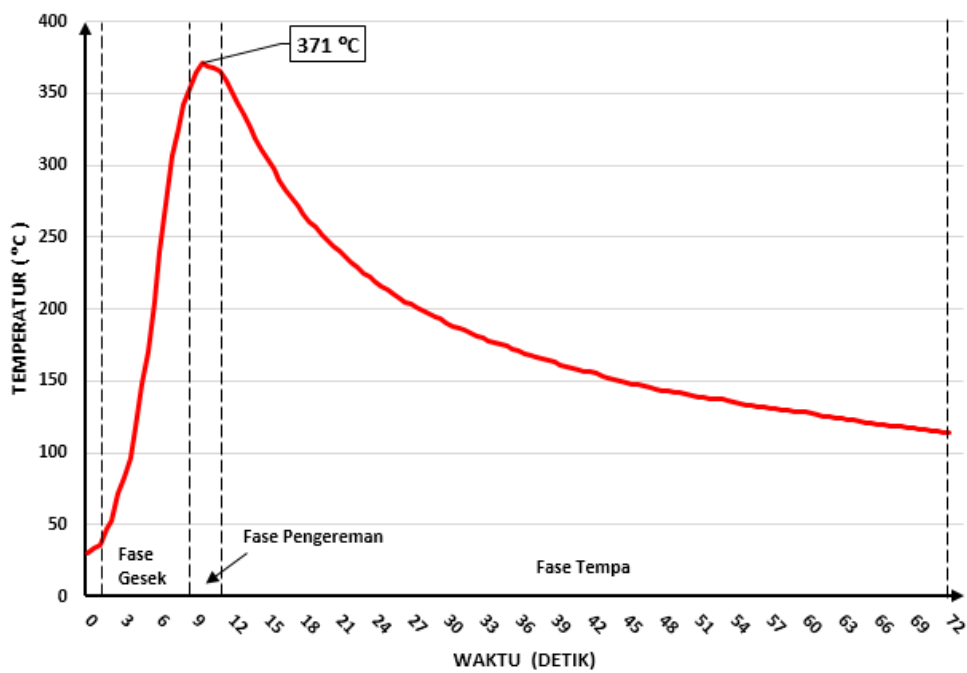
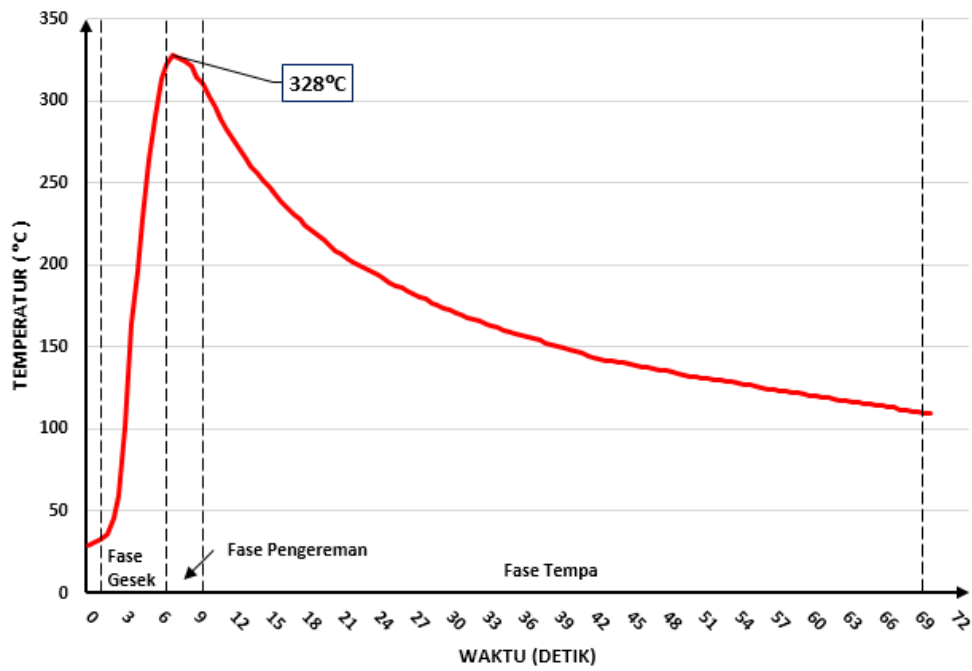
Lampiran 16. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 9 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.



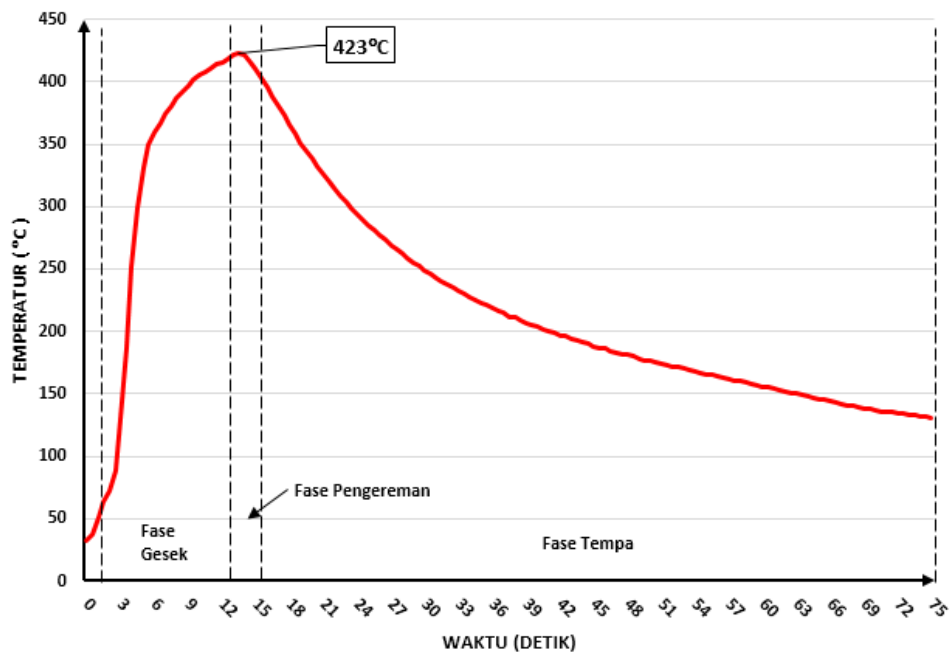
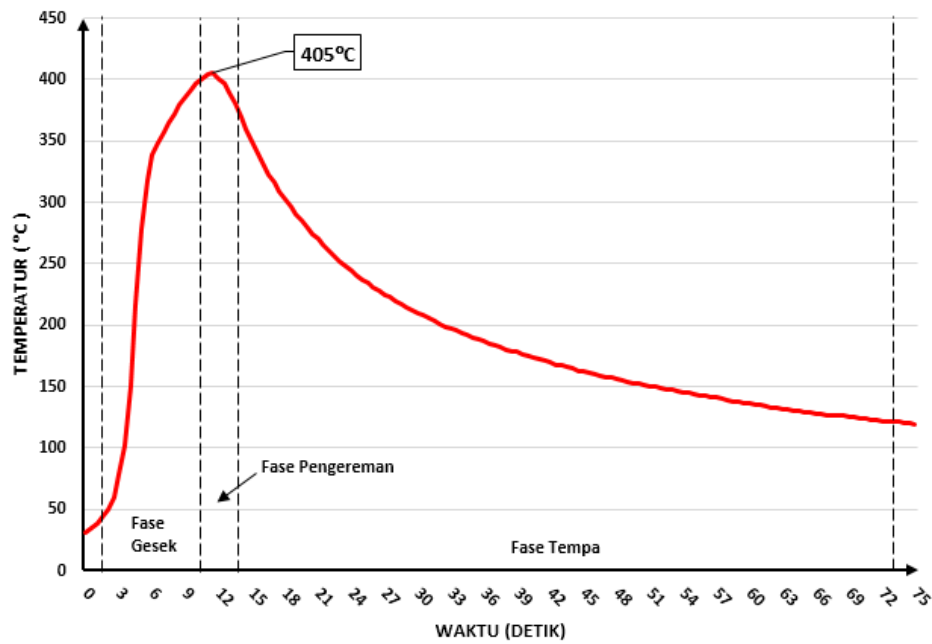
Lampiran 17. Grafik Tegangan-Regangan Sambungan pada Tekanan Gesek 40 MPa dan Waktu Gesek 11 Detik untuk Benda Uji 1, 2 dan 3.



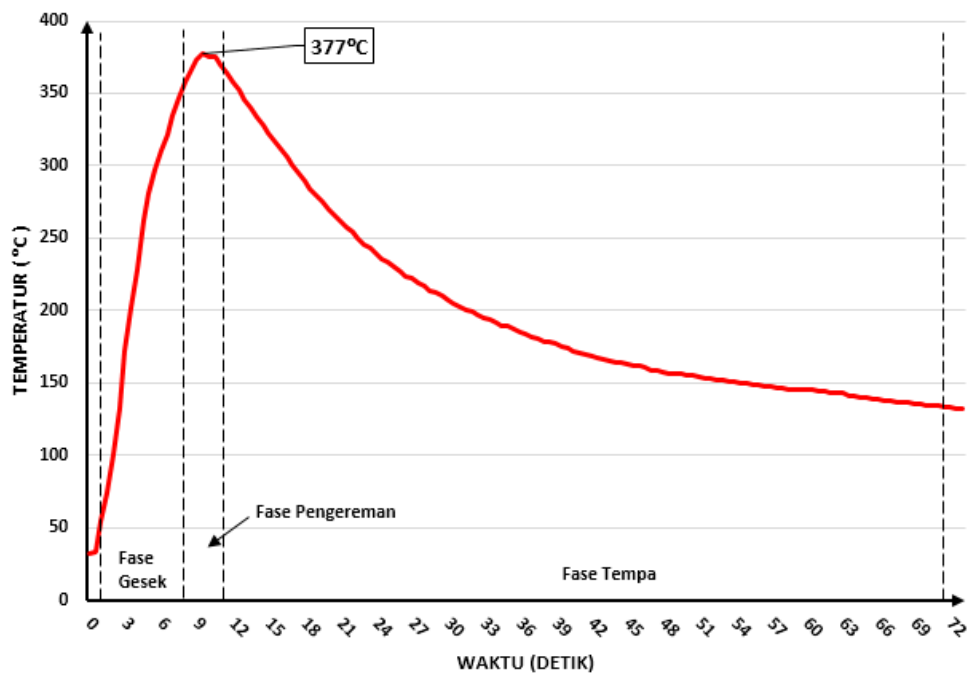
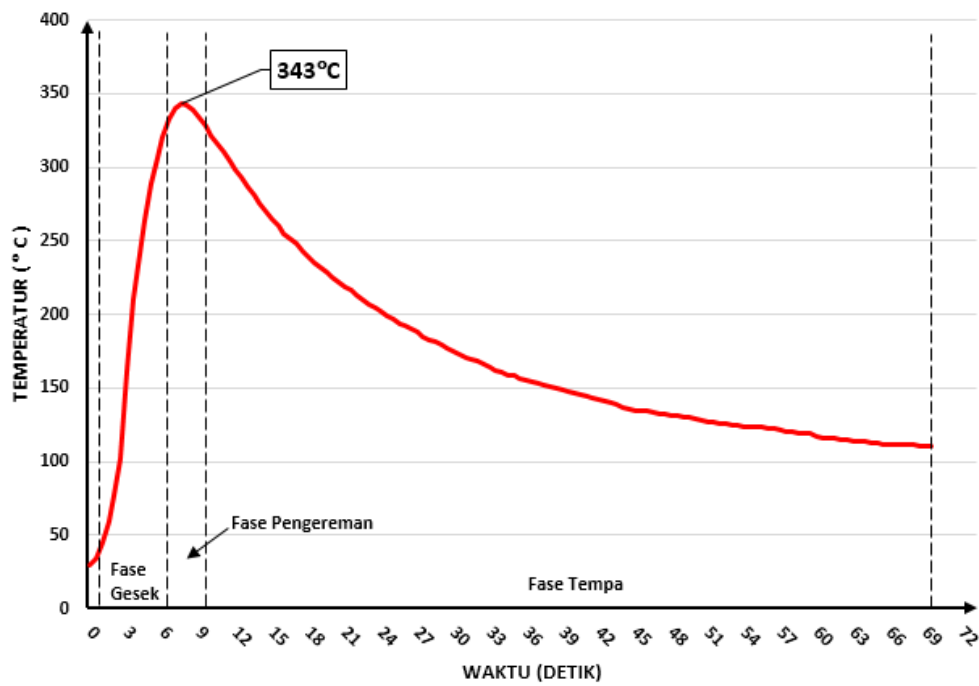
Lampiran 18. Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 24 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, dan 7 Detik



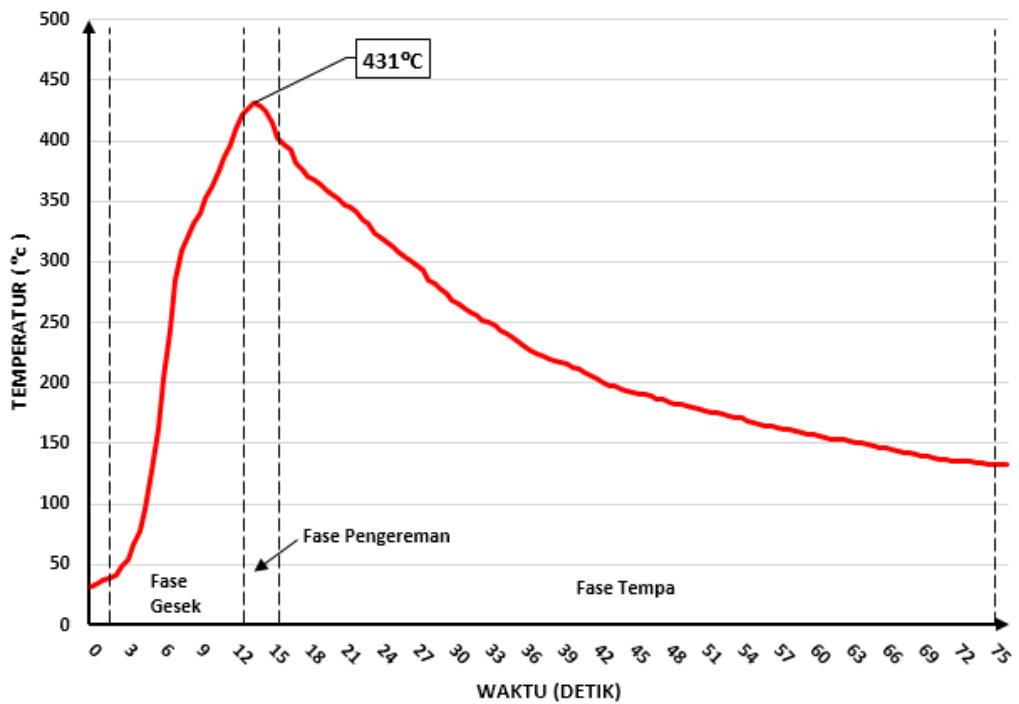
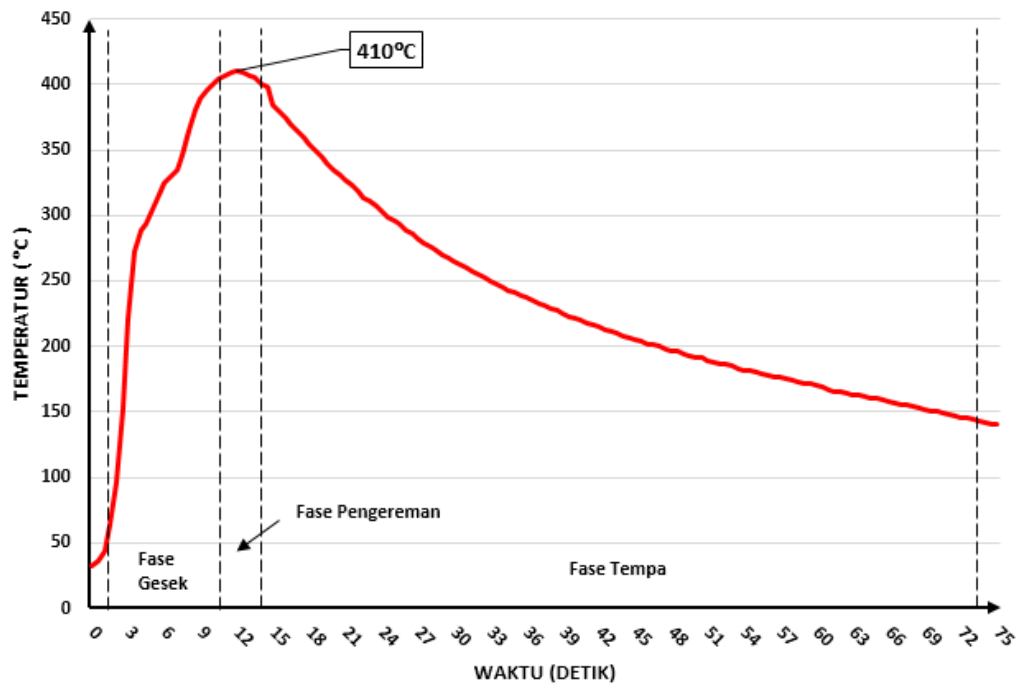
Lampiran 19. Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 24 MPa untuk Waktu Gesek 9 Detik, dan 11 Detik



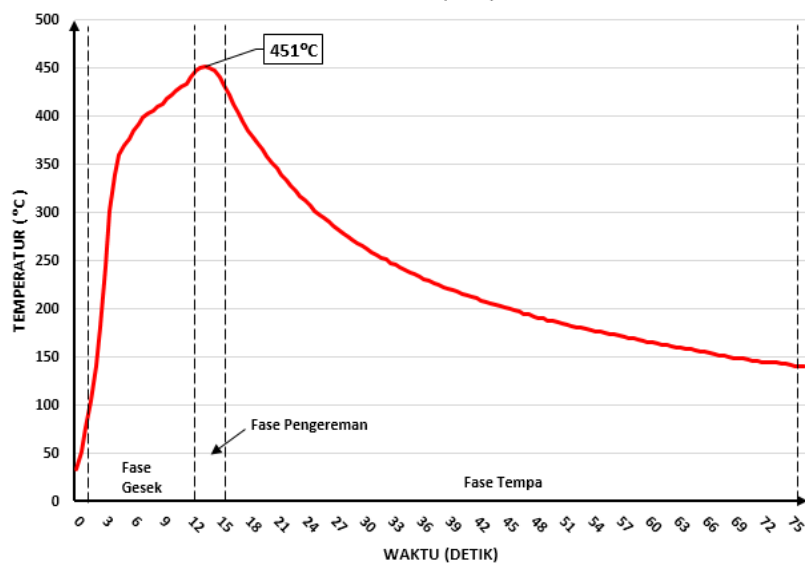
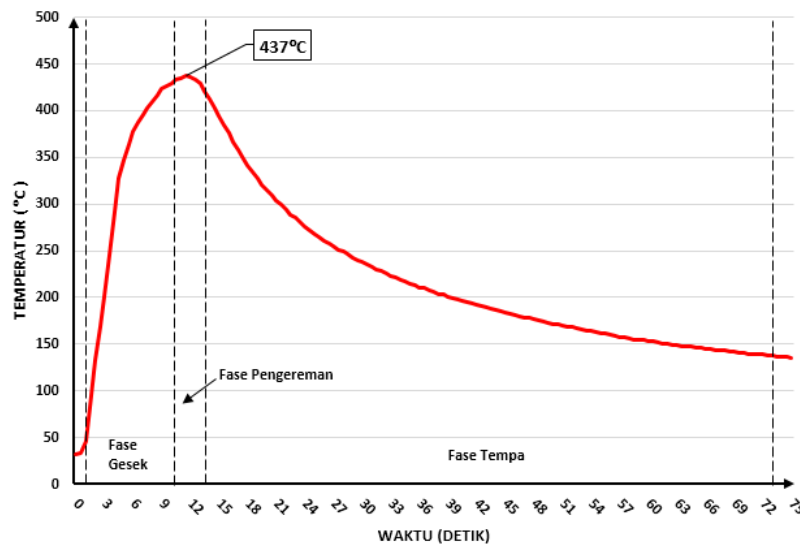
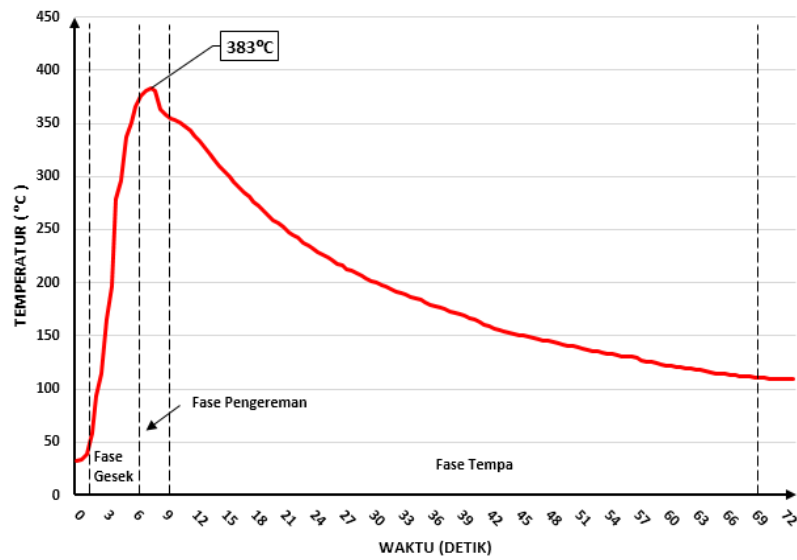
Lampiran 20. Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 32 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, dan 7 Detik



Lampiran 21. Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 32 MPa untuk Waktu Gesek 9 Detik, dan 11 Detik



Lampiran 22. Grafik Temperatur Proses pada Tekanan Gesek 40 MPa untuk Waktu Gesek 5 Detik, 9 Detik dan 11 Detik

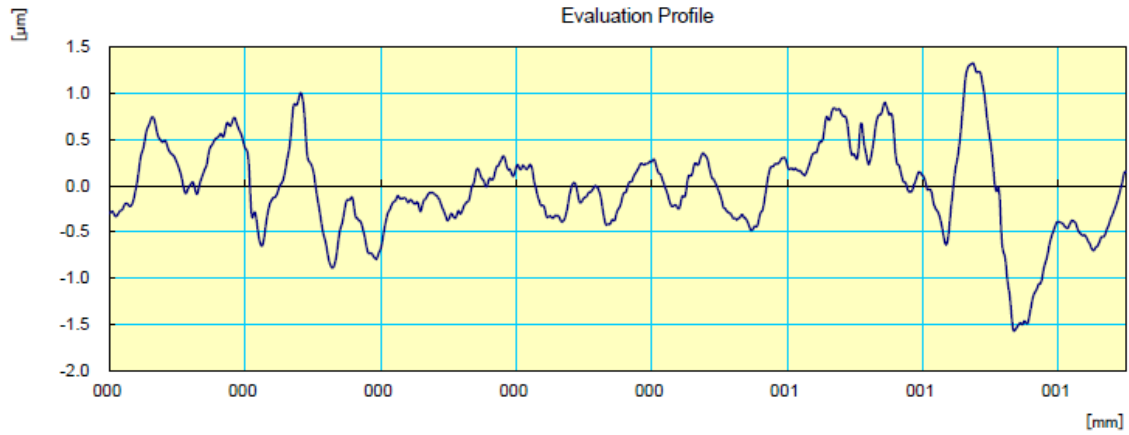


Lampiran 23. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji A



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



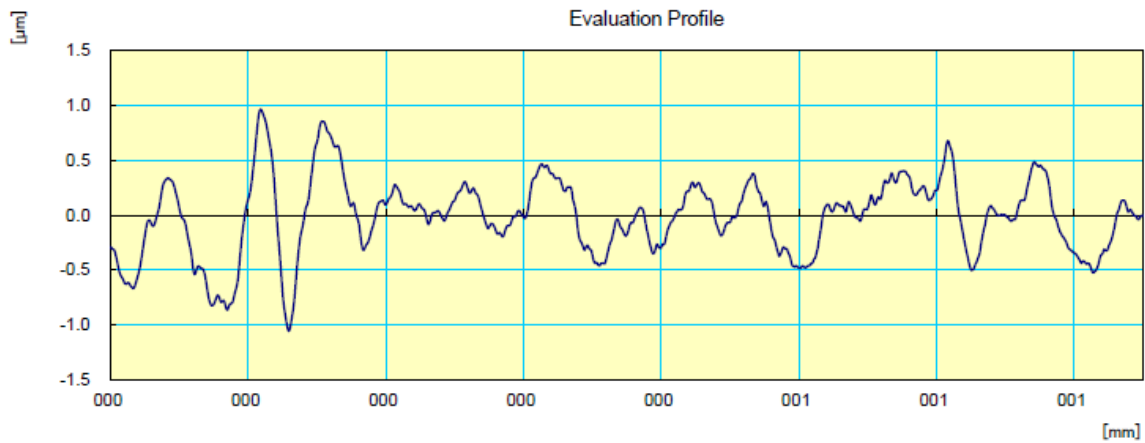
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.271 µm		
Rq	0.359 µm		
Rz	1.781 µm		

Lampiran 24. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji B



28- Sep -2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



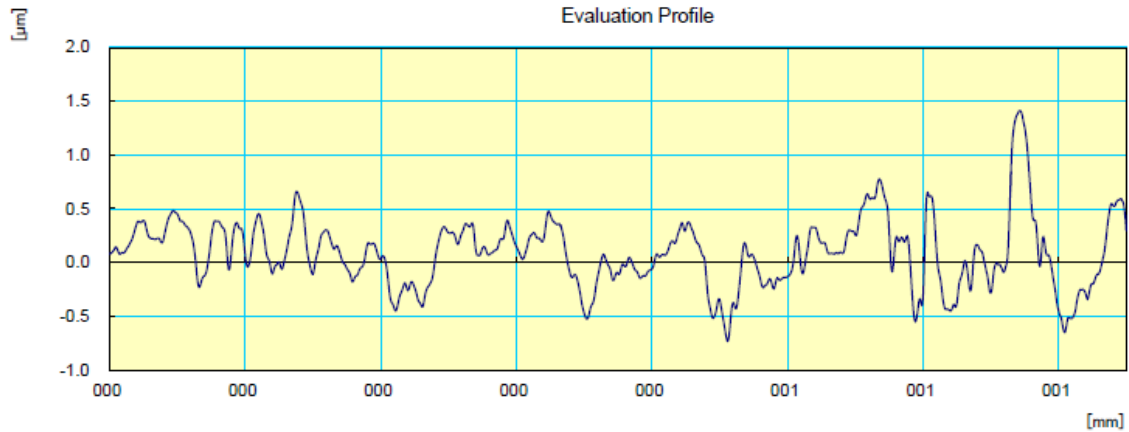
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λ_s	2.5 μ m	Filter	GAUSS
Ra	0.269 μ m		
Rq	0.335 μ m		
Rz	1.394 μ m		

Lampiran 25. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 1 Lokasi Uji C



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



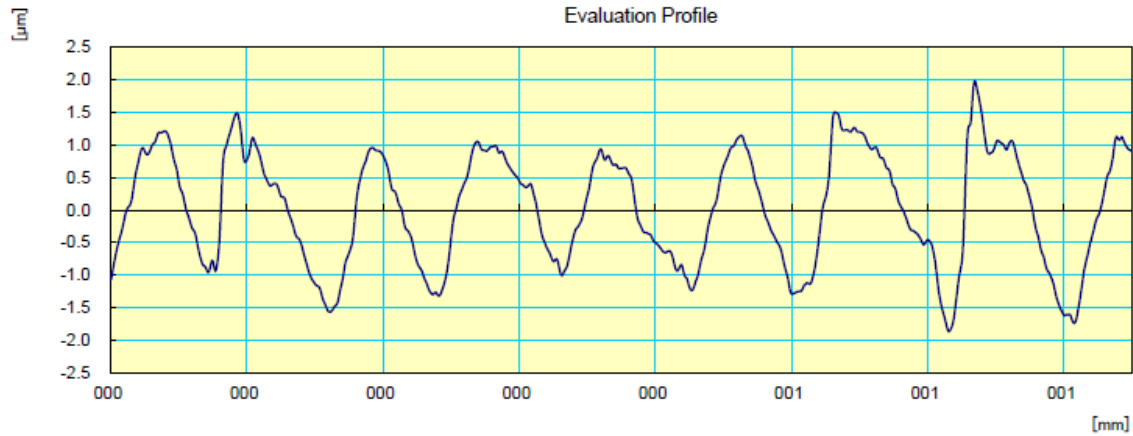
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.267 µm		
Rq	0.323 µm		
Rz	1.462 µm		

Lampiran 26. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji A



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



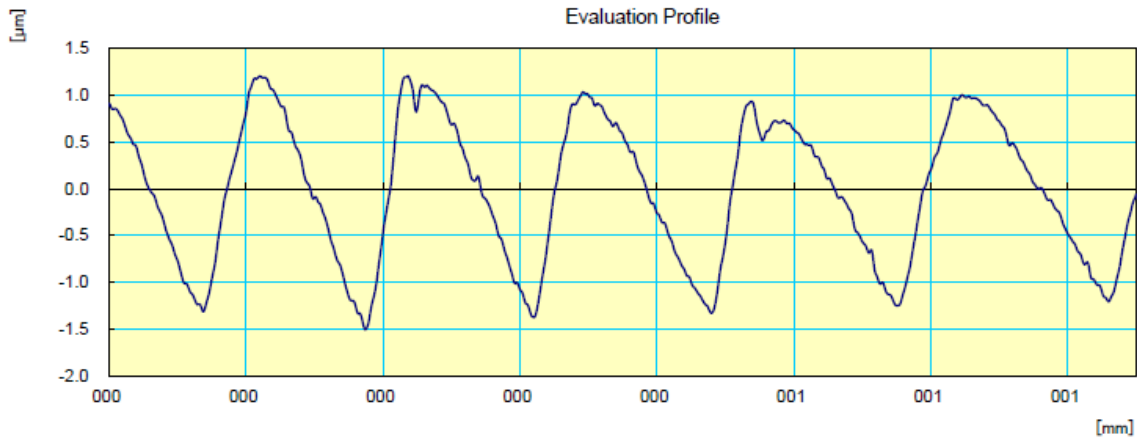
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.766 µm		
Rq	0.863 µm		
Rz	3.117 µm		

Lampiran 27. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji B



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



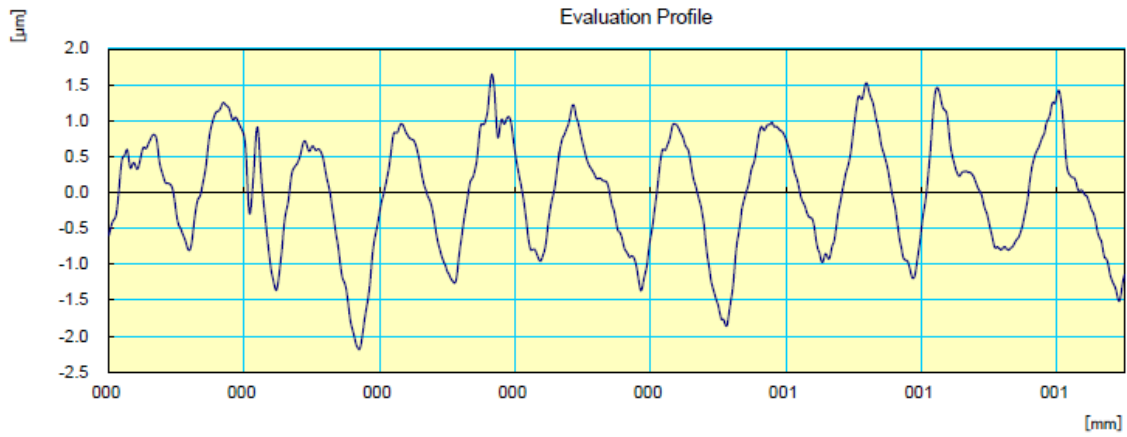
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.665 µm		
Rq	0.762 µm		
Rz	2.461 µm		

Lampiran 28. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 2 Lokasi Uji C



28- Sep -2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



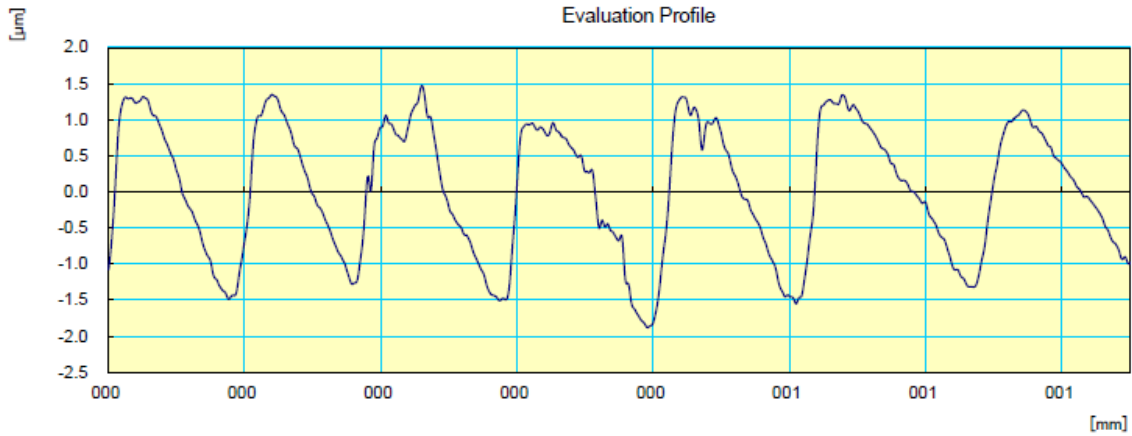
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.671 µm		
Rq	0.813 µm		
Rz	3.330 µm		

Lampiran 29. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji A



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00

Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λ_s	2.5µm	Filter	GAUSS

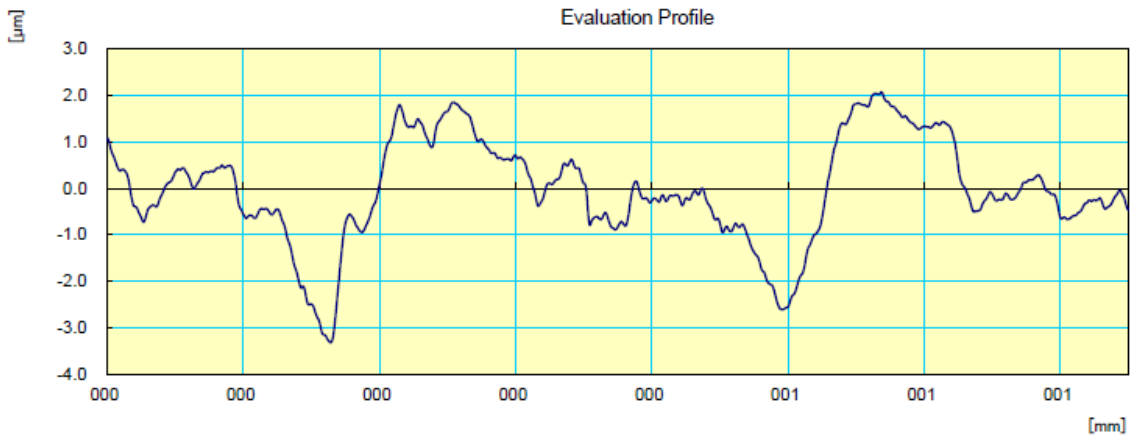
Ra	0.849 µm	
Rq	0.911 µm	
Rz	3.017 µm	

Lampiran 30. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji B



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



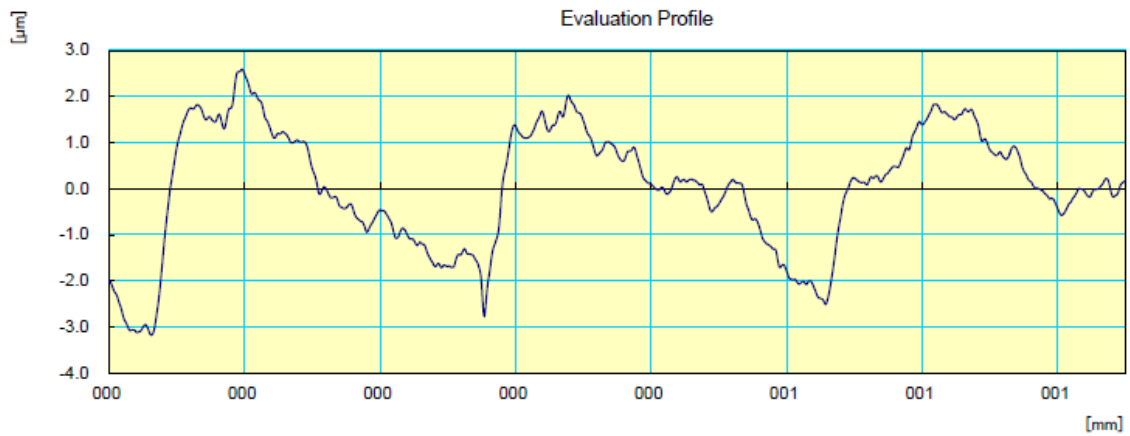
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.852 µm		
Rq	1.108 µm		
Rz	4.740 µm		

Lampiran 31. Hasil Uji Kekasaran Permukaan AA6061 Spesimen 3 Lokasi Uji C



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



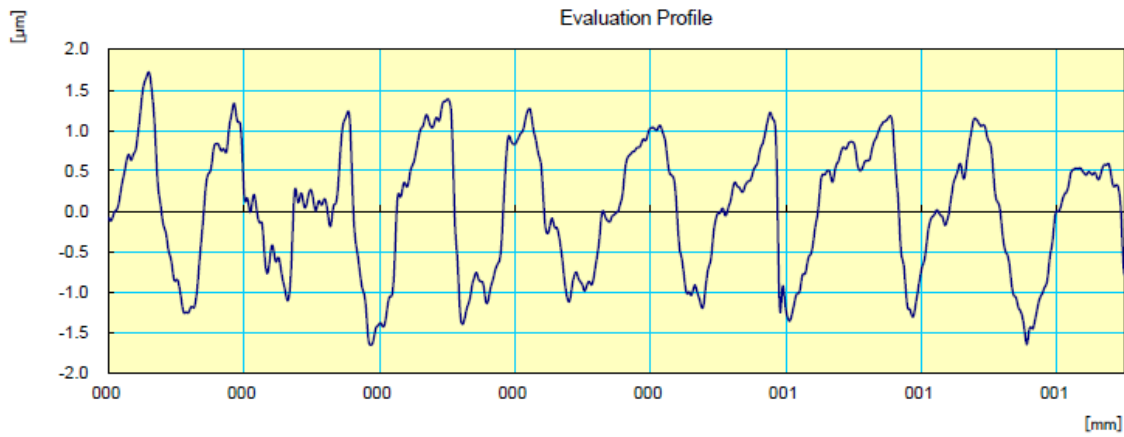
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.847 µm		
Rq	1.188 µm		
Rz	4.773 µm		

Lampiran 32. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 1 Lokasi Uji A



28- Sep -2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



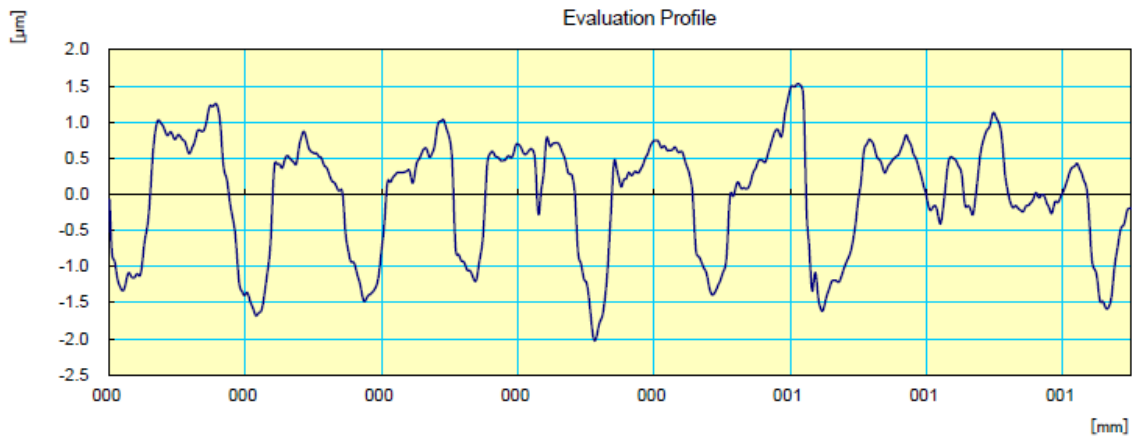
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.686 µm		
Rq	0.802 µm		
Rz	3.000 µm		

Lampiran 34. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 1 Lokasi Uji C



28- Sep -2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



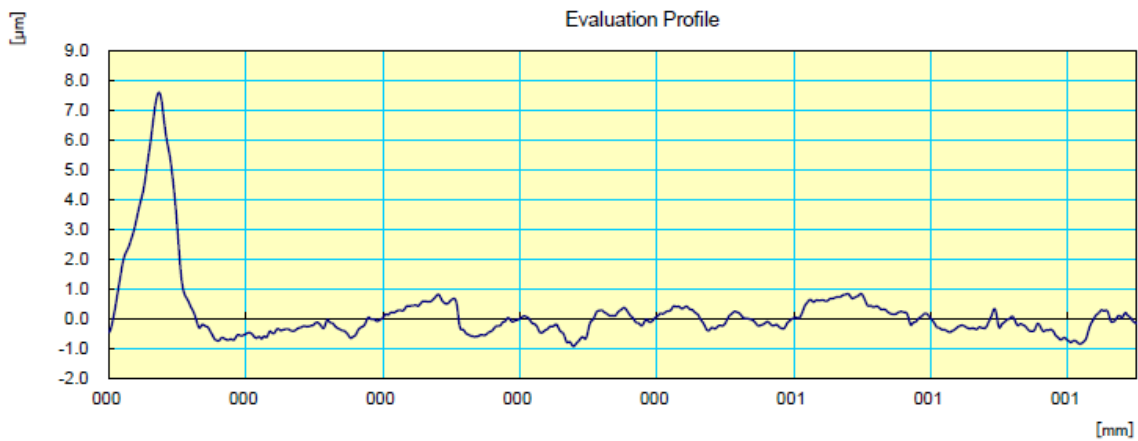
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λ_s	2.5 μ m	Filter	GAUSS
Ra	0.687 μ m		
Rq	0.806 μ m		
Rz	3.189 μ m		

Lampiran 35. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji A



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



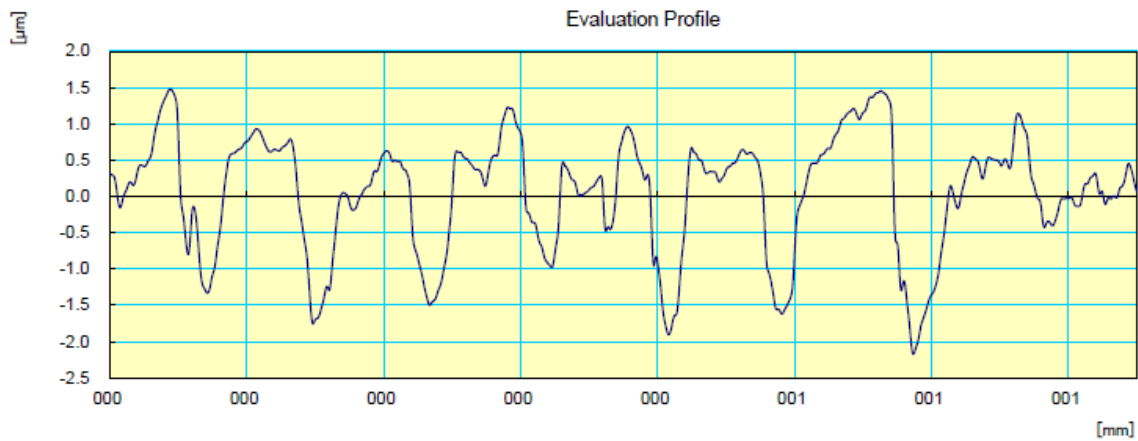
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.592 µm		
Rq	0.959 µm		
Rz	3.894 µm		

Lampiran 36. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji B



28- Sep -2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



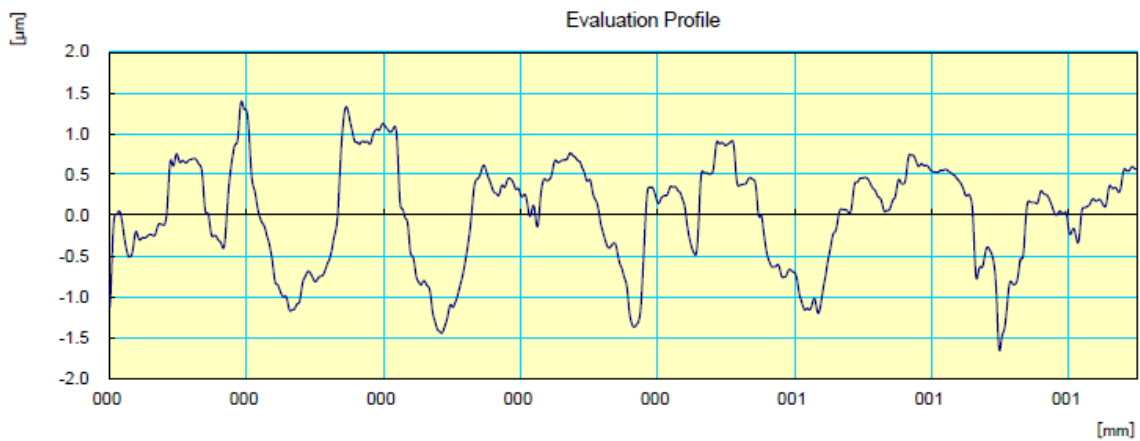
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.602 µm		
Rq	0.807 µm		
Rz	3.333 µm		

Lampiran 37. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 2 Lokasi Uji C



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



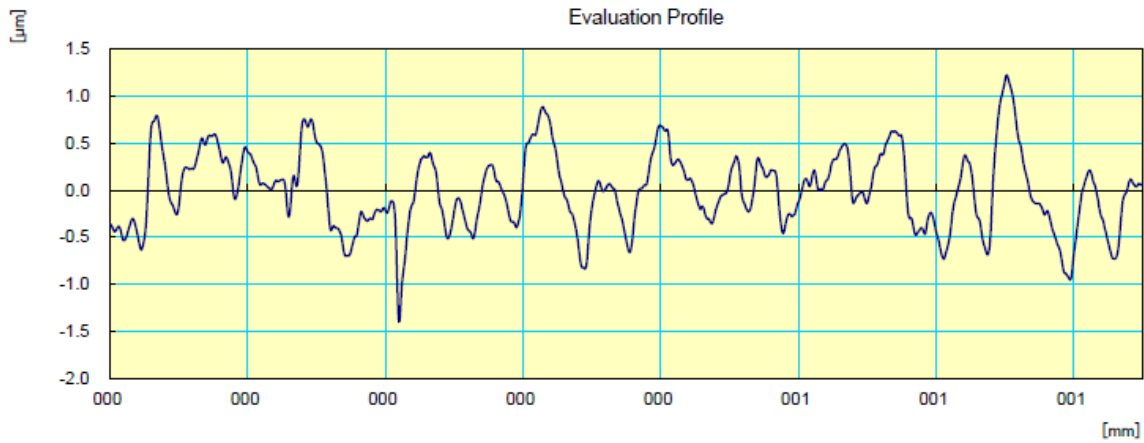
Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.594 µm		
Rq	0.634 µm		
Rz	2.514 µm		

Lampiran 38. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji A



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



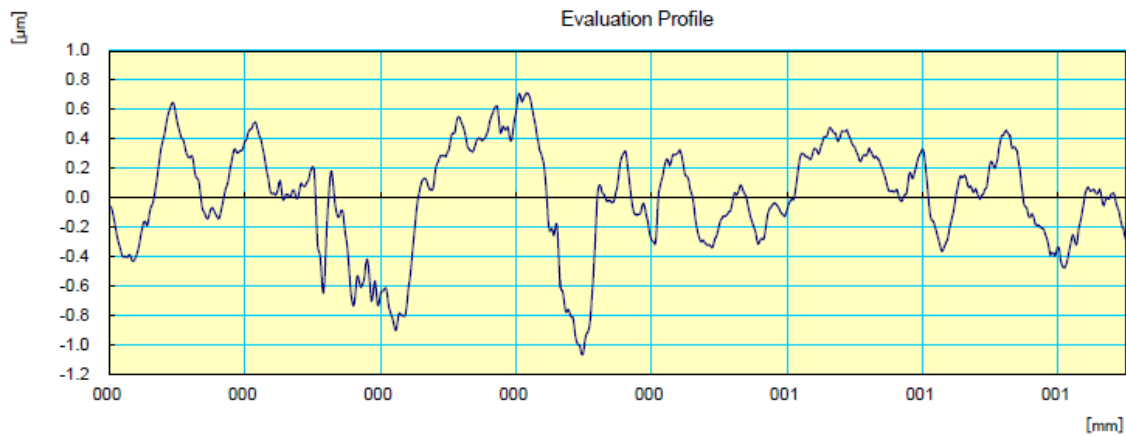
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λ_s	2.5 μ m	Filter	GAUSS
Ra	0.333 μ m		
Rq	0.412 μ m		
Rz	2.037 μ m		

Lampiran 39. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji B



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



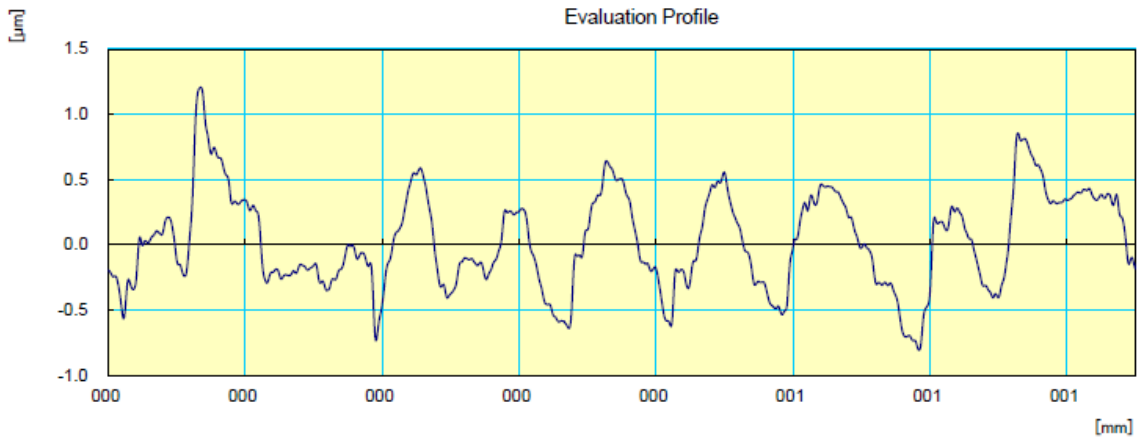
Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λs	2.5µm	Filter	GAUSS
Ra	0.327 µm		
Rq	0.351 µm		
Rz	1.430 µm		

Lampiran 40. Hasil Uji Kekasaran Permukaan Baja Karbon Spesimen 3 Lokasi Uji C



28-Sep-2016

CERTIFICATE OF INSPECTION



Work Name	Sample	Oprator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00
Standard	ISO 1997	N	3
Profile	R	Cut-Off	0.25mm
λ_s	2.5 μ m	Filter	GAUSS
Ra	0.329 μ m		
Rq	0.373 μ m		
Rz	1.629 μ m		

Lampiran 41. Surat Keterangan Pengujian Tarik



The Learning University

LABORATORIUM STRUKTUR
JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS NEGERI MALANG
 Gedung D9 Lt 1 Kampus UM Jl. Semarang No. 5 Malang Telp/Fax: (0341) 587 082

SURAT KETERANGAN

No. 27.01.2017

Yang bertandatangan di bawah ini Laboran / Teknisi Laboratorium Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang, menerangkan bahwa,

Nama : Jack Carol A.Pah
 NIM : 126060200111013
 Instansi : Progam Magister (S2) Teknik Mesin - Fakultas Teknik – Universitas Brawijaya

Telah melakukan pengujian kuat tarik terhadap material Alumunium – Baja Karbon Sedang sebanyak 70 benda uji pada tangga 22 Agustus 2016 – 28 November 2016 di Laboratorium Struktur - TeknikSipil – FT - UM.

Demikian keterangan ini dibuat untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Mengetahui,
 Kepala Laboratorium
 Teknik Sipil - FT - UM



Dr. Karyadi, M.P., M.T
 NIP. 19610312 198703 1 001

Malang, 27 Januari 2017
 Koordinator Uji
 Laboratorium Struktur - FT - UM

Lusti Mustikasari, Amd
 NIP. -

Lampiran 42. Foto Spesimen untuk Uji Tarik



Lampiran 43. Foto Spesimen untuk Foto Mikro

Lampiran 44. Foto Proses dan Peralatan Pengelasan Gesek

