



TUGAS AKHIR - TM 141585

**STUDI EKSPERIMENTAL *STICK-SLIP FRICTION* AKIBAT
MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION DENGAN
MATERIAL UJI *ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT*
POLYETHYLENE (UHMWPE) TERHADAP *STAINLESS*
*STEEL (AISI 304)***

ROY YAMSI KURNIA
NRP 2110 100 048

Dosen Pembimbing
Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TM 141585

**EXPERIMENTAL STUDY OF STICK-SLIP FRICTION DUE
TO MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION
MATERIAL TESTING WITH ULTRA HIGH MOLECULAR
WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE) ON STAINLESS
STEEL (AISI 304)**

**ROY YAMSI KURNIA
NRP 2110 100 048**

Adviser Lecturer
Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Engineering Faculty
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016**

**STUDI EKSPERIMENTAL *STICK-SLIP FRICTION*
AKIBAT *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT*
FRICTION DENGAN MATERIAL UJI *ULTRA HIGH*
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE)
TERHADAP *STAINLESS STEEL (AISI 304)***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Desain
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

ROY YAMSI KURNIA

Nrp. 2110 100 048

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E
(NIP.196511031990021001)

(Pembimbing)

2. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.
(NIP. 196807061999031004)

(Penguji I)

3. Hendro Nurhadi, Dipl. Ing. PhD
(NIP. 197511202002121002)

(Penguji II)

4. Moch. Solichin, ST, MT.
(NIP. 198908172015041003)

(Penguji III)



SURABAYA

Juli 2016

**STUDI EKSPERIMENTAL *STICK-SLIP FRICTION*
AKIBAT *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT*
FRICTION DENGAN MATERIAL UJI *ULTRA HIGH*
MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE (UHMWPE)
TERHADAP *STAINLESS STEEL (AISI 304)***

Nama Mahasiswa : Roy Yamsi Kurnia
NRP : 2110100048
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf kaelani, MSc.E

Abstrak

Dua buah atau lebih benda yang mengalami kontak dan bergerak relatif satu sama lain akan menimbulkan gaya gesek yang dapat menyebabkan terjadinya kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda, yang biasa disebut keausan. Sejauh ini, telah banyak dilakukan penelitian terkait keausan akibat gesekan satu arah dan gesekan dua arah. Pada kecepatan tertentu, sering terjadi suatu fenomena dimana keausan yang terjadi lebih besar dibandingkan yang lain. Fenomena tersebut disebabkan oleh adanya Stick-Slip Friction. Namun, masih sedikit ditemui penelitian mengenai gesekan tersebut.

Penelitian ini diawali dengan analisa kinematika gerakan spesimen untuk menentukan pada rasio kecepatan antara pin dan disk berapakah stick-slip terjadi. Setelah menentukan rasio kecepatan yang akan digunakan, kemudian dilakukan pengambilan data secara langsung besar volume keausan menggunakan tribometer tipe Pin-on-disk dengan material Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) sebagai pin uji dan Stainless steel sebagai disk, dimana pin dan disk akan bergerak secara rotasi dan saling mengalami kontak permukaan sehingga akan tercipta gesekan ke arah yang berubah-ubah pada permukaan material. Penelitian dilakukan kondisi tanpa pelumasan (dry-sliding), dimana pengujian diberikan variabel yang sama; yaitu pin diberikan beban sebesar 4kg dan digesekan

dengan jarak 2000 meter. Spesimen yang telah diuji selanjutnya akan diamati struktur permukaannya menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 5 kali dan 10 kali untuk dapat dianalisa sehingga diketahui mekanisme keausan dan penyebab keausan material tersebut, sedangkan data hasil pengujian selanjutnya akan diolah untuk diketahui laju keausan (wear rate) dari spesimen uji. Sebagai data pembandingan dalam pembahasan, akan dilihat juga pola kerusakan permukaan benda yang mengalami stick-slip akibat uni-directional contact serta hasil simulasi dari pemrograman.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah daerah stick-slip yang terjadi pada permukaan pin berbeda-beda dari setiap rasio kecepatan antara pin dan disk. Pada saat rasio kecepatan 4,2 daerah yang mengalami stick-slip terjadi pada radius 9 mm dari pusat pin, ketika rasio kecepatan 5 daerah yang mengalami stick-slip terjadi pada radius 8 mm dari pusat pin, saat rasio kecepatan 6.5 daerah yang mengalami stick-slip terjadi pada radius 6 mm dari pusat pin, kemudian saat rasio kecepatan 10 daerah yang mengalami stick-slip terjadi pada radius 4 mm dari pusat pin, dan saat rasio kecepatan 20 maka daerah yang mengalami stick-slip terjadi pada radius 2 mm dari pusat pin. Laju keausan benda yang mengalami stick-slip friction jika dibandingkan dengan benda yang mengalami uni-directional contact friction serta Mekanisme keausan yang terjadi pada saat fenomena stick-slip terjadi adalah keausan abrasif dan adhesif.

Kata kunci : Multi-directional, Stick-Slip Friction

**EXPERIMENTAL STUDY OF STICK-SLIP
FRICTION DUE TO MULTI-DIRECTIONAL
CONTACT FRICTION MATERIAL TESTING WITH
ULTRA HIGH MOLECULAR WEIGHT
POLYETHYLENE (UHMWPE) ON STAINLESS
STEEL (AISI 304)**

Student Name : Roy Yamsi Kurnia
NRP : 2110100048
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Adviser Lecture : Ir. Yusuf kaelani, MSc.E

Abstract

Two or more objects that are in contact and move relative to each other will cause friction can cause damage such as the loss of material from the surface of the object, which is called wear. So far, has done a lot of research related wear caused by friction one-way and two-way friction. At a certain speed, a phenomenon often occurs where the wear that occurs is larger than the others. That phenomenon is caused by the Stick-Slip Friction. However, there is still little research on the friction encountered.

This research begins with an analysis of the kinematics of the movement of specimens to determine the speed ratio between the pin and the disk what is the stick-slip occurs. After determining the speed ratio to be used, then do capture data directly large volume of wear using Tribometer type of pin-on-disk with material Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as a test pin and stainless steel as a disk, wherein the pin and the disk will move by rotation and mutually in contact surface that will create friction in the direction of changing the surface of the material. The research was conducted without lubrication conditions (dry-sliding), where the testing is given the same variable; the pin is given a load of 4kg and rubbed with a distance of 2000 meters. Specimens have been tested will then be observed surface structure using optical microscope with magnification of 5 times and 10

times to be analyzed so that the known mechanism of wear and tear and cause wear of the material, while subsequent test results data will be processed for the known rate of wear (wear rate) of the test specimen. As data comparison in discussion, also will see the pattern of damage to the surface of the object that is experiencing the stick-slip due to uni-directional contact and simulated results of programming.

The results obtained from this research is the stick-slip that occurs on the surface of the pin is different from any ratio between pin and disk speed. At the time of the speed ratio of 4.2 areas experiencing stick-slip occurred in a radius of 9 mm from the center pin, when the speed ratio 5 areas experiencing stick-slip occurred in a radius of 8 mm from the center pin, when the speed ratio of 6.5 areas experiencing stick-slip occurred in a radius of 6 mm from the center pin, then when the ratio of the speed of 10 areas experiencing stick-slip occurred in a radius of 4 mm from the center pin, and when the ratio of the speed of the areas experiencing 20 stick-slip occurred in a radius of 2 mm from the center pin. The rate of wear of objects experiencing stick-slip friction when compared with the objects that undergo uni-directional contact friction and wear mechanisms that occur during stick-slip phenomenon occurs is abrasive and adhesive wear.

Keywords : Multi-directional, Stick-Slip Friction

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga Tugas Akhir dengan judul “**Studi Eksperimental *Stick-Slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contact Friction* dengan Material Uji *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) Terhadap *Stainless Steel* (AISI 304)**” ini dapat terselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir ini adalah salah satu mata kuliah wajib pada tahap Sarjana di Jurusan Teknik Mesin. Adanya Tugas Akhir ini tentunya juga akan membekali para mahasiswa yang lain dengan kemampuan deskripsi, analisis, dan sintesis yang berguna dalam penyusunan Tugas Akhir selanjutnya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasihnya kepada :

1. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E. selaku Dosen Pembimbing Tugas yang selalu memberi bimbingan serta arahan bagi penulis dalam menyelesaikan Akhir ini.
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.
3. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, MT.; Bapak Hendro Nurhadi, Dipl. Ing. PhD; dan Bapak Moch. Solichin, ST, MT. selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang sangat membangun.
4. Kedua Orang Tua saya, Yakub Usi Mambela dan Marsiana Toding yang selalu memberikan dukungan baik melalui materil, doa dan semangat, serta sehingga penulis dapat menyelesaikan studi dengan baik, serta kedua adik saya, Listya Frisca Adriani dan Aditya Taruk Allo yang juga selalu memberikan semangat dan dukungan dalam doa.
5. Orang Tua wali saya di Surabaya, Bapak Obednego Balalembang dan Ibu Elisabeth Yanti yang memberikan semangat dan selalu mendukung dalam doa kepada penulis.

6. Chrismawaty Sejahtera Tombe yang juga tidak pernah berhenti memberi dorongan, semangat, kasih sayang dan mendoakan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman PKM dan juga jemaat Gereja KIBAID Surabaya yang tiada henti memberikan semangat kepada penulis
8. Saudara Grandika Andrayodi sebagai rekan sekerja dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Teman teman M-53 dan juga terlebih khusus kepada Pampam, Raja, Tj, Firman, Ittang, Aufar, Tito, Faisal beserta teman-teman Lab. Mekanika Benda Padat yang lain.
10. Rekan-rekan semuanya yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu, terima kasih atas bantuan serta dorongannya.

Dalam pembuatan Tugas Akhir ini tentunya tidak luput dari kekurangan dan kelemahan. Untuk itu segala kritikan, saran, sumbangan pikiran apapun untuk perbaikan tugas ini sangat diharapkan dari pembaca. Akhir kata, semoga tugas ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2016

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|--|------------|
| HALAMAN JUDUL | |
| LEMBAR PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | |
| KATA PENGANTAR | i |
| DAFTAR ISI..... | iii |
| DAFTAR GAMBAR..... | vii |
| DAFTAR TABEL..... | xi |
| DAFTAR SIMBOL | xii |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang Masalah..... | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Batasan Masalah | 2 |
| 1.4 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.5 Manfaat Penelitian | 3 |
| | |
| BAB II LANDASAN TEORI..... | 5 |
| 2.1 Keausan (<i>Wear</i>)..... | 5 |
| 2.1.1 Mekanisme Keausan (<i>Wear Mechanism</i>) | 5 |
| 2.1.2 Metode Menghitung Volume yang Tergerus | 10 |
| 2.1.3 Menghitung Laju Keausan..... | 13 |
| 2.2 Pelumasan | 14 |
| 2.3 Karakteristik <i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i> (<i>UHMWPE</i>)..... | 15 |
| 2.4 Karakteristik <i>Stainless Steel</i> | 15 |
| 2.5 Teori <i>Stick-slip</i> | 15 |
| 2.6 Penelitian Terdahulu | 19 |
| 2.6.1 Pengujian keausan permukaan material akibat <i>multi-</i> <i>directional contact friction</i> | 19 |
| 2.6.2 Pengujian Keausan <i>Ultra High Molecular Weight</i> <i>Polyethylene (UHMWPE)</i> Terhadap <i>Stainless Steel</i> ... | 21 |
| 2.6.3 Pengujian <i>Stick-slip Friction</i> dan Keausan pada <i>Articular Joints</i> | 23 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2.6.4 | Pengujian keausan permukaan yang dipengaruhi oleh <i>stick-slip friction</i> akibat <i>multi-directional contact friction</i> | 24 |
| 2.6.5 | Hasil Pemrograman Simulasi <i>Stick-slip Friction</i> | 27 |
| BAB III METODOLOGI | | 35 |
| 3.1 | Langkah-langkah Penelitian..... | 35 |
| 3.1.1 | Studi Literatur | 36 |
| 3.1.2 | Perumusan Masalah | 36 |
| 3.1.3 | Penentuan Variabel Uji dengan Analisa Kinematika Gerakan Spesimen | 37 |
| 3.1.4 | Persiapan Alat Uji..... | 46 |
| 3.1.5 | Persiapan Spesimen | 51 |
| 3.1.6 | Pengambilan Data Penelitian | 53 |
| 3.1.7 | Analisa Struktur Permukaan Spesimen Uji..... | 54 |
| 3.1.8 | Pengolahan Data Penelitian, Pembuatan Grafik dan Analisa Hasil Penelitian | 54 |
| 3.1.9 | Kesimpulan dan Saran | 55 |
| 3.2 | Perencanaan Eksperimen | 55 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN..... | | 57 |
| 4.1 | Analisa <i>Stick-Slip Friction</i> pada Permukaan Pin | 57 |
| 4.1.1 | Pengujian Rasio Kecepatan 4,2..... | 57 |
| 4.1.2 | Pengujian Rasio Kecepatan 5..... | 59 |
| 4.1.3 | Pengujian Rasio Kecepatan 6.5..... | 61 |
| 4.1.3 | Pengujian Rasio Kecepatan 10..... | 63 |
| 4.1.4 | Pengujian Rasio Kecepatan 20..... | 65 |
| 4.1.6 | Pengujian <i>Uni-Directional Contact</i> | 67 |
| 4.2 | Data Hasil Pengujian..... | 69 |
| 4.3 | Perhitungan Laju Keausan | 70 |
| 4.3.1 | Contoh Perhitungan | 71 |
| 4.4 | Analisa Laju Keausan | 72 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | | 75 |
| 5.1 | Kesimpulan | 75 |

5.2 Saran 76

DAFTAR PUSTAKA
LAMPIRAN
RIWAYAT PENULIS

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------------|---|----|
| Gambar 2.1 | Skema Gambar dari 4 Mekanisme Keausan | 6 |
| Gambar 2.2 | Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Adhesif..... | 6 |
| Gambar 2.3 | Mekanisme Keausan Adhesif..... | 7 |
| Gambar 2.4 | Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Abrasif..... | 8 |
| Gambar 2.5 | Mekanisme Keausan Abrasif | 8 |
| Gambar 2.6 | Keausan Lelah pada <i>Ball Bearing</i> | 9 |
| Gambar 2.7 | Mekanisme Keausan Lelah | 9 |
| Gambar 2.8 | Keausan Korosif pada Baja..... | 10 |
| Gambar 2.9 | Mekanisme Keausan Korosif | 10 |
| Gambar 2.10 | Hipotesis Model Partikel Setengah Bola yang Bergesekan pada Saat <i>Sliding</i> | 11 |
| Gambar 2.11 | Model Keausan Abrasif oleh Identor Berbentuk Kerucut | 12 |
| Gambar 2.12 | Gesekan dengan Menggunakan Pelumasan | 14 |
| Gambar 2.13 | Pola stick-slip pada beberapa pembebanan..... | 16 |
| Gambar 2.14 | menunjukkan kurva stick-slip dengan pembebanan yang berbeda..... | 17 |
| Gambar 2.15 | Kurva stick-slip dengan kecepatan yang berbeda | 18 |
| Gambar 2.16 | Model Pengujian yang Dilakukan Hasry | 19 |
| Gambar 2.17 | Hasil Penelitian Hasry untuk Pengujian Dry Sliding dan Wet Sliding..... | 20 |
| Gambar 2.18 | Hasil Penelitian Hasry untuk Perbandingan Keausan antara Uni-Directional dengan Multi- Directional Contact Friction | 20 |
| Gambar 2.19 | Model Pengujian Yang Dilakukan Solichin..... | 21 |

| | |
|---|----|
| Gambar 2.20 Grafik Hubungan <i>Specific Wear Rate</i> Dengan <i>Load</i> Pada Dua <i>Speed Control</i> Yang Berbeda Kondisi <i>Lubrication</i> | 22 |
| Gambar 2.21 Grafik Hubungan <i>Specific Wear Rate</i> Antara <i>Dry Sliding</i> Dengan <i>Lubrication</i> Pada Kecepatan 0,13 m/s..... | 22 |
| Gambar 2.22 Skema dan Hasil Penelitian Dong Woog Lee, Xavier Banquy, dan Jacob N. Israelachvili..... | 24 |
| Gambar 2.23 Model Pengujian yang dilakukan Dewi | 25 |
| Gambar 2.24 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 1,7 sampai 6,9 rpm/rpm | 25 |
| Gambar 2.25 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 7 sampai dengan 10,5 rpm/rpm..... | 26 |
| Gambar 2.26 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 10,8 sampai dengn 61,5 rpm/rpm | 26 |
| Gambar 2.27 Vektor - vektor kecepatan pada permukaan pin pada rasio kecepatan 4.2, dengan kondisi nilai teta 1 yang berbeda-beda (a) 0.1, (b) 0.785, (c) 1.57, (d) 2.355, dan (e) 3.14. | 29 |
| Gambar 2.28 Daerah pin yang mengalami fenomena stick-slip dengan meningkatkan variasi dari nilai teta 1 pada rasio kecepatan 4,2 | 30 |
| Gambar 2.29 Hasil simulasi daerah-daerah yang mengalami stick-slip friction dengan variasi rasio kecepatan (a) 4.2, (b) 5, (c) 6.5, (d) 10, dan (e) 20..... | 33 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian | 36 |
| Gambar 3.2 Analisa vektor kecepatan pada pin..... | 40 |
| Gambar 3.2 Titik analisa pada pin | 41 |

- Gambar 3.3** Perubahan posisi lintasan titik P,Q,R,S dan T. pada disk tribometer, Untuk (a) $\omega_{pin} = 4x \omega_{disk}$ (b) $\omega_{pin} = 6x \omega_{disk}$ (c) $\omega_{pin} = 10x \omega_{disk}$ 43
- Gambar 3.4** Grafik Perubahan Posisi Titik setiap radius pin pada Disk (a) $\omega_{pin} = 4 x \omega_{disk}$ (b) $\omega_{pin} = 5 x \omega_{disk}$ (c) $\omega_{pin} = 6,7x \omega_{disk}$ (d) $\omega_{pin} = 10x \omega_{disk}$ (e) $\omega_{pin} = 20x \omega_{disk}$ 46
- Gambar 3.5** *Set-up* Alat Tribometer tipe *pin on disk* 47
- Gambar 3.6** Kalibrasi Pembebanan..... 48
- Gambar 3.7** Kalibrasi *Speed Control*..... 49
- Gambar 3.8** Dimensi Pin Spesimen Uji 51
- Gambar 3.9** Dimensi Disk 52
- Gambar 3.10** Timbangan Digital 53
- Gambar 3.11** Mikroskop Optis 54
- Gambar 4.2** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 5, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x 60
- Gambar 4.3** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 6,5 , dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x 62
- Gambar 4.4** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 10, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x 64
- Gambar 4.5** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 20, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x 66
- Gambar 4.6** Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Uni-Directional Contact dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x. 68

Gambar 4.10 Grafik perbandingan laju keausan stick-slip friction dengan uni-directional contact friction. 72

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 3.1. Rasio Kecepatan antara Pin dan Disk berdasarkan Hasil Kalibrasi..... | 49 |
| Tabel 3.2 Perencanaan Eksperimen Pengujian..... | 55 |
| Tabel 4.1. Data Perubahan Massa Spesimen Uji..... | 69 |
| Tabel 4.2. Hasil Perhitungan Laju Keausan (<i>Wear Coefficient, K'</i>) | 70 |

DAFTAR SIMBOL

| | |
|----------------|---|
| K' | <i>Wear coefficient</i> (mm ³ /Nm) |
| k_{ab} | Koefisien keausan abrasif |
| k_{ad} | Koefisien keausan adesif |
| μ_k | koefisien gesek kinetis (N) |
| ω_1 | Kecepatan sudut disk (rad/s) |
| ω_2 | Kecepatan sudut pin (rad/s) |
| ΔV | Perubahan volume |
| Δm | Perubahan massa (gram) |
| d | Diameter pin (mm) |
| F | Beban (N) |
| H | <i>Hardness</i> (H) |
| L | Jarak lintasan (m) |
| n | Kecepatan putaran disk (rpm) |
| R ₁ | Radius disk (mm) |
| R ₂ | Radius pin (mm) |
| t | Waktu (menit) |
| v | kecepatan (mm/s) |
| e | <i>Exponential</i> |
| i | Imajiner |
| θ_1 | Sudut kontur disk (rad) |
| θ_2 | Sudut kontur pin (rad) |
| π | <i>Phi</i> (3,14) |
| ρ | Massa jenis (g/cm ³) |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Salah satu faktor yang mempengaruhi umur pakai sebuah mesin adalah adanya gesekan satu sama lain yang terjadi bila komponen-komponen dalam permesinan saling kontak, sehingga menimbulkan adanya pengikisan permukaan komponen. Gaya yang ditimbulkan oleh dua benda yang bergesekan dan arahnya berlawanan disebut dengan gaya gesek. Gaya gesek atau *friction* yang terjadi pada benda padat terdiri dari dua jenis, yaitu gaya gesek statis dan gaya gesek kinetis. Jika benda yang mengalami kontak tidak mengalami pergerakan, maka gesekannya disebut dengan gesekan statis. Jika gaya yang dikerjakan cukup untuk menggerakkan benda, maka gerakannya disebut dengan gaya kinetis. Namun, gesekan dapat saja mempunyai gabungan antara statis dan kinetis. Gesekan tersebut adalah *stick-slip friction*. *Stick-slip friction* juga terjadi ketika gerakan suatu benda mencapai kecepatan nol atau diam seketika kemudian bergerak kembali. Salah satu contoh fenomena *stick-slip friction* di kehidupan sehari-hari adalah bunyi yang timbul pada pintu ketika bergesekan dengan lantai saat hendak digerakkan dan suara yang timbul ketika dawai bergesekan dengan senar biola.

Gesekan dapat bermanfaat atau merugikan. Sepatu olahraga telapaknya dibuat kasar sehingga pengguna sepatu tersebut tidak mudah terpeleset merupakan salah satu contoh bahwa gesekan dapat bermanfaat. Namun, gesekan dapat juga merugikan karena gesekan menyebabkan kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda atau disebut dengan keausan. Keausan yang lebih besar akan terjadi pada benda yang kekerasannya lebih rendah. Berbagai faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan gerak, besar beban, profil permukaan serta kekerasan (*hardness*) dari material tersebut. Gesekan antar permukaan juga akan menimbulkan panas yang juga mempengaruhi laju keausan.

Dampak dari gesekan antara dua material bisa dikurangi dengan memberikan pelumasan yang tepat pada permukaan benda yang mengalami kontak.

Stick-slip friction dapat menimbulkan keausan yang besar. Namun, penelitian-penelitian terkait keausan akibat *stick-slip friction* masih jarang dilakukan. Sedangkan fenomena *stick-slip friction* tidak jarang ditemui dan dampak dari fenomena tersebut dapat menimbulkan kerusakan yang besar. Fenomena ini sangat sering terjadi pada gesekan dengan kontak searah maupun gesekan dengan kontak banyak arah. Aplikasi gesekan dengan kontak banyak arah (*multi-directional*) salah satunya yaitu pada sendi lutut buatan. Pada sendi lutut buatan, terdapat *ball joint* dengan material *stainless steel* yang bergerak dengan kontak banyak arah dan bergesekan dengan tempurung yang terbuat dari material UHMWPE. Untuk itulah perlu dilakukan penelitian terkait keausan yang dipengaruhi oleh *stick-slip friction* akibat gesekan dengan kontak banyak arah (*multi-directional*)

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana daerah terjadinya *stick-slip* dengan pengujian *multi-directional contact friction* pada permukaan benda yang mengalami variasi kecepatan dan variasi radius pin?
2. Bagaimana mekanisme keausan yang terjadi pada benda yang mengalami *stick-slip friction*?
3. Bagaimana perbandingan mekanisme keausan akibat pada kondisi *uni-directional contact* dengan *multi-directional contact friction* secara eksperimental?
4. Bagaimana hasil penelitian *stick-slip friction* secara teoritis (simulasi) dengan secara eksperimental?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Material yang diuji adalah *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE; PE 1000) terhadap *stainless steel* (AISI 304)
2. Beban yang digunakan adalah 4 kg
3. Variabel pengujian yang digunakan adalah rasio kecepatan antara kecepatan putar pin terhadap kecepatan putar disk dan radius pada pin.
4. Putaran pin dan disk dianggap konstan
5. Pembebanan (*load*) pada pin dianggap *uniform*
6. Jarak tempuh lintasan pada setiap putaran pin dianggap sama
7. Tidak ada partikel pengotor diantara permukaan pin dan disk yang mengalami kontak selama dilakukan pengujian
8. Pengaruh perubahan temperatur yang terjadi selama kontak diabaikan
9. Kondisi penelitian dilakukan dengan *dry sliding*

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui daerah terjadinya *stick-slip* dengan pengujian *multi-directional contact friction* pada permukaan benda yang mengalami variasi kecepatan dan variasi radius pin.
2. Mengetahui mekanisme keausan yang terjadi pada benda yang mengalami *stick-slip friction*.
3. Mengetahui perbandingan mekanisme keausan akibat pada kondisi *uni-directional contact* dengan *multi-directional contact friction* secara eksperimental.
4. Membandingkan hasil penelitian *stick-slip friction* secara teoritis (simulasi) dengan secara eksperimental.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat memprediksi umur dari dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesekan

2. Dapat menentukan solusi yang tepat untuk mengurangi keausan yang terjadi pada dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesek

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Keausan (*Wear*)

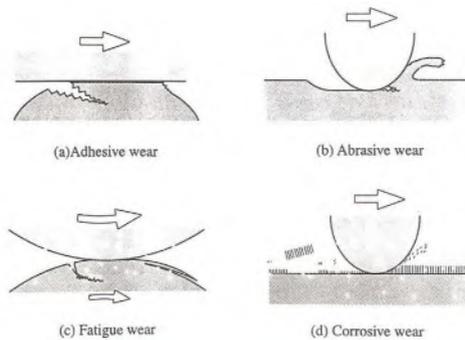
Keausan (*Wear*) adalah kerusakan pada permukaan atau hilangnya material dari satu atau kedua permukaan benda padat pada saat terjadi gesekan, perputaran atau efek dari gerakan relatif antara satu sama lain. Pada umumnya, keausan terjadi antara permukaan yang berinteraksi pada *asperities*. *Asperities* merupakan istilah yang dikenalkan oleh Coulomb yang mempunyai makna berupa ketidakteraturan mikroskopis pada permukaan. Keausan bukan merupakan sifat dasar material, melainkan respon material terhadap aksi mekanis (gesekan). Akibat negatif yang ditimbulkan adalah ketahanan (*durability*) dan kehandalan (*reliability*) dari benda yang aus akan berkurang karena perubahan dimensi dari benda tersebut.

2.1.1 Mekanisme Keausan (*Wear Mechanism*)

Terdapat 4 mekanisme terjadinya keausan yang secara umum dianggap sebagai dasar dan utama, yaitu:

1. Keausan adhesif (*Adhesive wear mechanism*)
2. Keausan abrasif (*Abrasive wear mechanism*)
3. Keausan lelah (*Fatigue wear mechanism*)
4. Keausan korosif (*Corrosive wear mechanism*)

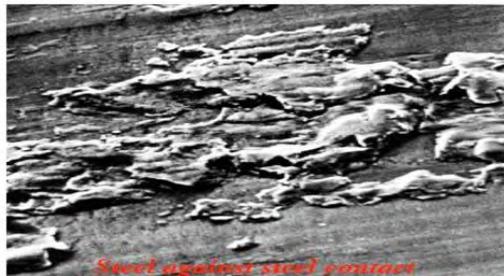
Skema gambar dari keempat mekanisme keausan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.1. berikut.



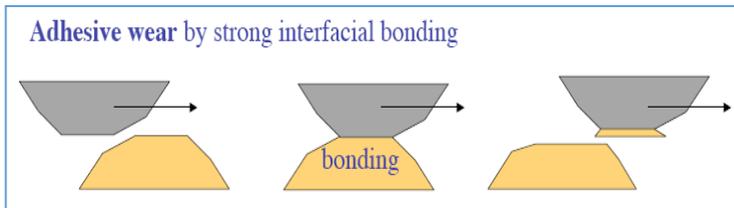
Gambar 2.1 Skema Gambar dari 4 Mekanisme Keausan

1. Keausan Adhesif (*Adhesive Wear Mechanism*)

Keausan adhesif terjadi bila kontak permukaan dari material mengakibatkan adanya perekatan (*adhesive*) antara satu sama lain. Bila tekanan normal sedang diterapkan, tekanan lokal di *asperities* akan menjadi sangat tinggi. Seringkali tekanan lokal tersebut melampaui tegangan luluh material sehingga menyebabkan terjadinya deformasi plastis dan pada akhirnya terjadi pengikatan (*bonding*) permukaan material yang satu oleh yang lain. Jika sifat adhesif dari material lebih tinggi dari sifat kohesinya, akan terjadi pengurangan materi pada permukaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan mekanismenya pada Gambar 2.3.



Gambar 2.2 Pengamatan *Micrographs* Keausan Adhesif

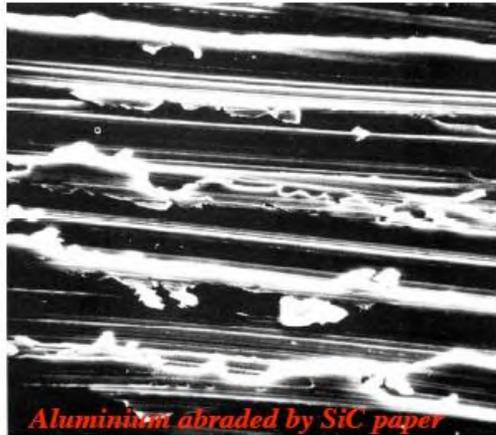


Gambar 2.3 Mekanisme Keausan Adhesif

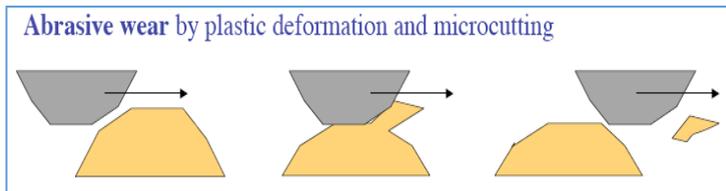
Faktor yang menyebabkan terjadinya keausan adhesif antara lain kontaminasi permukaan dan terjadinya ikatan (*bonding*) antar molekul pada material, yaitu ikatan ion, kovalen, ikatan logam, atau ikatan *van der Waals* dari material yg bergesekan.

2. Keausan Abrasif (*Abrasive Wear Mechanism*)

Keausan abrasif terjadi bila suatu partikel keras dari material tertentu meluncur pada permukaan material lain yang lebih lunak sehingga terjadi penetrasi atau pemotongan oleh *asperities* dari material yang lebih keras terhadap material yang lebih lunak. Keausan abrasif juga dapat terjadi karena adanya partikel kecil yang terperangkap pada permukaan material, sementara kekerasan partikel tersebut lebih tinggi dari kekerasan permukaan material. Salah satu bentuk keausan abrasif seperti diperlihatkan pada Gambar 2.4, sedangkan mekanisme keausannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.4 Pengamatan *Micrographs* Keausan Abrasif



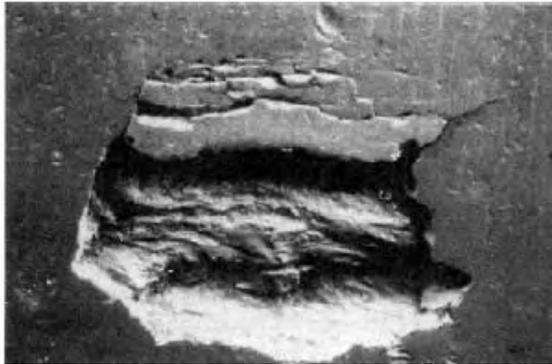
Gambar 2.5 Mekanisme Keausan Abrasif

Faktor yang mempengaruhi keausan abrasif antara lain kekasaran permukaan dan perbedaan kekerasan material yang bergesekan.

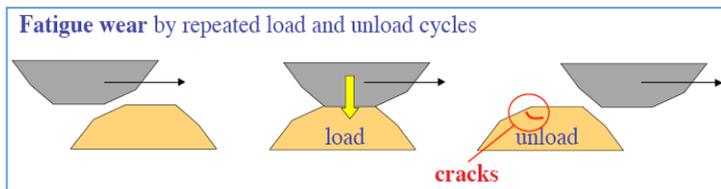
3. Keausan Lelah (*Fatigue Wear Mechanism*)

Keausan lelah pada material disebabkan pemberian beban secara berulang selama terjadinya gesekan antar permukaan material. *Fatigue* hanya akan terjadi jika beban yang diterima material lebih besar dari *fatigue strength* dari material itu sendiri. Keausan lelah diawali dengan pembentukan retak-retak mikro pada permukaan (*surface*) material dan kemudian menyebar ke bawah permukaan (*subsurface*). Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya

akan menyatu dan menyebabkan terjadinya pengelupasan material. Gambar 2.6. menunjukkan kegagalan lelah yang terjadi pada *ball bearing* dan Gambar 2.7. menunjukkan mekanisme dari keausan lelah.



Gambar 2.6 Keausan Lelah pada *Ball Bearing*



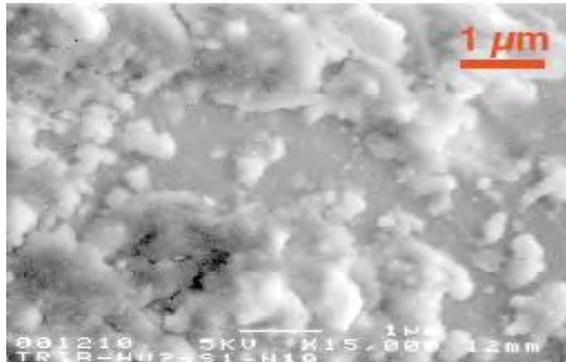
Gambar 2.7 Mekanisme Keausan Lelah

Faktor yang mempengaruhi keausan lelah antara lain besar tegangan, jumlah pengulangan pembebanan dan sifat ketahanan lelah dari material itu sendiri.

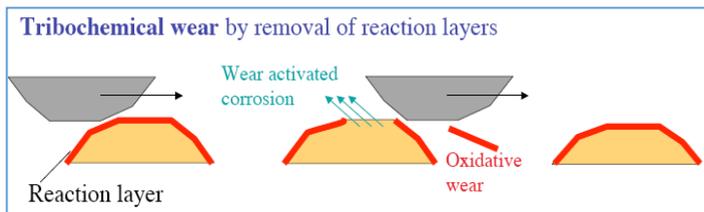
4. Keausan Korosif (*Corrosive Wear Mechanism*)

Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan *interface* antara lapisan permukaan yang terbentuk dan

material induk saat terjadi gesekan antar permukaan benda padat. Pada akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut. Pada Gambar 2.8. dapat dilihat permukaan baja yang mengalami keausan korosif sedangkan Gambar 2.9. menunjukkan mekanisme keausan korosif.



Gambar 2.8 Keausan Korosif pada Baja



Gambar 2.9 Mekanisme Keausan Korosif

2.1.2 Metode Menghitung Volume yang Tergerus

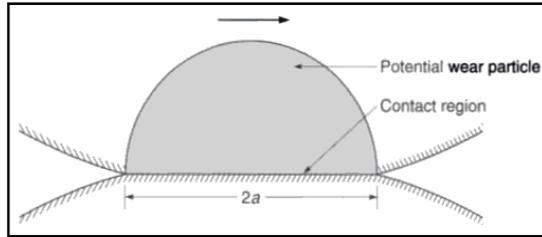
Terdapat 2 metode yang dapat digunakan dalam menghitung volume yang tergerus, yakni metode keausan adhesif dan metode keausan abrasif.

1. Metode Keausan Adhesif

Gambar 2.9 adalah gambar hipotesis model permukaan partikel dua material yang sedang mengalami gesekan pada saat

sliding. Jika diasumsikan titik kontak n dan total jumlah titik kontak konstan selama *sliding*, dengan asumsi radius partikel a seperti pada Gambar 2.10, maka volume keausan dari partikel yang berbentuk setengah bola adalah:

$$\frac{1}{2} \cdot \text{volume bola} = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a^3 = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3 \quad (2.1)$$



Gambar 2.10 Hipotesis Model Partikel Setengah Bola yang Bergesekan pada Saat *Sliding*

Berdasarkan asumsi diatas, volume keausan V untuk n titik kontak setelah menempuh *sliding distance* L , maka dapat dirumuskan:

$$V = n \cdot \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot a^3 \cdot \frac{L}{2a} \quad (2.2)$$

Karena tekanan kontak dalam kondisi deformasi plastis sama dengan nilai kekerasan (*hardness*) H dari material yang aus dan beban normal F diberikan pada material, maka luasan total kontak dapat dinyatakan :

$$n \cdot \pi \cdot a^2 = \frac{F}{H} \quad (2.3)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) pada persamaan (2.3) akan diperoleh:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) menunjukkan bahwa volume keausan adhesif proporsional dengan beban normal dan *sliding distance*, tetapi tidak proporsional dengan kekerasan dari material.

Untuk mengakomodasi semua variabel, parameter K_{ad} diperkenalkan sebagai pengubah, sehingga volume keausan menjadi :

$$V = k_{ad} \cdot \frac{F \cdot L}{H} \quad (2.5)$$

Persamaan (2.5) biasa disebut sebagai persamaan archard, dimana K_{ad} disebut koefisien keausan untuk keausan adesif, secara fisik K_{ad} adalah fraksi volume keausan pada daerah kontak plastis. Untuk material logam, koefisien gesekan K_{ad} bervariasi diantara 10^{-7} hingga 10^{-2} tergantung kondisi operasional dan *properties* material (Archard, 1953; Hirst, 1957).

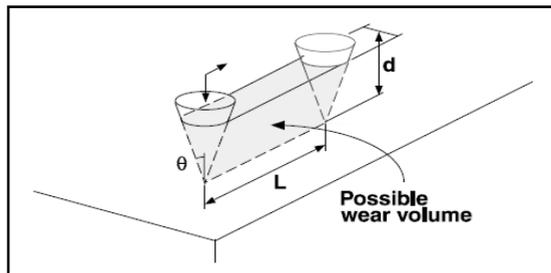
Dalam *text book "Friction, wear, Lubrication"* oleh Kenneth C Ludema persamaan Archard dapat juga dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi = k \cdot \frac{W \cdot v}{H} \quad (2.6)$$

Ψ adalah *time rate of wear* atau *wear rate* dengan satuan m^3/s , W adalah beban dengan satuan N, v adalah *sliding speed* dengan satuan m/s, H adalah *hardness* material dengan satuan Pa, sedangkan k adalah *wear coefficient* tanpa satuan.

2. Metode Keausan Abrasif

Untuk mengetahui volume keausan material yang ditimbulkan oleh keausan abrasif, diasumsikan sebuah model kontak berbentuk kerucut bersudut θ dan kedalaman indentasi abrasif d seperti ditunjukkan pada gambar 2.11. berikut.



Gambar 2.11 Model Keausan Abrasif oleh Indentor Berbentuk Kerucut

Berdasarkan model, volume keausan V yang disebabkan identor setelah menempuh *sliding distance* sejauh L adalah :

$$V = d^2 \cdot \tan \theta \cdot L \quad (2.7)$$

Karena tekanan normal kontak pada kondisi plastis diasumsikan nilai *hardness* H dari material yang aus dan luasan kontak $\pi \cdot (d \cdot \tan \theta)^2 / 2$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (d \cdot \tan \theta)^2 = \frac{W}{H} \quad (2.8)$$

Substitusi persamaan (2.7) kedalam persamaan (2.8) diperoleh volume keausan V sebagai berikut :

$$V = \frac{2}{\pi \cdot \tan \theta} \cdot \frac{W \cdot L}{H} \quad (2.9)$$

Untuk mengakomodasi semua variabel, parameter K_{ab} diperkenalkan sebagai pengubah, sehingga volume keausan menjadi :

$$V = k_{ab} \cdot \frac{W \cdot L}{H} \quad (2.10)$$

Keausan abrasif untuk logam bervariasi antara 10^{-4} sampai 10^{-1} (Rabinowicz, 1980) tergantung dari kondisi kontak dan *properties* material.

2.1.3 Menghitung Laju Keausan

Dalam mendeterminasikan keausan, teknik pengukuran yang berbeda dapat digunakan. Hal tersebut disebabkan oleh volume keausan, V , yang dapat diasumsikan merupakan fungsi dari *sliding distance*, L , kekerasan dari material yang lebih lunak, H , pembebanan yang diberikan, W , dan *sliding velocity*, \tilde{V} (persamaan 2.11).

$$V = f(L, W, H, \tilde{V}) \quad (2.11)$$

Berdasarkan standar German DIN 50321, “*Wear-quantities*”, keausan dapat dideteksi dengan mengukur secara langsung kuantitas keausan, yaitu dengan mengukur:

- a. Perubahan geometri pada spesimen:
 - 1) Perubahan pada dimensi secara linier
 - 2) Perubahan pada *cross-sections*

- 3) Perubahan pada volume
- b. Perubahan massa pada spesimen
- c. Jumlah dari *worn material-loss*
Atau dengan mengukur kuantitas keausan secara relatif, yaitu *wear rates* sebagai berikut:
- d. *The wear-time-ratio (wear velocity)*
- e. *The wear-distance-ratio*
Atau dengan mengukur *wear coefficient* yang didefinisikan sebagai berikut:

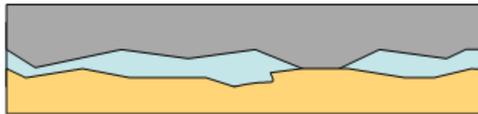
$$K' = \frac{\text{wear volume}}{\text{load} \cdot \text{distance}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) \quad (2.12)$$

Atau dengan mengukur *dimensionless Archard's wear coefficient* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$K = \frac{\text{wear volume} \cdot \text{hardness}}{\text{load} \cdot \text{distance}} \quad (2.13)$$

2.2 Pelumasan

Pelumasan adalah tindakan menempatkan pelumas antara permukaan yang saling bergeser untuk mengurangi keausan dan friksi. Ketika diberikan pelumas cair diantara permukaan yang saling bergesekan, maka pelumas tersebut akan cenderung untuk mengisi kesenjangan antar *asperities* (seperti pada Gambar 2.12) dan bertindak sebagai bantalan cairan untuk memperhalus pergerakan dari keduanya. Hal ini tentunya akan mengurangi gaya gesekan daripada gerakan tanpa pelumasan.



Gambar 2.12 Gesekan dengan Menggunakan Pelumasan

Ada tiga jenis pelumasan yaitu antara lain:

1. pelumasan oleh lapisan cairan (*Fluid-film*)
2. pelumasan batas (*Boundary Lubrication*)
3. pelumasan padat (*Solid Lubrication*)

2.3 Karakteristik *Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)*

UHMWPE adalah polietilena dengan massa molekul sangat tinggi, hingga jutaan. Biasanya berkisar antara 3.1 hingga 5.67 juta. Tingginya massa molekul membuat plastik ini sangat kuat, namun mengakibatkan pembentukan rantai panjang menjadi struktur kristal tidak efisien dan memiliki kepadatan lebih rendah dari pada HDPE. UHMWPE bisa dibuat dengan teknologi katalis, dan katalis Ziegler adalah yang paling umum. Karena ketahanannya terhadap penyobekan dan pemotongan serta bahan kimia, jenis plastik ini memiliki aplikasi yang luas. UHMWPE digunakan sebagai onderdil mesin pembawa kaleng dan botol, bagian yang bergerak dari mesin pemutar, roda gigi, penyambung, pelindung sisi luar, bahan anti peluru, dan sebagai implan pengganti bagian pinggang dan lutut dalam operasi.

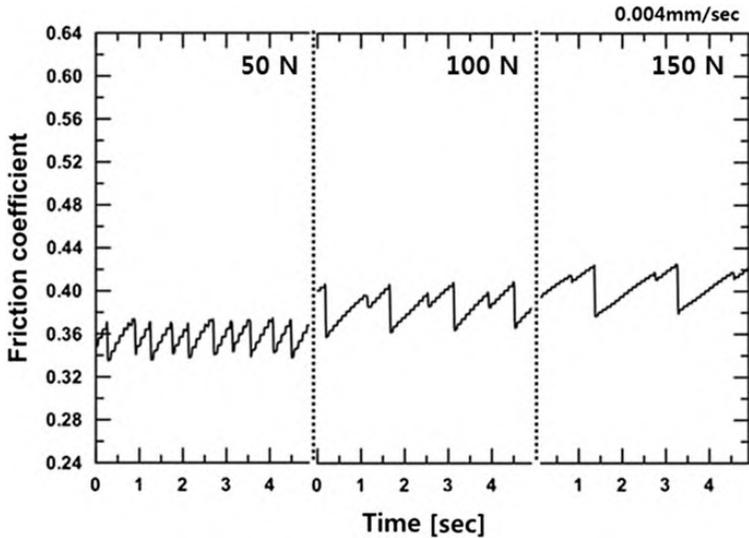
2.4 Karakteristik *Stainless Steel*

Merupakan baja *alloy* tinggi yang mengandung paling sedikitnya 12% *Chromium* (Cr). Semakin tinggi kandungan *Chromium* (Cr), makin tinggi ketahanan korosinya (*Corrosion Resistance*). Pada saat ini telah tersedia beraneka ragam jenis material *Stainless Steel* dengan sifat yang berbeda, misalnya keuletan pada temperature tinggi. Sifat yang terpenting tentu saja adalah ketahanan korosi (*corrosion resistance*) pada berbagai keadaan lingkungan yang berbeda. Sifat *Stainless Steel* menjadi beraneka ragam dengan adanya komposisi kimia yang menentukan mikrostrukturnya.

2.5 Teori *Stick-slip*

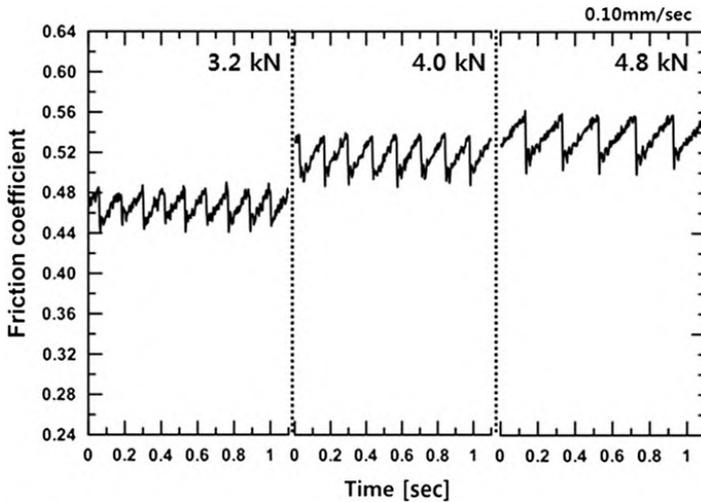
Dari jurnal Internasional yang berjudul "*Effect of Surface Contact Conditions on the Stick-Slip Behavior of Brake Friction Material*" karangan S.W. Yoon, M.W. Shin, W.G. Lee, dan H. Jang pada tahun 2012 menjelaskan bahwa *stick-slip* selama sliding dapat dianalisa pada saat kondisi pembebanan dan juga pada bagian luar

permukaan. Hal ini dapat dilihat karena amplitudo dan frekuensi *stick-slip* cenderung menentukan kerusakan secara perlahan. Pada gambar 2.13 menunjukkan grafik osilasi selama terjadinya sliding, hal tersebut memperlihatkan pola yang khas pada *stick-slip*.



Gambar 2.13 Pola *stick-slip* pada beberapa pembebanan.

Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa intensitas dari *stick-slip* meningkat terhadap fungsi dari beban sedangkan frekuensinya menurun.

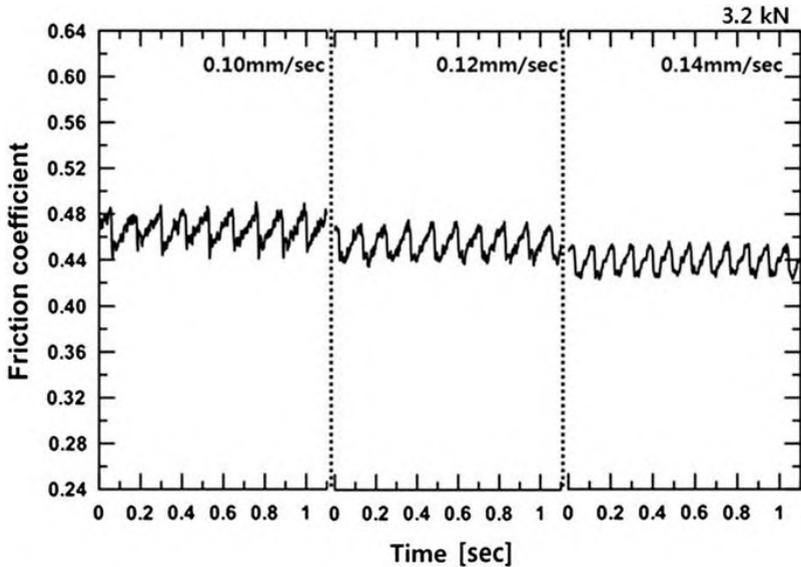


Gambar 2.14 menunjukkan kurva *stick-slip* dengan pembebanan yang berbeda

Pada gambar 2.14 menunjukkan bahwa kurva *stick-slip* memiliki nilai yang berbanding terbalik dengan beban. Hal dapat dilihat dari jumlah periode kurva *stick-slip* yang terjadi pada masing-masing pembebanan, pada saat beban 3.2 kN kurva *stick-slip* yang diperoleh lebih banyak bila dibandingkan oleh pembebanan 4.8 kN. Pada pembebanan 4.8 kN dapat dilihat jumlah kurva *stick-slip* lebih rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah kurva *stick-slip* berbanding terbalik dengan fungsi pembebanan. Maka dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\mu_k = \left[\frac{k.v}{L} \right] \quad (2.14)$$

Dimana μ_k = koefisien gesek kinetic
 v = kecepatan sliding
 k = kekakuan
 L = Beban



Gambar 2.15 Kurva *stick-slip* dengan kecepatan yang berbeda

Pada gambar 2.15 menunjukkan bahwa kemiringan kurva *stick-slip* menjadi lebih curam saat kecepatan meningkat. Dari kurva *stick-slip* juga menjelaskan bahwa periode dan intensitas *stick-slip* menjadi lebih kecil dengan meningkatnya kecepatan gesek.

Stick-slip diketahui sebagai penyebab kerusakan secara perlahan. Fenomena *stick-slip* dapat dilihat dari osilasi gesekan pada berbagai beban yang diberikan, tingkat kecepatan dan kondisi permukaan. Sehingga dari fenomena *stick-slip* ini dapat disimpulkan sebagai berikut:

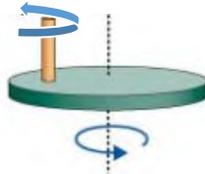
- Bidang kontak yang diterima oleh suatu benda meningkat berbanding lurus dengan beban yang diberikan
- Tingkat keausan ditentukan oleh luasan daerah yang terkena gesekan

- Intensitas kurva *stick-slip* akan meningkat saat terjadinya peningkatan beban, tetapi kurva *stick-slip* akan menurun saat kecepatan meningkat
- Besarnya $\Delta\mu$ pada kurva *stick-slip* dipengaruhi oleh pembebanan yang diberikan.

2.6 Penelitian Terdahulu

2.6.1 Pengujian keausan permukaan material akibat *multi-directional contact friction*

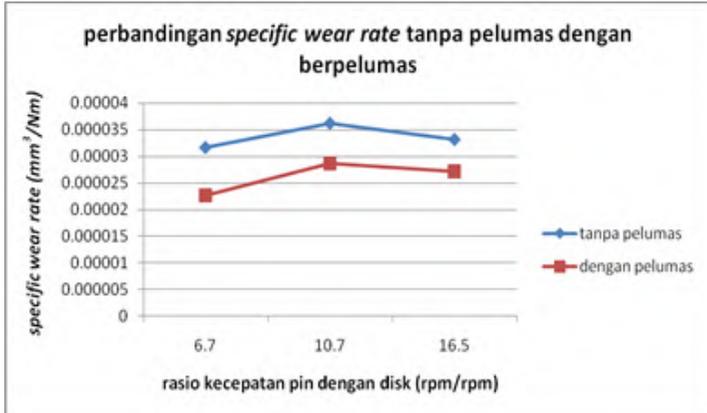
Hasry, 2013, melakukan kajian tribologi dalam tugas akhirnya yang berjudul “Studi Eksperimental Keausan Permukaan Material Akibat Adanya *Multi-Directional Contact Friction*”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *stainless steel* pada kondisi *multi-directional sliding*. Model pengujian yang dilakukan Hasry seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.



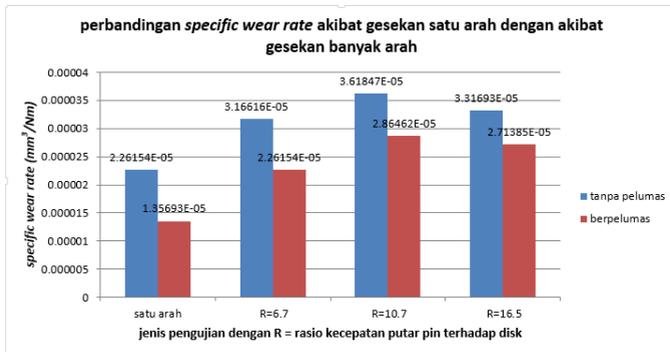
Gambar 2.16 Model Pengujian yang Dilakukan Hasry

Pada Gambar 2.16 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Hasry dimana pin berwarna kuning berputar berlawanan dengan arah jarum jam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan disk berwarna hijau bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan pelumasan (*wet sliding*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 600 meter. Dengan pembebanan statis sebesar 39,2 N dan 3 variasi rasio kecepatan antara pin dan disk, yaitu sebesar 6.7, 10.7, dan 16.5. Spesimen yang telah diuji selanjutnya diamati struktur permukaannya menggunakan

mikroskop optis dengan perbesaran 100 kali. Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Hasry.



Gambar 2.17 Hasil Penelitian Hasry untuk Pengujian *Dry Sliding* dan *Wet Sliding*



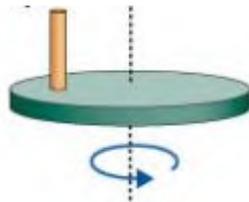
Gambar 2.18 Hasil Penelitian Hasry untuk Perbandingan Keausan antara Uni-Directional dengan Multi-Directional Contact Friction

Hasil dari penelitian yang telah dilakukan Hasry menyebutkan bahwa gesekan banyak arah (*Multi-Directional*

Friction) akan menghasilkan keausan yang lebih besar dibanding gesekan satu arah (*Uni-Directional Friction*). Material yang mengalami gesekan banyak arah dengan pembebanan statis sebesar 39.2 N dan dengan kecepatan sesaat yang berubah-ubah mulai dari nol sampai 19.546 m/menit, akan mengalami keausan dengan mekanisme abrasi. Berdasarkan penelitian diketahui juga bahwa adanya pelumas memberi pengaruh yang besar dalam mengurangi keausan.

2.6.2 Pengujian Keausan *Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Terhadap Stainless Steel*

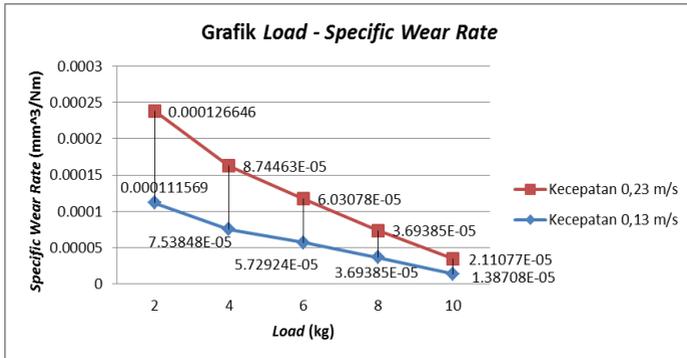
Solichin, 2012, melakukan kajian tribologi dalam tugas akhirnya yang berjudul “Studi Eksperimental Laju Keausan (*Specific Wear Rate*) Antara Ultra High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Dengan Stainless Steel Sebagai Sendi Lutut Buatan (*Total Knee Replacement Prosthesis*) Manusia”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *stainless steel* pada kondisi *unidirection sliding*. Model pengujian yang dilakukan Solichin seperti ditunjukkan pada Gambar 2.19.



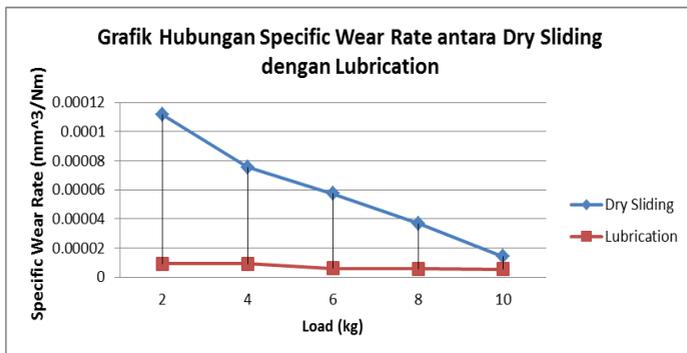
Gambar 2.19 Model Pengujian Yang Dilakukan Solichin

Pada Gambar 2.19 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Solichin, dimana pin berwarna kuning berada dalam posisi diam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan disk berwarna hijau bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian

tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan dengan pelumasan (*oil lubricated*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 600 meter. Variasi kecepatan adalah 0.13 m/s dan 0.23 m/s, dan 5 variasi pembebanan adalah 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg dan 10 kg. Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Solichin.



Gambar 2.20 Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* Dengan *Load* Pada Dua *Speed Control* Yang Berbeda Kondisi *Lubrication*



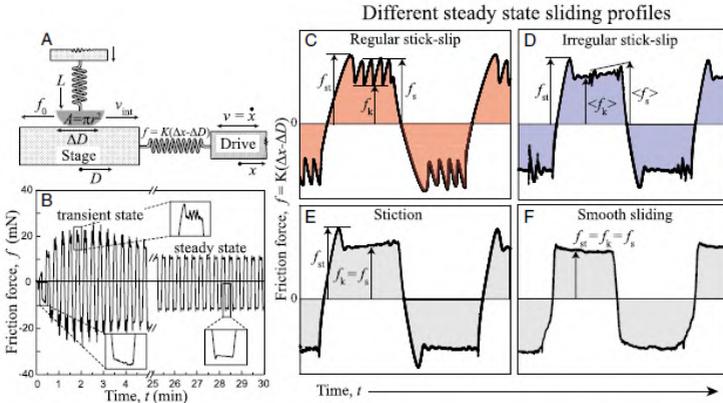
Gambar 2.21 Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* Antara *Dry Sliding* Dengan *Lubrication* Pada Kecepatan 0,13 m/s

Dari hasil penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.20, Solichin menjelaskan bahwa *Specific Wear Rate* semakin turun seiring semakin besarnya beban yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan laju keausan berbanding terbalik dengan beban. Dari gambar tersebut juga dapat diketahui bahwa peningkatan kecepatan akan meningkatkan laju keausan. Hal tersebut dikarenakan peningkatan kecepatan akan menyebabkan peningkatan temperatur dan peningkatan temperatur akan menyebabkan material semakin mudah terabrasi. Dari Gambar 2.21 dapat dilihat perbandingan laju keausan antara kontak tanpa pelumas dan kontak dengan pelumas. Adanya pelumas dapat memperpanjang umur UHMWPE sampai 8 kali umur kondisi *dry sliding*.

2.6.3 Pengujian *Stick-slip Friction* dan Keausan pada *Articular Joints*

Dong Woog Lee, Xavier Banquy, dan Jacob N. Israelachvili pada tahun 2012 di Universitas California, melakukan penelitian mengenai *stick-slip friction* dan keausan yang terjadi pada sendi artikular. Fenomena *stick-slip friction* diobservasi pada tulang rawan artikular dengan variasi pembebanan dan *sliding conditions*. Observasi tersebut dilakukan menggunakan alat ukur yaitu, *Surface Forces Apparatus*. Pada alat tersebut ditunjukkan bahwa *stick-slip friction* dapat menyebabkan perubahan morfologis secara permanen, yaitu perubahan pada kekasaran permukaan yang mengindikasikan keausan atau kerusakan.

Hasil dari percobaan dengan variasi pembebanan dan kecepatan direpresentasikan pada *friction maps* yang terdapat pada Gambar 2.22. Pada *friction maps* tersebut, dibedakan antara *smooth sliding* dan *stick-slip sliding*. Dari hasil yang terlihat mengindikasikan bahwa pada umumnya kerusakan terjadi pada saat fenomena *stick-slip* berlaku. Hal tersebut dibuktikan dengan peningkatan yang signifikan terhadap kekasaran permukaan.

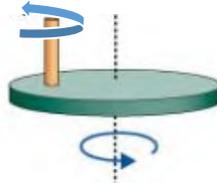


Gambar 2.22 Skema dan Hasil Penelitian Dong Woog Lee, Xavier Banquy, dan Jacob N. Israelachvili

Terdapat 3 kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini, yaitu keausan tidak berhubungan langsung terhadap koefisien gesek, akan tetapi lebih berhubungan langsung terhadap *stick-slip sliding* meskipun diterapkan pada amplitudo yang kecil. Kemudian molekuler komponen sendi yang berbeda dapat secara bersinergi mencegah keausan.

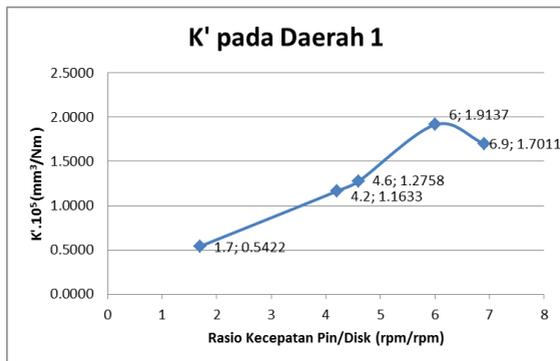
2.6.4 Pengujian keausan permukaan yang dipengaruhi oleh *stick-slip friction* akibat *multi-directional contact friction*

Dewi Fasholi, 2015 melakukan kajian mengenai Tribologi dalam tugas akhirnya dengan judul “Studi eksperimental dan analisa keausan permukaan yang dipengaruhi oleh *stick-slip friction* akibat *multi-directional contact friction*”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara UHMWPE dengan *Stainless-steel* pada kondisi *multi-directional sliding*. Model pengujian yang dilakukan Dewi dapat dilihat pada gambar 2.23.

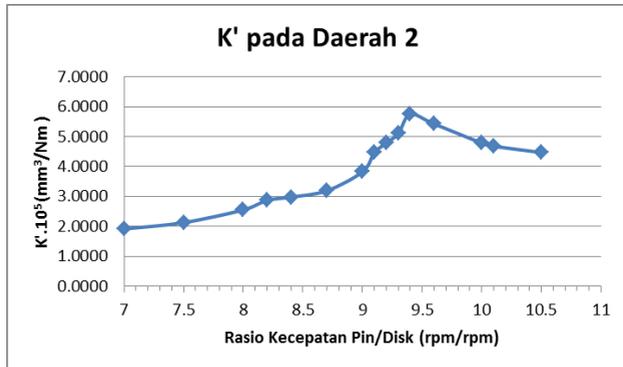


Gambar 2.23 Model Pengujian yang dilakukan Dewi

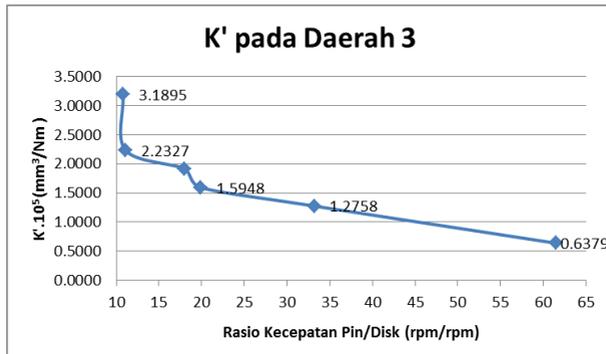
Pada gambar 2.23 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan Dewi dimana pin berwarna kuning berputar berlawanan arah dengan arah jarum jam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan disk berwarna hijau bergerak rotasi. Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan pengujian dengan pelumasan (*wet sliding*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 850 meter. Dengan pembebanan (2Kg, 4 Kg, 6 Kg dan 8 Kg) dengan rasio kecepatan pin dan disk sebesar 1.7 sampai 61.5 rpm/rpm. Berikut ini adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Dewi.



Gambar 2.24 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 1,7 sampai 6,9 rpm/rpm



Gambar 2.25 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 7 sampai dengan 10,5 rpm/rpm



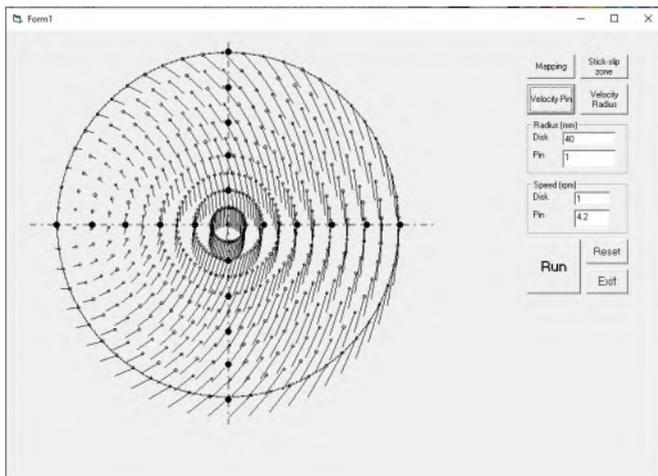
Gambar 2.26 Grafik Perubahan Laju Keausan (K') terhadap Perubahan Rasio Kecepatan antara Pin dengan Disk 10,8 sampai dengan 61,5 rpm/rpm

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah terdapat tiga daerah yang dapat dikelompokkan berdasarkan rasio kecepatan antara pin dengan disk, yaitu daerah sebelum terjadi *stick-slip* (rasio 1,7-6,9 rpm/rpm), daerah rawan terjadi *stick-slip* (rasio 7-10,5 rpm/rpm), dan daerah setelah terjadi *stick-slip* (rasio 10,8-61,5 rpm/rpm). Nilai laju keausan cenderung meningkat pada rasio

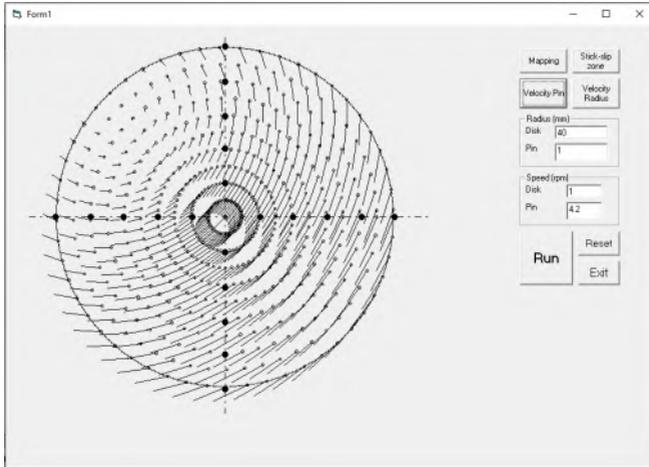
kecepatan 1,7 sampai dengan 9,4 rpm/rpm. Kemudian nilai laju keausan akan menurun dengan bertambahnya rasio kecepatan. Nilai laju keausan maksimal terdapat pada rasio kecepatan 9,4 dimana fenomena *stick-slip friction* kerap terjadi paling signifikan. Mekanisme keausan yang terjadi pada saat fenomena *stick-slip* terjadi adalah keausan abrasif dan adhesif.

2.6.5 Hasil Pemrograman Simulasi *Stick-slip Friction*

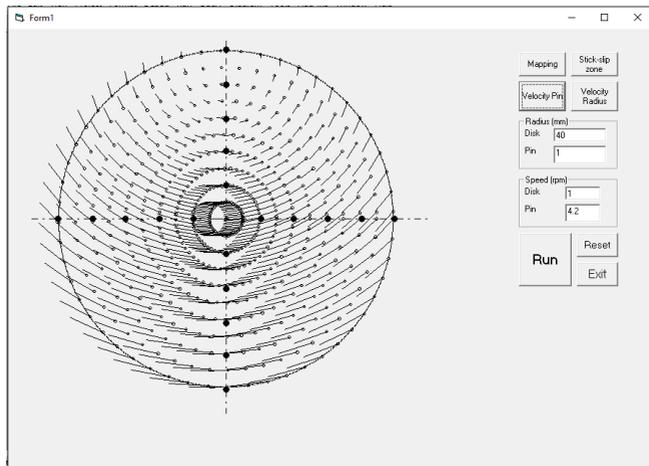
Pada hasil simulasi yang dilakukan oleh Grandika Andrayodi dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Visual Basic 6.0* maka diperoleh hasil daerah-daerah yang diidentifikasi mengalami *stick-slip friction* berdasarkan dari rasio kecepatan yang diprediksi mengalami *stick-slip friction*. Berikut adalah gambar dari hasil simulasi pada analisa *stick-slip friction*:



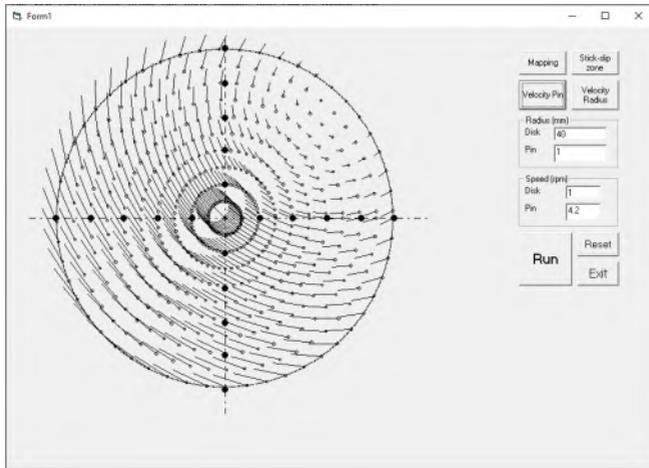
(a)



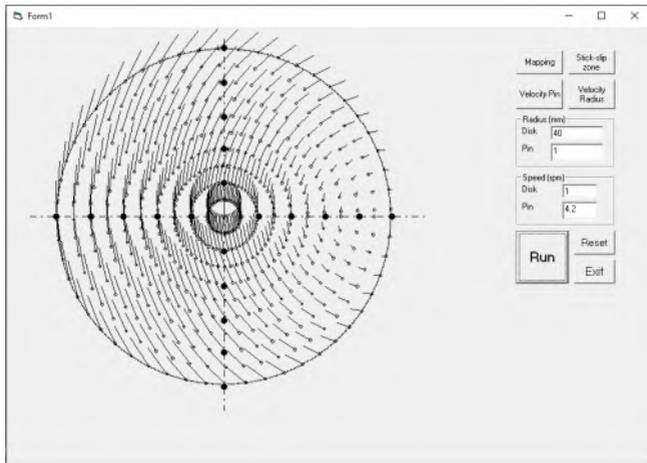
(b)



(c)



(d)

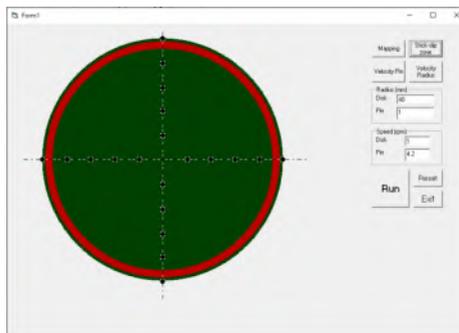


(e)

Gambar 2.27 Vektor - vektor kecepatan pada permukaan pin pada rasio kecepatan 4.2, dengan kondisi nilai teta 1 yang berbeda-beda (a) 0.1, (b) 0.785, (c) 1.57, (d) 2.355, dan (e) 3.14.

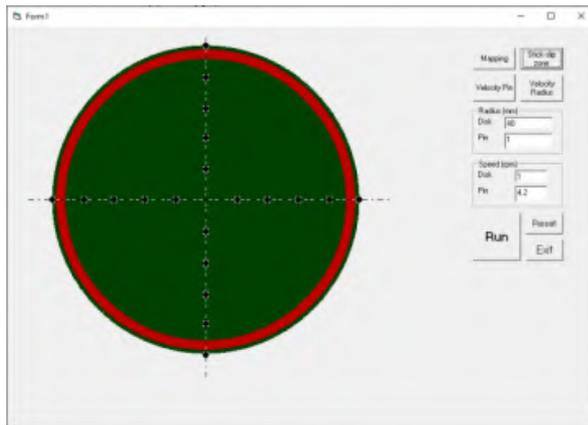
Pada Gambar 2.27 menunjukkan hasil simulasi yaitu hasil vektor kecepatan diseluruh permukaan pin saat bergesekan dengan disk pada rasio kecepatan 4.2 .Pada Gambar 4.7a merupakan kondisi saat pin diputar pada kondisi teta 1 sebesar 0.1, dimana teta 1 merupakan sudut yang terbentuk antara titik P dengan pusat disk, kemudian digesekkan pada disk (sepanjang 2π pada pin) maka pada permukaan pin terbentuk vektor-vektor kecepatan yang bervariasi. Sesuai pada pembahasan bab 2 bahwa *stick-slip* merupakan kondisi dimana pada satu titik saat bergesekan mengalami kecepatan nol, atau berhenti sesaat sebelum bergesekan kembali, pada saat *stick-slip* itulah terjadi keausan yang cukup besar. Sehingga dari hasil simulasi dapat dilihat daerah yang memiliki vektor kecepatan nol, dan daerah tersebut dapat disimpulkan mengalami *stick-slip*.

Dari hasil eksperimen pada rasio kecepatan 4,2 pin digesekkan pada disk sepanjang 2000 meter, maka pin akan berputar terus-menerus dan menciptakan daerah yang memiliki vektor kecepatan nol pada kondisi teta 1 yang selalu berbeda-beda sehingga apabila Gambar 2.27 dikumpulkan menjadi satu, dan nilai teta 1 diperbanyak maka terciptalah zona-zona pada pin yang pernah mengalami *stick-slip* seperti pada Gambar 2.28 berikut ini.

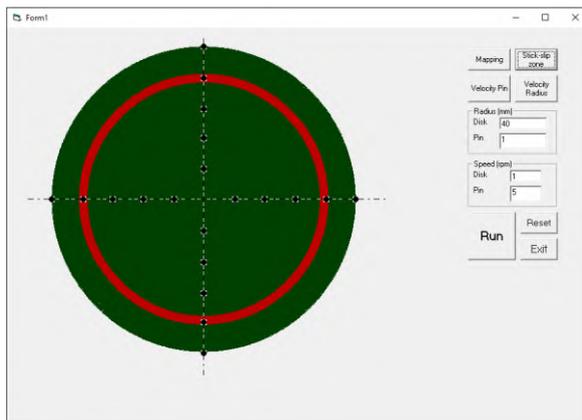


Gambar 2.28 Daerah pin yang mengalami fenomena *stick-slip* dengan meningkatkan variasi dari nilai teta 1 pada rasio kecepatan 4,2 .

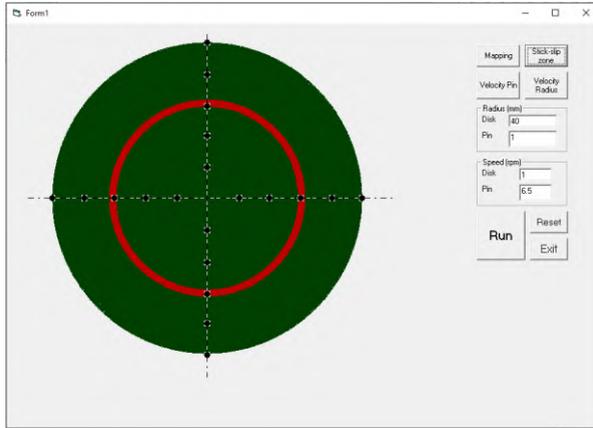
Dari Gambar 2.28 dapat dilihat bahwa zona yang memiliki warna merah, merupakan zona yang mengalami efek *stick-slip* pada saat rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 4.2 . Pada eksperimen dilakukan pengambilan data sebanyak 5 kali, yaitu pada kondisi rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 4.2, 5, 6.5, 10 dan 20. Maka diperoleh data hasil simulasi untuk zona-zona yang mengalami *stick-slip friction* pada gambar berikut.



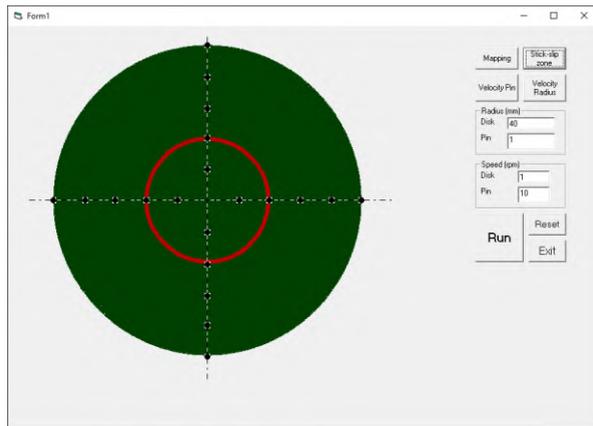
(a)



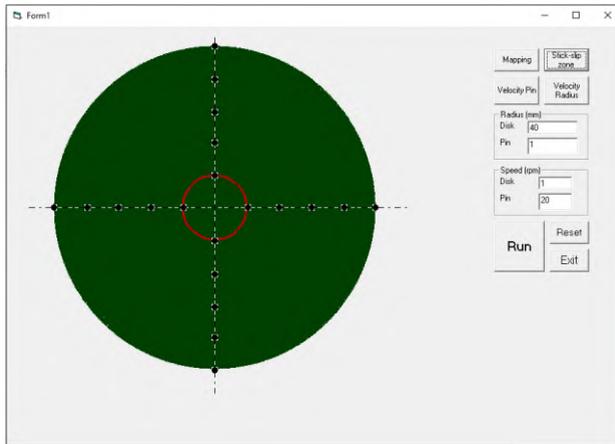
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 2.29 Hasil simulasi daerah-daerah yang mengalami *stick-slip friction* dengan variasi rasio kecepatan (a) 4.2, (b) 5, (c) 6.5, (d) 10, dan (e) 20.

Dapat dilihat pada Gambar 2.29 merupakan hasil daerah yang mengalami *stick-slip friction* berdasarkan pada hasil simulasi yang dijalankan dengan variasi rasio kecepatan yang berbeda-beda antara pin dengan disk. Pada daerah berwarna merah merupakan daerah yang diindikasikan mengalami *stick-slip friction*, dimana daerah tersebut pernah memiliki besar medan kecepatan 0 mm/s.

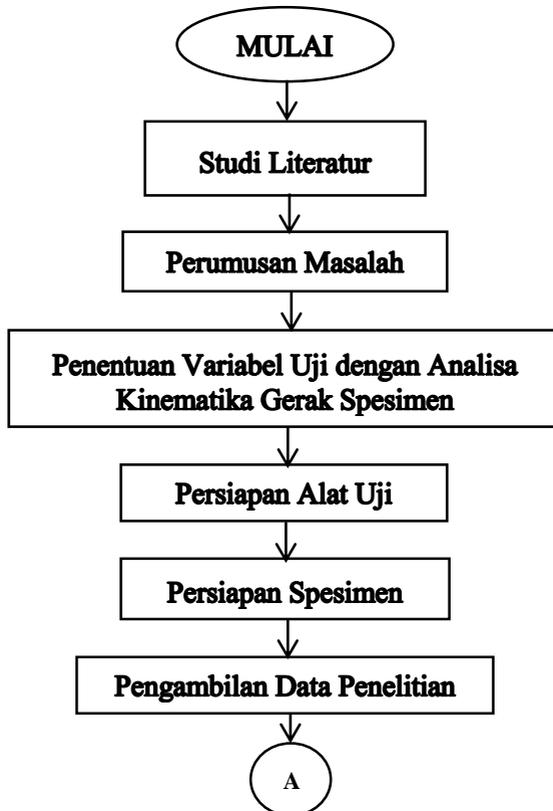
Berdasarkan pada hasil simulasi Gambar 2.29 dapat dilihat ketika ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 4.2 maka daerah yang mengalami *stick-slip friction* atau daerah yang berwarna merah terjadi pada radius 9 mm dari pusat pin. Saat rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 5 maka daerah yang mengalami *stick-slip friction* terjadi pada radius 8 mm dari pusat pin, kemudian saat rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 6.5 maka daerah yang mengalami *stick-slip friction* atau daerah yang berwarna merah terjadi pada radius 6 mm dari pusat pin, lalu saat rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 10 maka daerah yang mengalami *stick-*

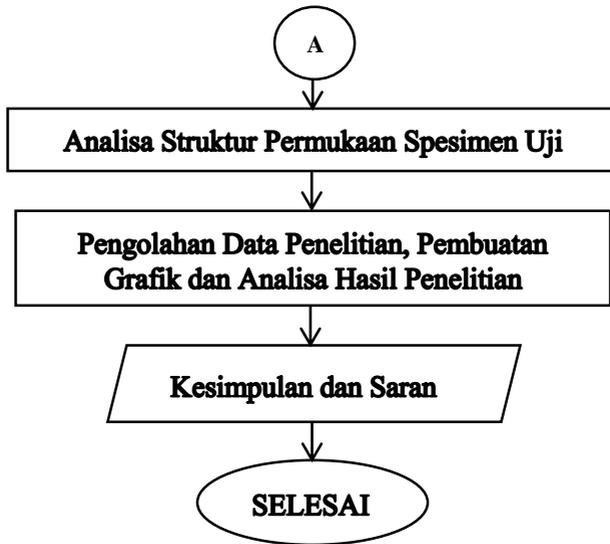
slip friction terjadi pada radius 4 mm dari pusat pin, dan pada saat saat rasio kecepatan antara pin dan disk adalah 20 maka daerah yang mengalami *stick-slip friction* terjadi pada radius 2 mm dari pusat pin.

BAB III METODOLOGI

3.1 Langkah-langkah Penelitian

Pada penelitian ini, langkah-langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian adalah pengujian secara eksperimental dan analitis, yaitu pengambilan secara langsung data volume keausan, perhitungan untuk mendapatkan nilai *specific wear rate* dan pengamatan struktur permukaan dari spesimen uji. Secara umum metodologi penelitian dapat dijabarkan pada diagram alir sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Secara sistematis, langkah-langkah penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut:

3.1.1 Studi Literatur

Langkah awal dalam penelitian ini adalah studi literatur. Tujuan dilakukannya studi literatur adalah untuk membantu penulis dalam merumuskan masalah, menentukan hal-hal yang perlu dilakukan agar tidak terjadi duplikasi penelitian atau karya di masa lalu yang sudah pernah dilakukan oleh peneliti lain, serta pengkajian teori-teori yang mendukung penelitian yang akan dilakukan. Sumber yang digunakan dalam studi literatur ini adalah abstrak hasil penelitian, jurnal, dan buku referensi.

3.1.2 Perumusan Masalah

Dari studi literatur yang dilakukan dan dijadikan sebagai dasar pemikiran dalam penelitian, maka dapat dirumuskan

beberapa permasalahan yang akan dianalisis secara khusus pada penelitian ini.

Fenomena *stick-slip friction* kerap terjadi pada kecepatan tertentu pada saat dua material saling kontak dan dapat mengakibatkan keausan yang lebih besar dibandingkan pada saat tidak terjadi fenomena ini. Oleh karena itu perlu dilakukan analisa kinematika pada rasio kecepatan berapakah *stick-slip* akan terjadi dan dibuktikan dengan melihat hasil uji keausan yang akan memperoleh nilai lebih besar dibandingkan dengan pada saat *stick-slip* tidak terjadi.

Pada perumusan ini nantinya dapat dilihat bagaimanakah pola kerusakan dari *stick-slip* pada pengujian *multi-directional contact* berdasarkan dari pengamatan pola kerusakan akibat dari *stick-slip* pada pengujian *uni-directional contact* secara teoritis.

3.1.3 Penentuan Variabel Uji dengan Analisa Kinematika Gerakan Spesimen

Pada tahap ini ditentukan variabel uji yang digunakan dalam melakukan penelitian ini untuk mengetahui variasi yang dilakukan sebagai bekal persiapan spesimen untuk pengambilan data. Penelitian ini dilakukan dengan metode keausan akibat gesekan banyak arah (*multi-directional contact friction*). Metode penelitian tersebut dianalisis dengan cara tanpa pelumasan (*dry sliding*). Kemudian dari setiap analisis tersebut divariasikan besar pembebanan dan rasio kecepatannya. Besar rasio kecepatan antara pin dan disk ditentukan berdasarkan analisa kinematika gerakan spesimen. Hal tersebut dilakukan untuk memperhitungkan pada rasio kecepatan berapa fenomena *stick-slip friction* kerap terjadi.

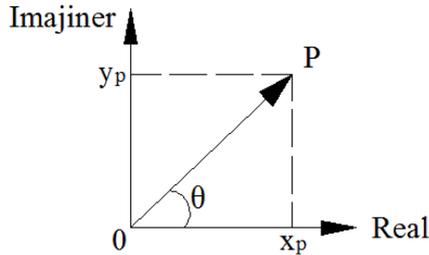
Lamanya waktu pengujian dihitung dengan menggunakan formulasi berikut:

$$t = \frac{L}{\pi.d.n} \quad (3.1)$$

Keterangan :

- t = waktu pengujian (menit)
 L = *sliding distance* = 2000(meter)
 d = diameter *track* pin pada disk (meter)
 n = kecepatan putaran disk (putaran/menit)

Analisa kinematika yang dilakukan adalah sebagai berikut:
 Sebuah titik P digambarkan pada sebuah koordinat kompleks



Secara kinematika dapat disebutkan bahwa

$$\bar{p} = x_p + iy_p \quad (3.2)$$

Dimana: $x_p = R \cos \theta$ (3.3)

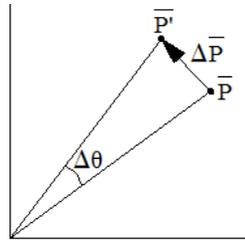
$y_p = R \sin \theta$, dengan R adalah panjang \bar{p} (3.4)

Sehingga:

$$\bar{p} = R \cos \theta + R \sin \theta \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{p} &= R (\cos \theta + \sin \theta) \\ \bar{p} &= R e^{i\theta} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Jika titik P mengalami perpindahan posisi yang begitu kecil,
 maka :



$$\bar{p}' = \bar{p} + \Delta\bar{p} \quad (3.7)$$

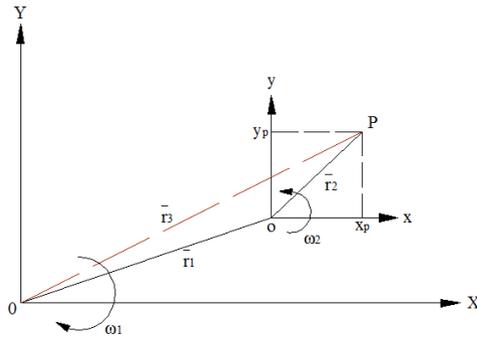
$$\Delta\bar{p} = \bar{p}' - \bar{p} \quad (3.8)$$

Dikarenakan perpindahan titik P dalam waktu yang begitu singkat, maka kecepatan perpindahan titik P dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\bar{p}}{\Delta t} = \frac{d}{dt}(\bar{p}) = \frac{d}{dt}(R e^{i\theta}) \quad (3.9)$$

$$\bar{\dot{p}} = \dot{R} e^{i\theta} + R i \omega e^{i\theta} \quad (3.10)$$

Ketika titik P berada pada koordinat lokal xoy, sedangkan koordinat lokal tersebut berada pada koordinat global XOY, maka titik P dapat digambarkan sebagai berikut :



$$\bar{r}_3 = \bar{r}_1 + \bar{r}_2 \quad (3.11)$$

$$\bar{r}_3 = R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2} \quad (3.12)$$

Sehingga, titik P pada koordinat global adalah sebagai berikut:

$$\bar{p} = \bar{r}_3 = R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2} \quad (3.13)$$

Sehingga

$$\bar{\dot{p}} = \frac{d\bar{r}_3}{dt} = iR_1\omega_1 e^{i\theta_1} + iR_2\omega_2 e^{i\theta_2} \quad (3.14)$$

$$\bar{\dot{p}} = iR_1\omega_1(\cos\theta_1 + i \sin\theta_1) + iR_2\omega_2(\cos\theta_2 + i \sin\theta_2) \quad (3.15)$$

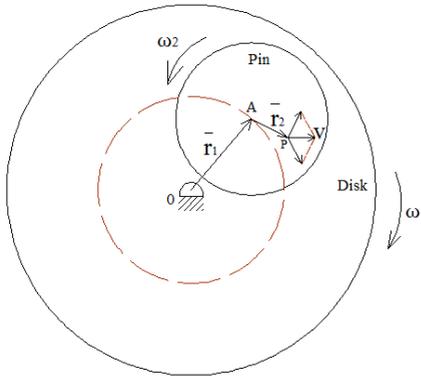
$$(v_x + iv_y) = iR_1\omega_1 \cos\theta_1 - R_1\omega_1 \sin\theta_1 + iR_2\omega_2 \cos\theta_2 - R_2\omega_2 \sin\theta_2 \quad (3.16)$$

Jika komponen *real* dan *imaginer* dipisah, maka:

$$Real = v_x = -R_1\omega_1 \sin\theta_1 - R_2\omega_2 \sin\theta_2 \quad (3.17)$$

$$Imajiner = v_y = R_1\omega_1 \cos\theta_1 + R_2\omega_2 \cos\theta_2 \quad (3.18)$$

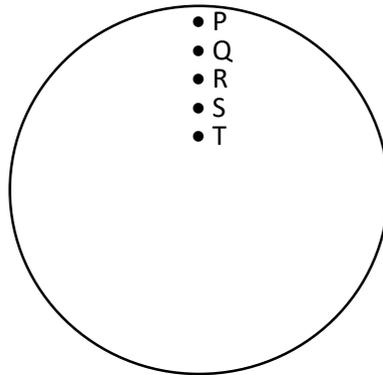
Pada penelitian ini, jika koordinat lokal diwakili oleh pin dan koordinat global diwakili oleh disk, maka dapat digambarkan sebagai berikut:



Dengan $\omega_2 = \omega \text{ pin (ccw)}$
 $\omega_1 = \omega \text{ disk (cw)}$

Gambar 3.2 Analisa vektor kecepatan pada pin

Lintasan yang dilewati titik P sepanjang waktu digambarkan pada disk dengan berbagai perbandingan rasio kecepatan, $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega \text{ pin}}{\omega \text{ disk}}$.

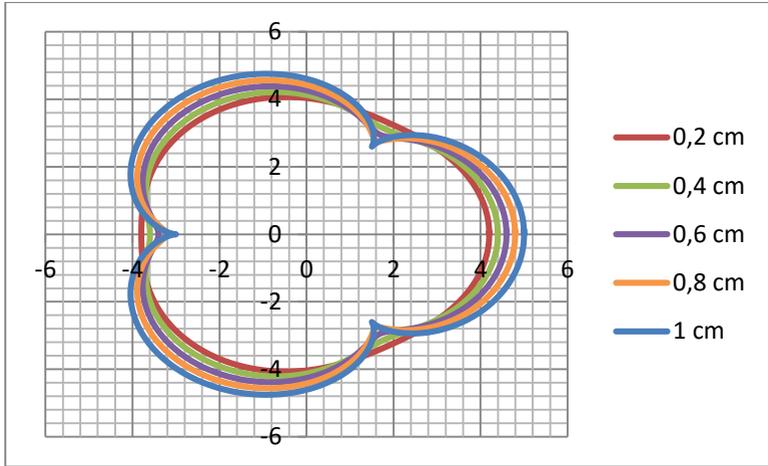


Gambar 3.2 Titik analisa pada pin

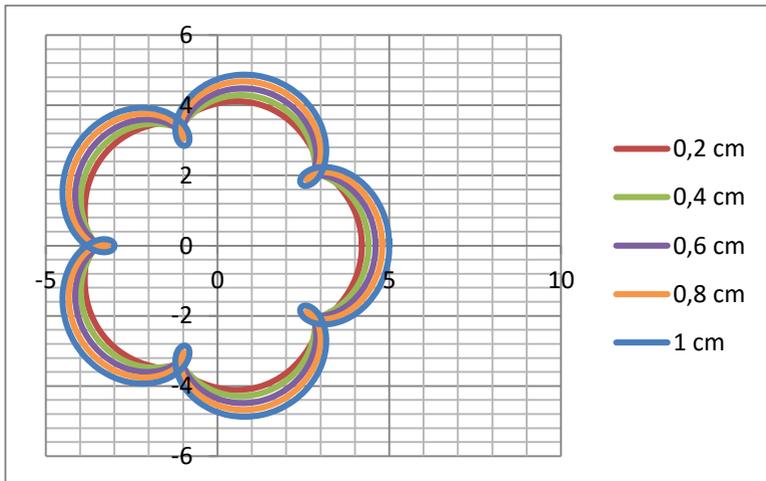
Pada gambar 3.2 merupakan titik yang mewakili pada pin untuk menjadi daerah pengujian, sehingga nantinya pada saat setelah pin diputar secara bersamaan maka dapat diamati bagaimana fenomena *stick slip* yang terjadi dikeempat titik tersebut.

Dengan menggunakan persamaan 3.13 maka dapat menentukan bentuk lintasan yang akan dilalui oleh masing-masing titik pada pin, dalam *Microsoft excel* digunakan persamaan 3.13 dengan variabel rasio kecepatan antara pin dan disk yaitu ω_1 dan ω_2 . ω_1 dan ω_2 diisi menggunakan metode *trial and error*, jadi rasio kecepatan yang digunakan dari nilai 1 hingga nilai dimana fenomena *stick-slip* terjadi.

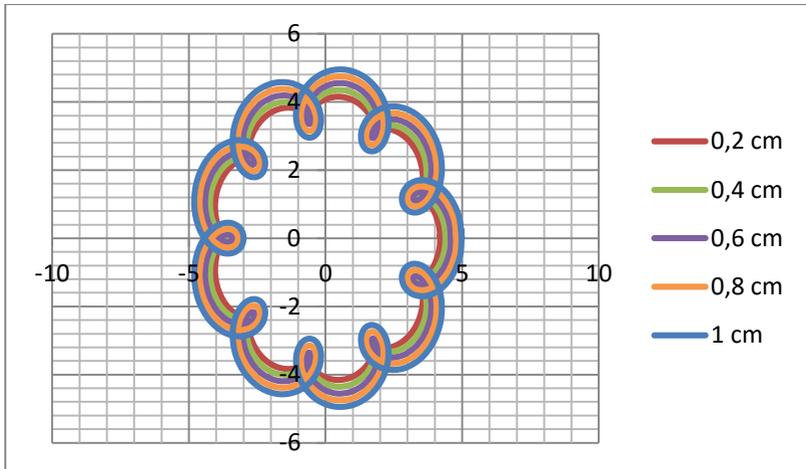
Lintasan yang dilewati setiap titik sepanjang waktu digambarkan pada disk dengan berbagai variasi rasio kecepatan antara pin dan disk, dimana titik P tersebut berada pada jarak 10 mm sebelah kanan dari pusat pin dan pusat pin berada pada jarak 40 mm dari pusat disk.



(a)



(b)

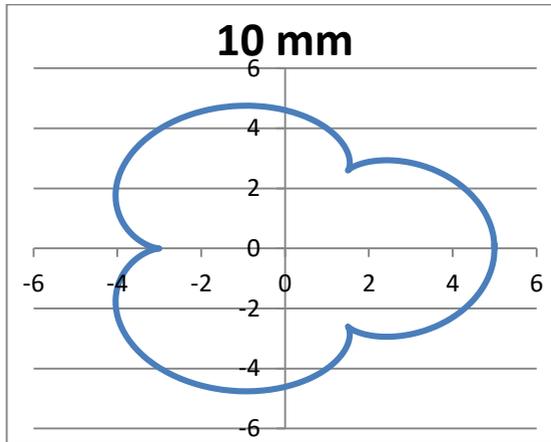


(c)

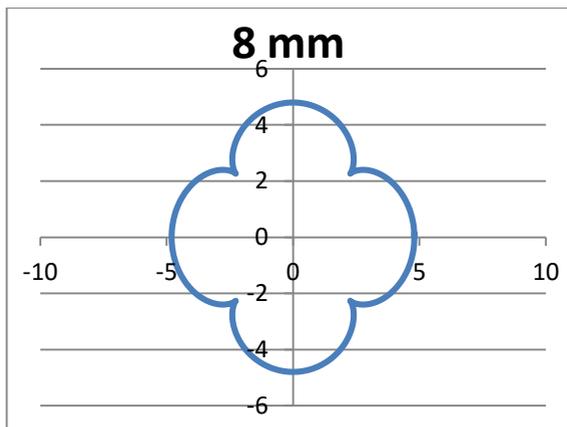
Gambar 3.3 Perubahan posisi lintasan titik P,Q,R,S dan T. pada disk tribometer, Untuk (a) $\omega_{\text{pin}} = 4x \omega_{\text{disk}}$ (b) $\omega_{\text{pin}} = 6x \omega_{\text{disk}}$ (c) $\omega_{\text{pin}} = 10x \omega_{\text{disk}}$

Pada penelitian ini untuk memudahkan analisa, ditinjau sebuah titik P pada permukaan pin yang berada dalam koordinat lokal, sedangkan pin tersebut berada dalam koordinat global pada disk. Berdasarkan hasil analisa kinematika gerakan titik P tersebut, dapat ditentukan rasio kecepatan yang dapat diuji eksperimen. Dari keseluruhan rasio kecepatan yang mampu diterapkan pada alat uji, terdapat 5 (lima) daerah yang dapat dianalisa. Daerah pertama yaitu pada rasio kecepatan 4 dimana pada rasio kecepatan tersebut terjadi *stick-slip friction* pada titik P dengan radius 10 mm dari pusat pin. Daerah kedua yaitu pada titik Q dengan rasio kecepatan 5 dimana pada rasio kecepatan tersebut terjadi *stick-slip friction* pada radius 8 mm dari pusat pin. Daerah ketiga yaitu pada rasio kecepatan 6.7 dimana pada rasio kecepatan tersebut terjadi *stick-slip friction* pada titik R dengan radius 6 mm dari pusat pin. Daerah keempat yaitu pada rasio kecepatan 10 dimana pada rasio kecepatan tersebut

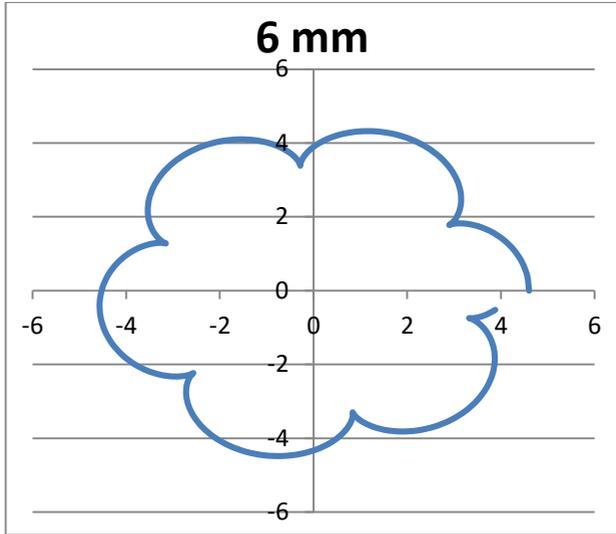
terjadi *stick-slip friction* pada titik S dengan radius 4 mm dari pusat pin. Kemudian daerah terakhir yaitu pada rasio kecepatan 20 dimana pada rasio kecepatan tersebut terjadi *stick-slip friction* pada titik T dengan radius 2 mm dari pusat pin. Grafik hasil analisa kinematika gerak pin dapat dilihat pada Gambar 3.4.



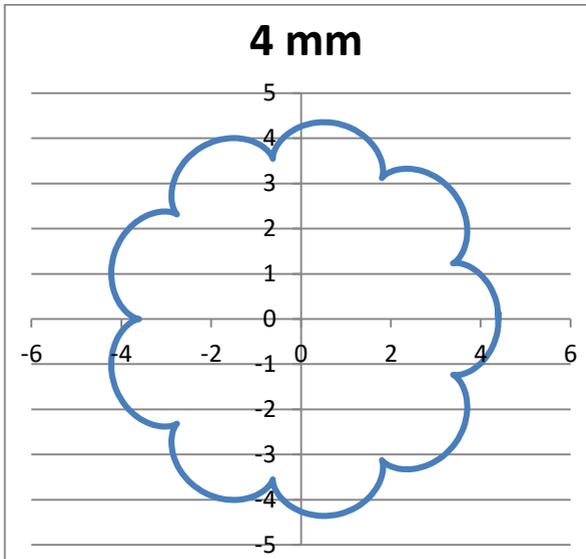
(a)



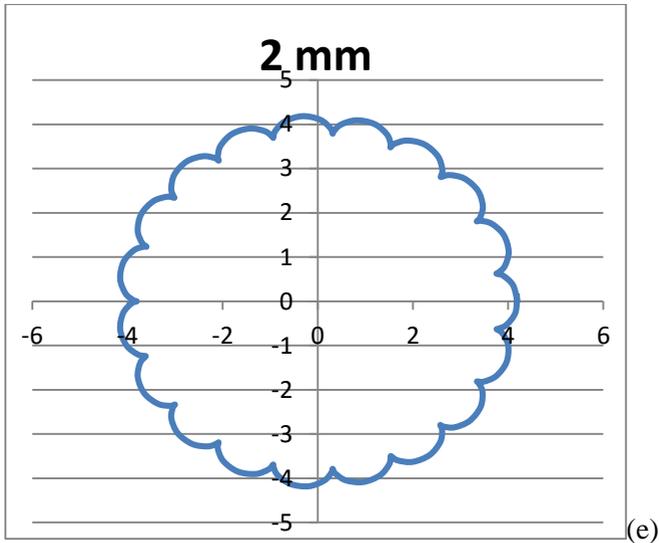
(b)



(c)



(d)



Gambar 3.4 Grafik Perubahan Posisi Titik setiap radius pin pada Disk (a) ω pin = 4 x ω disk (b) ω pin = 5 x ω disk (c) ω pin = 6,7x ω disk (d) ω pin = 10x ω disk (e) ω pin = 20x ω disk

3.1.4 Persiapan Alat Uji

Alat uji yang digunakan untuk pengambilan data pada penelitian ini adalah tribometer tipe *pin on disk*. Tribometer merupakan alat untuk mengetahui laju keausan dari suatu material yang melakukan kontak. Persiapan yang dilakukan adalah *set-up* alat tribometer tipe *pin on disk* yang dimodifikasi, pengaturan *speed control* dan *load* (pembebanan), serta kalibrasi ulang dari setiap komponen yang ada pada alat tribometer tipe *pin on disk*.

Adapun spesifikasi dari alat uji yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Tribometer tipe *pin on disk*
 - Sliding speed range* : 8.37 – 250 mm/s
 - Disc rotation speed* : 8 - 60 rpm
 - Maximum normal load* : 150 N

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| <i>Frictional force</i> | : 0 – 150 N |
| <i>Pin size</i> | : 8 – 15 mm diameter / diagonal |
| <i>Disk size</i> | : 100 mm diameter x 20 mm tebal |
| <i>Wear track diameter</i> | : 20 – 80 mm |

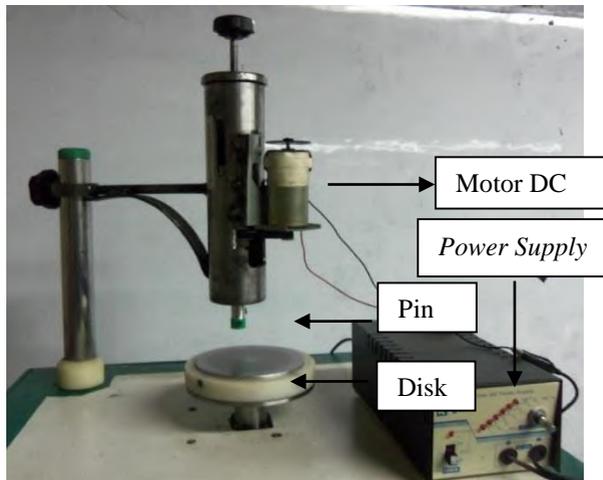
- Motor DC Pemutar Pin

| | |
|----------|------------|
| Merk | : Canon |
| Tipe | : FH7-1860 |
| Tegangan | : 12 V |
- *Stabilizer DC Power Supply*

| | |
|--------------|----------------|
| Merk | : Waeco |
| Arus | : 6 A |
| Tegangan out | : 3 s/d 13.8 V |

1. *Set-up* Alat Uji

Alat uji tribometer tipe pin on disk yang sudah dimodifikasi pada penelitian sebelumnya, mempunyai skema *set-up* alat yang dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 *Set-up* Alat Tribometer tipe pin on disk

Proses kerja dari tribometer yang ditunjukkan pada Gambar 3.5. adalah ketika motor berputar maka putaran dari motor akan diteruskan oleh *belt* menuju poros yang berada di dalam *casing* tribometer. Poros yang berputar kemudian akan memutar pin sehingga tercipta gesekan banyak arah (*multi-directional friction*). Gesekan tersebut terjadi ketika pin yang berputar bergesekan dengan disk yang juga berputar.

2. Kalibrasi Alat Uji

Sebelum alat uji digunakan, tribometer yang akan digunakan harus dikalibrasi terlebih dahulu. Hal tersebut dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan data hasil percobaan yang akurat. Kalibrasi yang dilakukan meliputi kalibrasi *speed control* dan *load* (pembebanan). Kalibrasi beban dilakukan dengan menggunakan timbangan badan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6. Kalibrasi *speed control* dilakukan dengan menggunakan *tachometer infrared* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Kalibrasi Pembebanan



Gambar 3.7 Kalibrasi *Speed Control*

Berdasarkan hasil kalibrasi, didapatkan variasi-variasi rasio kecepatan yang mampu dilaksanakan pada alat tribometer *pin on disk*. Hasil kalibrasi tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1. Rasio Kecepatan antara Pin dan Disk berdasarkan Hasil Kalibrasi

| LOAD (KG) | VOLT | PIN (RPM) | KECEPATAN DISK (RPM) | | | | |
|-----------|------|-----------|----------------------|------|------|------|------|
| | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| | | | 8.2 | 16.9 | 24.3 | 31.4 | 38.1 |
| 2 | 3 | 115.70 | 14.1 | 6.8 | 4.8 | 3.7 | 3.0 |
| | 6 | 215.99 | 26.3 | 12.8 | 8.9 | 6.9 | 5.7 |
| | 7.5 | 272.43 | 33.2 | 16.1 | 11.2 | 8.7 | 7.1 |
| | 9 | 353.83 | 43.1 | 20.9 | 14.6 | 11.3 | 9.3 |
| | 12 | 455.60 | 55.6 | 26.9 | 18.7 | 14.5 | 12.0 |
| | 13.8 | 504.47 | 61.5 | 29.8 | 20.8 | 16.1 | 13.2 |
| 4 | 3 | 102.93 | 12.6 | 6.1 | 4.2 | 3.3 | 2.7 |
| | 6 | 202.90 | 24.7 | 12.0 | 8.3 | 6.5 | 5.3 |
| | 7.5 | 262.35 | 32.0 | 15.5 | 10.8 | 8.4 | 6.9 |

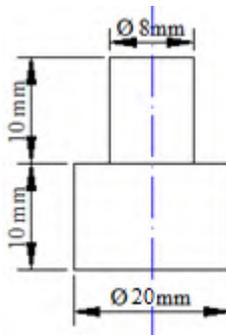
| | 9 | 337.99 | 41.2 | 20.0 | 13.9 | 10.8 | 8.9 |
|--------------|------|--------------|----------------------|------|------|------|------|
| | 12 | 437.41 | 53.3 | 25.8 | 18.0 | 13.9 | 11.5 |
| | 13.8 | 484.77 | 59.1 | 28.6 | 19.9 | 15.4 | 12.7 |
| 6 | 7.5 | 168.08 | 20.5 | 9.9 | 6.9 | 5.4 | 4.4 |
| | 9 | 226.05 | 27.6 | 13.3 | 9.3 | 7.2 | 5.9 |
| | 12 | 359.94 | 43.9 | 21.3 | 14.8 | 11.5 | 9.4 |
| | 13.8 | 441.38 | 53.8 | 26.1 | 18.2 | 14.1 | 11.6 |
| 8 | 7.5 | 150.73 | 18.4 | 8.9 | 6.2 | 4.8 | 4.0 |
| | 9 | 238.33 | 29.1 | 14.1 | 9.8 | 7.6 | 6.3 |
| | 12 | 356.23 | 43.4 | 21.0 | 14.7 | 11.3 | 9.3 |
| | 13.8 | 420.00 | 51.2 | 24.8 | 17.3 | 13.4 | 11.0 |
| LOAD (KG) | VOLT | PIN (RPM) | KECEPATAN DISK (RPM) | | | | |
| | | | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| | | | 43.6 | 48.3 | 52.4 | 56.0 | 59.2 |
| 2 | 3 | 115.70 | 2.7 | 2.4 | 2.2 | 2.1 | 2.0 |
| | 6 | 215.99 | 5.0 | 4.5 | 4.1 | 3.9 | 3.6 |
| | 7.5 | 272.43 | 6.3 | 5.6 | 5.2 | 4.9 | 4.6 |
| | 9 | 353.83 | 8.1 | 7.3 | 6.7 | 6.3 | 6.0 |
| | 12 | 455.60 | 10.5 | 9.4 | 8.7 | 8.1 | 7.7 |
| | 13.8 | 504.47 | 11.6 | 10.5 | 9.6 | 9.0 | 8.5 |
| 4 | 3 | 102.93 | 2.4 | 2.1 | 2.0 | 1.8 | 1.7 |
| | 6 | 202.90 | 4.7 | 4.2 | 3.9 | 3.6 | 3.4 |
| | 7.5 | 262.35 | 6.0 | 5.4 | 5.0 | 4.7 | 4.4 |
| | 9 | 337.99 | 7.8 | 7.0 | 6.4 | 6.0 | 5.7 |
| | 12 | 437.41 | 10.0 | 9.1 | 8.3 | 7.8 | 7.4 |
| | 13.8 | 484.77 | 11.1 | 10.0 | 9.2 | 8.7 | 8.2 |
| 6 | 7.5 | 168.08 | 3.9 | 3.5 | 3.2 | 3.0 | 2.8 |
| | 9 | 226.05 | 5.2 | 4.7 | 4.3 | 4.0 | 3.8 |
| | 12 | 359.94 | 8.3 | 7.5 | 6.9 | 6.4 | 6.1 |
| | 13.8 | 441.38 | 10.1 | 9.1 | 8.4 | 7.9 | 7.5 |
| 8 | 7.5 | 150.73 | 3.5 | 3.1 | 2.9 | 2.7 | 2.5 |
| | 9 | 238.33 | 5.5 | 4.9 | 4.5 | 4.3 | 4.0 |
| | 12 | 356.23 | 8.2 | 7.4 | 6.8 | 6.4 | 6.0 |
| | 13.8 | 420.00 | 9.6 | 8.7 | 8.0 | 7.5 | 7.1 |

3.1.5 Persiapan Spesimen

Persiapan spesimen meliputi 2 kegiatan, yaitu persiapan material dan penimbangan pin uji. Kegiatan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

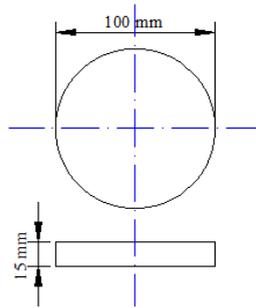
1. Persiapan material

Spesimen yang digunakan terdiri dari pin dan disk. Material yang digunakan untuk pin uji adalah *Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene* (UHMWPE) dan untuk disk adalah *Stainless Steel* AISI 304.



Gambar 3.8 Dimensi Pin Spesimen Uji

Material UHMWPE dibentuk menjadi spesimen berbentuk pin silinder yang memiliki dimensi bertingkat yaitu, 8 mm dan 20 mm dengan panjang masing-masing 10 mm. Bentuk dan dimensi pin digambarkan pada Gambar 3.8. Pin tersebut dibentuk dengan proses pembubutan bahan dasar berbentuk silinder. Kemudian bagian permukaan pin uji yang masih kasar akibat proses bubut selanjutnya dihaluskan dengan menggosokkan pin pada kertas gosok grid 1200 di atas permukaan kaca.



Gambar 3.9 Dimensi Disk

Material AISI 304 digunakan sebagai disk spesimen dengan diameter 100 mm dan tebal 15 mm. Bentuk dan dimensi disk dapat dilihat pada Gambar 3.9. Pembuatan disk dilakukan melalui proses pembubutan dan proses penghalusan permukaan yang dilakukan dengan cara menggosokkan permukaan disk pada kertas gosok di atas permukaan kaca.

Ukuran dari pin dan disk spesimen ini merupakan ukuran standar yang digunakan untuk melakukan pengujian menggunakan tribometer tipe pin on disk pada Laboratorium Otomotif, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Adapun spesifikasi dari disk dan pin yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Disk

| | |
|-----------------------------------|---|
| Nama Material | : <i>Stainless Steel</i> AISI 304 |
| <i>Density</i> | : 0,289 lb/in ³ = 8g/cm ³ |
| <i>Tensile Strength, Ultimate</i> | : 73200 psi |
| <i>Tensile Strength, Yield</i> | : 31200 psi |
| <i>Modulus of Elasticity</i> | : 28000-29000 ksi |

- Pin

| | |
|-------------------------|--|
| Nama Material | : <i>Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene</i> |
| <i>Density</i> | : 0,034lb/in ³ = 0,94 g/cm ³ |
| <i>Tensile Strength</i> | : 3560 psi |

Coefficient of Friction : 0,1- 0,15
Melting Point : 130-138 °C

1. Penimbangan pin uji

Sebelum dilakukan pengambilan data, seluruh pin spesimen uji ditimbang menggunakan timbangan digital. Timbangan digital yang digunakan pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Timbangan Digital

Penggunaan timbangan digital dimaksudkan untuk memperoleh nilai yang akurat dari perubahan massa pin spesimen uji setelah dan sebelum pengambilan data. Proses penimbangan dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

3.1.6 Pengambilan Data Penelitian

Pada tahap ini akan dilakukan pengambilan data yang nantinya akan digunakan sebagai bahan pembahasan dari penelitian ini. Pengambilan data ini dilakukan untuk melihat bagaimana fenomena *stick-slip* terjadi, dimana pengambilan data diambil dengan pengujian geskkan banyak arah (*Multi-directional contact friction*) dengan kondisi tanpa pelumas (*Dry sliding*).

3.1.7 Analisa Struktur Permukaan Spesimen Uji

Spesimen yang telah dilakukan pengujian dengan tribometer, selanjutnya diamati struktur permukaannya menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran dan 10 kali. Pengamatan ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana struktur permukaan dari material yang telah melakukan kontak sehingga dapat dianalisa untuk diketahui mekanisme keausan dan penyebab keausan material tersebut. Pada Gambar 3.11. dapat dilihat mikroskop optis yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.11 Mikroskop Optis

Pengamatan struktur permukaan pin spesimen uji dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

3.1.8 Pengolahan Data Penelitian, Pembuatan Grafik dan Analisa Hasil Penelitian

Data yang diperoleh selanjutnya diolah dan diplot ke dalam grafik yang disesuaikan dengan teori yang ada. Kemudian hasil tersebut dianalisa dan dilakukan pembahasan terhadap grafik yang

diperoleh. Hasil pengamatan struktur permukaan pin spesimen uji juga dianalisa untuk mengetahui mekanisme keausan dan penyebab terjadinya keausan.

3.1.9 Kesimpulan dan Saran

Pada tahap terakhir ini, keseluruhan hasil penelitian disimpulkan kemudian diberikan pula saran untuk penelitian kedepannya. Kesimpulan yang akan diamati, yaitu sebagai berikut:

- Mengetahui rasio kecepatan antara disk dan pin saat terjadinya *stick-slip*.
- Mengamati dan menganalisa daerah yang mengalami *stick-slip* pada pengujian *multi-directional contact* dan kondisi *dry sliding*.
- Pola keausan yang terjadi melalui pengamatan struktur permukaan secara mikroskopis.

3.2 Perencanaan Eksperimen

Eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini adalah pengujian dengan gesekan banyak arah (*multi-directional contact friction*). Dan pengujian yang dilakukan dianalisa pada kondisi dan tanpa pelumasan (*dry sliding*). Perencanaan eksperimen untuk pengujian pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 Perencanaan Eksperimen Pengujian

| No. | Distance (m) | Massa jenis (g/cm ³) | Speed Ratio | Load (kg) | F (N) | Massa awal (gram) | Massa akhir (gram) | Δm | ΔV | K' |
|-----|--------------|----------------------------------|-------------|-----------|-------|-------------------|--------------------|------------|------------|----|
| 1 | 2000 | 0.945 | 4.2 | | | | | | | |
| 2 | 2000 | 0.945 | 5 | | | | | | | |
| 3 | 2000 | 0.945 | 6.5 | | | | | | | |
| 4 | 2000 | 0.945 | 10 | | | | | | | |
| 5 | 2000 | 0.945 | 20 | | | | | | | |

Keterangan :

- m_o = massa pin awal sebelum pengujian
- m_i = massa pin akhir setelah pengujian
- Δm = $m_o - m_i$ (perubahan massa pin atau volume aus)

Perubahan massa pin Δm didapatkan dengan menimbang pin sebelum dilakukan pengujian dan kemudian ditimbang lagi menggunakan timbangan digital setelah dilakukan pengujian. Setelah Δm diketahui, berikutnya mulai menghitung perubahan volume ΔV pin yang terjadi dengan menggunakan rumus seperti persamaan 3.1 dibawah ini:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (3.19)$$

Maka *wear coefficient* K' dapat dicari dengan rumus:

$$K' = \frac{\Delta V}{\text{load} \cdot \text{distance}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \right) \quad (3.20)$$

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan membahas dan menganalisa hasil eksperimen antara *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* AISI 304. Pembahasan yang dilakukan yaitu meliputi, analisa daerah yang mengalami *Stick-slip Friction* akibat adanya *Multi-Directional Contact Friction*.

4.1 Analisa *Stick-Slip Friction* pada Permukaan Pin

Perbedaan besar dan arah kecepatan gesek pin terhadap disk selain menyebabkan perbedaan laju keausan juga menyebabkan perbedaan bentuk dan dimensi keausan yang terbentuk pada permukaan pin. Dimana terdapat perbedaan dari pola-pola dan letak dari mekanisme keausan yang terjadi pada masing-masing rasio kecepatan.

4.1.1 Pengujian Rasio Kecepatan 4,2

Pengambilan data pertama dilakukan pada rasio kecepatan 4,2. Dimana kecepatan putaran disk adalah 48,3 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 202,899 rpm. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)

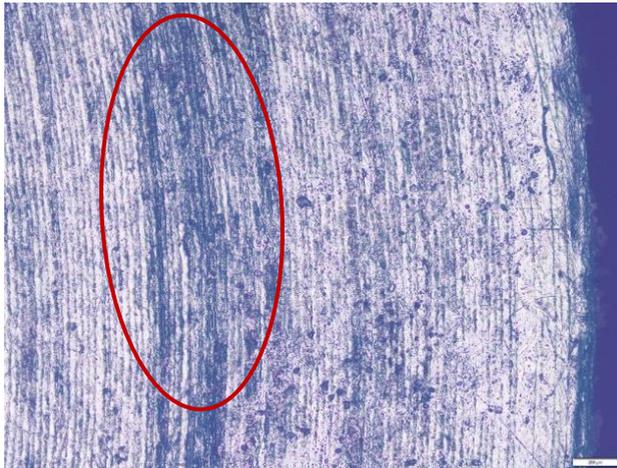
Gambar 4.1 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 4,2 dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x

Pada Gambar 4.1 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.1 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 4,2 dengan 5x dan 10x perbesaran. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit pada gambar 4.1a yang telah dilingkari berwarna merah dimana daerah tersebut diindikasikan mengalami fenomena *stick-slip*. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.1.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki ukuran yang cukup panjang dan lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak titik-titik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesif. Fenomena ini terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 4,2 diperkirakan efek *stick-slip friction* terjadi pada radius 9 mm dari

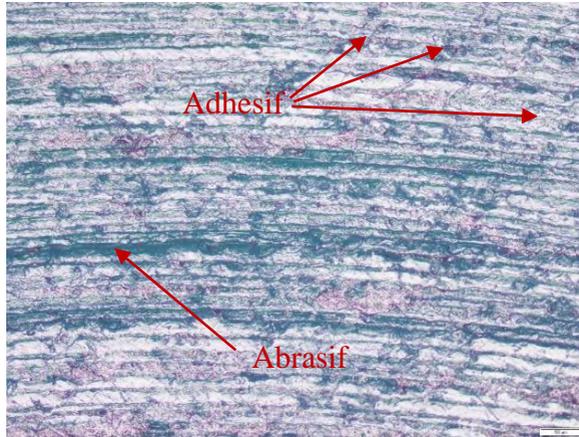
pusat pin. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.1, mekanisme keausan terjadi pada radius terluar dari pin.

4.1.2 Pengujian Rasio Kecepatan 5

Pengambilan data kedua dilakukan pada rasio kecepatan 5. Dimana kecepatan putaran disk adalah 52,4 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 262,35 rpm. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)

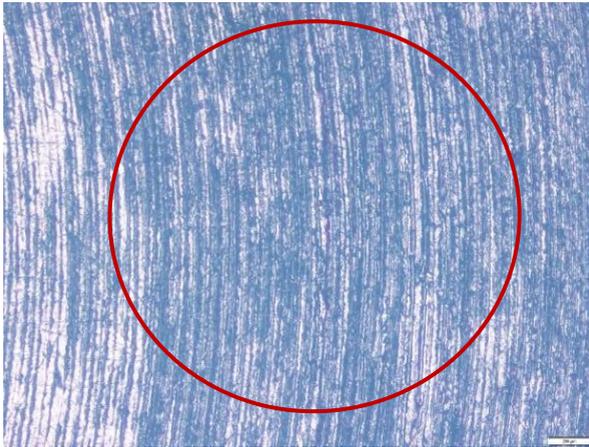
Gambar 4.2 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 5, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x

Pada Gambar 4.2 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.2 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 5, dengan perbesaran 5x dan 10x. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit, hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.2a yang telah dilingkari warna merah, dimana daerah tersebut diindikasikan mengalami fenomena *stick-slip*. Pola ini mirip pada permukaan saat rasio kecepatan 4,2 hanya saja letaknya berbeda cenderung lebih ke dalam. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.2.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki ukuran yang cukup panjang dan lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak bintik-bintik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesif. Fenomena ini

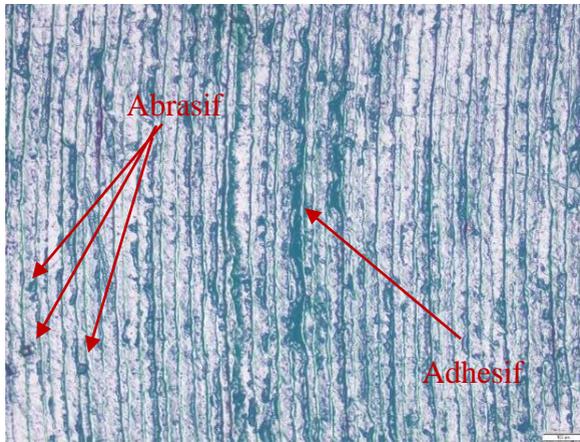
terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 5 diperkirakan efek *stick-slip friction* terjadi pada radius 8 mm dari pusat pin, sehingga dari gambar terlihat bahwa letak goresan-goresan pada permukaan lebih kedalam jika dibandingkan dengan Gambar 4.1 saat rasio kecepatan 4,2

4.1.3 Pengujian Rasio Kecepatan 6.5

Pengambilan data ketiga dilakukan pada rasio kecepatan 6,5. Dimana kecepatan putaran disk adalah 31,4 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 202,899 rpm. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)

Gambar 4.3 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 6,5 , dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x

Pada Gambar 4.3 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.3 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 6,5 dengan perbesaran foto adalah 5x dan 10x. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit, namun terlihat bahwa goresan tersebut merata pada permukaan pin. Hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.3a yang telah dilingkari warna merah dimana daerah tersebut diindikasikan mengalami fenomena *stick-slip*. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.3.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki ukuran yang cukup panjang namun sedikit lebih sempit, yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak bintik-bintik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesif. Fenomena ini

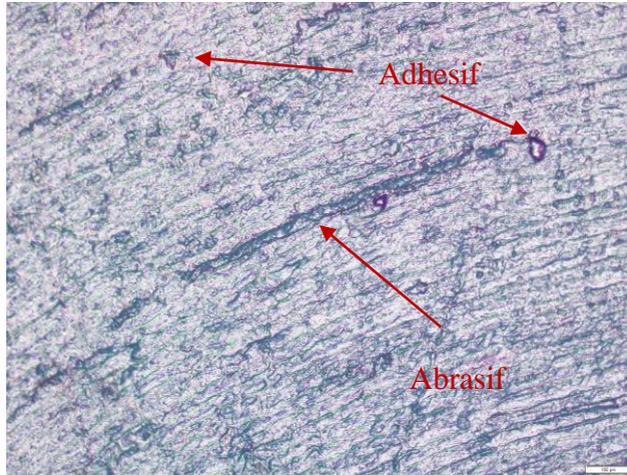
terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 6,5 efek *stick-slip friction* diperkirakan terjadi pada radius 6 mm dari pusat pin.

4.1.3 Pengujian Rasio Kecepatan 10

Pengambilan data keempat dilakukan pada rasio kecepatan 10. Dimana kecepatan putaran disk adalah 43,6 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 437,413 rpm. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar berikut ini.



(a)



(b)

Gambar 4.4 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 10, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x

Pada Gambar 4.4 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.4 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 10, dengan perbesaran 5x dan 10x pada mikroskop optis. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit. Hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.4a yang telah dilingkari warna merah dimana daerah tersebut diindikasikan mengalami fenomena *stick-slip*. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.1.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki ukuran yang cukup panjang dan agak lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak bintik-bintik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesif. Fenomena ini terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut.

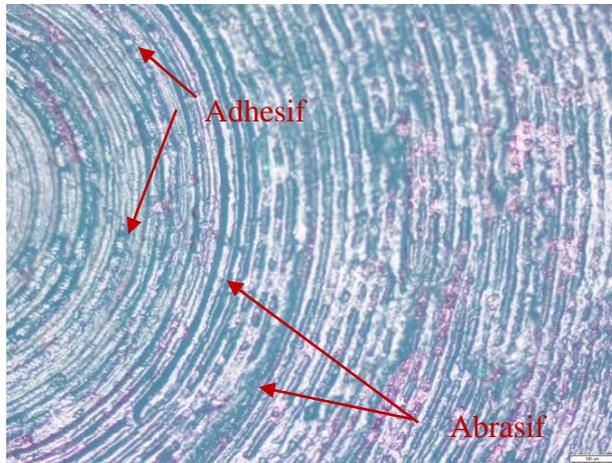
Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 10 diperkirakan efek *stick-slip friction* terjadi pada radius 4 mm dari pusat pin. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.4, mekanisme keausan terjadi pada radius lebih mendekati pusat pin jika dibandingkan dengan Gambar 4.3 saat rasio kecepatan 6,5.

4.1.4 Pengujian Rasio Kecepatan 20

Pengambilan data kelima dilakukan pada rasio kecepatan 20. Dimana kecepatan putaran disk adalah 16,9 rpm dan kecepatan putaran pin adalah 337,986 rpm. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



(b)

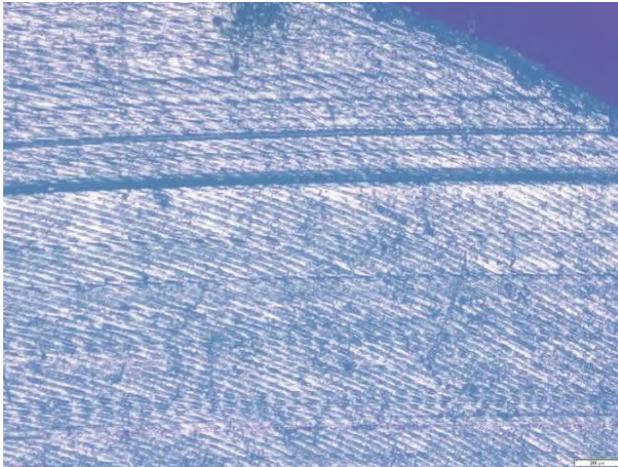
Gambar 4.5 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan 20, dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x

Pada Gambar 4.5 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.5 merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 20 dengan perbesaran 5x dan 10x pada mikroskop optis. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit. Hal tersebut dapat diamati pada gambar 4.5a yang telah dilingkari warna merah, dimana daerah tersebut diindikasikan mengalami fenomena *stick-slip*. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.5.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan-goresan yang memiliki ukuran yang cukup panjang dan lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif serta terdapat juga banyak titik-titik berwarna hijau yang merupakan material yang terkelupas akibat mekanisme keausan yang bersifat adhesif. Fenomena ini terjadi karena terjadinya efek *stick-slip friction* pada daerah tersebut. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 20

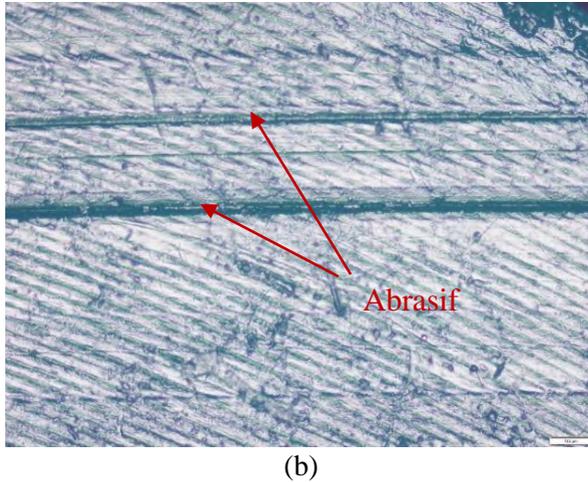
diperkirakan efek *stick-slip friction* terjadi pada radius 2 mm dari pusat pin. Sehingga dapat dilihat pada Gambar 4.5, mekanisme keausan terjadi pada daerah yang sangat dekat dengan pusat daripada pin.

4.1.6 Pengujian *Uni-Directional Contact*

Pengambilan data ini dilakukan pada kondisi *uni-directional contact*. Dimana kecepatan putaran disk adalah 24,3 rpm dan pin berada pada posisi tidak berputar atau diam sehingga pin hanya digesek satu arah oleh disk tersebut. Hasil foto mikroskop dari permukaan pin ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



(a)



Gambar 4.6 Foto Mikro Permukaan Spesimen Setelah Dilakukan Pengujian Uni-Directional Contact dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x.

Pada Gambar 4.6 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan, setelah dilakukan pengujian. Pada Gambar 4.6 merupakan permukaan spesimen uji dengan kondisi *uni-directional contact*, dengan perbesaran 5x dan 10x dari mikroskop optis. Dapat ditemukan banyak goresan, dengan arah lurus dari luar pin memotong lurus ke dalam pin, dengan posisi satu sama lain yang berhimpit dan searah. Ketika pengamatan dilanjutkan pada Gambar 4.6.b yang merupakan permukaan dengan perbesaran 10x dapat dilihat goresan memiliki ukuran yang cukup panjang dan agak lebar yang mengindikasikan terjadinya mekanisme keausan yang bersifat abrasif. Dimana berdasarkan analisa kinematika saat rasio kecepatan 1 tidak terjadi efek *stick-slip*. Sehingga dapat dilihat pada gambar 4.6 bahwa pola goresan terjadi merata pada permukaan.

Apabila dibandingkan foto mikro permukaan spesimen dengan yang sebelumnya maka dapat disebutkan bahwa

permukaan yang mengalami efek *stick-slip* memiliki mekanisme abrasi yang lebih banyak dan posisinya memanjang dan saling berhimpit serta mempunyai bercak-bercak yang merupakan material yang terkelupas akibat dari mekanisme keausan yang bersifat adhesif. berbeda dengan permukaan yang tidak mengalami efek *stick-slip* yang memiliki goresan yang panjang yang bentuknya searah dengan arah gesekan dari putaran disk.

4.2 Data Hasil Pengujian

Setelah melakukan seluruh rangkaian prosedur pengambilan data, diperoleh data perubahan massa dengan melakukan penimbangan massa spesimen sebelum dan setelah pengujian keausan. Data yang didapatkan setelah melakukan pengujian keausan berupa perubahan massa dalam satuan gram (gr) dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data Perubahan Massa Spesimen Uji

| No. Pin | Speed Ratio | Massa awal (gram) | Massa akhir (gram) | Δm (gram) |
|---------|-------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 1 | 4,2 | 3.6937 | 3.6889 | 0.0048 |
| 2 | 5 | 3.4777 | 3.4771 | 0.0006 |
| 3 | 6.5 | 3.4981 | 3.497 | 0.0011 |
| 4 | 10 | 3.1858 | 3.1846 | 0.0012 |
| 5 | 20 | 3.2287 | 3.2229 | 0.0058 |
| 6 | - | 2.8745 | 2.8742 | 0.0003 |

4.3 Perhitungan Laju Keausan

Penelitian pada tahap ini diperlukan perhitungan untuk mencari nilai laju keausan dengan parameter *wear coefficient* (K'). Dengan diketahuinya nilai K' tersebut maka dapat diketahui laju keausan UHMWPE di setiap rasio kecepatan dan dapat dilakukan perbandingan antara rasio kecepatan dimana *stick-slip friction* akan terjadi dengan rasio kecepatan dimana tidak terjadi *stick-slip friction*. Berikut ini merupakan hasil perhitungan untuk mencari nilai laju keausan dari material UHMWPE.

Tabel 4.2. Hasil Perhitungan Laju Keausan (*Wear Coefficient*, K')

| No. Pin | Distance (m) | Massa jenis (g/cm ³) | Speed Ratio | Load (kg) | F (N) |
|---------|--------------|----------------------------------|-------------|-----------|-------|
| 1 | 2000 | 0.945 | 4.2 | 4 | 39.24 |
| 2 | 2000 | 0.945 | 5 | 4 | 39.24 |
| 3 | 2000 | 0.945 | 6.5 | 4 | 39.24 |
| 4 | 2000 | 0.945 | 10 | 4 | 39.24 |
| 5 | 2000 | 0.945 | 20 | 4 | 39.24 |
| 6 | 2000 | 0.945 | - | 4 | 39.24 |

| No. Pin | Massa awal (gram) | Massa akhir (gram) | Δm | $\Delta volume$ (cm ³) | K' (mm ³ /N.m) |
|---------|-------------------|--------------------|------------|------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 3.6937 | 3.6889 | 0.0048 | 0.005079 | 6.472×10^{-5} |
| 2 | 3.4777 | 3.4771 | 0.0006 | 0.000635 | 8.090×10^{-6} |
| 3 | 3.4981 | 3.497 | 0.0011 | 0.001164 | 1.483×10^{-5} |
| 4 | 3.1858 | 3.1846 | 0.0012 | 0.00127 | 1.618×10^{-5} |
| 5 | 3.2287 | 3.2229 | 0.0058 | 0.006138 | 7.820×10^{-5} |
| 6 | 2.8745 | 2.8742 | 0.0003 | 0.000317 | 4.045×10^{-6} |

4.3.1 Contoh Perhitungan

Subbab ini akan menjabarkan salah satu contoh perhitungan yang dilakukan untuk mendapatkan nilai laju keausan dari tiap rasio kecepatan.

Spesimen 1 (Dry Sliding)

Rasio Kecepatan = 4,2

Beban = 4 kg

Kecepatan pin = 202,899 rpm

Kecepatan disk = 48,3 rpm

Massa jenis = 0,945 gr/cm³

Massa awal = 3,6937 gr

Massa akhir = 3,6889 gr

Jarak tempuh (L) = 2000 m

$$\begin{aligned} \diamond F &= m \cdot g \\ &= 2 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\ F &= 39,24 \text{ N} \end{aligned}$$

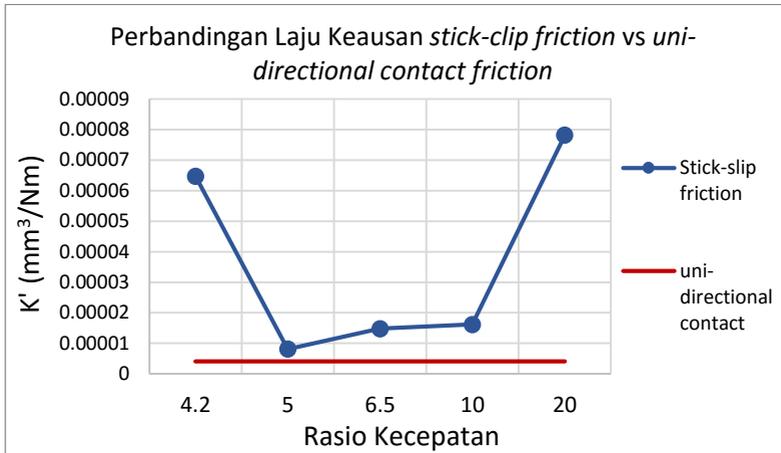
$$\begin{aligned} \diamond \Delta \text{Massa} &= \text{Massa awal} - \text{Massa akhir} \\ &= 3,6937 \text{ gr} - 3,6889 \text{ gr} \\ \Delta \text{Massa} &= 0,0048 \text{ gr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond \Delta \text{Volume} &= \frac{\Delta \text{Massa}}{\text{Massa Jenis}} \\ &= \frac{0,0048}{0,945} \\ &= 0,005079 \text{ cm}^3 \\ &= 5,079 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \diamond K' &= \frac{\Delta V}{F \cdot L} \\ &= \frac{5,079}{39,24 \times 2000} \\ K' &= 6,472 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nm}} \end{aligned}$$

Karena nilai K' sangat kecil maka untuk mempermudah dalam analisa ke dalam grafik, nilai K' dikalikan dengan 10^5 . Sehingga nilai $K' \cdot 10^5$ adalah $6,472 \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

4.4 Analisa Laju Keausan



Gambar 4.7 Grafik perbandingan laju keausan *stick-slip friction* dengan *uni-directional contact friction*.

Grafik pada Gambar 4.10 merupakan grafik yang membandingkan laju keausan *stick-slip friction* dengan *multi-directional contact friction*. Pada *trendline* warna biru menunjukkan hubungan antara besarnya laju keausan dengan perubahan rasio kecepatan antara pin dan disk, kemudian pada *trendline* warna merah menunjukkan laju keausan saat kondisi *uni-directional contact* dengan pengujian gesekan tanpa pelumas material UHMWPE terhadap material *stainless steel*. Pada grafik tersebut ditampilkan besarnya laju keausan dengan satuan mm^3/Nm sebagai sumbu vertikal dan perubahan rasio kecepatan dengan satuan rpm/rpm sebagai sumbu horizontal. Pada grafik tersebut, dibandingkan harga laju keausan dari 5 buah rasio kecepatan yang berbeda.

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa besar laju keausan untuk rasio kecepatan 4,2 adalah $6.472 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, untuk rasio kecepatan 5 adalah $8.09022 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, untuk rasio kecepatan 6,5 adalah $1.483 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, untuk rasio kecepatan 10 adalah $1.618 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ dan untuk rasio kecepatan 20 adalah $7.820 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$, serta pada kondisi *uni-directional contact* memiliki laju keausan sebesar $4.04511 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$.

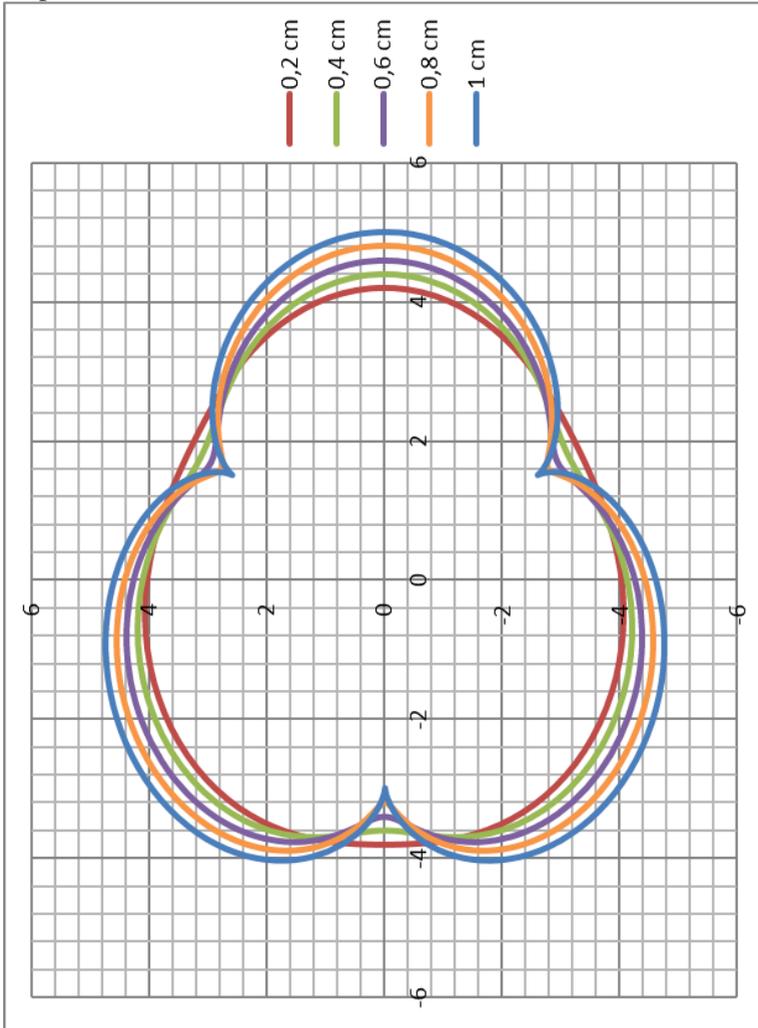
Pada Gambar 4.10 dapat dilihat pada *trendline* berwarna biru, saat rasio kecepatan 4.2 terjadi penurunan laju keausan, kemudian laju keausan kembali meningkat mulai dari rasio kecepatan 5 hingga pada puncaknya yaitu saat rasio kecepatan 20, sedangkan pada *trendline* yang berwarna merah yaitu laju keausan pada kondisi *uni-directional contact* memiliki nilai laju keausan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan *trendline* yang berwarna biru yaitu laju keausan saat mengalami *stick-slip friction*. Terlihat jelas pada grafik gambar 4.10 perbandingan antara pin yang mengalami *stick-slip friction* dengan yang hanya mengalami *uni-directional contact*, dimana laju keausan untuk pin yang mengalami *stick-slip friction* lebih tinggi jika dibandingkan dengan laju keausan untuk pin pada pengujian *uni-directional contact* dan bila dilihat dengan cermat pada grafik gambar 4.10 terlihat bahwa nilai keausan spesimen yang mengalami *stick-slip* lebih tinggi dan hingga dapat mencapai 200% dari nilai keausan saat benda mengalami *uni-directional contact*. Hal ini sudah sesuai dengan teori, karena saat pengujian *uni-directional contact* pin berada pada kondisi diam dan tidak mengalami *stick-slip friction*, dimana *stick-slip friction* mampu menciptakan laju keausan yang cukup tinggi.

Secara teori laju keausan meningkat sering dengan bertambahnya rasio kecepatan antara pin dan disk, hal ini disebabkan oleh semakin tinggi rasio kecepatan maka semakin sering juga fenomena *stick-slip friction* yang terjadi pada permukaan pin. Hal ini dapat dilihat pada gambar 3.4. Pada gambar 3.4 terlihat pola lintasan yang dilalui titik pada pin ditiap masing-masing rasionya. Jika diamati terlihat bahwa intensitas terjadinya *stick-slip* semakin meningkat dari rasio kecepatan rendah yaitu 4

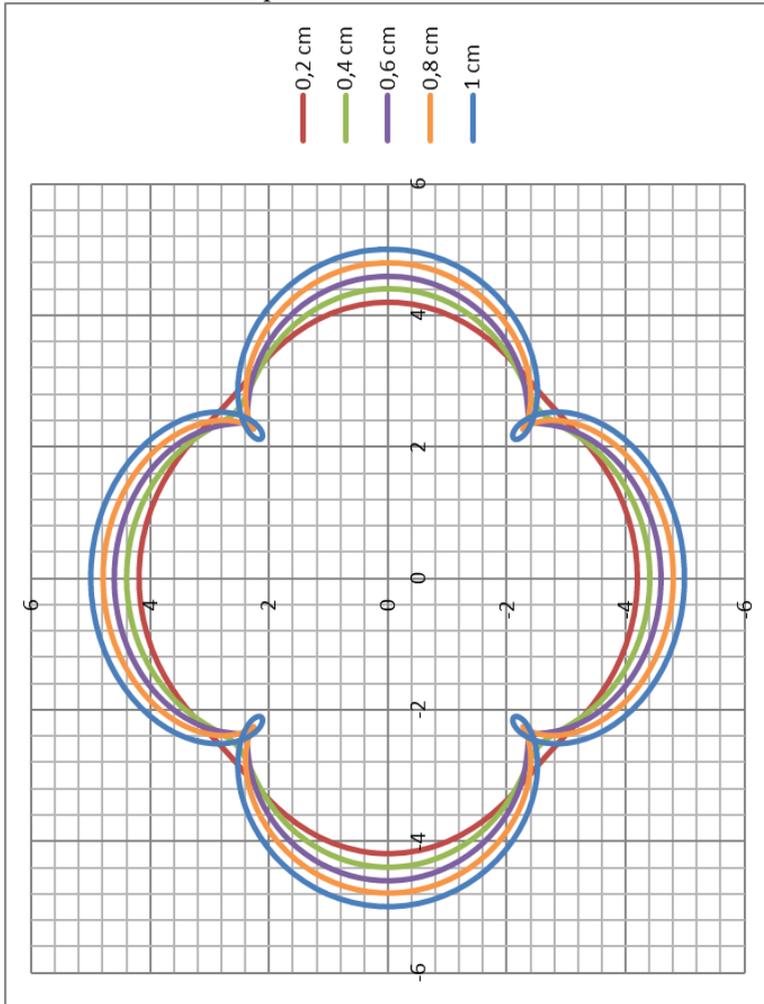
hingga rasio kecepatan tinggi 20. Dengan semakin banyak intensitas terjadinya *stick-slip* maka semakin tinggi juga nilai laju keausan suatu benda, dan hal tersebut telah dibuktikan pada grafik gambar 4.10. Namun pada grafik tersebut terlihat pada saat rasio kecepatan rendah yaitu 4,2 memiliki keausan yang cukup tinggi juga dan justru tidak sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin tinggi rasio kecepatan maka semakin tinggi nilai keausan yang dihasilkan. Tetapi berdasarkan pada gambar 2.15 dari jurnal Internasional yang berjudul “*Effect of Surface Contact Conditions on the Stick-Slip Behavior of Brake Friction Material*” karangan S.W. Yoon, M.W.Shin, W.G. Lee, dan H. Jang pada tahun 2012 yang menjelaskan bahwa semakin besar kecepatan semakin besar juga intensitas efek *stick-slip* terjadi, akan tetapi pada saat kecepatan rendah nilai dari koefisien *friction* yang dihasilkan justru lebih tinggi dibanding dengan saat kecepatan rendah. Oleh karena itu bisa disimpulkan bahwa pada rasio kecepatan 4,2 memiliki nilai laju keausan yang tinggi karena koefisien *friction* yang ditimbulkan pada kecepatan tersebut juga tinggi.

LAMPIRAN

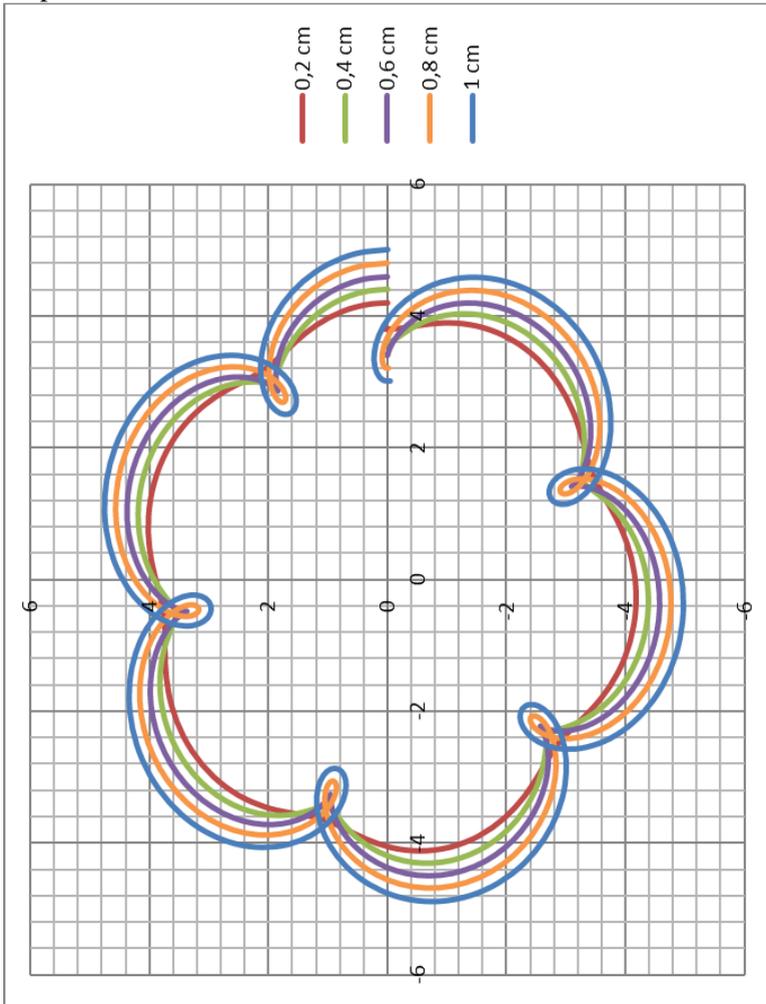
- Pola Lintasan titik P, Q, R, S, dan T saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 4



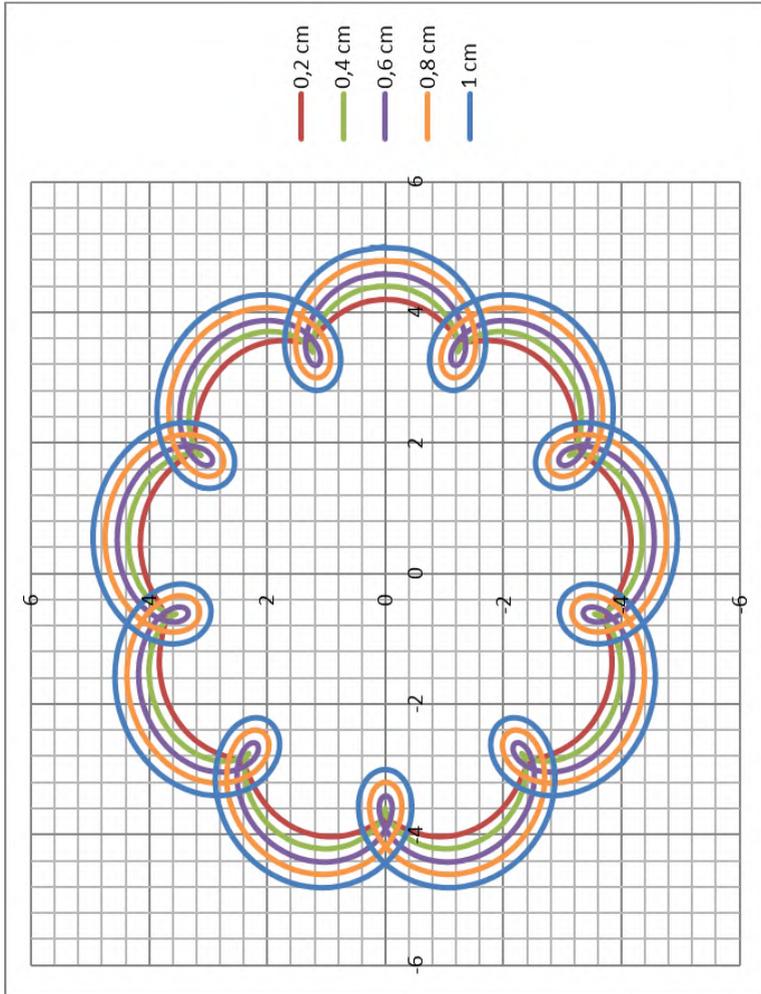
- Pola Lintasan titik P, Q, R, S, dan T saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 5



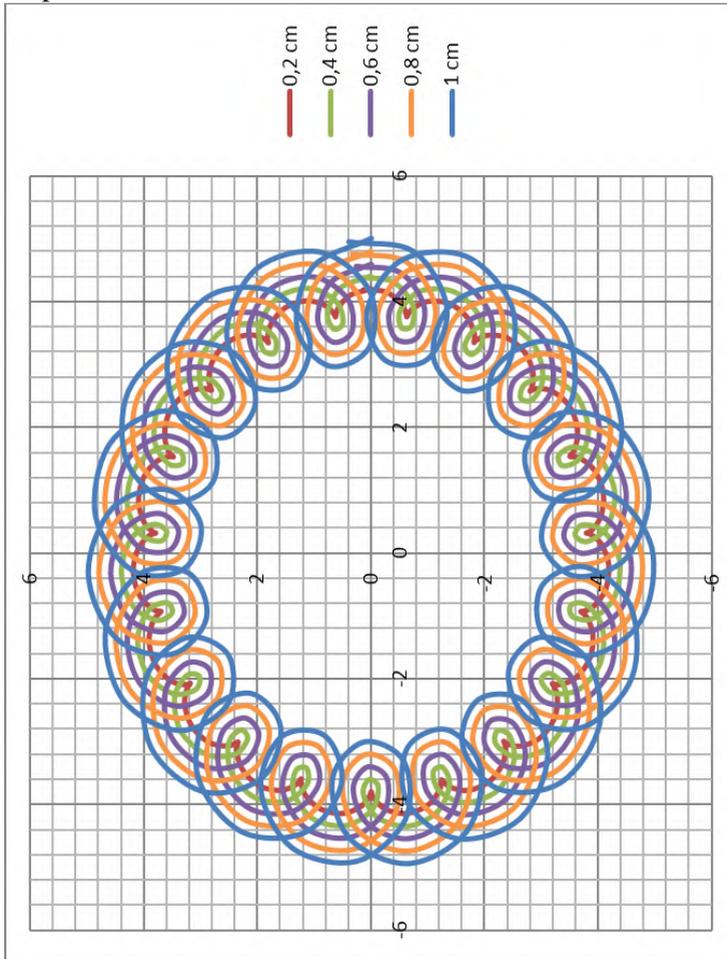
- Pola Lintasan titik P, Q, R, S, dan T saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 6,5



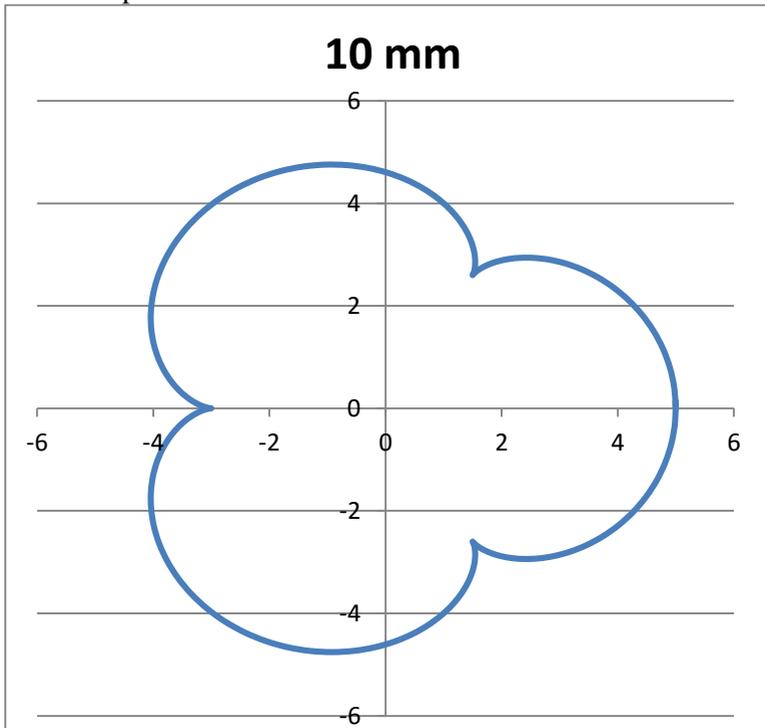
- Pola Lintasan titik P, Q, R, S, dan T saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 10



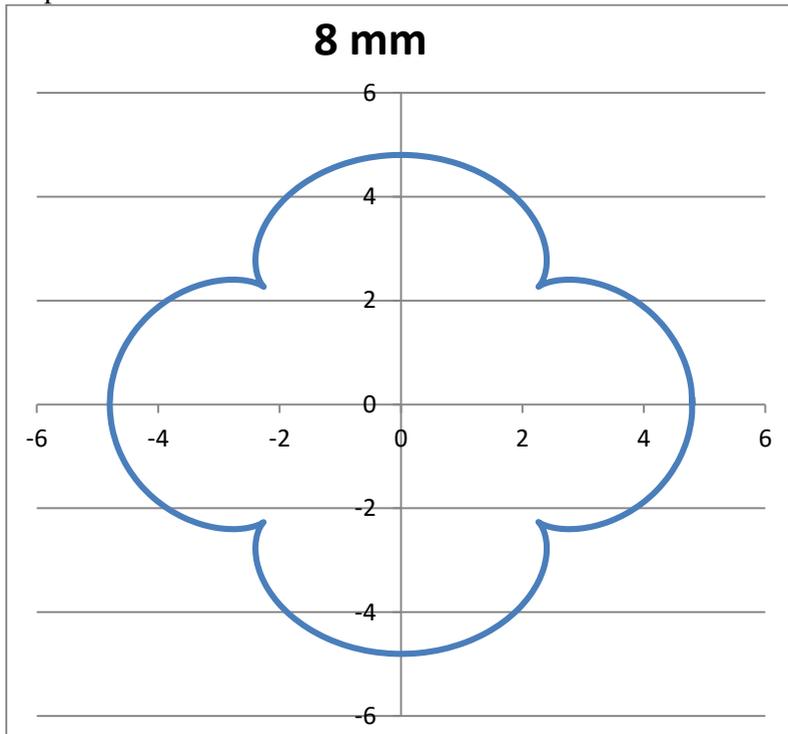
- Pola Lintasan titik P, Q, R, S, dan T saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 20



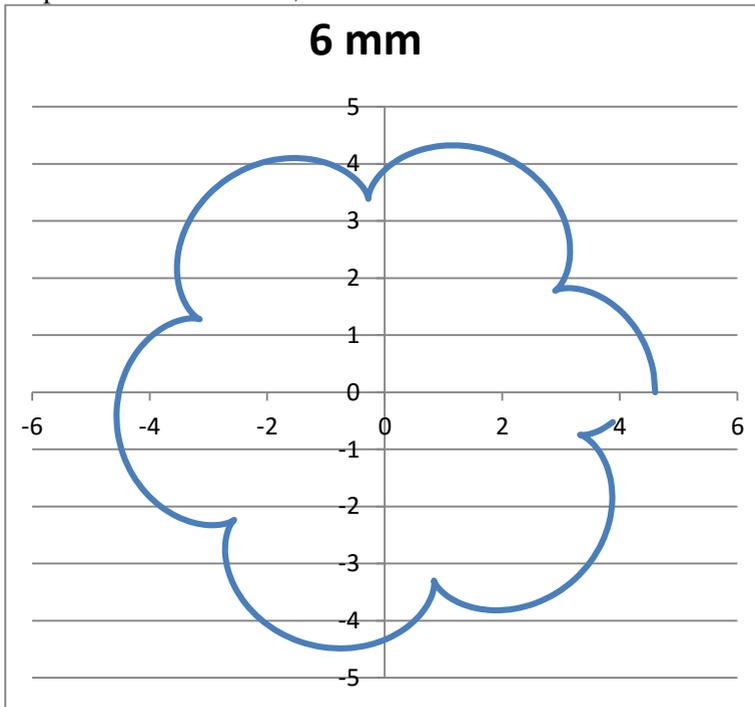
- Pola Lintasan titik P (radius = 10 mm) saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 4



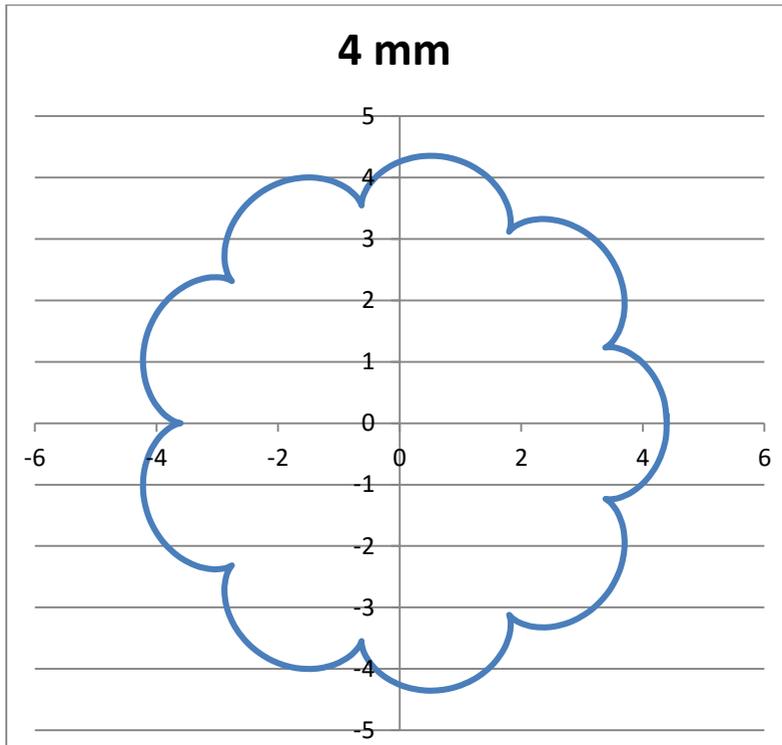
- Pola Lintasan titik Q (radius = 8 mm) saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 5



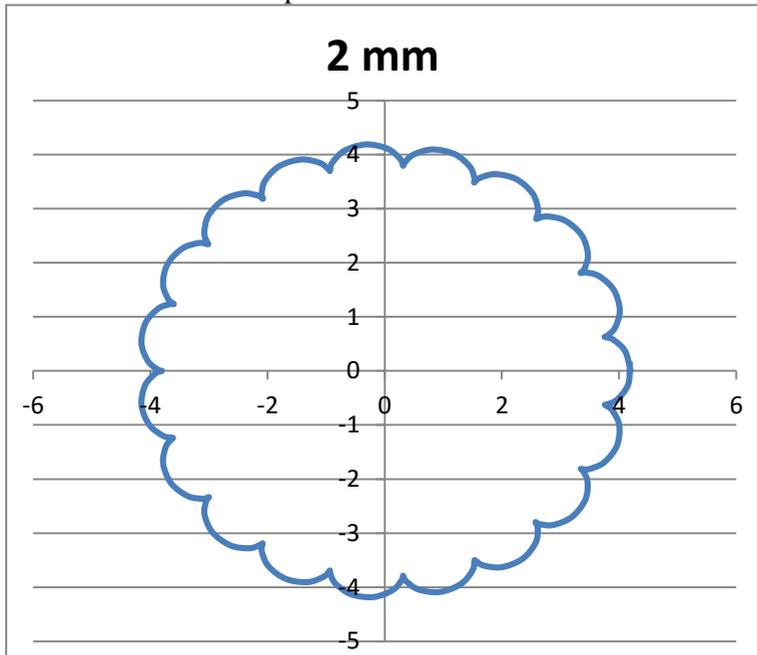
- Pola Lintasan titik R (radius = 6 mm) saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 6,5



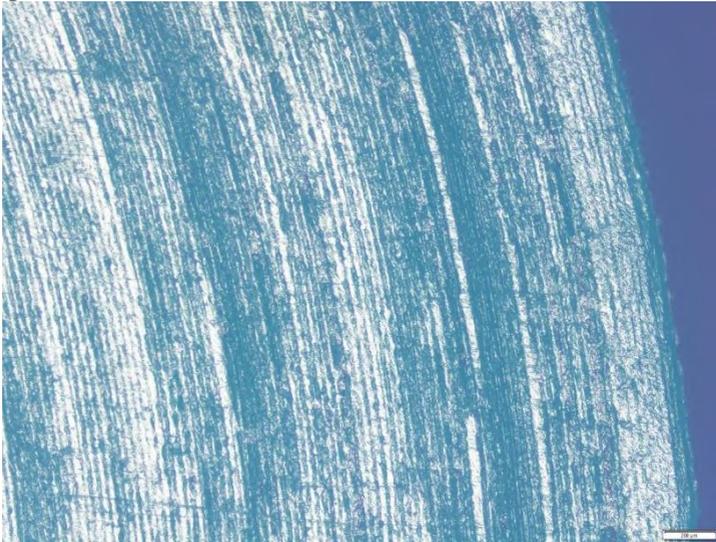
- Pola Lintasan titik S (radius = 4 mm) saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 10



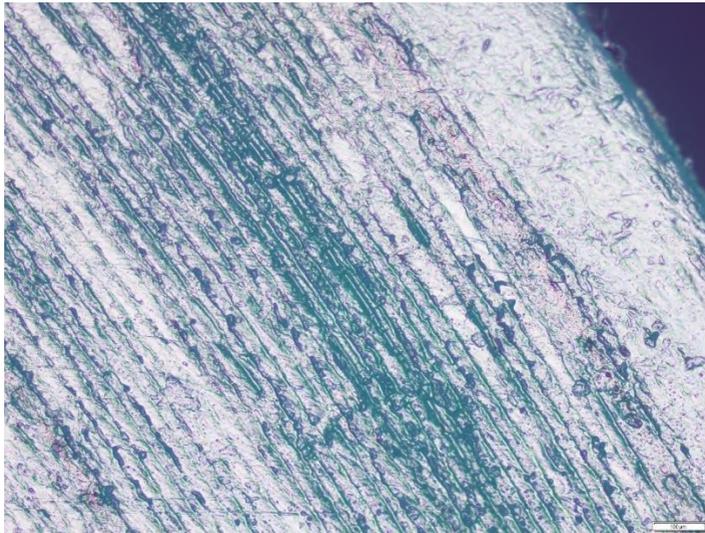
- Pola Lintasan titik T (radius = 2 mm) saat ratio kecepatan antara pin dan disk adalah 20



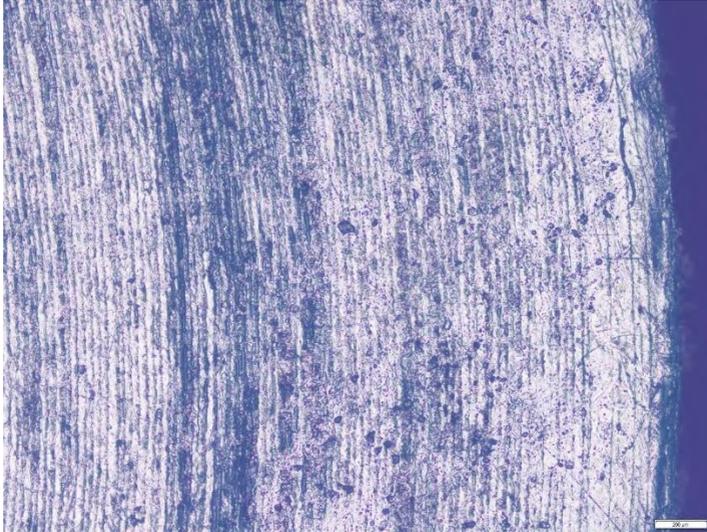
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 4,2 dengan perbesaran 5X



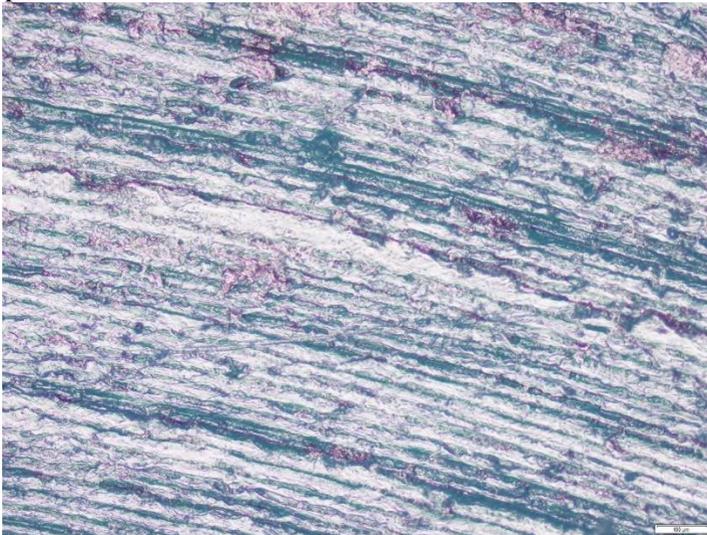
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 4,2 dengan perbesaran 10X



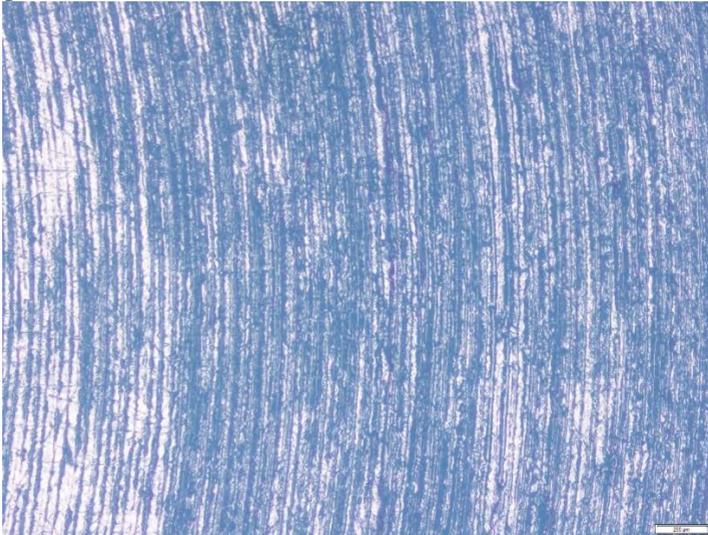
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 5 dengan perbesaran 5X



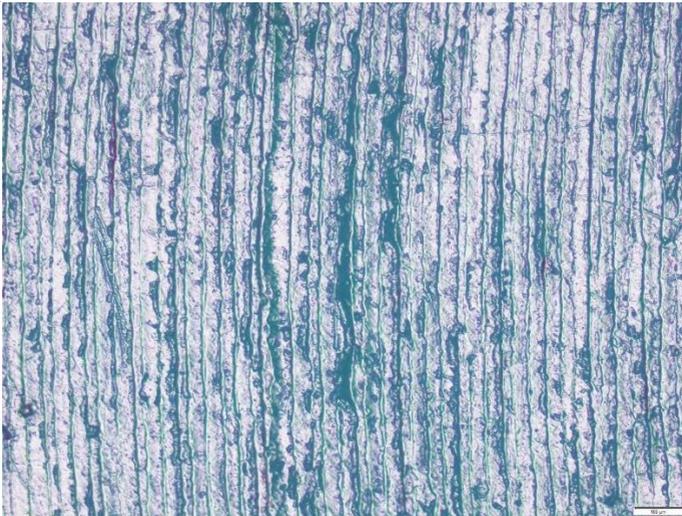
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 5 dengan perbesaran 10X



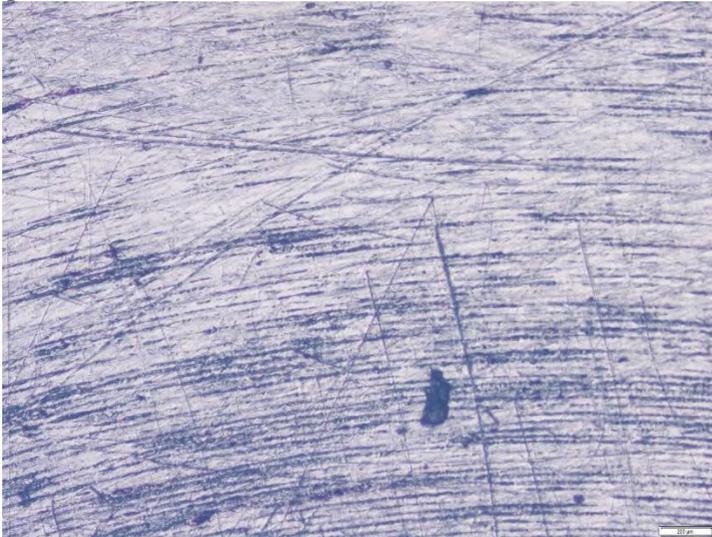
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 6,5 dengan perbesaran 5X



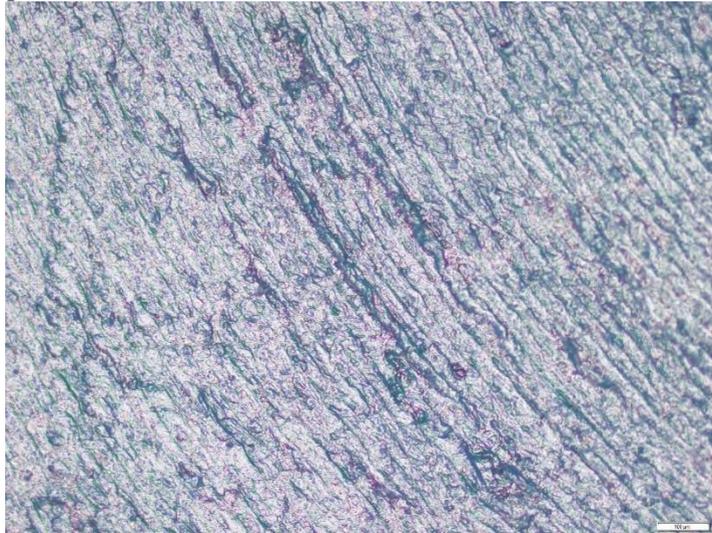
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 6,5 dengan perbesaran 10X



- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 10 dengan perbesaran 5X



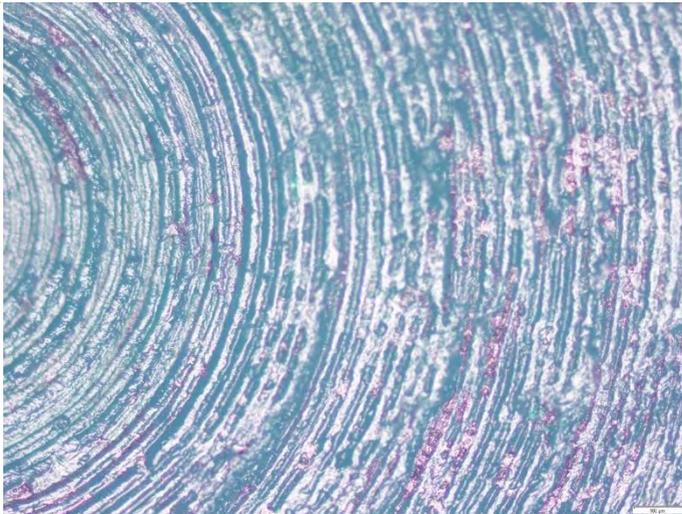
- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 10 dengan perbesaran 10X



- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 20 dengan perbesaran 5X



- Foto permukaan spesimen saat rasio kecepatan 20 dengan perbesaran 10X



➤ Rasio kecepatan antara pin dan disk

| LOAD | VOLT | PIN (RPM) | KECEPATAN DISK | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|---------|--------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|
| | | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2 | 3 | 115.7 | 8.2 | 16.9 | 24.3 | 31.4 | 38.1 | 43.6 | 48.3 | 52.4 | 56.0 | 59.2 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | |
| | 6 | 215.985 | 14.1 | 6.8 | 4.8 | 3.7 | 3.0 | 2.7 | 2.4 | 2.1 | 2.0 | 1.8 | 1.7 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 |
| | 7.5 | 272.426 | 26.3 | 12.8 | 8.9 | 6.9 | 5.7 | 5.0 | 4.7 | 4.2 | 3.9 | 3.6 | 3.4 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | |
| | 9 | 353.829 | 33.2 | 16.1 | 11.2 | 8.7 | 7.1 | 6.3 | 6.0 | 5.4 | 5.0 | 4.7 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12 | 455.598 | 43.1 | 20.9 | 14.6 | 11.3 | 9.3 | 8.1 | 7.3 | 6.7 | 6.3 | 6.0 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.8 | 504.471 | 61.5 | 29.8 | 20.8 | 16.1 | 13.2 | 11.6 | 10.5 | 9.6 | 9.0 | 8.5 | 8.2 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | 3 | 102.934 | 12.6 | 6.1 | 4.2 | 3.3 | 2.7 | 2.4 | 2.1 | 2.0 | 1.8 | 1.7 | 2.0 | 2.1 | 2.2 | 2.4 | 2.7 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | |
| | 6 | 202.899 | 24.7 | 12.0 | 8.3 | 6.5 | 5.3 | 4.7 | 4.2 | 3.9 | 3.6 | 3.4 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | 262.35 | 32.0 | 15.5 | 10.8 | 8.4 | 6.9 | 6.0 | 5.4 | 5.0 | 4.7 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 9 | 337.986 | 41.2 | 20.0 | 13.9 | 10.8 | 8.9 | 7.8 | 7.0 | 6.4 | 6.0 | 5.7 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12 | 437.413 | 53.3 | 25.8 | 18.0 | 13.9 | 11.5 | 10.0 | 9.1 | 8.3 | 7.8 | 7.4 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.8 | 484.766 | 59.1 | 28.6 | 19.9 | 15.4 | 12.7 | 11.1 | 10.0 | 9.2 | 8.7 | 8.2 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 3 | 168.08 | 20.5 | 9.9 | 6.9 | 5.4 | 4.4 | 3.9 | 3.5 | 3.2 | 3.0 | 2.8 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | |
| | 6 | 226.054 | 27.6 | 13.3 | 9.3 | 7.2 | 5.9 | 5.2 | 4.7 | 4.3 | 4.0 | 3.8 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | 285.944 | 35.9 | 17.3 | 12.2 | 9.1 | 7.4 | 6.3 | 5.6 | 5.1 | 4.7 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 9 | 359.944 | 43.9 | 21.3 | 14.8 | 11.5 | 9.4 | 8.3 | 7.5 | 6.9 | 6.4 | 6.1 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 12 | 441.381 | 53.8 | 26.1 | 18.2 | 14.1 | 11.6 | 10.1 | 9.1 | 8.4 | 7.9 | 7.5 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13.8 | 468.08 | 59.1 | 28.6 | 19.9 | 15.4 | 12.7 | 11.1 | 10.0 | 9.2 | 8.7 | 8.2 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 | 3 | 150.734 | 18.4 | 8.9 | 6.2 | 4.8 | 4.0 | 3.5 | 3.1 | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | |
| | 6 | 238.33 | 29.1 | 14.1 | 9.8 | 7.6 | 6.3 | 5.5 | 4.9 | 4.5 | 4.3 | 4.0 | 4.0 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.0 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 | 5.8 | 5.9 | 6.0 | 6.1 | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.5 | 6.6 | 6.7 | 6.8 | 6.9 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 7.5 | 7.6 | 7.7 | 7.8 | 7.9 | 8.0 | 8.1 | 8.2 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.6 | 8.7 | 8.8 | 8.9 | 9.0 | 9.1 | 9.2 | 9.3 | 9.4 | 9.5 | 9.6 | 9.7 | 9.8 | 9.9 | 10.0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 7.5 | 285.944 | 35.9 | 17.3 | 12.2 | 9.1 | 7.4 | 6.3 | 5.6 | 5.1 | 4.7 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

➤ Tabel hasil laju keausan

| No. | Distance (m) | Massa jenis (g/cm ³) | Speed Ratio | Load (kg) | F (N) | Massa awal (gram) | Massa akhir (gram) | Δm | $\Delta volume$ (cm ³) | K' (mm ³ /N.m) |
|-----|--------------|----------------------------------|-------------|-----------|-------|-------------------|--------------------|------------|------------------------------------|---------------------------|
| 1 | 2000 | 0.945 | 4.2 | 4 | 39.24 | 3.6937 | 3.6889 | 0.0048 | 0.005079 | 6.47218E-05 |
| 2 | 2000 | 0.945 | 5 | 4 | 39.24 | 3.4777 | 3.4771 | 0.0006 | 0.000635 | 8.09022E-06 |
| 3 | 2000 | 0.945 | 6.5 | 4 | 39.24 | 3.4981 | 3.4970 | 0.0011 | 0.001164 | 1.48321E-05 |
| 4 | 2000 | 0.945 | 10 | 4 | 39.24 | 3.1858 | 3.1846 | 0.0012 | 0.00127 | 1.61804E-05 |
| 5 | 2000 | 0.945 | 20 | 4 | 39.24 | 3.2287 | 3.2229 | 0.0058 | 0.006138 | 7.82055E-05 |
| 6 | 2000 | 0.945 | - | 4 | 39.24 | 2.8745 | 2.8742 | 0.0003 | 0.000317 | 4.04511E-06 |

(halaman sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Daerah *stick-slip* yang terjadi pada permukaan pin berbeda-beda dari setiap rasio kecepatan antara pin dan disk. Pada saat rasio kecepatan 4,2 daerah yang mengalami *stick-slip* terjadi pada radius 9 mm dari pusat pin, ketika rasio kecepatan 5 daerah yang mengalami *stick-slip* terjadi pada radius 8 mm dari pusat pin, saat rasio kecepatan 6.5 daerah yang mengalami *stick-slip* terjadi pada radius 6 mm dari pusat pin, kemudian saat rasio kecepatan 10 daerah yang mengalami *stick-slip* terjadi pada radius 4 mm dari pusat pin, dan saat rasio kecepatan 20 maka daerah yang mengalami *stick-slip* terjadi pada radius 2 mm dari pusat pin.
2. Daerah *stick-slip* yang tercipta pada permukaan pin dari hasil eksperimen apabila dibandingkan dengan hasil simulasi menggunakan *Microsoft Visual Basic 6.0* maka ditemukan hasil keduanya sangat mirip dimana daerah-daerah yang diindikasikan terjadi *stick-slip*.
3. Material UHMWPE dengan rasio kecepatan saat *stick-slip* akan mengalami keausan dengan mekanisme abrasif dan adhesif dengan arah keausan melingkar pada permukaan pin. Sedangkan untuk kondisi *uni-directional contact* maka spesimen benda uji akan mengalami keausan dengan mekanisme abrasive dengan arah keausan memotong permukaan pin.
4. Untuk material UHMWPE yang bergesekan banyak arah (*multi-directional contact*) dan juga mengalami kondisi *stick-slip* akan memiliki nilai keausan yang lebih tinggi hingga dapat mencapai 200% dibandingkan dengan spesimen benda uji yang hanya bergesekan satu arah (*uni-directional*).

5.2 Saran

Penelitian ini masih memiliki kekurangan, oleh karena itu penulis mempunyai beberapa saran, yaitu:

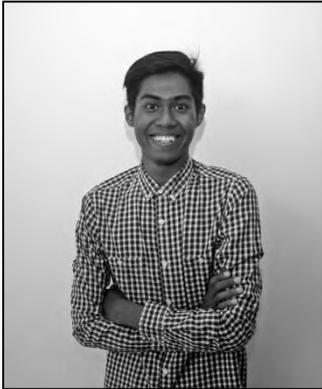
1. Pada penelitian ini digunakan alat tribometer dengan gerakan banyak arah yang masih butuh banyak perbaikan. Sehingga masih bisa dikembangkan dengan pembuatan alat yang lebih baik.
2. Untuk setiap penelitian sebaiknya kecepatan pin atau kecepatan disk jangan menggunakan rpm yang terlalu tinggi agar menghindari terjadinya permukaan spesimen yang meleleh akibat temperatur gesek yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrayodi, Grandika. 2016. **Studi Simulasi *Stick-Slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contact***. Unpublished.
- Archard, J.F. 1995. **Wear Control Handbook**. New York : ASME Centennial Research Project.
- Bhushan, Bharat. 2013. **Introduction to Tribology**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Bhushan, Bharat. 2001. **Modern Tribology Handbook Volume I. USA** : CRC Press.
- Bhushan, Bharat. 2013. **Principles and Applications of Tribology**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Czichos, Horst. 1978. **Tribology : A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear**. Amsterdam : Elsevier Scientific.
- Hasry, Muhammad. 2013. **Studi Eksperimental Keausan Permukaan Material Akibat Adanya *Multi-Directional Contact Friction***. Surabaya.
- Khonsari, M. Michael. 2001. **Applied Tribology : Bearing Design and Lubrication**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Kusumaningrum, Dewi Fasholi. 2015. **Studi Eksperimental dan Analisa Keausan Permukaan yang Dipengaruhi Oleh *Stick-Slip Friction* Akibat *Multi-Directional Contact Friction***. Surabaya.
- Lee, Dong Woog. 2012. **Stick-slip Friction and Wear of Articular Joints**. California.
- Ludema, C. Kenneth. 1996. **Friction, Wear, Lubrication : A Textbook in Tribology**. USA : CRC Press.
- Solichin, Moch. 2012. **Studi Eksperimental Laju Keausan (*Specific Wear Rate*) antara *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* Sebagai Sendi Lutut Buatan (*Total Knee Replacement Prosthesis*) Manusia**. Surabaya.

Yoon, S.W., M.W. Shin, W.G. Lee, H. Jang. 2012. **Effect of Surface Contact Conditions on the Stick–Slip Behavior of Brake Friction Material**. Amsterdam : Elsevier Scientific.

RIWAYAT PENULIS



Roy Yamsi Kurnia dilahirkan di Bontang, 19 Juni 1992, merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Yakub Usi Mambela dan Ibu Marsiana Toding. Penulis selama Penulis selama hidupnya telah menempuh pendidikan formal di TK VIDATRA Bontang, SD VIDATRA Bontang, SMP VIDATRA Bontang, dan SMA VIDATRA Bontang. Setelah tamat pendidikan SMA tahun 2010, penulis melanjutkan pendidikan tingkat sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya melalui jalur PKM (Program Kemitraan Mandiri) dengan pilihan pertama Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS.

Di jurusan Teknik Mesin ini penulis mengambil Bidang Studi Desain. Penulis juga aktif dalam berbagai kegiatan kemahasiswaan dan aktif sebagai pengurus di Himpunan Mahasiswa Mesin FTI-ITS. Pernah menjabat sebagai *Organizing Committee* POROS 2012, Staff Ahli Bidang Minat dan Bakat Organisasi Himpunan Mahasiswa Mesin Periode 2012-2013, *Chief of Security* kegiatan Mechanical City 2012. Penulis juga memperoleh beberapa prestasi dalam bidang minat dan bakat khususnya dalam bidang olahraga basket. Pernah menjuarai FTI *Olympic Games* 2012 dan 2013, *Runner up* Rektor Cup ITS 2013 serta pernah mengikuti event *campus league* 2011. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail di: royyamsikurnia@gmail.com