



TUGAS AKHIR - TM 091486

**STUDI EKSPERIMENTAL
KEAUSAN PERMUKAAN MATERIAL AKIBAT ADANYA
*MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION***

MUHAMMAD HASRY
NRP 2109 100 141

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

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM 091486

EXPERIMENTAL STUDY OF MATERIAL SURFACE'S WEAR EFFECTED BY MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION

MUHAMMAD HASRY
NRP 2109 100 141

Adviser Lecturer
Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Engineering Faculty
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

STUDI EKSPERIMENTAL KEAUSAN PERMUKAAN MATERIAL AKIBAT ADANYA *MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION*

Nama Mahasiswa : Muhammad Hasry
NRP : 2109100141
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf kaelani, M.Sc.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 keausan. Sampai saat ini, telah banyak dilakukan penelitian terkait keausan akibat gesekan satu arah dan gesekan dua arah, tetapi hanya sedikit yang mengkaji keausan akibat gesekan banyak arah (*multi-directional friction*), padahal tidak jarang suatu mekanisme mengakibatkan terjadinya *multi-directional contact friction*.

Penelitian diawali dengan pengambilan secara langsung data volume keausan menggunakan tribometer tipe *Pin-on-disk* dengan material *Ultra high molecular weight polyethylene* (UHMWPE) sebagai pin uji dan *Stainless steel* sebagai disk. Pada pengujian keausan, masing-masing pin dan disk akan bergerak rotasi dan saling kontak permukaan sehingga tercipta gesekan ke arah yang berubah-ubah pada permukaan material. Secara garis besar penelitian dilakukan dalam 2 macam, yaitu penelitian keausan akibat gesekan tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan dengan pelumasan (*wet sliding*), dimana masing-masing pengujian diberikan variabel uji yang sama; yaitu pin digesekkan dengan jarak 600 meter, pembebanan statis sebesar 39.2 N, dengan 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 sehingga dapat dianalisa bagaimana mekanisme keausan

dari material tersebut, sedangkan data hasil pengujian diolah sehingga diketahui laju keausan (*wear rate*) dari spesimen uji. Sebagai data pembanding, diambil juga data volume keausan akibat dari gesekan satu arah, yaitu dengan menggerakkan disk secara rotasi sedangkan pin hanya mengalami pembebanan dan tidak bergerak sama sekali.

Hasil dari penelitian yang telah dilakukan 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.

Kata kunci : Multi-directional, Friction, Rasio Kecepatan, Wear Rate

**EXPERIMENTAL STUDY OF
MATERIAL SURFACE'S WEAR EFFECTED BY
MULTI-DIRECTIONAL CONTACT FRICTION**

Student Name : **Muhammad Hasry**
NRP : **2109100141**
Department : **Teknik Mesin FTI-ITS**
Adviser Lecturer : **Ir. Yusuf kaelani, M.Sc.E**

Abstrack

Two or more objects that moving relative in contact surface will generate friction forces that may causing damage called wear. Until now, have many research related wear as a result by one-directional and two-directional friction, but only a few research related wear as a result by multi-directional friction. Whereas, it is not a few mechanism have multi-directional contact friction.

The research begins by taking the wear volume data directly using Pin-on-Disc Tribometer, with the Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) as a test pin and stainless steel as a disc. In wear testing, each pin and the disc will moving rotations and doing surface contact each other so that created friction's changeable direction on surface of the material. Generally, the research was conducted in two kinds, research of wear due to friction without lubrication (dry sliding) and with lubrication (wet sliding), where each test is given the same test variables, ie pin rubbed with a distance of 600 meters, static loading of 39.2 N, with 3 variations of the speed ratio between the pin and the disk, ie, at 6.7, 10.7 and 16.5. Further, specimens were tested is observed the surface structure using an optical microscope with a magnification of 100 times so it can be analyzed how the mechanism of the material's wear, while the data is processed so that the test results are known specific wear rate of the test specimen. As comparative data, the wear volume

data of the wear as a result by one-directional friction is also taken, namely by moving disk rotation while the pin only have load and does not rotate at all.

From the results of the research, we can say that the Multi-Directional Friction will result in greater wear than the Uni-Directional Friction. Friction material to undergo multi-direction with static loading of 39.2 N and the instantaneous velocity varying from zero to 19.546 m/min, will wear with abrasion mechanism. Based on the research note also that the presence of lubricant major influences in reducing wear .

Keywords : Multi-Directional, Friction, Speed Ratio, Wear Rate

**STUDI EKSPERIMENTAL KEAUSAN PERMUKAAN
MATERIAL AKIBAT ADANYA *MULTI-
DIRECTIONAL CONTACT FRICTION***

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 :

Muhammad Hasry
Nrp. 2109 100 141

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E (Pembimbing)
NIP. 196511031990021001
2. Ir. Yunarko Triwinarno, MT (Penguji I)
NIP. 195106031976031002
3. Ir. J. Lubi (Penguji II)
NIP. 194802201976031001
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT (Penguji III)
NIP. 197004121997032003

SURABAYA
Januari, 2014

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah...

Segala puji hanya milik Allah, *Rabb* semesta alam, pencipta langit dan bumi dan segala yang ada diantaranya, yang atas izin, rahmat dan kehendakNya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Eksperimental Keausan Permukaan Material Akibat Adanya *Multi-Directional Contact Friction*”.

Laporan Tugas Akhir ini sejatinya disusun sebagai salah satu syarat untuk dapat menyelesaikan studi dengan manis pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan banyak terimakasih kepada :

1. *Amang dainang* (Ayahanda dan Ibunda) yang senantiasa mendo'akan ananda dalam perjuangan menempuh pendidikan di rantau orang.
2. Bapak Yusuf Kaelani, selaku guru yang telah dengan sabar membimbing dan berbagi ilmu selama penulis melakukan penelitian.
3. Bapak Yunarko, Bapak Lubi serta Ibu Wiwiek yang dengan rasa percayanya telah memberikan kelulusan dan gelar Sarjana Teknik (ST) kepada penulis. Terimakasih juga atas nasehat dan saran yang telah diberikan kepada.
4. Bapak Triyogi dan Bapak Probo, selaku Rektor yang menjabat selama penulis menempuh pendidikan S1 di ITS.
5. Bapak Herman dan Bapak Pramujati, selaku Kepala Jurusan yang menjabat selama penulis menempuh pendidikan S1 di Teknik Mesin.
6. Bapak Harus, selaku Dosen Wali yang begitu rajin memantau perkembangan studi penulis.

7. Ibu Wiwiek, selaku Kasie Proposal dan Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberi arahan dalam pelaksanaan penelitian penulis.
8. Segenap Dosen / Tenaga Pengajar yang telah berbagi ilmu selama penulis menempuh pendidikan S1 di ITS.
9. Segenap Karyawan dan Staf Administrasi ITS yang telah bersedia melancarkan setiap keperluan penulis.
10. Bapak Sarosa dan Cak Goeng yang dengan hati terbuka telah bersedia memberi bantuan dalam pembuatan alat penelitian penulis.
11. Abang-abang, kakak-kakak juga teman-teman *par Posniroha*, bang Ilman, bang Topik, bang Cikwan, bang Ali, bang Duon, bang Dodi, kak Ria bang Anggi, bang Jack, Juhti, Imam, Kawi, Rudi, Aris, Fiqih, Fadli serta semuanya yang teramat banyak membantu perkembangan jiwa dan raga penulis.
12. Saudara dan saudari Alkamil 09, terutama kepada teman sepengembaraan, Mamatz, Cak Noer, Ichal juga Fery. Semoga secepatnya kita semua sama-sama memperoleh akhir yang bahagia sepulang dari rantau orang.
13. Mas Solichin, mas Susastro, mbak Deplox, mbak Femmy, mas Ghofar dan mas Tegar yang telah banyak membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
14. Teman-teman seperjuangan angkatan M52 yang tidak terlukiskan lagi dengan kata-kata bagaimana jasa kalian padaku sobat. Dan kepada kaum mayoritas, penulis sampaikan *Ayo ndang lulus ndang sukses masbro...mbak sist...*
15. Teman-teman Lab Desain, Hadid, Agung, Rasya, Tomi, Jamez Blink, Bapink, Mat, Hage, Opank, Jatmiko, Cak Gun, Tito, Adam, Samid, Enggar, Taufan, Nanang. Maaf jika ada yang terlupa ya... hehe
16. Teman-teman Lab Perpan, Senna, Yadik, Bagus, Sheli, Dharmo, Daniel, Ari, Ipink, Petruk. Maaf juga jika ada yang terlupa ya... hehe

17. Lab TPBB dan Sapu angin, yang telah meminjamkan berbagai peralatan untuk keperluan penelitian penulis.
18. Setiap insan yang telah mendukung dan mendo'akan kami dalam diam.
19. Sosok misterius yang selalu menjadi penghuni hati.
20. Dan setiap pihak-pihak yang tidak sempat kami sebutkan.

Jika kiranya selama menempuh pendidikan di ITS, penulis pernah melakukan kecurangan, baik itu mencontek, *mbacem*, berbohong, titip absen ataupun bentuk kecurangan yang lain, pada kesempatan ini penulis menyampaikan maaf yang sebesar-besarnya kepada setiap pihak yang terkait. Akhir kata, kami menyampaikan bahwa hati kami akan senantiasa terbuka untuk menerima setiap kritik dan saran.

Assalamu'alaykum warohmatullohi wabarokatuh..

Surabaya, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

Judul	i
Lembar Pengesahan.....	iii
Abstrak	iv
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.1.1 Pengujian Keausan Material <i>High Density Polyethylene</i> (HDPE)	5
2.1.2 Pengujian Keausan <i>Ultra High Molecular Weight Polyethylene</i> (UHMWPE) Terhadap <i>Stainless Steel</i>	8
2.2 Gesekan	11
2.3 Keausan (<i>Wear</i>)	13
2.3.1 Mekanisme Keausan (<i>Wear Mechanism</i>).....	13
1. Keausan Adhesif (<i>Adhesive Wear Mechanism</i>)	14
2. Keausan Abrasif (<i>Abrasive Wear Mechanism</i>)	15
3. Keausan Lelah (<i>Fatigue Wear Mechanism</i>)	16

4. Keausan Korosif (<i>Corrosive Wear Mechanism</i>)	17
2.3.2 Perhitungan Volume Aus Material	19
1. Metode Keausan Adhesif	19
2. Metode Keausan Abrasif	21
2.4 Pelumas.....	22
a. Tugas pokok.....	22
b. Tugas tambahan.....	22
2.5 <i>Polyethylene</i> (Polietilena).....	23
1. Polietilena bermassa molekul sangat tinggi (<i>Ultra high molecular weight polyethylene</i>) (UHMWPE)	24
2. Polietilena berdensitas tinggi (<i>High density polyethylene</i>) (HDPE)	24
3. Polietilena "cross-linked" (<i>Cross-linked polyethylene</i>) (PEX atau XLPE)	24
4. Polietilena berdensitas menengah (<i>Medium density polyethylene</i>) (MDPE).....	25
5. Polietilena berdensitas rendah (<i>Low density polyethylene</i>) (LDPE).....	25
6. Polietilena linier berdensitas rendah (<i>Linear low density polyethylene</i>) (LLDPE)	25
7. Polietilena berdensitas sangat rendah (<i>Very low density polyethylene</i>) (VLDPE).....	25
2.6 Analisa Kinematika <i>Multi-Directional Motion</i>	26
BAB III METODOLOGI	31
3.1 Metode dan Urutan Pelaksanaan Penelitian.....	31
3.2 Persiapan Alat Uji, Tribometer Tipe <i>Pin On Disk</i>	32
1. Modifikasi tribometer	32
2. Kalibrasi peralatan.....	35

3.3 Analisa Kinematika Kontak	37
3.4 Penentuan Variabel Uji	41
3.5 Persiapan Spesimen Uji.....	42
1. Persiapan material	42
2. Penimbangan	45
3.6 Pengambilan Data Penelitian.....	46
3.7 Pengamatan Struktur Permukaan Spesimen Uji.....	48
3.8 Pengolahan Data Penelitian dan Analisa Hasil Pengujian	50
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Kinematika Kecepatan Pada <i>Multi-Directional Contact Friction</i>	53
4.2 Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Tanpa Pelumas	57
4.2.1 Analisa Laju Keausan.....	57
4.2.2 Analisa Permukaan Kontak.....	61
4.3 Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Berpelumas	66
4.3.1 Analisa Laju Keausan.....	66
4.3.2 Analisa Permukaan Kontak	70
4.4 Perbandingan Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Tanpa Pelumas Dengan Berpelumas	72
4.5 Perbandingan Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Dengan Akibat Gesekan Satu Arah.....	74
BAB V KESIMPULAN	79
DAFTAR PUSTAKA	81
BIODATA PENULIS	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model Pengujian Yang Dilakukan Susastro	5
Gambar 2.2 Hasil Penelitian Susastro Untuk Pengujian <i>Dry Sliding</i> Dan <i>Wet Sliding</i>	6
Gambar 2.3 Foto Mikro Permukaan Spesimen Uji (HDPE) Dengan Pembesaran 100x.....	7
Gambar 2.4 Model Pengujian Yang Dilakukan Solichin	8
Gambar 2.5 Grafik Hubungan <i>Specific Wear Rate</i> Dengan <i>Load</i> Pada Dua <i>Speed Control</i> Yang Berbeda Kondisi <i>Lubrication</i>	9
Gambar 2.6 Grafik Hubungan <i>Specific Wear Rate</i> Antara <i>Dry Sliding</i> Dengan <i>Lubrication</i> Pada Kecepatan 0,13 m/s.....	10
Gambar 2.7 Kontak <i>Asperities</i> Antara 2 Buah Permukaan Benda Padat	11
Gambar 2.8 <i>Free Body Diagram</i> Dua Benda Padat Yang Sedang Bergesekan.....	12
Gambar 2.9 Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Adhesif (<i>H. Czichos, 1978</i>)	14
Gambar 2.10 Mekanisme keausan Adhesif (<i>H. Czichos, 1978</i>)..	15
Gambar 2.11 Pengamatan <i>Micrographs</i> Keausan Abrasif (<i>H. Czichos, 1978</i>)	16
Gambar 2.12 Mekanisme Keausan Abrasif (<i>H. Czichos, 1978</i>)..	16
Gambar 2.13 Keausan Lelah Pada <i>Ball Bearing</i> (<i>H. Czichos, 1978</i>).....	17
Gambar 2.14 Mekanisme Keausan Lelah (<i>H. Czichos, 1978</i>).....	17
Gambar 2.15 Keausan Korosif Pada Baja (<i>H. Czichos, 1978</i>)....	18
Gambar 2.16 Mekanisme Keausan Korosif (<i>H. Czichos, 1978</i>) .	18

Gambar 2.17 Hipotesis Model Partikel Setengah Bola Yang Bergesekan Pada Saat <i>Sliding</i>	19
Gambar 2. 18 Model Keausan Abrasif oleh <i>Indentor</i> Berbentuk Kerucut	21
Gambar 2.19 Perubahan Posisi Titik P dan Titik Pusat Pin Pada Disk Sepanjang Waktu (Skala Dalam mm)	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.2 Visualisasi 3D Tribometer Tipe <i>Pin On Disk</i> Sebelum Dimodifikasi	33
Gambar 3.3 Hasil Modifikasi Bagian Tribometer	33
Gambar 3.4 Kalibrasi Pembebanan	35
Gambar 3.5 Kalibrasi Kecepatan (a) Putaran Pin, dan (b) Putaran Disk.....	36
Gambar 3.6 Perubahan Posisi Titik P dan Titik Pusat Pin Pada Disk Sepanjang Waktu (Skala Dalam mm) untuk variabel pengujian (a) ω pin = 0 (b) ω pin = 6.7x ω disk (c) ω pin = 10.7x ω disk (d) ω pin = 16.5x ω disk.....	39
Gambar 3.7 Perubahan Posisi Titik P Jika Berada Pada Lintasan Lurus	40
Gambar 3.8 Dimensi Pin Spesimen.....	42
Gambar 3.9 pin yang digunakan dalam pengujian	43
Gambar 3.10 Dimensi Disk Spesimen	43
Gambar 3.11 Disk Yang Digunakan Dalam Pengujian.....	44
Gambar 3.12 Timbangan Digital	45
Gambar 3.13 Gambar Mikroskop Optis	48
Gambar 3.14 Foto Mikro Permukaan Pin Spesimen Sebelum Dilakukan Pengujian Keausan, Dengan Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x (d) 500x	50

Gambar 4.1 Vektor Kecepatan Titik Tinjau P Dari Waktu Ke Waktu Pada Pengujian Dengan Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5.....	56
Gambar 4.2 Grafik Perubahan Laju Keausan Terhadap Perubahan Rasio Kecepatan Antara Pin Dan Disk	60
Gambar 4.3 Foto Mikro Permukaan Spesimen Dengan Perbesaran 100x Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5	64
Gambar 4.4 Grafik Perubahan Laju Keausan Terhadap Perubahan Rasio Kecepatan Antara Pin Dan Disk Dengan Kondisi Pengujian Berpelumas.....	69
Gambar 4.5 Foto Mikro Permukaan Spesimen Dengan Perbesaran 100x Setelah Dilakukan Pengujian Berpelumas Untuk Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5	71
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Laju Keausan (<i>Specific Wear Rate</i>) Dengan Kondisi Tanpa Pelumas Dengan Berpelumas	73
Gambar 4.7 Grafik Perbandingan Laju Keausan Akibat Gesekan Satu Arah Dengan Akibat Gesekan Banyak Arah ..	76

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Hasil kalibrasi kecepatan putaran pin dengan variasi pembebanan (<i>load</i>).....	36
Tabel 3.2 Hasil kalibrasi kecepatan putaran disk dengan variasi <i>speed control</i>	37
Tabel 3.3 Variabel uji untuk setiap variasi pengujian	41
Tabel 3.4 Data hasil pengujian	46
Tabel 4.1 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Kurang Dari 10 (Rasio = 6.7 → ω Disk = 59.2 rpm)....	58
Tabel 4.2 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Berada Diantara 10 dan 15 (Rasio = 10.7 → ω Disk = 37.5 rpm).....	58
Tabel 4.3 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Lebih Dari 15 (Rasio = 16.5 → ω Disk = 24.4 rpm) ...	58
Tabel 4.4 Hasil Pengolahan Data Pengujian Berpelumas Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Kurang Dari 10 (Rasio = 6.7 → ω Disk = 59.2 rpm).....	67
Tabel 4.5 Hasil Pengolahan Data Pengujian Berpelumas Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Berada Diantara 10 dan 15 (Rasio = 10.7 → ω Disk = 37.5 rpm).....	67
Tabel 4.6 Hasil Pengolahan Data Pengujian Berpelumas Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Lebih Dari 15 (Rasio = 16.5 → ω Disk = 24.4 rpm).....	67

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Gesekan Satu Arah Tanpa Pelumas Dengan Kecepatan Disk = 37.5 rpm	75
Tabel 4.8 Hasil Pengujian Gesekan Satu Arah Berpelumas Dengan Kecepatan Disk = 37.5 rpm	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dua buah atau lebih benda yang mengalami kontak dan bergerak relatif satu sama lain akan menimbulkan gaya gesek. Bentuk dan arah gesekan yang ditimbulkan tergantung bagaimana profil, dimensi dan arah gerak dari masing-masing benda. Jika ditinjau dari arah geseknya, gesekan dapat berupa gesekan satu arah (*one-directional friction*), dua arah (*bi-directional friction*) ataupun banyak arah (*multi-directional friction*).

Adanya gesekan akan menyebabkan terjadinya kerusakan berupa hilangnya material dari permukaan benda, yang dinamakan keausan. Keausan yang lebih besar akan terjadi pada benda yang kekerasannya lebih rendah. Berbagai faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan gerak, besarnya beban, profil permukaan serta kekerasan (*hardness*) dari material itu sendiri. Gesekan antar permukaan juga akan menimbulkan panas yang juga mempengaruhi keausan, karena dalam kajian material disebutkan bahwa kekerasan material akan berkurang seiring meningkatnya temperatur. Dampak dari gesekan antara dua material bisa dikurangi dengan memberikan pelumasan pada permukaan benda yang mengalami kontak.

Sampai saat ini, telah banyak dilakukan penelitian terkait keausan akibat *one-directional friction* dan *bi-directional friction*, tetapi sangat jarang yang mengkaji keausan akibat *multi-directional friction*, padahal tidak jarang suatu mekanisme mengakibatkan terjadinya *multi-directional friction*. Gesekan banyak arah dapat ditemukan misalnya pada ban mobil saat melakukan *drifting*, pada *ball joint* seperti pada spion kendaraan, juga dapat ditemukan pada berbagai persendian tubuh, seperti

sendi rahang dan sendi lengan. Untuk itulah perlu dilakukan penelitian terkait keausan akibat gesekan banyak arah (*multi-directional friction*).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh *multi-directional contact friction* terhadap keausan benda
2. Bagaimana mekanisme keausan benda yang mengalami *multi-directional contact friction*.

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mengetahui bagaimana pengaruh *multi-directional contact friction* terhadap keausan benda
2. Mengetahui bagaimana mekanisme keausan benda yang mengalami *multi-directional contact friction*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. *Multi-directional motion* merupakan hasil kombinasi dari dua buah *rotational motion*
2. Material yang diuji adalah *Ultra high molecular weight polyethylene* (UHMWPE) terhadap *Stainless steel*
3. Variabel pengujian yang digunakan adalah tiga buah rasio kecepatan antara kecepatan putar pin terhadap kecepatan putar disk; yaitu sebesar 6.7, 10.7 dan 16.5

4. Disk dan pin berputar dengan kecepatan yang konstan
5. Pembebanan (*load*) dianggap *uniform* pada pin
6. Tidak ada partikel pengotor diantara permukaan pin dan disk yang mengalami kontak selama dilakukan pengujian
7. Pelumas yang digunakan adalah *Singer oil*, sebuah pelumas dengan kode viskositas ISO-VG 15, dengan *kinematic viscosity* antara 13.5 sampai 16.5 mm²/s (cSt) pada temperatur 40⁰C.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat memprediksi umur dari dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesekan
2. Dapat mengetahui pengaruh variasi rasio kecepatan terhadap keausan dua buah benda berputar yang permukaannya saling bergesekan.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

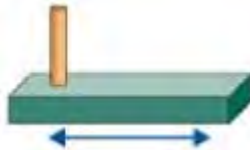
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

2.1.1 Pengujian Keausan Material *High Density Polyethylene* (HDPE)

Susastro, 2013, melakukan kajian tribologi dalam tugas akhirnya yang berjudul “Study Eksperimental Laju Keausan Pada 2 Buah *High Density Polyethylene* (HDPE) Dengan Variasi *Normal Load* Pada Kondisi *Reciprocating* Sebagai Sendi Rahang (*Temporomandibular Joint*) Manusia”. Pada penelitiannya dilakukan pengujian secara eksperimental untuk menguji keausan antara 2 HDPE yang saling kontak secara bolak-balik. Model pengujian yang dilakukan Susastro seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.

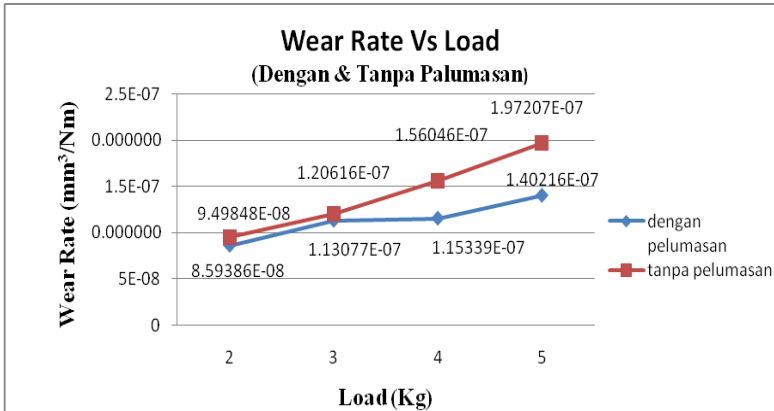


Gambar 2.1 Model Pengujian Yang Dilakukan Susastro

Pada Gambar 2.1 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Susastro, dimana pin berwarna kuning berada dalam posisi diam dengan pembebanan ke arah bawah, sedangkan plat berwarna hijau bergerak translasi bolak balik (*reciprocating*). Secara garis besar pada penelitian ini dilakukan dua macam pengujian, yaitu pengujian tanpa pelumasan (*dry sliding*) dan dengan pelumasan (*wet sliding*). Masing-masing spesimen uji diberikan jarak tempuh gesekan yang sama, yaitu sejauh 800

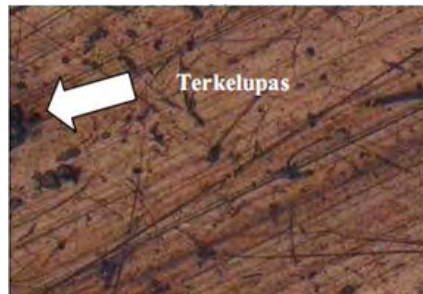
meter, kecepatan sliding 0,0893 m/s dan 4 variasi pembebanan (2 kg hingga 5 kg).

Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Susastro.



Gambar 2.2 Hasil Penelitian Susastro Untuk Pengujian *Dry Sliding* Dan *Wet Sliding*

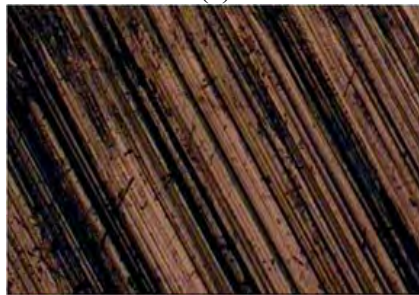




(b)



(c)



(d)

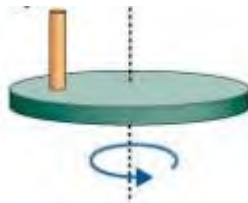
Gambar 2.3 Foto Mikro Permukaan Spesimen Uji (HDPE)
Dengan Pembesaran 100x

- (a) Pembebanan 2 kg, *Dry Sliding*
- (b) Pembebanan 5 kg, *Dry Sliding*
- (c) Pembebanan 2 kg, *Wet Sliding*
- (d) Pembebanan 5 kg, *Wet Sliding*

Pada penelitian tersebut, berdasarkan data seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2, Susastro mengambil berbagai kesimpulan, yaitu peningkatan beban akan meningkatkan laju keausan dan pemberian pelumasan pada gerakan *reciprocating* mampu memperkecil laju keausan antara 5% hingga 50%. Dengan melihat gambar 2.3 Susastro mengatakan bahwa keausan yang terjadi pada pengujian *dry sliding* terjadi dengan mekanisme keausan *adhesive*, sementara keausan yang terjadi pada pengujian *wet sliding* terjadi dengan mekanisme keausan *abrasive*.

2.1.2 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 2.4.

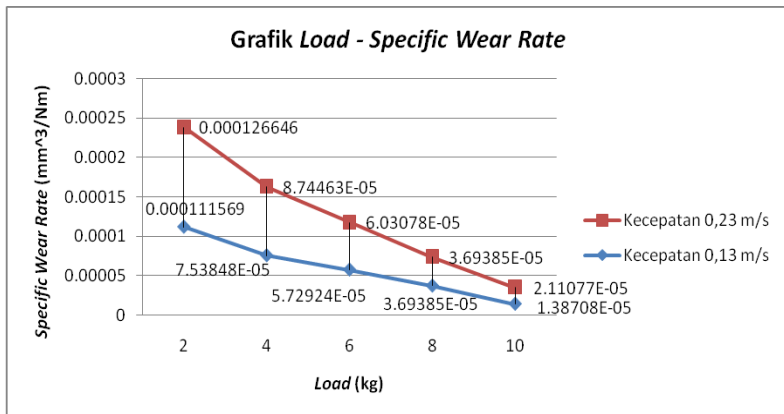


Gambar 2.4 Model Pengujian Yang Dilakukan Solichin

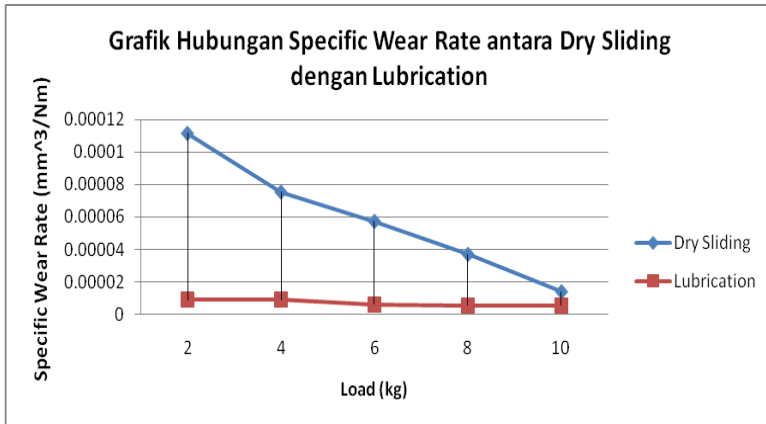
Pada Gambar 2.4 dapat dilihat model pengujian yang dilakukan oleh Solichin, dimana pin berwarna kuning berada dalam posisi diam dengan pembebanan statis ke arah bawah,

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 variasi pembebanan adalah 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg dan 10 kg.

Berikut adalah hasil dari pengujian keausan yang dilakukan Solichin.



Gambar 2.5 Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* Dengan *Load* Pada Dua *Speed Control* Yang Berbeda Kondisi *Lubrication*



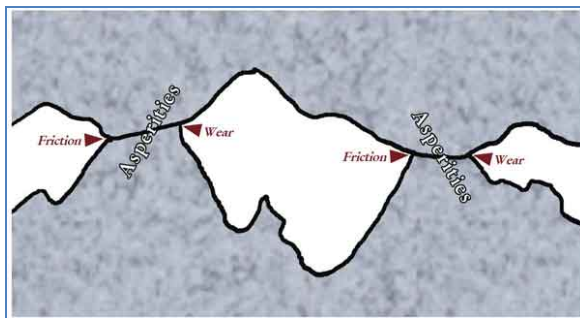
Gambar 2.6 Grafik Hubungan *Specific Wear Rate* Antara *Dry Sliding* Dengan *Lubrication* Pada Kecepatan 0,13 m/s

Dari hasil penelitian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5, 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 2.6 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*.

2.2 Gesekan

Gaya gesek adalah gaya yang mempunyai arah yang berlawanan dengan arah gerak benda atau arah kecenderungan benda akan bergerak. Gaya gesek muncul apabila dua buah benda bersentuhan. Benda-benda yang dimaksud disini tidak harus berbentuk padat, melainkan dapat pula berbentuk cair, ataupun gas. Gaya gesek antara dua buah benda padat misalnya adalah gaya gesek statis dan kinetis, sedangkan gaya antara benda padat dan cairan serta gas adalah gaya *Stokes*. Ketika benda yang permukaannya sedang mengalami kontak bergerak relatif satu sama lain, gesekan antara dua permukaan akan mengubah energi kinetik menjadi panas.

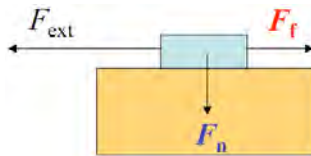
Dalam studi material atau biasa disebut *material science* diketahui bahwa pada permukaan logam yang sekalipun terlihat sangat mulus ternyata memiliki *asperities* atau permukaan yang kasar bila dilihat dalam skala mikroskopis, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Pada keadaan dua logam yang bergesekan, *asperities* inilah yang menimbulkan pergesekan serta keausan.



Gambar2.7 Kontak *Asperities* Antara 2 Buah Permukaan Benda Padat

Terdapat dua jenis gaya gesek antara dua buah benda padat yang saling bergerak lurus, yaitu gaya gesek statis dan gaya gesek kinetis.

Gaya gesek statis merupakan gaya akibat adanya gesekan antara dua benda padat yang tidak bergerak relatif satu sama lainnya. Sebagai contoh, gesekan statis dapat mencegah benda meluncur ke bawah pada bidang miring. Koefisien gesek statis umumnya dilambangkan dengan μ_s . Gaya gesek statis dihasilkan dari sebuah gaya yang diaplikasikan tepat sebelum benda yang bersentuhan bergerak. Gaya gesek maksimum antara dua permukaan sebelum gerakan terjadi adalah hasil dari koefisien gesek statis dikalikan dengan gaya normal $F_f = \mu_s F_n$. Ketika tidak ada gerakan yang terjadi, gaya gesek dapat memiliki nilai dari nol hingga gaya gesek maksimum.



Gambar 2.8 *Free Body Diagram* Dua Benda Padat Yang Sedang Bergesekan

Pada Gambar 2.8 dapat dilihat gaya-gaya yang terdapat pada dua benda padat yang sedang melakukan kontak. Setiap gaya luar (F_{ext}) yang lebih kecil dari gaya gesek (F_f) maksimum yang berusaha untuk menggerakkan salah satu benda akan dilawan oleh gaya gesek yang setara dengan besar gaya luar tersebut, namun dengan arah yang berlawanan. Sedangkan setiap gaya luar yang lebih besar dari gaya gesek maksimum akan menyebabkan gerakan terjadi. Setelah gerakan terjadi, gaya gesek statis tidak lagi dapat digunakan untuk menggambarkan kinetika benda, sehingga digunakan gaya gesek kinetis.

Gaya gesek kinetis (atau dinamis) terjadi ketika dua benda bergerak relatif satu sama lainnya dan saling bergesekan. Koefisien gesek kinetis umumnya dilambangkan dengan μ_k dan pada umumnya selalu lebih kecil dari koefisien gaya gesek statis untuk material yang sama.

Gaya gesek dapat merugikan juga bermanfaat. Gaya gesek dapat bermanfaat karena tanpanya manusia tidak akan dapat berpindah tempat disebabkan gerakan kaki yang hanya akan menggelincir di atas lantai, juga tanpa adanya gaya gesek mobil tidak akan dapat bergerak disebabkan ban mobil yang hanya akan slip terhadap jalan. Gaya gesek dapat merugikan karena dapat menyebabkan panas dan aus pada poros yang berputar.

Berbagai cara dapat dilakukan dalam mengurangi gesekan. Penggunaan perangkat seperti *ball bearing* dapat mengubah gesekan tipe *sliding* menjadi gesekan tipe *rolling* sehingga gaya gesek yang dihasilkan menjadi lebih kecil. Penggunaan pelumas juga merupakan salah satu cara yang umum digunakan dalam mengurangi gesekan karena adanya pelumas akan menghindarkan terjadinya kontak langsung antara permukaan benda padat.

2.3 Keausan (*Wear*)

Keausan dapat didefinisikan sebagai hilang atau berpindahnya material dari posisi semula pada permukaan benda padat yang mengalami kontak. 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.

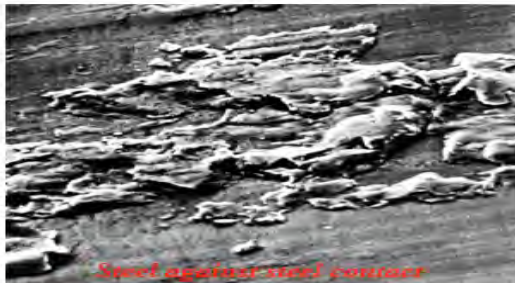
2.3.1 Mekanisme Keausan (*Wear Mechanism*)

Ada 4 jenis mekanisme dasar dari keausan.

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

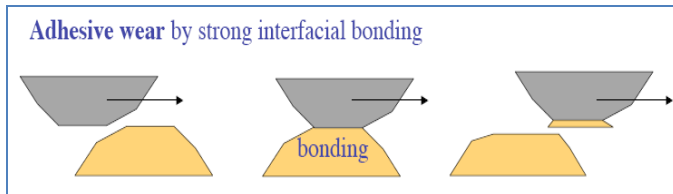
1. Keausan Adhesif (*Adhesive Wear Mechanism*)

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 adhesi dari material lebih tinggi dari sifat kohesinya, akan terjadi pengurangan materi pada permukaan, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan mekanismenya pada Gambar 2.10.



H. Czichos, *Tribology*, Springer 1978

Gambar 2.9 Pengamatan *Micrographs* Keausan Adhesif (H. Czichos, 1978)

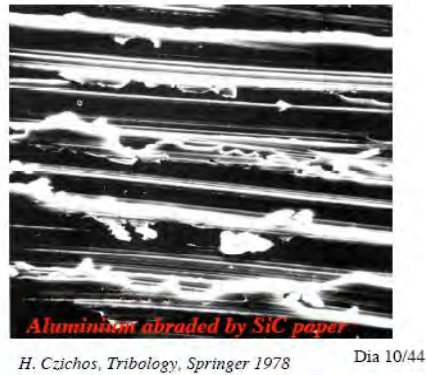


Gambar 2.10 Mekanisme keausan Adhesif (*H. Czichos, 1978*)

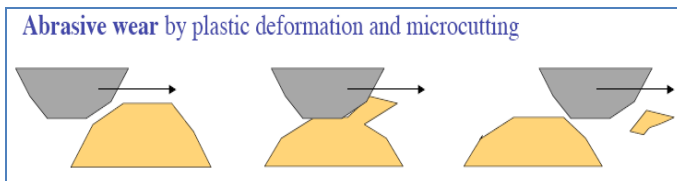
Faktor yang menyebabkan terjadinya keausan adhesif antara lain kontaminasi permukaan dan terjadinya ikatan (*bonding*) antar molekul pada material, yaitu ikatan ion, kovalen, ikatan logam, atau ikatan *van der Waals* dari material yang bergesekan.

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 2.11, sedangkan mekanisme keausannya seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar2.11 Pengamatan *Micrographs* Keausan Abrasif (*H. Czichos, 1978*)



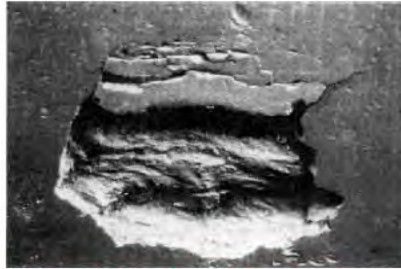
Gambar 2.12 Mekanisme Keausan Abrasif (*H. Czichos, 1978*)

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

3. Keausan Lelah (*Fatigue Wear Mechanism*)

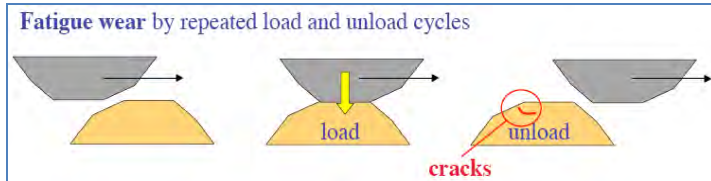
Keausan lelah pada material disebabkan pemberian beban secara berulang selama terjadinya gesekan antar permukaan material. *Fatigue* hanya akan terjadi jika beban yang diterima material lebih besar dari *fatigue strength* dari material itu sendiri. Keausan lelah diawali dengan pembentukan retak-retak 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 2.13 menunjukkan kegagalan lelah yang terjadi pada *ball bearing* dan Gambar 2.14 menunjukkan mekanisme dari keausan lelah.



Fatigue failure of a steel ball bearing

Gambar 2.13 Keausan Lelah Pada *Ball Bearing* (H. Czichos, 1978)



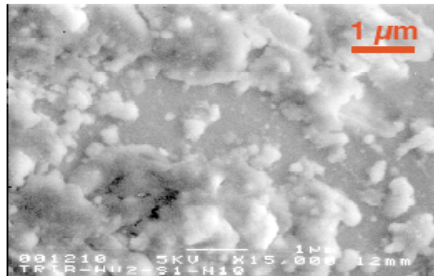
Gambar 2.14 Mekanisme Keausan Lelah (H. Czichos, 1978)

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*)

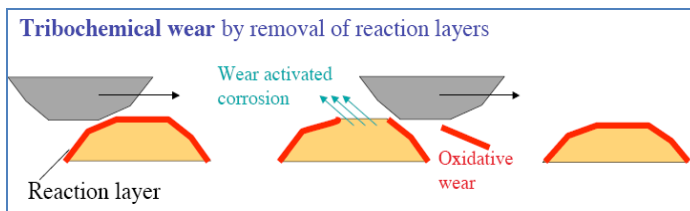
Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh faktor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada

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.



Agglomerated oxide particles after wear of a passive steel.

Gambar 2.15 Keausan Korosif Pada Baja (*H. Czichos, 1978*)



Gambar 2.16 Mekanisme Keausan Korosif (*H. Czichos, 1978*)

Pada Gambar 2.15 dapat dilihat permukaan baja yang mengalami keausan korosif sedangkan Gambar 2.16 menunjukkan mekanisme keausan korosif.

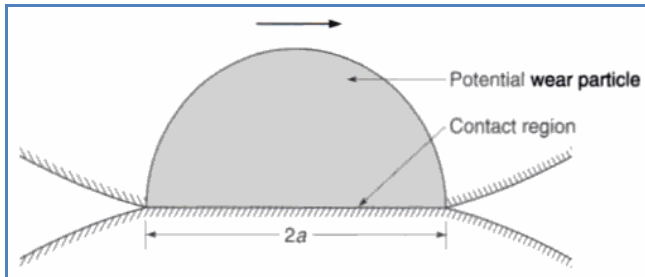
2.3.2 Perhitungan Volume Aus Material

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

1. Metode Keausan Adhesif

Gambar 2.17 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 2.17, maka volume keausan dari partikel yang berbentuk setengah bola adalah :

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



Gambar 2.17 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 mensubstitusi persamaan (2.3) pada persamaan (2.2) akan diperoleh :

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

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 :

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

Persamaan (2.5) biasa disebut sebagai persamaan Archard, dimana K_{ad} disebut koefisien keausan untuk keausan adhesif. 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).

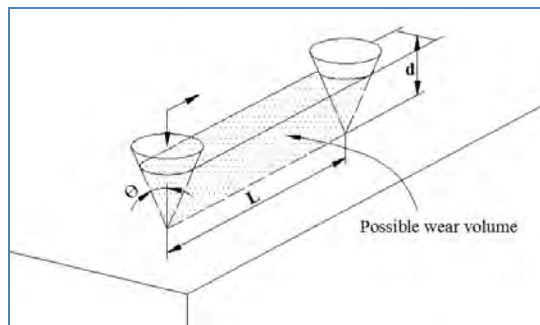
Dalam *text book "Friction, wear, Lubrication"* oleh Kenneth C Ludema persamaan Archard dapat juga dituliskan sebagai berikut :

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

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 2.18 dibawah.



Gambar 2.18 Model Keausan Abrasif Oleh Indentor Berbentuk Kerucut

Berdasarkan model, volume keausan V yang disebabkan indentor 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 $\frac{1}{2} \cdot \pi \cdot (d \cdot \tan \theta)^2$ 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 :

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

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

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

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

2.4 Pelumas

Pelumas adalah zat kimia, dapat berupa zat padat ataupun cair, yang diberikan diantara dua benda bergerak untuk mengurangi gaya gesek. Pelumas berfungsi sebagai lapisan pelindung yang memisahkan dua permukaan yang berhubungan. Pelumas cair secara umum terdiri dari 90% minyak dasar dan 10% zat tambahan. Fungsi dari cairan pelumas dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Tugas pokok

Pada dasarnya yang menjadi tugas pokok pelumas adalah mencegah atau mengurangi keausan sebagai akibat dari kontak langsung antara permukaan logam yang satu dengan permukaan logam lain yang terus menerus bergerak.

b. Tugas tambahan

Selain mempunyai tugas pokok, pelumas juga berfungsi sebagai penghantar panas. Pada mesin atau peralatan dengan

kecepatan putaran tinggi, panas akan timbul pada bantalan bantalan sebagai akibat dari adanya gesekan yang banyak. Dalam hal ini pelumas berfungsi sebagai penghantar panas dari bantalan untuk mencegah peningkatan temperatur atau suhu mesin.

Suhu yang tinggi akan merusak daya lumas. Apabila daya lumas berkurang, maka gesekan akan bertambah dan selanjutnya panas yang timbul akan semakin banyak sehingga suhu terus bertambah. Akibatnya pada bantalan bantalan tersebut akan terjadi kemacetan yang secara otomatis mesin akan berhenti secara mendadak. Oleh karena itu, mesin atau peralatan dengan kecepatan tinggi digunakan pelumas yang titik cairnya tinggi, sehingga walaupun pada suhu yang tinggi pelumas tersebut tetap stabil dan dapat melakukan pelumasan dengan baik.

(Wikipedia.org)

2.5 Polyethylene (Polietilena)

Polietilena (disingkat PE) atau dalam IUPAC disebut Polietena adalah polimer yang terdiri dari rantai panjang monomeretilena (dalam IUPAC disebut etena). Di industri polimer, polietilena ditulis dengan singkatan PE.

Molekul etena C_2H_4 adalah $CH_2=CH_2$. Dua grup CH_2 bersatu dengan ikatan ganda. Polietilena dibentuk melalui proses polimerisasi dari etena. Polietilena bisa diproduksi melalui proses polimerisasi radikal, polimerisasi adisi anionik, polimerisasi ion koordinasi, atau polimerisasi adisi kationik. Setiap metode menghasilkan tipe polietilena yang berbeda.

Polietilena terdiri dari berbagai jenis berdasarkan kepadatan dan percabangan molekul. Sifat mekanis dari polietilena bergantung pada tipe percabangan, struktur kristal, dan berat molekulnya.

1. Polietilena bermassa molekul sangat tinggi (*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. Polietilena berdensitas tinggi (*High density polyethylene*) (HDPE)

HDPE dicirikan dengan densitas yang melebihi atau sama dengan 0.941 g/cm^3 . HDPE memiliki derajat rendah dalam percabangannya dan memiliki kekuatan antar molekul yang sangat tinggi dan kekuatan tarik. HDPE bisa diproduksi dengan katalis kromium/ silika, katalis Ziegler-Natta, atau katalis metallocene. HDPE digunakan sebagai bahan pembuat botol susu, botol/ kemasan detergen, kemasan margarin, pipa air, dan tempat sampah.

3. Polietilena "cross-linked" (*Cross-linked polyethylene*) (PEX atau XLPE)

PEX adalah polietilena dengan kepadatan menengah hingga tinggi yang memiliki sambungan *cross-link* pada struktur polimernya. Sifat ketahanan terhadap temperatur tinggi meningkat seperti juga ketahanan terhadap bahan kimia.

4. Polietilena berdensitas menengah (*Medium density polyethylene*) (MDPE)

MDPE dicirikan dengan densitas antara 0.926–0.940 g/cm³. MDPE bisa diproduksi dengan katalis kromium/ silika, katalis Ziegler-Natta, atau katalis metallocene. MDPE memiliki ketahanan yang baik terhadap tekanan dan kejatuhan. MDPE biasa digunakan pada pipa gas.

5. Polietilena berdensitas rendah (*Low density polyethylene*) (LDPE)

LDPE dicirikan dengan densitas 0.910–0.940 g/cm³. LDPE memiliki derajat tinggi terhadap percabangan rantai panjang dan pendek, yang berarti tidak akan berubah menjadi struktur kristal. Ini juga mengindikasikan bahwa LDPE memiliki kekuatan antar molekul yang rendah. Ini mengakibatkan LDPE memiliki kekuatan tarik yang rendah. LDPE diproduksi dengan polimerisasi radikal bebas.

6. Polietilena linier berdensitas rendah (*Linear low density polyethylene*) (LLDPE)

LLDPE dicirikan dengan densitas antara 0.915–0.925 g/cm³. LLDPE adalah polimer linier dengan percabangan rantai pendek dengan jumlah yang cukup signifikan. Umumnya dibuat dengan kopolimerisasi etilena dengan rantai pendek alfa-olefin (1-butena, 1-heksena, 1-oktena, dan sebagainya). LLDPE memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dari LDPE dan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap tekanan.

7. Polietilena berdensitas sangat rendah (*Very low density polyethylene*) (VLDPE)

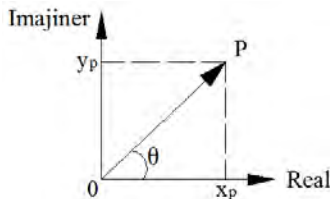
VLDPE dicirikan dengan densitas 0.880–0.915 g/cm³. VLDPE adalah polimer linier dengan tingkat percabangan rantai

pendek. Umumnya dibuat dengan kopolimerisasi etilena dengan rantai pendek alfa-olefin.

(*wikipedia.org*)

2.6 Analisa Kinematika *Multi-Directional Motion*

Sebuah titik P digambarkan pada sebuah koordinat kompleks



Secara kinematika dapat disebutkan bahwa

$$\bar{p} = x_p + iy_p$$

Dimana : $x_p = R \cos \theta$

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

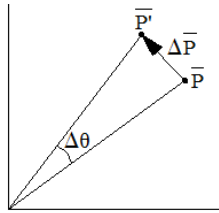
Sehingga :

$$\bar{p} = R \cos \theta + R \sin \theta$$

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

$$\bar{p} = R e^{i\theta}$$

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



$$\bar{p}' = \bar{p} + \Delta\bar{p}$$

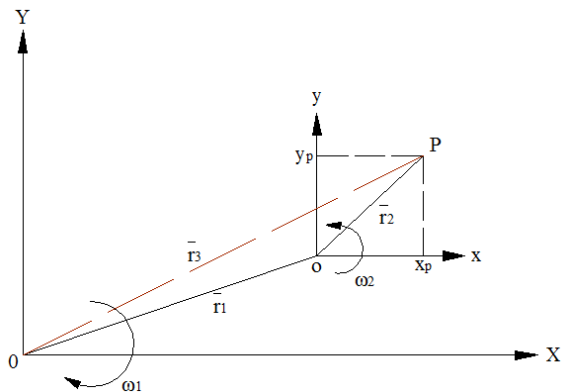
$$\Delta\bar{p} = \bar{p}' - \bar{p}$$

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

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

$$\bar{\dot{p}} = \dot{R} e^{i\theta} + R i \omega e^{i\theta}$$

Ketika titik P berada pada koordinat lokal xoy, sedangkan koordinat lokal tersebut berada pada koordinat global X0Y, maka titik P dapat digambarkan sebagai berikut :



$$\begin{aligned}\bar{r}_3 &= \bar{r}_1 + \bar{r}_2 \\ \dot{\bar{r}}_3 &= R_1 e^{i\theta_1} + R_2 e^{i\theta_2}\end{aligned}$$

Sehingga, titik P pada koordinat global adalah sebagai berikut :

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

Sehingga

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

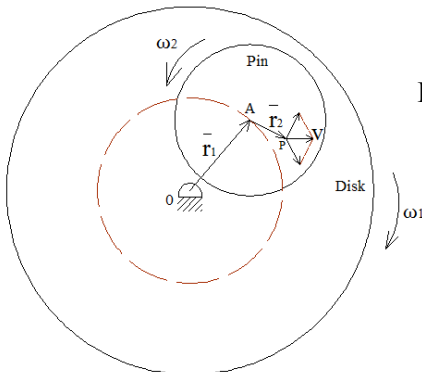
$$\begin{aligned}\dot{\bar{p}} &= iR_1\omega_1(\cos\theta_1 + i\sin\theta_1) + iR_2\omega_2(\cos\theta_2 + i\sin\theta_2) \\ (v_x + iv_y) &= iR_1\omega_1 \cos\theta_1 - R_1\omega_1 \sin\theta_1 + iR_2\omega_2 \cos\theta_2 - R_2\omega_2 \sin\theta_2\end{aligned}$$

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

$$Real = v_x = -R_1\omega_1 \sin\theta_1 - R_2\omega_2 \sin\theta_2$$

$$Imajiner = v_y = R_1\omega_1 \cos\theta_1 + R_2\omega_2 \cos\theta_2$$

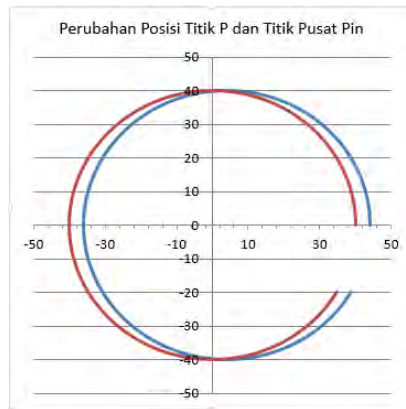
Pada penelitian ini, jika koordinat lokal diwakili oleh pin dan koordinat global diwakili oleh disk, maka dapat digambarkan sebagai berikut :



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

$\omega_1 = \omega \text{ disk}$ (cw)

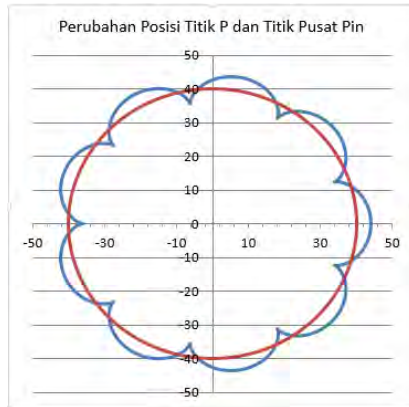
Ketika lintasan yang dilewati titik P sepanjng waktu digambarkan pada disk dengan berbagai perbandingan $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\omega_{pin}}{\omega_{disk}}$, dimana titik P tersebut berada pada jarak 4 mm dari pusat pin dan pusat pin berada pada jarak 40 mm dari pusat disk, maka hasilnya adalah seperti ditunjukkan pada gambar berikut :



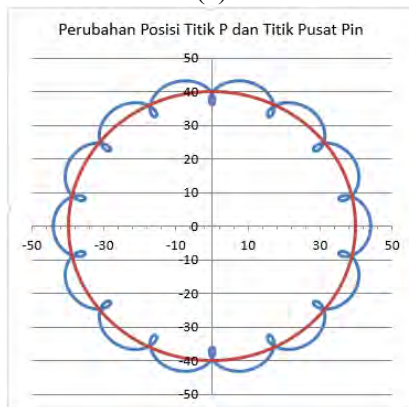
(a)



(b)



(c)



(d)

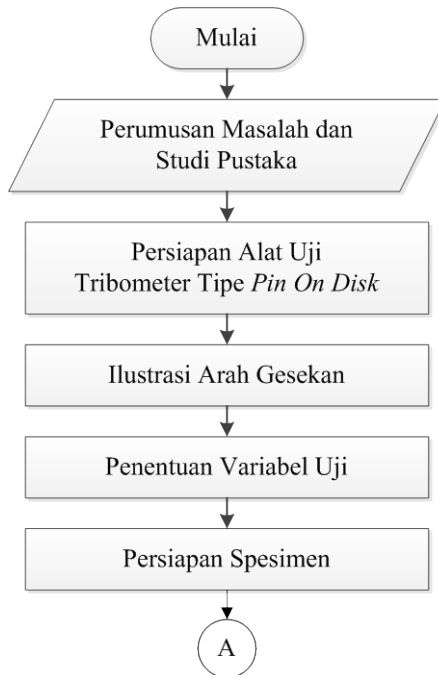
Gambar 2.19 Perubahan Posisi Titik P (Garis Biru) dan Titik Pusat Pin (Garis Merah) Pada Disk Sepanjang Waktu (Skala Dalam mm) Untuk (a) $\omega_{\text{pin}} = 0$ (b) $\omega_{\text{pin}} = 5 \times \omega_{\text{disk}}$ (c) $\omega_{\text{pin}} = 10 \times \omega_{\text{disk}}$ (d) $\omega_{\text{pin}} = 15 \times \omega_{\text{disk}}$

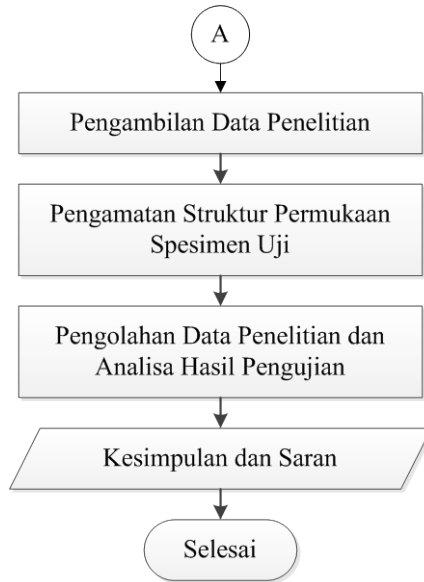
BAB III

METODOLOGI

3.1 Metode dan Urutan Pelaksanaan Penelitian

Pada penelitian ini, metodologi yang digunakan adalah pengujian dan analitis, yaitu pengambilan secara langsung data volume keausan, perhitungan untuk mendapatkan nilai *specific wear rate* dan pengamatan struktur permukaan dari permukaan spesimen uji. Secara garis besar, alur penelitian seperti ditunjukkan pada diagram berikut :



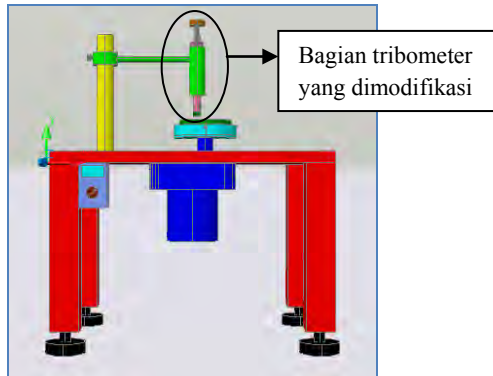


Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Persiapan Alat Uji, Tribometer Tipe *Pin On Disk*

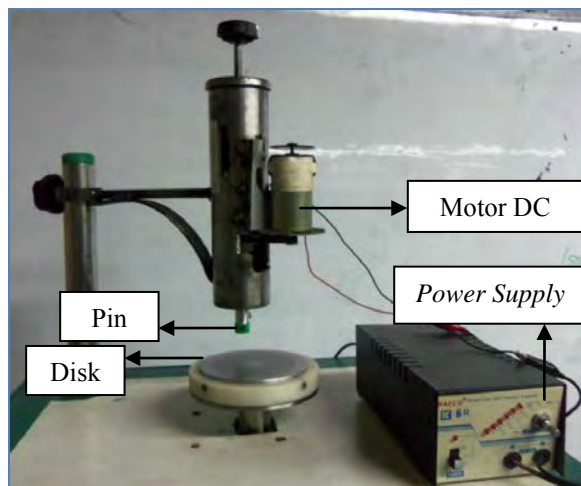
1. Modifikasi tribometer

Persiapan alat uji diawali dengan memodifikasi tribometer tipe *pin on disk* yang ada di Laboratorium Desain Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya. Modifikasi ini dilakukan dengan tujuan agar selain disk yang mengalami gerak rotasi, pin juga akan mengalami gerak rotasi, sehingga akan diperoleh *multi-direction contact friction* antara pin dan disk.



Gambar 3.2 Visualisasi 3D Tribometer Tipe *Pin On Disk* Sebelum Dimodifikasi

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat bagian tribometer yang dimodifikasi, sedangkan hasil modifikasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Hasil Modifikasi Bagian Tribometer

Modifikasi tribometer dilakukan dengan menambahkan motor DC sebagai penggerak, sepasang *belt* dan *pulley* sebagai penghantar daya dari motor ke poros dan bantalan (*bearing*) agar poros dapat berputar tanpa mengalami gesekan dengan *casing*. Sebagai sumber tenaga motor digunakan arus AC yang sebelumnya diubah menjadi arus DC oleh *Power Supply*.

Proses kerja dari tribometer yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 adalah ketika motor berputar maka putaran dari motor akan diteruskan oleh *belt* menuju poros yang berada di dalam *casing* tribometer. Poros yang berputar pada akhirnya akan memutar pin sehingga tercipta gesekan banyak arah (*multi-directional friction*) ketika pin yang berputar tersebut bergesekan dengan disk yang juga berputar.

Adapun spesifikasi berbagai peralatan 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
 - Frictional force* : 0 – 150 N
 - Pin size* : 8 – 15 mm diameter / diagonal
 - Disk size* : 100 mm diameter x 20 mm tebal
 - Wear track diameter* : 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

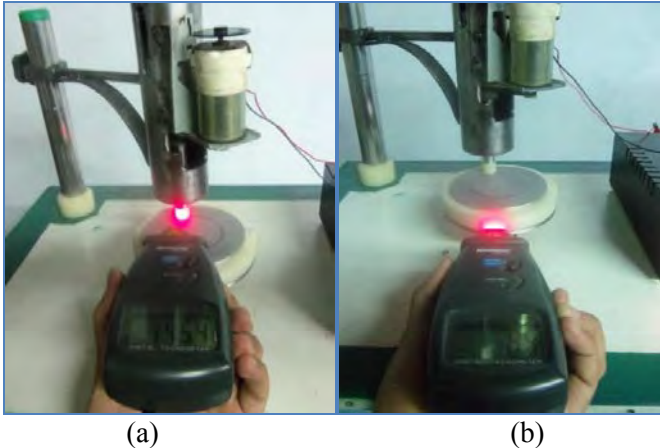
2. Kalibrasi peralatan

Setelah modifikasi alat uji dilakukan, persiapan dilanjutkan dengan proses penyetingan/ kalibrasi *speed control* dan *load* (pembebanan). Proses ini dilakukan agar diperoleh data yang akurat saat dilakukan pengujian. Kalibrasi beban dilakukan dengan menggunakan timbangan badan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.4, sementara kalibrasi *speed control* dilakukan dengan menggunakan *tachometer infrared* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.5



Gambar 3.4 Kalibrasi Pembebanan

Hasil kalibrasi pembebanan yang telah dilakukan selanjutnya digambarkan sebagai garis-garis skala yang ditempelkan pada tribometer, dengan variasi pembebanan mulai dari 2 kg sampai dengan 10 kg.



Gambar 3.5 Kalibrasi Kecepatan (a) Putaran Pin, dan (b) Putaran Disk

Pada tahap ini pemakaian *tachometer* dilakukan untuk mengetahui besar kecepatan putaran pin dengan berbagai variasi pembebanan dan besar kecepatan putaran disk dengan variasi *speed control*. Hasil dari pengukuran kecepatan putaran pin seperti ditunjukkan pada Tabel 3.1, sedangkan hasil dari pengukuran putaran disk seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2

Tabel 3.1 Hasil Kalibrasi Kecepatan Putaran Pin Dengan Variasi Pembebanan (*Load*)

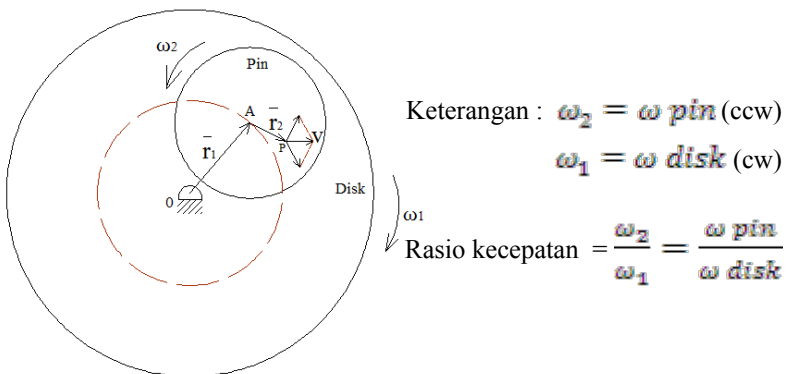
Pembebanan (kg)	Kecepatan (rpm)
0	452.8
2	448.3
4	402.4
6	375.2

Tabel 3.2 Hasil Kalibrasi Kecepatan Putaran Disk Dengan Variasi *Speed Control*

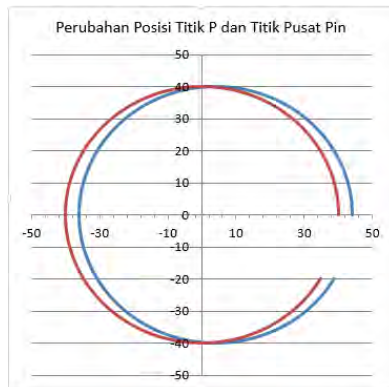
<i>Speed Control</i>	Kecepatan (rpm)
10	9.2
20	17.3
30	24.4
40	31.2
50	37.5
60	43.5
70	48.4
80	52.8
90	56.3
100	59.2

3.3 Analisa Kinematika Kontak

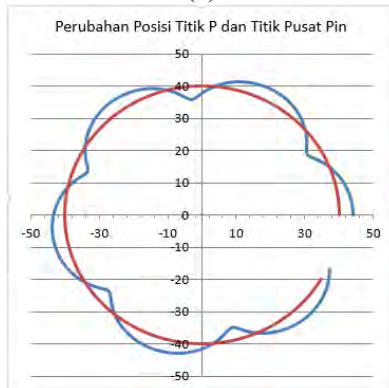
Pada penelitian ini, jika sebuah titik tinjau P pada permukaan pin berada dalam koordinat lokal, sedangkan pin tersebut berada dalam koordinat global pada disk, maka dapat digambarkan sebagai berikut :



Ketika lintasan yang dilewati titik P sepanjang waktu digambarkan pada disk dengan berbagai variasi rasio kecepatan antara pin dan disk, dimana titik P tersebut berada pada jarak 4 mm sebelah kanan dari pusat pin dan pusat pin berada pada jarak 40 mm dari pusat disk, maka ilustrasi dari perpindahan posisi titik P tersebut adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6



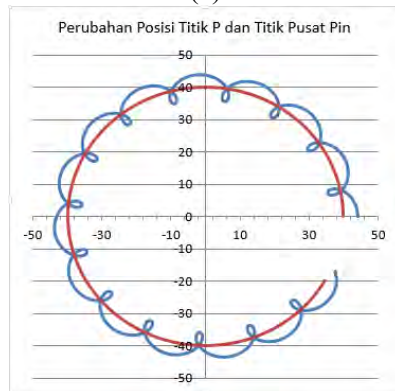
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.6 Perubahan Posisi Titik P (Garis Biru) dan Titik Pusat Pin (Garis Merah) Pada Disk Sepanjang Waktu (Skala Dalam mm) Untuk Variabel Pengujian

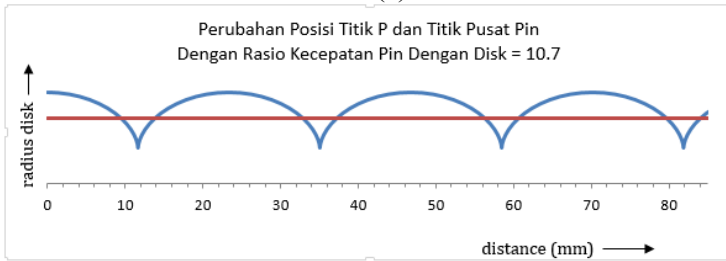
(a) $\omega_{\text{pin}} = 0$ (b) $\omega_{\text{pin}} = 6.7 \times \omega_{\text{disk}}$

(c) $\omega_{\text{pin}} = 10.7 \times \omega_{\text{disk}}$ (d) $\omega_{\text{pin}} = 16.5 \times \omega_{\text{disk}}$

Jika lintasan pin berupa lingkaran pada Gambar 3.6 digambarkan sebagai lintasan berupa garis lurus, maka perubahan posisi titik tinjau P seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.7 Perubahan Posisi Titik P Jika Berada Pada Lintasan Lurus,

Untuk (a) ω pin = 6.7x ω disk

(b) ω pin = 10.7x ω disk (c) ω pin = 16.5x ω disk

3.4 Penentuan Variabel Uji

Secara garis besar penelitian ini dilakukan dalam 2 macam, yaitu keausan akibat gesekan banyak arah (*multi-directional friction*) dan akibat gesekan satu arah (*uni-directional friction*). Variabel pengujian yang digunakan pada penelitian ini secara keseluruhan seperti ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 3.3 Variabel Uji Untuk Setiap Variasi Pengujian

Variasi ke-	<i>Sliding distance</i>	Pembebanan (<i>load</i>)	Diameter track pin pada disk	Kecepatan pin	Kecepatan disk	Rasio kecepatan pin dengan disk
<i>Multi-directional friction</i>						
1	600 m	39.2N	0.08 m	402.4 rpm	59.2 rpm	6.7
2	600 m	39.2N	0.08 m	402.4 rpm	37.5 rpm	10.7
3	600 m	39.2N	0.08 m	402.4 rpm	24.4 rpm	16.5
<i>Uni-directional friction</i>						
4	600 m	39.2N	0.08 m	-	37.5 rpm	-

Pada Tabel 3.3 dapat dilihat variable uji untuk setiap variasi pengujian, baik itu pengujian gesekan banyak arah maupun gesekan satu arah. Untuk setiap variasi dilakukan pengambilan data masing-masing sebanyak 3 kali tanpa pelumasan dan 3 kali dengan pelumasan. Dengan demikian, total 24 spesimen UHMWPE telah diuji untuk data keausan akibat gesekan satu arah dan data keausan akibat gesekan banyak arah.

Lamanya waktu pengujian dihitung dengan menggunakan formula berikut :

$$t = \frac{L}{v} \quad (3.1)$$

Dengan $v = \pi.d.n$, maka persamaan (3.1) menjadi :

$$t = \frac{L}{\pi.d.n} \quad (3.2)$$

Keterangan :

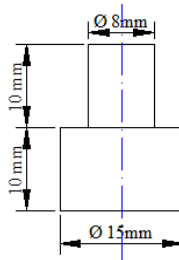
- t = waktu pengujian (menit)
- L = *sliding distance* (meter)
- v = kecepatan titik kontak disk terhadap pin (meter/menit)
- d = diameter *track* pin pada disk (meter)
- n = kecepatan putaran disk (putaran/menit)

3.5 Persiapan Spesimen Uji

Pada tahapan persiapan spesimen terdapat 2 kegiatan yaitu persiapan material dan penimbangan pin uji.

1. Persiapan material

Sebelum penelitian dilakukan, spesimen disiapkan terlebih dahulu. Spesimen yang digunakan terdiri dari pin dan disk yang mana kedua benda tersebut akan digesekkan satu sama lain.



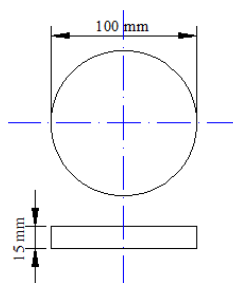
Gambar 3.8 Dimensi Pin Spesimen

Pin spesimen merupakan benda berbentuk silinder yang memiliki diameter bertingkat, yaitu 8 mm dan 15 mm dengan panjang masing-masing 10 mm. Bentuk dan dimensi pin dapat dilihat pada Gambar 3.8, sedangkan pin yang telah dipersiapkan untuk pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.9



Gambar 3.9 Pin yang Digunakan Dalam Pengujian

Pembuatan pin diawali dengan proses pembubutan bahan dasar berbentuk silinder, kemudian bagian permukaan pin uji yang masih kasar akibat proses bubut selanjutnya dihaluskan dengan menggosokkan pin tersebut pada kertas gosok grid 1200 di atas permukaan kaca.



Gambar 3.10 Dimensi Disk Spesimen

Sementara untuk untuk disk spesimen yang digunakan memiliki diameter 100 mm dengan ketebalan 15 mm. Bentuk dan dimensi disk dapat dilihat pada Gambar 3.10, sedangkan disk yang telah dipersiapkan untuk pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Disk yang Digunakan Dalam Pengujian

Pembuatan disk juga dilakukan melalui proses bubut dan proses penghalusan permukaannya juga dilakukan dengan menggosokkan permukaan disk tersebut pada kertas gosok di atas permukaan kaca.

Ukuran dari pin dan disk spesimen ini merupakan ukuran standar yang dipakai untuk melakukan pengujian menggunakan tribometer *pin on disk* pada Laboratorium Desain, 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>	: $0,289 \text{ lb/in}^3 = 8 \text{ g/cm}^3$
<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>	: $0,034 \text{ lb/in}^3 = 0,94 \text{ g/cm}^3$
<i>Tensile Strength, Ultimate</i>	: 3560 psi
<i>Coefficient of Friction</i>	: 0,1- 0,15
<i>Melting Point</i>	: 130-138 °C

2. Penimbangan

Pengukuran massa pin spesimen dilakukan dengan menggunakan timbangan digital. Pada Gambar 3.12 dapat dilihat timbangan digital yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 3.12 Timbangan Digital

Penggunaan timbangan digital dimaksudkan agar diperoleh nilai yang akurat dari perubahan massa pin. Proses penimbangan dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

3.6 Pengambilan Data Penelitian

Tahap ini merupakan tahapan yang penting karena pada tahap inilah dilakukan pengujian untuk memperoleh data yang digunakan sebagai bahan pembahasan serta analisa. Pengambilan data diawali dengan pengujian gesekan banyak arah tanpa pelumas, kemudian dilanjutkan dengan gesekan banyak arah dengan berpelumas, dimana untuk masing-masing gesekan banyak arah tersebut dilakukan dengan tiga variasi rasio kecepatan antara pin dan disk. Pengujian selanjutnya diakhiri dengan pengambilan data untuk gesekan satu arah tanpa dan dengan berpelumas. Untuk tiap-tiap variasi pengujian dilakukan pengambilan data sebanyak tiga kali.

Adapun data massa pin sebelum dan sesudah dilakukan pengujian ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3.4 Data hasil pengujian

No. Pin	<i>Speed Control (Disk)</i>	Massa Awal (gram)	Massa Akhir (gram)	Perubahan Massa (gram)
<i>Multi-directional friction (dry sliding)</i>				
1	100 (59.2 rpm)	2.1057	2.1051	0.0006
2		2.1237	2.1229	0.0008
3		2.1064	2.1957	0.0007

4	50 (37.5 rpm)	2.1143	2.1135	0.0008
5		2.1071	2.1064	0.0007
6		2.109	2.1081	0.0009
7	30 (24.4 rpm)	2.1081	2.1073	0.0008
8		2.1053	2.1047	0.0006
9		2.1145	2.1137	0.0008
<i>Multi-directional friction (lubricated sliding)</i>				
10	100 (59.2 rpm)	2.1146	2.1140	0.0006
11		2.1006	2.1001	0.0005
12		2.0865	2.0861	0.0004
13	50 (37.5 rpm)	2.1053	2.1046	0.0007
14		2.1013	2.1005	0.0008
15		2.1060	2.1056	0.0004
16	30 (24.4 rpm)	2.1363	2.1358	0.0005
17		2.1005	2.0998	0.0007
18		2.1026	2.1020	0.0006
<i>One-directional friction (dry sliding)</i>				
19	50 (37.5 rpm)	2.1296	2.1291	0.0005
20		2.1032	2.1026	0.0006
21		2.1016	2.1012	0.0004
<i>One-directional friction (lubricated sliding)</i>				
22	50 (37.5 rpm)	2.1084	2.1080	0.0004
23		2.0991	2.0988	0.0003
24		2.0990	2.0988	0.0002

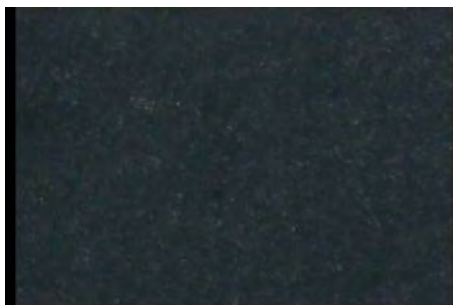
3.7 Pengamatan Struktur Permukaan Spesimen Uji

Spesimen yang telah dilakukan pengujian keausan, selanjutnya diamati struktur permukaannya menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 50, 100, 200 dan 500 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 3.13 dapat dilihat mikroskop optis yang digunakan pada penelitian ini.

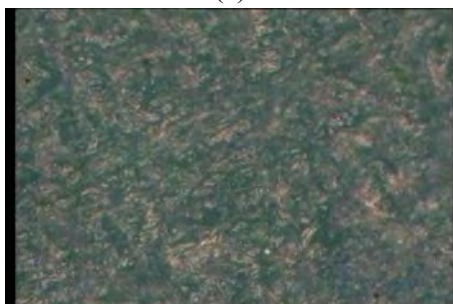


Gambar 3.13 Gambar Mikroskop Optis

Beberapa contoh gambar dengan berbagai skala perbesaran yang dihasilkan oleh mikroskop optis ini dapat dilihat pada Gambar 3.14



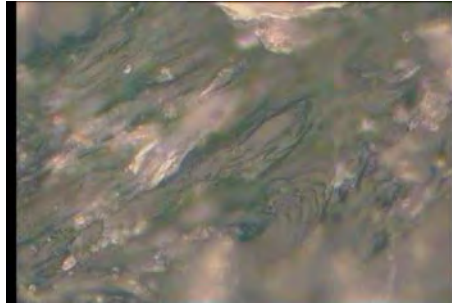
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.14 Foto Mikro Permukaan Pin Spesimen Sebelum Dilakukan Pengujian Keausan, Dengan Perbesaran (a) 50x (b) 100x (c) 200x (d) 500x

Gambar 3.14 merupakan gambar permukaan pin (UHMWPE) yang telah dihaluskan terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian gesekan. Pengamatan struktur permukaan spesimen uji ini dilakukan di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

3.8 Pengolahan Data Penelitian dan Analisa Hasil Pengujian

Data yang diperoleh selanjutnya diolah dan diplot ke dalam grafik, kemudian dilakukan analisa dan pembahasan terhadap grafik tersebut. Analisa dan pembahasan juga dilakukan terhadap foto mikro hasil pengamatan struktur permukaan spesimen uji untuk mengetahui mekanisme keausan dan penyebab terjadinya keausan.

Menggunakan data Δm yang telah diketahui, kemudian dihitung perubahan volume (ΔV) pin yang terjadi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (3.3)$$

Sehingga *specific wear rate* (K) akan diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

$$K = \frac{\Delta V}{FL} \quad (3.4)$$

Hasil perhitungan selanjutnya diolah dan diplot ke dalam grafik “*Specific wear rate*” sebagai:

- Efek dari perubahan rasio kecepatan antara pin dengan disk
- Efek dari adanya pelumasan
- Efek dari berubah-ubahnya arah gesekan

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

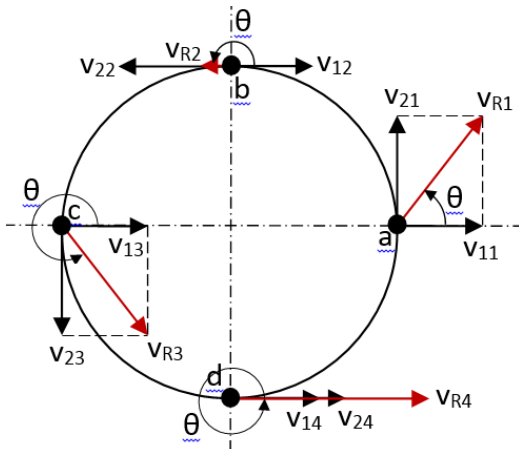
BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini dibahas dan dianalisa hasil penelitian tentang laju keausan antara *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* AISI 304. Pembahasan dimulai dengan melakukan analisa kecepatan dari pin yang melakukan kontak permukaan dengan disk, dilanjutkan dengan analisa keausan akibat dari adanya *Multi-Directional Friction*.

4.1 Kinematika Kecepatan Pada *Multi-Directional Contact Friction*

Jika ditinjau sebuah titik P pada permukaan pin dengan posisi 4 mm dari pusat pin, maka terjadinya perubahan posisi titik tinjau P dari waktu ke waktu secara otomatis akan menyebabkan terjadinya perubahan kecepatan dari waktu ke waktu. Pada penelitian ini terdapat dua variabel yang menjadi penentu besar dan arah kecepatan titik P, yaitu kecepatan putar disk dan kecepatan putar pin. Kinematika kecepatan dari titik P dapat digambarkan seperti pada gambar berikut.



Keterangan :

$$v_1 = \omega_1 \times R_1$$

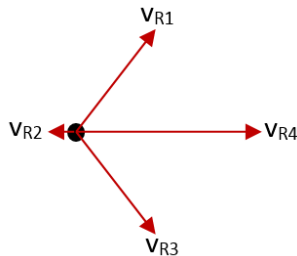
$$v_2 = \omega_2 \times R_2$$

ω_1 = kecepatan putar disk

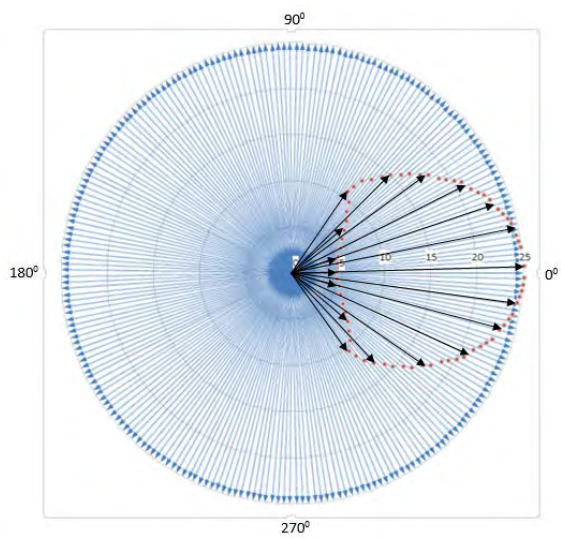
ω_2 = kecepatan putar pin

v_R = kecepatan resultan

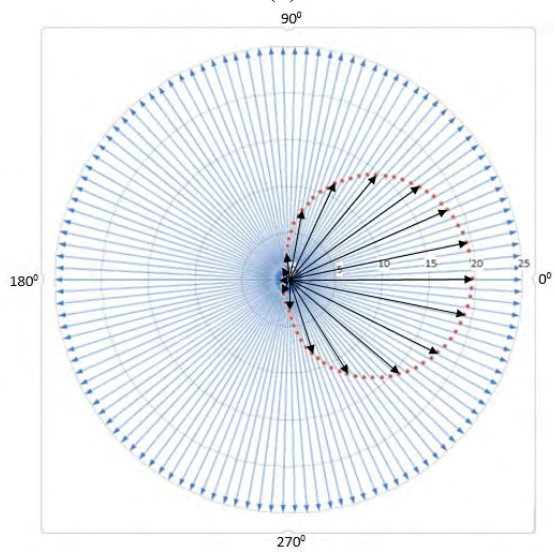
Ketika titik P berada pada posisi a maka kecepatan sesaat titik P akibat dari perputaran disk adalah seperti ditunjukkan dengan simbol v_{11} , sedangkan kecepatan sesaat titik P akibat dari perputaran pin adalah seperti ditunjukkan dengan simbol v_{21} , sehingga arah resultan kecepatan sesaat titik P ketika berada pada posisi a adalah seperti ditunjukkan dengan simbol v_{R1} . Ketika posisi titik P berpindah menuju b, maka kecepatan v_{11} akan berubah menjadi v_{12} dan kecepatan v_{21} akan berubah menjadi v_{22} , sehingga kecepatan resultan pun akan berubah menjadi v_{R2} , begitu seterusnya ketika titik P berada pada posisi c ataupun d. Perubahan resultan kecepatan titik P pada keempat posisi tersebut ditampilkan dalam gambar berikut.



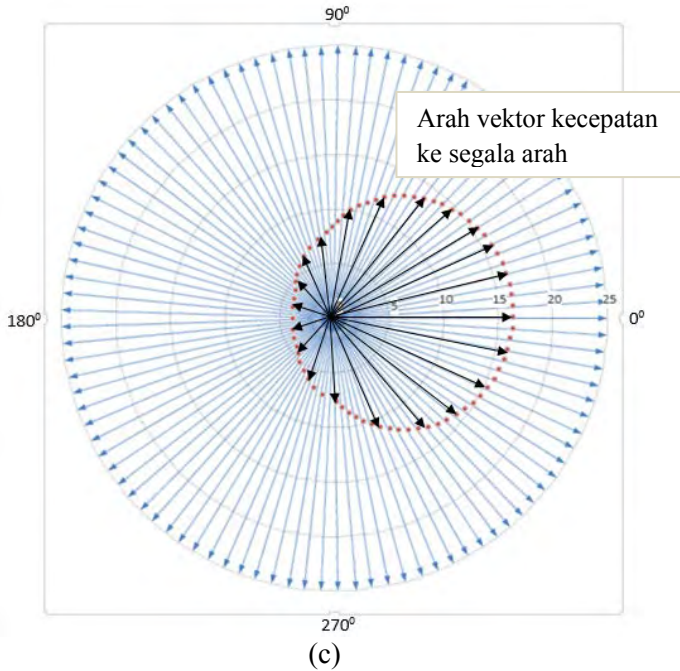
Secara lebih lengkap, perubahan besar dan arah resultan kecepatan titik P dari waktu ke waktu untuk setiap rasio kecepatan pin terhadap disk ditampilkan dalam Gambar 4.1 berikut.



(a)



(b)



Gambar 4.1 Vektor Kecepatan Titik Tinjau P Dari Waktu Ke Waktu Pada Pengujian Dengan Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5

Gambar 4.1 di atas merupakan gambar yang menampilkan vektor resultan kecepatan sebuah titik tinjau P di permukaan pin dari waktu ke waktu selama dilakukan pengujian, dengan sumbu axis sebagai besar kecepatan dalam satuan m/menit dan lingkaran 360° sebagai sudut arah kecepatan. Pada Gambar 4.1 di atas, titik tinjau di permukaan pin ditampilkan sebagai titik pusat lingkaran, sedangkan panjang dan arah panah yang berawal dari pusat lingkaran merupakan besar dan arah resultan kecepatan dari titik P tersebut. Sebagai contoh, jika pada gambar ditampilkan panah dengan panjang 16 skala sumbu axis

dan mempunyai sudut 0° , maka pada kenyataannya dalam sesaat kecepatan titik P adalah sebesar 16 m/menit mengarah ke kanan.

Pada Gambar 4.1.a dapat dilihat bahwa perubahan arah resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 6.7 dari waktu ke waktu hanya berada pada *range* 43° ke arah positif (kuadran 1 lingkaran) dan 43° ke arah negatif (kuadran 4 lingkaran). Adapun besar rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 6.7 ini adalah sebesar 16.6789 m/menit. Pada Gambar 4.1.b dapat dilihat bahwa vektor resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 10.7 sebagian besar berada pada kuadran 1 dan 4 lingkaran, dengan beberapa kali berada pada kuadran 2 dan 3 lingkaran. Adapun besar rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 10.7 adalah sebesar 12.4946 m/menit. Berbeda dengan kedua rasio kecepatan lainnya, vektor resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 16.5 mempunyai arah dengan *range* sudut yang lebih luas dan lebih bervariasi pada keempat kuadran lingkaran, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.1.c. Sedangkan besar rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 16.5 adalah 11.0815 m/menit.

4.2 Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Tanpa Pelumas

4.2.1 Analisa Laju Keausan

Hasil pengolahan data pengujian *Multi-Directional Friction* material *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* AISI 304 dalam kondisi tanpa pelumas dengan berbagai variasi rasio kecepatan putar antara pin dan disk ditunjukkan pada Tabel 4.1 sampai 4.3

Tabel 4.1 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Kurang Dari 10 (Rasio = 6.7 \rightarrow ω Disk = 59.2 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0006	39.2	600	14.885	40	0.94	0.638298	2.71385E-05
2	0.0008	39.2	600	14.885	40	0.94	0.851064	3.61847E-05
3	0.0007	39.2	600	14.885	40	0.94	0.744681	3.16616E-05
Rata-rata :	0.0007	39.2	600	14.885	40	0.94	0.744681	3.16616E-05

Tabel 4.2 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Berada Diantara 10 dan 15 (Rasio = 10.7 \rightarrow ω Disk = 37.5 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0008	39.2	600	9.429	64	0.94	0.851064	3.61847E-05
2	0.0007	39.2	600	9.429	64	0.94	0.744681	3.16616E-05
3	0.0009	39.2	600	9.429	64	0.94	0.957447	4.07078E-05
Rata-rata :	0.0008	39.2	600	9.429	64	0.94	0.851064	3.61847E-05

Tabel 4.3 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Lebih Dari 15 (Rasio = 16.5 \rightarrow ω Disk = 24.4 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0008	39.2	600	6.135	98	0.94	0.851064	3.61847E-05

2	0.0006	39.2	600	6.135	98	0.94	0.638298	2.71385E-05
3	0.0008	39.2	600	6.135	98	0.94	0.851064	3.61847E-05
Rata-rata :	0.00073	39.2	600	6.135	98	0.94	0.780142	3.31693E-05

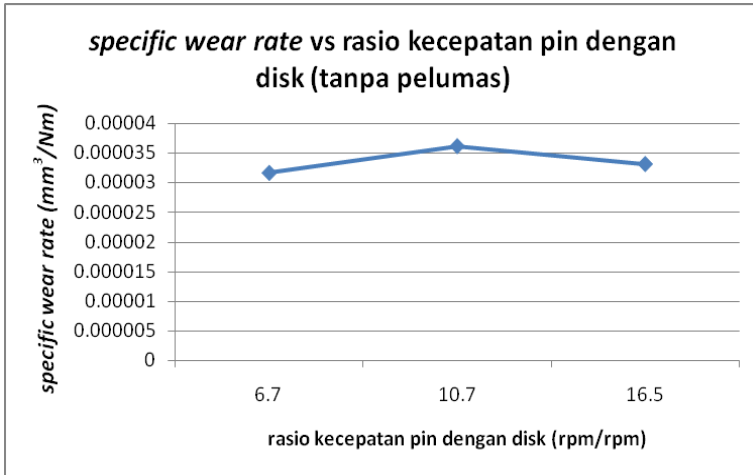
Keterangan :

- Δm = Perubahan massa pin
- F = Beban
- ρ = Massa jenis pin
- L = *Sliding distance*
- ΔV = Perubahan volume pin
- t = Waktu pengujian
- v = Kecepatan relatif pusat pin terhadap disk
- K = Laju keausan

Pada Tabel 4.1 sampai 4.3 dapat dilihat secara detail besar perubahan massa pin untuk setiap pengujian dengan berbagai variabel uji yang telah dilakukan. Variabel uji yang dimaksudkan disini terdiri dari besar pembebanan yang diberikan pada pin (F), panjang gesekan yang dialami pin (L), kecepatan gesek (v) dan juga waktu tempuh (t) yang dilalui pin untuk menempuh jarak L selama mengalami pergesekan. Sementara rasio kecepatan putar antara pin dan disk yang dimaksudkan disini bertujuan untuk memberikan pola gesekan yang berbeda-beda pada setiap variasinya, seperti yang telah dijelaskan pada bab 3.

Data perubahan massa pin selanjutnya dikalkulasikan dengan massa jenis pin (ρ UHMWPE) untuk mengetahui besar perubahan volume pin (ΔV) akibat dari gesekan yang telah diberikan, sehingga dengan bermodalkan data-data ΔV , F dan juga L dapat diketahui besar laju keausan K (*specific wear rate*) dengan menggunakan persamaan $K = \frac{\Delta V}{FL}$

Data laju keausan (*specific wear rate*) dari setiap pengujian yang telah dilakukan selanjutnya dirata-ratakan dan ditransformasikan menjadi grafik untuk dapat melihat perbandingan laju keausan dari tiap-tiap pengujian dengan rasio kecepatan putar antara pin dan disk yang berbeda-beda.



Gambar 4.2 Grafik Perubahan Laju Keausan Terhadap Perubahan Rasio Kecepatan Antara Pin Dan Disk Dengan Kondisi Pengujian Tanpa Pelumas

Grafik pada Gambar 4.2 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara besarnya laju keausan dengan perubahan rasio kecepatan antara pin dan disk pada pengujian gesekan tanpa pelumas material UHMWPE terhadap material *stainless steel*. Pada grafik tersebut ditampilkan besarnya laju keausan dengan satuan mm³/Nm sebagai sumbu vertikal dan perubahan rasio kecepatan dengan satuan rpm/rpm sebagai sumbu horizontal. Pada grafik tersebut, dibandingkan harga laju keausan dari 3 buah rasio kecepatan yang berbeda.

Pada grafik tersebut dapat dilihat bahwa besar laju keausan untuk rasio kecepatan 6.7 adalah $3.16616E-05$, untuk rasio kecepatan 10.7 adalah $3.61847E-05$ dan untuk rasio kecepatan 16.5 adalah $3.31693E-05$. Peningkatan laju keausan terjadi dengan meningkatnya rasio kecepatan dari 6.7 sampai 10.7. Namun, terjadi penurunan laju keausan dengan meningkatnya rasio kecepatan dari 10.7 menuju 16.5

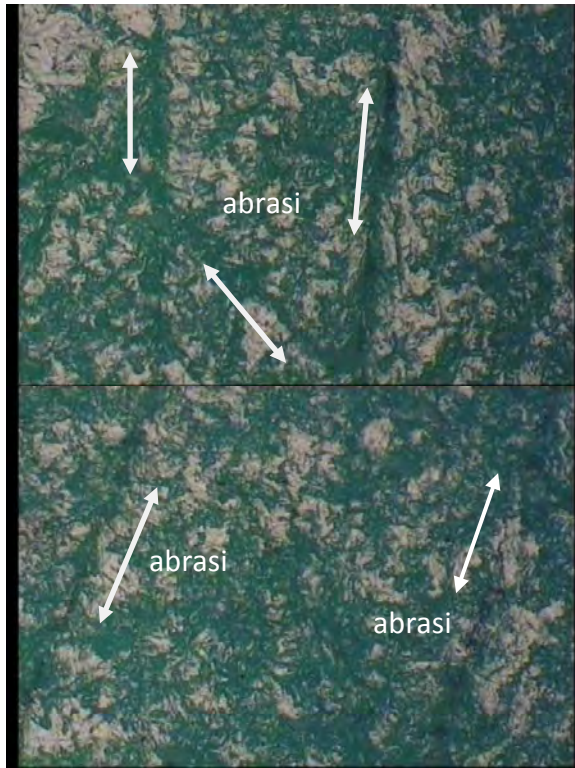
Jika arah kecepatan dihubungkan dengan harga laju keausan maka dapat disebutkan bahwa semakin banyak perubahan arah kecepatan akan menyebabkan besar laju keausan yang semakin besar, seperti ditunjukkan pada perubahan harga laju keausan yang semakin meningkat dari rasio kecepatan 6.7 sampai 10.7. Namun, perubahan arah kecepatan yang semakin banyak pada rasio kecepatan dari 10.7 sampai 16.5 malah menyebabkan harga laju keausan semakin berkurang, hal tersebut mungkin disebabkan karena besar rata-rata resultan kecepatan yang semakin kecil jika dibandingkan dengan besar rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 10.7

4.2.2 Analisa Permukaan Kontak

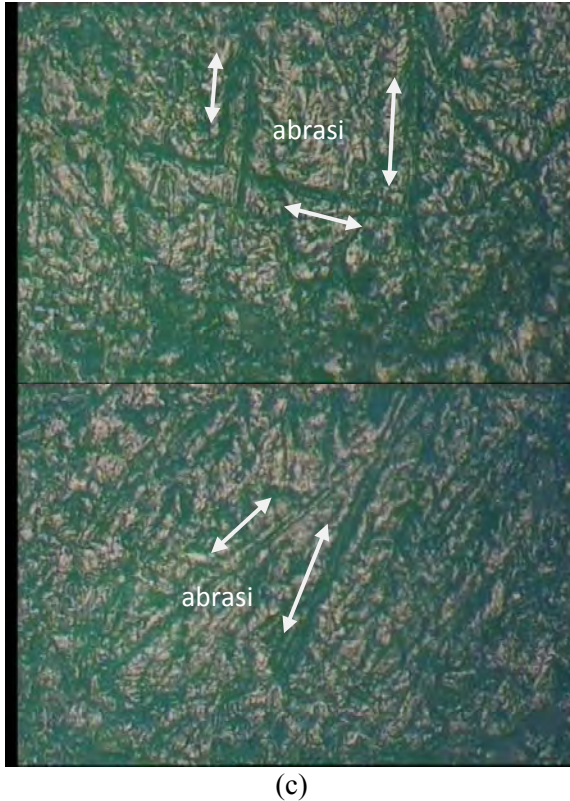
Perbedaan besar dan arah kecepatan gesek pin terhadap disk selain menyebabkan perbedaan laju keausan juga menyebabkan perbedaan bentuk dan dimensi keausan yang terbentuk pada permukaan pin. Adapun perbedaan-perbedaan tersebut dapat dilihat pada foto mikro permukaan spesimen pada Gambar 4.3



(a)



(b)



Gambar 4.3 Foto Mikro Permukaan Spesimen Dengan Perbesaran 100x Setelah Dilakukan Pengujian Untuk Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5

Pada Gambar 4.3 di atas dapat dilihat berbagai pola keausan yang terbentuk pada permukaan pin untuk tiap-tiap rasio kecepatan, setelah dilakukan pengujian. Untuk ketiga rasio kecepatan mempunyai berbagai persamaan dan beberapa perbedaan pada pola keausan yang terbentuk. Adapun kesamaan dari pola keausan untuk ketiga rasio kecepatan yang digunakan

pada pengujian adalah bahwa pola keausan yang terbentuk hanya berupa abrasi. Tidak ada ditemukan pola keausan yang mengindikasikan bahwa keausan terjadi dengan mekanisme korosif, adhesif ataupun *fatigue*. Adapun bentuk dan arah dari abrasi yang terbentuk terlihat berbeda untuk tiap-tiap rasio kecepatan. Pada Gambar 4.3.a yang merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 6.7, dapat ditemukan satu dua buah goresan, dengan arah yang relatif sama, dengan posisi satu sama lain yang saling berjauhan, namun dengan ukuran yang lebar dan panjang. Ketika pengamatan dialihkan pada Gambar 4.3.b yang merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 10.7, dapat dilihat goresan-goresan yang lebih banyak, namun dengan dimensi yang lebih pendek dan lebih sempit. Pada gambar tersebut juga dapat ditemukan goresan dengan arah yang berbeda dengan goresan lainnya. Pada Gambar 4.3.c yang merupakan permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 16.5, dapat ditemukan banyak sekali goresan-goresan dengan posisi yang rapat dan dengan arah yang berbeda-beda satu sama lain. Dapat juga dilihat bahwa goresan-goresan yang terdapat pada permukaan spesimen tersebut memiliki dimensi yang relatif pendek dan tidak begitu lebar.

Apabila dibandingkan foto mikro permukaan spesimen dari ketiga variasi rasio kecepatan 6.7, 10.7 dan 16.5, maka dapat disebutkan bahwa keausan yang terbentuk akibat dari gesekan banyak arah merupakan keausan dengan metode abrasif. Dapat juga disebutkan bahwa semakin banyak perubahan arah gesekan telah menyebabkan goresan-goresan yang semakin banyak dan dengan arah gesekan yang semakin bervariasi, namun dengan dimensi goresan yang semakin berkurang. Jika diperhatikan secara seksama, dapat dilihat bahwa pada foto mikro permukaan

spesimen uji dengan rasio kecepatan 10.7, keausan yang terbentuk cenderung lebih dalam jika dibandingkan dengan keausan pada permukaan spesimen uji dengan rasio kecepatan 6.7 juga 16.5. Hal tersebut disebabkan karena pada pengujian dengan rasio kecepatan 10.7 seringkali kecepatan kontak bernilai nol, dimana pada kondisi seperti ini akan terjadi fenomena yang dikenal dengan *stick slip*, sebuah fenomena yang menyebabkan keausan bertambah besar karena secara sesaat koefisien gesek yang berperan adalah koefisien gesek statis yang nilainya lebih besar dari koefisien gesek kinetik, sehingga keausan yang dihasilkan pun lebih dalam.

4.3 Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Berpelumas

4.3.1 Analisa Laju Keausan

Pada pengujian gesekan banyak arah berpelumas ini, ditambahkan cairan pelumas diantara pin dan disk saat dilakukan pengujian. Penambahan pelumas dalam hal ini dimaksudkan agar tidak terjadi kontak langsung antara kedua permukaan pin dengan permukaan disk sehingga dapat menghindari terjadinya keausan yang maksimum akibat dari efek gesekan.

Hasil pengolahan data pengujian *Multi-Directional Friction* material *Ultra High Molecular Weight Polyethylene* (UHMWPE) dengan *Stainless Steel* AISI 304 da lam kondisi berpelumas dengan berbagai variasi rasio kecepatan putar antara pin dan disk ditunjukkan pada Tabel 4.4 sampai 4.6

Tabel 4.4 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Kurang Dari 10 (Rasio = 6.7 \rightarrow ω Disk = 59.2 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0006	39.2	600	14.885	40	0.94	0.638298	2.71385E-05
2	0.0005	39.2	600	14.885	40	0.94	0.531915	2.26154E-05
3	0.0004	39.2	600	14.885	40	0.94	0.425532	1.80923E-05
Rata-rata :	0.0005	39.2	600	14.885	40	0.94	0.531915	2.26154E-05

Tabel 4.5 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Berada Diantara 10 dan 15 (Rasio = 10.7 \rightarrow ω Disk = 37.5 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0007	39.2	600	9.429	64	0.94	0.744681	3.16616E-05
2	0.0008	39.2	600	9.429	64	0.94	0.851064	3.61847E-05
3	0.0004	39.2	600	9.429	64	0.94	0.425532	1.80923E-05
Rata-rata :	0.00063	39.2	600	9.429	64	0.94	0.673759	2.86462E-05

Tabel 4.6 Hasil Pengolahan Data Pengujian Laju Keausan Dengan Rasio Kecepatan Putar Antara Pin Dan Disk Lebih Dari 15 (Rasio = 16.5 \rightarrow ω Disk = 24.4 rpm)

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
----------	----------------------	----------	----------	----------------	--------------	-----------------------------------	----------------------------------	----------------------------

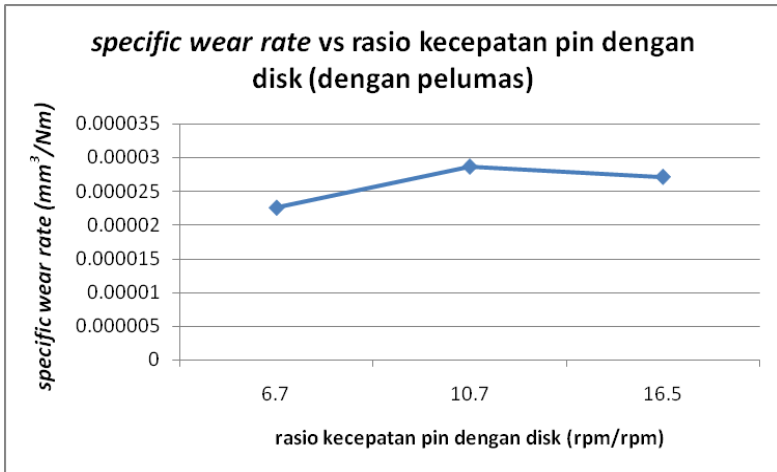
1	0.0005	39.2	600	6.135	98	0.94	0.531915	2.26154E-05
2	0.0007	39.2	600	6.135	98	0.94	0.744681	3.16616E-05
3	0.0006	39.2	600	6.135	98	0.94	0.638298	2.71385E-05
Rata-rata :								
Rata-rata :	0.0006	39.2	600	6.135	98	0.94	0.638298	2.71385E-05

Keterangan :

- Δm = Perubahan massa pin
- F = Beban
- ρ = Massa jenis pin
- L = *Sliding distance*
- ΔV = Perubahan volume pin
- t = Waktu pengujian
- v = Kecepatan relatif pusat pin terhadap disk
- K = Laju keausan

Sama halnya dengan pengolahan data pengujian tanpa pelumas, data hasil pengujian berpelumas juga terdiri dari besar perubahan massa pin (Δm) yang disertai dengan data-data variabel pengujian yang sama, yaitu pembebanan (F), kecepatan gesek (v) dan jarak gesekan (L). Adapun waktu pengujian pada dasarnya merupakan hasil pembagian dari jarak gesek terhadap kecepatan gesek.

Data perubahan volume pin (ΔV) yang merupakan hasil kalkulasi massa pin dengan massa jenis pin selanjutnya dikalkulasikan dengan data-data F dan L ke dalam formula $K = \frac{\Delta V}{FL}$ sehingga diperoleh harga laju keausan (K) yang selanjutnya di plot ke dalam grafik untuk melihat efek dari perubahan rasio kecepatan terhadap laju keausan (*specific wear rate*).



Gambar 4.4 Grafik Perubahan Laju Keausan Terhadap Perubahan Rasio Kecepatan Antara Pin Dan Disk Dengan Kondisi Pengujian Berpelumas

Grafik pada Gambar 4.4 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan antara besarnya laju keausan dengan perubahan rasio kecepatan antara pin dan disk pada pengujian gesekan berpelumas material UHMWPE terhadap material *stainless steel*. Pada grafik tersebut ditampilkan besarnya laju keausan dengan satuan mm³/Nm sebagai sumbu vertikal dan perubahan rasio kecepatan dengan satuan rpm/rpm sebagai sumbu horizontal. Pada grafik ditampilkan perubahan harga laju keausan hanya untuk 3 buah rasio kecepatan yang berbeda.

Pada grafik dalam Gambar 4.4 dapat dilihat besar laju keausan untuk rasio kecepatan 6.7 adalah sebesar 2.26154E-05. Nilai tersebut kemudian mengalami peningkatan sampai 2.86462E-05 ketika rasio kecepatan telah berubah menjadi 10.7. Namun, harga laju keausan selanjutnya mengalami penurunan yang tidak begitu signifikan menjadi 2.71385E-05 ketika rasio kecepatan menjadi 16.5

Peningkatan laju keausan untuk pengujian dengan rasio kecepatan 6.7 sampai rasio kecepatan 10.7 menunjukkan bahwa semakin banyak perubahan arah kecepatan akan menyebabkan laju keausan yang semakin meningkat. Selanjutnya penurunan laju keausan dari rasio kecepatan 10.7 sampai 16.5 mungkin terjadi karena perubahan arah kecepatan untuk rasio kecepatan 10.7 memiliki perbedaan yang tidak begitu signifikan dengan perubahan arah kecepatan untuk rasio kecepatan 16.5. Terjadinya penurunan rata-rata resultan kecepatan seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2 mungkin menjadi penyebab terjadinya penurunan laju keausan, dimana rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 10.7 adalah 12.4946 m/menit, sedangkan rata-rata resultan kecepatan untuk rasio kecepatan 16.5 adalah 11.0815 m/menit.

4.3.2 Analisa Permukaan Kontak

Perubahan rasio kecepatan selain berpengaruh terhadap perubahan harga laju keausan juga mempunyai pengaruh terhadap kontur permukaan spesimen. Adapun pengaruh tersebut dapat dilihat pada foto mikro permukaan spesimen uji hasil penelitian gesekan banyak arah berpelumas seperti ditunjukkan oleh Gambar 4.5 berikut.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.5 Foto Mikro Permukaan Spesimen Dengan Perbesaran 100x Setelah Dilakukan Pengujian Berpelumas Untuk Rasio Kecepatan (a) 6.7 (b) 10.7 dan (c) 16.5

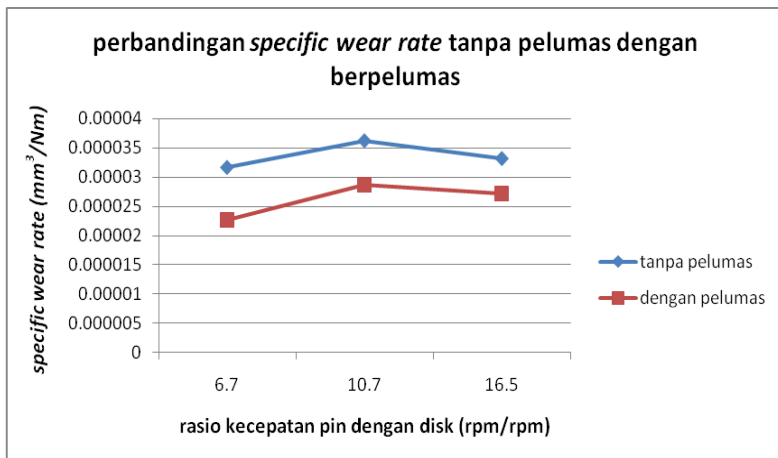
Pada Gambar 4.5 di atas dapat dilihat permukaan spesimen uji dengan perbesaran 100x setelah dilakukan pengujian gesekan banyak arah dengan kondisi berpelumas. Gambar 4.5.a

merupakan foto mikro permukaan spesimen untuk pengujian dengan rasio kecepatan 6.7, Gambar 4.5.b untuk pengujian dengan rasio kecepatan 10.7 dan Gambar 4.5.c merupakan foto mikro permukaan spesimen untuk pengujian dengan rasio kecepatan 16.5 Pada gambar a dapat dilihat goresan berupa garis yang mendekati horizontal, sedangkan pada gambar b dan c ditunjukkan keausan berupa goresan berbentuk miring.

Pada ketiga gambar tersebut, bentuk keausan yang ditemukan hanya berupa garis-garis tanpa satupun ditemukan pola keausan berupa delaminasi, adhesif ataupun korosif. Hal tersebut menunjukkan bahwa hanya keausan dengan mekanisme abrasif yang terjadi selama dilakukan pengujian gesekan banyak arah berpelumas. Jika dibandingkan dengan permukaan spesimen hasil pengujian tanpa pelumas, goresan-goresan yang terbentuk pada spesimen ini tampak memiliki dimensi yang lebih halus. Lebih halusnya goresan-goresan yang terbentuk menunjukkan bahwa adanya pelumas telah mengurangi dampak kerusakan akibat kontak permukaan.

4.4 Perbandingan Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Tanpa Pelumas Dengan Berpelumas

Perbandingan harga keausan dari material UHMWPE untuk pengujian *Multi-directional Friction* tanpa pelumas dengan berpelumas dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut.



Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Laju Keausan (*Specific Wear Rate*) Dengan Kondisi Tanpa Pelumas Dengan Berpelumas

Grafik pada Gambar 4.6 merupakan grafik yang menunjukkan perbandingan antara laju keausan akibat gesekan banyak arah tanpa pelumas dengan laju keausan akibat gesekan banyak arah berpelumas dengan garis berwarna biru mewakili hasil pengujian tanpa pelumas dan garis berwarna merah mewakili hasil pengujian berpelumas. Pada grafik di atas dibandingkan bagaimana perubahan laju keausan terhadap perubahan rasio kecepatan untuk kedua pengujian tersebut, sebagai sumbu vertikal merupakan laju keausan dalam satuan mm^3/Nm dan sebagai sumbu horizontal merupakan rasio kecepatan antara pin dan disk dalam satuan rpm/rpm.

Pada grafik di atas, dapat dilihat bahwa secara keseluruhan garis berwarna biru mempunyai tren yang sama dengan garis berwarna merah. Kedua garis mempunyai tren yang sama-sama meningkat dengan meningkatnya rasio kecepatan dari 6.7 menuju 10.7 dan selanjutnya kedua garis tersebut mempunyai tren yang sama-sama menurun seiring meningkatnya rasio

kecepatan dari 10.7 menuju 16.5. Pada grafik di atas juga dapat dilihat bahwa keausan yang dihasilkan oleh gesekan tanpa pelumas memiliki nilai yang lebih besar dibanding keausan yang dihasilkan oleh gesekan berpelumas, baik untuk rasio kecepatan berapapun. Adapun besar laju keausan antara tanpa pelumas dengan berpelumas memiliki selisih sebesar $9.04617E-06$ untuk rasio kecepatan 6.7, sebesar $7.53848E-06$ untuk rasio kecepatan 10.7 dan sebesar $6.03078E-06$ untuk rasio kecepatan 16.5

Berdasarkan data pada grafik di atas dapat disebutkan bahwa adanya pelumas telah meminimalisir terjadinya keausan. Pada rasio kecepatan 6.7, persentase penurunan angka keausan mencapai angka 28%, sedangkan pada rasio kecepatan 10.7 persentase penurunan angka keausan adalah sebesar 21% dan pada rasio kecepatan 16.5 persentase penurunan angka keausan hanya berkisar 18%. Terjadinya penurunan angka keausan pada semua titik rasio kecepatan menunjukkan bahwa penggunaan pelumas merupakan salah satu langkah yang tepat dalam mengurangi keausan.

4.5 Perbandingan Keausan Akibat Gesekan Banyak Arah Dengan Akibat Gesekan Satu Arah

Pada sub bab ini akan dilihat bagaimana pengaruh berubah-ubahnya arah gesekan terhadap besarnya laju keausan. Adapun pengaruh tersebut akan dilihat dengan membandingkan keausan yang dihasilkan oleh gesekan banyak arah (*Multi-directional Friction*) terhadap keausan yang dihasilkan oleh gesekan satu arah (*One-directional Friction*) pada pengujian gesekan material UHMWPE terhadap *Stainless Steel*. Adapun perbandingan laju keausan ini hanya dibatasi pada pengujian dengan *speed control* = 50 (kecepatan disk = 37.5 rpm).

Pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 berikut ditampilkan hasil pengolahan data pengujian gesekan satu arah yang akan dibandingkan dengan data keausan dari gesekan banyak arah.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Gesekan Satu Arah Tanpa Pelumas Dengan Kecepatan Disk = 37.5 rpm

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0005	39.2	600	9.429	64	0.94	0.531915	2.26154E-05
2	0.0006	39.2	600	9.429	64	0.94	0.638298	2.71385E-05
3	0.0004	39.2	600	9.429	64	0.94	0.425532	1.80923E-05
Rata-rata :	0.0005	39.2	600	9.429	64	0.94	0.531915	2.26154E-05

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Gesekan Satu Arah Berpelumas Dengan Kecepatan Disk = 37.5 rpm

Data ke-	Δm (gram)	F (N)	L (m)	v (m/menit)	t (menit)	ρ (gram/cm ³)	ΔV (mm ³)	K (mm ³ /Nm)
1	0.0004	39.2	600	9.429	64	0.94	0.425532	1.80923E-05
2	0.0003	39.2	600	9.429	64	0.94	0.319149	1.35693E-05
3	0.0002	39.2	600	9.429	64	0.94	0.212766	9.04617E-06
Rata-rata :	0.0003	39.2	600	9.429	64	0.94	0.319149	1.35693E-05

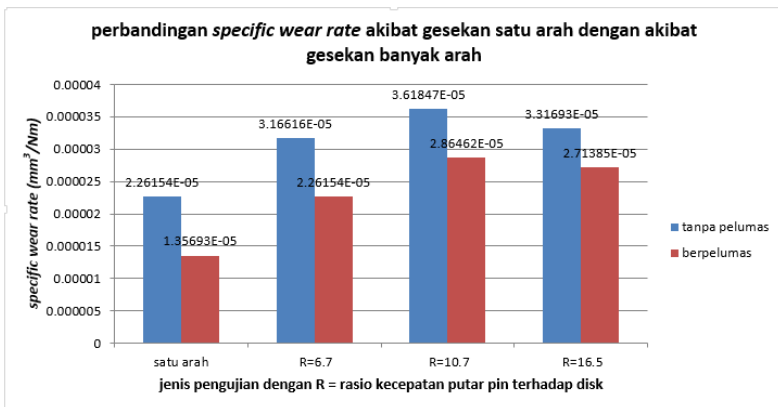
Keterangan :

- Δm = Perubahan massa pin
- F = Beban
- ρ = Massa jenis pin
- L = *Sliding distance*
- ΔV = Perubahan volume pin
- t = Waktu pengujian

- v = Kecepatan relatif pusat pin terhadap disk
 K = Laju keausan

Tabel 4.7 dan Tabel 4.8 di atas merupakan dua buah tabel yang menampilkan hasil pengolahan data gesekan satu arah dengan variabel uji yang sama dengan yang digunakan pada pengujian gesekan banyak arah, yaitu pembebanan statis sebesar 39.2 N dan jarak gesek sejauh 600 m. Hasil pengambilan data berupa perubahan massa pin (Δm) selanjutnya diolah menjadi data perubahan volume (ΔV) yang selanjutnya digunakan dalam menghitung besar laju keausan (K) dalam formula $K = \frac{\Delta V}{FL}$

Hasil pengolahan data berupa laju keausan selanjutnya ditampilkan dalam bentuk grafik untuk dibandingkan dengan laju keausan dari gesekan banyak arah yang menggunakan *speed control* = 50 sebagai variabel pengujiannya.



Gambar 4.7 Bagan Perbandingan Laju Keausan Akibat Gesekan Satu Arah Dengan Akibat Gesekan Banyak Arah

Bagan pada Gambar 4.7 merupakan bagan yang menampilkan perbandingan laju keausan dari gesekan banyak

arah terhadap laju keausan dari gesekan satu arah dengan kolom biru mewakili pengujian gesekan tanpa pelumas dan kolom merah mewakili pengujian gesekan berpelumas. Pada bagan tersebut, digunakan laju keausan dengan satuan mm^3/Nm sebagai sumbu vertikal dan jenis pengujian yang terdiri dari pengujian satu arah dan pengujian banyak arah dengan tiga variasi rasio kecepatan sebagai sumbu horizontal.

Pada bagan di atas dapat dilihat bahwa gesekan banyak arah menghasilkan laju keausan yang lebih besar jika dibandingkan gesekan satu arah, baik itu pada pengujian dengan rasio kecepatan 6.7, 10.7 ataupun 16.5. Berdasarkan data pada bagan di atas dapat diketahui bahwa pada pengujian tanpa pelumas laju keausan yang dihasilkan oleh gesekan satu arah adalah sebesar $2.26154\text{E-}05$, lebih kecil dibandingkan laju keausan yang dihasilkan oleh gesekan banyak arah yang berada pada *range* antara $3.16616\text{E-}5$ sampai $3.61847\text{E-}05$. Pada pengujian berpelumas juga ditemukan fenomena yang sama, yaitu gesekan satu arah yang mempunyai laju keausan sebesar $1.35693\text{E-}05$, juga lebih kecil dibanding laju keausan akibat gesekan banyak arah yang berada pada *range* antara $2.26154\text{E-}5$ sampai $2.86462\text{E-}05$.

Terjadinya peningkatan laju keausan baik pada pengujian tanpa pelumas maupun pada pengujian berpelumas terjadi karena adanya peningkatan rata-rata kecepatan juga karena berubah-ubahnya arah gesekan. Pada gesekan satu arah, rata-rata kecepatan adalah sebesar 9.429 m/menit, sedangkan pada gesekan banyak arah rata-rata kecepatan mencapai 11.0815 m/menit untuk rasio kecepatan 16.5, sebesar 12.495 m/menit untuk rasio kecepatan 10.7 dan 16.6789 m/menit untuk rasio kecepatan 6.7. Pada proses gesekan satu arah, *asperities* dari permukaan material hanya akan melakukan proses *cutting* pada jalur yang berupa garis lurus saja, sedangkan pada proses gesekan yang arahnya berubah-ubah telah memungkinkan semakin luasnya ruang lingkup proses *cutting* yang dilakukan oleh *asperities* sehingga

semakin banyak material pada permukaan spesimen yang dapat dipotong oleh *asperities* tersebut. Sebagaimana diketahui bahwa semakin banyak material yang terpotong saat mengalami kontak permukaan mengindikasikan semakin besarnya volume aus yang berarti semakin cepat keausan terjadi.

BAB V

KESIMPULAN

Berbagai kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Gesekan banyak arah (*Multi-Directional Friction*) menghasilkan keausan yang lebih besar dibanding gesekan satu arah (*Uni-Directional Friction*)
2. Pada gesekan banyak arah (*Multi-Directional Friction*) hasil kombinasi dua buah gerak rotasi, baik itu gesekan tanpa pelumas maupun gesekan berpelumas, besar laju keausan material akan semakin meningkat seiring dengan berubahnya rasio kecepatan dari 6.7 menjadi 10.7. Namun, laju keausan akan mengalami penurunan ketika rasio kecepatan berubah dari 10.7 menjadi 16.5
3. Gesekan banyak arah (*Multi-Directional Friction*) tanpa pelumas (*Dry Friction*) akan menghasilkan keausan yang lebih besar jika dibandingkan dengan gesekan banyak arah yang disertai pelumas (*Lubricated Friction*).
4. Material dengan pembebanan statis sebesar 39.2 N akan mengalami keausan dengan mekanisme abrasif ketika mengalami gesekan banyak arah (*Multi-Directional Contact Friction*), baik itu gesekan dalam kondisi tanpa pelumas maupun dalam kondisi berpelumas.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Khonsari, M. Michael. 2001. **Applied Tribology : Bearing Design and Lubrication**. New York : John Wiley & Sons, INC.
- Ludema, C. Kenneth. 1996. **Friction, Wear, Lubrication : A Textbook in Tribology**. USA : CRC Press.
- Susastro. 2013. **Studi Eksperimental Laju Keausan Pada 2 Buah *High Density Polyethylene* (HDPE) Dengan Variasi *Normal Load* Pada Kondisi *Reciprocating* Sebagai Sendi Rahang (*Temporomandibular Joint*) Manusia**. Surabaya.
- 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.
- Hutchings, I. M. 1992. **Tribology : Friction And Wear of Engineering Materials**. London : Arnold.
- Stachowiak, G., dan Batchelor, AW. 2005. **Engineering Tribology**. United Kingdom : Butterworth-Heinemann.
- Wikipedia. (30 April 2013). **Gaya Gesek**. Dari http://id.wikipedia.org/wiki/Gaya_gesek [07 Mei 2013]
- Wikipedia. (04 Maret 2013). **Wear**. Diperoleh dari <http://en.wikipedia.org/wiki/Wear> [08 Mei 2013]
- Kopeliovich, Dr. Dmitri. (01 Juni 2012). **Mechanism of Wear**. Diperoleh dari

http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear [12 Mei 2013]

Wikipedia. (05 April 2013). **Pelumas**. Diperoleh dari <http://id.wikipedia.org/wiki/Pelumas> [09 September 2013]

Wikipedia. (30 Maret 2013). **Polyethylene**. Dari <http://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene> [08 Mei 2013]

BIODATA PENULIS

Muhammad Hasry Ritonga adalah nama lengkap penulis, berasal dari suku batak bermarga Ritonga. Tetapi, karena terjadi kesalahan *entry* data pada ijazah SMP, nama Ritonga tidak ditampilkan pada KTP penulis. Penulis dilahirkan sebagai anak keempat dari enam bersaudara, oleh ibunda Shafni Wati Nasution, hasil dari benih ayahanda Saparuddin Ritonga, di Padangsidempuan, sebuah kota kecil di bagian selatan Sumatra Utara, pada bulan ramadhan tahun

1412 H. Setelah berumur lima tahun, penulis mengawali pendidikan formal di SD N 200102 / 02 PSP dan kemudian selama enam tahun melanjutkan pendidikan di SMP-SMA S Nurul 'Ilmi Padangsidempuan. Pada tahun 2009, penulis merantau ke Surabaya untuk menimba ilmu di Teknik Mesin ITS. Di Surabaya, penulis berkumpul bersama teman-teman seperantauan dan tergabung dalam perkumpulan pemuda-pemudi muslim batak di Surabaya, yang bernama *Posniroha*. Selama empat setengah tahun, penulis menempuh pendidikan di Teknik Mesin ITS, ditempa oleh guru-guru hebat menjadi seorang sarjana tampan, Cerdas Amanah dan Kreatif, yang berbakti kepada agama, keluarga, nusa dan bangsa. *aamin...*