# ANALISIS PENGARUH *SURFACE TEXTURING* POLA 45° DARI ARAH GERAK TERHADAP KURVA *STRIBECK* PADA *NEEDLE THRUST BEARING*

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat**
**Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Mesin**


**Disusun Oleh :**

**Nama : Fadhlan Rifqii Kurniawan**

**No. Mahasiswa : 21525036**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**
**FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**
**UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**
**YOGYAKARTA**


**2026**

## LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

# ANALISIS PENGARUH *SURFACE TEXTURING* POLA 45° DARI ARAH GERAK TERHADAP KURVA *STRIBECK* PADA *NEEDLE THRUST BEARING*

**TUGAS AKHIR**


**Disusun Oleh :**

**Nama : Fadhlan Rifqii Kurniawan**

**No. Mahasiswa : 21525036**


Yogyakarta, 12 Februari 2026

Pembimbing,



Muhammad Khafidh, Dr. Ir., S.T., M.T., IPP

## LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

# ANALISIS PENGARUH *SURFACE TEXTURING* POLA 45° DARI ARAH GERAK TERHADAP KURVA *STRIBECK* PADA *NEEDLE THRUST BEARING*

**TUGAS AKHIR**

**Disusun Oleh :**

**Nama : Fadhlan Rifqii Kurniawan**

**No. Mahasiswa : 21525036**

Tim Penguji

| | |
|---|---|
| Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP<br>Ketua | Tanggal: 2-3-2026. |
| Yustiasih Purwaningrum, S.T., M.T.<br>Anggota 1 | Tanggal: 3/3/2026 |
| Ir. Purtojo, S.T., M.Sc.<br>Anggota 2 | Tanggal: 03032026 |

*Mengetahui*

Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP**

# PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil karya saya sendiri. Segala bentuk kutipan, ringkasan, atau rujukan dari karya orang lain telah dicantumkan sumbernya sesuai dengan kaidah penulisan yang berlaku. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil plagiasi atau dibuat oleh pihak lain, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku di Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 12 Februari 2026




Fadhlan Rifqii Kurniawan

21525036

# HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini saya persembahkan untuk:

- **Papa dan Mama yang tercinta**

  *Terima kasih karena selalu memberikan doa, semangat, dukungan, dan nasehat yang tiada pernah ada hentinya sampai penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.*

- **Keluarga yang tercinta**

  *Terima kasih kepada Adik, Pakde, Bude, Kakek, dan Nenek yang senantiasa memberi doa, semangat, dan dukungan yang tiada pernah ada hentinya.*

- **Teman-Teman Seperjuangan**

  *Terima kasih kepada Athif, Kamal, Raihan, Naufal, Fuad, Anindya, Reza, Erza, Fierel, Bimo, dan Ferre yang membuat kehidupan kuliah saya di Jogja menjadi lebih berwarna dan bahagia.*

- **Keluarga Wisma Muslim Yogyakarta**

  *Terima kasih kepada teman-teman wisma muslim yang telah menerima dan membimbing saya agar menjadi pribadi yang lebih baik.*

- **Keluarga Teknik Mesin 2021**

  *Terima kasih kepada saudara-saudaraku angkatan 2021 yang telah menerima dan menjadikan saya bagian dari keluarga selama kuliah di kampus tercinta ini.*

Dan untuk mereka yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu, mereka yang membuat penulis sampai seperti sekarang ini.

## HALAMAN MOTTO

"Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain)."

QS. Al-Insyirah: 6–7

“Wahai orang-orang yang beriman, mohonlah pertolongan (kepada Allah) dengan sabar dan salat. Sesungguhnya Allah beserta orang-orang yang sabar.”

(Q.S. Al-Baqarah: 153)

# KATA PENGANTAR

*Bismillahirrahmanirrahim, Alhamdulillahirabbil'alamin,* segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayah, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga pelaksanaan dan penulisan Laporan Tugas Akhir dengan judul "Analisis Pengaruh *Surface Texturing* Pola 45° dari Arah Gerak Terhadap Kurva *Stribeck* pada *Needle Thrust Bearing*" dapat diselesaikan dengan baik. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karenanya, dengan kerendahan hati, penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Muhammad Khafidh, S.T., M.T., IPP selaku Dosen Pembimbing, serta segenap dosen dan staf atas segala ilmu, bimbingan, arahan, serta motivasi yang selalu diberikan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini maupun selama menempuh pendidikan di Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia.
2. Seluruh teman-teman mahasiswa yang telah membersamai penulis dalam menuntut ilmu selama masa studi, dan tak henti memberikan dukungan positif selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.

Penulis memahami bahwa proses dalam Tugas Akhir ini merupakan bagian dari dinamika pembelajaran yang tak luput dari kesalahan. Maka dari itu, masukan dari berbagai pihak sangat memperkaya perspektif dan meningkatkan kualitas penelitian ini. Penulis berharap karya ini dapat berkontribusi positif dan menjadi referensi awal dalam pengembangan *surface texturing* pada *bearing* yang lebih baik kedepannya.

# ABSTRAK

Gesekan pada *needle thrust bearing* berperan penting dalam menentukan efisiensi dan keandalan sistem mekanik, khususnya pada kondisi beban aksial dan kecepatan rendah hingga menengah. Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan untuk mengendalikan adalah penerapan *surface texturing*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *surface texturing* pola 45° terhadap arah gerak serta variasi kedalaman tekstur terhadap karakteristik koefisien gesek pada *needle thrust bearing*. Spesimen uji yang digunakan berupa *disc* Alumunium Dural 6061 yang diberi perlakuan *surface texturing* menggunakan *laser marking* dengan variasi 5 (dangkal) dan 15 siklus (dalam) yang kemudian diuji menggunakan tribometer *pin on disc* pada berbagai kecepatan putar untuk merepresentasikan rezim pelumasan *boundary*, *mixed*, dan *hydrodynamic*. Hasil menunjukkan bahwa penerapan *surface texturing* pola 45° secara signifikan menurunkan gaya gesek dibandingkan spesimen tanpa tekstur. Pada kecepatan 300 RPM, spesimen 5 dan 15 siklus masing-masing menurunkan gaya gesek sebesar 30,13% dan 47,35%, sedangkan pada kecepatan 1750 RPM penurunan masing-masing mencapai 18,5% dan 20,81%. Variasi kedalaman tekstur memengaruhi kestabilan gesek pada kecepatan menengah hingga tinggi, di mana spesimen 5 siklus menunjukkan performa yang lebih stabil dibandingkan 15 siklus. Selain itu, penerapan *surface texturing* mampu mempercepat transisi rezim pelumasan yang ditunjukkan oleh tercapainya nilai gaya gesek yang lebih rendah pada kecepatan yang lebih kecil dibandingkan spesimen tanpa tekstur.

**Kata Kunci:** *surface texturing*, *laser surface texturing*, gaya gesek, *needle thrust bearing,* kurva *Stribeck*

# ABSTRACT

*Friction in needle thrust bearings plays a crucial role in determining the efficiency and reliability of mechanical systems, particularly under axial loading and low to medium speed conditions. One widely developed approach to friction control is the application of surface texturing. This study aims to analyze the effect of 45° surface texturing relative to the direction of motion, as well as the influence of texture depth variation, on the friction coefficient characteristics of needle thrust bearings. The test specimens consisted of Aluminum Dural 6061 discs subjected to laser surface texturing with variations of 5 cycles for shallow texture and 15 cycles for deep texture, followed by friction testing using a pin on disc tribometer at various rotational speeds to represent boundary, mixed, and hydrodynamic lubrication regimes. The results show that the application of 45° surface texturing significantly reduces the friction force compared to non textured specimens. At a rotational speed of 300 rpm, the 5 and 15 cycle textured specimens reduced the friction force by 30.13% and 47.35%, respectively, while at 1750 rpm the reductions reached 18.5% and 20.81%. Texture depth variation affected friction stability at medium to high speeds, with the 5 cycle textured specimen exhibiting more stable performance than the 15 cycle specimen. Furthermore, surface texturing accelerated the transition between lubrication regimes, as evidenced by the achievement of lower friction forces at lower rotational speeds compared to the non-textured specimen.*

***Keywords**: surface texturing, laser surface texturing, friction force, needle thrust bearing, Stribeck curve*

# DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan Dosen Pembimbing ..... ii
Lembar Pengesahan Dosen Penguji ..... iii
Pernyataan Keaslian ..... iii
Halaman Persembahan ..... v
Halaman Motto ..... vi
Kata Pengantar ..... vii
Abstrak ..... viii
Abstract ..... ix
Daftar Isi ..... x
Daftar Tabel ..... xii
Daftar Gambar ..... xiii
Bab 1 Pendahuluan ..... 1
1.1 Latar Belakang ..... 1
1.2 Rumusan Masalah ..... 3
1.3 Batasan Masalah ..... 3
1.4 Tujuan Penelitian ..... 3
1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan ..... 4
1.6 Sistematika Penulisan ..... 4
Bab 2 Tinjauan Pustaka ..... 6
2.1 Kajian Pustaka ..... 6
2.2 Klasifikasi *Bearing* ..... 7
2.2.1 *Thrust bearing* ..... 9
2.2.2 *Needle thrust bearing* ..... 10
2.3 Pelumasan pada *Bearing* ..... 12
2.3.1 Rezim pelumasan ..... 12
2.3.2 Kurva *Stribeck* ..... 14
2.4 Keausan pada *Bearing* ..... 15
2.4.1 Keausan *adhesive* ..... 16
2.4.2 Keausan *abrasive* ..... 16

2.5 *Surface Texturing* ..... 17
2.5.1 *Laser Surface Texturing* (LST) ..... 18
2.5.2 Geometri tekstur ..... 19
Bab 3 Metodologi Penelitian ..... 20
3.1 Alur Penelitian ..... 20
3.2 Objek dan Kriteria Desain Spesimen ..... 21
3.3 Peralatan dan Bahan ..... 22
3.4 Proses Produksi ..... 23
3.4.1 Pembuatan spesimen uji *disc* ..... 23
3.4.2 Spesimen pin *roller* ..... 26
3.5 Pengujian Spesimen ..... 28
3.5.1 Pengujian kekerasan ..... 28
3.5.2 Pengujian gesekan ..... 30
3.5.3 Pengujian mikroskopik ..... 33
Bab 4 Hasil dan Pembahasan ..... 35
4.1 Karakterisasi Spesimen Uji ..... 35
4.1.1 Visualisasi *surface texturing* ..... 35
4.1.2 Geometri tekstur ..... 36
4.1.3 Pengujian kekerasan ..... 37
4.2 Hasil Pengujian Gesekan ..... 38
4.2.1 Tanpa tekstur (TP) ..... 40
4.2.2 5 siklus ..... 42
4.2.3 15 siklus ..... 44
4.2.4 Perbandingan spesimen dengan perlakuan *surface texturing* dengan tanpa tekstur ..... 46
4.3 Evaluasi Visual Keausan Pasca Pengujian ..... 51
Bab 5 Penutup ..... 54
5.1 Kesimpulan ..... 54
5.2 Saran ..... 55
Daftar Pustaka ..... 56
Lampiran ..... 60

# DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Peralatan yang digunakan pada penelitian ini. ..... 22
Tabel 3.2 Bahan yang digunakan pada penelitian ini.. ..... 23
Tabel 3.3 Rencana pengujian..... 32
Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan pin *roller*..... 37
Tabel 4.2 Kekerasan Alumunium Dural 6061..... 38
Tabel 4.3 Nilai gaya gesek spesimen TP..... 40
Tabel 4.4 Nilai gaya gesek spesimen 5 siklus ..... 42
Tabel 4.5 Nilai gaya gesek spesimen 15 siklus. ..... 44

# DAFTAR GAMBAR

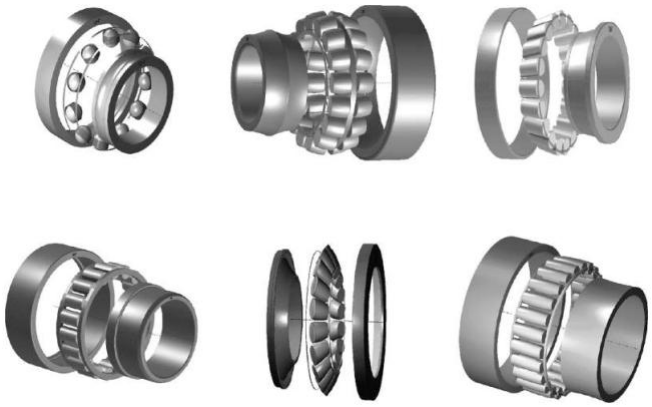

Gambar 1.1 Contoh jenis-jenis *bearing* [1]. ..... 1
Gambar 2.1 Arah pembebanan pada *bearing* [22]. ..... 8
Gambar 2.2 Klasifikasi *bearing* menurut mekanisme kontak: (a) *Sliding contact bearing* dan (b) *Roller contact bearing* [22]. ..... 8
Gambar 2.3 Jenis *bearing* berdasarkan arah beban: (a) *journal bearing*, (b) *thrust bearing* [25]. ..... 9
Gambar 2.4 Ilustrasi skema *thrust bearing* [26]. ..... 9
Gambar 2.5 Komponen *needle thrust bearing.* ..... 11
Gambar 2.6 Kurva *stribeck.* ..... 14
Gambar 2.7 Jenis keausan: (a) keausan *adhesive* dan (b) keausan *abrasive.* . 15
Gambar 2.8 SEM *micrograph* keausan *adhesive* pada permukaan *stainless steel shaft.* Dengan arah *sliding* vertikal [1]. ..... 16
Gambar 2.9 SEM *micrograph* keausan *abrasive* pada permukaan *stainless steel shaft*. Dengan arah *sliding* vertikal [1]. ..... 17
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian. ..... 20
Gambar 3.2 Dimensi desain spesimen uji *disc.* ..... 24
Gambar 3.3 Proses pembubutan Alumunium Dural 6061. ..... 25
Gambar 3.4 Proses pemotongan material Alumunium Dural 6061. ..... 25
Gambar 3.5 Hasil spesimen uji *disc.* ..... 26
Gambar 3.6 *Needle thrust bearing.* ..... 27
Gambar 3.7 Proses (a) *Point welding* dan hasil (b) Pin *roller.* ..... 27
Gambar 3.8 Diagram skematik pengujian kekerasan. ..... 28
Gambar 3.9 Alat *vickers hardness test.* ..... 29
Gambar 3.10 Diagram skematik pengujian gesek. ..... 30
Gambar 3.11 Alat tribometer *pin on disc.* ..... 31
Gambar 3.12 Skematik grafik gaya gesek-waktu pengujian. ..... 32
Gambar 3.13 Alat mikroskop optik metalurgi. ..... 33
Gambar 4.1 Hasil *laser marking*: (a) 5 siklus & (b) 15 siklus. ..... 35
Gambar 4.2 Geometri *pattern surface texturing*: (a) 5 siklus (b) 15 siklus. .. 36
Gambar 4.3 Contoh hasil pengujian kekerasan. ..... 37

Gambar 4.4 Hasil pengujian gesek secara *real time*..... 39
Gambar 4.5 Data mentah hasil pengujian gesek. ..... 39
Gambar 4.6 Hasil pengujian gesek spesimen tanpa tekstur. ..... 41
Gambar 4.7 Hasil pengujian gesek spesimen 5 siklus..... 43
Gambar 4.8 Hasil pengujian gesek spesimen 15 siklus..... 45
Gambar 4.9 Perbandingan hasil pengujian spesimen tanpa tekstur, 5 siklus, dan 15 siklus. ..... 46
Gambar 4.10 Perbandingan gaya gesek antar variasi *surface texturing* pada kecepatan 300 rpm. ..... 47
Gambar 4.11 Perbandingan gaya gesek antar variasi *surface texturing* pada kecepatan 1750 rpm. ..... 49
Gambar 4.12 Hasil pengamatan mikroskop spesimen *disc* TP dengan perbesaran (a)5x dan (b) 20x. ..... 51
Gambar 4.13 Hasil pengamatan mikroskop spesimen 5 siklus dengan perbesaran (a)5x dan (b) 10x. ..... 52
Gambar 4.14 Hasil pengamatan mikroskop spesimen *disc* 15 siklus dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x. ..... 53

# BAB 1
# PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Gesekan dan keausan merupakan permasalahan utama dalam sistem tribologi yang secara langsung memengaruhi efisiensi energi, umur pakai komponen, serta keandalan sistem mekanik, khususnya pada aplikasi *bearing*. Pada *thrust bearing*, kondisi kontak yang didominasi oleh beban aksial dan kecepatan yang relatif tinggi menyebabkan terjadinya kehilangan energi akibat gesekan dan percepatan mekanisme keausan. Dalam kondisi ideal, sistem *bearing* diharapkan mampu beroperasi dengan koefisien gesek yang rendah dan stabil.



Gambar 1.1 Contoh jenis-jenis *bearing* [1].

Sebagai respons terhadap permasalahan tersebut, penelitian terkait *surface texturing* berkembang sebagai salah satu pendekatan yang efektif untuk meningkatkan performa tribologis. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tekstur mikro pada permukaan dapat berperan sebagai reservoir pelumas, pembangkit tekanan *hydrodynamic* mikro, serta perangkap partikel keausan (*debris trapping*), sehingga mampu menurunkan koefisien dan laju keausan [2], [3], [4]. *Laser Surface Texturing* (LST) secara khusus banyak digunakan karena kemampuannya menghasilkan tekstur dengan presisi tinggi dan fleksibilitas desain pola yang luas [5], [6].

Meskipun penelitian mengenai *surface texturing* telah banyak dilakukan, performa tribologis yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter tekstur, seperti pola, orientasi, kedalaman, dan densitas tekstur. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi konfigurasi tekstur dapat menghasilkan respons gesek yang berbeda, bahkan pada material dan kondisi operasi yang serupa [7], [8], [9]. Hal ini mengindikasikan bahwa optimasi parameter tekstur merupakan aspek krusial untuk memperoleh performa gesek yang optimal.

Dalam hal metode penelitian, penelitian mengenai *surface texturing* pada bearing masih didominasi oleh pendekatan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk memprediksi perilaku film pelumas dan distribusi tekanan *hydrodynamic* [10]. Meskipun pendekatan ini memberikan pemahaman teoritis yang baik, hasil simulasi seringkali belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi kontak nyata, terutama pada rezim pelumasan *boundary* dan *mixed* yang melibatkan interaksi asperity secara langsung. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya validasi melalui pengujian eksperimental.

Penelitian eksperimental terkait LST telah menunjukkan potensi penurunan koefisien gesek pada berbagai komponen tribologis, seperti *piston ring, journal bearing,* dan *thrust bearing* [5], [11], [12]. Namun demikian, penelitian yang secara khusus mengkaji pengaruh orientasi tekstur terhadap arah gerak serta variasi kedalaman tekstur pada *thrust bearing* masih terbatas. Selain itu, hubungan antara kedalaman tekstur dan karakteristik gesek pada berbagai rezim pelumasan belum banyak dikaji secara sistematis melalui pendekatan eksperimental.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis secara eksperimental pengaruh *surface texturing* dengan pola 45° terhadap arah gerak dengan variasi kedalaman tekstur 5 dan 15 siklus terhadap karakteristik kurva *Stribeck* pada *needle thrust bearing*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran parameter tekstur dalam meningkatkan performa tribologis serta menjadi dasar bagi pengembangan desain *bearing* yang lebih efisien.

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh *surface texturing* pada perubahan nilai gaya gesek pada kurva *Stribeck* dibandingkan dengan permukaan tanpa tekstur?
2. Bagaimana pengaruh variasi kedalaman tekstur 5 dan 15 siklus *laser marking* terhadap nilai gaya gesek pada kurva *Stribeck* selama pengujian gesek?
3. Bagaimana perubahan karakteristik kurva *Stribeck* pada rezim pelumasan *boundary, mixed,* dan *hydrodynamic*?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diterapkan dalam penelitian ini yaitu:

1. Pola tekstur yang dikaji terbatas pada bentuk 45 derajat searah dengan arah gerak.
2. Analisis data difokuskan pada karakteristik kurva *Stribeck*.
3. Variasi kedalaman tekstur dikontrol melalui jumlah siklus penembakan laser.
4. Pembebanan diberikan secara konstan sebesar 20 N selama pengujian berlangsung.
5. Kecepatan putar dibatasi pada rentang 200 hingga 2000 RPM.
6. Pelumas yang digunakan adalah oli dengan jenis ATF D-III dengan SAE 20
7. Suhu pengujian diasumsikan pada temperatur ruangan.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin diperoleh dengan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh *surface texturing* pola 45 derajat terhadap perubahan gaya gesek pada kurva *Stribeck* dibandingkan dengan spesimen tanpa *surface texturing*.
2. Menganalisis pengaruh variasi kedalaman tekstur 5 dan 15 siklus *laser marking* terhadap gaya gesek pada kurva *Stribeck* selama pengujian gesek.

3. Mengetahui perubahan karakteristik gaya gesek pada kurva *Stribeck* akibat penerapan *surface texturing* pada berbagai rezim pelumasan *boundary, mixed,* dan *hydrodynamic lubrication*.

## 1.5 Manfaat Penelitian atau Perancangan

Manfaat penelitian tugas akhir ini secara umum adalah:

1. Memberikan kontribusi ilmiah berupa data eksperimental mengenai pengaruh nyata aplikasi LST dengan pola 45 derajat terhadap karakteristik gesekan pada *needle thrust bearing* yang dapat melengkapi literatur sebelumnya yang didominasi oleh studi *Computational Fluid Dimensional* (CFD).
2. Memberikan peluang pengembangan lebih lanjut terkait optimasi parameter atau pengujian pada material dan kondisi operasi yang berbeda.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini menggunakan sistematika penulisan yang dibagi dalam lima bab. Bab-bab ini diawali dengan Pendahuluan dan diakhiri dengan Kesimpulan seperti dalam uraian berikut ini.

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang uraian latar belakang penelitian, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan yang berisikan alur isi keseluruhan dari laporan ini

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas kajian literatur serta dasar teori yang relevan dengan penelitian ini. Meliputi klasifikasi *bearing*, *needle thrust bearing*, konsep pelumasan dan rezim pelumasan, kurva *Stribeck*, mekanisme keausan pada *bearing*, serta konsep dasar *surface texturing*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan langkah penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini, mulai dari alur penelitian, alat dan bahan yang digunakan, proses produksi, hingga proses pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memaparkan analisis hasil pengujian dan pembahasan *laser surface texturing*, pengujian kekerasan, pengujian gesekan, dan pengujian mikroskop.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang didapat dari penelitian yang sudah dilakukan serta saran untuk penelitian selanjutnya.

# BAB 2
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Kajian Pustaka

Penelitian terkait penerapan *surface texturing* pada komponen sistem mekanik telah banyak dilakukan untuk merekayasa fenomena gesekan dan keausan [13]. Secara umum, pembentukan *surface texturing* dapat dilakukan melalui berbagai metode konvensional maupun non-konvensional, seperti *chemical etching*, pemesinan mekanik, *ion beam texturing*, hingga litografi. Penggunaan *surface texturing* terbukti mampu meratakan penyebaran tegangan kontak, mengingkatkan kemampuan pelumasan, serta mendukung pembentukan lapisan film pelumas yang lebih stabil [14]. Efektivitas dari tekstur permukaan sangat bergantung pada parameter desain seperti geometri, kerapatan, dan orientasi pola terhadap arah gerakan relatif permukaan [15].

Seiring dengan perkembangan penelitian kinerja *surface texturing* pada komponen mesin, khususnya *thrust bearing*, hingga saat ini masih banyak didominasi oleh pendekatan pemodelan numerik dengan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) [16], [17], [18]. Pendekatan ini umum digunakan untuk menganalisis distribusi *hydrodynamic pressure, load carrying capacity,* serta fenomena kavitasi yang muncul akibat variasi geometri tekstur mikro. Melalui simulasi tersebut, optimasi parameter geometris tekstur dapat dilakukan secara efisien untuk memprediksi kecenderungan penurunan koefisien gesek pada berbagai kondisi operasional.

Meskipun simulasi CFD mampu menghasilkan resolusi data yang tinggi, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan antara hasil pemodelan numerik dengan kondisi fisik permukaan yang sesungguhnya. Model CFD umumnya disusun dalam kondisi ideal dan cenderung mengabaikan karakteristik nyata hasil proses manufaktur, seperti residu hasil *laser marking*, deformasi tepi tekstur, serta mekanisme penangkapan partikel keausan yang berlangsung secara acak selama proses gesekan [19]. Perbedaan kondisi tersebut berpotensi menimbulkan perbedaan hasil simulasi dengan nilai koefisien gesek yang

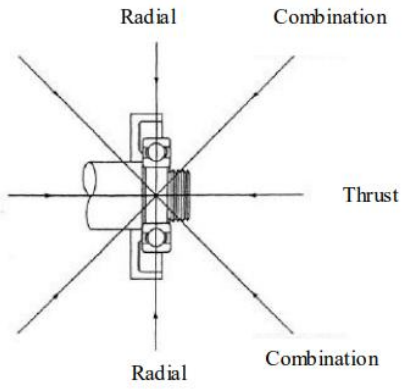
diperoleh melalui pengujian eksperimental. Oleh karena itu, pengujian langsung menggunakan tribometer menjadi langkah penting untuk memvalidasi perilaku pelumasan yang terjadi secara nyata.

Dalam penelitian ini, metode yang digunakan adalah *Laser Surface Texturing* (LST) yang dikenal sebagai salah satu teknik rekayasa permukaan paling prospektif karena tingkat presisi dan kecepatan prosesnya pada material logam [20]. Eksperimen difokuskan pada pengaruh *surface texturing* dengan pola 45° yang searah dengan arah gerak gesekan pada material Alumunium Dural 6061. Penelitian difokuskan untuk mengevaluasi kinerja tribologi kedalaman tekstur yang divariasikan melalui pengaturan jumlah siklus penembakan laser, yaitu 5 dan 15 siklus, pada rentang kecepatan 200 hingga 2000 RPM. Pendekatan ini dirancang untuk memperoleh data kinerja aktual dari penerapan LST pada material alumunium.

## 2.2 Klasifikasi *Bearing*

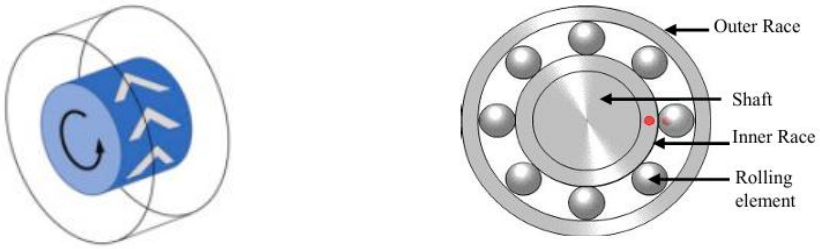
*Bearing* merupakan suatu elemen mesin yang berperan mendukung fungsi gerak suatu mesin, *bearing* memungkinkan pembatasan pergerakan realtif antar dua komponen mesin yang berkontak satu sama lain sekaligus menumpu beban [21]. *Bearing* harus bisa menumpu poros dan mencegah gesekan langsung antar poros dengan elemen mesin lainnya agar tetap bekerja dengan baik. Jika *bearing* tidak bekerja dengan baik, maka poros dan elemen mesin yang lain dapat mengalami kegagalan.

*Bearing* memiliki banyak jenis dan fungsinya masing-masing. Hal itu disebabkan oleh penggunaan *bearing* yang sangat beragam. Secara garis besar, *bearing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu berdasarkan mekanisme kontak dan arah beban yang bekerja padanya. Arah pembebanan dapat dilihat pada Gambar 2.1




Gambar 2.1 Arah pembebanan pada *bearing* [22].

Klasifikasi *bearing* berdasarkan mekanisme kontak dibagi menjadi dua, yaitu *sliding contact bearing* dan *rolling contact bearing* [23]. *Sliding contact bearing* menggunakan fluida berupa lubrikan sebagai penerus beban. Sedangkan, *rolling contact bearing* terdiri dari elemen yang berputar dan bagian yang diam, gesekan yang terjadi pada *rolling bearing* adalah gesekan gelinding antara elemen bergerak, seperti bola, rol, rol jarum, dan rol bulat dengan bagian yang diam [24]. *Sliding contact bearing* dan *rolling contact bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut ini.

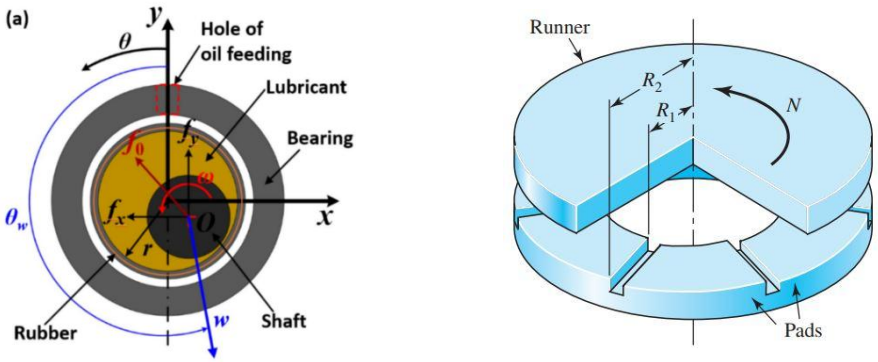



(a) (b)

Gambar 2.2 Klasifikasi *bearing* menurut mekanisme kontak: (a) *Sliding contact bearing* dan (b) *Roller contact bearing* [22].

*Bearing* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan arah beban yang didukungnya, yang terbagi menjadi dua jenis utama: *journal bearing* dan *thrust bearing*. *Journal bearing* dirancang untuk menopang beban yang memiliki arah tegak lurus (radial) terhadap sumbu poros. Sementara itu, *thrust bearing* dibuat untuk mendukung

beban yang memiliki arah sejajar (aksial) dengan sumbu poros. Jenis *bearing* berdasarkan arah beban yang dapat ditumpu dapat dilihat pada Gambar 2.3

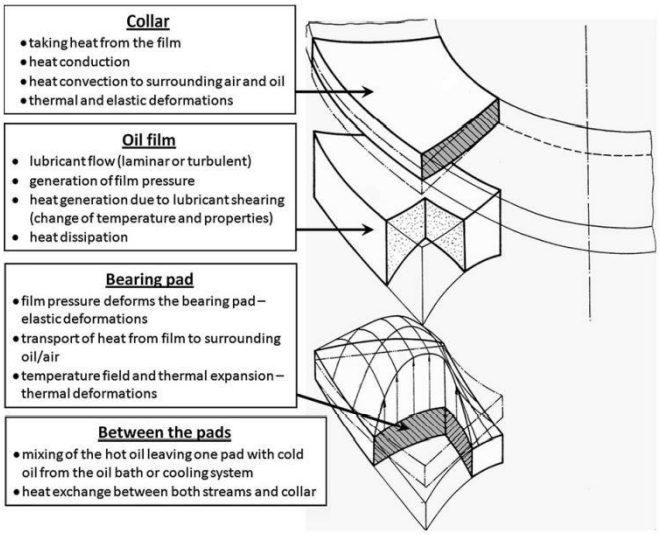



(a) (b)

Gambar 2.3 Jenis *bearing* berdasarkan arah beban: (a) *journal bearing*, (b) *thrust bearing* [25].

### 2.2.1 *Thrust bearing*

*Thrust bearing* memiliki tiga bagian utama, yaitu rotor, lubrikan, dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak pada poros dengan kecepatan tertentu. Lubrikan adalah bagian yang berfungsi sebagai penerus beban dan mengurangi gesekan yang terjadi akibat rotor yang bergerak relatif terhadap stator. Stator merupakan bagian yang tidak bergerak ketika poros berputar. Skema *thrust bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.4 berikut ini.

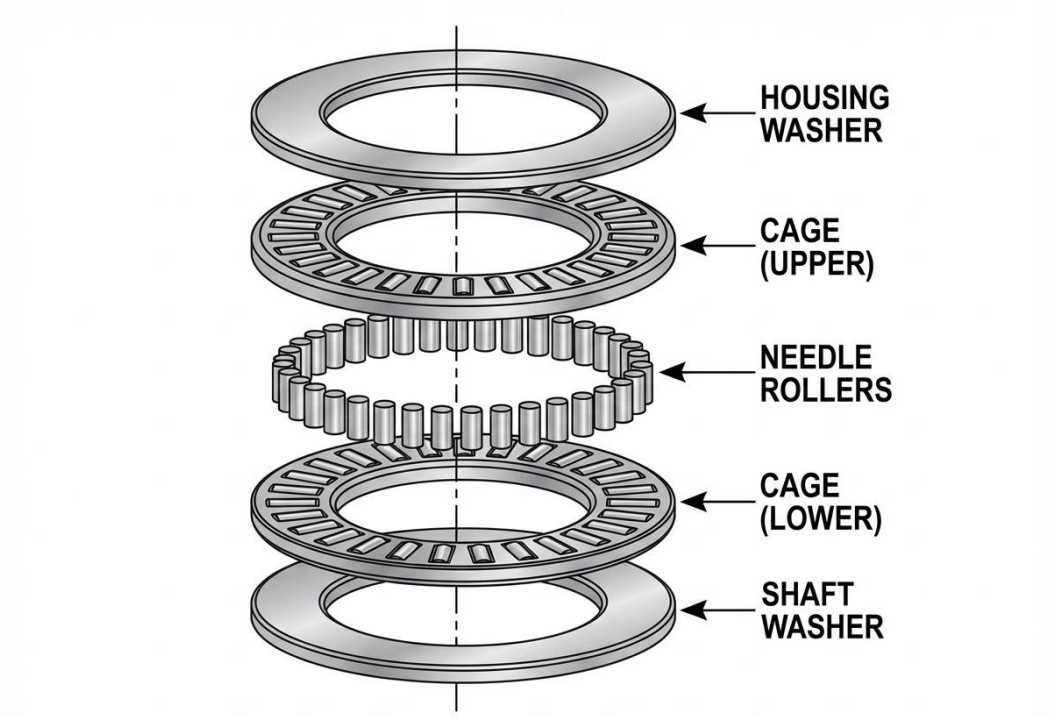



Gambar 2.4 Ilustrasi skema *thrust bearing* [26]

Saat poros berputar, bagian rotor *thrust bearing* berotasi pada porosnya serta menerima beban yang sejajar dengan sumbu poros putarnya yang menghasilkan tekanan hidrodinamik pada lubrikan. Pergerakan rotasional dari rotor *thrust bearing* juga menimbulkan *wedging action* yang menyebabkan terjadinya gaya angkat pada *thrust bearing.* Gaya angkat juga terjadi pada saat *thrust bearing* diberikan beban sehingga menimbulkan perubahan tekanan pada lubrikan. Selain itu, pergerakan rotasional tersebut menimbulkan gaya sentrifugal yang menyebabkan lubrikan pada bagian dalam *thrust bearing* akan keluar.

### 2.2.2 *Needle thrust bearing*

*Needle thrust bearing* merupakan salah satu jenis khusus dari *thrust bearing* yang dirancang untuk menahan beban aksial dengan memanfaatkan elemen gelinding berbentuk jarum (*needle roller*). *Bearing* ini banyak digunakan pada sistem mekanik dengan keterbatasan radial namun memerlukan kapasitas beban (*load carrying capacity*) aksial yang tinggi seperti aplikasi transmisi, aktuator, dan sistem mesin lain yang serupa. Karakteristik utama *needle thrust bearing* terletak pada penggunaan elemen *roller* berbentuk silinder ramping dengan rasio panjang terhadap diameter yang besar, sehingga dapat meningkatkan keampuan dalam menahan beban aksial dibandingkan dengan *thrust bearing* konvensional. Perancangan dan dimensinya mengikuti standar manufaktur tertentu sehingga memiliki dua konfigurasi yaitu *single-row* dan *multi-row needle thrust beaering* yang disesuaikand dengan aplikasinya [27].




Gambar 2.5 Komponen *needle thrust bearing.*

Dapat dilihat pada Gambar 2.5, *Needle thrust bearing* tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu *needle roller*, *cage,* serta *washer* yang terdiri dari *shaft* dan *housing washer*. *Needle roller* berfungsi sebagai elemen utama yang memikul beban aksial dan memungkinkan gerakan relatif dengan gesekan rendah. *Cage* berfungsi untuk menjaga posisi dan jarak antar *needle roller* agar tetap merata selama sistem beroperasi, sehingga distribusi beban menjadi lebih seragam. *Washer* berfungsi sebagai lintasak kontak (*raceway*) yang biasanya diberi perlakuan permukaan (*hardness, finishing*) [28] untuk meningkatkan ketahanan terhadap keausan *bagi needle roller* dan menjadi komponen yang berkontak langsung dengan poros maupun rumah *bearing*.

Penggunaan *needle thrust bearing* menghadapi beberapa tantangan khusus yang disebabkan karena kontak aksial antara *needle roller* dan *washer* cenderung menghasilkan tekanan kontak tinggi, sehingga film pelumas yang terbentuk relatif tipis. Akibatnya, sistem sering berlangsung pada rezim pelumasan *boundary* hingga *mixed*, khususnya saat kecepatan rendah di mana beban sistem masih relatif tinggi. Kondisi ini meningkatkan kemungkinan interaksi antar *asperity*, *adhesive wear*, dan peningkatan koefisien gesek jika kondisi permukaan dan pelumasan

tidak memadai. Selain itu, geometri *needle roller* yang panjang dan berdiameter kecil meningkatkan sensitifitas terhadap distribusi beban tidak merata yang dapat mempercepat keausan lokal.

Kestabilan film pelumas sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan lintasan *washer*. Permukaan yang dihasilkan dengan proses finishing konvensional tidak cukup mampu mempertahankan pelumas pada area kontak aksial tinggi, sehingga menyebabkan penurunan performa pelumasan dan umur *bearing*. Berdasarkan studi sebelumnya, kegagalan pada operasi *needle thrust bearing* disebabkan oleh faktor material, kekerasan, finishing permukaan, dan tekstur permukaan dapat memengaruhi pola keausan dan mekanisme kerusakan *bearing* [29].

## 2.3 Pelumasan pada *Bearing*

Pelumas pada *bearing* memiliki fungsi utama untuk membentuk lapisan film fluida yang mampu mengurangi gesekan dan keausan agar elemen mesin dapat berjalan dengan optimal. Efektivitas pembentukan lapisan ini sangat dipengaruhi oleh interaksi dinamis antara viskositas pelumas *(viscosity),* kecepatan operasional *(speed)*, dan beban yang diterapkan *(load)* [30] . Perubahan kondisi pelumasan secara langsung berpengaruh pada mekanisme pembangkitan film pelumas, distribusi tekanan kontak, serta nilai koefisien gesek yang dihasilkan selama operasi pengujian.

### 2.3.1 Rezim pelumasan

Rezim pelumasan menjelaskan keadaan interaksi antara pelumas dan permukaan material yang umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga rezim utama, yaitu *boundary, mixed,* dan *hydrodynamic lubrication*. Perpindahan antar rezim dipengaruhi oleh parameter kecepatan, viskositas, beban, serta karakteristik permukaan seperti kekasaran dan tekstur [31], [32] . Pendekatan eksperimental dan pemodelan modern menekankan bahwa batasan antara rezim bukanlah diskret tetapi berupa transisi kontinu yang sensitif terhadap kondisi operasi nyata [32], [33].

#### 2.3.1.1 Boundary lubrication

Rezim *boundary lubrication* terjadi ketika ketebalan film pelumas lebih tipis daripada puncak kekasaran permukaan (*asperities*), sehingga kontak langsung antar logam (*metal to metal contact*) masih sangat tinggi. Kondisi ini umum dijumpai pada kecepatan rendah, beban aksial tinggi, atau pada fase awal operasi (*start-up*) yang ditandai oleh nilai koefisien gesek yang relatif tinggi serta potensi keausan adhesif atau abrasive yang meningkat jika performa pelumas atau kondisi permukaan tidak memadai [33].

#### 2.3.1.2 *Mixed lubrication*

Rezim *mixed* lubrication merupakan rezim transisi di mana sebagian beban didukung oleh film pelumas dan sebagian lainnya masih melalui kontak asperity. Pada rezim ini, kontribusi film hidrodinamik mulai signifikan tetapi belum sepenuhnya dapat memisahkan permukaan. Akibatnya, koefisien gesek cenderung menurun terhadap rezim boundary namun masih dipengaruhi kekasaran dan topografi permukaan [33], [34]. Studi eksperimental dan model *mixed lubrication* modern menunjukkan bahwa variasi kondisi permukaan termasuk keberadaan tekstur mikro dapat menghasilkan perilaku gesek yang non-monoton pada rezim ini, sehingga penting untuk menggabungkan hasil eksperimen dengan pemodelan yang mempertimbangkan kontak *asperity* dan film tipis secara lanjut [32], [33].

#### 2.3.1.3 *Hydrodynamic lubrication*

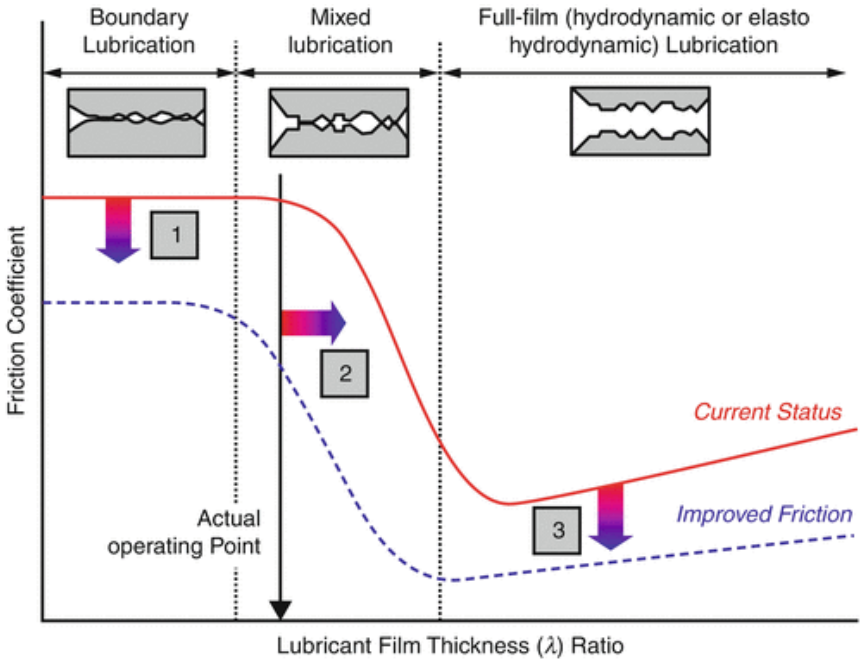
Rezim *hydrodynamic lubrication* terjadi ketika permukaan kontak sepenuhnya terpisah oleh film pelumas yang membawa beban melalui tekanan *hydrodynamic*. Pada rezim ini, tekanan *hydrodynamic* yang timbul dari aliran pelumas merupakan faktor utama yang menyebabkan koefisien gesek menjadi relatif rendah yang dipengaruhi oleh viskositas dan kecepatan relatif pada saat sistem beroperasi [31].

Meskipun koefisien gesek berada pada titik minimum di awal rezim ini, kenaikan kecepatan yang terus menerus akan memicu seikit peningkatan gesekan kembali akibat adanya hambatan viskos (*viscous drag*) atau gesekan internal di dalam molekul fluida itu sendiri. Eksperimen visual dan pengukuran yang telah

dilakukan pada penelitian terdahulu mengonfirmasi bahwa pada kondisi *hydordynamic lubrication*, efek topografi permukaan terhadap gesekan berkurang, namun parameter seperti temperatur dan pelumas non-Newtonian tetap memiliki peranan penting pada sistem [32].

### 2.3.2 Kurva *Stribeck*

Kurva *Stribeck* merupakan alat fundamental dalam tribologi yang menggambarkan hubungan antara koefisien gesek dan parameter pelumasan yang melibatkan viskositas pelumas (*viscosity*), kecepatan relatif (*speed*), serta beban yang diterapkan (*load*). Grafik ini memplot nilai koefisien gesek pada sumbu vertikal terhadap parameter tanpa dimensi pada sumbu horizontal yang dikenal sebagai parameter hersey. Kurva ini menunjukkan transisi bertahap dari rezim *boundary lubrication*, menuju *mixed lubrication*, hingga mencapai kondisi *hydrodynamic lubrication* seriring dengan meningkatnya ketebalan film pelumas. Dapat dilihat pada Gambar 2.6, parameter *Hersey* umumnya dinyatakan sebagai perbandingan antara produk viskositas dinamis pelumas dan kecepatan relatif terhadap beban normal yang bekerja pada sistem kontak, yang secara umum digunakan dalam studi tribologi modern [33], [35].

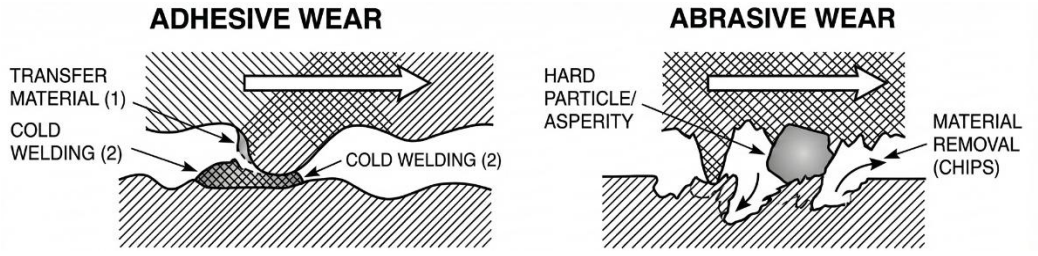



Gambar 2.6 Kurva *stribeck.*

Penggunaan parameter *Hersey* juga memungkinkan perbandingan performa gesek pada berbagai kondisi operasi dan konfigurasi permukaan dalam kerangka analisis yang seragam. Dalam penelitian ini, parameter *Hersey* digunakan secara implisit melalui variasi kecepatan putar dengan beban dan jenis yang dijaga konstan. Dengan pendekatan tersebut, perubahan nilai koefisien gesek yang diamati pada kurva *Stribeck* dapat diinterpretasikan sebagai respons sistem terhadap peningkatan parameter *Hersey*, sekaligus digunakan untuk mengidentifikasi perpindahan rezim pelumasan dan mengevaluasi pengaruh *surface texturing* terhadap karakteristik pelumasan.

## 2.4 Keausan pada *Bearing*

Keausan pada bearing merupakan fenomena hilangnya material dari permukaan yang disebabkan oleh interaksi mekanis selama gerakan relatif pada sistem beroperasi. Pada sistem bearing, keausan berpengaruh langsung terhadap penigkatan gesekan, perubahan geometri kontak, serta penurunan umur pakai komponen. Tingkat dan mekanisme keausan dipengaruhi oleh kondisi pelumasan, beban, kecepatan, material, serta karakteristik permukaan kontak. Pada kondisi pelumasan yang tidak ideal, seperti yang terjadi pada rezim *boundary* dan *mixed lubrication*, kontak langsung antar *asperity* tidak dapat dihindari sehingga keausan cenderung meningkat.



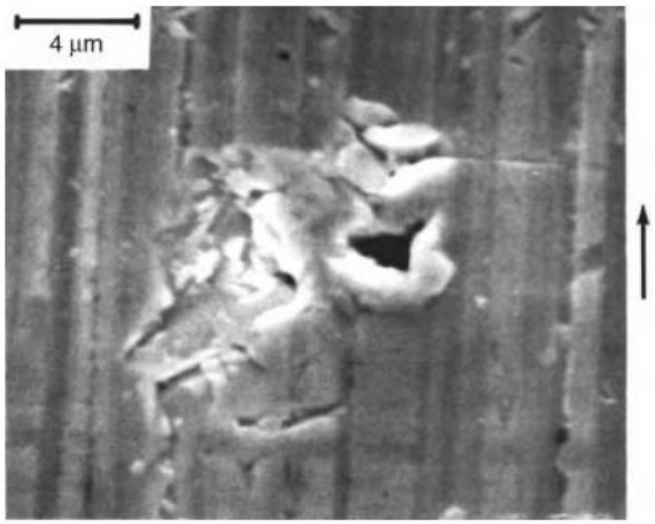

(a) (b)

Gambar 2.7 Jenis keausan: (a) keausan *adhesive* dan (b) keausan *abrasive.*

Pada bearing elemen gelinding, seperti *thrust bearing* dan *needle thrust bearing*, terdapat dua jenis keausan yang umum terjadi. Literatur tribologi mengelompokkan keausan yang paling umum pada bearing menjadi keausan *abrasive* dan *adhesive* yang keduanya sering muncul pada kondisi pelumasan terbatas dan memiliki tekanan kontak yang tinggi.

### 2.4.1 Keausan *adhesive*

Keausan adhesive terjadi akibat terbentuknya ikatan mikro antara asperity dua permukaan yang saling bersentuhan di bawah beban mikro yang sangat tinggi. Ikatan ini terbentuk karena gaya adhesi antar atom pada permukaan kontak dan akan terputus selama gerakan relatif, sehingga menyebabkan perpindahan material dari satu permukaan ke permukaan lain atau terbentuknya partikel keausan.



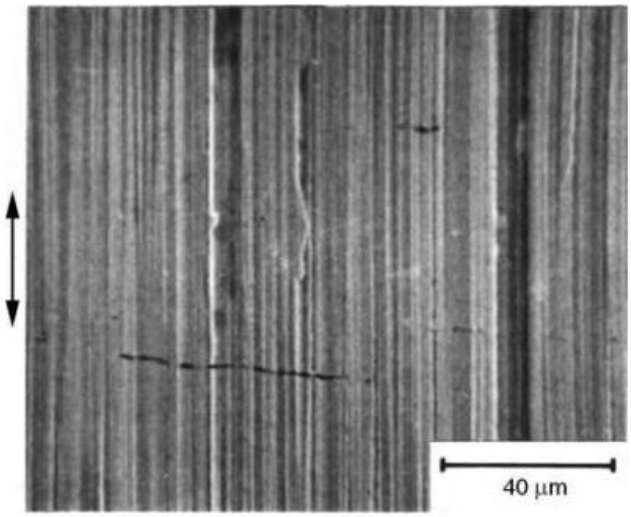

Gambar 2.8 SEM *micrograph* keausan *adhesive* pada permukaan *stainless steel shaft.* Dengan arah *sliding* vertikal [1].

Mekanisme keausan adhesif sangat dominan pada kondisi rezim *boundary lubrication* yang terjadi ketika pelumas tidak cukup tebal untuk memisahkan permukaan secara efektif. Keausan *adhesive* pada bearing sering ditandai oleh permukaan yang tampak mengalami *smearing*, pengelupasan material lokal, serta perubahan warna akibat gesekan dan kenaikan temperatur lokal seperti yang terlihat pada Gambar 2.8. Kondisi ini dapat memicu kerusakan permukaan yang lebih serius dan menurunkan umur pakai *bearing* secara signifikan jika berlangsung secara terus menerus.

### 2.4.2 Keausan *abrasive*

Keausan *abrasive* terjadi ketika permukaan yang lebih keras menggores permukaan yang lebih lunak selama kontak gesek. Mekanisme ini disebabkan oleh kontaminasi partikel asing seperti debu atau kotoran, ataupun partikel keausan

yang terbentuk selama operasi dan terperangkap di dalam zona kontak. Partikel-partikel ini dapat menghasilkan alur-alur yang sejajar dengan arah gerak pada permukaan lintasan kontak, seperti pada Gambar 2.9.




Gambar 2.9 SEM *micrograph* keausan *abrasive* pada permukaan *stainless steel shaft*. Dengan arah *sliding* vertikal [1].

Keausan abrasif umumnya dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *two body abrasion* yang terjadi ketika *asperity* dari satu permukaan langsung menggores permukaan lawannya. Sedangkan, *three body abrasion* terjadi ketika partikel bebas berada di antara dua permukaan kontak. Pada sistem *bearing* yang beroperasi dengan pelumasan kurang efektif, mekanisme *three body abrasion* sering terjadi akibat sirkulasi partikel keausan (*debris*) di dalam film pelumas yang tipis. Keausan ini dapat menyebabkan peningkatan kekasaran permukaan dan mempercepat penurunan performa pelumasan.

## 2.5 *Surface Texturing*

*Surface texturing* merupakan salah satu pendekatan dalam rekayasa permukaan yang bertujuan untuk mengubah karakteristik topografi material untuk meningkatkan performa tribologi. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang berasumsi bahwa penurunan kekasaran permukaan secara kontinu akan selalu menghasilkan gesekan yang lebih rendah, metode ini justru menerapkan kekasaran terkontrol dalam bentuk fitur mikro, seperti *micro dimples* atau alur dengan geometri tertentu [13]. Penerapan tekstur permukaan telah terbukti mampu

memperluas rentang operasi komponen mekanis melalui penurunan koefisien gesek, peningkatan kapasitas dukung beban, serta pengurangan laju keausan pada permukaan kontak [14].

Penerapan *surface texturing* berpengaruh pada peningkatan kinerja tribologi dikarenakan tiga mekanisme fisik utama. Pertama, tekstur mikro berperan sebagai perangkap partikel keausan (*debris trap*) yang menahan partikel hasil gesekan agar tidak terlibat kembali dalam kontak langsung dan menggores permukaan, khususnya pada kondisi pelumasan *boundary* atau tanpa pelumasan [20]. Kedua, tekstur berfungsi sebagai *micro reservoir* pelumas yang mampu menyimpan fluida dan mendistribusikan kembali ke area kontak ketika kondisi pelumasan menjadi tidak stabil. Ketiga, pada kecepatan yang relatif tinggi, tekstur mikro dapat bertindak sebagai bantalan hidrodinamik mikro (*micro hydrodynamic bearing*) yang menghasilkan gaya angkat tambahan akibat gradien tekanan fluida yang terbentuk saat aliran pelumas melewati cekungan tekstur. Mekanisme ini berkontribusi dalam meningkatkan pemisahan antar permukaan kontak dan menurunkan koefisien gesek secara lebih efektif [15].

### 2.5.1 *Laser Surface Texturing* (LST)

Di antara berbagai teknik rekayasa *surface texturing,* metode *Laser Surface Texturing* (LST) saat ini dipandang sebagai metode yang paling banyak digunakan dan paling andal dalam pengembangan aplikasi tribologi modern. Teknologi ini memanfaatkan sinar laser berenergi tinggi yang difokuskan secara presisi untuk membentuk tekstur pada permukaan melalui mekanisme ablasi, yaitu penghilangan material secara cepat melalui proses penguapan tanpa adanya kontak mekanis langsung dengan perkakas [20]. Pendekatan ini memberikan tingkat fleksibilitas yang tinggi dalam pengaturan parameter geometris tekstur, termasuk diameter, kedalaman, kerapatan area, sertea pembentukan profil tekstur dengan kompleksitas tinggi, seperti pola *cross hatch* dengan orientasi 45° yang sulit direalisasikan jika diproduksi menggunakan metode pemesinan konvensional maupun *chemical etching* [36].

Metode LST memiliki keunggulan karena kemampuannya dalam menghasilkan struktur mikro dengan tingkat presisi yang tinggi serta zona yang

terpengaruh panas akibat laser (Heat Affected Zone) yang relatif minimal, sehingga sifat mekanik material dasar tetap terjaga. Kemampuan kontrol kedalaman tekstur yang dihasilkan LST menjadi aspek yang sangat penting, karena rasio kedalaman terhadap diameter tekstur berperan signifikan dalam optimalisasi pembentukan tekanan hidrodinamik pada permukaan kontak [37]. Selain itu, LST dikenal sebagai proses yang efisien dari sisi waktu dan relatif ramah lingkungan, sehingga banyak diterapkan sebagai metode standar dalam pembuatan tekstur permukaan pada komponen mesin presisi, seperti *mechanical seal, piston ring,* dan *thrust bearing* [30].

### 2.5.2 Geometri tekstur

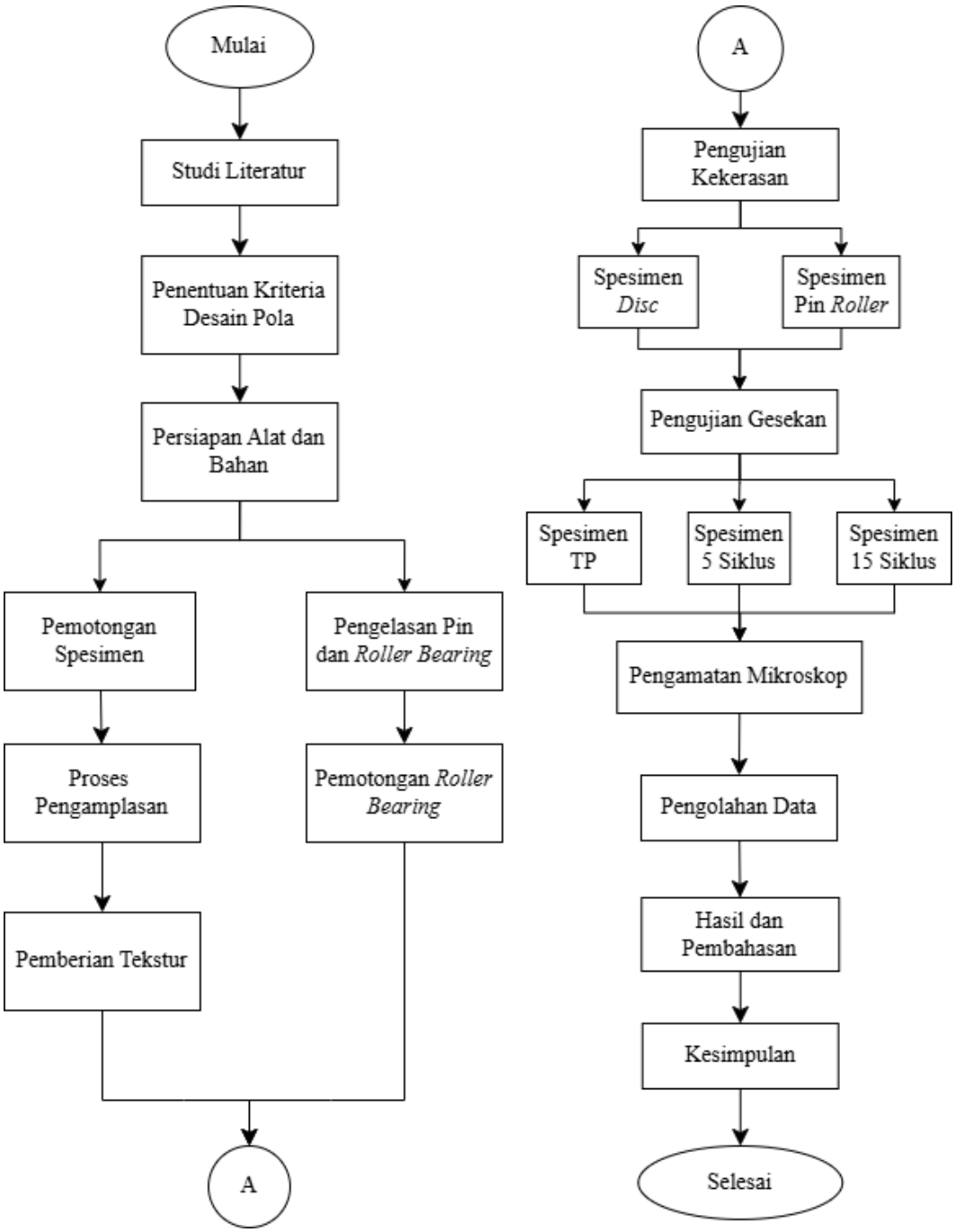
Geometri tekstur merupakan faktor utama yang menentukan efektivitas *surface* texturing dalam merekayasa perilaku gesekan dan keausan. Parameter geometri yang umum digunakan meliputi lebar, kedalaman, dan orientasi pola tekstur. Parameter-parameter tersebut memengaruhi volume reservoir pelumas, distribusi tekanan hidrodinamik mikro, serta luas kontak efektif antar *asperity*. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perubahan kecil pada geometri tekstur dapat menghasilkan respons gesek yang berbeda secara signifikan, terutama pada rezim *boundary* dan *mixed* lubrication [3], [14].

Di antara parameter geometri tersebut, kedalaman tekstur memiliki peran paling dominan dalam menentukan performa tribologis. Kedalaman yang terlalu dangkal menghasilkan kapasitas penyimpanan pelumas yang terbatas, sehingga efek tekstur menjadi kurang signifikan, sedangkan kedalaman yang terlalu besar dapat menyebabkan ketidakstabilan film pelumas dan fluktuasi gesekan pada kecepatan yang relatif tinggi. Sejumlah penelitian eksperimental melaporkan adanya kedalaman tekstur yang optimal mampu menghasilkan penurunan koefisien gesek paling stabil dan konsisten [8], [9].

Orientasi pola tekstur terhadap arah gerak relatif juga memengaruhi mekanisme pelumasan pada saat kondisi operasi. Pola yang membentuk sudut atau bentuk tertentu, seperti pola miring atau diagonal terbukti mampu meningkatkan distribusi pelumas dan mendukung pembentukan tekanan *hydrodynamic* lokal secara lebih efektif dibandingkan pola yang sejajar dengan arah gerak [2], [11].

# BAB 3
# METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Alur Penelitian




Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.

Penelitian ini menerapkan metode penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi pengaruh suatu variabel terhadap variabel lainnya dalam lingkungan yang terkendali. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menguji hubungan sebab-akibat serta memvalidasi teori guna memprediksi suatu fenomena. Melalui penggunaan datanumerik dan analisis statistik, penelitian ini memiliki landasan objektif yang kuat dalam memahami fenomena yang yang diteliti. Peneliti melakukan proses pembuatan spesimen uji dalam skala laboratorium dengan variasi tekstur yaitu 5 dan 15 siklus menggunakan *laser marking.* Spesimen uji yang telah dibuat kemudian duiji untuk mengetahui performa tribologi materialnya.

## 3.2 Objek dan Kriteria Desain Spesimen

Spesimen uji pada penelitian ini diberikan perlakuan permukaan berupa tekstur yang memiliki dua variasi jumlah siklus pemakanan dalam proses *laser marking.* Perbedaan siklus ini berpengaruh langsung pada kedalaman spesimen uji. Siklus yang digunakan pada penelitian ini adalah 5 dan 15 siklus. Adapun kriteria desain pada spesimen uji yaitu:

1. Spesimen uji harus memiliki permukaan yang rata dan halus agar hasil dari pengujian tribometer menunjukkan hasil yang sempurna.
2. Perlakuan *surface texturing* pada spesimen uji disesuaikan dengan kontak dengan pin yang digunakan, yaitu ±1 cm.
3. Diameter spesimen uji berada pada rentang 60 sampai 100 mm, serta ketebalan spesimen uji tidak lebih dari 8 mm.

## 3.3 Peralatan dan Bahan

Dalam penelitian ini, untuk menunjang seluruh tahapan, diperlukan sejumlah alat dan bahan yang digunakan dalam setiap proses desain dan manufaktur spesimen uji. Pemilihan alat dan bahan yang disebutkan pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2 telah disesuaikan dengan kebutuhan fungsional dan efisiensi waktu.

Tabel 3.1 Peralatan yang digunakan pada penelitian ini.

| No. | Alat | Fungsi |
|---|---|---|
| 1 | Mesin gergaji | Memotong material awal menjadi bagian-bagian spesimen dengan ukuran yang telah ditentukan |
| 2 | Bubut | Membentuk diameter dan geometri spesimen uji |
| 3 | Gerinda tangan | Memotong komponen pin *roller* |
| 4 | *Point welding* | Menyambungkan komponen pin dan *roller bearing* |
| 5 | *Laser marking* | Membuat pola *surface texturing* pada spesimen uji |
| 6 | Amplas | Menghaluskan spesimen uji |
| 7 | Tribometer *pin on disc* | Alat utama untuk mengukur koefisien gesek pada permukaan kontak spesimen |
| 8 | Laptop | Digunakan untuk mendukung proses simulasi, pengolahan data statistik hasil pengujian, hingga penyusunan laporan |
| 9 | *Software solidworks* | Perangkat lunak untuk mendesain spesimen uji |
| 10 | Jangka sorong 0,05 mm | Mengukur dimensi spesimen uji dan pin *roller* |
| 11 | Vickers *hardness tester* | Mengukur kekerasan spesimen uji dan pin *roller* |
| 12 | Olympus BX53M | Mengamati keausan pasca pengujian gesek |

Tabel 3.2 Bahan yang digunakan pada penelitian ini..

| No. | Bahan | Fungsi |
|---|---|---|
| 1 | Alumunium Dural 6061 | Digunakan sebagai material dasar pembuatan spesimen uji yang akan diberi variasi tekstur permukaan |
| 2 | Pin *bearing* | Komponen pasangan gesek yang dicekam pada tribometer untuk memberikan beban terhadap spesimen |
| 3 | *Roller bearing* | Digunakan sebagai komponen kontak dalam pengujian gesek |
| 4 | Oli ATF D-III SAE 20 | Sebagai pelumas pada pengujian gesek |

## 3.4 Proses Produksi

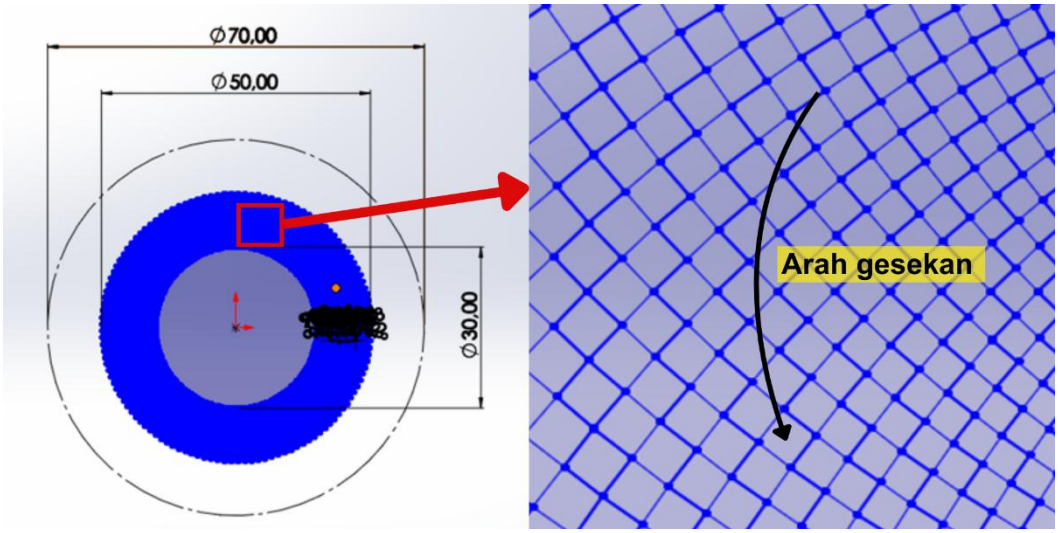
Dalam penelitian ini, tahap proses produksi adalah fase penting yang menentukan geometri, presisi, dan kualitas spesimen uji yang akan menunjukkan nilai gaya gesek yang dihasilkan dari pengujian gesekan menggunakan alat tribometer *pin on disc*. Proses produksi dibagi menjadi dua tahapan utama, yaitu pembuatan spesimen uji dan pin *roller*.

### 3.4.1 Pembuatan spesimen uji *disc*

Pembuatan spesimen uji diawali dengan membuat desain menggunakan *software* SolidWorks 2021. Desain pada Gambar 3.2 menunjukkan konfigurasi spesimen uji *disc* yang memiliki diameter luar 70 mm, diameter dalam 30 dan 50 mm, serta dengan ketebalan 6 mm. Dimensi diameter dalam dipilih agar permukaan mengalami distribusi beban yang merata dan stabil selama proses pengujian gesekan berlangsung.

Area berwarna biru menandakan area yang diberikan perlakuan *surface texturing*, sedangkan area abu-abu di bagian dalam dibiarkan tanpa tekstur. Pendekatan ini bertujuan untuk memfokuskan efek tekstur hanya berada pada

lintasan kontak efektif, sekaligus meminimalkan pengaruh tekstur di luar area gesek. Dengan demikian, perubahan karakteristik gesek yang terukur dapat dikaitkan secara langsung dengan keberaan tekstur pada permukaan kontak.




Gambar 3.2 Dimensi desain spesimen uji *disc*.

Pembesaran area yang ditunjukkan oleh tanda panah memperlihatkan pola tekstur berbentuk kisi persegi dengan perputaran sudut 45° yang tersusun secara seragam. Dapat dilihat pada Gambar 3.2, pola ini membentuk sudut terhadap arah gerak relatif yang dirancang untuk meningkatkan distribusi pelumas dan mendukung pembentukan tekanan *hydrodynamic* mikro selama pengujian. Desain ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh geometri dan kedalaman tekstur terhadap karakteristik gesekan pada berbagai rezim pelumasan.

Setelah proses desain selesai, langkah selanjutnya dilakukan dengan proses pembubutan material mentah Alumunium Dural 6061 seperti pada Gambar 3.3. Fokus utama pada tahap awal produksi ini adalah mereduksi dimensi material untuk mencapai diameter luar sebesar 70 mm, sesuai dengan spesifikasi pada desain yang telah dibuat.



Gambar 3.3 Proses pembubutan Alumunium Dural 6061.

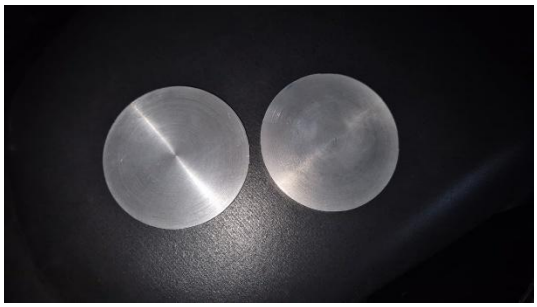
Setelah proses pembubutan selesai dan diameter target telah tercapai, langkah selanjutnya adalah pemotongan material untuk menentukan dimensi ketebalan spesimen uji. Material Alumunium Dural 6061 dipotong untuk menghasilkan spesimen dengan ketebalan 6 mm sesuai dengan desain seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Ketelitian dalam proses ini menjadi prioritas agar tiap spesimen uji memiliki keseragaman dimensi sehingga data yang diperoleh dalam pengujian nantinya bersifat valid dan konsisten. Proses pemotongan dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Proses pemotongan material Alumunium Dural 6061.

Sebagai tahap akhir dari pembuatan spesimen uji *disc*, dilakukan perlakuan permukaan melalui metode pengamplasan bertingkat untuk memperoleh tingkat kehalusan permukaan yang seragam tiap spesimen. Proses pengamplasan ini bertujuan untuk menghilangkan ketidakrataan permukaan akibat proses pemesinan sehingga permukaan spesimen dapat distandarkan sebelum dilakukan *laser marking*.

Pengamplasan dilakukan dalam dua tahapan berturut-turut, yaitu menggunakan amplas dengan tingkat kekasaran 200 sebagai awalan dan dilanjutkan dengan amplas 1000. Tahap pertama berfungsi untuk meratakan permukaan dan menghilangkan cacat makro, sedangkan tahap kedua bertujuan memperhalus permukaan dan mengurangi kekasaran sisa hasil pengamplasan awal. Setiap tahapan pengamplasan dilakukan dengan durasi waktu 5 menit secara konstan untuk memastikan konsistensi perlakuan pada seluruh spesimen uji *disc*.



Gambar 3.5 Hasil spesimen uji *disc.*

Dengan penerapan waktu pengamplasan yang sama pada setiap tingkat kekasaran, langkah ini diharapkan untuk memastikan bahwa perbedaan karakteristik gesek yang diamati selama pengujian terutama disebabkan oleh perlakuan *surface texturing*, bukan oleh perbedaan kondisi awal kekasaran pada permukaan spesimen. Hasil pengamplasan spesimen *disc* dapat dilihat pada Gambar 3.5.

### 3.4.2 Spesimen pin *roller*

Proses produksi spesimen pin *roller* dalam penelitian ini dirancang dengan mempertimbangkan keselarasan geometris antara dimensi pin *roller* dan lintasan keausan (*wear track*) pada permukaan spesimen *disc* yang telah diberi tekstur. Keselarasan ini menjadi aspek penting untuk memastikan bahwa kontak yang terjadi selama pengujian gesek merepresentasikan kondisi kontak aktual pada mekanisme *needle thrust bearing*, khususnya dalam hal distribusi beban dan interaksi permukaan.



Gambar 3.6 *Needle thrust bearing.*

Pembuatan spesimen pin *roller* dilakukan menggunakan alat *point welding*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.6(a) untuk menghasilkan konfigurasi pin yang sesuai dengan spesifikasi dan sistem penjepitan pada alat tribometer *pin-on-disc*. Metode ini digunakan karena mampu menghasilkan sambungan yang kuat dan stabil antara pin dan dudukannya, sehingga deformasi atau pergeseran selama pengujian dapat dihindari.



(a) (b)

Gambar 3.7 Proses (a) *Point welding* dan hasil (b) Pin *roller.*

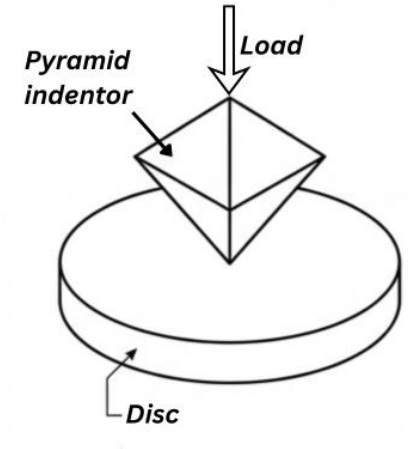
Permukaan pin yang berkontak dengan spesimen *disc* dibentuk menyerupai *roller* dengan panjang sebesar 8 mm yang disesuaikan dengan lebar area tekstur pada spesimen *disc* sebesar 10 mm sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.6(b).

## 3.5 Pengujian Spesimen

Rangkaian pengujian spesimen dilakukan untuk mengevaluasi sifat mekanik dan performa tribologi dari material Alumunium Dural 6061 yang telah diberikan perlakuan *surface texturing*. Seluruh tahapan pengujian ini dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Islam Indonesia untuk mendapatkan data yang presisi.

### 3.5.1 Pengujian kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui karakterisasi sifat mekanik permukaan kedua material kontak, yaitu spesimen uji dan pin dilakukan dengan uji kekerasan Vickers dengan skematik pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.8. Tujuan pengujian ini adalah untuk memetakan dan membandingkan nilai kekerasan kedua material secara kuantitatif. Data kekerasan yang didapat digunakan untuk memverifikasi kondisi kontak, di mana spesimen uji didesain memiliki kekerasan yang lebih rendah dibandingkan pin. Hal ini sangat penting untuk memastikan bahwa mekanisme keausan dan deformasi didominasi oleh spesimen uji, sehingga respons tribologi yang terjadi secara valid merepresentasikan perilaku permukaan spesimen yang menjadi fokus penelitian.




Gambar 3.8 Diagram skematik pengujian kekerasan.

#### 3.5.1.1 Prosedur pengujian kekerasan

Prosedur pengujian kekerasan dilakukan dengan langkah-langkah sistematis sebagai berikut:



Gambar 3.9 Alat *vickers hardness test.*

1. Menyiapkan mesin uji dan spesimen uji yang ditunjukkan pada Gambar 3.9
2. Meletakkan spesimen secara mendatar pada meja uji mesin *Vickers Hardness Test*.
3. Mengatur beban tekan (*test load*) dan waktu penahanan (*dwell time*) sesuai dengan karakteristik material.
4. Melakukan proses indentasi menggunakan mata berbentuk piramida intan secara perlahan ke permukaan spesimen untuk mencapai hasil.
5. Mempertahankan beban indentor selama *dwell time* yang telah ditetapkan, kemudian mesin melepaskan *indentor* secara otomatis.
6. Mengamati jejak indentasi berbentuk belah ketupat menggunakan mikroskop optik yang terintegrasi pada alat uji.
7. Menghitung nilai kekerasan *Vickers* (HV) berdasarkan perbandingan antara beban tekan *P* dan luas jejak indentasi menggunakan persamaan:

$$D_{rata-rata} = \frac{D_{1+}D_2}{2} \tag{3.1}$$

$$\text{HV} = 1{,}8544 \times \frac{F}{D_{rata-rata}{}^2} \tag{3.2}$$

$D_1$ = Diagonal 1 (mm)

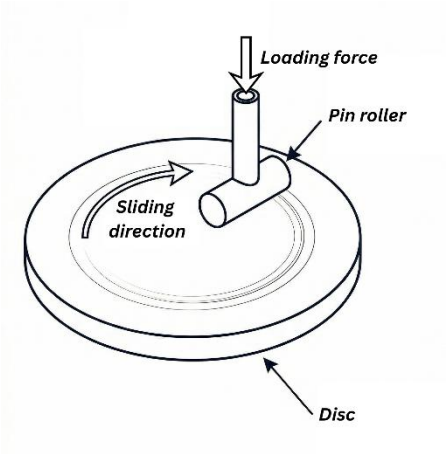
$D_2$ = Diagonal 2 (mm)

HV = Satuan kekerasan *vickers*

F = Beban maksimal (N)

### 3.5.2 Pengujian gesekan

Pengujian gesekan dilakukan menggunakan alat uji tribometer *pin on disc* untuk menentukan nilai gaya gesek dari spesimen uji. Mekanisme pengujian bekerja seperti pada Gambar 3.10 dengan cara menekan pin yang bersifat stasioner di atas permukaan spesimen uji (*disc*) yang berputar sehingga menghasilkan kontak gesek pada lintasan lingkaran. Eksperimen dilakukan pada rentang kecepatan putar 200 hingga 2000 RPM dengan pembebanan konstan sebesar 20 N.




Gambar 3.10 Diagram skematik pengujian gesek.

Kondisi pengujian dilakukan secara basah (*lubricated sliding*) menggunakan pelumas oli ATF D-III (SAE 20) untuk mensimulasikan kondisi *hydrodynamic lubricant*. Selama pengujian berlangsung, volume pelumas dijaga secara konsisten agar tetap membasahi area lintasan gesek untuk menjada stabilitas viskositas dan suhu operasional.

### 3.5.2.1 Prosedur pengujian gesek

Prosedur yang harus dilakukan pada pengujian ini sebagai berikut:



Gambar 3.11 Alat tribometer *pin on disc.*

1. Menyiapkan mesin uji dan spesimen uji yang ditunjukkan pada Gambar 3.11
2. Melakukan kalilbrasi dan mengatur mesin pengujian sebelum pelaksanaan pengujian agar mendapat data yang lebih akurat.
3. Meletakkan spesimen uji di piringan dan mengatur posisi spesimen sesuai dengan diameter spesimen pada bagian penjepit yang berada pada piringan.
4. Menempelkan pin *roller* pada penjepit pin, mengatur beban sebesar 20 N, kecepatan 200 rpm, waktu pengujian 2 menit, dan *wear track* 40 mm pada *software* alat uji.
5. Melakukan *reset* ke titik nol pada grafik gaya gesek yang berada pada *software* mesin dan pada alat uji dengan cara memutar sensor sebelum proses *running*.
6. Melakukan pengujian sebanyak tiga kali percobaan.
7. Mengulangi langkah di atas dengan variasi kecepatan 250, 300, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, dan 2000 rpm.
8. Mengulangi langkah di atas pada variasi spesimen uji 5 dan 15 siklus.
9. Menghitung nilai gaya gesek pada masing-masing spesimen.

Tabel 3.3 menyajikan rencana dan kondisi pengujian gesek yang digunakan dalam penelitian ini untuk seluruh variasi spesimen, dengan parameter utama yang diamati berupa gaya gesek.

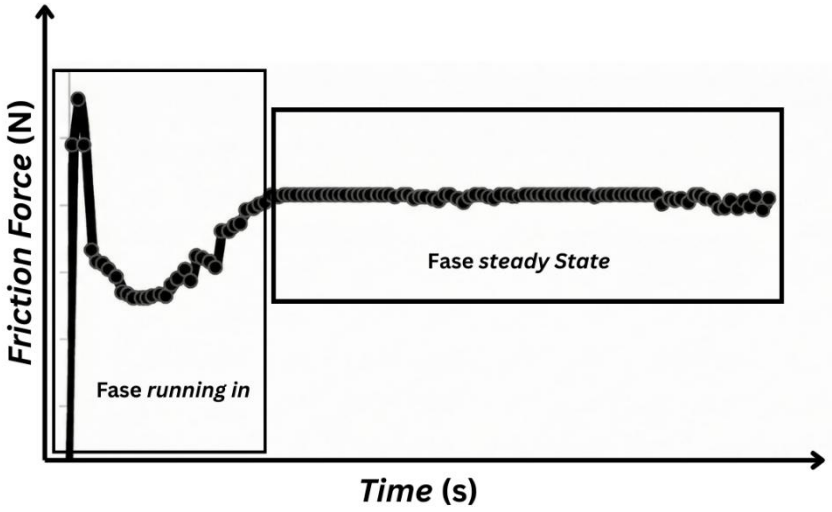
Tabel 3.3 Rencana pengujian.

| Spesimen | Kecepatan (RPM) | Kondisi Pengujian |
|---|---|---|
| TP<br>5 Siklus<br>15 Siklus | 200, 250, 300, 500, 750. 1000, 1250, 1500, 1750, dan 2000 | • Beban = 20 N<br>• Waktu pengujian = 120 detik<br>• Pelumas = oli ATF D-III SAE 20<br>• Parameter yang diamati = gaya gesek |

### 3.5.2.2 Metode pengolahan dan analisis data

Langkah pengambilan data hasil uji dalam kondisi *steady*:

1. Mengambil data gaya gesek dari hasil pengujian ketika kondisi *steady* dengan nilai gesek pada sumbu x dan nilai waktu pengujian pada sumbu y. Seperti yang terlihat pada Gambar 3.12.




Gambar 3.12 Skematik grafik gaya gesek-waktu pengujian.

2. Menghitung nilai rata-rata dari fase *steady state* menggunakan *Microsoft Excel* pada variasi siklus dan variasi kecepatan.

3. Menghitung nilai rata-rata gaya gesek dari tiga kali pengujian pada tiap variasi kecepatan pada variasi siklus 5 dan 15.
4. Membuat grafik *stribeck curve* dengan nilai rata-rata gaya gesek pada masing-masing kecepatan di siklus 5 dan 15. Dengan parameter nilai CoF berada pada sumbu y dan nilai kecepatan pada sumbu x.

### 3.5.3 Pengujian mikroskopik

Pengujian mikroskopik dilakukan untuk mengevaluasi kondisi keausan permukaan spesimen secara visual setelah pengujian gesek, khususnya dalam mengidentifikasi pola keausan, distribusi kontak, serta indikasi mekanisme keausan yang terjadi pada masing-masing perlakuan *surface texturing*.

Metode pengamatan yang digunakan bersifat makroskopik dan mikroskopik dengan memanfaatkan perbesaran rendah hingga menengah guna memperoleh gambaran menyeluruh terhadap area kontak gesek. Pendekatan ini dipilih karena mampu menampilkan perubahan morfologi permukaan secara jelas, seperti lebar *wear track*, intensitas goresan, serta kemungkinan terjadinya *adhesive* atau *abrasive wear* akibat interaksi mekanis selama pengujian.

#### 3.5.3.1 Prosedur pengujian mikroskopik



Gambar 3.13 Alat mikroskop optik metalurgi.

Prosedur yang harus dilakukan untuk pengujian yaitu sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat mikroskop optik metalurgi seperti yang terdapat pada Gambar 3.13.
2. Membersihkan spesimen *disc* yang telah melalui pengujian gesek guna memastikan area *wear track* dapat terlihat dengan jelas.
3. Menempatkan spesimen *disc* secara stabil pada meja pengamatan dengan posisi *wear track* berada pada bidang fokus utama.
4. Mengamati permukaan *wear track* pada perbesaran 5x untuk memperoleh gambaran umum distribusi area kontak dan pola keausan secara keseluruhan.
5. Mengamati permukaan *wear track* pada perbesaran 10x untuk mengamati detail morfologi permukaan, seperti intensitas goresan dan perubahan tekstur permukaan.
6. Mendokumentasikan setiap hasil pengamatan pada masing-masing tingkat perbesaran dalam bentuk digital sebagai data pendukung analisis.
7. Mengevaluasi secara visual keausan secara garis besar.

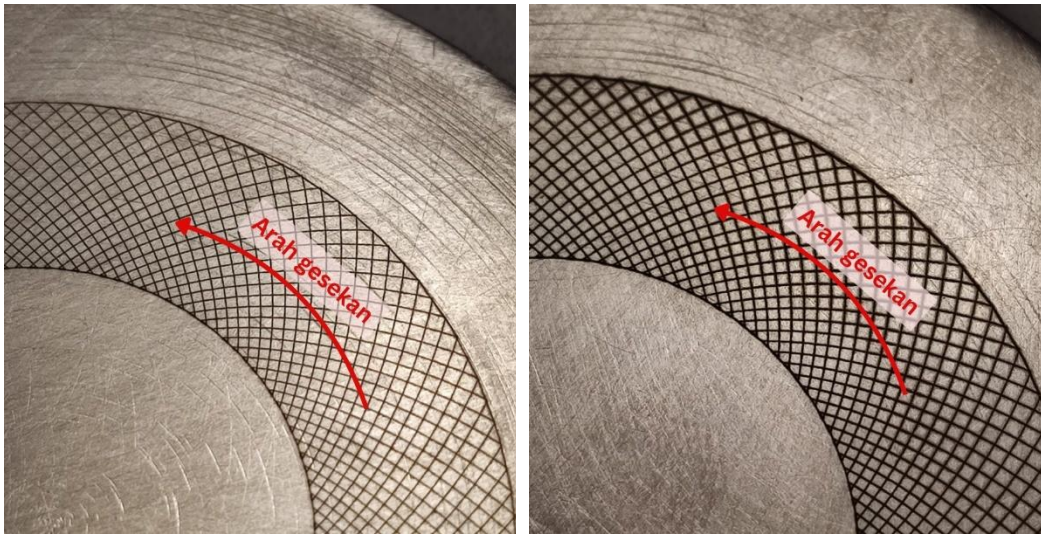
# BAB 4
# HASIL DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Karakterisasi Spesimen Uji

Karakterisasi spesimen uji dilakukan untuk memastikan bahwa perbedaan performa tribologi yang diamati pada tahap pengujian gesek benar-benar dipengaruhi oleh perlakuan *surface texturing*. Tahapan karakterisasi meliputi visualisasi permukaan, geometri spesimen, serta pengujian kekerasan. Hasil karakterisasi ini menjadi dasar penting dalam menganalisis hubungan antara *surface texturing* dan perilaku gesek pada *needle thrust bearing.*

### 4.1.1 Visualisasi *surface texturing*

Visualisasi *surface texturing* dilakukan untuk mengamati karakteristik morfologi permukaan spesimen sebelum pengujian gesek. Hasil fabrikasi menggunakan mesin *laser marking* menunjukkan bahwa pola *cross hatch* dengan sudut 45° berhasil terbentuk pada permukaan spesimen dengan material Alumunium Dural 6061.




(a) (b)

Gambar 4.1 Hasil *laser marking*: (a) 5 siklus & (b) 15 siklus.

Dapat dilihat pada Gambar 4.1 (a) Spesimen dengan tekstur 5 siklus menunjukkan tekstur yang relatif dangkal dengan distribusi yang merata di seluruh

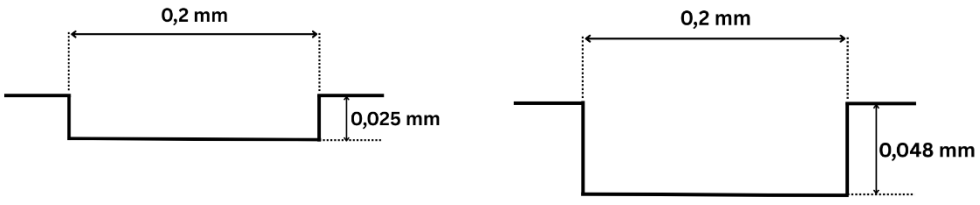
area kontak. Sementara itu, pada Gambar 4.1 (b) spesimen dengan tekstur 15 siklus, permukaan memperlihatkan tekstur yang lebih dalam dan kontras, dengan bentuk yang lebih tegas. Perbedaan karakteristik visual ini mengindikasikan adanya perbedaan kedalaman antara masing-masing siklus pemakanan laser.

Variasi kedalaman tersebut berpotensi memengaruhi mekanisme tribologis selama pengujian, khususnya dalam pembentukan film *lubricant*, mekanisme penampungan pelumas (*lubricant reservoir*), serta kemampuan tekstur dalam menangkap partikel keausan (*debris trapping*).

### 4.1.2 Geometri tekstur

Geometri *pattern surface texturing* pada spesimen *disc* ditunjukkan pada Gambar 4.2 yang memperlihatkan perbedaan karakteristik tekstur akibat variasi jumlah siklus proses laser 5 dan 15 siklus. Kedua spesimen dirancang dengan lebar tekstur yang sama sebesar 0,2 mm sehingga pengaruh yang diamati pada pengujian gesek dapat difokuskan pada perbedaan kedalaman tekstur.

Pada spesimen dengan 5 siklus, kedalaman tekstur yang terbentuk sebesar 0,025 mm seperti yang terlihat pada Gambar 4.2(a). Kedalaman ini merepresentasikan tekstur dangkal yang diharapkan mampu berfungsi sebagai reservoir pelumas tanpa mengganggu kontinuitas film pelumas secara signifikan. Geometri ini dirancang untuk mengevaluasi performa tekstur dangkal dalam mendukung transisi rezim pelumasan dari *boundary* menuju *mixed lubrication.*




(a) (b)

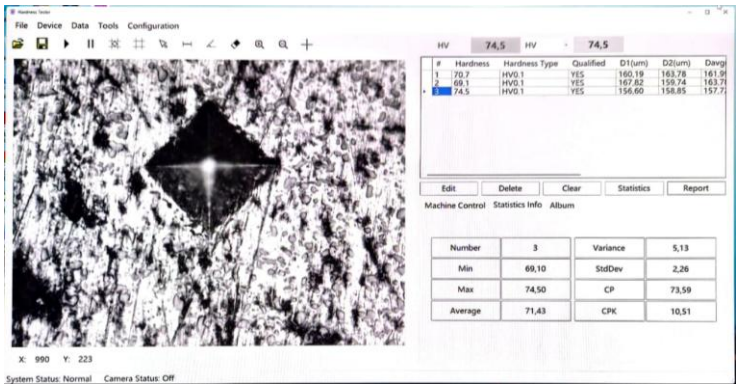
Gambar 4.2 Geometri *pattern surface texturing*: (a) 5 siklus (b) 15 siklus.

Pada spesimen dengan 15 siklus, kedalaman tekstur yang terbentuk sebesar 0,048 mm seperti yang terlihat pada Gambar 4.2(b). Peningkatan kedalaman ini mencerminkan intensitas pemakanan laser yang lebih tinggi, sehingga volume reservoir pelumas yang terbentuk juga meningkat. Variasi geometri ini digunakan

untuk menganalisis pengaruh kedalaman tekstur terhadap karakteristik gesek pada berbagai rezim pelumasan, sebagaimana dibahas lebih lanjut pada subbab 4.2 hasil pengujian gesek.

### 4.1.3 Pengujian kekerasan

Pengujian dilakukan pada dua komponen utama sistem kontak, yaitu *disc* dengan material Alumunium Dural 6061 dan pin *roller*. Gambar 4.3 menunjukkan contoh hasil pengujian kekerasan pada *software vickers hardness test*.




Gambar 4.3 Contoh hasil pengujian kekerasan.

Hasil pengujian kekerasan pin *roller* dan Alumunium Dural 6061 dihitung menggunakan persamaan 3.1 dan 3.2 berdasarkan rata-rata panjang jejak indentasi diagonal indentasi D1 dan D2 serta besarnya beban yang digunakan, yaitu 1 kgf. Untuk meningkatkan akurasi dan representativitas data, pengujian dilakukan pada tiga titik yang berbeda, kemudian nilai kekerasan ditentukan dari rata-rata hasil pengukuran *disc* dan *roller* yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Tabel 4.1 Hasil pengujian kekerasan pin *roller*

| No. | Hardness (HV) | $D_1$ (µm) | $D_2$ (µm) | $D_{avg}$ (µm) |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 696,4 | 48,46 | 54,75 | 51,6 |
| 2. | 727,4 | 47,45 | 53,53 | 50,49 |
| 3. | 755,8 | 46.93 | 52,14 | 49,54 |
| $\bar{x}$ | 726,53 | | | |

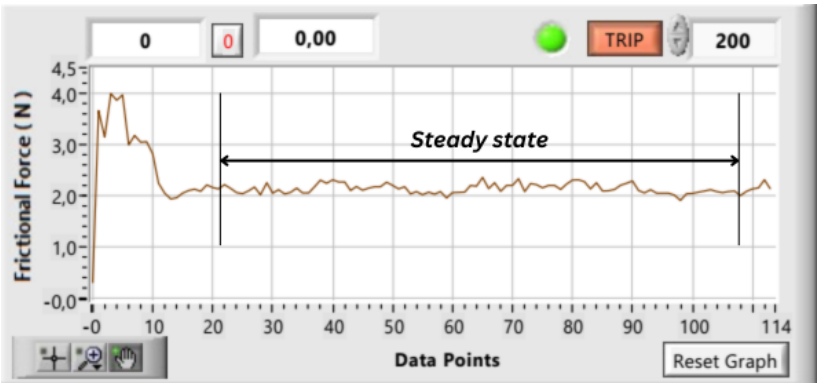
Tabel 4.2 Kekerasan Alumunium Dural 6061

| No. | Hardness (HV) | D1 (µm) | D2 (µm) | Davg (µm) |
|---|---|---|---|---|
| 1. | 70,7 | 160,19 | 163,78 | 161,98 |
| 2. | 69,1 | 167,82 | 159,74 | 163,78 |
| 3. | 74,5 | 156,6 | 158,85 | 157,72 |
| $\bar{x}$ | 71,43 | | | |

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, diperoleh nilai kekerasan rata-rata spesimen uji dengan material alumunium dural 6061 sebesar 71,43 HV. Sementara itu, hasil yang dimiliki oleh pin *roller* sebesar 726,53 HV. Perbedaan kekerasan yang dimiliki antara spesimen *disc* dan *pin* menunjukkan adanya perbedaan sifat mekanik yang signifikan, dimana material *pin* memiliki tingkat kekerasan 10 kali lipat lebih tinggi dibandingkan *disc*. Rasio kekerasan yang besar ini dilakukan untuk memastikan bahwa selama proses pengujian gesek berlangsung, deformasi dan mekanisme keausan mayoritas terjadi pada permukaan *disc*. Oleh karena itu, data koefisien gesek yang terekam oleh sensor tribometer dapat dipastikan merupakan sensor murni dari permukaan spesimen uji tanpa efek yang signifikan dari keausan geometri *pin*.

## 4.2 Hasil Pengujian Gesekan

Pengujian gesekan dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perlakuan *surface texturing* terhadap karakteristik kurva *Stribeck* pada *needle thrust bearing* di bawah variasi kecepatan putar. Hasil pengujian pada setiap variasi spesimen diperoleh secara *real time* melalui *software* tribometer *pin on disc,* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4 yang menampilkan hubungan antara gaya gesek terhadap waktu. Data tersebut kemudian diekspor dalam bentuk data mentah seperti yang terlihat pada Gambar 4.5 untuk diolah kembali untuk menentukan rentang waktu *steady state* yang merepresentasikan kondisi gesek yang stabil.




Gambar 4.4 Hasil pengujian gesek secara *real time*.

| TIME; | Load; | FF; | COF; | WEAR; | Chamber_Temp; | Humidity; | Speed; | Sliding Distance; |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,400; | 20,000; | 0,297; | 0,015; | -5,759; | 14,889; | -15,440; | 1000,000; | 0,838; |
| 1,400; | 20,000; | 3,671; | 0,184; | -44,586; | 12,361; | -15,440; | 1000,000; | 2,932; |
| 2,400; | 20,000; | 3,149; | 0,157; | -45,447; | 12,109; | -15,440; | 1000,000; | 5,027; |
| 3,402; | 20,000; | 4,004; | 0,200; | -48,069; | 14,125; | -15,440; | 1000,000; | 7,125; |
| 4,604; | 20,000; | 3,878; | 0,194; | -38,561; | 14,762; | -15,440; | 1000,000; | 9,643; |
| 5,606; | 20,000; | 3,978; | 0,199; | -47,091; | 14,895; | -15,440; | 1000,000; | 11,741; |
| 6,606; | 20,000; | 2,999; | 0,150; | -42,492; | 14,755; | -15,440; | 1000,000; | 13,836; |
| 7,608; | 20,000; | 3,181; | 0,159; | -43,134; | 14,559; | -15,440; | 1000,000; | 15,934; |
| 8,808; | 20,000; | 3,051; | 0,153; | -44,036; | 14,773; | -15,440; | 1000,000; | 18,447; |
| 9,811; | 20,000; | 3,064; | 0,153; | -44,213; | 14,849; | -15,440; | 1000,000; | 20,548; |
| 10,812; | 20,000; | 2,825; | 0,141; | -42,572; | 14,744; | -15,440; | 1000,000; | 22,645; |
| 12,014; | 20,000; | 2,249; | 0,112; | -42,173; | 14,821; | -15,440; | 1000,000; | 25,162; |
| 13,016; | 20,000; | 2,052; | 0,103; | -42,189; | 14,768; | -15,440; | 1000,000; | 27,261; |
| 14,018; | 20,000; | 1,940; | 0,097; | -44,097; | 14,805; | -15,440; | 1000,000; | 29,359; |
| 15,017; | 20,000; | 1,968; | 0,098; | -44,646; | 14,807; | -15,440; | 1000,000; | 31,452; |
| 16,219; | 20,000; | 2,053; | 0,103; | -38,770; | 14,864; | -15,440; | 1000,000; | 33,969; |
| 17,222; | 20,000; | 2,108; | 0,105; | -45,677; | 14,933; | -15,440; | 1000,000; | 36,070; |
| 18,226; | 20,000; | 2,133; | 0,107; | -39,366; | 14,684; | -15,440; | 1000,000; | 38,172; |
| 19,222; | 20,000; | 2,094; | 0,105; | -39,862; | 14,632; | -15,440; | 1000,000; | 40,258; |
| 20,423; | 20,000; | 2,218; | 0,111; | -37,003; | 14,567; | -15,440; | 1000,000; | 42,774; |

Gambar 4.5 Data mentah hasil pengujian gesek.

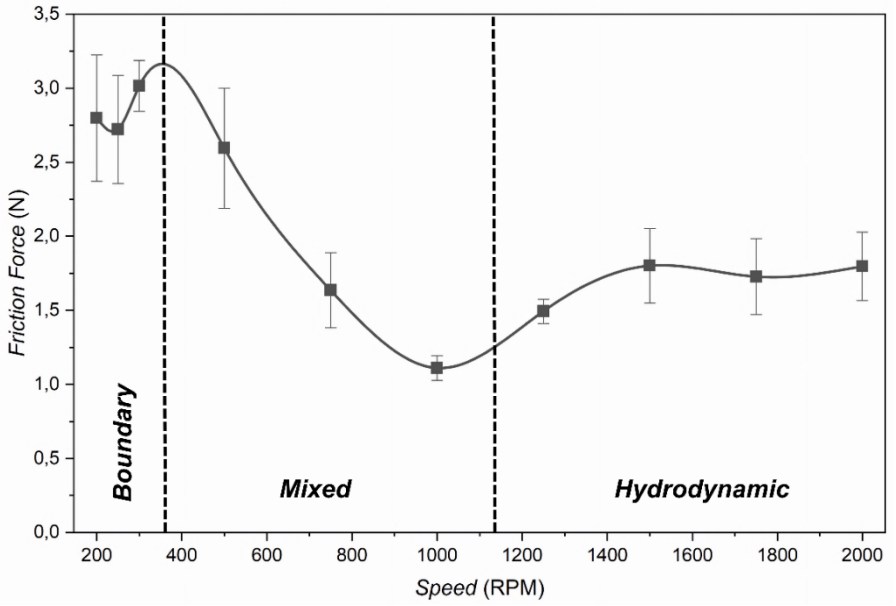
Berdasarkan data *steady state*, nilai gaya gesek yang digunakan dalam analisis ditentukan dengan cara menghitung rata-rata dari tiga kali pengujian pada masing-masing spesimen dan kondisi pengujian. Nilai rata-rata ini selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis perbandingan performa tribologi antar spesimen yang disajikan dalam bentuk kurva *Stribeck* untuk mengidentifikasi perubahan perilaku gesekan serta perpindahan rezim pelumasan dari *boundary, mixed,* dan *hydrodynamic* pada masing-masing kondisi permukaan, yaitu spesimen tanpa tekstur (TP), 5 siklus, dan 15 siklus.

### 4.2.1 Tanpa tekstur (TP)

Eksperimen pertama dilakukan pada spesimen *disc* dengan material Alumunium Dural 6061 tanpa diberikan perlakuan *surface texturing.* Konfigurasi ini digunakan sebagai acuan pembanding untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan dan kedalaman *surface texturing* terhadap fenomena gesekan yang terjadi. Berdasarkan data nilai gaya gesek pada Tabel 4.3 dan kurva *Stribeck* pada Gambar 4.6, nilai gaya gesek mengalami peningkatan pesat di kecepatan awal (200−300 rpm) hingga mencapai 3,02 N. Nilai ini menunjukkan sistem mencapai rezim *boundary lubrication*, yang mengindikasikan bahwa pelumasan terjadi dengan kontak langsung antara *asperity* permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa eksperimen berjalan secara stabil dan hasil dapat dipercaya untuk dijadikan acuan dalam analisis perbandingan dengan konfigurasi *surface texturing* lainnya.

Tabel 4.3 Nilai gaya gesek spesimen TP

| *Speed* (RPM) | *Friction force* (N) | Standar deviasi |
|---|---|---|
| 200 | 2,80 | 0,43 |
| 250 | 2,72 | 0,36 |
| 300 | 3,02 | 0,17 |
| 500 | 2,60 | 0,41 |
| 750 | 1,64 | 0,25 |
| 1000 | 1,11 | 0,08 |
| 1250 | 1,49 | 0,08 |
| 1500 | 1,80 | 0,25 |
| 1750 | 1,73 | 0,26 |
| 2000 | 1,80 | 0,23 |




Gambar 4.6 Hasil pengujian gesek spesimen tanpa tekstur.

Pada rentang kecepatan menengah (300-1000 rpm), nilai gaya gesek secara bertahap mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya kecepatan hingga mencapai nilai terendah sebesar 1,11 N pada kecepatan 1000 rpm. Hal ini menunjukkan terjadinya perpindahan rezim pelumasan dari *boundary* menuju *mixed lubrication*, di mana sebagian besar pelumasan sudah tidak lagi bergantung pada kontak langsung antar *asperity* permukaan, tetapi masih ada sebagian gesekan yang terjadi pada rentang kecepatan tersebut.

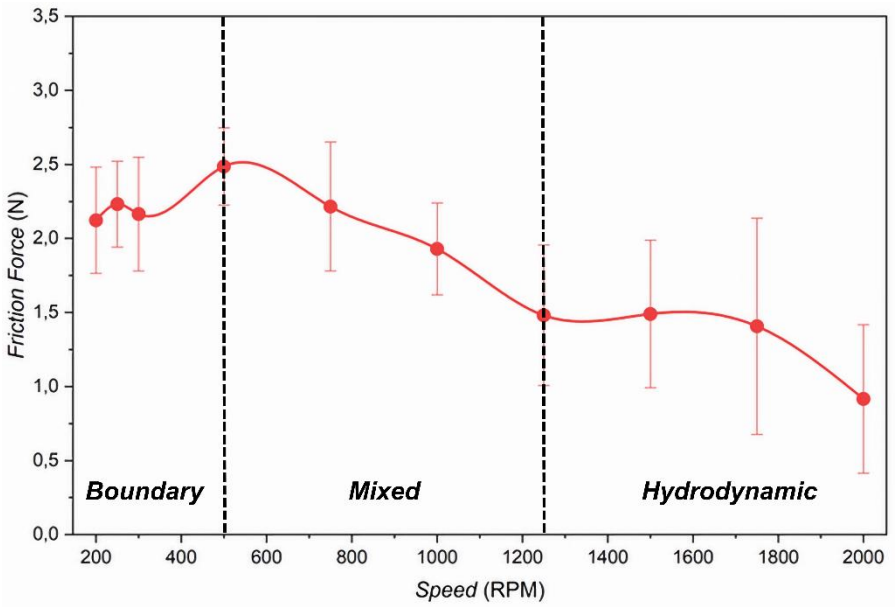
Lalu, pada rentang kecepatan tinggi (1250−2000 rpm), terlihat bahwa nilai gaya gesek mengalami kenaikan pada kecepatan 1500 dan cenderung stabil seiring meningkatnya kecepatan. Kondisi ini menunjukkan sistem telah mengalami perpindahan rezim dari *mixed* menuju *hydrodynamic lubrication*, di mana film pelumas yang stabil terbentuk untuk memisahkan permukaan yang saling bergesekan, sehingga mengurangi gesekan secara signifikan dan memungkinan sistem beroperasi dengan lebih efisien. Dengan demikian, eksperimen ini menunjukkan bahwa spesimen tanpa tekstur beroperasi dengan perubahan yang jelas dalam rezim pelumasan seiring meningkatnya kecepatan, hasil ini memberikan gambaran dasar yang penting untuk membandingkan efek dari perlakuan *surface texturing* pada spesimen *disc* lainnya.

### 4.2.2 5 siklus

Eksperimen kedua dilakukan dengan menggunakan spesimen *disc* Alumunium Dural 6061 yang telah diberikan perlakuan *surface texturing* pola 45° arah gesekan dengan 5 siklus penembakan laser. Konfigurasi ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh keberadaan dan kedalaman tekstur permukaan terhadap fenomena gesekan pada rentang kecepatan yang berbeda. Berdasarkan data nilai gaya gesek pada Tabel 4.4 dan kurva *Stribeck* pada Gambar 4.7, sama seperti spesimen TP, nilai gaya gesek mengalami peningkatan pesat pada kecepatan rendah (200-300 rpm) yaitu sebesar 2,49 N pada kecepatan 300 rpm, turun sekitar 0,53 N jika dibandingkan dengan spesimen TP. Meskipun memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan spesimen TP, nilai ini menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam rezim *boundary lubrication*, yang menunjukkan bahwa tekstur dengan kedalaman 5 siklus mampu memberikan perbaikan dalam distribusi pelumas, sehingga mampu mengurangi kontak langsung antar asperity permukaan.

Tabel 4.4 Nilai gaya gesek spesimen 5 siklus

| *Speed* (RPM) | *Friction force* (N) | Standar deviasi |
|---|---|---|
| 200 | 2,12 | 0,36 |
| 250 | 2,23 | 0,29 |
| 300 | 2,11 | 0,38 |
| 500 | 2,49 | 0,26 |
| 750 | 2,22 | 0,44 |
| 1000 | 1,93 | 0,31 |
| 1250 | 1,48 | 0,47 |
| 1500 | 1,49 | 0,50 |
| 1750 | 1,41 | 0,73 |
| 2000 | 0,92 | 0,50 |




Gambar 4.7 Hasil pengujian gesek spesimen 5 siklus.

Pada kecepatan menengah (300-1000 rpm), terlihat penurunan gaya gesek yang lebih jelas, dengan nilai terendah sebesar 1,48 pada kecepatan 1250 rpm. Hal ini menunjukkan perpindahan rezim pelumasan dari *boundary* menuju *mixed lubrication*, dengan kontribusi pelumasan dari film pelumas yang semakin besar. Peningkatan pelumasan pada kondisi ini menunjukkan bahwa tekstur permukaan dengan 5 siklus lebih efektif dalam mengoptimalkan distribusi pelumas dibandingkan dengan spesimen *disc* TP.

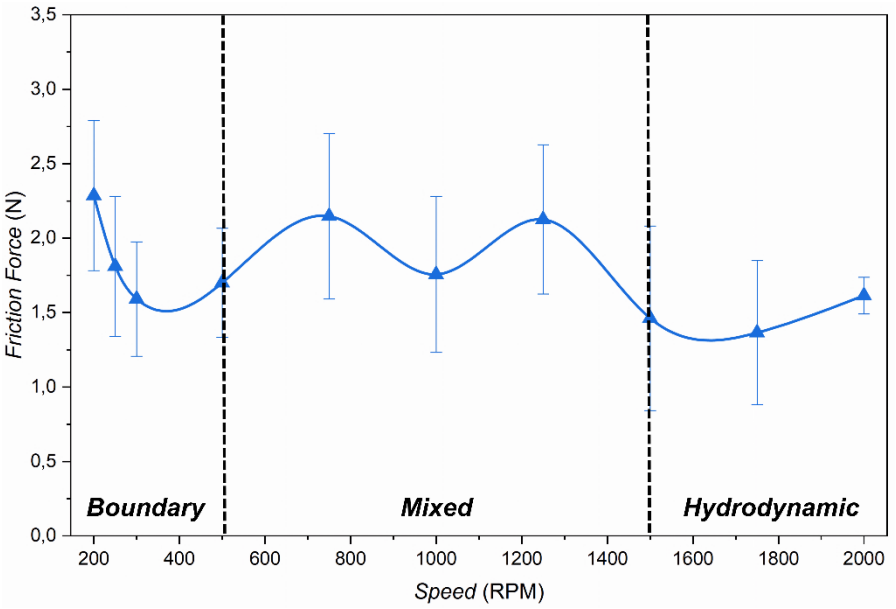
Pada kecepatan tinggi (1250-2000 rpm), terlihat nilai gaya gesek stabil pada rentang 1,4−1,5 N sebelum akhirnya menurun ke 0,92 pada kecepatan 2000 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa sistem telah beralih ke rezim *hydrodynamic lubrication*. Dapat dilihat pada Gambar 4.7, pada kecepatan tinggi, permukaan tekstur mampu mempertahankan stabilitas film pelumas lebih baik dibandingkan dengan spesimen *disc* TP yang memberikan pengurangan gesekan yang lebih efisien.

### 4.2.3 15 siklus

Eksperimen ketiga dilakukan pada spesimen *disc* Alumunium Dural 6061 yang diberikan perlakuan *surface texturing* pola 45° arah gesekan dengan kedalaman 15 siklus penembakan *laser marking*. Berdasarkan data nilai gaya gesek pada Tabel 4.5 dan kurva *Stribeck* pada Gambar 4.8, gaya gesek memiliki nilai yang cukup tinggi pada kecepatan rendah (200-300 rpm) yang memiliki nilai 2,29 N pada kecepatan 200 rpm, turun sekitar 0,73 N dibandingkan spesimen TP. Nilai ini menunjukkan sistem beroperasi pada rezim *boundary lubrication*, namun dengan penurunan gaya gesek yang lebih signifikan, menunjukkan perbaikan dalam distribusi pelumas.

Tabel 4.5 Nilai gaya gesek spesimen 15 siklus.

| *Speed* (RPM) | *Friction force* (N) | Standar deviasi |
|---|---|---|
| 200 | 2,29 | 0,50 |
| 250 | 1,81 | 0,47 |
| 300 | 1,59 | 0,38 |
| 500 | 1,70 | 0,37 |
| 750 | 2,15 | 0,56 |
| 1000 | 1,76 | 0,52 |
| 1250 | 2,13 | 0,50 |
| 1500 | 1,46 | 0,62 |
| 1750 | 1,37 | 0,48 |
| 2000 | 1,61 | 0,12 |



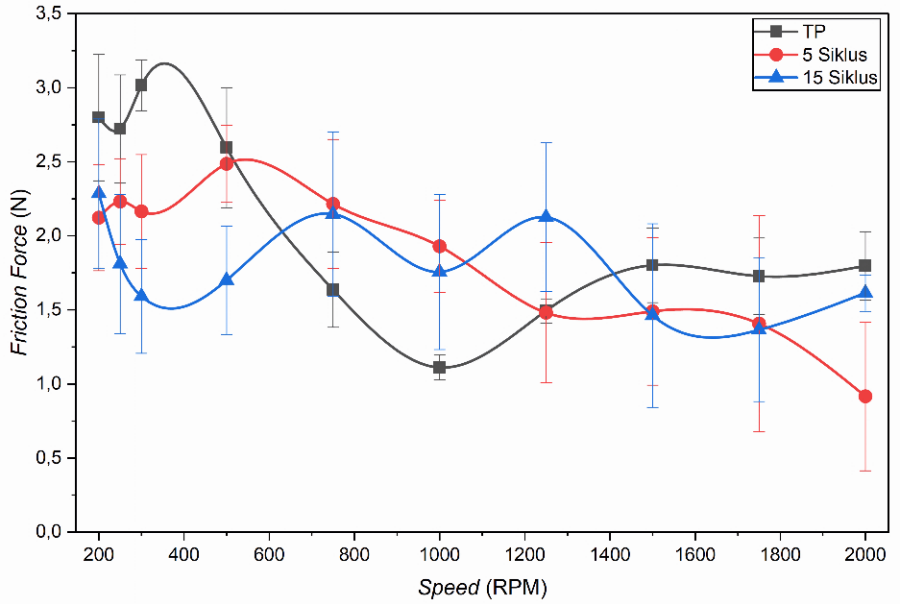

Gambar 4.8 Hasil pengujian gesek spesimen 15 siklus.

Pada kecepatan menengah (300−1000 rpm), gaya gesek mengalami fluktuasi yang cukup signifikan. Nilai gaya gesek pada kecepatan 750 rpm tercatat sebesar 2,15 N dan mengalami fluktuasi antara 2,15 hingga 1,70 N seiring meningkatnya kecepatan hingga 1250 rpm. Fluktuasi yang terjadi menunjukkan transisi ke rezim *mixed lubrication*, di mana sebagian permukaan sudah terpisah oleh film pelumas, tetapi masih ada bagian yang mengalami kontak antar *asperity* dikarenakan distribusi pelumas yang tidak sepenuhnya merata.

Pada kecepatan tinggi (1250−2000 rpm), nilai gaya gesek mulai menurun secara stabil, mencapai nilai sekitar 1,37 N pada kecepatan 1750 rpm dan cenderung stabil hingga mencapai 1,61 N pada 2000 rpm. Kestabilan ini menunjukkan bahwa sistem telah memasuki rezim *hydrodynamic lubrication*, di mana film pelumas yang stabil sepenuhnya memisahkan permukaan yang bergesekan sehingga mengurangi nilai koefisien gesek secara signifikan.

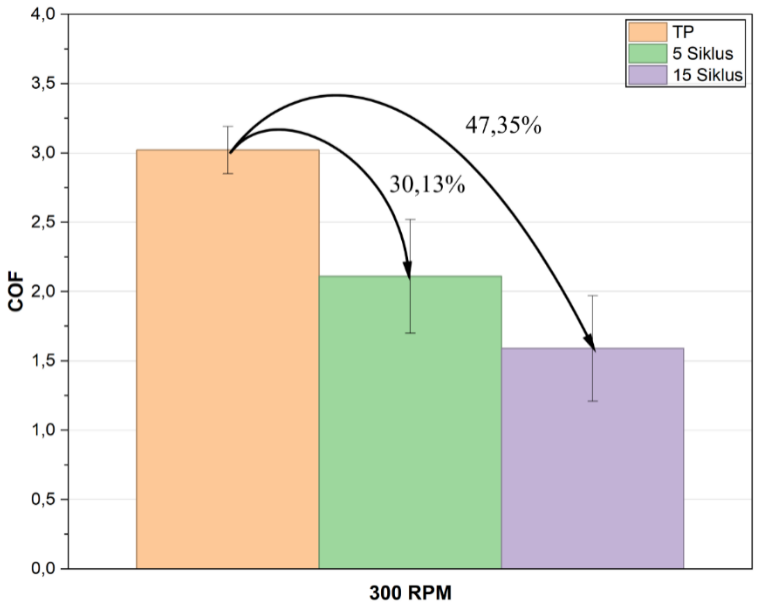
### 4.2.4 Perbandingan spesimen perlakuan *surface texturing* dengan tanpa tekstur

Berdasarkan hasil analisis pada subbab 4.2.1 s.d 4.2.3 yang melampirkan hasil pengujian gesekan dengan alat tribometer *pin on disc* dengan memvariasikan kedalaman tekstur pada spesimen *disc* Alumunium Dural 6061 yang dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh kedalaman tekstur terhadap nilai gaya gesek yang meliputi perpindahan rezim pelumasan. Perbandingan bertujuan untuk mengidentifikasi konfigurasi yang paling efektif untuk meningkatkan kinerja spesimen *disc* Alumunium Dural 6061 tanpa tekstur (TP), tekstur 5 siklus, dan tekstur 15 siklus pada *needle thrust bearing*. Gambar 4.9 menunjukkan seluruh spesimen menunjukkan pola kurva *Stribeck* yang serupa, ditandai dengan perubahan gaya gesek seiring meningkatnya kecepatan putar. Pola ini menunjukkan terjadinya perpindahan rezim pelumasan dari *boundary* menuju *mixed,* dan selanjutnya ke *hydrodynamic*. Meskipun demikian, karakteristik nilai gaya gesek dan transisi antar rezim menunjukkan perbedaan yang signifikan untuk setiap perlakuan *surface texturing*.




Gambar 4.9 Perbandingan hasil pengujian spesimen tanpa tekstur, 5 siklus, dan 15 siklus.

Pada saat rezim *boundary lubrication*, Gambar 4.10 menunjukkan spesimen tanpa tekstur menunjukkan nilai gaya gesek tertinggi, yaitu 3,01 N pada kecepatan 300 rpm. Kecepatan 300 rpm digunakan sebagai representasi kondisi rezim *boundary lubrication* dikarenakan memiliki karakteristik gaya gesek yang masih tinggi dan belum menunjukkan penurunan yang signifikan. Perlakuan *surface texturing* pada spesimen 5 siklus menurunkan nilai gaya gesek sebesar 30,13% menjadi 2,11 N, sedangkan pada spesimen *disc* 15 siklus memberikan penurunan yang lebih besar, yakni sebesar 47,35% atau 1,59 N dibandingkan spesimen tanpa tekstur. Hal ini menunjukkan bahwa tekstur mikro yang dihasilkan oleh metode *Laser Surface Texturing* (LST) berperan dalam meningkatkan volume pelumas di area kontak sehingga intensitas kontak antar *asperity* pada kecepatan rendah dapat berkurang. Kondisi ini sejalan dengan penelitian Sasaki et al. serta Wang et al. yang menyatakan bahwa tekstur mikro dapat berfungsi sebagai reservoir pelumas dan membantu menurunkan gesekan pada kondisi pelumasan terbatas [3], [9].



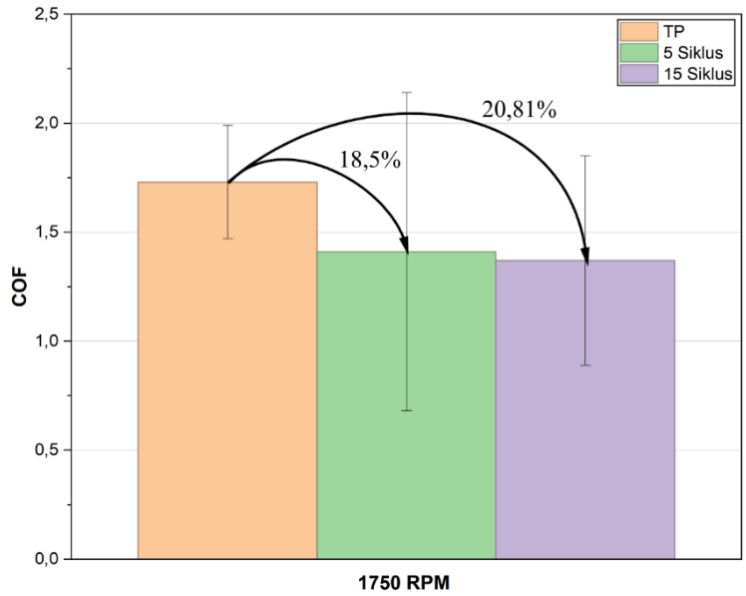

Gambar 4.10 Perbandingan gaya gesek antar variasi *surface texturing* pada kecepatan 300 rpm.

Pada rezim *mixed lubrication,* perbedaan performa antar perlakuan *surface texturing* pada masing-masing spesimen *disc* semakin terlihat jelas. Gambar 4.9 menunjukkan bahwa perlakuan *surface texturing* dengan pola 45° pada spesimen 5

dan 15 siklus mengalami perlambatan transisi dari rezim *boundary* menuju *mixed lubrication* pada kecepatan 500 rpm jika dibandingkan dengan spesimen TP. Spesimen 5 siklus memiliki nilai gaya gesek yang lebih tinggi dari spesimen TP dan menunjukkan penurunan gaya gesek yang lebih bertahap dan relatif stabil dengan rentang nilai 2,49 N pada kecepatan 500 rpm hingga 1,48 N pada kecepatan 1250 rpm, sedangkan spesimen 15 siklus mengalami fluktuasi nilai gaya gesek yang lebih besar pada rentang kecepatan 500 hingga 1250 rpm dengan nilai gaya gesek berada pada rentang 1,7 hingga 2,13 N. Kenaikan nilai gaya gesek yang terjadi pada rezim *mixed lubrication*. Kenaikan nilai gaya gesek dapat disebabkan karena fitur dari tekstur dengan pola 45° yang berperan sebagai *micro reservoir* dan *hydrodynamic lift* belum bekerja secara optimal, sehingga kontak antar *asperity* permukaan masih cukup tinggi yang menyebabkan nilai gaya gesek lebih tinggi dibandingkan spesimen TP [33]. Fluktuasi yang terjadi pada spesimen 15 siklus terjadi karena kedalaman tekstur yang berlebihan dapat menyebabkan ketidakstabilan tekanan lokal dan gangguan pembentukan film pelumas pada rezim *mixed lubrication* [8], [9].

Pada rezim *hydrodynamic lubrication,* kedua spesimen dengan perlakuan *surface texturing* menunjukkan hasil gaya gesek yang lebih rendah dibandingkan spesimen tanpa tekstur. Gambar 4.11 menunjukkan spesimen tanpa tekstur memiliki nilai 1,73 N pada kecepatan 1750 rpm. Kecepatan 1750 rpm dipilih sebagai representasi rezim *hydrodynamic lubrication* karena pada kecepatan ini koefisien gesek telah mencapai nilai rendah dan stabil, yang menunjukkan telah terbentuknya film pelumas kontinu. Perlakuan *surface texturing* 5 siklus dan 15 siklus menunjukkan hasil yang serupa pada rezim ini. Spesimen 5 siklus menunjukkan penurunan sebesar 18,5% menjadi 1,4 N, tidak jauh berbeda dengan spesimen 15 siklus yang menunjukkan penurunan sebesar 20,81% menjadi 1,37 N jika dibandingkan dengan spesimen tanpa tekstur. Meskipun masing-masing spesimen dengan perlakuan *surface texturing* berhasil menurunkan nilai gaya gesek pada rezim ini, spesimen 5 siklus menunjukkan performa yang paling stabil jika dibandingkan dengan spesimen 15 siklus yang masih menunjukkan fluktuasi nilai gaya gesek. Kondisi ini menunjukkan bahwa kedalaman tekstur 5 siklus merupakan konfigurasi yang paling optimal pada kecepatan tinggi karena mampu

mendukung pembentukan film pelumas yang kontinu tanpa mengganggu aliran fluida. Sedangkan, spesimen 15 siklus menunjukkan bahwa kedalaman yang lebih besar dapat menyebabkan gangguan aliran pelumas dan ketidakstabilan pada kecepatan tinggi, hal ini sejalan dengan hasil penelitian dalam studi eksperimental dan numerik pada komponen *textured thrust bearing* [11], [12], [38].




Gambar 4.11 Perbandingan gaya gesek antar variasi *surface texturing* pada kecepatan 1750 rpm.

Berdasarkan data yang diperoleh dan diinterpretasikan pada Gambar 4.6 s.d. 4.9, hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan *surface texturing* pola 45° dengan kedalaman 5 dan 15 siklus beroperasi pada rezim *mixed lubrication* yang terlalu lama dan mengalami ketidakstabilan nilai gaya gesek yang dialami spesimen 15 siklus. Namun, dengan spesimen TP sebagai acuan pembanding, perlakuan *Laser Surface Texturing* pola 45° memberikan peningkatan performa pada *needle thrust bearing*, dapat diamati pada Gambar 4.9 bahwa nilai gaya gesek spesimen bertekstur pada kecepatan 200−500 rpm berada pada kisaran yang hampir setara dengan nilai gaya gesek spesimen tanpa tekstur pada kecepatan 1500−2000 rpm. Kondisi ini menunjukkan bahwa penerapan *surface texturing* menyebabkan kondisi pelumasan yang lebih menguntungkan telah tercapai pada kecepatan yang lebih rendah. Hal ini dapat terjadi karena meningkatnya ketebalan

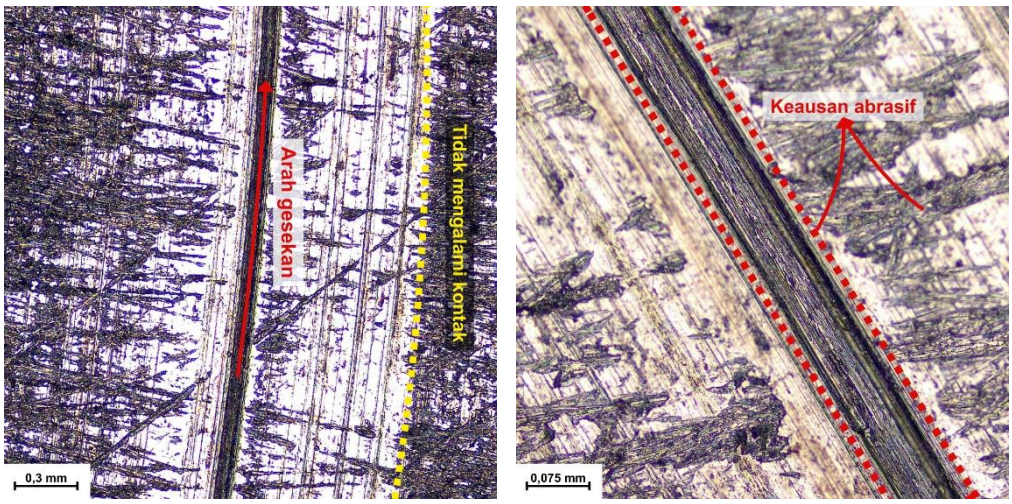
film pelumas pada permukaan bertekstur sehingga terjadi pergeseran karakteristik kurva *Stribeck* ke arah kecepatan yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, hasil pembahasan ini menunjukkan bahwa meskipun perlakuan *surface texturing* secara umum mampu menurunkan nilai gaya gesek pada rezim *boundary* dan *hydrodynamic*, kedalaman tekstur pada spesimen 5 siklus memberikan performa terbaik berupa keseimbangan antara penurunan dan kestabilan gesekan. Berdasarkan hasil yang didapat, spesimen 5 siklus dengan kedalaman 0,025 mm dapat dinyatakan sebagai konfigurasi perlakuan *surface texturing* paling optimal dalam penelitian ini, baik dari sisi performa gesekan, stabilitas transisi rezim pelumasan, dan relevansinya terhadap aplikasi pada *needle thrust bearing*.

## 4.3 Evaluasi Visual Keausan Pasca Pengujian

Setelah pengujian gesekan menggunakan alat tribometer *pin on disc* selesai, dilakukan evaluasi visual untuk menganalisis kondisi permukaan spesimen pada spesimen tanpa tekstur, 5 siklus, dan 15 siklus. Evaluasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi sejauh mana tekstur permukaan mempengaruhi tingkat keausan yang terjadi pada masing-masing spesimen setelah pengujian gesekan.

Gambar 4.12(a) menunjukkan permukaan spesimen tanpa tekstur memiliki tanda-tanda keausan yang cukup signifikan. Hal ini ditandai oleh adanya gesekan yang rapat, memanjang, dan sejajar dengan arah gesekan pada hampir seluruh area yang mengalami kontak. Pola alur keausan abrasif di sepanjang lintasan gesek, yang terlihat pada Gambar 4.12(b) menunjukkan terjadinya dominasi kontak langsung antar *asperity* akibat tidak adanya fitur permukaan yang berfungsi reservoir pelumas sehingga meningkatkan intensitas keausan selama pengujian gesek.

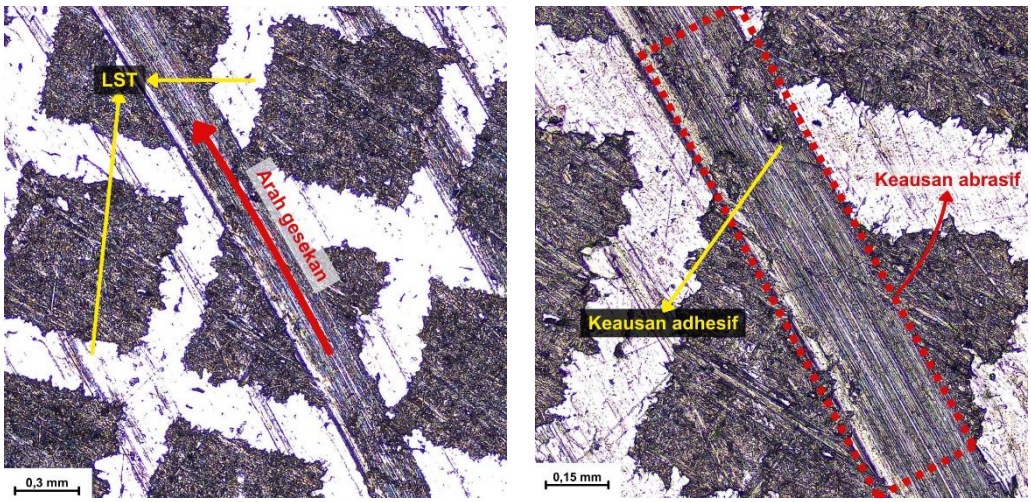



(a) (b)

Gambar 4.12 Hasil pengamatan mikroskop spesimen *disc* TP dengan perbesaran (a)5x dan (b) 20x.

Gambar 4.13(a) dan (b) menunjukkan kondisi permukaan spesimen 5 siklus setelah pengujian gesek. Pada permukaan yang mengalami gesekan, tampak alur keausan abrasif yang memanjang searah dengan gerak gesekan dan keausan adhesif lokal, namun dengan intensitas yang lebih rendah dibandingkan spesimen TP. Hal ini mengindikasikan bahwa fitur tekstur berperan dalam membatasi area

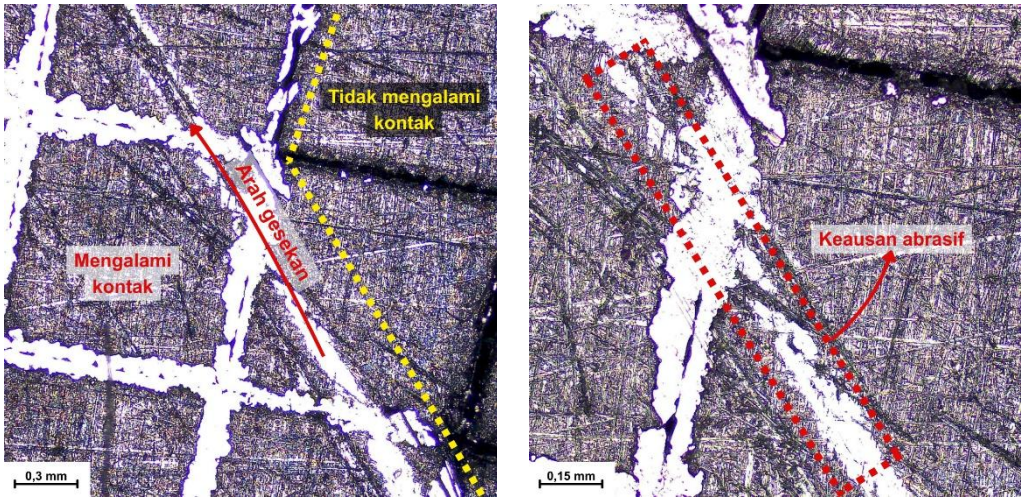
kontak langsung. Pola keausan ini menunjukkan bahwa spesimen 5 siklus mampu menjaga kestabilan kontak dan mendukung mekanisme pelumasan selama pengujian gesek.




(a) (b)

Gambar 4.13 Hasil pengamatan mikroskop spesimen 5 siklus dengan perbesaran (a)5x dan (b) 10x.

Hasil pengamatan mikroskop pada spesimen 15 siklus ditunjukkan pada Gambar 4.11(a) dan (b). Mekanisme keausan yang terjadi tetap berupa keausan abrasif yang ditandai oleh goresan sejajar arah gesekan pada area yang mengalami kontak. Namun, intensitas dan kedalaman goresan tidak menunjukkan indikasi keausan yang lebih dalam dibandingkan spesimen 5 siklus. Area tekstur hasil LST yang tidak mengalami gesekan masih dapat terlihat dengan jelas. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman pada spesimen 15 siklus tidak secara lansung menyebabkan peningkatan tingkat keausan yang terlihat, meskipun pengaruhnya terhadap perilaku gesek dan stabilitas pelumasan.




(a) (b)

Gambar 4.14 Hasil pengamatan mikroskop spesimen *disc* 15 siklus dengan perbesaran (a) 5x dan (b) 10x.

Kondisi yang terjadi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 s.d. 4.11 konsisten dengan hasil pengujian gesek yang menunjukkan nilai koefisien gesek tertinggi pada spesimen bertekstur, sekaligus menegaskan peran *surface texturing* dalam mengurangi keausan dan memperbaiki kondisi pelumasan.

# BAB 5
# PENUTUP

## 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat dihasilkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penerapan *surface texturing* pola 45° pada spesimen 5 dan 15 siklus terbukti mampu menurunkan nilai gaya gesek pada rezim *boundary* dan *hydrodynamic lubrication*, namun mengalami kenaikan nilai gaya gesek pada rezim *mixed lubrication* dibandingkan spesimen tanpa tekstur. Sebagai contoh pada 300 RPM, penurunan gaya gesek masing-masing mencapai 30,13% dan 47,35%, sedangkan pada kecepatan 1750 RPM masing-masing sebesar 18,5% dan 20,81% dibandingkan dengan spesimen tanpa tekstur.
2. Kedua variasi kedalaman tekstur berpengaruh signifikan terhadap karakteristik kurva *Stribeck*. Spesimen 5 sikus menghasilkan nilai gaya gesek yang lebih stabil dibandingkan spesimen 15 siklus, khususnya pada kecepatan menengah hingga tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen 5 siklus lebih optimal dalam menjaga kestabilan film pelumas dibandingkan spesimen 15 siklus.
3. Penerapan *surface texturing* menyebabkan perubahan karakteristik kurva *Stribeck* pada tiap rezim pelumasan. Kedua variasi kedalaman mengalami perlambatan transisi antar rezim, di mana spesimen 5 dan 15 siklus memasuki rezim *mixed lubrication* pada kecepatan 500 rpm dan rezim *hydrodynamic lubrication* pada 1250 dan 1500 rpm.

## 5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk penelitian-penelitian selanjutnya diantaranya sebagai berikut:

1. Penelitian ini hanya menggunakan dua variasi kedalaman tekstur, yaitu 5 dan 15 siklus *laser marking*. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk mengeksplorasi variasi geometri dan kedalaman tekstur yang lebih luas untuk menentukan konfigurasi tekstur yang paling optimal dalam menurunkan koefisien gesek pada berbagai kondisi operasi.
2. Penelitian berikutnya disarankan untuk mengevaluasi pengaruh variasi kondisi operasi, seperti jenis dan viskositas pelumas serta rentang beban dan kecepatan yang lebih beragam agar rezim pelumasan pada kurva *Stribeck* dapat terlihat dengan jelas.
3. Diperlukan proses pengamplasan pada spesimen pin *roller* sebelum pengujian gesek. Langkah ini penting untuk meminimalkan variasi kondisi kontak awal serta menjamin distribusi tekanan yang lebih merata selama pengujian, sehingga mekanisme keausan yang terjadi dapat dianalisis secara lebih representatif dan konsisten.

# DAFTAR PUSTAKA


[1] Bharat. Bhushan, *Introduction to Tribology, 2nd Edition*, vol. 2. Wiley, 2013.

[2] S. Gimeno *et al.*, "Effect of different laser texturing patterns on rolling contact surface and its tribological & fatigue life behavior on 100Cr6 bearing steel," *Wear*, vol. 522, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204717.

[3] S. Sasaki, "Surface Texturing for Friction Control: A Review on Existing Technology and Prospects," *Tribology Online*, vol. 19, no. 2, pp. 105–120, Apr. 2024, doi: 10.2474/trol.19.105.

[4] P. Lei *et al.*, "Research status of laser surface texturing on tribological and wetting properties of materials: A review," *Optik (Stuttg).*, vol. 298, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ijleo.2023.171581.

[5] R. Ferreira, Ó. Carvalho, L. Sobral, S. Carvalho, and F. Silva, "Laser texturing of piston ring for tribological performance improvement," *Friction*, vol. 11, no. 10, pp. 1895–1905, Oct. 2023, doi: 10.1007/s40544-022-0723-5.

[6] H. J. Wang, B. T. Wang, F. Zhou, K. K. Guo, Y. Liu, and H. T. Lin, "Effect of laser surface texturing on friction performance and surface damage of silicon nitride ceramic," *Journal of Asian Ceramic Societies*, vol. 12, no. 2, pp. 184–193, 2024, doi: 10.1080/21870764.2024.2337416.

[7] S. Gimeno *et al.*, "Effect of different laser texturing patterns on rolling contact surface and its tribological & fatigue life behavior on 100Cr6 bearing steel," *Wear*, vol. 522, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.wear.2023.204717.

[8] R. Long *et al.*, "Parameter Optimization for the Improvement of Tribological Behavior of Textured Tapered Roller Bearings," *Lubricants*, vol. 13, no. 4, Apr. 2025, doi: 10.3390/lubricants13040165.

[9] Y. Wang *et al.*, "Optimization of Laser Surface Texturing Parameters for Improving Friction and Wear Resistance of GCr15 Bearing Steel Sliding Pairs," *Lubricants*, vol. 13, no. 12, Dec. 2025, doi: 10.3390/lubricants13120536.

[10] D. Sirohi and S. Aggarwal, “Numerical and Experimental Studies on Performance Enhancement of Thrust Pad Bearing Employing Surface Texture: A Review,” Sep. 01, 2023, *Faculty of Engineering, University of Kragujevac*. doi: 10.24874/ti.1463.03.23.06.

[11] G. Schnell, H. Studemund, R. Thomas, and H. Seitz, “Experimental investigations on the friction behavior of partially femtosecond laser-textured journal bearing shells,” *Tribol. Int.*, vol. 188, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.triboint.2023.108764.

[12] X. Xu, Y. Zhang, and S. Gao, “Effects of surface texture on tribological performance and bonding strength of phosphate coatings in cylindrical thrust roller bearings,” *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 77, no. 4, pp. 561–572, Mar. 2025, doi: 10.1108/ILT-12-2024-0484.

[13] B. Mao, A. Siddaiah, Y. Liao, and P. L. Menezes, “Laser surface texturing and related techniques for enhancing tribological performance of engineering materials: A review,” May 01, 2020, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.02.009.

[14] K. Chen and Y. Tang, “Research Progress on the Design of Surface Texture in Tribological Applications: A Mini-Review,” *Symmetry (Basel).*, vol. 16, no. 11, p. 1523, Nov. 2024, doi: 10.3390/sym16111523.

[15] M. S. Uddin, T. Ibatan, and S. Shankar, “Influence of surface texture shape, geometry and orientation on hydrodynamic lubrication performance of plane-to-plane slider surfaces,” *Lubrication Science*, vol. 29, no. 3, pp. 153–181, Apr. 2017, doi: 10.1002/ls.1362.

[16] M. Z. Mehrjardi, A. R. Shooroki, M. Rabani, and M. Rabani, “Effect of Surface Texture Depth with Various Geometric Shapes on the Steady-State Performance and Dynamic Stability of Noncircular Lobed Journal Bearings,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 8, Apr. 2025, doi: 10.3390/app15084412.

[17] X. Tang *et al.*, “Investigation on the Coupling Effect of Bionic Micro-Texture Shape and Distribution on the Tribological Performance of Water-Lubricated Sliding Bearings,” *Lubricants*, vol. 13, no. 7, p. 305, Jul. 2025, doi: 10.3390/lubricants13070305.

[18] N. Nurul, N. A. Fuad, M. A. Ahmad, and J. A. Ghani, “CFD analysis of textured journal bearing for performance parameters,” 2025.

[19] M. Muchammad, M. Tauviqirrahman, H. Nurahman, and J. Jamari, “Analysis of Lubrication Performance of Thrust Bearing with Texture Height Variation and Cavitation Modelling with CFD Simulation,” 2021.

[20] V. Brizmer, Y. Kligerman, and I. Etsion, “A Laser Surface Textured Parallel Thrust Bearing,” *Tribology Transactions*, vol. 46, no. 3, pp. 397–403, Jan. 2003, doi: 10.1080/10402000308982643.

[21] A. Partogi, M. Tauviqirrahman, and Muchammad, “Analisis Pengaruh Kekasaran Permukaan pada Hydrodynamic Journal Bearing dengan Pelumas Non-Newronian dengan Perangkat Lunak CFD,” vol. 10, p. 6, 2022.

[22] H. T. Athif, “Analisis Thermoelastic-Hydrodynamic pada Multilayer Gas Foil Thrust Bearing Dengan Variasi Material Pelapis dan Variasi Menggunakan Pendekatan Fluid Structure Interaction (FSI),” Universitas Diponegoro, Semarang, 2025.

[23] C. Anam, “Perencanaan Daya Dan Perhitungan Bantalan/Bearing Pada Mesin Pengupas Kulit Kacang Hijau,” Feb. 2016. [Online]. Available: http://repository.its.ac.id/76196/

[24] M. Linandar, “Analisa Pemilihan Bantalan Gelinding pada Belt Conveyor Mini,” *ALMIKANIKA*, vol. 3, no. 1, pp. 8–12, Nov. 2021, doi: 10.32832/almikanika.v3i1.5740.

[25] S.-H. Hong, “A novel design of journal bearings for stability under shock loads,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 22577, Sep. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-73178-1.

[26] M. Wasilczuk and M. Wodtke, “Experimental study on the feasibility of alternative materials for tilting pad thrust bearings operating in transition to mixed friction,” *Friction*, vol. 12, no. 4, pp. 812–822, Apr. 2024, doi: 10.1007/s40544-023-0838-3.

[27] T. A. Harris and M. N. Kotzalas, *Advanced Concepts of Bearing Technology*. CRC Press, 2006. doi: 10.1201/9781420006582.

[28] SKF, “Needle Roller Bearings Handbook,” Gothenburg, Sweden, Sep. 2015.

[29] E. Bergseth, M. Henriksson, S. Dizdar, and U. Sellgren, “Effects of thrust washer bearing surface characteristics on planetary gear train wear,” *Wear*, vol. 432–433, p. 202933, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.202933.

[30] T. Hu and L. Hu, “The study of tribological properties of laser-textured surface of 2024 aluminium alloy under boundary lubrication,” *Lubrication Science*, vol. 24, Mar. 2012, doi: 10.1002/ls.1165.

[31] Y. Meng *et al.*, “A review of advances in tribology in 2020–2021,” Oct. 01, 2022, *Tsinghua University*. doi: 10.1007/s40544-022-0685-7.

[32] J. Tervo, J. Junttila, V. Lämsä, M. Savolainen, and H. Ronkainen, “Hybrid methodology development for lubrication regimes identification based on measurements, simulation, and data clustering,” *Tribol. Int.*, vol. 195, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.triboint.2024.109631.

[33] R. Patel, Z. A. Khan, A. Saeed, and V. Bakolas, “A Review of Mixed Lubrication Modelling and Simulation,” 2022, *Faculty of Engineering, University of Kragujevac*. doi: 10.24874/ti.1186.09.21.11.

[34] S. Zhang, Z. Yan, Z. Liu, Y. Jiang, H. Sun, and S. Wu, “Experimental and Numerical Study of the Mixed Lubrication Considering Boundary Film Strength,” *Materials*, vol. 16, no. 3, Feb. 2023, doi: 10.3390/ma16031035.

[35] L. Deleanu, C. Georgescu, D. Guglea, and G. Ghiocel, “Stribeck Curve for Lubricants Based on Rapessed Oil.”

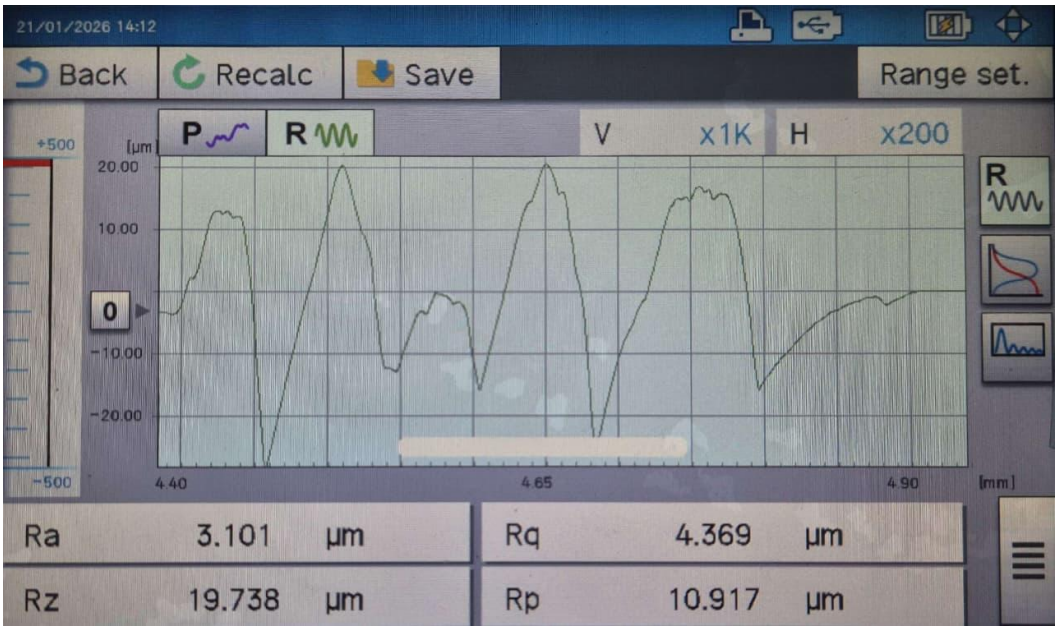
[36] Y. Qiu and M. M. Khonsari, “Experimental investigation of tribological performance of laser textured stainless steel rings,” *Tribol. Int.*, vol. 44, no. 5, pp. 635–644, May 2011, doi: 10.1016/j.triboint.2011.01.003.

[37] L. Vilhena, M. Sedlaček, B. Podgornik, Z. Rek, and I. Žun, “CFD Modeling of the Effect of Different Surface Texturing Geometries on the Frictional Behavior,” *Lubricants*, vol. 6, no. 1, p. 15, Jan. 2018, doi: 10.3390/lubricants6010015.

[38] J. Xue *et al.*, “Optimization of laser surface texturing for improved tribological performance in engine valve trains,” *Surface Science and Technology*, vol. 3, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s44251-025-00091-8.

# LAMPIRAN

1. Hasil pengujian kedalaman spesimen 5 siklus *laser marking*.




2. Hasil pengujian kedalaman spesimen 15 siklus *laser marking*

