

**ANALISIS DISTRIBUSI TERMAL PADA *BALL SCREW CNC MILLING* :
STUDI EKSPERIMEN DAN SIMULASI MENGGUNAKAN ANSYS**

(Skripsi)

Oleh

**KOHARUDIN
NPM 2115021109**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**ANALISIS DISTRIBUSI TERMAL PADA *BALL SCREW CNC MILLING* :
STUDI EKSPERIMEN DAN SIMULASI MENGGUNAKAN ANSYS**

Oleh

KOHARUDIN

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

ANALISIS DISTRIBUSI TERMAL PADA *BALL SCREW* CNC *MILLING* : STUDI EKSPERIMEN DAN SIMULASI MENGUNAKAN ANSYS

Oleh

KOHARUDIN

Pada mekanisme *ball screw*, terjadi gesekan antara *ball*, *nut* dan *screw shaft* yang kemudian menghasilkan panas yang dapat mempercepat keausan komponen. Oleh karena itu, analisis penyebaran panas serta pengaruh suhu ruangan dilakukan untuk mengevaluasi distribusi termal dan dampaknya pada *ball screw*. Penelitian ini menganalisis distribusi termal *ball screw* CNC *Milling* melalui pendekatan eksperimen dan simulasi numerik berbasis *Finite element Method* (FEM) menggunakan Ansys. *Ball screw* diukur untuk mengamati tren kenaikan suhu dan pola penyebaran panasnya pada kondisi AC *on* dan *off*, lalu divalidasi dengan simulasi Ansys untuk memvisualisasikan distribusi suhu dan mengidentifikasi area bertemperatur tertinggi. Pada kondisi AC *on*, kenaikan suhu di posisi sensor sebesar 41,8% dari suhu maksimum yaitu ditengah *screw shaft*. Sedangkan pada kondisi AC *off* meningkat menjadi 48,4%. Hasil eksperimen menunjukkan suhu *ball screw* dan komponen pendukung meningkat bertahap, dengan kenaikan 0,3°C pada kondisi AC *on* dan 0,5°C pada AC *off*, sementara *motor servo* mengalami kenaikan suhu tertinggi hingga 1°C. Hasil simulasi menunjukkan suhu tertinggi berada di *servo motor* dan pada *ball screw* pola distribusi suhunya merata sepanjang poros *screw shaft* dengan suhu tertinggi berada pada bagian tengah. Deformasi termal terbesar terjadi di tengah poros dan lebih besar pada kondisi AC *off*.

Kata Kunci: *Ball Screw*, Distribusi Termal, CNC *Milling*, *Finite Element Method* (FEM), Deformasi.

ABSTRACT

THERMAL DISTRIBUTION ANALYSIS IN CNC MILLING BALL SCREW: EXPERIMENTAL AND SIMULATION STUDY USING ANSYS

By

KOHARUDIN

In the ball screw mechanism, friction occurs between the ball, nut, and screw shaft, which then generates heat that can accelerate component wear. Therefore, heat distribution analysis and the effect of room temperature were conducted to evaluate the thermal distribution and its impact on the ball screw. This study analyzes the thermal distribution of CNC Milling ball screws through an experimental approach and numerical simulation based on the Finite Element Method (FEM) using Ansys. The ball screw was measured to observe the temperature rise trend and heat distribution pattern under AC on and off conditions, then validated with Ansys simulation to visualize the temperature distribution and identify the highest temperature areas. Under AC on conditions, the temperature increase at the sensor position was 41.8% of the maximum temperature, which was in the middle of the screw shaft. Meanwhile, under AC off conditions, it increased to 48.4%. The experimental results showed that the temperature of the ball screw and supporting components increased gradually, with an increase of 0.3°C under AC on conditions and 0.5°C under AC off conditions, while the servo motor experienced the highest temperature increase of up to 1°C. The simulation results show that the highest temperature is in the servo motor and that the temperature distribution pattern on the ball screw is evenly distributed along the screw shaft with the highest temperature in the middle. The greatest thermal deformation occurs in the middle of the shaft and is greater when the AC is off.

Keywords: Ball Screw, Thermal Distribution, CNC Milling, Finite Element Method (FEM), Deformation.

Judul Skripsi

: ANALISIS DISTRIBUSI TERMAL PADA *BALL SCREW CNC MILLING* : STUDI EKSPERIMEN DAN SIMULASI MENGGUNAKAN ANSYS

Nama Mahasiswa

: Koharudin

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2115021109

Program Studi

: S1 Teknik Mesin

Jurusan

: Teknik Mesin

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Ir. Gusri Akhyar I, S.T., M.T., Ph. D.
NIP. 197108171998021003

Ir. Nasril, M.T.
NIP. 196512301998031002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Prodi S1 Teknik Mesin

Ahmad Suudi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001

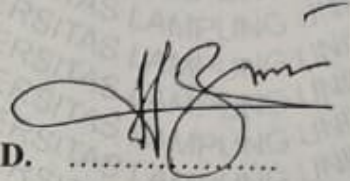
Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

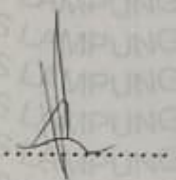
Ketua Penguji

: **Prof. Ir. Gusri Akhyar I, S.T., M.T., Ph. D.**



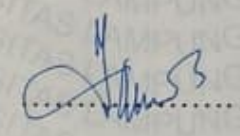
Anggota Penguji

: **Ir. Nasril, M.T.**

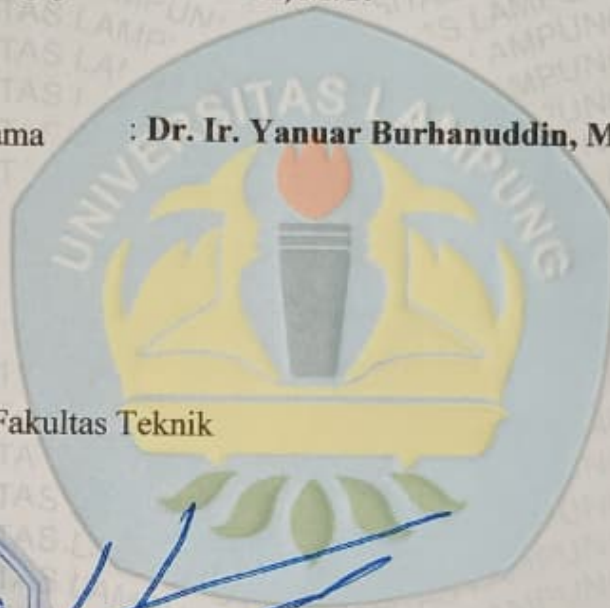


Penguji Utama

: **Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M. T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



 **Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T.**
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: **02 Februari 2026**

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Koharudin

NPM : 2115021109

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “**Analisis Distribusi Termal Pada Ball Screw CNC Milling : Studi Eksperimen dan Simulasi Menggunakan Ansys**” merupakan karya saya sendiri dan bukan karya orang lain. Semua tulisan yang tertuang di skripsi ini telah mengikuti kaidah penulisan karya ilmiah Universitas Lampung. Apabila di kemudian hari terbukti skripsi saya merupakan hasil penjiplakan atau dibuat orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi berupa pencabutan gelar yang saya terima.

Bandar Lampung, 02
Februari 2026



KOHARUDIN

NPM. 2115021109

RIWAYAT HIDUP



Lahir di Fajar Bulan, Lampung Barat pada hari minggu, 12 Mei 2002. Anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Wawan dan Ibu Untah. Menyelesaikan Pendidikan dasar di SDN 02 Fajar Bulan pada tahun 2014, kemudian menyelesaikan Pendidikan menengah pertama di SMP N 1 Way Tenong pada tahun 2017 dan lulus dari Pendidikan menengah atas di SMK N 1 Way Tenong pada tahun 2020.

Pada tahun 2021, terdaftar sebagai mahasiswa jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Kegiatan-kegiatan yang dilakukan selama menjadi mahasiswa yaitu sebagai berikut :

1. Menjadi anggota Bidang Edukasi dan Kemahasiswaan Teknik Mesin periode 2023/2024.
2. Melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Negeri Sungkai ,Kabupaten Way Kanan Pada Tahun 2023.
3. Melaksanakan Program MSIB Studi Independen Batch 6 di PT CADFEM Ansys Pada Bulan Februari – Juni 2024.
4. Melaksanakan Kerja Praktik dan Magang Riset Pada Bulan Agustus 2024 – Januari 2025 di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Serpong.

MOTO

“Tanggung jawab akan membuatmu dewasa, rasa sakit membuatmu kuat. Pengalaman membuatmu berani, dan setiap kesalahan akan membuat dirimu belajar. Tidak akan ada kesuksesan tanpa pertolongan dari Allah dan doa dari Kedua Orang Tua. Hidup itu singkat jika dinikmati dan terasa lama jika terus direnungi. Sejauh apapun dunia merubahmu, ingatlah bahwa dahulu kamu adalah anak yang rajin mengaji sehabis maghrib.”

-Koharudin-

PERSEMBAHAN

Alhamdulillahirobbil'alamin

Puja dan puji Syukur tercurahkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala Rahmat dan Karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.

Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW.

Kupersembahkan karya ini kepada :

Keluarga Tercinta

Ayah dan Ibu

Yang senantiasa memberikan yang terbaik dan do'a terbaik yang selalu menyertaiku. Kuucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada papa dan mama karena telah mendidik dan membesarkanku dengan cara yang dipenuhi kasih sayang, dukungan, dan pengorbanan. Kupersembahkan semua ini untuk kalian. Tanpa kalian, semua ini tidak akan terwujud. Setiap Langkah yang kuambil adalah hasil dari cinta dan kerja keras kalian.

Seluruh Keluarga Teknik Mesin 2021

Yang selalu memberikan motivasi dan dukungan.

Almamater Tercinta, Universitas lampung dan Jurusan Teknik Mesin

Tempat menimba ilmu, untuk menjadi bekal hidup dunia dan akhirat.

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Analisis Distribusi Termal Pada *Ball Screw CNC Milling* : Studi Eksperimen dan Simulasi Menggunakan Ansys” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Skripsi ini adalah bukti perjalanan panjang yang tidak mudah. Ada proses yang senyap, ada lelah yang tak terlihat, namun setiap langkah selalu disertai keyakinan bahwa usaha yang tulus tidak akan sia-sia. Di balik halaman-halaman ini, tersimpan banyak pelajaran, pengorbanan, serta doa yang senantiasa menyertai.

Dengan segala kerendahan hati, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda tercinta Wawan, ibunda tercinta Untah, kakak dan adikku tersayang Usman Setiawan dan Fattah Hermawan serta keluarga besar lainnya yang selalu memberikan Do’a serta dukungan yang tiada hentinya dengan penuh kasih sayang.
2. Bapak Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Ahmad Suudi S.T., M.T selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
4. Bapak Dr. Ir. Martinus S.T., M.Sc sebagai ketua program studi S1 Teknik Mesin.
5. Bapak Prof. Ir. Gusri Akhyar Ibrahim S.T., M.T., Ph. D. sebagai Dosen Pembimbing 1 yang telah membimbing penulis untuk dapat menyelesaikan penelitian ini.
6. Bapak Ir. Nasril, M.T. sebagai Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan

masukannya yang bermanfaat dalam menjalankan proses dan perbaikan skripsi ini.

7. Bapak Dr. Ir. Yanuar Burhanuddin, M. T. sebagai dosen pembahas yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam pelaksanaan penelitian.
8. Bapak Achmad Yahya Teguh Panuju, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, ide, motivasi, dan dukungan akademik penulis.
9. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu dan pengalaman dalam hidup untuk menjadi lebih baik.
10. Pak Jarni, Pak Dadang, dan Pak Agung yang dapat membantu segala urusan administrasi penulis di Jurusan Teknik Mesin.
11. Keluarga Besar Teknik Mesin 2021 yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.
12. Seluruh pihak yang terlibat dalam proses penelitian skripsi ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Bandar Lampung, 02
Februari 2026

Koharudin

NPM. 2115021109

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah.....	8
1.5 Manfaat Penelitian.....	8
1.6 Sistematika Penulisan	9
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	11
2.1 Pengertian Mesin CNC	11
2.2 <i>Ball Screw</i>	13
2.3 Fenomena Termal Pada <i>Ball Screw</i>	14
2.4 Komponen – Komponen Pada <i>Ball Screw</i>	16
2.5 Metode Elemen Hingga	20
III. METODE PENELITIAN	26
3.1 Objek, Tempat dan Waktu Penelitian	27

3.2 Alat dan Bahan	27
3.2.1 Mesin CNC <i>Milling Leadwell V-30</i>	27
3.2.2 Sensor PT100	28
3.2.3 Arduino NodeMCU ESP8266.....	29
3.2.4 Laptop	29
3.2.5 Software Solidworks 2018.....	30
3.2.6 Software Ansys R1 2024	30
3.3 Rangkaian Pengujian	30
3.3.1 Prosedur Pengujian Eksperimental	30
3.3.2 Pengujian Simulasi.....	31
3.4 Diagram Alur Penelitian	35
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1 Distribusi Temperatur Mesin CNC <i>Milling</i> Pada Pengujian Eksperimen dan Simulasi	36
4.1.1 Distribusi temperatur mesin cnc milling pada pengujian eksperimen kondisi AC <i>On</i>	36
4.1.2 Distribusi temperatur mesin cnc milling pada pengujian eksperimen dan simulasi kondisi AC <i>Off</i>	40
4.2 Distribusi Temperatur <i>Ball Screw</i> Kondisi AC <i>On</i>	44
4.3 Distribusi Temperatur <i>Ball Screw</i> Kondisi AC <i>Off</i>	48
4.4 Deformasi	51
V. PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56
DAFTAR PUSTAKA.....	57

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1 Penelitian - Penelitian Sebelumnya Yang Sudah Mengkaji Distribusi Termal Pada <i>Ball Screw</i>	21
Tabel 3. 1 Properti Material Komponen	33
Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Simulasi Total Deformasi.....	51

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 <i>Ball Screw</i>	13
Gambar 2. 2 Komponen – Komponen Pada <i>Ball Screw</i>	18
Gambar 2. 3 Kesalahan geometris bola dan lintasan	19
Gambar 2. 4 Kesalahan geometris normal di daerah kontak.....	19
Gambar 3. 1 Mesin CNC Milling Leadwell V-30	27
Gambar 3. 2 Sensor PT100	28
Gambar 3. 3 Arduino NodeMCU ESP8266	29
Gambar 3. 4 Titik - Titik Pemasangan Sensor PT100	31
Gambar 3. 5 Desain <i>Ball Screw</i> dan Komponen Lainnya Menggunakan Solidworks 2018.....	32
Gambar 3. 6 Meshing Pada <i>Ball Screw</i> Menggunakan Ansys R1 2021.....	34
Gambar 4. 1 Grafik Distribusi Temperatur pengujian eksperimen kondisi AC ON Pada Mesin CNC Milling	37
Gambar 4. 2 Distribusi Temperatur pengujian simulasi kondisi AC ON Pada Mesin CNC Milling	39
Gambar 4. 3 Distribusi temperatur mesin cnc milling pada pengujian eksperimen kondisi AC OFF	41
Gambar 4. 4 Distribusi temperatur mesin cnc milling pada pengujian simulasi kondisi AC OFF	43
Gambar 4. 5 Grafik pengujian eksperimen dan simulasi pada <i>ball screw</i> kondisi AC ON	45
Gambar 4. 6 Hasil pengujian simulasi kondisi AC ON pada <i>ball screw</i>	46

Gambar 4. 7 Grafik pengujian eksperimen kondisi AC OFF pada ball screw	49
Gambar 4. 8 Hasil pengujian simulasi kondisi AC OFF pada <i>ball screw</i>	50
Gambar 4. 9 Total deformasi hasil pengujian simulasi ball screw AC ON	53
Gambar 4. 10 Total deformasi hasil pengujian simulasi ball screw AC OFF	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam proses manufaktur modern, mesin CNC (*Computer Numerical Control*) memiliki peran penting dalam menghasilkan produk dengan tingkat presisi tinggi. Salah satu komponen vital dalam sistem pergerakan mesin CNC *milling* adalah *ball screw*. Penggunaan *ball screw* pada mesin-mesin yang memerlukan presisi tinggi dalam pemotongan, penggilingan, dan pengukuran, dan ini menjadikannya prinsip dasar dalam berbagai alat berat dan kendali otomatis (Pernandito et al., 2024; Wicaksono & Prayogi, 2021). Dari perspektif perkembangan teknologi, desain dan material *ball screw* terus mengalami peningkatan kinerja dan masa pakai mesin. Teknologi dan inovasi dalam proses manufaktur *ball screw*, termasuk peningkatan sistem pelumasan dan pengurangan gesekan, berkontribusi pada efisiensi energi dan pengurangan biaya pemeliharaan (Wicaksono & Prayogi, 2021; Yanto et al., 2022).

Dalam mesin CNC, *ball screw* memungkinkan bergerak secara halus dan presisi untuk menghasilkan produk dengan detail yang rumit dan kualitas tinggi. Sebagai contoh, dalam proses pengikisan bahan akrilik, *ball screw* memungkinkan mesin CNC bergerak dengan akurat untuk menghasilkan pola dan desain yang halus (Pernandito et al., 2024). Tanpa sistem *ball screw* yang presisi, akan sulit untuk mencapai tingkat ketepatan yang diperlukan dalam berbagai aplikasi manufaktur, di mana keakuratan dan kecepatan memainkan peran kunci (Yanto et al., 2022).

Ball screw berfungsi untuk mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan translasi dengan efisiensi tinggi. Namun, dalam proses kerjanya, *ball screw* dapat menghasilkan panas yang signifikan, yang diakibatkan oleh sejumlah faktor yang berkaitan dengan gesekan, suhu lingkungan, beban yang diterapkan, dan kecepatan pemutaran (Mahardika dkk., 2022). Dalam konteks perancangan dan operasi mesin CNC (*Computer Numerical Control*), distribusi panas pada komponen kunci seperti *ball screw* sangat penting untuk diperhatikan. *Ball screw* berfungsi sebagai penghubung antara gerakan rotasi motor servo dan gerakan linier, dan kinerjanya secara langsung mempengaruhi akurasi dan kualitas hasil pemesinan (Luo et al., 2015; Sun et al., 2021). Selama operasi, *ball screw* dapat mengalami pemanasan yang signifikan yang menyebabkan berbagai masalah, termasuk perubahan dimensional akibat ekspansi termal, yang bisa mengakibatkan kesalahan posisi pada mesin (S. Li & Lv, 2023; Yang et al., 2021).

Pada mekanisme *ball screw*, gesekan terjadi antara bola-bola dan lintasan (*raceway*) yang menghasilkan energi panas akibat konversi energi mekanis menjadi energi termal. Proses ini sangat kritis karena peningkatan suhu yang dihasilkan dapat mempengaruhi kinerja pelumasan serta mempercepat laju keausan komponen akibat penurunan viskositas pelumas (Zhao et al., 2022). Peningkatan kecepatan putar dan beban yang bekerja pada permukaan kontak antara bola dan jalur ulir menghasilkan peningkatan energi gesekan internal yang memicu kenaikan temperatur pada komponen tersebut, sehingga suhu permukaan sekrup dan *nut* akan meningkat seiring dengan kecepatan dan beban operasi (Cui et al., 2024). Gesekan yang terjadi pada permukaan kontak *ball screw* tidak hanya meningkatkan temperatur operasi, tetapi juga mempercepat keausan pada jalur bola dan *raceway*, yang pada akhirnya dapat menurunkan akurasi posisi, memperpendek masa pakai komponen, dan mengurangi performa sistem transmisi linear (Ali, 2025). Adapun penelitian – penelitian sebelumnya yang sudah mengkaji tentang distribusi termal pada *ball screw* sebagai berikut :

Tabel 1.1 Penelitian – penelitian sebelumnya yang sudah mengkaji distribusi termal pada *ball screw*

No	Peneliti (Tahun)	Judul Penelitian	Publikasi	Tujuan	Metode	Hasil Utama	Keterkaitan & Kesenjangan
1	(C. Liu et al., 2021)	<u>Research on Thermal Characteristics of Ball Screw Feed System Considering Nut Movement</u>	<i>Machines (MDPI)</i>	Menganalisis efek gerakan <i>nut</i> terhadap distribusi termal	Simulasi termal ANSYS, variasi aliran pendinginan, fokus pada pergerakan <i>nut</i> .	Pergerakan <i>nut</i> menciptakan distribusi suhu yang tidak merata, memengaruhi akurasi sistem secara signifikan.	Sangat relevan secara teknis. Belum memasukkan data simulasi secara terperinci beserta deformasinya.
2	(T. Li et al., 2018)	<u>Adaptive Real-Time Model on Thermal Error of Ball Screw Feed Drive Systems</u>	<i>IJAMT (Springer)</i>	Prediksi kesalahan termal secara <i>real-time</i>	Model adaptif dengan data sensor suhu <i>online</i> ; integrasi <i>real-time</i> dengan ANSYS.	Prediksi error termal meningkat akurat hingga 35% dibandingkan metode statik.	Belum mengkaji distribusi termal secara spasial detail. Cocok sebagai dasar pengembangan model adaptif penelitian ini.

3	(Jin et al., 2014)	<u>Thermal Characteristics of a CNC Feed System Under Varying Conditions</u>	<i>Precision Engineering (Elsevier)</i>	Memahami deformasi termal akibat perubahan beban kerja	Simulasi ANSYS dengan validasi eksperimental sebagian; fokus variasi kecepatan dan beban.	Deformasi meningkat secara nonlinier dengan kenaikan suhu dan beban operasional.	Tidak membahas distribusi termal lokal (lokalisasi panas). Penelitian ini dapat memperdalam aspek tersebut.
4	(Y. Li et al., 2020)	<u>Temperature Simulation and Thermal Equilibrium Analysis</u>	<i>Proc. Inst. Mech. Eng. (SAGE)</i>	Menganalisis suhu dan keseimbangan termal dalam sistem CNC	Simulasi ANSYS, pengaruh variasi beban dan kecepatan gerak nut.	Waktu mencapai keseimbangan termal bergantung pada kondisi operasi; suhu maksimal bervariasi 4-6°C.	Masih berbasis simulasi tanpa pengujian langsung. Penelitian ini mengisi dengan validasi eksperimental konkret.
5	(Razak et al., 2017)	<u>CNC Machine Capability Study Using Structural and Thermal Analysis</u>	<i>Int. J. of Applied Engineering Research</i>	Menilai pengaruh termal dan mekanik pada ball screw	Simulasi FEM di ANSYS, analisis <i>stress structural</i> dan termal simultan.	Lonjakan suhu menyebabkan konsentrasi <i>stress structural</i> ; suhu 49.9°C menyebabkan tegangan 4342 N.	Masih terbatas pada kondisi statik dan pendekatan struktur. Penelitian ini menambahkan sisi dinamis dan <i>real-time</i> eksperimental.

6	(Z. Li et al., 2019)	<u>Heat source forecast of ball screw drive system under actual working conditions</u>	Sensors (MDPI)	Memprediksi sumber panas berdasarkan pengukuran sensor aktual	Pengukuran suhu <i>real-time</i> , pemodelan ANSYS, pendekatan <i>inverse heat source modeling</i>	Akurasi prediksi meningkat 27% dengan pengukuran <i>real-time</i> dibandingkan pemodelan <i>default</i>	Belum ada integrasi deformasi mekanik dalam model termal. Penelitian ini dapat menyempurnakan dengan simulasi deformasi juga.
7	(dos Santos et al., 2018)	<u>Numerical and experimental modeling of thermal errors in a five-axis CNC machining center</u>	IJAMT (Springer)	Model numerik dan eksperimental kesalahan termal sistem multi-sumbu	Simulasi ANSYS, pemodelan kesalahan deformasi sumbu multi-koordinat, validasi eksperimen	Model menunjukkan efisiensi prediksi error hingga 80% untuk kondisi non-statis	Belum dikaji secara lokal pada sistem <i>ball screw</i> . Penelitian ini memperdalam distribusi termal spesifik pada <i>ball screw</i> .
8	(Z. jun Li et al., 2022)	<u>Thermal error prediction using inverse heat transfer analysis</u>	IJAMT (Springer)	Prediksi kesalahan termal pada <i>ball screw</i> z-axis	<i>Inverse heat transfer modeling</i> + ANSYS, validasi terhadap data eksperimen	Metode <i>inverse</i> meningkatkan ketepatan model hingga 19% dibandingkan metode langsung	Belum ada pengaruh pendingin udara <i>ball screw</i> . Penelitian ini melengkapi dengan analisis lebih luas dan variasi kondisi suhu ruangan.

9	(Zhe ng et al., 2024)	<i>Thermal characteristics with multiphysics coupling for precision CNC feed system</i>	<i>Bulletin of the Polish Academy of Sciences</i>	Kajian efek <i>coupling</i> multi- fisika (termal, mekanik, dinamis) pada <i>feed</i> CNC	Simulasi ANSYS <i>multiphysics</i> + eksperimen suhu dan deformasi simultan	Menunjukkan bahwa kesalahan termal dan deformasi saling memengaruhi dalam kondisi dinamis CNC	Hampir sejalan dengan pendekatan penelitian ini, tetapi belum memfokuskan pada karakteristik lokal <i>ball screw</i> .
10	(Xu et al., 2015)	<i>Thermal error forecast for air- cooling ball screw system</i>	<i>IJMMS (Elsevier)</i>	Prediksi <i>error</i> sistem pendinginan udara pada <i>ball screw</i>	ANSYS + eksperimen suhu; desain eksperimen suhu ruangan terkendali	<i>Ball screw</i> dengan sistem pendinginan udara menunjukkan penurunan deformasi termal hingga 38%	Belum menguji deformasi mekanik akibat suhu. Penelitian ini menambahkan deformasi struktural sebagai variabel pengamatan penting.

Berdasarkan data yang disajikan dalam Tabel Rangkuman Penelitian Terdahulu, dapat disimpulkan bahwa meskipun telah banyak studi dilakukan mengenai distribusi termal dan kesalahan posisi pada sistem *ball screw* mesin CNC, sebagian besar penelitian masih menunjukkan keterbatasan dalam hal cakupan analisis lokal, validasi eksperimen nyata, dan pengaruh suhu ruangan sebagai akibat langsung dari akumulasi panas. Beberapa penelitian bahkan hanya menekankan pada aspek pemodelan atau simulasi tanpa pendekatan eksperimental sehingga menghasilkan celah dalam pemahaman mendalam terhadap efek termal secara

komprehensif dalam kondisi kerja aktual. Oleh karena itu, penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan sebagai upaya mengisi kekosongan tersebut, dengan menggabungkan pendekatan eksperimen dan simulasi berbasis *Finite Element Method* (FEM) menggunakan *software* ANSYS dalam menganalisis distribusi termal dan dampaknya pada *ball screw* CNC milling. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan strategi prediksi dan mitigasi kesalahan termal guna meningkatkan akurasi dan stabilitas sistem mesin CNC secara keseluruhan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana profil distribusi suhu pada *ball screw* CNC milling berdasarkan pengujian eksperimen tanpa beban pemotongan?
2. Bagaimana profil simulasi distribusi termal ball screw menggunakan *software* ANSYS?
3. Seberapa besar perbedaan antara hasil distribusi termal dari pengujian eksperimen dengan hasil simulasi ANSYS?
4. Berapa nilai deformasi yang dihasilkan dari proses pengujian yang dilakukan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis distribusi suhu pada *ball screw* CNC milling berdasarkan hasil pengujian eksperimen.

2. Melakukan simulasi termal *ball screw* menggunakan *software* ANSYS.
3. Membandingkan hasil distribusi suhu antara data eksperimen dengan hasil simulasi.
4. Mencari nilai total deformasi yang dihasilkan dari proses pengujian simulasi yang dilakukan.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batas masalah yang diinginkan dalam penelitian adalah:

1. Pengambilan data suhu hanya dilakukan pada *ball screw* mesin CNC milling dalam kondisi tanpa beban pemotongan, dengan kecepatan 150 mm/min pada dua kondisi berbeda yaitu kondisi AC hidup dan AC mati selama periode waktu yang telah ditentukan.
2. Simulasi termal menggunakan ANSYS hanya difokuskan pada analisis distribusi suhu akibat efek gesekan dan pergerakan *ball screw*, tanpa mempertimbangkan gaya pemotongan.
3. Perbandingan hasil hanya dilakukan antara data eksperimen suhu aktual dengan hasil simulasi ANSYS, tanpa melakukan optimasi parameter material atau desain ulang komponen *ball screw*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan studi terkait analisis termal pada komponen mesin CNC, khususnya *ball screw*.

2. Memberikan informasi penting mengenai karakteristik distribusi suhu pada *ball screw* CNC milling.
3. Memberikan gambaran tentang potensi penerapan simulasi ANSYS dalam prediksi kondisi termal komponen mesin sehingga dapat mempercepat proses analisis tanpa harus melakukan uji coba fisik yang berulang.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada laporan tugas akhir ini terdiri dari 5 bab, antara lain sebagai berikut:

I. PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bagian ini menjelaskan dasar dan urgensi penelitian yang dilakukan serta ruang lingkup studi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini membahas teori-teori yang relevan dengan topik penelitian, seperti prinsip kerja mesin CNC milling, sistem ball screw, fenomena perpindahan panas, metode elemen hingga (Finite Element Method), serta studi literatur terkait penelitian sebelumnya yang mendukung analisis distribusi suhu pada ball screw.

III. METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan metode yang digunakan dalam penelitian, mulai dari peralatan dan bahan, prosedur eksperimen, pemasangan sensor suhu, perekaman data, serta langkah-langkah simulasi distribusi panas menggunakan ANSYS.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memuat hasil pengamatan dan simulasi yang diperoleh, seperti grafik distribusi suhu, perbandingan data eksperimen dan simulasi, serta analisis hubungan antara kecepatan gerak, waktu, dan kondisi lingkungan terhadap distribusi suhu. Pembahasan dilakukan untuk menjawab rumusan masalah dan membuktikan tujuan penelitian.

V. PENUTUP

Bab terakhir berisi kesimpulan dari hasil penelitian serta saran untuk penelitian selanjutnya, baik dari segi teknis pengukuran maupun pendekatan simulasinya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Mesin CNC

Mesin CNC merupakan suatu mesin yang dikontrol melalui komputer dengan menggunakan bahasa numerik atau perintah data dengan kode angka, huruf, dan simbol. Sistem kerja sistem CNC ini menggunakan sinkronisasi atau penyerentakan antara komputer dan mekaniknya, sehingga jika dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional, maka mesin perkakas CNC akan lebih teliti, lebih presisi, lebih cepat, dan biasanya untuk produksi massal. Dengan menggunakan mesin perkakas CNC dapat menunjang produksi yang membutuhkan tingkat kerumitan yang tinggi dan dapat mengurangi campur tangan manusia atau operator selama mesin beroperasi. Mesin NC pertama diciptakan pertama kali pada tahun 1940-1950, dengan memodifikasi mesin perkakas biasa. Dalam hal ini mesin perkakas biasa ditambahkan dengan motor yang akan menggerakkan pengontrol mengikuti titik-titik yang dimasukkan kedalam sistem oleh perekam kertas. Mesin perpaduan antara servo motor dan mekanis ini segera digantikan dengan sistem analog dan kemudian komputer digital, menciptakan Mesin perkakas modern yang disebut Mesin CNC (*Computer Numerical Control*) yang dikemudian hari telah merevolusi proses desain. Saat ini mesin CNC mempunyai hubungan yang sangat erat dengan program CAD (Widiyanto, 2018).

Komponen utama dari mesin CNC (*Computer Numerical Control*) sangat beragam dan masing-masing memiliki fungsi yang spesifik untuk memastikan operasi yang efektif dan akurat. Secara umum, mesin CNC terdiri dari beberapa komponen

fundamental yang meliputi struktur mesin, sistem penggerak, dan sistem kontrol. Pertama, struktur mesin, atau sering disebut sebagai "*bed*" mesin, memainkan peran penting dalam kualitas produk akhir. Struktur ini berperan sebagai fondasi bagi komponen lain dan harus mampu menahan beban statis serta beban dinamis yang dihasilkan selama proses pemesinan (Krisbudiman, 2020). Struktur *bed* yang kuat dapat mengurangi defleksi dan memastikan akurasi pemotongan (Priantoko et al., 2016). Selain itu, dalam konteks desain, pemilihan material (seperti besi cor) untuk *bed* dapat meningkatkan stabilitas dan kekuatan mesin (Tinulad & Widodo, 2023).

Sistem kontrol dalam mesin CNC berperan sebagai inti pengendali dinamika gerak sumbu, di mana servo motor digunakan sebagai aktuator utama yang menerima sinyal kontrol feedback untuk mengatur posisi dan kecepatan gerak. Pada sistem feedrate planning berbasis model servo response error, struktur kontrol servo motor PMSM diimplementasikan dalam tiga loop tertutup untuk meminimalkan respons lag dan kesalahan kontur, sehingga akurasi gerak feed CNC dapat ditingkatkan secara signifikan (Baoquan et al, 2023)

Lebih jauh, desain pengendali servo yang efektif pada mesin CNC juga melibatkan penggunaan metode kendali adaptif dan sliding mode control yang mampu mengurangi dampak gesekan nonlinier dan faktor waktu-variabel terhadap performa servo system. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa strategi kontrol servo tidak hanya sekedar menerjemahkan sinyal G-code menjadi gerak mekanis, tetapi juga secara aktif mengompensasi ketidaksempurnaan model dan nonlinieritas untuk mencapai gerak sumbu yang lebih stabil dan presisi tinggi (Taihao et al, 2023)

2.2 Ball Screw

Ball screw adalah sistem gerak mekanik yang mengubah gerak rotasi menjadi gerak linear dengan sedikit gesekan. Terdiri dari *spindle screw* dan mur yang terintegrasi dengan bola bantalan dan mekanisme pengembalian bola bantalan berupa *return tubes* atau *return caps* 2), *ball screw* menjadi sistem penggerak yang paling umum digunakan dalam aktuator permesinan. Ketika mendapat beban transmisi, beban seperti diteruskan ke bantalan bola, beban dipindah dari sekrup ke bola, dari bola ke mur, dan dari mur ke perangkat didorong atau dipindah. Dengan *ball screw*, bola bergulir antara poros sekrup dan mur untuk mencapai efisiensi yang tinggi. Hal ini hanya memerlukan daya torsi yang hanya sepertiga dibanding sekrup biasa (*lead screw*). Hal ini menjadikan *Ball screw* tidak hanya mampu mengubah gerak rotasi ke gerak lurus, tetapi juga mengubah gerak lurus gerak rotasi (Sulistiyo et al., 2016).



Gambar 2. 1 *Ball Screw*

(Benker et al., 2019)

Inti dari mekanisme *ball screw* adalah poros sekrup dan mur, yang menaungi bantalan bola. Bantalan bola bersirkulasi dalam jalur sekrup dan mur, membantu meminimalkan gesekan dan meningkatkan efisiensi mekanis. Biasanya, *ball screw*

menunjukkan efisiensi mekanis yang tinggi, yang dicirikan oleh koefisien gesekan yang rendah. Efisiensi ini sangat penting dalam aplikasi CNC, karena memastikan bahwa energi secara efektif diubah menjadi gerakan produktif tanpa kehilangan yang berlebihan karena gesekan (Zhou et al., 2018) .

Karakteristik dinamis *ball screw*, termasuk kekakuan dan sifat peredamnya, juga penting bagi kinerjanya. Berbagai penelitian telah mengidentifikasi model dinamis aksial, torsional, dan lentur sekrup bola. Model-model ini membantu dalam memahami bagaimana sekrup bola merespons dalam kondisi pembebanan yang berbeda dan memandu teknisi dalam menyetel sistem untuk kinerja yang lebih baik . Misalnya, memprediksi kekakuan dinamis secara akurat dapat mencegah getaran yang tidak diinginkan yang mungkin timbul selama operasi kecepatan tinggi, yang secara langsung memengaruhi presisi pemesinan (Cheng et al., 2020) .

2.3 Fenomena Termal Pada *Ball Screw*

Fenomena termal pada *ballscrew* merupakan aspek yang sangat penting dalam pengoperasian mesin CNC, karena dapat secara signifikan mempengaruhi akurasi dan kinerja sistem. Fenomena ini berhubungan dengan pemanasan yang dihasilkan akibat terjadinya pada kontak antara bola, mur, dan sekrup yang mana panas tersebut dapat menyebabkan pendinginan termal. Deformasi ini pada keturunannya berpotensi merusak presisi dan stabilitas mesin ((Gao et al., 2019; Z. H. Li et al., 2014).

Panas yang terjadi akibat gesekan pada *ball screw* merupakan fenomena yang penting dalam aplikasi teknologi tinggi, terutama pada peralatan seperti mesin CNC . Fenomena ini dapat dijelaskan melalui mekanisme friksi yang terjadi di dalam *ball screw*. Ketika *ball screw* beroperasi, gesekan antara bola dan lintasan dapat menyebabkan peningkatan suhu, yang semakin signifikan pada kecepatan tinggi (L.-C. Zhang & Zu, 2019) menjelaskan bahwa peningkatan suhu ini dapat

mempengaruhi kinerja dan efisiensi sistem, yang relevan dalam konteks penggunaannya pada mesin CNC Selain itu, parameter seperti friksi dan suhu harus diperhitungkan dalam desain sistem penggerak *ball screw* untuk mencapai kinerja yang optimal, yang juga mencakup aspek mekanis dan kontrol dari sistem tersebut (Riaz dkk., 2020).

Lebih lanjut, pengaruh gesekan tidak hanya terbatas pada *ball screw*, tetapi juga diamati dalam berbagai sistem mekanis lainnya. (Prasetyo et al., 2021) menunjukkan bahwa gesekan pada *bearing*, yang juga beroperasi di mesin, menghasilkan panas yang mirip. Sumber panas pada *ball screw* umumnya dihasilkan dari gesekan yang terjadi antara bola dan lintasan. Model friksi antara bola di dalam *ball screw* dapat memahami distribusi beban dan interaksi bola-bola tersebut yang berkontribusi pada peningkatan gesekan dan pengeluaran panas dalam mekanisme *ball screw* (Zhao et al., 2019). Friksi ini dapat semakin diperburuk oleh kondisi pelumasan yang tidak optimal. Kinerja elastohidrodinamik pelumasan menurun akibat efek termal pada suhu dan tekanan yang tinggi, mengakibatkan fluktuasi dalam torsi friksi dan peningkatan suhu (Zhao et al., 2022).

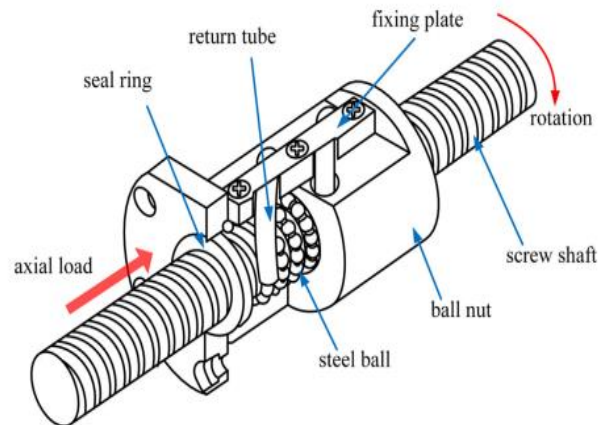
Dalam *ball screw*, ketika mesin beroperasi, terjadi peningkatan suhu akibat pikselasi yang dihasilkan di area kontak. Penelitian menunjukkan bahwa suhu yang tinggi dapat menyebabkan ekspansi termal dari sekrup, yang mungkin mengubah *pitch* sekrup itu sendiri, sehingga berakibat pada ketidakakuratan posisi peta (Oyanguren et al., 2013). Untuk mengatasi fenomena ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk memodelkan dan menganalisis perilaku sekrup bola termal. Metode simulasi menggunakan elemen hingga (FEM) sering digunakan untuk memprediksi distribusi suhu dan perilaku komponen termal ini. Selain itu, penggunaan material seperti serat karbon yang diperkuat plastik (CFRP) dalam konstruksi sekrup bola berpotensi mengurangi menghasilkan termal akibat karakteristik mekanis yang unggul.

2.4 Komponen – Komponen Pada *Ball Screw*

Ball Screw merupakan komponen vital dalam sistem mesin CNC, berfungsi untuk mengubah gerakan rotasi menjadi gerakan linier dengan tingkat presisi yang tinggi. Struktur dan komponen-komponen dari *ball screw* sangat berpengaruh terhadap kinerja dan resolusi mesin CNC. Berikut adalah komponen – komponen yang ada pada *ball screw* :

- a. **Skrup (*Screw Shaft*)** : Komponen utama yang menjadi poros dari *ball screw*. Skrup ini biasanya terbuat dari material yang kuat seperti baja karbon tinggi atau *stainless steel* untuk memastikan kekuatan dan ketahanan terhadap aus. Dimensi dan bentuk alur pada skrup juga dirancang secara presisi agar bola dapat bergerak dengan lancar (Rachmat, 2023) .
- b. **Mur (*Nut*)** : Sekrup bola mur berisi jalur (*raceway*) tempat bola bergerak. Mur ini sangat penting dalam koneksi dengan pengaturan *backlash* (permainan) dan gerakan presisi. Dalam praktiknya, mur bisa berupa *single-nut* atau *double-nut*, di mana *double-nut* menawarkan tingkat presisi yang lebih tinggi dengan meminimalkan *backlash* (Rachmat, 2023; Wibowo, 2017).
- c. **Bola *Ball Screw* (*Balls*)** : Bola-bola ini bertindak sebagai elemen gesek yang mengurangi sirkulasi antara skrup dan mur, yang memungkinkan pergerakan yang lebih halus dan efisien. Bola umumnya terbuat dari baja atau keramik dan dirancang agar memiliki permukaan yang halus untuk mengurangi keausan (Azhar et al., 2024) .
- d. **Bantalan (*Bearings*)** : Bantalan dalam pemesinan berperan mendasar dalam menopang beban putar baik aksial maupun radial dari poros *spindle*, serta berkontribusi secara langsung terhadap stabilitas, kakuhan dan akurasi pemotongan selama operasi *machining*. Perilaku dinamika bantalan, termasuk preload dan *stiffness*, memengaruhi respon vibrasi dan presisi *machining* sehingga menjadi faktor penting dalam desain dan pemilihan sistem bantalan (T. Zhang, 2024).

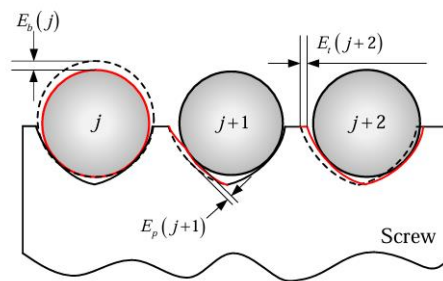
- e. **Penutup (*End Caps*)** : *End caps* berfungsi sebagai bagian dari mekanisme recirculation internal yang memastikan bola-bola baja yang membawa beban kembali ke jalurnya setelah melewati ujung mur, sekaligus membantu menjaga keteraturan lintasan sirkulasi bola, mengurangi vibrasi dan potensi masuknya kontaminan, serta meningkatkan stabilitas gerak linear pada kecepatan tinggi. Desain *end caps* memfasilitasi jalur sirkulasi yang tertutup di dalam *nut* melalui saluran yang ditentukan, sehingga bola-bola tersambung kembali secara presisi ke jalur ulir untuk mempertahankan kinerja transmisi linier yang halus dan minim *backlash* (Sobolewski, 2013).
- f. **Pelepasan *Preload* (Mekanisme *Preload*)** : Komponen ini penting untuk meningkatkan kekakuan dan akurasi sistem. *Preload* pada *ball screw* didefinisikan sebagai gaya internal yang diperkenalkan antara mur dan poros sekrup untuk menghilangkan celah bebas aksial dan radial, sehingga mengeliminasi *backlash*, meningkatkan kekakuan sistem, dan meningkatkan *repeatability* serta akurasi posisi pada sistem *feed drive* mesin CNC. Penerapan *preload* ini sangat berperan dalam menentukan performa operasional dari sistem *ball screw* (Lam et al., 2019)
- g. **Pelindung Mur dan Skrup** : Untuk meningkatkan umur dan kinerja, sistem pelindung ini melindungi mur dan skrup dari kotoran dan bahan asing yang dapat menyebabkan kerusakan (Apriadi & Prayogi, 2021; Rachmanadi et al., 2021).



Gambar 2. 2 Komponen – Komponen Pada Ball Screw

(Mengtao, 2021)

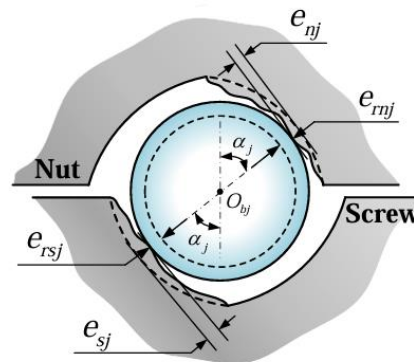
Pada pengoperasiannya, ball screw memiliki kesalahan - kesalahan akurasi yang disebabkan oleh *pitch error* atau *lead error*, yang merupakan bagian dari kesalahan geometri ulir yang menyebabkan penyimpangan posisi aksial sepanjang lintasan *screw*. Kesalahan ini mengubah kondisi kontak antara bola dan *raceway* sehingga sudut kontak dan deformasi elastis lokal mengalami variasi. Akibatnya, distribusi beban antar bola menjadi tidak merata, di mana sebagian bola menanggung beban yang lebih besar dibandingkan bola lainnya. Perubahan distribusi beban ini secara langsung memengaruhi karakteristik kontak, deformasi aksial, serta kekakuan *ball screw* secara keseluruhan, sehingga respons mekanik sistem tidak lagi ideal seperti pada kondisi tanpa kesalahan geometri.



Gambar 2. 3 Kesalahan geometris bola dan lintasan

(Jun liu, 2025)

Saat sistem penggerak sekrup bola beroperasi, ukuran kapasitas beban bola-bola dalam lintasan bola mencerminkan kapasitas beban seluruh sub-sistem sekrup bola hingga batas tertentu. Dalam sistem pengumpanan sekrup bola, kondisi beban setiap bola bergantung pada parameter struktural dan karakteristik material. Namun, dalam operasi aktual, gaya aktual pada setiap bola dalam subrakitan sekrup bola tidak terdistribusi secara merata akibat ketidakpastian dalam proses pemesinan dan perakitan. Untuk subrakitan sekrup bola dengan satu ujung terpasang dan satu ujung terpasang. Saat sistem pengumpanan beroperasi, pergerakan ujung penyangga menyebabkan sekrup terkena torsi rotasi tambahan, yang mengakibatkan distribusi beban bola di lintasan bola tidak merata, dan kemudian memengaruhi umur kelelahan sub-sistem sekrup bola (Qin wu et al, 2024).



Gambar 2. 4 Kesalahan geometris normal di daerah kontak

(Jun liu ,2025)

2.5 Metode Elemen Hingga

Persoalan perancangan dapat diselesaikan dengan cara matematis dan numeris. Untuk benda-benda yang mempunyai bentuk yang tidak teratur (elemen isoparametrik), penyelesaiannya akan sulit menggunakan cara matematis. Sehingga perlu digunakan cara numerik, yang dalam perkembangannya disebut sebagai Metode Elemen Hingga (*Finite Elements Method*). Bila suatu kontinu dibagi-bagi menjadi beberapa bagian yang lebih kecil (*subregion*) maka bagian-bagian kecil ini disebut elemen hingga. Proses pembagian suatu kontinu menjadi elemen hingga ini dikenal sebagai proses pembagian (deskritisasi), sehingga elemen hingga merupakan pendekatan bagian demi bagian dengan menggunakan polinomial yang mana masing-masing terdefinisi pada daerah (elemen) yang kecil dan dinyatakan dalam harga-harga titik simpul dari fungsi tersebut. Dinamakan elemen hingga karena ukuran elemen kecil ini berhingga dan umumnya mempunyai bentuk geometri yang lebih sederhana dibandingkan kontinunya. Metode ini menjadi suatu solusi permasalahan yang sering dijumpai dalam dunia teknik seperti perpindahan kalor, mekanika fluida, analisa struktur, mekanika benda pejal, sampai dengan getaran (Abidin & Rama, 2015).

Analisis distribusi panas pada *ball screw* dapat dihitung mulai dari nilai konveksinya.. Adapun persamaan nilai konveksi menurut (H. Liu et al., 2021) dapat disajikan sebagai berikut:

$$h = \frac{N_u \cdot \lambda_{air}}{L} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana : h = koefisien perpindahan panas

N_u = Bilangan Nusselt

λ_{air} = Konduktivitas termal udara

L = Panjang komponen *screw shaft*

Dalam operasional sistem pengumpan, poros *screw* yang berputar dengan kecepatan tinggi memicu peningkatan interaksi termal dengan udara lingkungan. Mekanisme ini memperkuat proses pertukaran panas dan diklasifikasikan sebagai konveksi paksa. Untuk menganalisis hal tersebut, koefisien perpindahan panas h dapat dihitung menggunakan Persamaan (1) dengan syarat bilangan *Nusselt* N_u telah ditetapkan sebelumnya. Berikut adalah definisi dari bilangan *Nusselt*:"

$$N_u = 0.133 R_e^{2/3} P_r^{1/3} \dots\dots\dots (2)$$

$$R_e = \frac{\omega \cdot d_m^2}{\nu} \dots\dots\dots (3)$$

Dimana : N_u = Bilangan *Nusselt*

R_e = Bilangan *Reynold*

ω = Kecepatan sudut *screw shaft*

P_r = Bilangan *Prandt*

ν = Viskositas kinematic udara

d_m = Jarak *Pitch* pada *screw shaft*

Adapun bagian lain pada sistem *ball screw* masuk kedalam perpindahan panas konveksi alami. Adapun persamaan Bilangan *Nusselt* sebagai berikut :

$$N_u = C (G_r \cdot P_r)^{1/4} \dots\dots\dots (4)$$

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \Delta T}{\nu^2} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana : C = Angka konstan sesuai dengan sumber panas yang dipilih

G_r = Angka *Grashev*

g = Percepatan gravitasi

β = Koefisien ekspansi udara

ΔT = Selisih suhu udara dengan *ball screw*

Pada pengoperasiannya *ball screw* mengalami gesekan nut dengan pasangannya, oleh karena itu pada proses gesekannya mengakibatkan panas. Panas tersebut didefinisikan sebagai berikut :

$$\begin{cases} Q_n = 0.12\pi \cdot n \cdot M_n \\ M_n = M_d + M_r \end{cases} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana : Q_n = Panas yang dihasilkan akibat gesekan

n = Kecepatan rotasi *ball screw*

M_n = Total torsi gesekan

M_d = Torsi penggerak yang dihasilkan pada beban aksial

M_r = Resistensi Torsi

Adapun nilai M_d dan M_r pada nilai torsi penggerak dapat didefinisikan sebagai berikut :

$$M_d = \frac{F_a \cdot P_h}{2\pi\eta} \dots\dots\dots (7)$$

$$M_r = \frac{F_p \cdot P_h}{2\pi\eta} (1 - \eta^2) \dots\dots\dots (8)$$

Dimana : F_a = Beban Aksial

P_h = Beban *preload*

η = Efisiensi konversi transmisi dari pasangan *nut ball screw*

Proses simulasi termal menggunakan Metode Elemen Hingga (FEM) adalah alat yang efektif untuk memahami perilaku termal dari sistem teknik, termasuk *ball screw* pada mesin CNC. Proses ini biasanya terdiri dari tiga tahap utama: *preprocess*, *compute*, dan *postprocess*, yang masing-masing memiliki fungsinya sendiri dalam pengembangan model dan analisis hasil (Fajrin et al., 2022) .

Menurut (Yu et al., 2024) Pada kondisi pemanasan atau pendinginan cepat yang bersifat tidak *stasioner*, kemampuan konduksi panas di dalam material *screw* menjadi jauh lebih dominan dibandingkan mekanisme perpindahan panas konveksi ke udara sekitarnya. Dalam kondisi ini, nilai konduktivitas termal internal (κ) jauh lebih besar dibandingkan koefisien perpindahan panas konvektif (h), sehingga memenuhi $\kappa \gg h$. Dengan demikian, pada fase transien perubahan temperatur sekrup, kontribusi perpindahan panas konvektif dalam persamaan konduksi panas dapat diabaikan. Oleh karena itu, menurut (H. Liu et al., 2021) persamaan differensial konduksi panas pada sistem *ball screw* digunakan dengan jenis persamaan batang satu dimensi karena deformasi termal yang dapat diperoleh terjadi di arah aksial oleh karena itu arah radial dapat diabaikan, Adapun persamaannya sebagai berikut :

$$\rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} + S \dots\dots\dots (9)$$

$$S = \begin{cases} q_1 & 0 < x < Lx_1 \\ q_2 & Lx - Lx_2 < x < Lx \\ q_3 & Lx_1 - LnL < x < Lx_1 + LnL + Ln \dots \\ -\frac{4h_1(T(x,t)-T_f)}{d_m} & \text{elsewhere} \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

Dimana : ρ = Densitas

c = Kapasitas panas spesifik

$T(x, t)$ = Distribusi suhu dibawah pengaruh sumber panas

S = Sumber panas sistem

T_f = Temperatur Lingkungan

q_1 = Laju pembangkit panas *motor bearing*

q_2 = Laju pembangkit panas *rear bearing*

q_3 = Laju pembangkit panas *nut dan screw*

κ = Konduktivitas termal material

h_1 = Konveksi

d_m = Diameter *screw shaft*

1. *Preprocess*

Tahap ini mencakup semua persiapan sebelum simulasi dimulai. Pertama, model geometris dari sekrup bola perlu dibuat menggunakan perangkat lunak CAD, seperti SolidWorks atau AutoCAD. Desain harus mencerminkan parameter fisik yang relevan, seperti dimensi sekrup, mur, dan diameter bola. Kemudian, *mesh* (jaring) harus dibuat untuk membagi geometri menjadi elemen-elemen kecil. Ukuran *mesh* dapat mempengaruhi akurasi hasil simulasi; *mesh* yang lebih halus memberikan lebih banyak detail tetapi memerlukan lebih banyak waktu komputasi (Garnadi, 2017).

Selain itu, pada tahap ini, distribusi suhu awal dan kondisi batas juga ditentukan, termasuk beban yang akan diterapkan pada sistem. Kontak antara elemen, konduktivitas termal, dan sifat material *ball screw* juga harus diatur dengan benar selama *preprocessing* untuk memastikan bahwa simulasi mencerminkan kondisi nyata (Wibawa et al., 2021).

2. *Compute*

Setelah semua parameter disiapkan, tahap berikutnya adalah menjalankan simulasi. Proses komputasi melibatkan pemecahan sistem persamaan diferensial yang menggambarkan perbaikan panas dalam model. Perangkat lunak seperti ANSYS atau Abaqus digunakan untuk menganalisis perilaku termal ini (Putra et al., 2021; Walidina et al., 2022). Metode unsur hingga memecahkan persamaan berdasarkan pendekatan numerik, memberi tahu kita bagaimana suhu dalam komponen seiring berubahnya waktu dan di bawah berbagai kondisi beban (Hermawan et al., 2021).

Model 3D disiapkan, simulasi dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan dan regangan, yang sangat berhubungan dengan efek termal (Hermawan dkk., 2021). Hasil yang diperoleh dari simulasi ini akan mencakup tentang distribusi suhu,

potensi titik panas, dan bagaimana berbagai faktor seperti kecepatan rotasi atau beban dapat mempengaruhi informasi suhu di dalam *ball screw* (Fitriyana et al., 2020) .

3. *Postprocess*

Tahap ini mencakup analisis hasil simulasi. Setelah penghitungan selesai, informasi yang dihasilkan perlu dianalisis untuk menarik kesimpulan. Hasil dari simulasi biasanya disajikan dalam bentuk grafik distribusi suhu, kontur tegangan, dan pendinginan. Alat dalam perangkat analisis lunak membantu visualisasi dan interpretasi data ini secara mudah (Fajrin et al., 2022).

Pada tahap ini, dapat dilakukan evaluasi untuk memahami seberapa baik model itu berfungsi dalam merefleksikan perilaku fisik aktual dari *ballscrew*. Singkatnya, analisis *postprocessing* sangat penting untuk memahami hubungan antara hasil simulasi dan kondisi nyata, serta untuk mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan atau modifikasi lebih lanjut pada desain (Firdaus et al., 2016; Prasetyo et al., 2021).

Simulasi termal menggunakan Metode Elemen Hingga memberikan gambaran mendalam tentang perilaku termal dari *ballscrew* dalam sistem mesin CNC. Proses yang terstruktur dengan baik—mulai dari *preprocessing* hingga *postprocessing* membantu perencana untuk merancang dan menganalisis komponen dengan lebih efektif, memastikan bahwa semua kondisi operasi dan risiko termal yang mungkin muncul dapat diantisipasi.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen dan simulasi numerik untuk menganalisis distribusi termal pada *ball screw* CNC milling selama proses pengoperasian mesin. Pengujian eksperimen dilakukan dengan melakukan pengukuran pada *ball screw* serta beberapa komponen pendukung, seperti *motor servo*, *bearing*, dan meja mesin, guna memperoleh respons termal terhadap waktu operasi dan kondisi lingkungan yang berbeda, yaitu pada kondisi AC ruangan *on* dan *off*. Pengukuran pada *ball screw* dilakukan pada lokasi tertentu sebagai representasi, yang selanjutnya digunakan untuk mengamati tren kenaikan suhu dan sebagai acuan validasi model simulasi.

Untuk memperoleh gambaran distribusi secara spasial sepanjang *ball screw*, dilakukan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak Ansys dengan mempertimbangkan sifat termal material, pembangkitan panas akibat gesekan pada pasangan *screw* dan *nut*, serta mekanisme perpindahan panas melalui konduksi dan konveksi ke lingkungan sekitar. Hasil simulasi digunakan untuk memvisualisasikan pola distribusi dan mengidentifikasi area dengan tertinggi sepanjang *ball screw*. Selanjutnya, hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen untuk memastikan bahwa pola distribusi termal yang diperoleh secara numerik memiliki kecenderungan yang sejalan dengan kondisi mesin.

3.1 Objek, Tempat dan Waktu Penelitian

Objek dari penelitian ini adalah *ball screw* pada mesin CNC *Milling V30 Leadwell* yang berada di workshop Gedung Teknologi 2 Badan Riset Inovasi Nasional, Serpong. Dengan membandingkan kenaikan dan distribusi suhu eksperimen *ball screw* dengan simulasi menggunakan *software Ansys*. Adapun waktu dari pelaksanaan penelitian ini dimulai dari bulan Agustus sampai dengan Desember 2024.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

3.2.1 Mesin CNC *Milling Leadwell V-30*



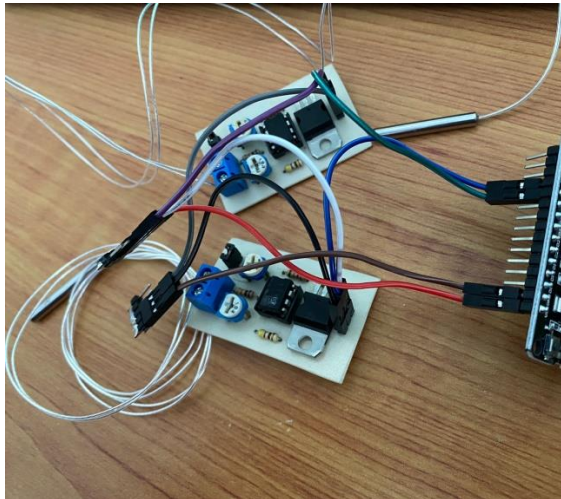
Gambar 3. 1 Mesin CNC Milling Leadwell V-30

Mesin CNC *milling* merupakan mesin pemrosesan yang dikendalikan secara otomatis melalui program untuk melakukan proses pemotongan material

dengan tingkat presisi tinggi. Mesin ini menggunakan penggerak translasi seperti *ball screw* untuk mengubah putar motor menjadi gerak translasi yang halus dan akurat pada sumbu X, Y, dan Z. Mesin CNC *Milling Leadwell V-30* ini digunakan untuk mengukur distribusi termal pada *ball screw*. Berikut adalah spesifikasi dari mesin *Milling Leadwell V-30* :

<i>Control</i>	: FANUC 0i-MC
<i>XYZ travel</i>	: 760x410x410 mm
<i>Spindle speed</i>	: 8000 rpm
<i>Table size</i>	: 890x400 mm
<i>Table height</i>	: 780 mm
<i>Max. table load</i>	: 300 kg
<i>Machine size-LWH</i>	: 2250x2100x2368 mm
<i>Machine weight</i>	: 4500 kg

3.2.2 Sensor PT100

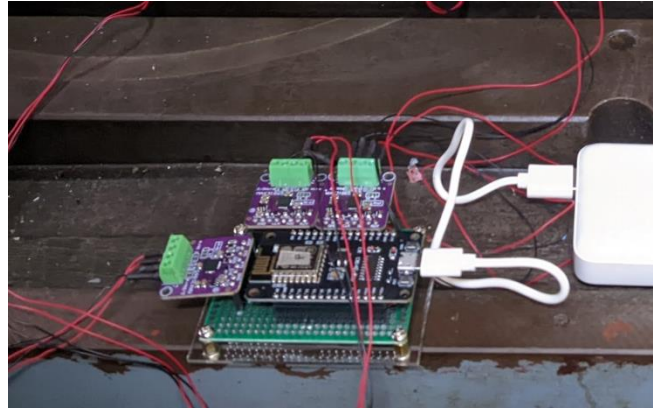


Gambar 3. 2 Sensor PT100

Sensor suhu PT100 merupakan jenis sensor RTD (*Resistance Temperature Detector*) yang digunakan untuk mengukur suhu berdasarkan perubahan

resistansi kawat platinum terhadap suhu. PT100 digunakan untuk mendeteksi perubahan suhu di sepanjang permukaan *ball screw* selama operasi. Data suhu dari PT100 kemudian dikonversi menjadi sinyal digital dan dibaca oleh mikrokontroler Arduino untuk dianalisis lebih lanjut.

3.2.3 Arduino NodeMCU ESP8266



Gambar 3. 3 Arduino NodeMCU ESP8266

Arduino NodeMCU ESP8266 berfungsi untuk membaca data suhu dari sensor PT100 yang telah dikonversi melalui modul antarmuka, lalu mengirimkan data tersebut ke. Arduino bekerja dengan cara membaca sinyal digital dari sensor melalui *pin input*, memprosesnya sesuai program yang ditanamkan, dan mengirimkannya secara *real-time* melalui koneksi USB ke laptop.

3.2.4 Laptop

Laptop digunakan untuk menerima data yang dikirimkan oleh arduino dan juga berfungsi sebagai media untuk menjalankan perangkat lunak (*Software Solidworks*) sehingga dapat digunakan dalam pemodelan dan perangkat lunak (ANSYS) yang digunakan dalam proses simulasi.

3.2.5 *Software* Solidworks 2018

Software Solidworks digunakan untuk merancang bagian – bagian pada *ball screw* dimulai dari sketsa nya lalu kemudian menjadikannya model 3D sesuai dengan bentuk dan ukuran yang ada.

3.2.6 *Software* Ansys R1 2024

Software Ansys dipakai untuk mensimulasi dan menganalisa model *ball screw* yang dibuat untuk kemudian melakukan proses *meshing*, sampai menjalankan simulasi FEM nya, dan mendapatkan hasil distribusi termal yang telah dilakukan.

3.3 Rangkaian Pengujian

3.3.1 Prosedur Pengujian Eksperimental

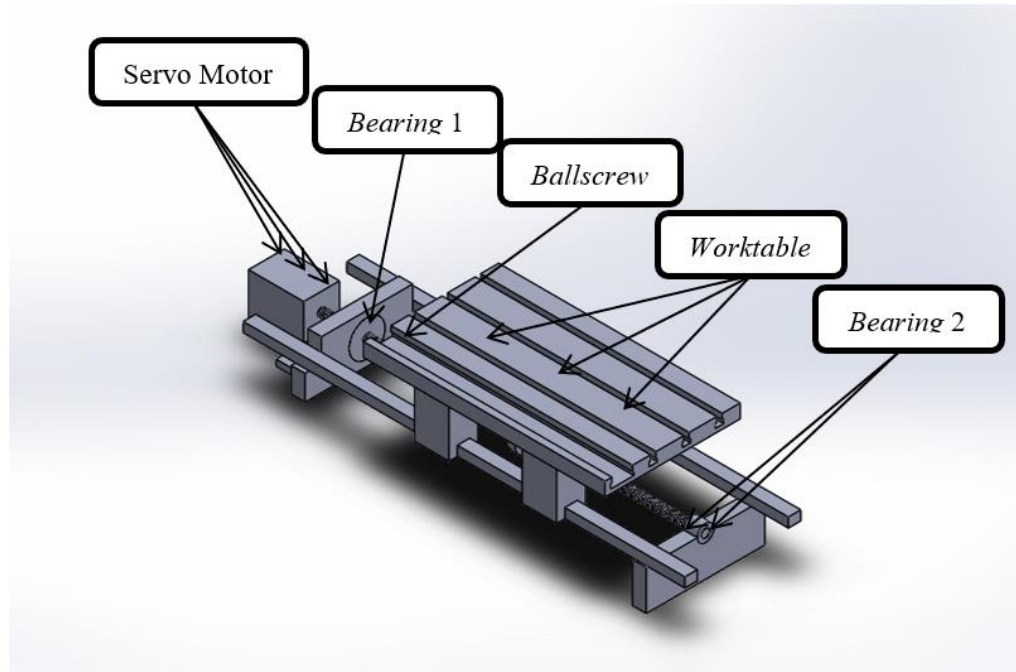
Adapun prosedur – prosedur penelitian pada pengujian eksperimental adalah sebagai berikut :

a. Persiapan Alat dan Bahan

- 1). Mesin CNC *Milling Leadwell* V-30
- 2). Sensor PT100
- 3). Arduino NodeMCU ESP8266
- 4). Laptop
- 5). Pasta Termal
- 6). Kabel Ties

b. Instalasi Sensor Suhu PT100

Memasang sensor disekeliling permukaan *ball screw* dan bagian lain – lain dengan jumlah 10 titik.



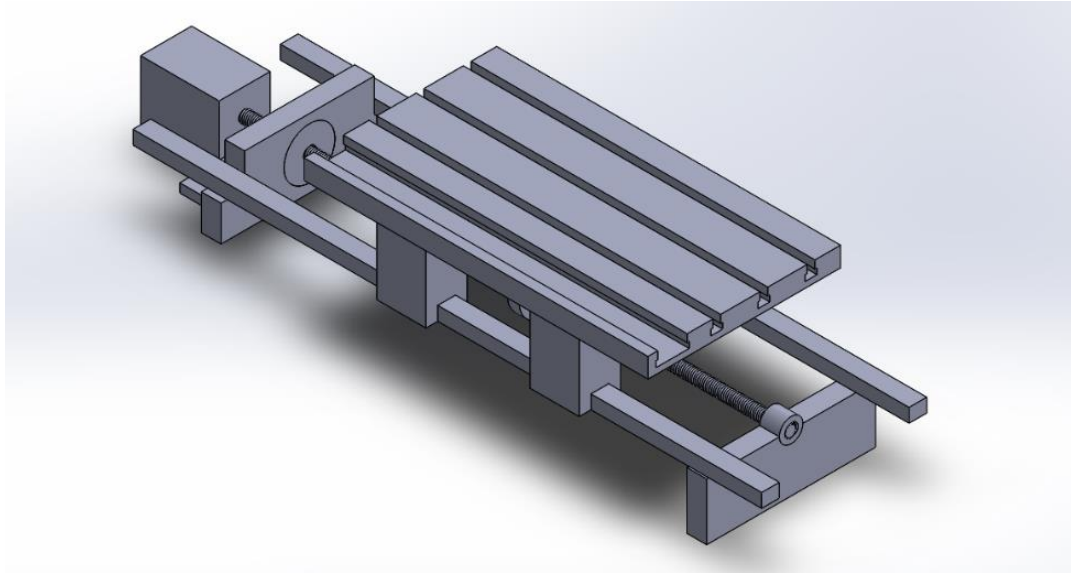
Gambar 3. 4 Titik – Titik Pemasangan Sensor PT100

- 1). *Servo Motor* : 3 titik
- 2). *Ballscrew* : 1 titik
- 3). *Bearing 1* : 1 titik
- 4). *Bearing 2* : 2 titik
- 5). *Worktable* : 3 titik

3.3.2 Pengujian Simulasi

Adapun prosedur penelitian pada pengujian simulasi Ansys adalah sebagai berikut :

- a. Membuat model 3D *ball screw* berdasarkan dimensi nya menggunakan *solidworks*. File model 3D kemudian diekspor ke format STEP (.step), atau Parasolid (.x_t) dan diimpor ke *ANSYS Workbench*.



Gambar 3. 5 Desain *Ball Screw* dan Komponen Lainnya Menggunakan *Solidworks 2018*

- b. Menetapkan Properti Material

Material *ball screw* didefinisikan sebagai structural steel, dengan parameter termal (konduktivitas termal, densitas, kapasitas panas spesifik).sebagai berikut :

Tabel 3. 1 Properti Material Komponen

<i>Parameters</i>	<i>Ball</i>	<i>Bearing</i>	<i>Screw Shaft</i>	<i>Nut</i>
<i>Materials</i>	Suj2	Suj2	50crmo4	Scm415h
<i>Density (kg/m3)</i>	7.810	7.810	7.800	7800
<i>Poissons Ratio</i>	0.30	0.30	0.30	0.30
<i>Specific Heat Capacity J/(Kg.°C)</i>	475 J/g-°C	475 J/g-°C	480 J/g-°C	460 J/g-°C
<i>Thermal Conductivity W/(M.°C)</i>	46.6 W/m-K	46.6 W/m-K	45.0 W/m-K	42.6 W/mK
<i>Modulus of Elasticity (Gpa)</i>	210 GPa	210 GPa	210 gpa	210
<i>Thermal Expansion Co-efficient (M/°C)</i>	$11.9 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$	$11.9 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$	$12.0 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$	$12.2 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$

Data ini dimasukkan ke dalam *modul Engineering Data* pada Ansys, berdasarkan nilai material yang setara dengan spesifikasi pada *ball screw*.

c. Menentukan *Boundary Condition*

Dalam simulasi termal, meng-input kondisi batas (*boundary condition*) ditentukan untuk mendekati kondisi eksperimen:

- *Ambient Temperature (boundary Temperature)*: 27,15 °C
- *Heat Generation (internal heat)*: diaplikasikan sebagai *heat source* (51,6 W/m³) dari *ball screw*
- *Convection*: pada permukaan luar *ball screw* diterapkan koefisien konveksi (h) sebesar 2,66 W/m²·K untuk mensimulasikan pendinginan oleh udara ruangan.

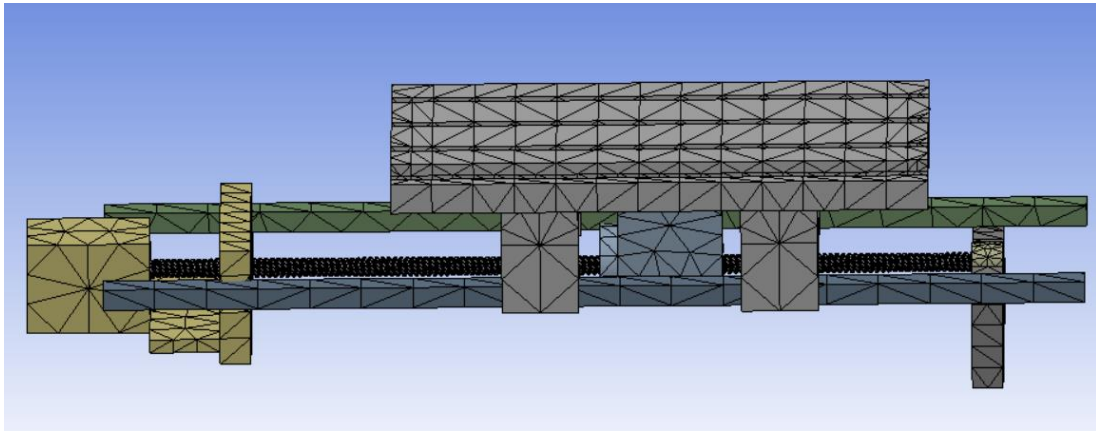
d. Menjalankan simulasi

Simulasi dilakukan dalam mode *Transient Thermal* untuk menganalisis perubahan suhu terhadap waktu, sesuai dengan durasi eksperimen

selama 2,5 jam (9000 detik). Waktu langkah (*time step*) diatur secara otomatis atau konstan per 10 detik tergantung kestabilan *solver*.

Pengaturan *solver* menggunakan *auto time stepping* dengan total waktu simulasi:

- *Start time*: 0 s
- *End time*: 9000 s (2,5 jam)
- *Initial temperature*: 27,15 °C (sama dengan suhu lingkungan)

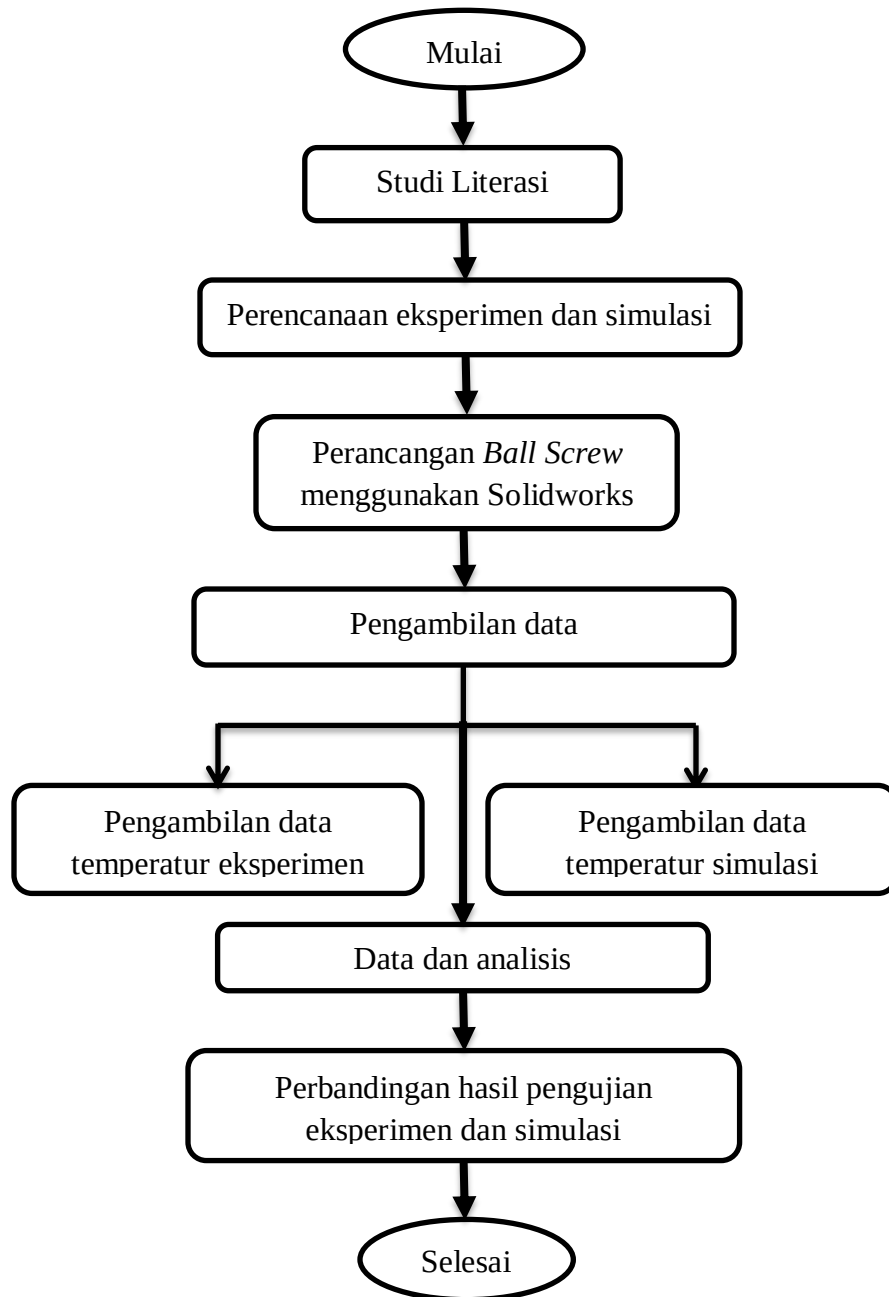


Gambar 3. 6 *Meshing* Pada *Ball Screw* Menggunakan Ansys R1 2021

e. Hasil Yang Didapat

Melihat data suhu yang didapat setelah dilakukan nya *solution* pada proses simulasi disetiap titik sensor yang sama dengan eksperimen dimenu *Result*.

3.4 Diagram Alur Penelitian



V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian eksperimen dan simulasi yang telah dilakukan pada *ball screw* mesin CNC *milling*, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian eksperimen menunjukkan bahwa distribusi suhu pada *ball screw* dan komponen pendukung mengalami kenaikan secara bertahap seiring waktu pengujian. Pada kondisi AC *on*, suhu *ball screw* meningkat 0,3 °C, sedangkan pada kondisi AC *off* mencapai 0,5°C. Pada motor servo menunjukkan suhu tertinggi dibandingkan komponen lain, dengan kenaikan suhu mendekati 1°C pada kedua kondisi. Sementara itu, *bearing motor*, *rear bearing* dan *table* mengalami kenaikan suhu yang lebih rendah, yaitu tidak lebih dari 0,5°C. Pada pengujian didapatkan bahwa suhu *ball screw* belum mencapai kondisi *steady state* termal dan masih membutuhkan waktu mencapai kondisi *steady state*.
2. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa suhu tertinggi berada di area servo motor seperti pada pengujian eksperimen. Pola distribusi suhu merata sepanjang poros *screw shaft* dengan suhu tertinggi berada pada bagian tengah *screw shaft*. Hal ini terjadi karena bagian ini jauh dari komponen penopang sehingga panas yang terakumulasi akibat gesekan memusat dibagian tengah sedangkan panas bagian sisi dikedua ujung *screw* yang dekat dengan *bearing motor* dan *rear bearing* cenderung merambat ke bagian masing masing

penopang sehingga lebih dingin. Pada kondisi AC *on*, kenaikan suhu pada posisi sensor tercatat sebesar 41,8% dari kenaikan suhu maksimum yang terjadi di bagian tengah *screw shaft*. Sedangkan, kondisi AC *off* meningkat menjadi 48,4%.

3. Perbandingan antara pengujian eksperimen dan simulasi termal Ansys menunjukkan bahwa pada pengujian eksperimen kondisi AC *on*, suhu *ball screw* meningkat 0,3 °C, sedangkan pada simulasi 0,38 °C. Kondisi AC *off* mengalami kenaikan suhu sedikit lebih tinggi, hasil eksperimen didapat kenaikan suhu *ball screw* sebesar 0,5 °C, sedangkan disimulasi 0,59°C. Selisih temperatur yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa model simulasi mampu merepresentasikan perilaku termal *ball screw* dengan cukup baik di dua kondisi.
4. Deformasi termal *ball screw* didapat bahwa nilai deformasi total dan deformasi aksial terbesar terjadi pada bagian tengah sepanjang poros *screw shaft*, sejalan dengan distribusi suhu tertinggi pada simulasi. Pada kondisi AC *off*, deformasi lebih besar dibandingkan kondisi AC *on*, yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu lingkungan berpengaruh langsung terhadap besarnya deformasi.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan pengujian dengan variasi waktu operasi yang lebih panjang serta variasi kecepatan *ball screw* yang berbeda, sehingga dapat diamati secara lebih jelas kecenderungan sistem dalam mencapai kondisi *steady state* termal.
2. Pengoptimalan yang baik pada suhu ruangan menjadi sangat penting untuk membuat hasil pengujian lebih baik dan realistis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abidin, Z., & Rama, B. R. (2015). Analisa Distribusi Tegangan Dan Defleksi Connecting Rod Sepeda Motor 100 Cc Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 15(1), 30–39.
- Ali, O. (2025). *Comparative Analysis of the Reliability and Durability of TIC and NSK Ball Screws for Enhanced Process Optimization*.
- Apriadi, F., & Prayogi, E. (2021). Proses Manufaktur Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro. *Jurnal Crankshaft*, 4(2), 19–28.
<https://doi.org/10.24176/crankshaft.v4i2.6656>
- Azhar, A., Hartini, D., & Edi, P. (2024). Troubleshooting Pada Air Conditioning Recirculation System Di Komponen Fan Pesawat Boeing 737-900er. *Vortex*, 5(1).
<https://doi.org/10.28989/vortex.v5i1.2029>
- Benker, M., Kleinwort, R., & Zäh, M. F. (2019). Estimating remaining useful life of machine tool ball screws via probabilistic classification. *2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)*, 1–7.
<https://doi.org/10.1109/ICPHM.2019.8819445>
- Berghaus, M., Florian, S., Solanki, K. V., Zinn, C., Wang, H., Butz, B., Apmann, H., & von Hehl, A. (2025). *Effect Of Part Geometry on Thermal History and Mechanical Properties of Additively Manufactured 316L*.
- Cheng, Q., Qi, B., Liu, Z., Yang, C., & Zheng, J. (2020). Positioning Accuracy Degradation and Lifetime Prediction of the Ball Screw Considering Time-Varying

- Working Conditions and Feed Modes. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, 235(6–7), 943–957. <https://doi.org/10.1177/0954405420971089>
- Cui, P., Hou, Z., He, L., Zheng, H., He, Y., Fan, Y., An, L., & Huang, Y. (2024). Experimental Study on In Situ Storage of Grease-Lubricated Ball Screws. *Applied Sciences*, 14, 2734. <https://doi.org/10.3390/app14072734>
- dos Santos, M. O., Batalha, G., Bordinassi, E., & Miori, G. (2018). Numerical and experimental modeling of thermal errors in a five-axis CNC machining center. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1595-8>
- Fajrin, M. G. F. G., Widianoro, H., & Zainuddin, Z. (2022). Analisis Elemen Hingga Bagian Penekuk Pada Mesin Pembuat Begel Baja Tulangan 8 Mm. *Suara Teknik Jurnal Ilmiah*, 13(1), 6. <https://doi.org/10.29406/stek.v13i1.4222>
- Firdaus, M. B., Hidayat, M. I. P., & Fellicia, D. M. (2016). Analisa Proses Perpindahan Panas Pada Pengecoran Paduan Al-12%Si Dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Its*, 5(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v5i2.17990>
- Fitriyana, B., Perkasa, M., Ivano, O., & Sulisty, W. D. (2020). Analisis Tegangan Orifice Chamber Yang Mengalami Lokal Hot Spot Dengan Metode Elemen Hingga. *Jurnal Teknik Mesin Cakram*, 3(1), 47. <https://doi.org/10.32493/jtc.v3i1.5065>
- Gao, X., Qin, Z., Guo, Y., Wang, M., & Zan, T. (2019). Adaptive Method to Reduce Thermal Deformation of Ball Screws Based on Carbon Fiber Reinforced Plastics. *Materials*, 12(19), 3113. <https://doi.org/10.3390/ma12193113>
- Garnadi, A. D. (2017). *Valuasi Opsi Beli (It Call Options) Eropa Bervolatilitas Stokastik Dengan Menggunakan Modifikasi Metode Karakteristik Dan Metode Elemen Hingga*. <https://doi.org/10.31227/osf.io/fhbsx>

- Hermawan, M. V, Supriyanto, A., & Alaa, T. A. (2021). Efek Variasi Beban Torsi Terhadap Distribusi Tegangan Komponen Axle Shaft Kendaraan Niaga. *Teknika*, 7(1), 46–51. <https://doi.org/10.52561/teknika.v7i1.141>
- Jin, C., Wu, B., & Hu, Y. (2014). Temperature Distribution and Thermal Error Prediction of a CNC Feed System Under Varying Operating Conditions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(9–12), 1979–1992. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6604-y>
- Krisbudiman, A. (2020). ANALISIS KEKUATAN DESAIN STRUKTUR BASE MESIN INDUK CNC VERTIKAL. *Teknologi : Jurnal Ilmiah Dan Teknologi*, 2, 152. <https://doi.org/10.32493/teknologi.v2i2.7904>
- Lam, T., Ro, S., & Park, J. (2019). Study of ball screw system preload monitoring during operation based on the motor current and screw-nut vibration. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 131, 18–32. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.05.036>
- Li, H., Liu, H., Feng, X., Liu, Y., Yao, M., & Wang, A. (2023). Thermal Model and Thermal Analysis of the Dual Drive Sliding Feed System. *Machines*, 11(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/machines11121084>
- Li, S., & Lv, G. (2023). Optimization Study of Internal Cooling Structure of Ball Screw Sub for CNC Machine Tools. *Journal of Physics Conference Series*, 2610(1), 12045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2610/1/012045>
- Li, T., Zhao, C., & Zhang, Y. (2018). Adaptive real-time model on thermal error of ball screw feed drive systems of CNC machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1076-5>
- Li, Y., Su, D., Cai, X., Wu, W., Zhang, J., & Zhao, W. (2020). Temperature Simulation and Thermal Equilibrium Analysis of the Ball Screw Feed Drive System Under

- Various Working Conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(24), 4844–4856. <https://doi.org/10.1177/0954406220929051>
- Li, Z. H., Fan, K., & Yang, J. G. (2014). Analysis of the Thermal Behavior of a Ball Screw Based on Simulation and Experimental Investigation. *Applied Mechanics and Materials*, 577, 140–144. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.577.140>
- Li, Z. jun, Tan, Z., Chen, Y., Lu, Z. chen, & Fan, Y. chuan. (2022). Thermal error prediction of ball screw feed system based on inverse heat transfer analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(5–6), 2607–2624. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10076-8>
- Li, Z., Lu, Z., Zhao, C., Liu, F., & Chen, Y. (2019). Heat source forecast of ball screw drive system under actualworking conditions based on on-line measurement of temperature sensors. *Sensors (Switzerland)*, 19(21). <https://doi.org/10.3390/s19214694>
- Liu, C., Zhao, C., Liu, Z., & Wang, S. (2021). Dynamic analysis of ball screw feed system with the effects of excitation amplitude and design parameters. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/app11157070>
- Liu, H., Rao, Z., Pang, R., & Zhang, Y. (2021). Research on thermal characteristics of ball screw feed system considering nut movement. *Machines*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/machines9110249>
- Luo, M., Li, H., Ma, B., & Chen, Z. (2015). *A Method of Pitch Error Compensation Based on HNC-818B CNC System*. <https://doi.org/10.2991/iiccec-15.2015.398>
- Oyanguren, A., Ulacia, I., Larrañaga, J., Gallo, A. M., Arana, A., & González, R. (2013). Prediction of Heat Generation and Temperature Distribution in High Speed Preloaded Ball Screws. *Key Engineering Materials*, 572, 363–366.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.572.363>

- Pernandito, A., Rahmawaty, M., Tianur, & Hendriko, H. (2024). Sistem Kontrol Engraving Acrylic CNC 3 Axis Berbasis Pc Menggunakan Arduino. *Armatur Artikel Teknik Mesin & Manufaktur*, 5(1), 106–114. <https://doi.org/10.24127/armatur.v5i1.4287>
- Prasetyo, A., Admaja, F. P., Devi, M. H., & Yaqin, M. A. (2021). Analisis Dan Perancangan Software Simulasi Pertumbuhan Model Proses Bisnis Menggunakan Random Growth Model. *Ilkomnika Journal of Computer Science and Applied Informatics*, 3(1), 1–10. <https://doi.org/10.28926/ilkomnika.v3i1.67>
- Priantoko, A., Murdifin, A., Adkhiyan, A., & Slamet, S. (2016). Optimasi Desain Struktur Bed Mesin Bubut Cnc Terhadap Pengaruh Defleksi, Frekuensi Pribadi Dan Proses Manufaktur Milling. *Simetris : Jurnal Teknik Mesin, Elektro Dan Ilmu Komputer*, 7(1), 39. <https://doi.org/10.24176/simet.v7i1.486>
- Putra, A. D., Rohman, M., & Sulaiman, M. (2021). Simulasi Pengaruh Waktu Dan Gerak Terhadap Desain Implan Sendi Pinggul. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 9(1), 23–31. <https://doi.org/10.23887/jptm.v9i1.28885>
- Qiu, Y. L., Zhou, C. G., Ou, Y., & Feng, F. T. (2023). Theoretical and experimental analysis of the temperature rise of a ball screw. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(1–2), 703–715. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11550-7>
- Rachmanadi, D., Faridah, E., Sumardi, S., Meer, P. v. d., & Qirom, M. A. (2021). No Title. *Jurnal Galam*, 1(2). <https://doi.org/10.20886/glm.2021.1.2>
- Rachmat, D. (2023). Analisis Reliability, Maintainability Dan Availability Komponen Induced Draft Fan Boiler Sebagai Bahan Usulan Penjadwalan Perawatan Pemeriksaan Dan Penggantian Komponen (Studi Kasus PLTU PKS Pangkalan Panji PT. SMART Tbk). *Jurnal Vokasi Teknologi Industri (Jvti)*, 5(2), 1–17.

<https://doi.org/10.36870/jvti.v5i2.337>

- Razak, I. H. A., Muhamad, W. M. W., Reshid, M. N., & Baharudin, N. S. (2017). CNC machine capability study based on structural and thermal analysis of ball screw using finite element method. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(24), 14664–14668.
- Sobolewski, J. Z. (2013). JOURNAL OF MACHINE ENGINEERING Vol 13, No. 4, 2013, Page 86-95 ISSN 1895-7595X. *JOURNAL OF MACHINE ENGINEERING*, Vol.13, No. 4, 2013, 86–95.
- Sulistiyo, A., Studi Elektromekanik, P., & Teknofisika Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir BATAN Jl Babarsari, J. (2016). *Rancang Bangun Sistem Mekanik Penggerak Tabung Sinar X Medis Berbasis Ballscrew*. 421–428.
- Sun, T., Wang, W., Chen, Z., Zhu, Y., Xu, K., Wu, H., Sang, Z., Lu, K., & Yang, H. (2021). Positioning Errors Measurement of CNC Machine Tools Based on J-DBB Method. *Applied Sciences*, 11(24), 11770. <https://doi.org/10.3390/app112411770>
- Tinulad, A. M., & Widodo, B. L. (2023). Analisa Perbandingan Kekuatan Struktur Bed Mesin Bubut CNC Kirana BPPT Terhadap Bed Modifikasi Dengan Menggunakan Software Analysis. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 13(3), 233–238. <https://doi.org/10.29122/mipi.v13i3.3493>
- Walidina, M. F., Kardiman, K., & Gusniar, I. N. (2022). Analisis Tegangan Von Mises Pada Poros Mesin Penggiling Sekam Padi Menggunakan Software Ansys. *Jurnal Mettek*, 8(1), 35. <https://doi.org/10.24843/mettek.2022.v08.i01.p05>
- Wibawa, L. A. N., Yudhotomo, U. S., Haryanto, Y., & Laksita, R. L. (2021). Pengaruh Panjang Tabung Dan Radius Fillet Terhadap Faktor Keamanan Tabung Motor Roket Dextrose Menggunakan Ansys Workbench. *Infotekmesin*, 12(2), 110–114. <https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v12i2.609>
- Wibowo, H. (2017). Pengaruh Sudut Serang Aerofoil Terhadap Distribusi Tekanan

- Dan Gaya Angkat. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 2(2), 148. <https://doi.org/10.21831/dinamika.v2i2.15999>
- Wicaksono, O. D., & Prayogi, E. (2021). Perancangan B-Axis Pada Mesin Bubut Konvensional Untuk Proses Perbaikan Katup Bola (Ball Valve). *Jurnal Syntax Admiration*, 2(3), 453–464. <https://doi.org/10.46799/jsa.v2i3.196>
- Xu, Z.-Z., Choi, C. M., Liang, L. J., Li, D., & Lyu, S.-K. (2015). Study on a Novel Thermal Error Compensation System for High-Precision Ball Screw Feed Drive (1st Report: Model, Calculation and Simulation). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(9), 2005–2011. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0261-4>
- Yang, J., Li, C., Xu, M., & Zhang, Y. (2021). *Analysis of Thermal Error Model of Ball Screw Feed System Based on Experimental Data*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-407988/v1>
- Yanto, H. A., Suprpto, H., Kristijono, A., & Setianto, F. (2022). Implementasi Prototyping Produk Fleksible Dengan Mesin CNC Multifungsi (Milling, Laser Co2 Dan 3d Printing). *Serenade Seminar on Research and Innovation of Art and Design*, 1, 228–233. <https://doi.org/10.21460/serenade.v1i1.36>
- Yu, H., Luan, X., Zheng, G., Hao, G., Liu, Y., Xing, H., & Liu, Y. (2024). *applied sciences Analysis and Experiment of Thermal Field Distribution and Thermal Deformation of Nut Rotary Ball Screw Transmission Mechanism*.
- Zhang, L.-C., & Zu, L. (2019). A new method to calculate the friction coefficient of ball screws based on the thermal equilibrium. *Advances in Mechanical Engineering*, 11, 168781401882073. <https://doi.org/10.1177/1687814018820731>
- Zhang, T. (2024). *Development and Challenges of Spindle Bearing Technology in CNC Machine Tools*. 120, 700–707.
- Zhao, J., Lian, B., Lin, M., Song, X., Jiang, H., Zhang, D., & Qi, B. (2022). A Novel

Modeling Method of Friction Torque for Ball Screw Based on Lubrication Performance Analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(11), 2621–2634. <https://doi.org/10.1177/09544062221136443>

Zhao, J., Lin, M., Song, X., & Guo, Q. (2019). Analysis of the Precision Sustainability of the Preload Double-Nut Ball Screw With Consideration of the Raceway Wear. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of Engineering Tribology*, 234(9), 1530–1546. <https://doi.org/10.1177/1350650119883484>

Zheng, J., Deng, X., Yang, J., Zhang, W., Lin, X., Jiang, S., Yao, X., & Shen, H. (2024). Analysis of thermal characteristics with multi-physics coupling for the feed system of a precision CNC machine tool. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 72(2), 1–12. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2024.148941>

Zhou, C.-G., Feng, H.-T., & Ou, Y. (2018). A New Model for Predicting the Mechanical Efficiency of Ball Screws Based on the Empirical Equations for the Friction Torque of Rolling Bearings. *Advances in Mechanical Engineering*, 10(9), 168781401880017. <https://doi.org/10.1177/1687814018800173>