

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Persaingan industri global saat ini makin terasa. Arus barang dan informasi bergerak begitu cepat dari satu belahan dunia kebelahan lain. Persaingan industri saat ini bersifat global. Untuk dapat bersaing, industri harus beroperasi dengan efisien dan efektif. Disisi lain, perkembangan kecerdasan buatan sangat cepat di awal abad 21 ini. Teknologi ini memberi peluang dan tantangan baru bagi dunia industri. Kecerdasan buatan dapat membantu industri dalam meningkatkan efisiensi dengan cara mengintegrasikan dan mengotomasi sistem industri sangat merubah tatanan persaingan global. Salah satu langkah untuk meningkatkan efisiensi industri adalah mengintegrasikan proses yang ada di industri baik dalam operasi maupun dengan sistem perawatan sehingga dapat meningkatkan utilitas industri dan mengurangi *idel time*.

Salah satu komponen mesin yang sering rusak di industri adalah bantalan. Bantalan merupakan komponen mesin yang banyak digunakan untuk menumpu mesin-mesin yang berotasi dengan gesekan sekecil mungkin. Aplikasi dari bantalan sangat luas, mulai dari bantalan yang digunakan untuk komponen yang sangat kecil dengan beban ringan hingga bantalan utama yang mengalami pembebanan yang besar seperti turbin dan impeler kapal. Bantalan ada berbagai tipe yaitu; bantalan luncur dan bantalan gelinding. Untuk penggunaan umum, bantalan gelinding (*rolling bearings*) yang paling banyak digunakan adalah bantalan jenis bola (*ball bearings*).

Dalam kondisi ideal, bantalan bola dirancang untuk pemakaian yang cukup lama tergantung pada beban dan kecepatan operasi. Umur rancangan dari bantalan dapat dicapai dengan syarat dioperasikan dalam kondisi ideal. Pada kenyataannya umur pakai bantalan berada jauh di bawah dari umur rancangannya. Hal ini disebabkan oleh pemasangan yang tidak baik, kondisi lingkungan yang kotor dan pelumasan yang tidak tepat. Laju kegagalan dini pada bantalan di industri secara umum disebabkan oleh kontaminasi sebesar 45,4%, *misassembly* 12,8%,

misalignment 12,6%, kekurangan pelumasan (*starvation*) 11,4%, beban lebih 8,1%, korosi 3,7% dan lain lain 3,2% (Modh, 2016) dan khusus pada industri semen, kegagalan akibat kontaminasi dapat mencapai 80%. Kontaminasi pada umumnya terjadi pada lingkungan kerja yang kurang bersih, dapat juga terjadi pada saat pemasangan, peralatan yang kotor, debu lingkungan dan gemuk yang terkontaminasi.

Kontaminan tergantung pada lingkungan dimana bantalan tersebut beroperasi, dapat berupa *solid* (padat) dan *liquid* (cair). Karakteristik kontaminasi padat yang telah diteliti oleh beberapa peneliti yang berkaitan dengan sifat fisik dari kontaminasi padat seperti kekerasan material, ukuran butir dan konsentrasi dari kontaminan (Maru & Castillo, 2007), (Hariharan, 2010), (Soni, 2018). Dari hasil penelitian mereka memperlihatkan bahwa dengan meningkatnya konsentrasi dan ukuran butir, maka akan menyebabkan getaran yang lebih besar pada bantalan. Beberapa hasil penelitian yang lain memperlihatkan bahwa sifat kegetasan dan keuletan dari material juga akan berpengaruh (Utpat & Mahajan, 2018) dengan meningkatnya konsentrasi dan ukuran partikel. Keausan tidak selalu disebabkan oleh faktor kekerasan, ukuran butir dan konsentrasi. Pengaruh kontaminasi terhadap keausan sudah dilakukan oleh Sahu (Sahu, 2022), dimana peneliti menggunakan pasir yang bersifat *abrasive* berupa bahan silika dalam bentuk cair, dari hasil penelitiannya memperlihatkan bahwa terjadi peningkatan keausan dengan meningkatkan konsentrasi dan ukuran butir. Nabhan (Nabhan & Nabhan, 2016) melakukan penelitiannya menggunakan Cu dan Carbon Nanotubes, dimana dari hasil penelitiannya memperlihatkan hasil yang berbeda, begitu juga dengan Kamalesan (Kamalesan, 2016) yang melakukan penelitian dengan penambahan Cu, hal ini dapat menurunkan keausan. Dari hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa pada batas tertentu dengan meningkatnya konsentrasi Cu dan *carbon nanotubes* dapat menurunkan amplitudo dari getaran. Peningkatan ukuran konsentrasi dan kekerasan tidak selalu meningkatkan tingkat kerusakan pada bantalan. Jadi pengaruh kontaminan juga dipengaruhi oleh sifat lain dari material.

Meskipun terdapat sejumlah database pengujian bearing yang tersedia secara online, seperti *Case Western Reserve University Bearing Data Center* (CWRU) atau *Paderborn Bearing Data Center* (PBMC), sebagian besar dataset

tersebut berfokus pada kerusakan bearing yang dihasilkan secara artifisial, seperti pemotongan *raceway* atau bola dari bearing. Dataset tersebut tidak mencakup kerusakan bearing yang diakibatkan oleh kontaminasi padat pada pelumas, yang merupakan fenomena nyata yang sering terjadi di lingkungan industri. Selain itu, data yang tersedia biasanya terbatas pada sinyal getaran tanpa mencakup data sensor lain, seperti temperatur atau arus listrik, yang dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tentang mekanisme keausan.

Perawatan prediktif yang dilakukan dengan mendeteksi kondisi bantalan pada umumnya dilakukan dengan menggunakan analisis getaran. Untuk kondisi bantalan yang mengalami kontaminasi banyak terdapat *noise* dari sinyal getarannya. Analisis getaran untuk bantalan yang mengalami kontaminasi membutuhkan *sampling rate* yang tinggi, jumlah data yang besar, dan keahlian khusus dalam menganalisisnya. Pada kondisi ini sensor getaran saja tidak akurat. Beberapa peneliti menggunakan dua atau tiga buah sensor. Untuk mendeteksi kondisi *defect* pada bantalan dengan metoda *envelope detection* (Soni & Patel, 2017), *feature extraction*, *spektra kurtograph* (Hong, 2019) menggunakan data *vibro acoustic* (Gunerkar & Jalan, 2019), (Poddar & Tandon, 2019), *vibrometer* (Sukendi & others, 2020), dan arus stator (Frosini & Bassi, 2010). Kebutuhan alat akuisisi data untuk memantau kondisi bantalan secara terus menerus akan dapat mendeteksi *fault* lebih awal. Dalam kenyataannya alat akuisisi data yang mahal, sehingga metoda pengawasan yang digunakan adalah pemeriksaan secara teratur. Dengan memanfaatkan beberapa sensor dan dengan teknologi *internet of things* (IoT) berbasis mikrokontroler berpotensi untuk melakukan sistem *real time monitoring* dengan biaya yang relatif murah.

Beberapa cacat yang sering terjadi pada bantalan berupa *fatigue*, *wear*, deformasi plastis, korosi dan *brinelling* (Moundekar & Deshmukh, 2014) yang dapat diketahui dengan pemeriksaan kondisi permukaan dengan menggunakan SEM. Hubungan kondisi permukaan berupa hubungan *topography* evolusi dan vibrasi untuk bantalan jenis *trust bearings* (G. Wang, 2023) dengan melibatkan satu variabel kecepatan rotasi, beban, jenis pelumas dengan 3 (tiga) konsentrasi, dengan 5 (lima) level waktu. Karakteristik dari *topography* yang digunakan hanya

kekasaran permukaan. Hubungan lebih detail tentang mode cacat dengan getaran atau karakter operasional lain belum dibahas.

Menurut Lei dkk. (Lei et al., 2018), kondisi kritis dari bantalan adalah pada fase *fault*. Deteksi pada tahap ini sangat dibutuhkan karena dapat memberikan dampak pada kerusakan yang lebih besar terhadap kerusakan bagian mesin lainnya, dan bahkan berdampak pada keamanan dari pekerja. Kondisi *fault* ditentukan dengan penurunan fungsi dari bantalan yang didefinisikan dengan perubahan putaran dan arus listrik (Soualhi et al., 2019). Setelah kondisi *fault* bantalan diketahui, maka pertanyaan yang perlu dijawab adalah berapa lama lagi bantalan dapat bertahan?. Hal ini dikenal dengan umur sisa. Masalah untuk memprediksi dari umur sisa atau *remain usable life* (RUL) telah diselidiki oleh berbagai penulis dengan menggunakan *tools* yang berbeda-beda. Ada tiga kategori basis model penentuan umur sisa yaitu, model berbasis fisika, berbasis pengalaman, dan berbasis data, sehingga untuk menyelesaikan masalah ini ada tiga pendekatan.

Pendekatan berbasis model fisika mengandalkan model matematika yang diturunkan dari fisika komponen untuk menilai kondisi kesehatannya saat ini dan di masa depan (Cubillo et al., 2016). Model yang banyak digunakan adalah model Paris-Erdogan untuk perambatan retak, karena model fisik degenerasi bantalan terlalu kompleks (Liu et al., 2018). Untuk kondisi perambatan, filter partikel dengan model pertumbuhan retak yang dimodifikasi, berdasarkan model Paris, digunakan untuk memprediksi RUL *bantalan* oleh Liu dkk. (Liu et al., 2018). Untuk komponen yang sama, N. Lie dkk. (N. Li et al., 2015) mengusulkan model eksponensial yang ditingkatkan berdasarkan hukum Paris untuk prediksi RUL. Namun, penerapannya yang sangat terbatas adalah kelemahan utama dari pendekatan ini, karena sulit untuk memodelkan secara fisika kerusakan dalam sistem yang kompleks (Lei et al., 2018).

Pendekatan berbasis pengalaman biasanya mempertimbangkan data historis dan pengetahuan dari para ahli untuk membuat model degradasi (Xu et al., 2014). Namun demikian, dalam praktiknya, sebagian besar fenomena degradasi bersifat nonlinier, stokastik, dan nonstasioner, sehingga sulit untuk menggunakan kembali model yang dibuat dari data pengalaman (Tobon-Mejia et al., 2012).

Pendekatan berbasis data mencakup, tidak hanya terbatas pada model statistik dan kecerdasan buatan dapat juga dengan pendekatan gabungan fisik dan data sensor untuk memperdiksi tingkat keausan. Pendekatan pembelajaran mesin dapat menyelesaikan hubungan non linier, stokastik dan nonstasioner. Kategori cacat, *fault* dan *failure* bersifat kategorik sulit untuk dikaitkan dengan waktu. Penggunaan *scar width* sebagai ukuran keausan bantalan bola dapat digunakan sebagai ukuran kuantitatif terhadap kondisi bantalan, sehingga dapat didekati dengan model regresi.

B. Perumusan Masalah

Bantalan bola yang dilumasi dengan *gemuk* sering mengalami kegagalan sebelum waktu rancangannya, karena beroperasi pada lingkungan yang tidak bersih sehingga *gemuk* terkontaminasi oleh benda padat. Oleh sebab itu penelitian ini akan menjawab beberapa pertanyaan penelitian sebagai berikut:

Pertanyaan penelitian

1. Seberapa besar pengaruh jenis kontaminasi padat pada *gemuk* terhadap koefisien gesek dan laju keausan material dari disk?
2. Seberapa besar pengaruh kontaminasi padat pada *gemuk* terhadap mode dan mekanisme keausan
3. Bagaimana memprediksi tingkat keausan *bantalan bola*?

C. Tujuan Penelitian

1. Umum

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis pengaruh berbagai jenis kontaminan partikulat terhadap perilaku tribologis dan mekanisme keausan pada sistem bantalan bola, serta mengembangkan model prediktif berbasis data untuk estimasi tingkat keausan, guna mendukung strategi pemeliharaan prediktif dalam konteks industri 4.0.

2. Khusus

1. Menganalisis pengaruh enam jenis kontaminan yaitu: silika, pasir besi, batu bara, batu kapur, tanah liat, dan gipsum terhadap koefisien gesek dan laju keausan
2. Mengidentifikasi perubahan mode keausan pada bantalan bola akibat eksposur terhadap masing-masing jenis kontaminan, dengan melakukan karakterisasi morfologi permukaan menggunakan mikroskop elektron (SEM), spektroskopi energi-dispersif (EDS), dan analisis makroskopis.
3. Mengelaborasi mekanisme dominan keausan seperti *abrasive wear*, *adhesive wear*, *fatigue wear*, dan *tribo-chemical wear* yang terjadi pada sistem bantalan dalam kondisi kontaminasi yang divariasikan berdasarkan jenis dan konsentrasi kontaminan.
4. Mengembangkan model prediksi tingkat keausan bantalan bola berbasis pendekatan pembelajaran mesin, dengan mempertimbangkan variabel-variabel seperti jenis kontaminan, beban kerja, kecepatan rotasi, dan waktu operasi, untuk mendukung implementasi pemeliharaan prediktif yang efektif.

D. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoritis, praktis, maupun teknologis, sebagaimana dijelaskan berikut:

3. Manfaat Teoritis

Penelitian ini memperkaya literatur dalam bidang tribologi, khususnya mengenai pengaruh kontaminasi padat dalam gemuk terhadap karakteristik gesekan dan mekanisme keausan bantalan bola. Selain itu, penelitian ini juga memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan model prediktif berbasis pembelajaran mesin yang mempertimbangkan parameter fisik kontaminan dan data multi sensor secara simultan.

4. Manfaat Praktis

Hasil penelitian ini dapat digunakan oleh praktisi industri untuk memahami pengaruh kontaminan terhadap kerusakan bantalan sebagai dasar dalam pemilihan dan pengawasan kondisi pelumasan pada sistem bantalan, khususnya di lingkungan kerja ekstrem atau berdebu seperti industri pertambangan, manufaktur berat, dan transportasi. Identifikasi mode keausan dan jenis kontaminan yang dominan dapat membantu perencanaan strategi pemeliharaan yang lebih tepat sasaran.

5. Manfaat Teknologis

Penelitian ini mendorong pengembangan sistem perawatan prediktif berbasis kecerdasan buatan (*AI-assisted predictive maintenance*) yang terintegrasi dengan sensor dan data akuisisi. Model prediksi kerusakan bantalan yang dikembangkan dapat menjadi komponen penting dalam sistem monitoring kondisi mesin secara *real-time*, sehingga meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional.

Dengan manfaat-manfaat ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi industri, akademisi, dan praktisi dalam bidang perawatan mesin, serta meningkatkan kinerja dan keandalan operasional berbagai jenis mesin.

E. Batasan Masalah

Berikut adalah beberapa batasan masalah penelitian ini:

1. Umum
 - a. Material yang diujikan meliputi batubara, gipsum, pasir silika, tanah liat, batu kapur, dan pasir besi.
 - b. Ukuran material kontaminan adalah 74 μm dan 250 μm .
 - c. Lubrikasi menggunakan *gemuk* Top 1 HI-Temp Grease (standar NLGI GC-BL)
 - d. Konsentrasi kontaminan 10% dan 20% dari berat gemuk
2. *Pin-on-Disk*
 - a. Waktu pengukuran 30 dan 60 menit.

3. *Bearing test apparatus*
 - a. *Bearing* yang digunakan adalah tipe 6206.
 - b. Kecepatan rotasi adalah 2900 - 3000 rpm. (kecepatan rotasi motor)
 - c. Beban vertikal adalah 2000 N. ($\pm 20\%$ beban statis bantalan)
 - d. Waktu 4 jam (240 menit)
4. Pengembangan Model
 - a. Algoritma yang digunakan adalah pembelajaran mesin *Random Forest*, *XGBoost*, Suport Vektor Regression, *Neural Network* dan Regresi *Linerar*
 - b. Validitas menggunakan validasi silang

F. Kontribusi Ilmiah

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang signifikan dalam pengembangan ilmu tribologi serta sistem pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan. Adapun kebaruan (novelty) dari penelitian ini meliputi:

1. Komparasi sistematis terhadap pengaruh enam jenis kontaminan padat dari berbagai lokasi dalam industri semen, termasuk batu bara, gipsum, pasir silika, tanah liat, batu kapur, dan pasir besi terhadap performa tribologis sistem bantalan, yang jarang dilaporkan dalam literatur sebelumnya dengan pengujian *pin-on-disk* dan *bearing apparatus* melibatkan multi sensor yaitu akselerometer, termometer dan ampermeter.
2. Identifikasi mode keausan spesifik yang dipengaruhi oleh masing-masing kontaminan, melalui karakterisasi morfologi permukaan menggunakan SEM dan EDX.
3. Elaborasi mekanisme keausan multivariabel, seperti *abrasive*, *adhesive*, dan *fatigue wear*, yang dipicu oleh perbedaan komposisi kimia dan struktur morfologi partikel kontaminan.
4. Pengembangan model prediksi keausan bantalan bola berbasis pembelajaran mesin, dengan memasukkan jenis dan sifat fisik kontaminan, data multi

sensor dan sebagai variabel input, yang memberikan kontribusi pada sistem pemeliharaan prediktif berbasis AI (*AI-assisted predictive maintenance*) untuk lingkungan kerja ekstrem.

G. Sistematika Penulisan

Disertasi ini disusun dalam lima bab utama dengan sistematika sebagai berikut:

Bab I – Pendahuluan

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, kontribusi ilmiah (*novelty*), batasan penelitian, dan sistematika penulisan. Bab ini memberikan gambaran awal mengenai pentingnya topik penelitian dan arah kontribusinya.

Bab II – Tinjauan Pustaka

Bab ini menyajikan kajian literatur yang relevan dengan penelitian, termasuk teori tribologi, mekanisme keausan bantalan bola, jenis-jenis kontaminan padat pada gemuk, prinsip kerja pembelajaran mesin, serta tinjauan terhadap penelitian-penelitian terdahulu. Kerangka berpikir dan model konseptual juga disusun dalam bab ini.

Bab III – Metodologi Penelitian

Bab ini menjelaskan jenis dan pendekatan penelitian, variabel dan definisi operasional, populasi dan sampel, alat dan bahan penelitian, prosedur eksperimen tribologis dan pengujian bantalan, metode akuisisi dan analisis data sensor (akselerometer, termometer, dan ampermeter), teknik karakterisasi permukaan (SEM, EDX), serta tahapan pengembangan dan evaluasi model prediksi berbasis pembelajaran mesin.

Bab IV – Karakteristik Sifat Tribologi Dari Kontaminan Padat Dalam Gemuk Pada Sliding Kontak

Bab ini menyajikan pengujian proses gaya gesek dengan tribo meter, bahan yang digunakan, prosedur pengujian hasil koefisien gesek dan keausan akibat kontaminan. interpretasi citra SEM/EDX.

Bab V – Karakteristik Sifat Tribologi Pada Bantalan Bola Akibat Kontaminasi Padat

Bab ini menyajikan hasil pengujian dengan alat penguji bantalan. Material, sensor, kontaminan, prosedur pengujian. Bab ini juga melakukan analisis mode dan mekanisme keausan.

Bab VI – Pembelajaran Mesin untuk *Predictive Maintenance* Pada Bantalan Bola Akibat Kontaminasi Padat Pada Lingkungan Berdebu

Bab ini membahas proses pengembangan model pembelajaran mesin. Metoda yang digunakan untuk pemrosesan awal data berupa pembersihan data, membuang noise, normalisasi data. Memilih algoritma pembelajaran yang akan dilatih. Evaluasi dan validasi model untuk menguji kestabilan dan generalisasi model.

Bab VII – Kesimpulan dan Saran

Bab ini memuat kesimpulan dari hasil penelitian yang menjawab tujuan dan hipotesis yang telah diajukan. Selain itu, disampaikan juga kontribusi ilmiah, keterbatasan penelitian, serta saran untuk penerapan praktis dan penelitian lanjutan di masa depan.