



# NOZEL

## Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



### ANALISIS TREN PENERAPAN ECONOMIC EVALUATION PADA PREDICTIVE MAINTENANCE BERBASIS IOT DI INDUSTRI MANUFAKTUR: SEBUAH SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

**Rizky hardinata<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Al- Azhar Medan  
Corresponding e-mail: [rizkyhardinata336@gmail.com](mailto:rizkyhardinata336@gmail.com)

#### *Abstract*

*Predictive Maintenance (PdM) based on the Internet of Things (IoT) has emerged as a strategic approach to improve equipment reliability, reduce unplanned downtime, and optimize maintenance costs in manufacturing industries. However, despite the rapid advancement of PdM technologies, studies focusing on their economic evaluation remain relatively limited. This study aims to identify the economic evaluation methods used in PdM-IoT literature, analyze the reported economic benefits, identify key implementation challenges, and propose future research directions. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following the PRISMA protocol. Literature was collected from Scopus, Google Scholar, and IEEE Xplore databases for the period 2019–2025. From an initial pool of 268 publications, 20 articles met the inclusion criteria and were analyzed in depth. The findings indicate that Return on Investment (ROI) and Net Present Value (NPV) are the most frequently used methods for evaluating the economic feasibility of PdM-IoT implementation. The reported benefits include reduced maintenance costs, minimized downtime, improved asset availability, and enhanced operational efficiency. Nevertheless, several challenges remain, including high initial investment costs, data integration complexity, sensor infrastructure requirements, and difficulties in quantifying indirect economic benefits. The study concludes that economic evaluation plays a crucial role in supporting PdM-IoT investment decisions and highlights the need for more comprehensive evaluation frameworks tailored to specific industrial contexts.*

**Keywords:** *economic evaluation, predictive maintenance, IoT, manufacturing industry, systematic literature review*

## A. PENDAHULUAN

Perawatan mesin merupakan aktivitas kritis dalam industri yang berdampak signifikan terhadap biaya operasional dan keandalan sistem. (Ran et al., 2020) dalam survei komprehensif mereka mencatat bahwa downtime tak terencana pada mesin atau sistem dapat mengganggu inti bisnis perusahaan dan mengakibatkan kerugian ekonomi yang besar. Sebagai contoh, biaya operasi dan perawatan (O&M) untuk turbin angin lepas pantai mencapai 20–35% dari total pendapatan listrik yang dihasilkan, sementara pengeluaran perawatan di industri minyak dan gas berkisar antara 15–70% dari total biaya produksi (Ran et al., 2020). Dalam konteks pengambilan keputusan ekonomi, (Siregar et al., 2022) menjelaskan bahwa perhitungan biaya operasional merupakan bagian penting dari analisis ekonomi teknik yang menentukan efisiensi dan kelayakan suatu sistem industri. Fakta ini menegaskan urgensi penerapan strategi perawatan yang lebih efisien dan berbasis data.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dalam kerangka revolusi industri 4.0 telah memungkinkan implementasi sistem perawatan prediktif (predictive maintenance/PdM) yang memanfaatkan data sensor secara real-time untuk memprediksi kegagalan peralatan sebelum terjadi. integrasi data yang efektif menjadi salah satu faktor penting dalam mendukung implementasi teknologi industri 4.0. Sistem informasi terintegrasi seperti Enterprise Resource Planning dan Supply Chain Management (ERP-SCM) memungkinkan pengelolaan data operasional yang lebih terkoordinasi sehingga mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan efisien dalam lingkungan industri (Siregar, 2019). Penerapan pendekatan berbasis data seperti dalam proses manufaktur terbukti mampu meningkatkan efisiensi siklus produksi secara signifikan dan mengurangi pemborosan operasional di industri (Puspita et al., 2024). (Rosati et al., 2023) mengusulkan arsitektur sistem Maintenance 4.0 yang mengintegrasikan teknologi IoT, cloud computing, dan kecerdasan buatan untuk menciptakan sistem perawatan yang lebih cerdas dan prediktif. (Compare et al., 2019) menegaskan bahwa paradigma industri 4.0 semakin meningkatkan relevansi PdM bagi industri manufaktur dan produksi, meskipun sejumlah tantangan implementasi masih perlu diatasi.

Sistem PdM konvensional (reactive dan preventive maintenance) memiliki keterbatasan inheren. (Shehadeh, 2024) menjelaskan bahwa reactive maintenance menyebabkan downtime tak terencana dengan biaya tinggi, sementara preventive

maintenance berisiko menghasilkan perawatan yang tidak perlu karena didasarkan pada estimasi teoritis, bukan kondisi aktual peralatan. Lebih jauh, biaya perbaikan dalam mode reaktif (setelah kegagalan) umumnya tiga kali lebih mahal dibandingkan perawatan terjadwal dan (Ran et al., 2020) PdM menawarkan solusi dengan memungkinkan perawatan hanya dilakukan saat benar-benar diperlukan berdasarkan kondisi aktual peralatan.

Meskipun aspek teknis PdM berbasis IoT telah banyak dikaji—seperti oleh (Basto & Symone, 2019). yang mengkaji metode machine learning untuk PdM, serta (Zonta et al., 2020). yang melakukan tinjauan sistematis PdM dalam konteks industri 4.0—kajian yang secara khusus memetakan penerapan metode economic evaluation pada domain ini masih sangat terbatas. Kesenjangan ini lah yang mendorong penelitian ini. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis tematik-deskriptif terhadap metode evaluasi ekonomi PdM-IoT dengan pemetaan bibliometrik menggunakan VOSviewer, yang belum banyak dilakukan dalam kajian sejenis. Berbeda dengan tinjauan sistematis sebelumnya yang lebih banyak menyoroti aspek teknis PdM (Zonta et al., 2020)(Basto & Symone, 2019) penelitian ini secara khusus memetakan dimensi ekonomi—mencakup metode evaluasi, manfaat, dan tantangan—sekaligus menampilkan posisi Indonesia dalam lanskap kolaborasi riset PdM-IoT global. Hasil pemetaan ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan kerangka evaluasi ekonomi PdM-IoT yang relevan dengan konteks industri manufaktur di Indonesia

. Tujuan penelitian adalah:

1. mengidentifikasi metode economic evaluation yang digunakan dalam literatur PdM-IoT.
2. menganalisis manfaat ekonomi yang dilaporkan.
3. mengidentifikasi tantangan utama.
4. mengusulkan arah penelitian masa depan.

## **B. METODE**

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) mengacu pada protokol PRISMA yang dikembangkan oleh (Cheng et al., 2022). Protokol PRISMA dipilih karena menyediakan kerangka kerja yang terstandarisasi untuk

mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis bukti-bukti empiris secara sistematis dan transparan. Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data: Scopus, Google Scholar, dan IEEE Xplore, dengan periode publikasi 2019–2025. String pencarian yang digunakan adalah kombinasi kata kunci: ("predictive maintenance" OR "PdM") AND ("IoT" OR "Internet of Things") AND ("economic evaluation" OR "cost-benefit" OR "ROI" OR "NPV" OR "life cycle cost"). Pencarian dilaksanakan pada bulan Januari 2026. Proses seleksi dilakukan melalui empat tahap PRISMA:

1. Identifikasi: 268 artikel ditemukan dari ketiga basis data.
2. Skrining: 89 artikel tersisa setelah penghapusan duplikat dan artikel tidak relevan.
3. Kelayakan: 20 artikel lolos setelah pembacaan teks lengkap.
4. Inklusi: 20 artikel dianalisis penuh. Kriteria inklusi: artikel jurnal atau prosiding terindeks, memuat evaluasi ekonomi eksplisit pada sistem PdM berbasis IoT di sektor manufaktur, dipublikasikan 2019–2025.

Selain analisis tematik-deskriptif, analisis bibliometrik dilakukan menggunakan perangkat lunak VOSviewer untuk memetakan lanskap penelitian PdM-IoT secara global. Analisis ini mencakup pemetaan jaringan kolaborasi antar penulis (*co-authorship authors*) dan pemetaan kolaborasi antar negara (*co-authorship countries*) berdasarkan keseluruhan 268 artikel hasil pencarian. Dari 268 artikel tersebut, hanya 20 artikel yang memenuhi kriteria inklusi PRISMA yang selanjutnya dianalisis secara mendalam sebagai referensi utama dalam kajian ini. Data diekstrak menggunakan matriks sistematis yang mencakup: jenis industri, metode evaluasi ekonomi, manfaat yang dilaporkan, tantangan implementasi, dan temuan utama. Analisis dilakukan secara tematik-deskriptif.

## **C. HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **1. Hasil Penelitian**

#### **A. Tren Penelitian PdM Berbasis IoT (2019–2025)**

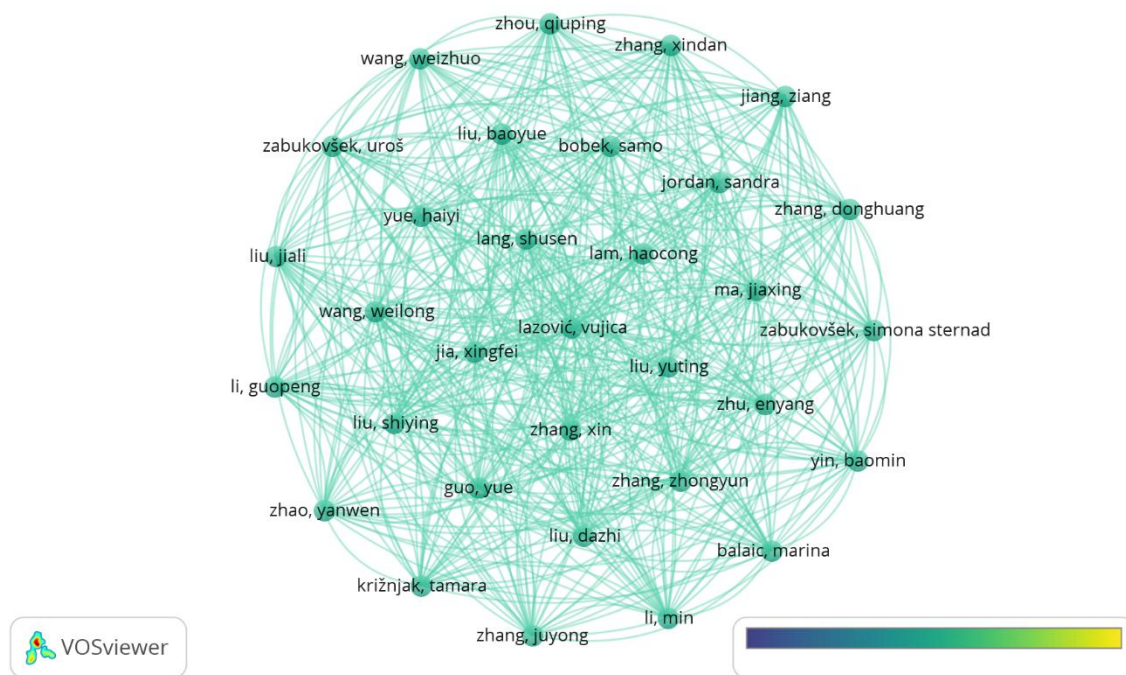
Dari 20 artikel yang memenuhi kriteria inklusi, seluruhnya membahas implementasi PdM berbasis IoT di sektor manufaktur dengan berbagai pendekatan evaluasi ekonomi. (Zonta et al., 2020) dalam tinjauan sistematis mereka mengidentifikasi bahwa sebagian besar penelitian PdM masih berfokus pada aspek teknis seperti akurasi prediksi

dan deteksi anomali, sementara evaluasi kelayakan finansial masih kurang mendapat perhatian proporsional. Temuan ini mengonfirmasi relevansi dan urgensi kajian ini.

(Dalzochio et al., 2020) mengidentifikasi bahwa integrasi machine learning dan reasoning dalam sistem PdM industri 4.0 merupakan tren yang berkembang pesat, namun implementasinya masih menghadapi tantangan nyata terkait ketersediaan data berkualitas tinggi dan kompleksitas integrasi sistem. Dari perspektif evaluasi ekonomi (Bousdekis et al., 2021) menegaskan bahwa keputusan investasi teknologi PdM memerlukan pendekatan pengambilan keputusan yang komprehensif, mencakup tidak hanya analisis finansial tetapi juga pertimbangan operasional dan strategis jangka panjang.

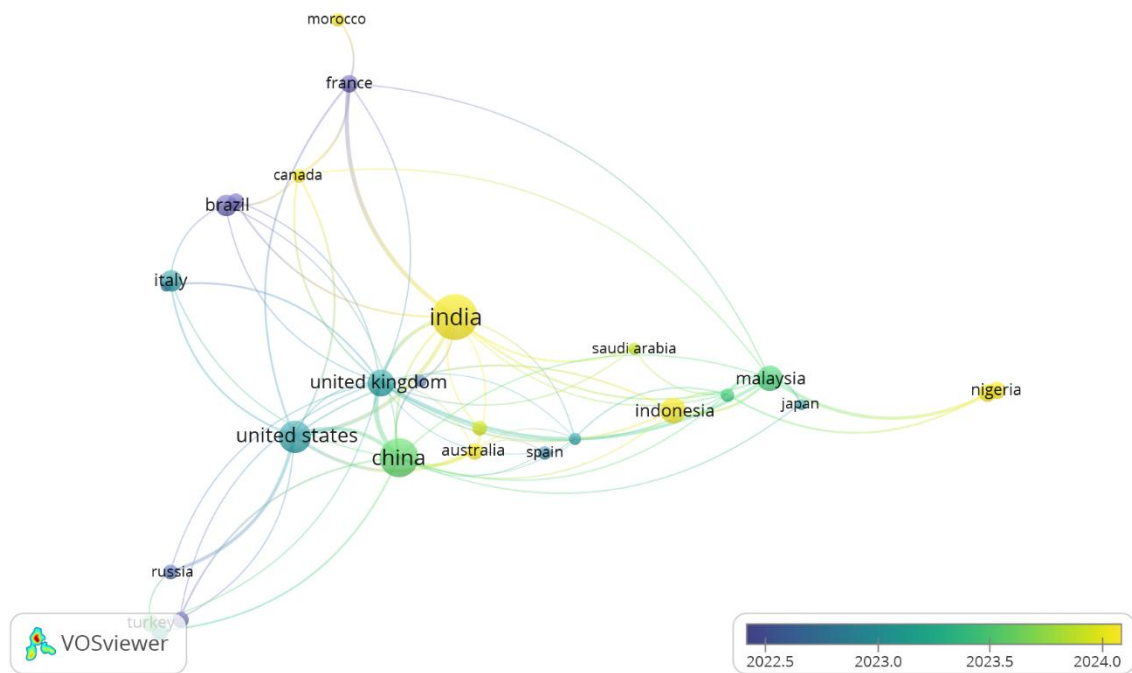
## **B. Pemetaan Kolaborasi Penelitian PdM-IoT Berbasis VOSviewer**

Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer dilakukan terhadap keseluruhan 268 artikel hasil pencarian untuk memetakan lanskap kolaborasi penelitian PdM-IoT secara global. Dari 268 artikel tersebut, hanya 20 artikel yang memenuhi kriteria inklusi PRISMA dan dianalisis secara mendalam sebagai referensi utama dalam kajian ini. Analisis ini menghasilkan dua peta visualisasi jaringan kolaborasi yakni peta co-authorship antar penulis dan peta co-authorship antar negara, yang memberikan gambaran menyeluruh tentang perkembangan komunitas peneliti PdM-IoT secara global sebelum dilakukan analisis tematik lebih mendalam pada bagian selanjutnya.



Gambar 1. Peta Co-authorship Penulis Penelitian PdM-IoT

Berdasarkan gambar 1. menunjukkan peta jaringan co-authorship antar penulis. Dari hasil analisis teridentifikasi 71 penulis yang memenuhi threshold minimum, dengan 32 penulis membentuk satu kluster jaringan kolaborasi utama yang saling terhubung erat. Jaringan ini didominasi oleh penulis-penulis dari kawasan Asia Timur seperti Zhang, Liu, dan Wang, serta dari Eropa Tengah seperti Zabukovšek, Bobek, dan Lazović, mencerminkan pola kolaborasi internasional yang aktif. Temuan ini sejalan dengan (Zonta et al., 2020) yang mengidentifikasi pertumbuhan signifikan komunitas peneliti PdM dalam konteks industri 4.0, di mana sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis sementara evaluasi ekonomi masih kurang mendapat perhatian proporsional



Gambar 2. Peta Co-authorship Negara Penelitian PdM-IoT

Berdasarkan Gambar 2 menunjukkan peta co-authorship berdasarkan negara. Dari 74 negara yang teridentifikasi berkontribusi dalam penelitian PdM-IoT, sebanyak 28 negara memenuhi threshold minimum 5 dokumen. India merupakan negara dengan kontribusi terbesar yang ditandai dengan lingkaran terbesar berwarna kuning, menunjukkan dominasi publikasi terbaru pada periode 2023–2024. China dan United States menyusul sebagai kontributor utama dengan jaringan kolaborasi yang luas. Yang menarik, Indonesia turut muncul dalam jaringan penelitian global ini bersama Malaysia sebagai representasi kawasan Asia Tenggara, meskipun kontribusinya masih terbatas. Kondisi ini sejalan dengan tantangan yang diidentifikasi oleh (Compare et al., 2019) dan (Theissler et al., 2021) bahwa negara-negara berkembang masih menghadapi hambatan signifikan dalam implementasi PdM-IoT, termasuk tingginya biaya infrastruktur sensor dan platform analitik yang akan dibahas lebih lanjut pada bagian C.

### C. Metode Evaluasi Ekonomi dalam Literatur

Analisis tematik terhadap 20 artikel menunjukkan bahwa metode evaluasi ekonomi yang digunakan dalam literatur PdM-IoT bervariasi. Berdasarkan sintesis dari artikel-artikel yang dikaji, metode Return on Investment (ROI) dan Net Present Value (NPV) merupakan pendekatan yang paling sering disebutkan, sejalan dengan temuan (Bousdekis

et al., 2021) yang menyatakan bahwa metrik finansial berbasis nilai waktu uang mendominasi evaluasi investasi teknologi industri. Tabel 1 berikut ini akan menyajikan ringkasan metode evaluasi yang teridentifikasi dalam literatur yang dikaji.

**Tabel 1. Metode Evaluasi Ekonomi yang Teridentifikasi dalam Literatur PdM-IoT**

<b>Metode Evaluasi Ekonomi</b>	<b>Konteks Penerapan</b>	<b>Referensi</b>
Return on Investment (ROI)	Paling sering disebutkan dalam evaluasi investasi PdM-IoT	(Bousdekis et al., 2021)
Net Present Value (NPV)	Evaluasi kelayakan investasi jangka panjang	(Bousdekis et al., 2021)
Payback Period (PP)	Estimasi waktu pengembalian investasi	(Ran et al., 2020)
Total Cost of Ownership (TCO)	Evaluasi biaya siklus hidup sistem	(Compare et al., 2019)
Cost Minimization Model	Optimasi biaya perawatan (preventif vs. korektif)	(Ran et al., 2020)

Berdasarkan Tabel 1, metode ROI dan NPV merupakan metode yang paling sering digunakan dalam evaluasi ekonomi PdM-IoT karena kemudahannya dalam mengkomunikasikan kelayakan investasi kepada pemangku kepentingan (Bousdekis et al., 2021). Metode lain seperti Payback Period, TCO, dan Cost Minimization Model juga digunakan sesuai dengan kebutuhan dan konteks industri masing-masing (Ran et al., 2020); (Compare et al., 2019)

(Eddouh et al., 2023) secara eksplisit mencatat bahwa minimisasi biaya merupakan salah satu tujuan utama PdM, dan biaya perbaikan dalam mode reaktif umumnya tiga kali lebih mahal dibandingkan perawatan terjadwal. (Theissler et al., 2021) dalam kajian PdM berbasis machine learning di industri otomotif mengidentifikasi bahwa meskipun manfaat teknis PdM sangat signifikan, kuantifikasi manfaat ekonomi masih menjadi tantangan tersendiri karena banyak manfaat bersifat tidak langsung dan sulit dikuantifikasi secara presisi. Hal ini menjelaskan keragaman pendekatan evaluasi yang ditemukan dalam literatur.

(Çınar et al., 2020) dalam kajian komprehensif mereka tentang machine learning untuk PdM di industri manufaktur cerdas mengidentifikasi bahwa teknik ML terbukti efektif dalam mendeteksi anomali dan memprediksi kegagalan peralatan secara dini, sehingga berkontribusi signifikan terhadap pengurangan downtime dan peningkatan efisiensi perawatan. Meskipun studi tersebut tidak melaporkan nilai ROI spesifik, sistem yang dikembangkan terbukti mampu mencegah production stop, yang secara langsung berimplikasi pada penghematan biaya downtime. (Pech & Vrchota, 2021) menambahkan bahwa keberhasilan sensor cerdas dalam pabrik pintar sangat bergantung pada kemampuan organisasi mengelola dan menganalisis data, yang merupakan faktor penting dalam kalkulasi total biaya kepemilikan sistem PdM-IoT.

#### **D. Manfaat dan Tantangan Ekonomi Implementasi PdM-IoT**

Sejumlah manfaat ekonomi dilaporkan secara konsisten dalam literatur yang dikaji. (Ran et al., 2020) menyebutkan bahwa PdM memungkinkan frekuensi perawatan seoptimal mungkin—menghindari reactive maintenance yang mahal sekaligus menghindari preventive maintenance yang berlebihan. (Varalakshmi & Kumar, 2025) mengidentifikasi bahwa tantangan terbesar implementasi PdM-IoT meliputi:

1. integrasi data dari berbagai sumber sensor yang heterogen.
2. kompleksitas pemodelan degradasi.
3. dampak implementasi terhadap manajemen pemeliharaan, logistik suku cadang, keselamatan, desain sistem, dan manajemen secara keseluruhan.

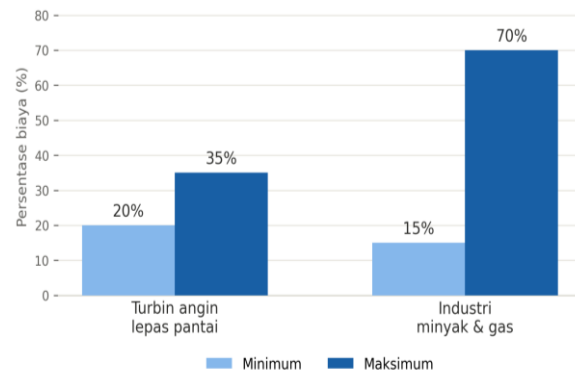
berikut ini Tabel 2 akan merangkum manfaat dan tantangan utama berdasarkan sintesis literatur.

**Tabel 2. Manfaat dan Tantangan Ekonomi PdM-IoT Berdasarkan Literatur**

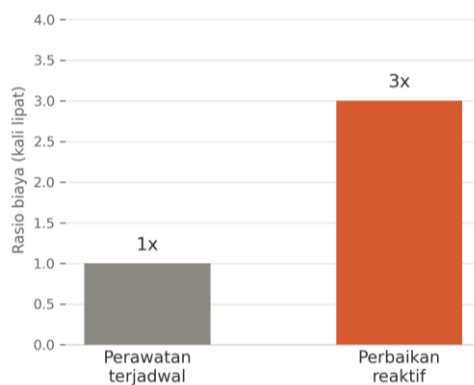
<b>Aspek</b>	<b>Temuan dari Literatur</b>	<b>Referensi</b>
Biaya O&M	Biaya O&M turbin angin lepas pantai mencapai 20–35% dari total pendapatan	(Ran et al., 2020)
Biaya industri minyak & gas	Pengeluaran perawatan berkisar 15–70% dari total biaya produksi	(Ran et al., 2020)
Biaya perbaikan reaktif	Umumnya 3x lebih mahal dari perawatan terjadwal	(Ran et al., 2020)

Tantangan biaya awal	Biaya infrastruktur sensor dan platform analitik menjadi hambatan utama adopsi	(Compare et al., 2019) ,(Theissler et al., 2021)
Deteksi dini kegagalan	Sistem PdM-IoT terbukti efektif mendeteksi sinyal kegagalan sebelum production stop terjadi	(Elkateb et al., 2024)

Berdasarkan Tabel 2, untuk mempermudah visualisasi perbandingan rentang biaya perawatan antar sektor industri dan perbedaan biaya perbaikan reaktif dibandingkan perawatan terjadwal, data tersebut disajikan kembali dalam bentuk diagram batang sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Rentang biaya O&M (% dari basis terkait). Sumber data: Ran et al. (2020).



Gambar 4. Rasio biaya perbaikan reaktif vs terjadwal. Sumber data: Ran et al. (2020).

Berdasarkan Gambar 3 dan 4, biaya O&M turbin angin lepas pantai berkisar antara 20–35% dari total pendapatan, sedangkan biaya perawatan industri minyak & gas jauh lebih tinggi yakni 15–70% dari total biaya produksi. Selain itu, biaya perbaikan reaktif terbukti tiga kali lebih mahal dibandingkan perawatan terjadwal, yang menegaskan pentingnya penerapan sistem perawatan prediktif berbasis IoT sebagai solusi yang lebih efisien secara ekonomi.

## 2. Pembahasan

### A. Kesenjangan Evaluasi Ekonomi dalam Literatur PdM-IoT

Temuan kajian ini mengonfirmasi bahwa evaluasi ekonomi merupakan komponen yang belum mendapat perhatian proporsional dalam literatur PdM-IoT, meskipun secara praktis menjadi penentu utama keputusan adopsi teknologi ini. (Zonta et al., 2020) mengidentifikasi kesenjangan yang sama dalam tinjauan sistematis mereka, di mana sebagian besar penelitian PdM masih terfokus pada aspek teknis sementara dimensi ekonomi dan finansial masih kurang dikaji secara mendalam.

### B. Dominasi Metode ROI dan NPV serta Keterbatasannya

Dominasi metode ROI dan NPV dalam literatur yang dikaji (Bousdekis et al., 2021) dapat dipahami sebagai konsekuensi dari kebutuhan praktis industri untuk mengomunikasikan kelayakan investasi PdM-IoT kepada pemangku kepentingan secara cepat dan mudah dipahami. Namun, kecenderungan ini juga berisiko menyederhanakan persoalan, karena metrik finansial berbasis nilai waktu uang cenderung berfokus pada manfaat jangka pendek dan langsung, sementara manfaat strategis seperti peningkatan keselamatan kerja, keberlanjutan operasional, dan kapabilitas pengambilan keputusan berbasis data—yang bersifat jangka panjang dan yang bersifat tidak langsung sehingga sulit direpresentasikan dalam perhitungan ROI atau NPV konvensional. Hal ini sejalan dengan temuan (Theissler et al., 2021) yang menegaskan bahwa kuantifikasi manfaat ekonomi PdM masih menjadi tantangan karena sifatnya yang tidak langsung. Temuan tersebut menunjukkan perlunya pengembangan kerangka evaluasi ekonomi yang lebih komprehensif sehingga mampu mengintegrasikan manfaat finansial, operasional, dan strategis secara bersamaan dalam implementasi PdM-IoT.

### **C. Tantangan Multidimensi dalam Implementasi PdM-IoT**

Dari perspektif tantangan, (Compare et al., 2019) mengidentifikasi bahwa implementasi PdM-IoT menghadapi tantangan multidimensi yang mencakup aspek teknis (integrasi data, akurasi model), aspek organisasional (perubahan proses dan prosedur pemeliharaan), dan aspek ekonomis (justifikasi investasi awal yang tinggi). (Theissler et al., 2021) menambahkan bahwa dalam konteks industri otomotif, kuantifikasi manfaat ekonomi PdM sangat bergantung pada konteks spesifik implementasi, termasuk jenis komponen yang dipantau, frekuensi kegagalan historis, dan biaya downtime yang bervariasi antar fasilitas produksi.

### **D. Akar Metodologis Minimnya Kajian Ekonomi**

Minimnya kajian ekonomi dibandingkan aspek teknis dalam literatur PdM-IoT dapat dijelaskan dari perspektif metodologis. Sebagian besar penelitian PdM berasal dari disiplin teknik dan ilmu komputer, sehingga fokus evaluasi cenderung diarahkan pada metrik kinerja teknis seperti akurasi prediksi, precision, dan recall yang relatif mudah diukur, direplikasi, serta dibandingkan antar studi. Sebaliknya, evaluasi ekonomi memerlukan akses terhadap data biaya operasional, investasi, dan dampak finansial yang umumnya bersifat proprietary dan tidak dipublikasikan secara terbuka oleh perusahaan.

Kondisi ini menyebabkan peneliti menghadapi keterbatasan data empiris untuk melakukan analisis ekonomi secara komprehensif. Oleh karena itu, kesenjangan penelitian yang teridentifikasi dalam kajian ini tidak hanya mencerminkan dominasi perspektif teknis dalam pengembangan PdM-IoT, tetapi juga menunjukkan adanya hambatan struktural terkait aksesibilitas data ekonomi di lingkungan industri.

### **E. Prinsip Optimasi Biaya melalui Predictive Maintenance**

(Taoufyq, 2025) menegaskan bahwa predictive maintenance memungkinkan frekuensi perawatan dioptimalkan berdasarkan kondisi aktual peralatan sehingga dapat mencegah terjadinya reactive maintenance yang tidak terencana tanpa menimbulkan biaya akibat preventive maintenance yang berlebihan. Prinsip optimasi biaya ini menjadi landasan konseptual bagi pengembangan kerangka evaluasi ekonomi yang komprehensif. Realisasi manfaat ini dalam praktik masih menghadapi kendala nyata terkait kualitas dan ketersediaan data pelatihan untuk model prediktif, yang pada gilirannya memengaruhi akurasi prediksi dan nilai ekonomi sistem secara keseluruhan.

### **F. Implikasi bagi Industri Manufaktur Indonesia**

Untuk konteks industri manufaktur Indonesia, temuan ini memiliki implikasi penting. (Ali & Abdelhadi, 2022) penerapan condition-based maintenance (CBM) memiliki biaya instalasi awal yang relatif tinggi, namun mampu mengurangi biaya pemeliharaan dan downtime melalui deteksi dini kerusakan serta peningkatan ketersediaan aset. (Buabeng et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan pendekatan stacked ensemble berbasis multisensor data fusion mampu meningkatkan akurasi klasifikasi kerusakan mesin secara signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan keandalan prediksi dapat mendukung efektivitas implementasi predictive maintenance di lingkungan industri.

### **G. Posisi Indonesia dalam Jaringan Riset Global dan Peluang Pengembangan**

Posisi Indonesia yang masih terbatas dalam jaringan kolaborasi global PdM-IoT sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 mengindikasikan adanya celah ganda: di satu sisi adopsi teknologi PdM-IoT di industri manufaktur Indonesia masih dalam tahap awal, di sisi lain riset mengenai evaluasinya pun belum banyak dilakukan. Kondisi ini sekaligus membuka peluang riset, mengingat struktur biaya operasional di Indonesia—terutama komponen biaya tenaga kerja berbeda signifikan dari negara-negara dengan

kontribusi riset terbesar seperti India, China, dan Amerika Serikat. Akibatnya, hasil perhitungan ROI atau payback period dari literatur global tidak dapat diadopsi secara langsung, melainkan perlu disesuaikan dengan konteks biaya dan karakteristik sektor industri di Indonesia, misalnya manufaktur berbasis sumber daya alam seperti pengolahan kelapa sawit (Puspita et al., 2024).

## **D. PENUTUP**

### **Simpulan**

Berdasarkan hasil systematic literature review terhadap 20 artikel terpilih (2019–2025), metode evaluasi ekonomi yang paling dominan digunakan dalam literatur PdM-IoT adalah ROI dan NPV. Biaya perbaikan reaktif terbukti tiga kali lebih mahal dibandingkan perawatan terjadwal, menegaskan urgensi adopsi sistem PdM-IoT (Ran et al., 2020). Tantangan utama implementasi meliputi tingginya biaya infrastruktur sensor, kompleksitas integrasi sistem, dan sulitnya kuantifikasi manfaat ekonomi tidak langsung (Compare et al., 2019)(Theissler et al., 2021). Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan pemetaan sistematis yang secara eksplisit menghubungkan metode evaluasi ekonomi dengan implementasi PdM berbasis IoT, dilengkapi dengan analisis bibliometrik yang menggambarkan posisi Indonesia dalam lanskap riset global di bidang ini. Pemetaan ini dapat menjadi rujukan awal bagi akademisi dan praktisi industri manufaktur di Indonesia dalam menyusun kerangka evaluasi investasi PdM-IoT yang sesuai dengan konteks biaya dan kebutuhan industri lokal, sekaligus menjadi titik tolak bagi pengembangan riset empiris lanjutan di sektor-sektor spesifik. Berbeda dengan kajian sebelumnya yang berfokus pada aspek teknis PdM, penelitian ini memberikan pemetaan komprehensif mengenai dimensi ekonomi implementasi PdM-IoT dan implikasinya bagi konteks industri manufaktur Indonesia.

### **Saran**

Berdasarkan temuan penelitian, disarankan:

1. penelitian selanjutnya mengembangkan kerangka evaluasi ekonomi terstandar yang dapat diadaptasi ke berbagai konteks industri dan skala usaha.

2. lebih banyak studi empiris dilakukan di negara berkembang termasuk Indonesia untuk menghasilkan data yang relevan secara lokal.
3. kolaborasi akademisi, industri, dan pemerintah diperkuat untuk mendorong adopsi standar evaluasi ekonomi dalam implementasi teknologi industri 4.0 di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., & Abdelhadi, A. (2022). *applied sciences Condition-Based Monitoring and Maintenance : State of the Art Review*. 12(668), 1–18. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/2/688>
- Basto, P., & Symone, G. S. (2019). *A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance*. 1–12. [https://www.researchgate.net/publication/335644027\\_A\\_systematic\\_literature\\_review\\_of\\_machine\\_learning\\_methods\\_applied\\_to\\_predictive\\_maintenance](https://www.researchgate.net/publication/335644027_A_systematic_literature_review_of_machine_learning_methods_applied_to_predictive_maintenance)
- Bousdekis, A., Lepenioti, K., & Apostolou, D. (2021). *A Review of Data-Driven Decision-Making Methods for Industry 4 . 0 Maintenance Applications*. 10(7), 1–20. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/7/828>
- Buabeng, A., Simons, A., & Frempong, N. K. (2022). *Predictive Maintenance Model Based on Multisensor Data Fusion of Hybrid Fuzzy Rough Set Theory Feature Selection and Stacked Ensemble for Fault Classification*. 2022, 1–24. <https://doi.org/10.1155/2022/4372567>
- Cheng, X., Chaw, J. K., Goh, K. M., Ting, T. T., & Sahrani, S. (2022). *Systematic Literature Review on Visual Analytics of Predictive*. 18(3), 1–16. <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/17/6321>
- Çınar, Z. M., Nuhu, A. A., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2020). *Machine Learning in Predictive Maintenance towards Sustainable Smart Manufacturing in Industry 4 . 0*. 12(19), 1–42. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/16/8081>
- Compare, M., Baraldi, P., Zio, E., & Member, S. (2019). *Challenges to IoT-enabled Predictive Maintenance for Industry 4 . 0*. 7(5), 1–13. [https://www.researchgate.net/publication/337711441\\_Challenges\\_to\\_IoT-Enabled\\_Predictive\\_Maintenance\\_for\\_Industry\\_40](https://www.researchgate.net/publication/337711441_Challenges_to_IoT-Enabled_Predictive_Maintenance_for_Industry_40)

- Dalzochio, J., Kunst, R., Pignaton, E., Binotto, A., Sanyal, S., Favilla, J., & Barbosa, J. (2020). *Computers in Industry Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4 . 0: Current status and challenges*. 123, 1–15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166361520305327?via%3Dihub>
- Eddouh, Y., Daya, A., Elotmani, R., & Touache, A. (2023). *Optimization Approaches for Cost Reduction in Preventive Maintenance Strategies : A Comparative Study*. 19(6), 359–367. <https://doi.org/10.23940/ijpe.23.06.p1.359367>
- Elkateb, S., Ahmed, M., Shendy, A., & Abu-elanien, A. E. B. (2024). *Machine learning and IoT – Based predictive maintenance approach for industrial applications*. 88(October 2023), 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.12.065>
- Pech, M., & Vrchota, J. (2021). *Predictive Maintenance and Intelligent Sensors in Smart Factory : Review*. 21(4), 1–40. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1470>
- Puspita, R., Polewangi, Y. D., Fazri, M., & Siregar, Z. H. (2024). *LEAN SIX SIGMA APPROACH TO INCREASE PROCESS CYCLE EFFICIENCY IN PALM OIL PROCESSING AT PT. X*. 05(01), 367–375. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v5i1.357>
- Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y., & Deng, R. (2020). *A Survey of Predictive Maintenance : Systems , Purposes and Approaches*. 1–36. [https://www.researchgate.net/publication/337971929\\_A\\_Survey\\_of\\_Predictive\\_Maintenance\\_Systems\\_Purposes\\_and\\_Approaches/link/65b126029ce29c458ba9c4ca/download?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19](https://www.researchgate.net/publication/337971929_A_Survey_of_Predictive_Maintenance_Systems_Purposes_and_Approaches/link/65b126029ce29c458ba9c4ca/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIn19)
- Rosati, R., Romeo, L., Cecchini, G., Tonetto, F., Viti, P., Mancini, A., & Frontoni, E. (2023). From knowledge-based to big data analytic model : a novel IoT and machine learning based decision support system for predictive maintenance in Industry 4 . 0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10845-022-01960-x>
- Shehadeh, H. K. (2024). *Evaluating the Impact of Transitioning Maintenance Strategy from Reactive to Proactive in Power Generation Companies : An Empirical Analysis*. 21(69), 820–838. <https://doi.org/10.37394/23207.2024.21.69>
- Siregar, Z. H. (2019). *Sistem Enterprise Resource Planning - Supply Chain Management ( ERP-SCM ) Pada Perusahaan Distribusi*. 1(1), 20–37.

- [https://www.researchgate.net/publication/349320172\\_Sistem\\_Enterprise\\_Resource\\_Planning\\_-\\_Supply\\_Chain\\_Management\\_ERP-SCM\\_Pada\\_Perusahaan\\_Distribusi](https://www.researchgate.net/publication/349320172_Sistem_Enterprise_Resource_Planning_-_Supply_Chain_Management_ERP-SCM_Pada_Perusahaan_Distribusi)
- Siregar, Z. H., Asahan, U., Hardono, J., & Tangerang, U. M. (2022). *Ekonomi teknik* (Issue April). [https://www.researchgate.net/publication/360269062\\_EKONOMI\\_TEKNIK](https://www.researchgate.net/publication/360269062_EKONOMI_TEKNIK)
- Taoufyq, H. (2025). *Predictive Maintenance Approaches : A Systematic Literature Review*. 18(3), 427–458. <https://www.jiem.org/index.php/jiem/article/view/8537>
- Theissler, A., Pérez-velázquez, J., Kettelgerdes, M., & Elger, G. (2021). Predictive maintenance enabled by machine learning: Use cases and challenges in the automotive industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 215, 107864. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107864>
- Varalakshmi, K., & Kumar, J. (2025). *Optimized predictive maintenance for streaming data in industrial IoT networks using deep reinforcement learning and ensemble techniques*. 15, 1–17. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-10268-8>
- Zonta, T., André, C., Righi, R., José, M., Lima, D., Silveira, E., & Pyng, G. (2020). Computers & Industrial Engineering Predictive maintenance in the Industry 4 . 0 : A systematic literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 150(October), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>