

**ANALISIS BIAYA KESINAMBUNGAN UNTUK PENGAMBILAN
KEPUTUSAN STRATEGI PERAWATAN MENGGUNAKAN
PENDEKATAN KECERDASAN BISNIS**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Strata-1
Program Studi Teknik Industri - Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia**



Nama : Dzihni Hanifa
No. Mahasiswa : 22522171

**PROGRAM STUDI TEKNIK INDUSTRI PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2026**

PERNYATAAN KEASLIAN

Saya mengakui bahwa tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri kecuali kutipan dan ringkasan yang seluruhnya sudah saya jelaskan sumbernya. Jika dikemudian hari ternyata terbukti pengakuan saya ini tidak benar dan melanggar peraturan yang sah maka saya bersedia ijazah yang telah saya terima ditarik kembali oleh Universitas Islam Indonesia.

Yogyakarta, 18 Juni 2026



Dzihni Hanifa
22522171

SURAT BUKTI PENELITIAN



**FAKULTAS
TEKNOLOGI INDUSTRI**

Gedung KH. Mas Mansur
Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584
T. (0274) 898444 ext. 4110, 4100
F. (0274) 895007
E. fti@uii.ac.id
W. fti.uii.ac.id

SURAT KETERANGAN PENELITIAN

Nomor : 290/Ka.lab SIMANTI/20/Lab.SIMANTI/V/2026

Assalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Dengan hormat,

Yang bertanda tangan dibawah ini, menerangkan bahwa:

Nama : Dzihni Hanifa

Nim : 22522171

Jurusan : Teknik Industri

Dosen Pembimbing : Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM

Menyatakan bahwa mahasiswa tersebut diatas telah melaksanakan penelitian tugas akhir dengan judul **"ANALISIS BIAYA KESINAMBUNGAN UNTUK PENGAMBILAN KEPUTUSAN STRATEGI PERAWATAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN KECERDASAN BISNIS"**. Mulai penelitian 16 September 2025 sampai 19 Mei 2026.

Demikian surat keterangan penelitian ini kami buat. Atas perhatiannya dan kerja samanya kami mengucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warohmatullahi Wabarokaatuh

Yogyakarta, 25 Mei 2026

Kepala Laboratorium
Sistem Manufaktur Terintegrasi

Putri Dwi Annisa, S.T., M.Sc.

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING



Yogyakarta, 4 Juni 2026

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in blue ink, which appears to be "Ridwan", is written over the name of the supervisor.

(Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.)

LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI
ANALISIS BIAYA KESINAMBUNGAN UNTUK PENGAMBILAN
KEPUTUSAN STRATEGI PERAWATAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN
KECERDASAN BISNIS

TUGAS AKHIR

Disusun Oleh :

Nama : Dzihni Hanifa

No. Mahasiswa : 22522171

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata-1 Teknik Industri Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 18 Juni 2026

Tim Penguji

Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo
S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.

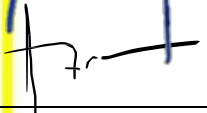
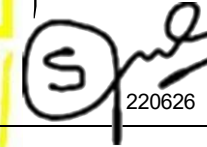
Ketua

Dr. Sri Indrawati, S.T., m.Eng.

Anggota I

Wahyudhi Sutrisno, S.T., M.M., M.T

Anggota II

Mengetahui,

Ketua Program Studi Teknik Industri Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia




Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM.

NIK. 015220101

HALAMAN PERSEMBAHAN

Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan syarat untuk meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Dengan penuh rasa hormat dan kasih sayang, karya ini saya persembahkan kepada kedua orang tua saya yang tercinta, Bapak dan Ibu, atas doa, dukungan, serta pengorbanan tanpa henti yang senantiasa mengiringi setiap langkah perjalanan saya.

MOTTO

“Sesungguhnya Allah tidak akan mengubah nasib suatu kaum sebelum mereka mengubah keadaan diri mereka sendiri.”

(Q.S. Ar-Ra’d: 11)

“Dan barang siapa bersungguh-sungguh, maka sesungguhnya kesungguhannya itu adalah untuk dirinya sendiri.”

(Q.S. Al- ‘Ankabut: 6)

“Kerja keras mengalahkan bakat ketika bakat tidak bekerja keras.”

(Tim Notke)

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, serta hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Biaya Kesenambungan Untuk Pengambilan Keputusan Strategi Perawatan Menggunakan Pendekatan Kecerdasan Bisnis” dengan baik dan tepat waktu.

Laporan ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan laporan ini terdapat berbagai tantangan dan kendala, terutama dalam memahami data teknis serta proses analisis *Business Intelligence* untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis keberlanjutan. Namun, berkat bimbingan, arahan, dan dukungan dari berbagai pihak, laporan ini dapat terselesaikan dengan baik.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Hari Purnomo, M.T., IPU, ASEAN.Eng., selaku Dekan Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia.
2. Ir. Muhammad Ridwan Andi Purnomo, S.T., M.Sc., Ph.D., IPM., selaku Ketua Program Studi Teknik Industri sekaligus Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan bimbingan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
3. Kedua orang tua dan kakak tercinta, atas doa, kasih sayang, serta dukungan moral dan material yang tiada henti.
4. Seluruh teman dan rekan seperjuangan di Program Studi Teknik Industri yang telah memberikan semangat, bantuan, dan kebersamaan selama proses penyusunan laporan ini.

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih memiliki keterbatasan dan kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan demi penyempurnaan laporan ini di masa yang akan datang. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat, baik secara akademik maupun praktis, khususnya dalam penerapan *Business Intelligence* untuk mendukung strategi pemeliharaan yang berkelanjutan di industri manufaktur.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta, 26 Mei 2026



Dzhini Hanifa

ABSTRAK

Industri manufaktur menghadapi tantangan dalam menyeimbangkan efisiensi biaya perawatan mesin dengan aspek keberlanjutan ekonomi, lingkungan, dan sosial. Selain itu, perusahaan belum memasukkan biaya downtime dan scrap dalam evaluasi *maintenance* serta masih menentukan strategi perawatan secara intuitif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan biaya keberlanjutan (*sustainability cost*) dari tiga strategi perawatan (*corrective*, *preventive*, dan *predictive*) serta memberikan rekomendasi strategi terbaik untuk setiap mesin menggunakan pendekatan *Business Intelligence* (BI). Metode penelitian bersifat kuantitatif dengan memanfaatkan data sekunder BI *Shopfloor Reliability Dataset* yang diolah melalui proses ETL (*Extract, Transform, Load*) dan divisualisasikan menggunakan Power BI. Hasil penelitian menunjukkan perbandingan total *sustainability cost* ketiga strategi adalah *corrective: predictive: preventive* = 1:1,99:2,15. Strategi *corrective* memiliki biaya terendah (7.653.855), namun keandalannya paling rendah. Berdasarkan analisis per mesin, strategi *predictive* direkomendasikan untuk Mesin 1, 2, dan 4, sedangkan strategi *preventive* direkomendasikan untuk Mesin 3 dan 5. Kesimpulannya, pemilihan strategi perawatan tidak dapat diseragamkan dan perlu disesuaikan dengan karakteristik performa masing-masing mesin. Pendekatan BI terbukti efektif dalam mengungkap *hidden cost* seperti *downtime* dan *scrap* yang selama ini tidak tercatat, sehingga mendukung pengambilan keputusan strategis yang lebih transparan dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Sustainability Cost*, Strategi Perawatan, *Business Intelligence*, *Power BI*, Pengambilan Keputusan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	ii
SURAT BUKTI PENELITIAN.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
MOTTO.....	vii
KATA PENGANTAR	viii
ABSTRAK.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Kajian Literatur.....	6
2.1.1 Objek Penelitian	6
2.1.2 Metode Maintenance	7
2.1.3 Kontribusi Penelitian.....	8
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Maintenance	10
2.2.2 Jenis Strategi Maintenance.....	11
2.2.3 Sustainability dan Sustainability Cost.....	11
2.2.4 Economi Cost	13
2.2.5 Environmental Cost.....	13
2.2.6 Sosial Cost.....	14
2.2.7 Business Intelligence (BI)	14
2.2.8 Power BI dan Proses ETL	15
2.2.9 Reliability System	17
2.2.10 Downtime	17
2.2.11 Trade-Off Analysis.....	18
BAB III METODE PENELITIAN.....	20
3.1 Objek Penelitian	20
3.2 Subjek Penelitian	20
3.3 Data Penelitian.....	20
3.4 Waktu Penelitian	20
3.5 Alur Penelitian.....	21
BAB IV PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA	27

4.1	Pengumpulan Data.....	27
4.1.1	Deskripsi Perusahaan	27
4.2	Pengolahan Data	28
4.2.1	Extract Data	28
4.2.2	Transform Data	28
4.2.3	Data Modeling.....	30
4.2.4	Perhitungan Measure (DAX)	32
4.2.5	Visualisasi Dashboard	36
BAB V	PEMBAHASAN.....	43
5.1	Analisis Kinerja per Mesin.....	43
5.1.1	Analisis Mesin 1	43
5.1.2	Analisis Mesin 2	43
5.1.3	Analisis Mesin 3.....	44
5.1.4	Analisis Mesin 4.....	45
5.1.5	Analisis Mesin 5.....	45
5.2	<i>Knowledge</i>	46
5.2.1	Hubungan Biaya dan Profit Perhitungan.....	46
5.2.2	Keterkaitan Reliability dengan Profit Perhitungan	47
5.2.3	Keunggulan Predictive sebagai Strategi Seimbang.....	47
5.2.4	Dampak Tersembunyi dari Downtime dan Scrap	48
5.2.5	Konsistensi Pola Antar Mesin	48
5.3	<i>Manajerial Insight</i>	48
5.3.1	Klasifikasi Mesin Kritis dan Non Kritis.....	49
5.3.2	Rekomendasi Strategi Berdasarkan Klasifikasi Mesin	49
5.3.3	Implementasi Bertahap dan Indikator Kinerja	50
5.3.4	Catat Biaya Downtime dan Scrap sebagai Hidden Cost	50
5.3.5	Evaluasi Frekuensi Preventive Maintenance.....	50
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	52
6.1	Kesimpulan.....	52
6.2	Saran	53
DAFTAR PUSTAKA		55
LAMPIRAN		59

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 <i>State of the Art</i>	9
Tabel 4. 1 Komponen <i>Cost</i>	32
Tabel 5. 1 Hubungan Biaya dan <i>Profit</i> Perhitungan	46
Tabel 5. 2 Keterkaitan <i>Reliability</i> dengan <i>Profit</i> Perhitungan	47
Tabel 5. 3 Keunggulan <i>Predictive</i> sebagai Strategi Seimbang	47
Tabel 5. 4 Dampak Tersembunyi dari <i>Downtime</i> dan <i>Scrap</i>	48
Tabel 5. 5 Konsistensi Pola Antar Mesin	48
Tabel 5. 6 Klasifikasi Mesin Kritis dan Non Kritis	49
Tabel 5. 7 Rekomendasi Strategi Berdasarkan Klasifikasi Mesin	49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Tampilan <i>Software Power BI</i>	16
Gambar 4. 1 <i>Extract Data</i>	28
Gambar 4. 2 <i>Data Cleaning</i>	29
Gambar 4. 3 Sebelum Normalisasi	30
Gambar 4. 4 Setelah Normalisasi	30
Gambar 4. 5 <i>Data Modelling</i>	31
Gambar 4. 6 <i>DAX Economic Cost</i>	33
Gambar 4. 7 <i>DAX Environmental Cost</i>	33
Gambar 4. 8 <i>DAX Social Cost</i>	34
Gambar 4. 9 <i>DAX TradeOff-Index</i>	35
Gambar 4. 10 <i>DAX Avg Reliability</i>	35
Gambar 4. 11 <i>DAX Profit Perhitungan</i>	36
Gambar 4. 12 <i>Slicer Machine ID</i>	37
Gambar 4. 13 <i>Slicer Policy</i>	37
Gambar 4. 14 <i>Card Biaya</i>	38
Gambar 4. 15 <i>Card Kinerja</i>	39
Gambar 4. 16 <i>Clustered Bar Chart Perbandingan Profit</i>	40
Gambar 4. 17 <i>Donut Chart Frekuensi Maintenance</i>	41
Gambar 4. 18 <i>Table</i>	42
Gambar 5. 1 Analisis Mesin 1	43
Gambar 5. 2 Analisis Mesin 2	44
Gambar 5. 3 Analisis Mesin 3	44
Gambar 5. 4 Analisis Mesin 4	45
Gambar 5. 5 Analisis Mesin 5	46

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri manufaktur pada saat ini menuntut adanya sistem operasional yang tidak hanya menguntungkan secara ekonomi, tetapi juga memperhatikan keberlanjutan (*sustainability*) mulai dari aspek lingkungan dan juga sosial. Faktor penting yang berpengaruh pada keberlanjutan operasi industri adalah sistem pemeliharaan mesin (*maintenance*) yang efektif dan efisien. Mesin yang selalu beroperasi dalam jangka panjang akan berisiko pada penurunan performa dan kerusakan yang dapat menyebabkan penurunan produktivitas, peningkatan biaya perawatan, dan pemborosan sumber daya energi serta bahan kimia yang digunakan. Oleh sebab itu, penerapan strategi *maintenance* yang tepat menjadi faktor penting dalam keberlanjutan proses produksi (Giliyana, 2025).

Keberlanjutan (*sustainability*) memfokuskan keseimbangan antara aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam kegiatan industri. Dalam sistem *maintenance*, setiap strategi perawatan memiliki dampak yang berbeda terhadap biaya, penggunaan energi, emisi, limbah, serta keselamatan kerja (Nurbiati et al., 2023). Oleh karena itu, evaluasi strategi *maintenance* perlu mempertimbangkan ketiga aspek tersebut secara bersamaan.

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian yang berhubungan dengan sistem *maintenance* masih berfokus pada efisiensi biaya ekonomi dan kendala sistem, tanpa memperhatikan biaya keberlanjutan (*sustainability cost*) yang mencakup aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dalam praktiknya, setiap strategi memiliki keterlibatan dalam keberlanjutan yang berbeda. Misalnya, *preventive maintenance* yang terlalu sering dapat meningkatkan penggunaan bahan kimia dan limbah industri, sedangkan *corrective maintenance* dapat menimbulkan pemborosan energi dan material akibat kerusakan komponen berat (Ibrahim et al., 2019).

Pada perusahaan yang menjadi objek penelitian, merupakan perusahaan *controller electronic* dimana untuk proses produksi didukung oleh lima mesin utama yang memiliki karakteristik performa yang berbeda. Namun, evaluasi strategi *maintenance* yang diterapkan masih berfokus pada biaya perawatan langsung dan belum

mempertimbangkan biaya lain yang timbul akibat aktivitas *maintenance*. Selain itu, pemilihan strategi perawatan masih dilakukan berdasarkan pertimbangan intuitif dan pengalaman sehingga belum didukung oleh analisis data yang lengkap. Kondisi tersebut menyebabkan perusahaan sulit mengetahui strategi *maintenance* yang paling sesuai untuk setiap mesin serta dampaknya terhadap aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dalam industri, pemilihan strategi *maintenance* masih sering dilakukan berdasarkan pengalaman dan pertimbangan pengambil keputusan. Pemilihan tersebut cenderung bersifat subjektif karena belum didukung oleh analisis data yang lengkap, sehingga berpotensi menghasilkan keputusan yang kurang optimal. Seiring perkembangan teknologi dan ketersediaan data operasional, pengambilan keputusan berbasis data mulai banyak diterapkan untuk mendukung penentuan strategi *maintenance* yang lebih objektif dan terukur (Faghihinia et al., 2012).

Secara umum, terdapat tiga strategi utama dalam sistem pemeliharaan mesin, yaitu *corrective maintenance*, *preventive maintenance*, dan *predictive maintenance*. Pada strategi tersebut, *corrective maintenance* dilakukan ketika mesin akan diperbaiki setelah diketahui telah rusak. Pada strategi ini memiliki frekuensi perawatan yang rendah, namun biaya perbaikan mungkin saja lebih tinggi dan memiliki risiko *downtime* yang lebih panjang karena kerusakan biasanya sudah parah sebelum dilakukan tindakan perbaikan. Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* dilakukan secara terjadwal, misalnya setiap bulan, dengan tujuan mencegah terjadinya kerusakan yang mendadak. Strategi ini efektif dalam menjaga kendala mesin, tetapi memiliki frekuensi perawatan yang lebih tinggi dan penggunaan bahan kimia lebih banyak sehingga dapat berdampak pada tingginya biaya dan potensi pencemaran lingkungan akibat limbah dari bahan kimia. Sementara itu, *predictive maintenance* merupakan strategi dimana *maintenance* dilakukan dengan cara didekatkan, dimana tidak terlalu sering untuk frekuensinya namun juga tidak dilakukan setelah rusak seperti dilakukan saat satu minggu sebelum mesin rusak. Pada strategi ini penggunaan bahan tidak sebanyak *corrective* karena belum rusak tetapi mungkin lebih banyak dari *preventive maintenance* (Elmardi et al., 2025).

Pada saat ini, perusahaan belum memasukkan biaya *downtime* dan *scrap* ke dalam perhitungan biaya perawatan. Sedangkan, menurut Thomas et al., (2021), *downtime*

berpengaruh langsung terhadap biaya perusahaan karena *unplanned downtime* menimbulkan kerugian finansial yang signifikan, termasuk *downtime cost* yang dimana menunjukkan bahwa semakin tinggi *downtime*, semakin besar biaya yang harus ditanggung perusahaan yang dimana pada penelitiannya perusahaan yang beralih dari *corrective maintenance* ke *predictive maintenance* dapat mengurangi *unplanned downtime* hingga 52,7% dan *defects* hingga 78,5%. Selain itu, Johnston et al., (2024) Menjelaskan bahwa *machine downtime* menyebabkan hilangnya waktu dan meningkatkan pengeluaran perusahaan.

Selanjutnya, Dantan et al., (2022) menjelaskan bahwa *scrap* berpengaruh terhadap *cost* perusahaan karena biaya produk meliputi *scrap cost (internal failure)* sebagai salah satu komponen utama. Dalam model biaya yang dibahas, total *cost* produk terdiri dari *manufacturing cost*, *inspection cost*, *scrap cost*, dan *external failure cost*. Dengan demikian, semakin tinggi *scrap* yang terjadi dalam proses produksi, semakin besar biaya yang harus ditanggung perusahaan. Permasalahan yang dihadapi perusahaan melibatkan berbagai data operasional, seperti *downtime*, biaya *maintenance*, konsumsi energi, emisi karbon, dan profit yang saling berkaitan. Pengolahan data tersebut secara manual akan menyulitkan perusahaan dalam mengidentifikasi pola dan menentukan strategi *maintenance* yang paling sesuai. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang mampu mengintegrasikan dan mengolah data operasional tersebut menjadi informasi yang dapat mendukung pengambilan keputusan.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, pendekatan *Business Intelligence (BI)* dapat digunakan dalam pengambilan keputusan. *Business Intelligence* memungkinkan pengolahan data mentah dari *shopfloor* menjadi informasi yang kemudian dapat dikonversi menjadi *knowledge* untuk mendukung keputusan strategis. Melalui proses *Extract, Transform, Load (ETL)* dan visualisasi data interaktif menggunakan *Business Intelligence*, manajemen dapat mengidentifikasi pola biaya, konsumsi energi, emisi karbon, serta frekuensi kerusakan pada setiap strategi *maintenance*. Dengan demikian, *Business Intelligence* berfungsi tidak hanya sebagai alat untuk analisis, tetapi juga dapat digunakan sebagai sarana pembelajaran pada organisasi dalam menentukan strategi perawatan mesin yang paling sesuai dan berkelanjutan (Picozzi et al., 2024).

Selain menganalisis dan membandingkan *sustainability cost* dari tiga strategi perawatan mesin, yaitu *corrective*, *preventive*, dan *predictive maintenance*, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan strategi perawatan yang paling sesuai untuk setiap mesin berdasarkan total biaya yang dihasilkan dan juga hasil dari visualisasi. Hasil analisis ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi strategi pemeliharaan yang paling efisien, berkelanjutan, serta sesuai dengan karakteristik performa masing-masing mesin.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut merupakan rumusan masalah pada penelitian yang dilakukan berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan:

1. Bagaimana perbandingan *sustainability cost* dari tiga strategi *maintenance* (*corrective*, *preventive*, *predictive*)?
2. Strategi *maintenance* manakah yang memberikan *sustainability cost* yang sesuai serta efisiensi dari sisi ekonomi, lingkungan, dan sosial dengan mempertimbangkan performa operasional pada setiap mesin?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis dan membandingkan *sustainability cost* berdasarkan tiga strategi *maintenance* berdasarkan data *shopfloor reliability*, serta mempertimbangkan indikator operasional lainnya untuk mendukung pengambilan keputusan.
2. Memberikan rekomendasi strategi *maintenance* yang paling sesuai berdasarkan hasil visualisasi dan analisis data dengan mempertimbangkan *trade-off* antara aspek ekonomi, lingkungan, sosial, dan performa operasional pada setiap mesin.

1.4 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat penelitian bagi akademik dan perusahaan:

1. Memperbanyak literatur mengenai penerapan *Business Intelligence* pada sistem *maintenance* serta hubungannya dengan konsep *sustainability cost* dalam industri manufaktur.

2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan bagi perusahaan dalam menentukan strategi pemeliharaan mesin yang paling efisien dan berkelanjutan, sehingga mampu menekan biaya perawatan dan dampak lingkungan secara bersamaan.
3. Menghasilkan *dashboard* interaktif menggunakan *Power BI* yang dapat digunakan oleh manajemen untuk melakukan analisis berkelanjutan terhadap performa *maintenance*.

1.5 Batasan Penelitian

Berikut merupakan batasan penelitian pada penelitian yang dilakukan:

1. Penelitian ini hanya menggunakan data sekunder dari *dataset shopfloor reliability* yang diperoleh dari dosen pembimbing.
2. Analisis dilakukan terhadap tiga strategi *maintenance: corrective, preventive*, dan *predictive*.
3. Aspek keberlanjutan yang dikaji terbatas pada biaya ekonomi, dampak lingkungan dan aspek sosial berupa paparan pekerja.
4. Penelitian berfokus pada analisis dan visualisasi data *maintenance* menggunakan pendekatan *Business Intelligence* untuk mendukung pengambilan keputusan strategi perawatan.
5. *Manajerial insight* dalam penelitian ini hanya terbatas pada pemberian rekomendasi perbaikan dan tidak mencakup tahap implementasi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Literatur

2.1.1 Objek Penelitian

Objek penelitian pada 20 penelitian yang telah dikaji berfokus pada industri manufaktur. Misalnya pada penelitian Dinh et al., (2025) mengambil objek perusahaan manufaktur yang berfokus pada mesin *injection molding* yang digunakan di sektor otomotif. Lalu, Karuppiah et al., (2021) mengambil objek pada industri manufaktur dalam pembuatan *leather garments*. Widya et al., (2023) meneliti objek berupa pengoperasian pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yaitu perawatan mesin cwp. Oleh Mallioris et al., (2024) perusahaan bergerak pada bidang industri minyak dan gas dengan fokus pada manajemen pemeliharaan seperti *centrifugal compressor* dan *gas turbines*.

Penelitian Lu et al., (2021), berfokus pada sistem manufaktur dengan komponen mesin (*tooling components*). Hosseinzadeh et al., (2023) meneliti objek pada industri dengan melakukan deteksi kegagalan mesin. Lanjut pada penelitian Arjomandi et al., (2021), objek penelitian yang digunakan adalah unit distilasi minyak mentah (*crude oil distillation unit*) di kilang minyak. Penelitian oleh Tito Lukito et al., (2025) meneliti objek berupa industri manufaktur secara umum dan juga pada industri otomotif dan jasa. Ucar et al., (2024) meneliti objek pada industri manufaktur berupa peralatan listrik dan elektronik dan juga fokus pada pengembangan peralatan dan mesin tertentu seperti sistem rem, komponen pesawat, dan perangkat elektronik yang mengalami keausan.

Selanjutnya, penelitian Wigger et al., (2025) berfokus pada industri yang bergerak dibidang pengelolaan energi seperti peningkatan efisiensi energi, keberlanjutan dan penggunaan teknologi. Penelitian Harianja et al., (2025) berfokus pada objek di bidang produksi barang dan jasa melalui proses pengolahan bahan mentah menjadi produk jadi atau setengah jadi. Burhan et al., (2024) meneliti industri manufaktur dengan fokus pada *bearing* mesin kertas di PT Integral Industrial Indonesia yaitu memprediksi temperatur *bearing*. Selanjutnya, oleh Sitinjak et al., (2023) objek penelitian yang diambil adalah berfokus pada *excavator* di PT Toba Pulp Lestari, Tbk. Oleh Guna et al., (2025), objek penelitian yang diambil adalah mesin *milling* di CV Prima Lotus Jakarta. Sedangkan

Aziza et al., (2025) berfokus pada objek penelitian berupa mesin produksi (MCC, Boiler, dan BFS) di PT XYZ. Ali et al., (2025), meneliti objek pada manufaktur bidang energi terbarukan yang khususnya fokus pada pemeliharaan sistem tenaga surya. Objek penelitian pada industri manufaktur oleh Rizky et al., (2021) mengambil objek penelitian berupa mesin *Syntric* TKG di CV XYZ.

Penelitian Avakh et al., (2020) berfokus pada perusahaan otomotif *Iran Khodro Company*, yaitu perusahaan mobil terbesar di Iran. Harianja et al., (2025) mengambil objek industri dengan meneliti industri jasa kelistrikan, khususnya distribusi tenaga listrik di wilayah rawan gangguan yang dikelola PLN (Perusahaan Listrik Negara) atau entitas penyedia layanan distribusi energi listrik yang lainnya di Indonesia. Terakhir, oleh Benhanifia et al., (2025) mengambil objek manufaktur meliputi perusahaan besar internasional seperti IBM, ABB, Siemens, Rockwell Automation, Bosch Rexroth, dan GE.

2.1.2 *Metode Maintenance*

Metode *maintenance* pada jurnal yang telah dikaji memiliki banyak variasi. Pertama, pada klasifikasi metode *Business Intelligence/ETL (Power BI, Python ETL, Data Analytics)*, penelitian oleh Lu et al., (2021) menggunakan metode *Bayesian Updating* dalam kebijakan *dynamic predictive maintenance* berbasis data untuk sistem manufaktur, yang dimana metode ini bertujuan untuk memprediksi penurunan kualitas produk dan keandalan mesin. Selanjutnya, Wigger et al., (2025) mengintegrasikan AI ke dalam manajemen energi dengan mengembangkan algoritma evaluasi berdasarkan kerangka kerja CRISP-DM. Begitupun dengan penelitian oleh Mallioris et al., (2024) juga mengintegrasikan *python* dan AI sebagai pengambilan keputusan. Sementara penelitian Ali et al., (2025) menggunakan model berbasis Regresi Usia Layanan untuk memodelkan penurunan performa peralatan, yang merupakan teknik pemodelan data untuk optimasi berbasis keandalan. Penelitian Tito Lukito et al., (2025) menggunakan metode integrasi teknologi Industry 4.0 seperti IoT dan *big data analytics* untuk *monitoring real-time* dan analisis data. Terakhir oleh, Benhanifia et al., (2025) menggunakan *python* untuk menganalisis data sensor secara *real-time* dan mengidentifikasi pola yang menunjukkan potensi kegagalan peralatan.

Klasifikasi kedua merupakan metode *Reliability & Maintenance Optimization* (Markov, RCM, *preventive/predictive/corrective*, monte carlo dsb.). Pada penelitian Dinh et al., (2025) mengusulkan penggunaan model adaptif inspeksi non-periodik yang mengombinasikan inspeksi sempurna dan tidak sempurna untuk mengoptimalkan biaya dan interval inspeksi. Metode ini diterapkan pada kasus mesin cetak injeksi sebagai strategi *Predictive Maintenance*. Selanjutnya, Ali et al., (2025) memberikan saran strategi *preventive maintenance* dan penggantian yang berkelanjutan untuk sistem tenaga fotovoltaik (PV). Metode *Markov Chain* digunakan oleh dua penelitian yaitu, Widya et al., (2023) untuk merencanakan jadwal perawatan mesin *Circulation Water Pump* (CWP) dengan tujuan meminimumkan biaya perawatan dengan mengusulkan perawatan korektif pada status kerusakan sedang dan berat. Metode serupa juga digunakan oleh Aziza et al., (2025) untuk memilih strategi pemeliharaan mesin MMC, *Boiler*, dan BFS di perusahaan beton pracetak, dengan memoelkan transisi status kegagalan mesin dan menghitung ekspektasi biaya berdasarkan berbagai strategi *preventive maintenance*.

Selanjutnya, pendekatan *Reliability Centered Maintenance* (RCM) juga banyak dipilih sebagai metode seperti penelitian oleh Dhamar Jati et al., (2024) yang menggunakan RCM dan FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) untuk merencanakan *Preventive Maintenance* pada mesin CWSM (*Cathodewashing Striping Machine*). Selain itu, Rizky et al., (2021) menganalisis kebijakan perawatan mesin secara *corrective* dan *preventive* dengan metode RCM. Penelitian oleh Harianja et al., (2025) membahas pengaruh penerapan *Predictive Maintenance* terhadap kinerja sistem distribusi listrik. Terakhir, penelitian oleh Guna et al., (2025) menganalisis implementasi strategi *preventive* dan *corrective maintenance* pada mesin *milling* di CV Prima Lotus Jakarta. Sebagian besar, pada 20 literatur mengkaji strategi maintenance antara lain, *corrective*, *preventive* dan juga *predictive maintenance*.

2.1.3 Kontribusi Penelitian

Berdasarkan kajian terhadap 20 penelitian terdahulu, diketahui bahwa sebagian besar penelitian menitikberatkan pada penerapan metode *Reliability & Maintenance Optimization* serta *Machine Learning/AI* untuk meningkatkan efektivitas pemeliharaan mesin dan meminimalkan biaya kerusakan. Meskipun demikian, penelitian-penelitian

tersebut masih terbatas pada analisis teknis dan ekonomis dari aktivitas pemeliharaan, tanpa mengintegrasikan aspek keberlanjutan (*sustainability*). Selain itu, belum banyak kajian yang memanfaatkan *Business Intelligence* (BI), khususnya *Power BI*, sebagai alat bantu visualisasi dan pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*) dalam konteks pemeliharaan.

Penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Lu et al., (2021) dan Dinh et al., (2025), hanya berfokus pada perbandingan efektivitas antara pemeliharaan preventif, prediktif, dan korektif. Adapun penelitian Harianja et al., (2025) mulai menyentuh aspek efisiensi biaya, tetapi belum menjadikannya sebagai komponen utama dalam evaluasi keberlanjutan sistem pemeliharaan.

Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi baru melalui integrasi analisis biaya keberlanjutan (*sustainability cost*) ke dalam evaluasi strategi pemeliharaan. Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya menilai efektivitas strategi prediktif, preventif, dan korektif dari segi teknis dan ekonomis, tetapi juga mempertimbangkan aspek lingkungan dan sosial, seperti emisi karbon, limbah, serta konsumsi energi. Selain itu, penelitian ini memanfaatkan *Power BI* sebagai *platform Business Intelligence* untuk menampilkan hasil analisis dalam bentuk visualisasi interaktif yang mendukung proses pengambilan keputusan di tingkat manajerial. Berikut merupakan Tabel 2.1 yang menunjukkan *State of the Art* penelitian.

Tabel 2. 1 *State of the Art*

Penulis	Objek (Industri)	Metode		
	Manufaktur	A	B	C
(Dinh et al., 2025)	√		√	
(Karuppiah et al., 2021)	√		√	
(Mallioris et al., 2024)	√	√	√	
(Lu et al., 2021)	√	√		
(Hosseinzadeh et al., 2023)	√		√	
(Wigger et al., 2025)	√	√		
(Ali et al., 2025)	√	√	√	
(Arjomandi et al., 2021)	√		√	
(Widya et al., 2023)	√		√	
(Harianja et al., 2025)	√		√	

Penulis	Objek (Industri)	Metode		
	Manufaktur	A	B	C
(Tito Lukito et al., 2025)	√		√	
(Dhamar Jati et al., 2024)	√		√	
(Benhanifia et al., 2025)	√	√	√	
(Ucar et al., 2024)	√	√	√	
(Avakh Darestania et al., 2020)	√		√	
(Burhan et al., 2024)	√		√	
(Sitinjak et al., 2023)	√		√	
(Guna et al., 2025)	√		√	
(Aziza et al., 2025)	√		√	
(Rizky et al., 2021)	√		√	
Usulan	√	√	√	√

Keterangan:

A. *Business Intelligence*

B. *Reliability & Maintenance Policy*

C. *Cost & Sustainability Analysis*

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Maintenance

Maintenance atau pemeliharaan peralatan merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk menjaga agar peralatan tetap berfungsi dengan baik dan sesuai standar yang telah ditetapkan. Tujuan utama dari *maintenance* adalah untuk mencegah kerusakan yang sering terjadi sehingga dapat mengganggu produktivitas dan efisiensi operasional. Pada pelaksanaannya, *maintenance* memperhatikan aspek keandalan, kemudahan perawatan, dan ketersediaan peralatan, yang diukur menggunakan parameter seperti *Mean Time Between Failure* (MTBF) dan *Mean Time to Repair* (MTTR) (Permatasari et al., 2025).

Pemeliharaan merupakan kegiatan merawat mesin, peralatan, serta fasilitas lain melalui perbaikan dan penggantian yang dibutuhkan supaya proses produksi bisa berjalan optimal. Pemeliharaan juga melibatkan segala tindakan yang ditujukan untuk menjaga kondisi fasilitas dan peralatan tetap produktif, dan melakukan perbaikan agar semuanya bisa bekerja dengan seharusnya. Menurut *British Standards Institution*, pemeliharaan

adalah kombinasi dari semua aktivitas teknis dan administrative yang diperlukan untuk menjaga atau mengembalikan peralatan dan aset fisik ke kondisi operasi yang diinginkan (Nauli Siregar et al., 2022).

2.2.2 Jenis Strategi *Maintenance*

Terdapat beberapa strategi utama dalam kegiatan *maintenance*, yaitu *corrective*, *preventive* dan *predictive maintenance* dengan pengertian sebagai berikut.

1. *Corrective Maintenance*

Corrective maintenance merupakan strategi yang dilakukan ketika peralatan mengalami kerusakan dan baru diperbaiki setelah terjadi kegagalan. Frekuensi perawatan rendah, namun biaya perbaikan dan risiko *downtime* cenderung tinggi karena peralatan sudah dalam kondisi rusak sebelum diperbaiki (Rizky et al., 2021).

2. *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance adalah kegiatan yang dilakukan oleh suatu sistem untuk menjamin bahwa suatu barang akan tetap memenuhi fungsi yang dirancang. Kegiatan ini meliputi pemeliharaan, perbaikan, peningkatan, pengujian, dan inspeksi yang dilakukan secara tepat waktu dan tepat agar suatu produksi dapat menjaga integritas mesinnya (Ramadhan et al., 2024)

3. *Predictive Maintenance*

Predictive maintenance merupakan metode pemeliharaan yang memanfaatkan data dari sensor dan analisis lanjutan untuk memprediksi potensi kerusakan pada peralatan sebelum benar-benar terjadi. Tujuan dari strategi ini untuk menjaga agar peralatan tetap berfungsi optimal, menekan biaya perbaikan serta mencegah kerusakan mendadak, sehingga efisiensi dan produktivitas operasional dapat meningkat (Burhan et al., 2024).

2.2.3 *Sustainability* dan *Sustainability Cost*

Menurut Nurbiati et al., (2023) *sustainability* merupakan konsep pembangunan yang berkelanjutan dengan memperhatikan aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi agar sumber daya alam dapat dimanfaatkan secara bijaksana dan tidak cepat habis, serta memastikan kesejahteraan generasi sekarang dan mendatang.

Sedangkan *sustainability cost* adalah biaya yang terkait dengan upaya perusahaan atau organisasi untuk mencapai keberlanjutan lingkungan, sosial, dan ekonomi. Biaya ini mencakup pengeluaran yang diperlukan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, meningkatkan efisiensi sumber daya, serta memenuhi standar keberlanjutan yang ditetapkan dalam kerangka pembangunan berkelanjutan. Konsep ini menekankan pentingnya integrasi aspek keberlanjutan dalam pengelolaan biaya agar perusahaan dapat berkontribusi terhadap pembangunan yang berkelanjutan secara jangka panjang (Afifah et al., 2021).

Pengelompokan komponen *sustainability cost* ke dalam aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial didasarkan pada *konsep Triple Bottom Line* (TBL). Konsep tersebut menjelaskan bahwa keberlanjutan perusahaan tidak hanya diukur dari kemampuan menghasilkan keuntungan ekonomi, tetapi juga dari upaya dalam menjaga kelestarian lingkungan serta memperhatikan kesejahteraan masyarakat dan tenaga kerja. Oleh karena itu, ketiga dimensi tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi dampak penerapan strategi perawatan secara menyeluruh.

Pengelompokan tersebut sesuai dengan pendekatan yang dikembangkan oleh Swarnakar et al., (2022) dalam penilaian keberlanjutan pada proses manufaktur. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa evaluasi keberlanjutan perlu mempertimbangkan seluruh dimensi *Triple Bottom Line* secara terintegrasi. Dimensi ekonomi mencakup berbagai biaya yang berkaitan dengan aktivitas operasional perusahaan, seperti biaya material, peralatan, dan operasional. Dimensi lingkungan mencakup biaya yang berkaitan dengan penggunaan sumber daya, emisi, dan pengelolaan limbah. Sementara itu, dimensi sosial mencakup biaya yang berhubungan dengan keselamatan, kesehatan, dan kesejahteraan tenaga kerja.

Berdasarkan konsep *Triple Bottom Line* (TBL), *sustainability cost* pada penelitian ini dihitung dengan mengintegrasikan tiga dimensi keberlanjutan, yaitu ekonomi, lingkungan, dan sosial. Berikut merupakan persamaan *total sustainability cost* yang digunakan.

$$\text{Total Sustainability Cost} = \text{Economic Cost} + \text{Environmental Cost} + \text{Social Cost}$$

2.2.4 *Economi Cost*

Economic cost merupakan biaya yang berkaitan dengan penggunaan sumber daya dan aktivitas operasional yang memengaruhi kinerja ekonomi perusahaan. Pada keberlanjutan manufaktur, aspek ekonomi digunakan untuk menilai efisiensi proses produksi serta kemampuan perusahaan dalam mengelola biaya operasional. Lucato et al., (2018) menjelaskan bahwa dimensi ekonomi dalam sistem manufaktur berkelanjutan dapat ditunjukkan melalui indikator seperti *cycle time*, *setup time*, dan *labour cost*. Ketiga indikator tersebut menunjukkan bahwa aspek ekonomi berfokus pada penggunaan sumber daya, produktivitas proses, dan biaya yang timbul selama kegiatan operasional.

Oleh karena itu, komponen *maintenance cost*, *material cost*, *downtime cost*, *scrap cost*, *rework cost*, *overtime cost*, dan *disposal cost* dalam penelitian ini dikategorikan sebagai *economic cost* karena berdasarkan karakteristik dampaknya terhadap kinerja finansial perusahaan, seluruh komponen tersebut berhubungan langsung dengan aktivitas operasional dan berpengaruh terhadap efisiensi serta profitabilitas perusahaan.

Berdasarkan dimensi ekonomi dalam *sustainability assessment*, *economic cost* pada penelitian ini dihitung dengan menjumlahkan seluruh komponen biaya yang berdampak langsung terhadap kinerja finansial perusahaan. Berikut merupakan persamaan *Economic Cost* yang digunakan.

$$Economic\ Cost = \sum \text{Komponen Biaya Ekonomi}$$

Persamaan tersebut disusun berdasarkan pengelompokan komponen biaya pada dimensi ekonomi yang berkaitan dengan aktivitas operasional, penggunaan sumber daya, dan profitabilitas perusahaan (Lucato et al., 2018).

2.2.5 *Environmental Cost*

Environmental cost merupakan biaya yang timbul akibat dampak lingkungan yang dihasilkan selama aktivitas operasional perusahaan. Dalam penilaian keberlanjutan manufaktur, aspek lingkungan direpresentasikan melalui indikator konsumsi energi, efisiensi energi, pengelolaan limbah, emisi, serta intensitas pelepasan gas rumah kaca (*greenhouse gas emission intensity*). Indikator-indikator tersebut menunjukkan bahwa aspek lingkungan berfokus pada upaya meminimalkan penggunaan energi dan

mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh proses produksi (Kaldas et al., 2020). Oleh karena itu, *energy cost* dan *carbon cost* dalam penelitian ini dikategorikan sebagai *environmental cost* karena keduanya berkaitan langsung dengan konsumsi energi dan emisi karbon yang dihasilkan selama kegiatan operasional maupun aktivitas perawatan mesin. Berikut merupakan persamaan *Enviromental Cost* yang digunakan.

$$Enviromental Cost = \sum \text{Komponen Biaya Lingkungan}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa *environmental cost* diperoleh dari akumulasi seluruh komponen biaya yang berkaitan dengan dampak lingkungan perusahaan (Kaldas et al., 2020).

2.2.6 *Sosial Cost*

Social cost merupakan biaya yang berkaitan dengan dampak aktivitas perusahaan terhadap tenaga kerja dan masyarakat. Dalam penilaian keberlanjutan manufaktur, aspek sosial meliputi indikator kesehatan dan keselamatan kerja (*health and safety*), pelatihan karyawan, keberagaman tenaga kerja, risiko kesehatan dan keselamatan bagi masyarakat, serta keterlibatan pemangku kepentingan. Indikator-indikator tersebut menunjukkan bahwa aspek sosial berfokus pada perlindungan tenaga kerja dan peningkatan kesejahteraan individu yang terlibat dalam aktivitas perusahaan (Kaldas et al., 2020). Oleh karena itu, *safety cost* dan *social health cost* dalam penelitian ini dikelompokkan sebagai *social cost* karena keduanya berkaitan langsung dengan aspek keselamatan, kesehatan, dan kesejahteraan tenaga kerja. Berikut merupakan persamaan *Social Cost* yang digunakan.

$$Social Cost = \sum \text{Komponen Biaya Sosial}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa *social cost* diperoleh dari akumulasi seluruh komponen biaya yang berkaitan dengan aspek keselamatan, kesehatan, dan kesejahteraan tenaga kerja (Kaldas et al., 2020).

2.2.7 *Business Intelligence (BI)*

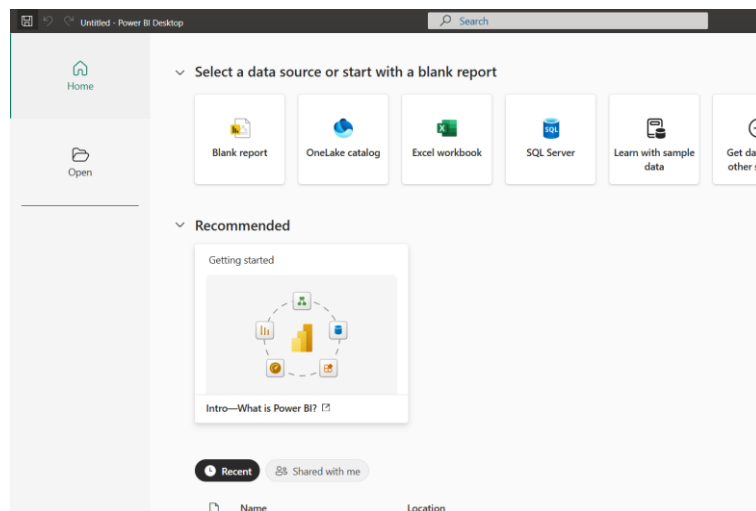
Business Intelligence (BI) adalah serangkaian teknologi, aplikasi, dan praktik terbaik yang digunakan untuk mengumpulkan, mengintegrasikan, menganalisis, dan menyajikan

data bisnis guna mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti. Sistem BI memungkinkan organisasi mengubah data mentah menjadi wawasan yang bermakna dan dapat ditindaklanjuti, sehingga memfasilitasi proses pengambilan keputusan yang lebih cepat, akurat, dan strategis (Nugroho et al., 2025).

Sedangkan menurut Prasetya et al., (2020) *Business Intelligence* adalah proses pengambilan data operasional dari suatu organisasi atau perusahaan, kemudian mengintegrasikannya ke dalam data *warehouse* untuk dimanfaatkan dalam berbagai kebutuhan organisasi, seperti pengambilan keputusan dan penyusunan strategi. Melalui *Business Intelligence*, data dapat diolah menjadi informasi yang relevan dan mudah dipahami, sehingga membantu dalam menemukan solusi atas permasalahan serta menentukan langkah penyelesaiannya.

2.2.8 Power BI dan Proses ETL

Power BI adalah perangkat *Business Intelligence* (BI) buatan *Microsoft* yang berfungsi untuk mengolah, menganalisis, serta menampilkan data dalam bentuk visual yang interaktif dan dinamis. Melalui *Power BI*, pengguna dapat mengintegrasikan berbagai sumber data, menyusun laporan, dan membuat *dashboard* informatif yang membantu dalam proses pengambilan keputusan bisnis secara lebih efektif. Dalam konteks penerapan BI, *Power BI* berfungsi sebagai *platform* yang memudahkan perusahaan dalam mengelola data penjualan, memvisualisasikan hasil analisis, serta meningkatkan efisiensi dan keunggulan kompetitif perusahaan (Dian Dameria et al., 2024). Berikut merupakan tampilan pada *software Power BI* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Tampilan *Software Power BI*

Pada *Power BI* terdapat beberapa proses sebelum informasi dapat dijadikan sebagai *knowledge*, yaitu dengan proses ETL (*Extract-Transfrom-Load*). ETL adalah proses utama dalam sistem data *warehouse* yang digunakan untuk mengintegrasikan data dari berbagai sumber. Proses ini meliputi tiga tahap: pertama, data diekstraksi dari sumbernya; kedua, data tersebut diubah sesuai dengan aturan bisnis dan kebutuhan analisis; ketiga, data yang telah diubah dimuat ke dalam struktur data target seperti data *warehouse*. ETL sangat penting karena memungkinkan data operasional yang beragam untuk disusun menjadi informasi yang konsisten dan akurat, mendukung pengambilan keputusan bisnis yang tepat (Putu et al., 2021).

Menurut Andriansyah et al., (2022) proses ETL terdiri dari tiga tahapan utama:

1. *Extract* (Ekstraksi): Mengambil data dari sumber data yang heterogen, seperti *database*, *file flat*, XML, dan lain-lain. Tahap ini bertujuan memahami dan membaca data dari sumbernya sebelum diproses lebih lanjut.
2. *Transform* (Transformasi): Melakukan pembersihan data (misalnya koreksi ejaan, penghapusan duplikasi), penyesuaian format, dan penggabungan data dari berbagai sumber agar sesuai dengan kebutuhan analisis dan model data yang diinginkan

3. *Load* (Memuat): Menyimpan data yang sudah diproses ke dalam target data *warehouse* atau model dimensional, biasanya dalam bentuk tabel yang terstruktur dan siap digunakan untuk analisis atau pelaporan.

2.2.9 *Reliability System*

Reliability atau keandalan merupakan kemampuan suatu sistem untuk menjalankan fungsi yang telah ditetapkan tanpa mengalami kegagalan selama periode waktu tertentu dan pada kondisi operasi yang telah ditentukan. Pada industri manufaktur, *reliability* menjadi salah satu indikator penting karena berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menjaga kelancaran proses produksi, kualitas produk yang dihasilkan, serta efisiensi penggunaan sumber daya. Tingkat keandalan sistem memiliki pengaruh terhadap performa operasional manufaktur, termasuk efisiensi produksi, kualitas produk, dan konsumsi energi selama proses operasi (Friederich et al., 2024).

Selain berperan dalam aspek teknis, *reliability* juga memiliki kontribusi terhadap pencapaian keberlanjutan perusahaan. Breznická et al., (2023) menyatakan bahwa keandalan sistem merupakan faktor penting dalam mendukung pengambilan keputusan pada industri modern karena berkaitan dengan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. Tingkat keandalan yang baik dapat membantu menekan biaya operasional akibat kegagalan sistem, meningkatkan keselamatan kerja, serta mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh gangguan atau kerusakan peralatan.

Dalam penelitian ini, *reliability* digunakan sebagai indikator untuk mengevaluasi kinerja berbagai strategi perawatan, yaitu *Predictive Maintenance*, *Preventive Maintenance*, dan *Corrective Maintenance*. Nilai *reliability* digunakan untuk membandingkan kemampuan masing-masing strategi dalam menjaga kinerja operasional mesin serta sebagai dasar dalam menilai pengaruhnya terhadap *sustainability cost* perusahaan.

2.2.10 *Downtime*

Downtime merupakan kondisi ketika mesin atau peralatan tidak dapat beroperasi sehingga proses produksi terganggu atau terhenti dalam periode tertentu. *Downtime* umumnya disebabkan oleh kegagalan komponen atau kerusakan peralatan yang berdampak pada penurunan produktivitas, hilangnya *output* produksi, serta meningkatnya biaya

operasional perusahaan. Oleh karena itu, *downtime* sering digunakan sebagai dasar dalam menentukan tingkat kekritisan mesin karena mencerminkan besarnya konsekuensi operasional dan ekonomi yang ditimbulkan akibat kegagalan mesin. Semakin tinggi durasi *downtime* yang terjadi, semakin besar pula dampaknya terhadap kinerja sistem produksi, sehingga mesin tersebut dapat dikategorikan sebagai mesin yang lebih kritis dibandingkan mesin lainnya (Arora et al., 2021).

Selain itu, Thomas et al., (2020) menjelaskan bahwa *unplanned downtime* akibat kegagalan mekanis dapat menurunkan efisiensi operasional, menghambat pencapaian target produksi, dan menyebabkan hilangnya potensi pendapatan perusahaan. Oleh karena itu, *downtime* sering digunakan sebagai indikator tingkat kekritisan mesin karena mencerminkan besarnya dampak operasional dan ekonomi yang ditimbulkan akibat kegagalan peralatan. Semakin tinggi nilai *downtime*, semakin kritis mesin tersebut terhadap kelangsungan proses produksi.

2.2.11 Trade-Off Analysis

Trade-Off Index merupakan suatu ukuran yang digunakan untuk mengevaluasi dan menyeimbangkan beberapa kriteria yang memiliki hubungan saling bertentangan dalam proses pengambilan keputusan. Kravchenko et al., (2021) menjelaskan bahwa analisis *trade-off* berperan sebagai pendukung keputusan ketika peningkatan pada satu indikator berpotensi menyebabkan penurunan pada indikator lainnya. Oleh karena itu, *Trade-Off Index* dapat digunakan untuk membantu menentukan alternatif yang memberikan keseimbangan terbaik di antara berbagai tujuan yang ingin dicapai.

Profit dan *reliability* dipilih sebagai komponen pembentuk *Trade-Off Index* karena keduanya merepresentasikan dua tujuan utama dalam pengelolaan perawatan. *Profit* digunakan untuk menggambarkan kinerja ekonomi yang dihasilkan dari penerapan suatu strategi *maintenance* menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Profit = Revenue - Total Cost Sustain$$

Persamaan (6) diperoleh berdasarkan dataset yang berasal dari *revenue* dikurangi dengan *total sustainability cost*. Sedangkan *reliability* digunakan untuk menunjukkan kemampuan sistem dalam menjalankan fungsinya tanpa mengalami kegagalan. Borjalilu et al., (2018) menjelaskan bahwa pemilihan strategi *maintenance* memiliki pengaruh

terhadap profitabilitas dan kinerja perusahaan sehingga aspek ekonomi perlu dipertimbangkan dalam proses pengambilan keputusan. Sementara itu, Faghihinia et al., (2012) menunjukkan bahwa *reliability* merupakan salah satu kriteria utama dalam evaluasi strategi *maintenance* karena berkaitan langsung dengan kemampuan sistem untuk beroperasi secara andal. Oleh karena itu, *Trade-Off Index* digunakan untuk menilai keseimbangan antara *profit* dan *reliability* sehingga dapat membantu menentukan strategi perawatan yang memberikan kompromi terbaik antara pencapaian tujuan ekonomi dan pemeliharaan keandalan sistem.

Trade-Off Index digunakan untuk mengevaluasi keseimbangan antara *profit* dan *reliability* dalam pengambilan keputusan *maintenance*. Berikut merupakan persamaan untuk *Trade-Off Index*.

$$\text{Trade - Off Index} = \frac{\text{Indikator 1} + \text{Indikator 2}}{2}$$

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa *Trade-Off Index* diperoleh dari rata-rata dua indikator yang digunakan dalam evaluasi, yaitu *profit* dan *reliability*.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Objek Penelitian

Objek pada penelitian ini adalah kegiatan perawatan mesin (*maintenance*) pada sistem manufaktur di perusahaan yang memproduksi *controller* elektronik, dengan data yang bersumber dari *BI Shopfloor Reliability Dataset*. Dataset tersebut menunjukkan kondisi kerja mesin, jadwal perawatan, serta pemanfaatan sumber daya seperti energi, bahan kimia, dan komponen pengganti dalam proses produksi di sektor industri manufaktur.

3.2 Subjek Penelitian

Subjek penelitian yang digunakan merupakan aktivitas *maintenance* mesin yang terdapat dalam dataset. Data tersebut mencerminkan aktivitas yang umumnya terjadi di lingkungan industri manufaktur. Subjek meliputi variabel-variabel seperti frekuensi perawatan mesin, waktu kerusakan (*downtime*), konsumsi energi dan air, emisi karbon dan limbah hasil *maintenance*, serta biaya suku cadang serta material kimia yang digunakan dalam setiap jenis *maintenance*.

3.3 Data Penelitian

Data yang digunakan merupakan data sekunder dalam bentuk dataset *Excel* berjudul *BI Shopfloor Reliability Dataset.xlsx*. Dataset tersebut mencakup beberapa kelompok data utama: data performa mesin (jam operasi, waktu kerusakan, *downtime*), data aktivitas *maintenance* (frekuensi, jadwal, tipe perawatan), data biaya dan sumber daya (energi, bahan, limbah, emisi karbon), serta data hasil produksi (efisiensi, *output*, utilisasi mesin). Data ini digunakan untuk menganalisis perbandingan *sustainability cost* antar strategi *maintenance* dengan memanfaatkan fitur analisis dan visualisasi dari *Power BI*.

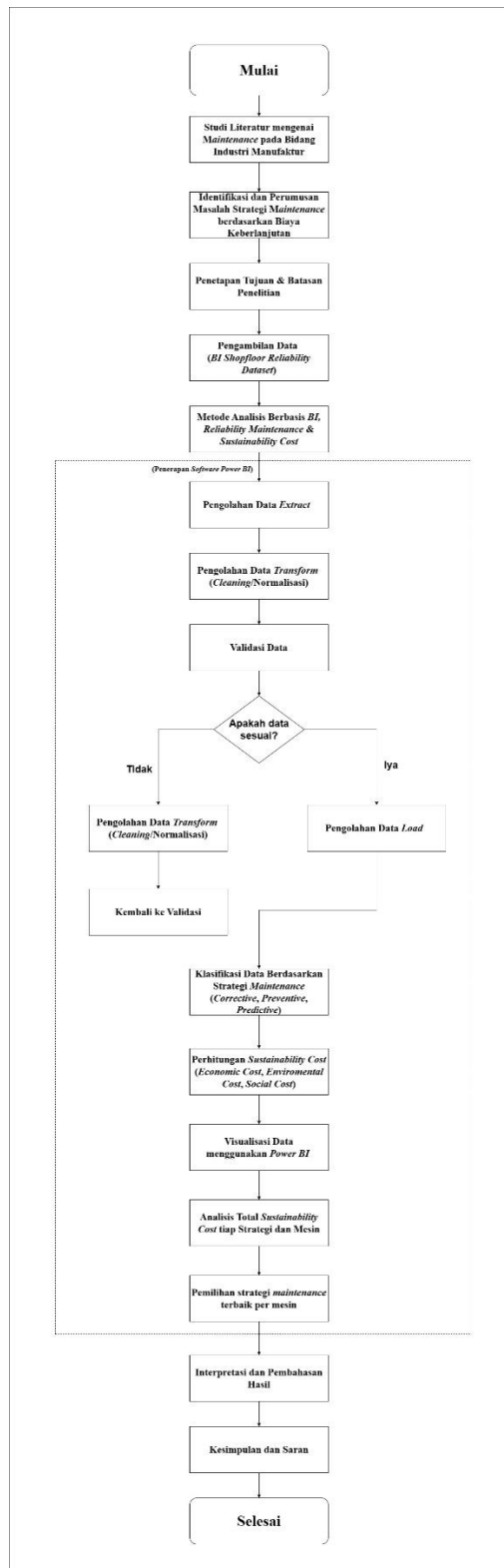
3.4 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada periode November 2025 hingga April 2026. Kegiatan penelitian difokuskan pada pengolahan dan analisis data sekunder yang telah disediakan dalam bentuk *BI Shopfloor Reliability Dataset*. Seluruh tahapan penelitian dilakukan

secara mandiri melalui proses pengolahan data menggunakan perangkat lunak *Microsoft Power BI*. Kegiatan penelitian meliputi proses *extract, transform, load* (ETL), perhitungan *sustainability cost*, analisis hasil, serta pembuatan *dashboard* visualisasi untuk mendukung pengambilan keputusan.

3.5 Alur Penelitian

Berikut merupakan alur penelitian pada penelitian yang akan dilaksanakan.



Gambar 3. 1 Alur Penelitian

Berikut merupakan penjelasan berdasarkan alur penelitian di atas.

1. Studi Literatur

Penelitian diawali dengan tahap perencanaan dan penentuan topik berdasarkan permasalahan nyata di bidang *maintenance system* industri manufaktur yang memerlukan efisiensi biaya dan keberlanjutan proses produksi.

2. Identifikasi Masalah dan Rumusan Masalah

Berdasarkan hasil studi literatur dan arahan pembimbing, ditentukan masalah utama yaitu perlunya analisis perbandingan dan pemilihan strategi perawatan mesin yang paling efisien serta berkelanjutan.

3. Penetapan Tujuan dan Batasan Penelitian

Tujuan utama penelitian adalah menentukan strategi *maintenance* yang optimal untuk setiap mesin berdasarkan *sustainability cost* (ekonomi, lingkungan, sosial). Penelitian dibatasi hanya menggunakan data sekunder dari *BI Shopfloor Reliability Dataset*.

4. Pengambilan Data (*BI Shopfloor Reliability Dataset*)

Data diambil dari dataset *shopfloor* yang berisi informasi performa mesin, frekuensi kerusakan, *downtime*, konsumsi energi, dan biaya perawatan. Dataset mencakup lima mesin yang menjadi objek penelitian.

5. Metode Analisis Berbasis BI, *Reliability Maintenance & Sustainability Cost*

Tahapan utama analisis dilakukan dengan mengintegrasikan tiga pendekatan, yaitu *Business Intelligence (BI)* untuk pengolahan dan visualisasi data, *Reliability Maintenance* untuk penilaian performa mesin, dan *Sustainability Cost* untuk perhitungan biaya keberlanjutan.

6. Pengolahan Data (ETL - *Extract, Transform, Load*)

- a. *Extract*: Pada tahap ini, data yang diperlukan diekstraksi dari sumber yang sudah ada, berupa dataset *BI Shopfloor Reliability Dataset* yang berisi informasi sebagai berikut.

- Data performa mesin: Jam operasi, waktu kerusakan (*downtime*), dan frekuensi kerusakan.

- Data aktivitas *maintenance*: Jadwal perawatan mesin (*corrective*, *preventive*, dan *predictive*), serta waktu perawatan yang dibutuhkan.
 - Data biaya dan sumber daya: Mencakup biaya suku cadang, energi yang digunakan, bahan kimia, serta emisi karbon yang dihasilkan selama proses pemeliharaan.
- b. *Transform*: Setelah data diekstraksi, langkah selanjutnya adalah transformasi data. Berupa proses penyesuaian data agar siap digunakan untuk analisis lebih lanjut yaitu penyesuaian struktur data dan pembersihan data untuk validasi.
- c. *Load*: Proses *load* dilakukan untuk menyimpan data yang sudah dilakukan transform ke dalam data warehouse untuk selanjutnya dilakukan perhitungan menggunakan *DAX*.
7. Perhitungan *measure Sustainability Cost* dan *measure* pendukung
- Perhitungan *measure Sustainability Cost* dilakukan untuk setiap strategi dan setiap mesin berdasarkan tiga aspek:
- a) *Economic Cost* → biaya *maintenance*, *material*, *scrap*, *downtime*, *rework*, *overtime*, dan *disposal*.

Untuk menghitung total biaya ekonomi menggunakan Persamaan (1).

Economic Cost

$$\begin{aligned}
 &= \sum (\text{maintenance_cost_}\$) + \sum (\text{material_cost_}\$) \\
 &+ \sum (\text{scrap_units} \times 30) \\
 &+ \sum (\text{disposal_cost_}\$) + \sum (\text{downtime_cost}) \\
 &+ \sum (\text{rework_cost_}\$) + \sum (\text{overtime_cost_}\$)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

- b) *Environmental Cost* → emisi karbon

Untuk menghitung total biaya lingkungan menggunakan Persamaan (2).

Environmental Cost

$$= \sum (energy_kwh \times 0.12) + \sum (carbon_cost_\$)$$

(2)

c) *Social Cost* → risiko kesehatan dan keselamatan pekerja

Untuk menghitung total biaya sosial menggunakan Persamaan (3).

$$Social\ Cost = \sum (safety_cost_\$) + \sum (social_health_cost_\$)$$

(3)

Measure kinerja mencakup:

a) *Tradeoff Index*

Untuk menghitung keseimbangan antara keuntungan dengan keandalan menggunakan Persamaan (4).

$$Tradeoff\ Index = \frac{1}{2} \left(\frac{Profit - Profit_{min}}{Profit_{max} - Profit_{min}} \times 100 + reliability \times 100 \right)$$

(4)

b) *Avg Reliability*

Untuk menghitung rata-rata keandalan menggunakan Persamaan (5).

$$Avg\ Reliability = \frac{(\sum Reliability)}{n}$$

(5)

c) *Profit*

Untuk menghitung keuntungan menggunakan Persamaan (6).

$$Profit = Revenue - Total\ Cost\ Sustain$$

(6)

8. Visualisasi Data menggunakan Power BI

Hasil analisis ditampilkan dalam *dashboard Power BI* berupa perbandingan *sustainability cost* tiap aspek, *tradeoff*, *reliability*, *total cost* dan *profit*, pada setiap strategi untuk analisis.

9. Analisis Total *Sustainability Cost* tiap Strategi dan Mesin

Nilai *sustainability cost* dari tiap mesin dibandingkan antar strategi untuk mengetahui perbedaan biaya keberlanjutan.

10. Pemilihan Strategi Maintenance paling baik per Mesin

Pemilihan strategi *maintenance* paling baik per mesin dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan antara biaya, *profit*, serta dampak lingkungan dan sosial, sehingga strategi yang dipilih tidak hanya paling murah, tetapi paling tepat untuk kondisi mesin.

11. Interpretasi dan Pembahasan Hasil

Dilakukan pembahasan terhadap hasil analisis serta perbandingan dengan teori atau penelitian sebelumnya.

12. Kesimpulan dan Saran

Tahapan akhir berisi kesimpulan hasil penelitian dan rekomendasi penerapan strategi *maintenance* berbasis BI untuk efisiensi biaya dan keberlanjutan.

Analisis dalam penelitian ini dilakukan pada lima mesin produksi yang terdapat dalam *dataset BI Shopfloor Reliability*. Setiap mesin dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas tiga strategi perawatan, meliputi *corrective*, *preventive*, dan *predictive maintenance*. Berdasarkan hasil perhitungan *sustainability cost*, ditentukan strategi perawatan paling sesuai untuk masing-masing mesin dengan mempertimbangkan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Hasil perbandingan selanjutnya divisualisasikan dalam *dashboard Power BI* sebagai dukungan pengambilan keputusan manajemen dalam menentukan strategi pemeliharaan yang paling baik.

BAB IV

PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

4.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari mitra industri manufaktur pada bidang produksi *controller electronic* yang berlokasi di Daerah Istimewa Yogyakarta. Data dikumpulkan dari kegiatan *maintenance shopfloor* perusahaan yang merekam aktivitas operasional mesin produksi secara berkala dihitung dari bulan Januari 2025 – Juni 2025. Dataset yang digunakan mencakup informasi *downtime* mesin, biaya *maintenance*, *material*, konsumsi energi, emisi karbon, biaya keselamatan kerja, *rework*, *disposal*, *revenue*, *profit*, dan data-data yang bersangkutan dengan aktivitas *maintenance*.

Data tersebut mempresentasikan tiga strategi *maintenance* yang diterapkan perusahaan, yaitu *predictive maintenance*, *preventive maintenance*, dan *corrective maintenance*. Secara keseluruhan, data meliputi lima mesin produksi utama yang menjadi objek utama analisis pada penelitian ini. Data historis tersebut kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan evaluasi kinerja *maintenance* dari aspek ekonomi, lingkungan, sosial, profitabilitas, dan keandalan sistem.

4.1.1 Deskripsi Perusahaan

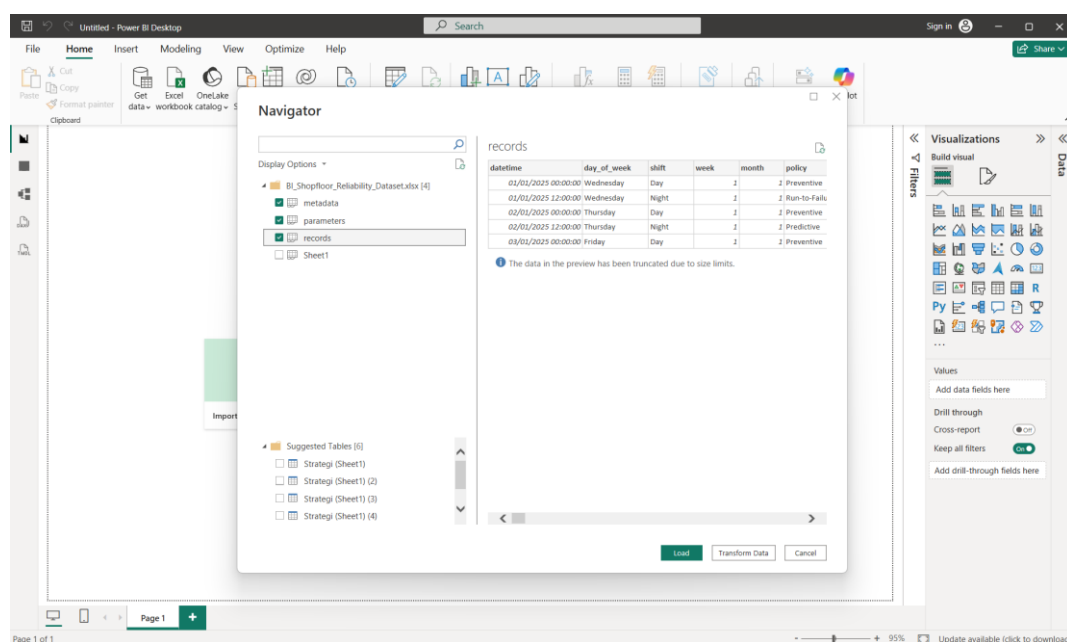
Perusahaan mitra merupakan perusahaan manufaktur yang bergerak pada produksi *controller electronic*. Proses produksi dilakukan menggunakan beberapa mesin utama yang beroperasi dalam sistem *shopfloor manufacturing*. Kinerja mesin memiliki pengaruh langsung terhadap output produksi, biaya operasional, serta tingkat profit perusahaan.

Berdasarkan kebijakan internal perusahaan, identitas dan nama perusahaan tidak dapat dipublikasikan untuk menjaga kerahasiaan data. Permasalahan utama yang dihadapi perusahaan berkaitan dengan tingginya biaya perawatan, *downtime* mesin, serta dampak keberlanjutan akibat aktivitas *maintenance*. Oleh sebab itu, diperlukan evaluasi strategi *maintenance* yang sesuai untuk setiap mesin dengan tujuan meningkatkan efisiensi operasional dan keberlanjutan sistem produksi.

4.2 Pengolahan Data

4.2.1 Extract Data

Pada penelitian ini, data diperoleh dari *BI Shopfloor Reliability Dataset* dalam format *Microsoft Excel* (.xlsx) yang terdiri dari tiga *sheet* utama yaitu *metadata*, *parameter*, dan *records*. *Dataset* mencakup data operasional lima mesin produksi selama 180 hari mulai dari tanggal 1 Januari 2025 – 29 Juni 2025, dengan 2 *shift*/hari. Proses *extract* dilakukan dengan mengimpor *file Excel* ke dalam *Power BI* sebagai sumber data utama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4. 1 *Extract Data*

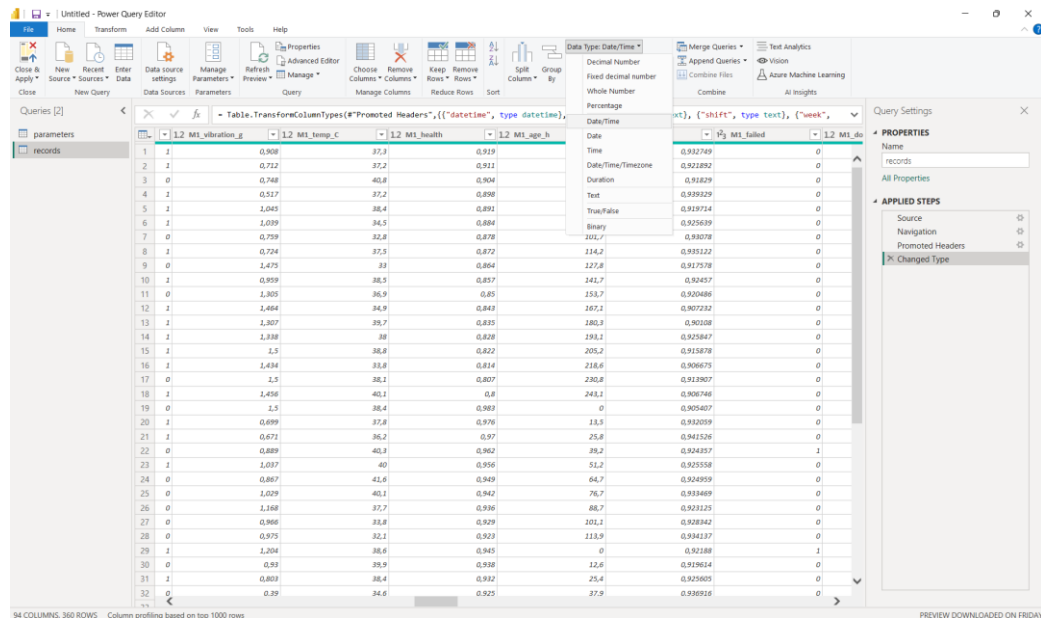
4.2.2 Transform Data

Pada tahap transformasi dilakukan menggunakan *Power Query Editor* untuk mempersiapkan data agar siap dianalisis. Pada penelitian ini, transformasi berfokus pada pembersihan data dan penyesuaian format agar sesuai dengan kebutuhan perhitungan. Berikut merupakan beberapa proses transformasi yang dilakukan.

1. Pembersihan Data

Pada tahap pembersihan data, dilakukan agar data tersebut konsisten seperti melakukan penanganan pada nilai kosong (*null values*). Selain itu, tipe data pada

setiap atribut disesuaikan, seperti tanggal menjadi *date*, biaya menjadi *numeric*, dan kategori menjadi *text* seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2 Data Cleaning

2. Menyesuaikan Struktur Data

Pada *sheet records*, data mesin produksi awal tersimpan dalam beberapa kolom terpisah. Untuk mempermudah dalam proses *filtering*, dilakukan proses *unpivot* sehingga mesin diubah menjadi satu kolom *Machine_ID*. Struktur data kemudian berbentuk *long format*, dimana pada setiap baris menampilkan satu mesin pada satu waktu tertentu. Transformasi ini memudahkan dalam perhitungan per mesin, perbandingan antar strategi *maintenance*, dan visualisasi dinamis pada *dashboard*. Berikut merupakan tampilan sebelum dan sesudah dilakukan transformasi data seperti pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.

Gambar 4. 3 Sebelum Normalisasi

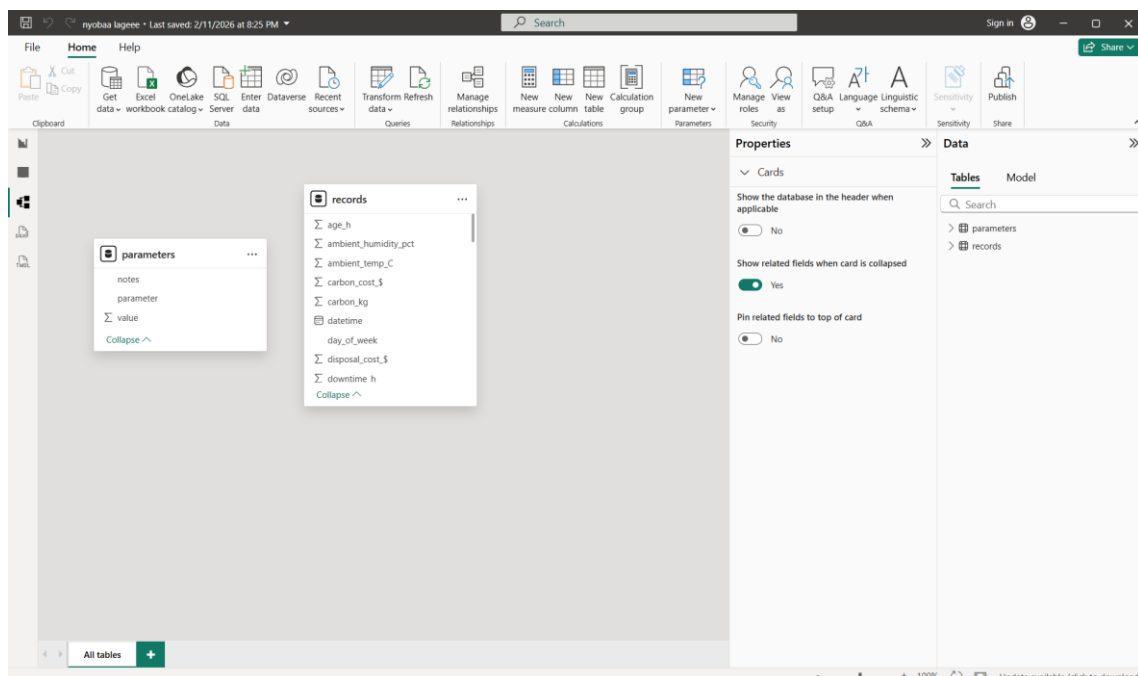
Gambar 4. 4 Setelah Normalisasi

4.2.3 Data Modeling

Data modelling merupakan tahapan yang dilakukan setelah proses transformasi selesai dengan tujuan untuk menyusun struktur tabel agar proses analisis dan perhitungan dapat dilakukan secara efisien. Pada penelitian ini, data *modelling* menggunakan pendekatan

single fact table (flat model) karena sebagian data operasional berada pada satu tabel utama. Tabel *records* pada penelitian ini berfungsi sebagai *fact table* yang berisi seluruh data numerik utama seperti *downtime*, biaya perawatan, penggunaan energi, *profit*, serta variabel produksi lainnya. Tabel ini menjadi tabel utama pada seluruh proses perhitungan indikator kinerja.

Selanjutnya, digunakan tabel *parameters* sebagai tabel referensi yang menyimpan informasi mengenai konstanta biaya, seperti tarif listrik, harga karbon, biaya *rework* serta informasi lainnya yang menunjang dalam perhitungan *measure* sebagai *input*. Pada penelitian ini, parameter bersifat global dan tidak bergantung pada setiap baris baris data, sehingga tidak diperlukan relasi (*relationship*) antar tabel. Perhitungan dilakukan secara langsung menggunakan *measure* sehingga model menjadi lebih sederhana, mudah dipahami, dan sesuai ukuran dataset penelitian. Metode ini digunakan dengan tujuan untuk memudahkan perancangan strategi perawatan sehingga dapat dilakukan tanpa melibatkan struktur data yang kompleks. *Single fact table* pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 *Data Modelling*

4.2.4 Perhitungan Measure (DAX)

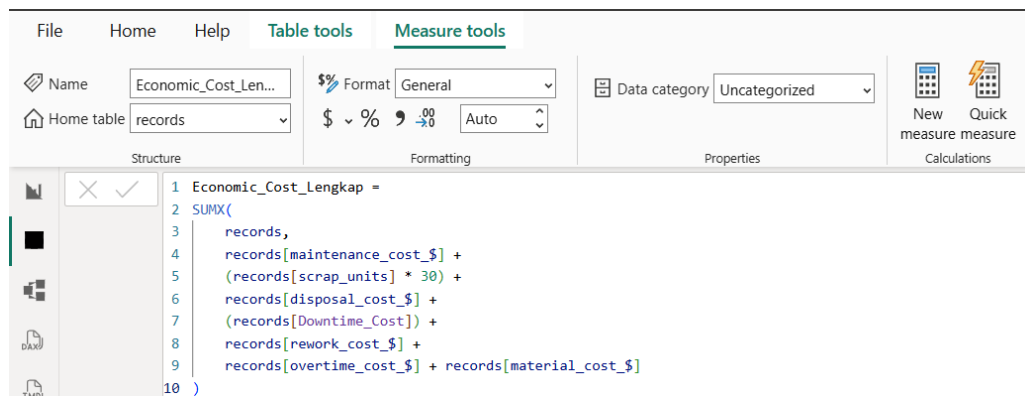
Perhitungan *measure* pada DAX (*Data Analysis Expressions*) dilakukan untuk mengevaluasi performa strategi pada proses *maintenance* yang diterapkan pada sistem produksi. *Measure* digunakan untuk mengolah data numerik yang berada pada tabel *records* dengan parameter biaya yang terdapat pada tabel *parameters*. Pada penelitian ini, indikator yang digunakan meliputi aspek ekonomi, lingkungan, sosial, serta indikator performa sistem. Berikut merupakan komponen *cost* yang digunakan dalam perhitungan. Komponen *cost* yang digunakan pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Komponen Cost

Komponen	Total Cost Dataset	Total Sustain Cost
<i>maintenance cost</i>	✓	✓
<i>material cost</i>	✓	✓
<i>energy cost</i>	✓	✓
<i>carbon cost</i>	✓	✓
<i>rework cost</i>	✓	✓
<i>disposal cost</i>	✓	✓
<i>overtime cost</i>	✓	✓
<i>safety cost</i>	✓	✓
<i>social health cost</i>	✓	✓
<i>scrap units</i> × 30	x	✓
<i>Downtime cost</i>	x	✓

1. Economic Cost

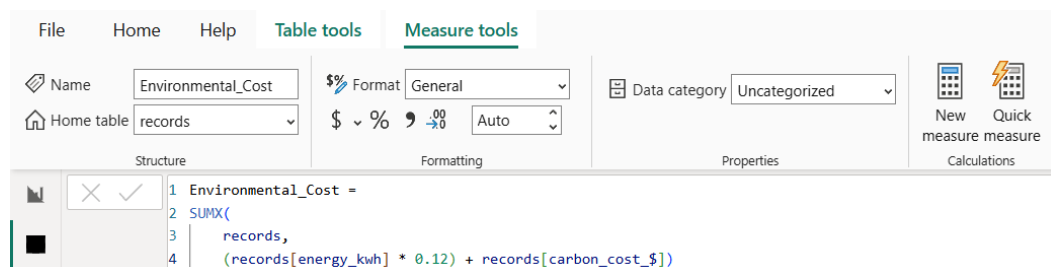
Economic Cost merupakan total biaya ekonomi yang timbul karena aktivitas produksi dan perawatan meliputi biaya *maintenance*, *scrap*, *downtime*, *rework*, *overtime*, dan *disposal*. Secara umum *economic cost* dihitung dengan menjumlahkan seluruh biaya yang terkait dengan proses produksi dan pemeliharaan mesin. *Economic cost* digunakan untuk mengevaluasi seberapa besar beban finansial yang ditimbulkan oleh masing-masing strategi *maintenance* tiap mesin. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *Economic_Cost* seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 DAX Economic Cost

2. Environmental Cost

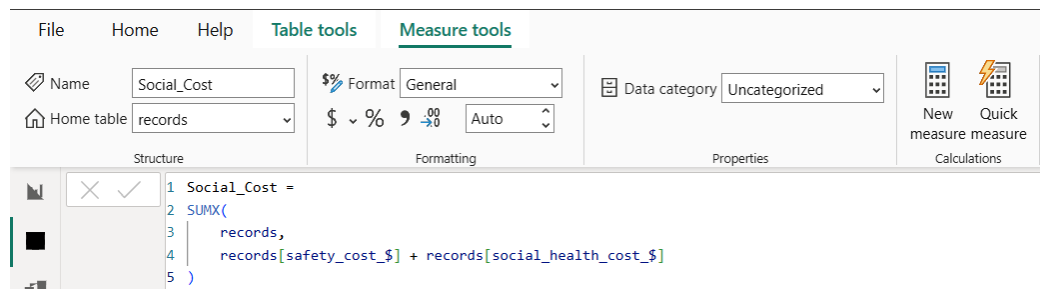
Environmental Cost merupakan perhitungan berdasarkan dampak biaya yang berkaitan dengan aspek lingkungan, seperti konsumsi energi dan juga emisi karbon yang dihasilkan selama proses produksi maupun *maintenance* berlangsung. *Environmental Cost* digunakan untuk menilai sejauh mana strategi *maintenance* mempengaruhi keberlanjutan lingkungan dalam sistem produksi. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *Environmental_Cost* seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4. 7 DAX Environmental Cost

3. Social Cost

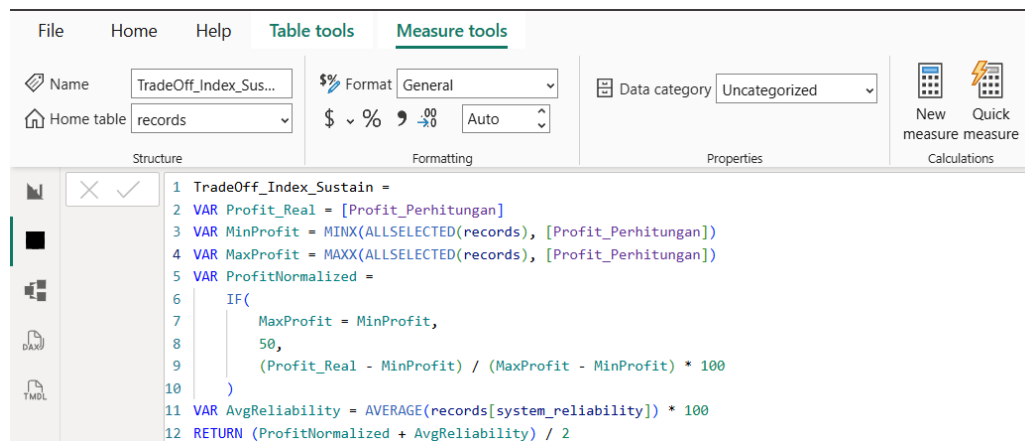
Social Cost merupakan biaya yang berkaitan dengan aspek sosial, terutama yang berkaitan dengan tenaga kerja yang berpengaruh dalam keberlanjutan. Pada penelitian, *social cost* mengutamakan pada biaya yang timbul akibat insiden keselamatan kerja dan juga beban kerja operator selama proses produksi. Perhitungan *social cost* dilakukan menggunakan dua komponen utama, berupa biaya akibat *safety incident* dan beban kerja produksi. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *Social_Cost* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 DAX Social Cost

4. Trade-Off Index

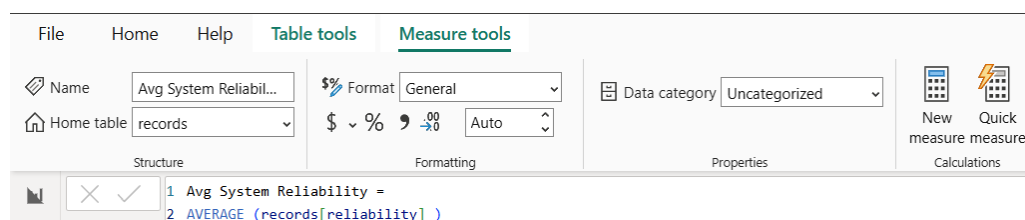
Trade-Off Index Sustain merupakan indikator untuk mengevaluasi keseimbangan antara *profit real* dan keandalan sistem (*reliability*) dalam membandingkan kinerja setiap strategi *maintenance*. *Profit real* yang digunakan adalah hasil perhitungan *revenue* dikurangi total *sustainability cost*, di mana nilai tersebut dapat bernilai negatif karena telah memasukkan biaya tersembunyi seperti *downtime* dan *scrap*. Oleh karena itu, normalisasi *profit* dilakukan dengan metode *min-max scaling* agar seluruh nilai *profit* (dari terendah hingga tertinggi) dapat dipetakan ke dalam rentang 0–100 secara proporsional. Sementara itu, nilai *system reliability* yang berada pada rentang 0–1 dikonversi ke skala 0–100 dengan cara dikalikan 100. Selanjutnya, kedua komponen yang telah dinormalisasi tersebut dirata-ratakan untuk menghasilkan nilai *trade-off index*. Indeks ini memungkinkan perbandingan antar strategi *maintenance* secara adil, di mana semakin tinggi nilai indeks menunjukkan strategi yang semakin seimbang antara *profit real* dan keandalan sistem. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *TradeOff_Index* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9 DAX TradeOff-Index

5. Avg Reliability

Average System Reliability merupakan nilai rata-rata dari *system reliability* yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keandalan pada sistem produksi secara menyeluruh. Penggunaan rata-rata bertujuan untuk menderhanakan data *reliability* yang bersifat banyak dan bervariasi menjadi satu nilai representatif, sehingga memudahkan proses analisis. Perhitungan rata-rata *system reliability* dilakukan dengan menjumlahkan seluruh nilai *system reliability* kemudian dibagi dengan jumlah data pengamatan. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *Avg_Reliability* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10.

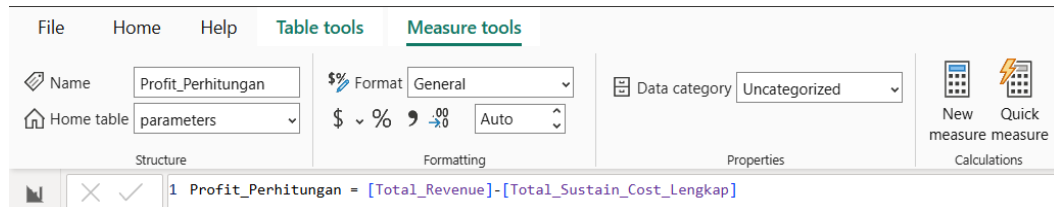


Gambar 4. 10 DAX Avg Reliability

6. Total Profit

Profit merupakan keuntungan yang diperoleh dari hasil produksi setelah dikurangi dengan biaya yang dikeluarkan. Perhitungan *profit* dalam *Power BI* dilakukan dengan menjumlahkan seluruh nilai *profit* pada data. Pada penelitian ini, nilai *profit* diperoleh berdasarkan data yang tersedia pada *dataset* dan digunakan sebagai

indikator untuk menilai kinerja ekonomi dari masing-masing strategi *maintenance*. Berikut merupakan *measure* yang digunakan pada *Profit_Perhitungan*.



Gambar 4. 11 DAX Profit Perhitungan

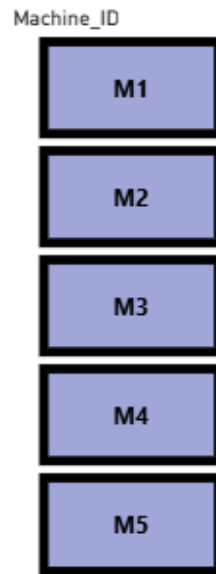
4.2.5 Visualisasi Dashboard

Tahap akhir dari proses pengolahan data menggunakan *Business Intelligence (Power BI)* adalah pembuatan *dashboard* interaktif. *Dashboard* tersebut dirancang untuk menampilkan hasil perhitungan indikator biaya dan performa sistem produksi secara visual, dengan tujuan untuk memudahkan dalam pembacaan data sebelum memasuki tahap analisis. Pada penelitian ini, visual *dashboard* yang digunakan meliputi lima jenis elemen utama, yaitu *slicer*, *card*, *clustered bar chart*, *donut chart*, dan *table*.

1. Panel Filter Data (*Slicer*)

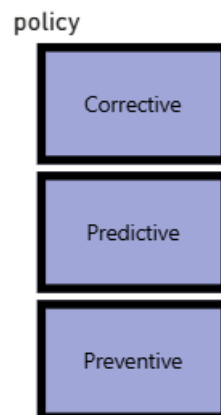
Panel *filter data* pada *dashboard* ini menggunakan elemen visual yang bernama *slicer* untuk memfilter keseluruhan data yang ditampilkan. Terdapat tiga jenis *slicer* yang digunakan di sisi kiri *dashboard*, yaitu:

- a. *Machine_ID*: *Slicer* berbentuk *checkbox* untuk menyeleksi data berdasarkan identitas mesin (M1, M2, M3, M4, dan M5). Berikut merupakan tampilan *Machine_ID* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4. 12 *Slicer Machine ID*

- b. *Policy*: *Slicer* berbentuk *checkbox* untuk memilah data berdasarkan sttategi maintenance yang diterapkan, yaitu *Predictive*, *Preventive*, dan *Corrective*. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.13.

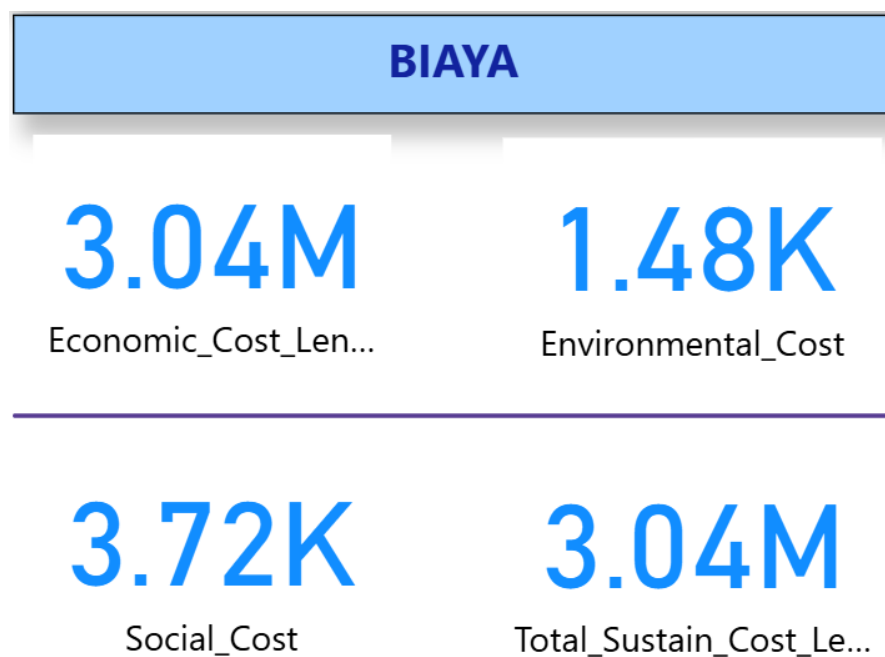


Gambar 4. 13 *Slicer Policy*

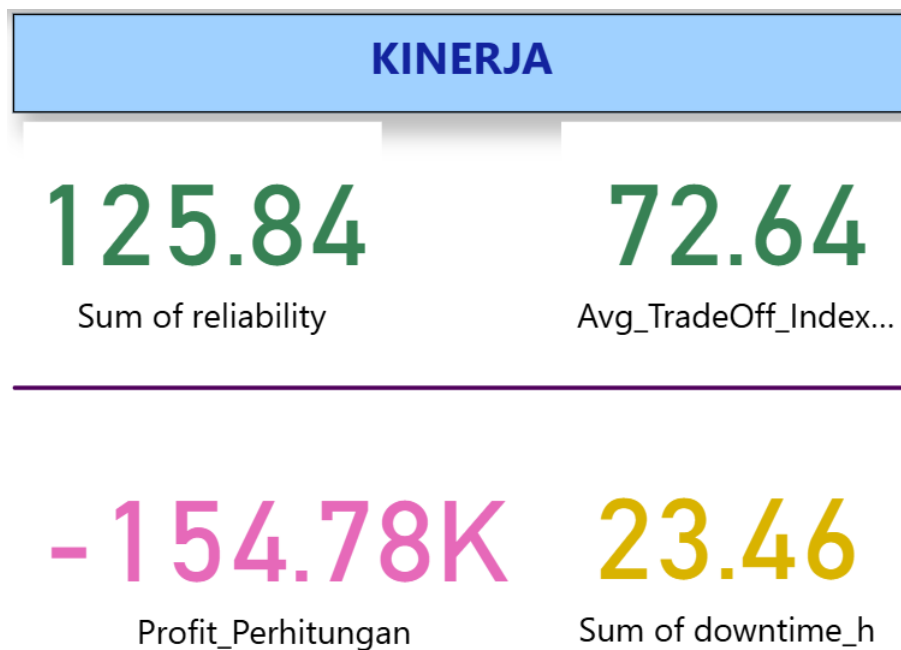
2. Tampilan Indikator Kinerja Utama (*Card*)

Pada metrik kinerja utama penelitian ini, disajikan secara numerik menggunakan elemen visual *card*. Visualisasi ini terbagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama menampilkan nilai total berupa *Economic_Cost*, *Environmental_Cost*, *Social_Cost*, dan *Total_Sustain_Cost*. Sementara itu kelompok kedua menampilkan

metrik performa operasional dan biaya keseluruhan, yang terdiri dari *Total Profit*, *Trade-Off Index (Avg)*, *Reliability* dan total waktu henti mesin (*Sum of downtime_h*). Nilai yang ditampilkan pada visual *card* merupakan hasil dari proses kalkulasi agregasi, seperti penjumlahan dan rata-rata, yang disesuaikan dengan parameter atau *filter* yang aktif pada *dashboard*. Visualisasi ini bertujuan untuk menampilkan nilai indikator secara ringkas sehingga memudahkan dalam melihat hasil pengolahan data secara keseluruhan. Berikut merupakan visualisasi elemen visual *card*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Gambar 4.15.



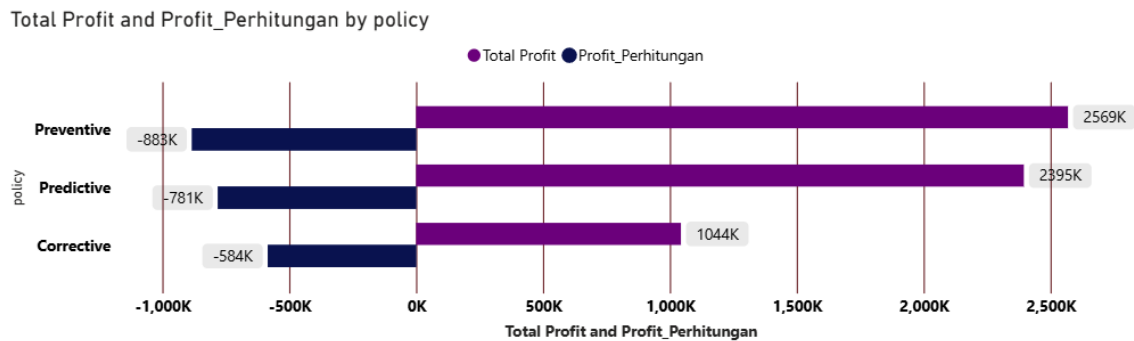
Gambar 4. 14 *Card Biaya*



Gambar 4. 15 Card Kinerja

3. Grafik Komparatif Kebijakan (*Clustered Bar Chart*)

Visualisasi menggunakan *Clustered Bar Chart* pada dashboard ini digunakan untuk memudahkan dalam membandingkan dan mengidentifikasi nilai beberapa variabel secara berdampingan. Dengan *Clustered*, visual yang ditampilkan dapat lebih mudah untuk dibandingkan berdasarkan panjang pendeknya batang secara horizontal untuk melihat perbandingan nilai tertinggi dan terendah. Berikut merupakan visualisasi pada penelitian ini yang menggunakan *Clustered Bar Chart* horizontal dengan judul "*Total Profit and Profit_Perhitungan by policy*" yang diletakkan pada bagian dasar *dashboard*. Grafik komparatif ini secara langsung menyandingkan dua dimensi keuntungan, yaitu batang berwarna ungu sebagai indikator *Total Profit* dan batang berwarna biru tua sebagai indikator *Profit Perhitungan* untuk setiap jenis kebijakan pemeliharaan yang diterapkan. Berikut merupakan visualisasi *Clustered Bar Chart* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4. 16 *Clustered Bar Chart* Perbandingan *Profit*

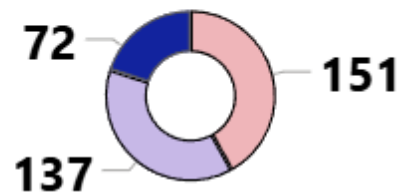
Gambar 4.16 menunjukkan visualisasi komparatif hasil keuntungan melalui *Clustered Bar Chart* horizontal berjudul "*Total Profit and Profit_Perhitungan by policy*". Dalam grafik ini, sumbu Y menunjukkan jenis kebijakan (*policy*) yang diterapkan, sementara sumbu X mengelompokkan nilai nominal finansial dalam skala ribuan (K) dengan batas area positif dan negatif. Visualisasi ini menyandingkan dua indikator secara berpasangan, yaitu variabel *Total Profit* yang direpresentasikan oleh batang berwarna ungu dan variabel *Profit Perhitungan* yang direpresentasikan oleh batang berwarna biru tua, serta dilengkapi legenda penanda warna yang kontras.

4. Grafik Distribusi Strategi (*Donut Chart*)

Visualisasi menggunakan *Donut Chart* pada *dashboard* ini digunakan untuk menunjukkan kontribusi proporsional, persentase, atau frekuensi kemunculan dari beberapa kategori dalam satu kesatuan objek data. Dengan *Donut Chart*, porsi distribusi atau dominasi dari masing-masing variabel dapat dibandingkan secara intuitif berdasarkan segmentasi warna busur lingkaran yang mudah dipahami. Berikut merupakan visualisasi pada penelitian ini yang menggunakan *Donut Chart* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.17.

Frekuensi_per_Mesin by policy

policy ● Preventive ● Predictive ● Corrective



Gambar 4. 17 *Donut Chart* Frekuensi Maintenance

Gambar 4.17 menampilkan kontribusi frekuensi penerapan strategi pemeliharaan dalam bentuk *Donut Chart* dengan judul “Jumlah Strategi by Policy”. Besar kecilnya bagian pada grafik menggambarkan jumlah penerapan masing-masing strategi yang tercatat dalam sistem. Grafik ini juga dilengkapi dengan perbedaan warna dan label jumlah data pada sisi kanan sehingga memudahkan pembaca dalam membandingkan strategi *Predictive*, *Preventive*, dan *Corrective*.

5. Tabel Ringkasan Data (*Table*)

Visualisasi tabel pada *dashboard* ini digunakan untuk menampilkan rincian data secara terstruktur dalam bentuk baris dan kolom. Penggunaan visual tabel sangat efektif untuk menyajikan angka yang mendetail, sehingga pembaca dapat melihat nilai dengan jelas dari setiap variabel yang mungkin akan sulit jika hanya menggunakan visual grafik biasa. Berikut merupakan penerapan visualisasi tabel pada penelitian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18.

▲ policy	Sum of reliability ▼	Profit_Perhitungan
Corrective	320.2	-584,105.29
Predictive	610.9	-780,758.06
Preventive	672.5	-882,987.23
Total	1,603.6	-2,247,850.58

Gambar 4. 18 *Table*

Gambar 4.18 menampilkan ringkasan data numerik dalam bentuk tabel matriks untuk setiap strategi *maintenance*. Pada tabel tersebut, data dikelompokkan berdasarkan jenis policy pada bagian baris, sedangkan kolom menampilkan nilai keandalan (*Sum of Reliability*) dan keuntungan bersih (*Profit Perhitungan*) secara berdampingan. Penyajian dalam bentuk tabel ini digunakan agar nilai dari masing-masing strategi dapat terlihat lebih jelas dan mudah dibandingkan.

BAB V

PEMBAHASAN

5.1 Analisis Kinerja per Mesin

Analisis kinerja pada setiap mesin dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perbandingan pada setiap parameter yang nantinya akan dianalisis meliputi jenis biaya, tingkat keuntungan, serta efisiensi waktu operasional yang direpresentasikan oleh *downtime*.

5.1.1 Analisis Mesin 1

Berikut merupakan hasil dari analisis pada mesin 1 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.1.

MESIN 1								
Strategi	Economic Cost (M)	Enviromental Cost	Social Cost (K)	Profit	Sustain Cost	Downtime	Reliability	TradeOff-Index
Predictive	3.035.078	1.477	3.721	-154.777	3.040.277	23.46	125.84	72.64
Preventive	3.288.539	1.611	3.870	-176.471	3.294.021	37.62	138.46	70.81
Corrective	1.528.100	773.62	1.880	-116.805	1.530.755	17.74	65.95	65.12

Gambar 5. 1 Analisis Mesin 1

Berdasarkan Gambar 5.1 pada Mesin 1, strategi *corrective maintenance* memiliki nilai *economic cost* terendah (1.528.100), *environmental cost* terendah (774), *social cost* terendah (1.880), serta *downtime* terendah (17,74 jam). Pada sisi *profit* perhitungan, strategi ini menghasilkan kerugian paling kecil (-116.805). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki *reliability* tertinggi (138,46) tetapi *economic cost* tertinggi (3.288.539) dan *profit real* terendah (-176.471). Sementara itu, *predictive maintenance* berada pada posisi tengah untuk semua indikator dan memiliki *Trade-Off Index* tertinggi (72,64). Dengan demikian, pemilihan strategi yang sesuai tergantung pada prioritas perusahaan. Jika perusahaan ingin meminimalkan biaya dan *downtime*, *corrective maintenance* adalah pilihan terbaik. Jika ingin memaksimalkan *reliability*, *preventive maintenance* lebih disarankan. Sedangkan jika ingin keseimbangan antara profit, biaya, dan *reliability*, *predictive maintenance* menjadi alternatif yang tepat.

5.1.2 Analisis Mesin 2

Berikut merupakan hasil dari analisis pada mesin 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.2.

MESIN 2								
Strategi	Economic Cost (M)	Enviromental Cost	Social Cost (K)	Profit	Sustain Cost	Downtime	Reliability	TradeOff-Index
Predictive	3.035.031	1.337	3.721	-154.590	3.040.090	19.65	123.70	71.74
Preventive	3.287.956	1.462	3.870	-175.739	3.293.289	28.86	136.15	69.90
Corrective	1.527.743	699.38	1.880	-116.373	1.530.323	13.52	64.85	64.68

Gambar 5. 2 Analisis Mesin 2

Berdasarkan Gambar 5.2 pada Mesin 2, strategi *corrective maintenance* memiliki nilai *economic cost* terendah (1.527.743), *environmental cost* terendah (699), *social cost* terendah (1.880), serta *downtime* terendah (13,52 jam). Pada sisi *profit* perhitungan, strategi ini menghasilkan kerugian paling kecil (-116.373). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki *reliability* tertinggi (136,15) tetapi *economic cost* tertinggi (3.287.956) dan *profit real* terendah (-175.739). Sementara itu, *predictive maintenance* berada pada posisi tengah untuk semua indikator dan memiliki *Trade-Off Index* tertinggi (71,74). Dengan demikian, pemilihan strategi yang sesuai tergantung pada prioritas perusahaan. Jika perusahaan ingin meminimalkan biaya dan downtime, *corrective maintenance* adalah pilihan terbaik. Jika ingin memaksimalkan *reliability*, *preventive maintenance* lebih disarankan. Sedangkan jika ingin keseimbangan antara profit, biaya, dan *reliability*, *predictive maintenance* menjadi alternatif yang tepat.

5.1.3 Analisis Mesin 3

Berikut merupakan hasil dari analisis pada mesin 3 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.3.

MESIN 3								
Strategi	Economic Cost (M)	Enviromental Cost	Social Cost (K)	Profit	Sustain Cost	Downtime	Reliability	TradeOff-Index
Predictive	3.037.148	1.613	3.721	-156.984	3.042.484	41.21	120.54	70.48
Preventive	3.289.658	1.759	3.870	-177.738	3.295.288	44.61	132.69	68.60
Corrective	1.528.467	838.11	1.880	-117.236	1.531.186	24.01	63.28	63.26

Gambar 5. 3 Analisis Mesin 3

Berdasarkan Gambar 5.3 pada Mesin 3, strategi *corrective maintenance* memiliki nilai *economic cost* terendah (1.528.467), *environmental cost* terendah (838), *social cost* terendah (1.880), serta *downtime* terendah (24,01 jam). Pada sisi *profit* perhitungan, strategi ini menghasilkan kerugian paling kecil (-117.236). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki *reliability* tertinggi (132,69) tetapi *economic cost* tertinggi (3.289.658) dan *profit real* terendah (-177.738). Sementara itu, *predictive maintenance* berada pada posisi tengah untuk semua indikator dan memiliki *Trade-Off*

Index tertinggi (70,48). Dengan demikian, pemilihan strategi yang sesuai tergantung pada prioritas perusahaan. Jika perusahaan ingin meminimalkan biaya dan *downtime*, *corrective maintenance* adalah pilihan terbaik. Jika ingin memaksimalkan *reliability*, *preventive maintenance* lebih disarankan. Sedangkan jika ingin keseimbangan antara *profit*, biaya, dan *reliability*, *predictive maintenance* menjadi alternatif yang tepat.

5.1.4 Analisis Mesin 4

Berikut merupakan hasil dari analisis pada mesin 4 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.4.

MESIN 4								
Strategi	Economic Cost (M)	Enviromental Cost	Social Cost (K)	Profit	Sustain Cost	Downtime	Reliability	TradeOff-Index
Predictive	3.036.017	1.477	3.721	-155.716	3.041.216	26.90	121.99	70.97
Preventive	3.288.105	1.611	3.870	-176.038	3.293.588	30.84	134.37	69.25
Corrective	1.527.634	778.69	1.880	-116.344	1.530.294	13.13	63.88	63.69

Gambar 5. 4 Analisis Mesin 4

Berdasarkan Gambar 5.4 pada Mesin 4, strategi *corrective maintenance* memiliki nilai *economic cost* terendah (1.527.634), *environmental cost* terendah (779), *social cost* terendah (1.880), serta *downtime* terendah (13,13 jam). Pada sisi *profit* perhitungan, strategi ini menghasilkan kerugian paling kecil (-116.344). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki *reliability* tertinggi (134,37) tetapi *economic cost* tertinggi (3.288.105) dan *profit real* terendah (-176.038). Sementara itu, *predictive maintenance* berada pada posisi tengah untuk semua indikator dan memiliki *Trade-Off Index* tertinggi (70,97). Dengan demikian, pemilihan strategi yang sesuai tergantung pada prioritas perusahaan. Jika perusahaan ingin meminimalkan biaya dan *downtime*, *corrective maintenance* adalah pilihan terbaik. Jika ingin memaksimalkan *reliability*, *preventive maintenance* lebih disarankan. Sedangkan jika ingin keseimbangan antara *profit*, biaya, dan *reliability*, *predictive maintenance* menjadi alternatif yang tepat.

5.1.5 Analisis Mesin 5

Berikut merupakan hasil dari analisis pada mesin 5 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.5.

MESIN 5								
Strategi	Economic Cost (M)	Enviromental Cost	Social Cost (K)	Profit	Sustain Cost	Downtime	Reliability	TradeOff-Index
Predictive	3.038.724	1.743	3.721	-158.689	3.044.189	52.15	118.86	69.74
Preventive	3.288.761	1.915	3.870	-176.998	3.294.548	38.93	130.82	68.18
Corrective	1.528.500	914.33	1.880	-117.345	1.531.295	24.97	62.24	62.60

Gambar 5. 5 Analisis Mesin 5

Berdasarkan Gambar 5.5 pada Mesin 5, strategi *corrective maintenance* memiliki nilai *economic cost* terendah (1.528.500), *environmental cost* terendah (914), *social cost* terendah (1.880), serta *downtime* (24,97 jam) yang lebih rendah dibandingkan *predictive* (52,15 jam). Pada sisi *profit* perhitungan, strategi ini menghasilkan kerugian paling kecil (-117.345). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki *reliability* tertinggi (130,82) tetapi *economic cost* tertinggi (3.288.761) dan *profit real* terendah (-176.998). Sementara itu, *predictive maintenance* berada pada posisi tengah untuk semua indikator dan memiliki *Trade-Off Index* tertinggi (69,74). Dengan demikian, pemilihan strategi yang sesuai tergantung pada prioritas perusahaan. Jika perusahaan ingin meminimalkan biaya dan *downtime*, *corrective maintenance* adalah pilihan terbaik. Jika ingin memaksimalkan *reliability*, *preventive maintenance* lebih disarankan. Sedangkan jika ingin keseimbangan antara *profit*, biaya, dan *reliability*, *predictive maintenance* menjadi alternatif yang tepat.

5.2 Knowledge

Berdasarkan data dan informasi yang telah disajikan pada sub-bab sebelumnya, beberapa *knowledge* dapat diperoleh dengan menggabungkan berbagai indikator yang saling terkait. *Knowledge* tersebut, akan digunakan sebagai jembatan antara data mentah dan kebijakan manajerial.

5.2.1 Hubungan Biaya dan Profit Perhitungan

Berikut merupakan tabel hubungan biaya keberlanjutan dengan *profit* perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 1 Hubungan Biaya dan Profit Perhitungan

Strategi	Total Sustainability Cost	Profit Perhitungan
Corrective	7.653.855	(584.105)
Predictive	15.205.258	(780.758)
Preventive	16.470.737	(882.987)

Berdasarkan Tabel 5.1, terlihat bahwa strategi *corrective maintenance* memiliki total *sustainability cost* terendah sekaligus *profit perhitungan* tertinggi (kerugian paling kecil). Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* memiliki total *sustainability cost* tertinggi dan *profit perhitungan* terendah (kerugian paling besar). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan biaya *sustainability* tidak selalu sebanding dengan perbaikan *profit*. Meskipun *preventive* meningkatkan *reliability*, beban biaya yang terlalu tinggi justru memperburuk kinerja keuangan.

5.2.2 Keterkaitan *Reliability* dengan *Profit* Perhitungan

Berikut merupakan tabel keterkaitan *reliability* dengan *profit* perhitungan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.2.

Tabel 5. 2 Keterkaitan *Reliability* dengan *Profit* Perhitungan

Strategi	Reliability	Profit Perhitungan
Preventive	134.4	(882.987)
Predictive	122,2	(780.758)
Corrective	64	(584.105)

Tabel 5.2 menunjukkan bahwa strategi *preventive* memiliki *reliability* tertinggi tetapi *profit perhitungan* terendah. Sebaliknya, *corrective* dengan *reliability* terendah justru memiliki *profit perhitungan* tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa *reliability* yang sangat tinggi bukanlah jaminan *profit* yang baik, karena biaya untuk mempertahankan reliabilitas dapat menggerus keuntungan. Dengan ini, perusahaan perlu menemukan titik keseimbangan.

5.2.3 Keunggulan *Predictive* sebagai Strategi Seimbang

Berikut merupakan tabel keunggulan *predictive* sebagai strategi seimbang seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 3 Keunggulan *Predictive* sebagai Strategi Seimbang

Strategi	TradeOff-Index
Predictive	71.07
Preventive	69.33
Corrective	63.83

Tabel 5.3 memperlihatkan bahwa *predictive maintenance* memiliki *Trade-Off Index* tertinggi. Hasil ini membuktikan bahwa *predictive* merupakan keseimbangan yang paling baik antara *profit* dan keandalan. Strategi ini tidak unggul di satu indikator tertentu, tetapi

tidak lemah di indikator lain karakteristik paling diinginkan dalam pengambilan keputusan strategis.

5.2.4 Dampak Tersembunyi dari *Downtime* dan *Scrap*

Berikut merupakan tabel perbandingan *profit* berdasarkan dampak *downtime* dan *scrap* seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5. 4 Dampak Tersembunyi dari *Downtime* dan *Scrap*

Strategi	Profit Dataset	Profit Perhitungan	Hidden Cost
Corrective	1.043.712	(584.758)	1.628.470
Predictive	2.395.061	(780.758)	3.175.819
Preventive	2.569.030	(882.987)	3.452.017

Tabel 5.4 menunjukkan bahwa setelah memasukkan biaya *downtime* dan *scrap* (yang tidak dicatat perusahaan), semua strategi berubah dari untung menjadi rugi. Hasil ini memberikan pengetahuan bahwa adanya *hidden cost* yang signifikan dari aktivitas *maintenance*. Perusahaan selama ini melaporkan laba positif karena mengabaikan kerugian akibat mesin berhenti dan produk gagal.

5.2.5 Konsistensi Pola Antar Mesin

Berikut merupakan tabel perbandingan *tradeoff-index* tiap mesin seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.5.

Tabel 5. 5 Konsistensi Pola Antar Mesin

Mesin	Predictive	Preventive	Corrective
M1	72.64	70.81	65.12
M2	71.74	69.90	64.68
M3	70.48	68.60	63.26
M4	70.97	69.25	63.69
M5	69.74	68.18	62.60

Berdasarkan Tabel 5.5 memperlihatkan bahwa *predictive maintenance* selalu memiliki *TradeOff-Index* tertinggi di setiap mesin, tanpa terkecuali. Pola ini konsisten meskipun karakteristik tiap mesin berbeda. Hal tersebut menjelaskan bahwa keunggulan strategi *predictive* bersifat general dan dapat direkomendasikan untuk seluruh lini produksi.

5.3 *Manajerial Insight*

Berdasarkan *knowledge* yang telah dijelaskan pada sub-bab 5.2, berikut adalah rekomendasi yang dapat diterapkan oleh manajemen perusahaan.

5.3.1 Klasifikasi Mesin Kritis dan Non Kritis

Klasifikasi mesin kritis dan non-kritis dalam penelitian ini menggunakan *downtime* pada strategi *predictive* sebagai tolak ukur. Hal tersebut berdasarkan pada pertimbangan bahwa *predictive* merupakan strategi dengan *TradeOff-Index* tertinggi. Dengan menggunakan garis dasar dari strategi terbaik, perusahaan dapat mengidentifikasi mesin mana yang masih memiliki *downtime* tinggi meskipun telah menerapkan strategi yang terbaik. Mesin dengan *downtime* di atas rata-rata *predictive* (32,67 jam) dikategorikan sebagai mesin kritis karena membutuhkan perawatan lebih intensif, sementara mesin dengan *downtime* di bawah rata-rata dikategorikan sebagai mesin non-kritis. Berikut merupakan klasifikasi antara mesin kritis dan non kritis. Berikut merupakan tabel klasifikasi mesin seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.6.

Tabel 5. 6 Klasifikasi Mesin Kritis dan Non Kritis

Mesin	Downtime (Predictive)	Dibanding Rata-rata (32.67 jam)	Kategori
M1	23.46	< 32.67	Non-Kritis
M2	19.65	< 32.68	Non-Kritis
M3	41.21	> 32.69	Kritis
M4	26.90	< 32.70	Non-Kritis
M5	52.15	> 32.71	Kritis

Pada Tabel 5.6 Mesin 3 dan 5 dikategorikan sebagai mesin kritis karena memiliki *downtime* di atas rata-rata, sehingga berisiko tinggi mengganggu kelancaran produksi. Mesin 1, 2 dan 4 dikategorikan sebagai mesin non-kritis karena memiliki *downtime* di bawah rata-rata.

5.3.2 Rekomendasi Strategi Berdasarkan Klasifikasi Mesin

Berikut merupakan rekomendasi strategi pada setiap mesin seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.4.

Tabel 5. 7 Rekomendasi Strategi Berdasarkan Klasifikasi Mesin

Mesin	Kategori	Downtime (Predictive)	Rekomendasi
M1	Non-Kritis	23.46 jam	Predictive
M2	Non-Kritis	19.65 jam	Predictive
M3	Kritis	41.21 jam	Preventive
M4	Non-Kritis	26.90 jam	Predictive
M5	Kritis	52.15 jam	Preventive

Pada Tabel 5.7 Mesin non-kritis (M1, M2, M4) dengan *downtime* rendah direkomendasikan *predictive maintenance* karena cukup untuk menjaga keseimbangan. Mesin kritis (M3, M5) dengan *downtime* tinggi direkomendasikan *preventive maintenance* untuk perawatan lebih intensif. *Corrective maintenance* tidak direkomendasikan karena memiliki *reliability* terlalu rendah sehingga berisiko menyebabkan kerusakan besar mendadak.

5.3.3 Implementasi Bertahap dan Indikator Kinerja

Perusahaan disarankan untuk memulai implementasi *predictive maintenance* pada mesin non-kritis (M1, M2, M4) terlebih dahulu. Setelah berhasil, dapat dipertimbangkan untuk diterapkan pada mesin kritis (M3, M5) dengan tambahan *monitoring* secara berkala. Selain itu, *TradeOff-Index* dapat dijadikan sebagai indikator kinerja utama (*key metric*) *dashboard maintenance manager* untuk membandingkan kinerja antar strategi dan antar mesin setiap bulan.

5.3.4 Catat Biaya *Downtime* dan *Scrap* sebagai *Hidden Cost*

Setelah memasukkan biaya *downtime* dan *scrap*, semua strategi menghasilkan *profit* negatif. Hal tersebut menyatakan adanya *hidden cost* signifikan yang selama ini tidak tercatat. Manajemen wajib mulai mencatat kedua biaya ini secara nyata dalam laporan operasional bulanan sebagai dasar pengambilan keputusan.

5.3.5 Evaluasi Frekuensi *Preventive Maintenance*

Berdasarkan hasil analisis antara *reliability* dan *profit*, *preventive maintenance* menunjukkan *reliability* tertinggi dibandingkan strategi lainnya. Namun, strategi ini juga menghasilkan *profit* yang lebih rendah akibat tingginya biaya *maintenance* yang dikeluarkan secara rutin. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan *reliability* berbanding lurus dengan peningkatan biaya *maintenance*. Jika dilihat lebih detail, frekuensi *preventive maintenance* mencapai 151 kali selama periode penelitian, lebih tinggi dibandingkan *predictive* (137 kali) dan *corrective* (72 kali). Tingginya frekuensi ini berdampak pada total biaya *preventive* yang paling besar (16,47 juta) dan *profit perhitungan* yang paling rendah (rugi 882.987). Sementara itu, *predictive* dengan frekuensi hampir sama (137 kali) memiliki biaya 1,26 juta lebih hemat dan *profit* lebih baik.

Selain itu, berdasarkan *profit dataset* (tanpa memperhitungkan *downtime* dan *scrap*), *preventive* terlihat paling menguntungkan. Namun, setelah biaya *downtime* dan *scrap* dimasukkan ke dalam perhitungan *profit* perhitungan, *preventive* justru berubah menjadi paling merugi, sementara *corrective* menjadi paling tidak merugi. Hal ini menunjukkan bahwa perusahaan memiliki *hidden cost* (biaya *downtime* dan *scrap*) yang signifikan namun tidak tercatat. Dengan demikian, frekuensi *preventive maintenance* yang diterapkan terlalu sering menyebabkan biaya *maintenance* meningkat secara signifikan. Meskipun perawatan rutin mampu menjaga kondisi mesin tetap stabil, interval *maintenance* yang terlalu pendek dapat menyebabkan perusahaan mengeluarkan biaya lebih besar dibandingkan kebutuhan aktual mesin.

Oleh karena itu, perusahaan dapat mempertimbangkan evaluasi terhadap interval *preventive maintenance* dengan memperpanjang jadwal perawatan, terutama pada mesin non-kritis (M1, M2, M4) yang memiliki *downtime* rendah. Dengan demikian, perusahaan tetap dapat menjaga *reliability* mesin tanpa meningkatkan biaya *maintenance* secara berlebihan, sehingga keseimbangan antara performa operasional dan *profit* dapat lebih terjaga.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan total *sustainability cost* (penjumlahan *economic cost*, *environmental cost*, dan *social cost*), perbandingan ketiga strategi *maintenance* adalah *corrective* : *predictive* : *preventive* = 1 : 1,99 : 2,15. Strategi *corrective maintenance* memiliki total *sustainability cost* terendah yaitu sebesar 7.653.855, diikuti oleh *predictive maintenance* dengan total 15.208.258 (hampir 2 kali lipat dari *corrective*), dan *preventive maintenance* memiliki total tertinggi yaitu 16.470.737 (lebih dari *corrective* dan *predictive*). Berdasarkan frekuensi pelaksanaannya, strategi *preventive maintenance* memiliki frekuensi tertinggi yaitu 151 kali, diikuti *predictive maintenance* sebanyak 137 kali, dan *corrective maintenance* sebanyak 72 kali. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *preventive maintenance* memerlukan aktivitas perawatan yang lebih sering dibandingkan strategi lainnya. Dengan demikian, semakin tinggi frekuensi perawatan, semakin besar total *sustainability cost* yang harus ditanggung perusahaan.
2. Berdasarkan hasil analisis *trade-off index* dan klasifikasi mesin, strategi *predictive maintenance* direkomendasikan untuk Mesin 1, 2, dan 4 yang termasuk kategori mesin non-kritis. Pada Mesin 1, *predictive maintenance* menghasilkan *profit* 12,29% lebih tinggi dibandingkan *preventive maintenance*, meskipun *reliability* 9,11% lebih rendah. Pada Mesin 2, *predictive maintenance* menghasilkan *profit* 12,43% lebih tinggi dengan *reliability* 9,14% lebih rendah. Sementara itu, pada Mesin 4, *predictive maintenance* menghasilkan *profit* 11,54% lebih tinggi dengan *reliability* 9,21% lebih rendah. Karena mesin-mesin tersebut termasuk kategori non-kritis, peningkatan *profit* dinilai lebih menguntungkan dibandingkan penurunan *reliability* yang relatif kecil.

Sebaliknya, strategi *preventive maintenance* direkomendasikan untuk Mesin 3 dan 5 yang termasuk kategori mesin kritis. Pada Mesin 3, *preventive maintenance* menghasilkan *reliability* 9,16% lebih tinggi dibandingkan *predictive maintenance*, meskipun *profit* 11,68% lebih rendah. Pada Mesin 5, *preventive maintenance* menghasilkan *reliability* 9,14% lebih tinggi dengan *profit* 10,34% lebih rendah. Karena mesin tersebut termasuk kategori kritis, peningkatan *reliability* menjadi prioritas utama untuk menjaga kontinuitas operasi dan mengurangi risiko gangguan produksi. Dengan mempertimbangkan hasil *trade-off* antara profit dan *reliability* serta tingkat kritikalitas mesin, strategi *predictive maintenance* direkomendasikan untuk Mesin 1, Mesin 2, dan Mesin 4 yang termasuk kategori mesin non-kritis. Sementara itu, strategi *preventive maintenance* direkomendasikan untuk Mesin 3 dan Mesin 5 yang termasuk kategori mesin kritis karena lebih mampu menjaga keandalan mesin dan mengurangi risiko gangguan operasional.

6.2 Saran

Berdasarkan keterbatasan dan temuan dalam penelitian ini, berikut saran untuk penelitian selanjutnya.

1. Penelitian selanjutnya dapat menentukan besaran frekuensi atau interval *preventive* yang optimal (misalnya: berapa kali per minggu atau per bulan) dengan mempertimbangkan *trade-off* antara biaya, *reliability*, dan *profit*, menggunakan metode seperti uji coba bertahap.
2. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem pencatatan biaya *downtime* dan *scrap* yang lebih terstruktur, sehingga perusahaan dapat melihat dampak riil biaya tersembunyi terhadap profitabilitas.
3. Penelitian selanjutnya dapat melakukan studi kelayakan (*cost-benefit analysis*) untuk implementasi *predictive maintenance*, mengingat strategi ini membutuhkan investasi awal yang tidak kecil (sensor, IoT, AI, SDM).

4. Penelitian selanjutnya perlu menggunakan data *material cost* yang tersedia secara spesifik per mesin (bukan agregat) agar perhitungan *sustainability cost* lebih akurat mendekati total biaya riil perusahaan.

DAFTAR PUSTAKA

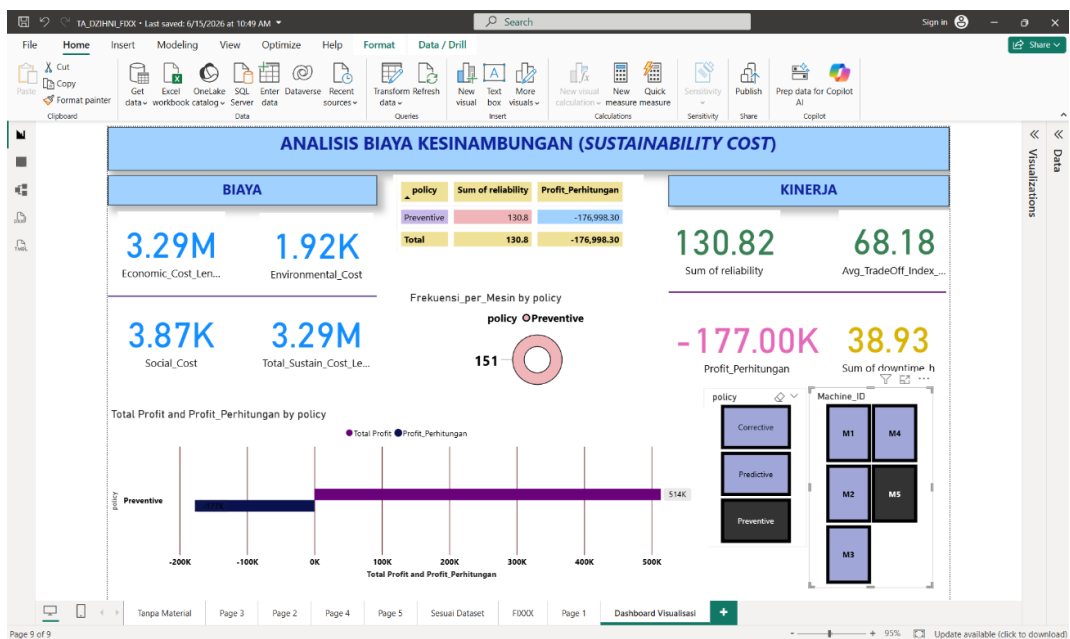
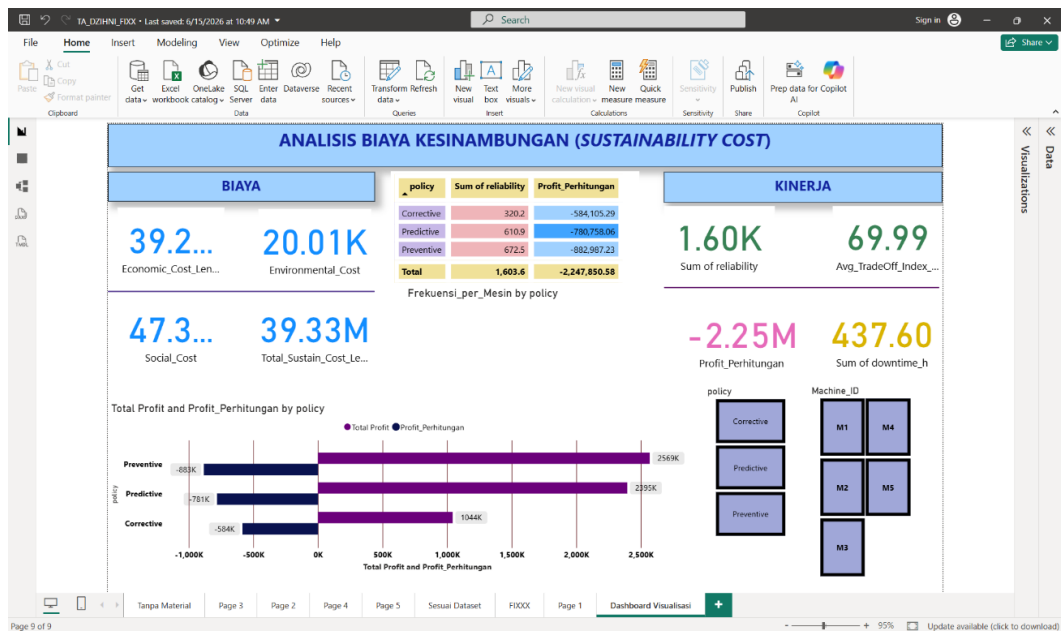
- Afifah, D., Ekonomi Bisnis, F., & Trilogi, U. (2021). Pencapaian Target Sustainable Development Goals dengan Konsep Material Flow Cost Accounting. *History Article: Konsep Material Flow Cost Accounting. MAKSIMUM*, 11(1), 27–42. <https://jurnal.unimus.ac.id/index.php/MAX>
- Ali, B. M., Al-Musawi, T. J., Mohammed, A., Fakhruldeen, H. F., Hanoon, T. M., Khurramov, A., Khalaf, D. H., & Algburi, S. (2025). Sustainable strategies for preventive maintenance and replacement in photovoltaic power systems: Enhancing reliability, efficiency, and system economy. *Unconventional Resources*, 6. <https://doi.org/10.1016/j.uncre.2025.100170>
- Andriansyah, D. (n.d.). *Implementasi Extract-Transform-Load (ETL) Data Warehouse Laporan Harian Pool*.
- Arjomandi, M. A., Dinmohammadi, F., Mosallanezhad, B., & Shafiee, M. (2021). A fuzzy DEMATEL-ANP-VIKOR analytical model for maintenance strategy selection of safety critical assets. *Advances in Mechanical Engineering*, 13(4). <https://doi.org/10.1177/1687814021994965>
- Arora, S. J., Ebbecke, C., Rabe, M., & Fisch, J. (2021). Methodology for the assessment of potentials, selection, and design of Predictive Maintenance solutions. *Procedia CIRP*, 104, 708–713. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.119>
- Arya Guna, R., & Sultan Ageng Tirtayasa, U. (2025). *Jurnal Riset Multidisiplin Edukasi Analisis Maintenance Mesin Milling Di Cv Prima Lotus Jakarta* (Vol. 2). <https://journal.hasbaedukasi.co.id/index.php/jurmieHalaman:465-471>
- Avakh Darestania, S., Ganjib, M., & Imannezhadb, R. (2020). What are the key determinants of maintenance performance? *Production*, 30, 1–16. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20190155>
- Benhanifia, A., Cheikh, Z. Ben, Oliveira, P. M., Valente, A., & Lima, J. (2025). Systematic review of predictive maintenance practices in the manufacturing sector. In *Intelligent Systems with Applications* (Vol. 26). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200501>
- Borjalilu, N., & Ghambari, M. (2018). Optimal maintenance strategy selection based on a fuzzy analytical network process: A case study on a 5-MW powerhouse. *International Journal of Engineering Business Management*, 10. <https://doi.org/10.1177/1847979018776172>
- Breznická, A., Kohutiar, M., Krbat'a, M., Eckert, M., & Mikuš, P. (2023). Reliability Analysis during the Life Cycle of a Technical System and the Monitoring of Reliability Properties. In *Systems* (Vol. 11, Number 12). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/systems11120556>
- Burhan, R., & Bagus Herlambang, M. (2024). *Implementasi Predictive Maintenance Pada Bearing Dengan Menggunakan Machine Learning Untuk Memprediksi Temperatur*. 9(1).
- Dantan, J. Y., Etienne, A., Mohammadi, M., Khezri, A., Homri, L., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Siadat, A. (2022). Modular cost model for Tolerance allocation, Process selection and Inspection planning. *Procedia CIRP*, 114, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.001>

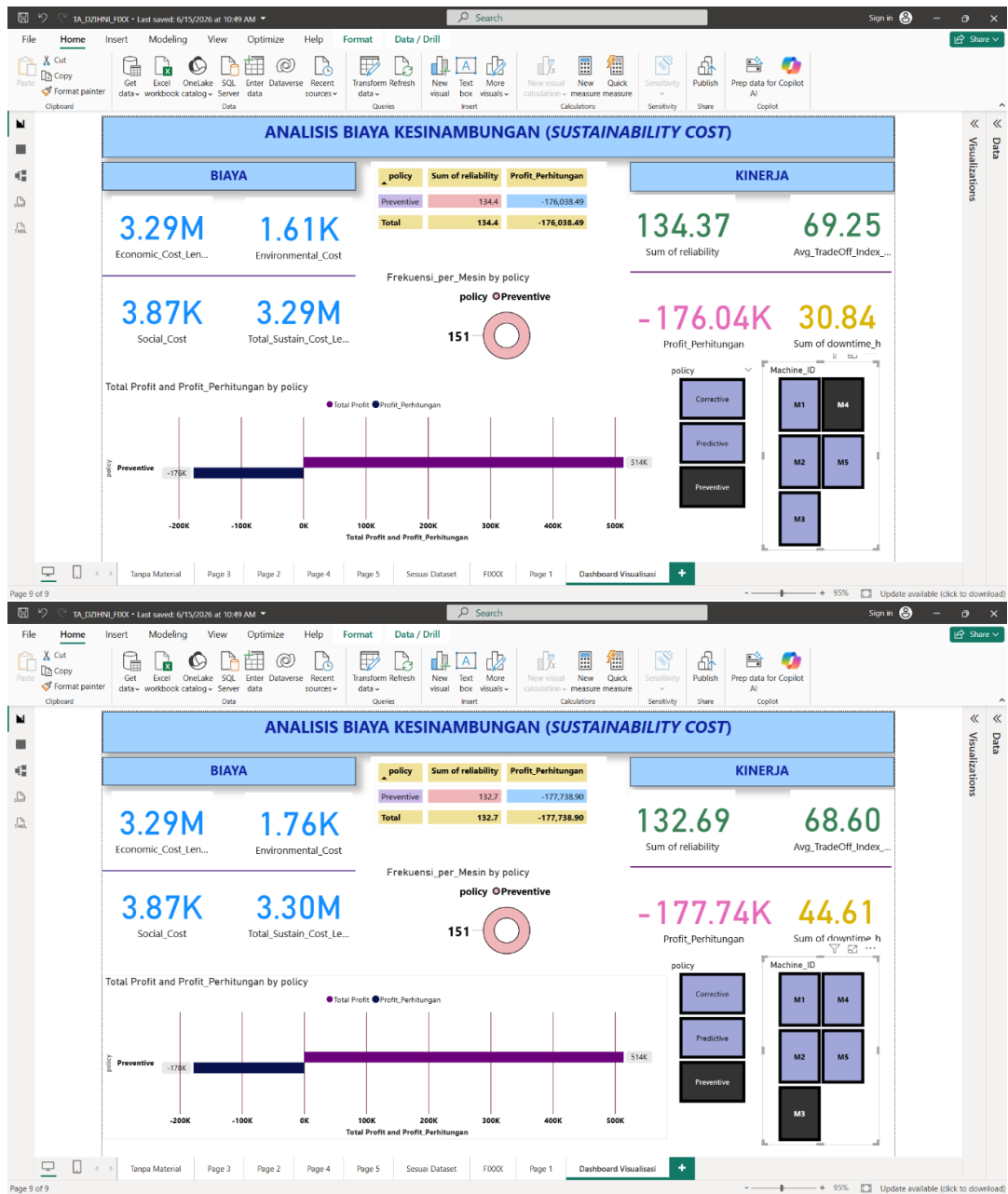
- Dhamar Jati, S., Suryo, B., & Lutfiananda, D. (2024). *Rencana Preventive Maintenance CWSM (Cathodewashing Striping Machine) di PT Chiyoda International Indonesia (Plant PT Smelting)*. 15(2). <https://ejournal.itn.ac.id/index.php/flywheel/>
- Dian Dameraia, A. S., Zahra, A., & Haerul Jaman, J. (n.d.). *SISTEMASI: Jurnal Sistem Informasi Penggunaan Power BI untuk menerapkan Business Intelligence terhadap Penjualan Produk Using Power BI to Implement Business Intelligence for Product Sales*. Retrieved <http://sistemasi.ftik.unisi.ac.id>
- Dinh, D. H., Do, P., Lung, B., & Bang, T. Q. (2025). Predictive maintenance optimization for manufacturing systems considering perfect and imperfect inspections: application to injection molding machine. *CIRP Annals*, 74(1), 597–601. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2025.03.027>
- Elmardi, O. M., Khayal, S., & Siyad, H. O. (2025). *A Comprehensive Review of Maintenance Strategies and Their Impact on Industrial Performance* (Vol. 2, Number 4). <https://www.researchgate.net/publication/393515978>
- Faghihinia, E., & Mollaverdi, N. (2012). *Building a maintenance policy through a multi-criterion decision-making model*. <http://www.jiei-tsb.com/content/8/1/14>
- Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. In *Journal of Manufacturing Systems* (Vol. 72, pp. 38–58). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001>
- Giliyana, S. (2025). Anomaly detection using different types of machine learning models in the context of “smart maintenance technologies in the manufacturing industry.” *Procedia Computer Science*, 253, 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.01.156>
- Harianja, R., Sastra, A., Tarigan, P., & Anisah, S. (2025). Pengaruh Pemeliharaan Predictive Maintenance Terhadap Kinerja Sistem Distribusi di Wilayah Rawan Gangguan. *Jurnal Indragiri Penelitian Multidisiplin*, 5(2).
- Hosseinzadeh, A., Chen, F. F., Shahin, M., & Bouzary, H. (2023). *Manufacturing Letters A Predictive Maintenance Approach in Manufacturing Systems via AI-based Early Failure Detection-NC-ND license* (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>) Peer-review under responsibility of the Scientific Committee of the NAMRI/SME. www.sciencedirect.com
- Ibrahim, Y. M., Hami, N., & Othman, S. N. (2019). Integrating sustainable maintenance into sustainable manufacturing practices and its relationship with sustainability performance: A conceptual framework. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(4), 30–39. <https://doi.org/10.32479/ijeep.7709>
- Johnston, A., Soban, D., & Long, A. (2024). Visual Analytics Enabling Optimisation of Downtime †. *Engineering Proceedings*, 65(1). <https://doi.org/10.3390/engproc2024065006>
- Kaldas, O., Shihata, L. A., & Kiefer, J. (2020). An index-based sustainability assessment framework for manufacturing organizations. *Procedia CIRP*, 97, 235–240. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.231>
- Karuppiyah, K., Sankaranarayanan, B., & Ali, S. M. (2021). On sustainable predictive maintenance: Exploration of key barriers using an integrated approach. *Sustainable*

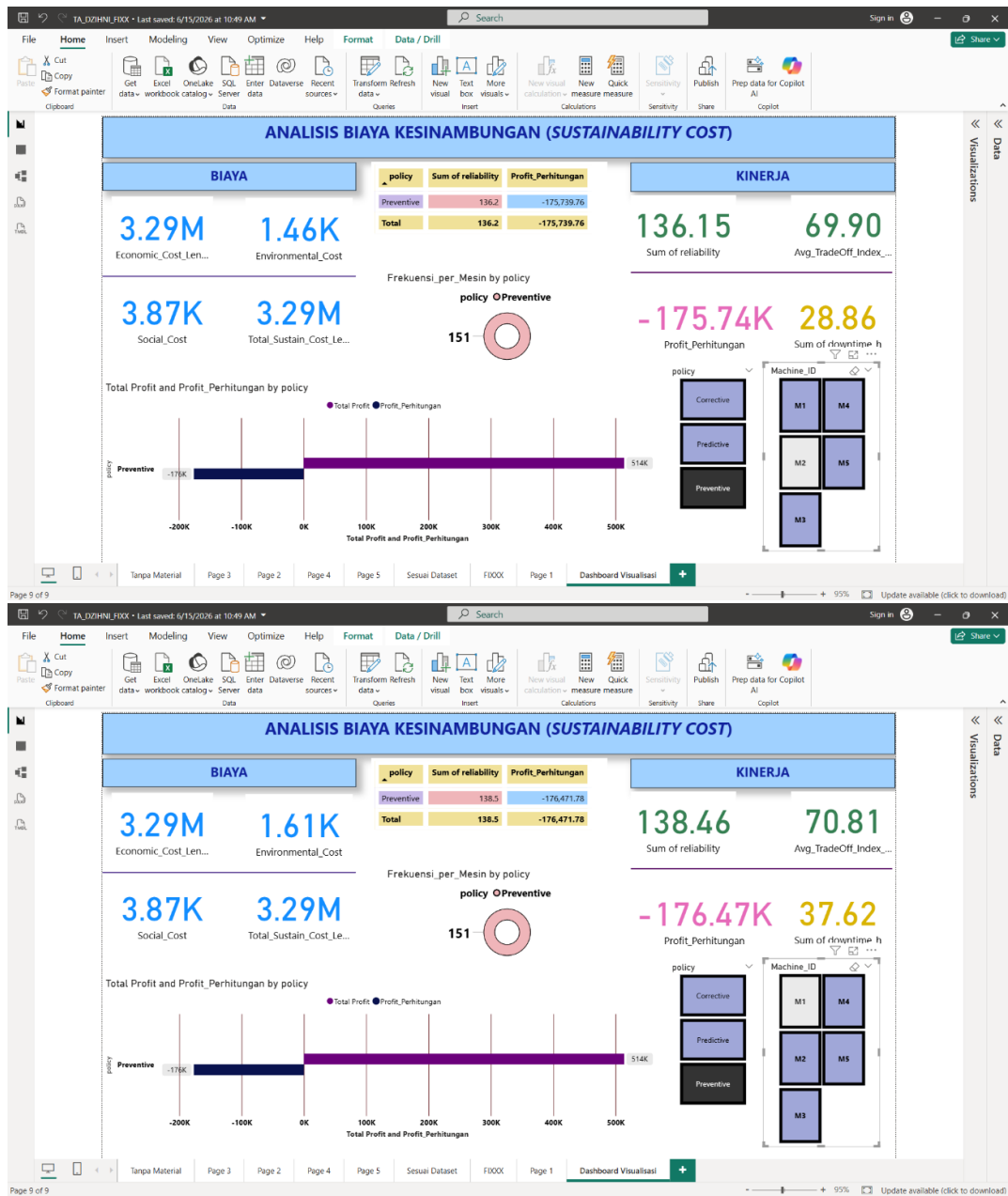
- Production and Consumption*, 27, 1537–1553. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.03.023>
- Kravchenko, M., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2021). A trade-off navigation framework as a decision support for conflicting sustainability indicators within circular economy implementation in the manufacturing industry. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su13010314>
- Lu, B., Chen, Z., & Zhao, X. (2021). Data-driven dynamic predictive maintenance for a manufacturing system with quality deterioration and online sensors. *Reliability Engineering and System Safety*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107628>
- Lucato, W. C., Santos, J. C. da S., & Pacchini, A. P. T. (2018). Measuring the sustainability of a manufacturing process: A conceptual framework. *Sustainability (Switzerland)*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010081>
- Mahsa Aziza, R., Surentu, B. J., Amir, M. B., Salsabilla, A. A., Rochman, D., Kunci:, K., Mesin, P., Chain, M., Perawatan, S., & Biaya, E. (n.d.). Pemilihan Strategi Pemeliharaan Mesin dengan. In *Menggunakan Metode Markov Chain* (Vol. 1, Number 1).
- Mallioris, P., Aivazidou, E., & Bechtsis, D. (2024). Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping. In *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (Vol. 50, pp. 80–103). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.02.003>
- Nauli Siregar, C. T., Kindangen, P., & Debbie Palandeng, I. (2022). Kota Bitung Evaluation Of Maintenance On Production Machinery And Equipment At Pt. Multi Nabati Sulawesi Bitung City. In *428 Jurnal EMBA* (Vol. 10, Number 3). MNS.
- Nugroho, A. W., & Utama, A. A. G. S. (2025). Business Intelligence Systems and Their Impact on Organizational Decision-Making and Performance Outcomes: Literature Review. *Owner*, 9(2). <https://doi.org/10.33395/owner.v9i2.2646>
- 'Permatasari, C., 'Madhawi, N. N., 'Dasi, D., & 'Wildan, M. (2025). ANALISIS METODE Submitted : 02/01/2025 Reviewed : 02/01/2025 Accepted : 02/01/2025 Published : 15/01/2025 Maintenance Berdasarkan Mtbf Dan Mtttr Pada Peralatan Navigasi Di Perum Lppnpi Cabang Denpasar. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, 8, 1–7.
- Picozzi, P., Nocco, U., Pezzillo, A., De Cosmo, A., & Cimolin, V. (2024). The Use of Business Intelligence Software to Monitor Key Performance Indicators (KPIs) for the Evaluation of a Computerized Maintenance Management System (CMMS). *Electronics (Switzerland)*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/electronics13122286>
- Prasetya, P. H., & Susilowati, M. (2020). Pemanfaatan Business Intelligence Di Perguruan Tinggi . *Kurawal Jurnal Teknologi, Informasi Dan Industri* , 3, 1–18.
- Putu, I., Prasetya, W., Nyoman, I., & Kurniawan, H. (2021). Implementasi ETL (Extract, Transform, Load) pada Data warehouse Penjualan Menggunakan Tools Pentaho. *TIERS Information Technology Journal*, 2(1), 39–47. <https://journal.undiknas.ac.id/index.php/tiers>
- Ramadhan, A., Bagus, I., Widi, I., & Gustany, W. (2024). Analisis Preventive Maintenance Mesin PSD Untuk Meningkatkan Keandalan Dengan Metode

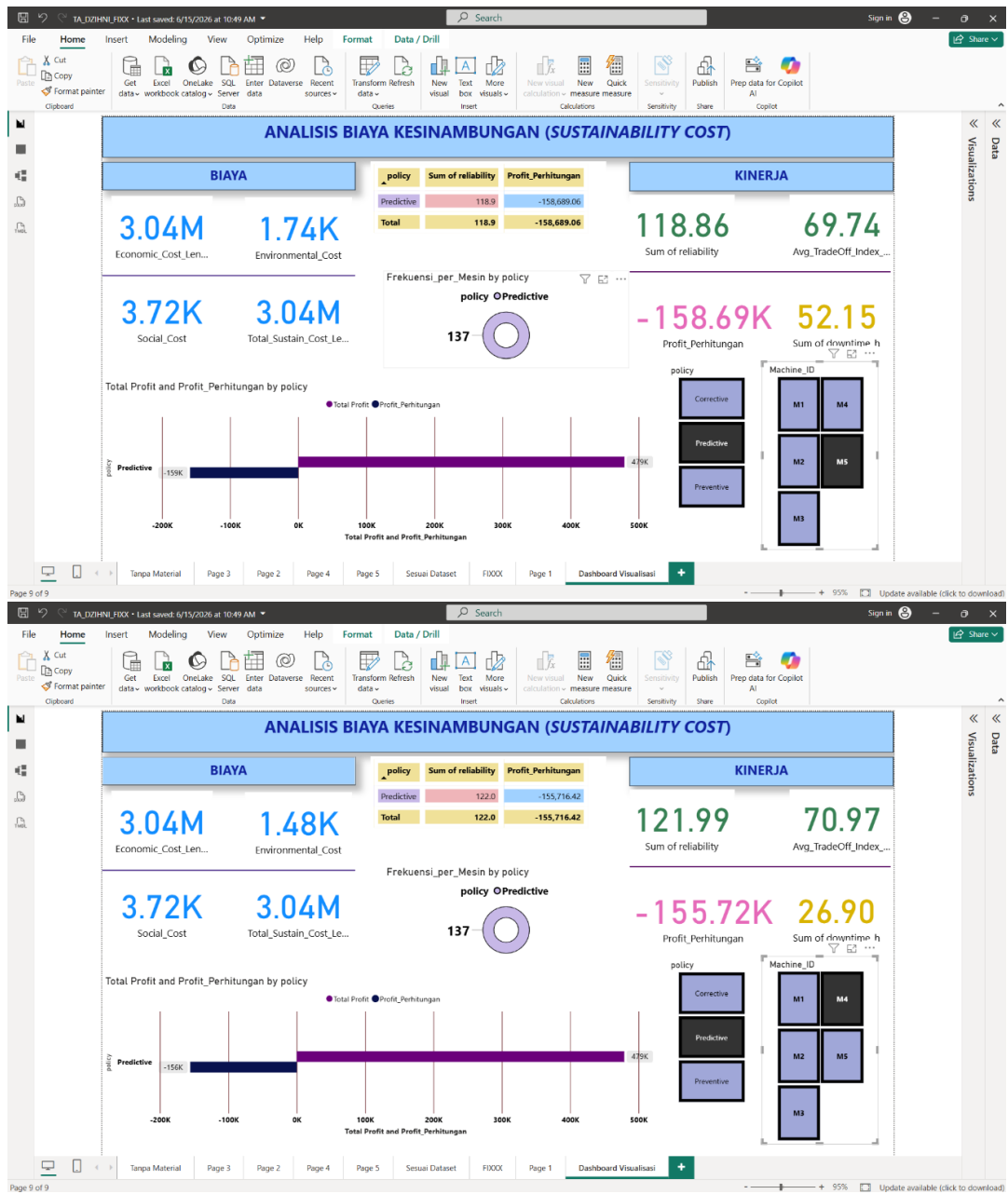
- Reliability-Centered Maintenance di MRT Jakarta. *Proceeding Mercu Buana Conference on Industrial Engineering*, 6, 42–55.
- Rizky, A., Nr, A., & Pudji, E. (2021a). Analisis Kebijakan Perawatan Mesin Secara Corrective Dan Preventive Dengan Metode Rcm Di Cv Xyz. In *Juminten : Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi* (Vol. 02, Number 03).
- Rizky, A., Nr, A., & Pudji, E. (2021b). Analisis Kebijakan Perawatan Mesin Secara Corrective Dan Preventive Dengan Metode Rcm Di Cv Xyz. In *Juminten : Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi* (Vol. 02, Number 03).
- Sitinjak, F. R., & Silalahi, F. T. R. (2023). Analisis Strategi Pemeliharaan Preventive Maintenance Excavator Menggunakan Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP) dan Analisis Sensitivitas. *Journal of Integrated System*, 6(2), 226–242. <https://doi.org/10.28932/jis.v6i2.7633>
- Nurbaiti, B., Ria Armayani Hasibuan, R., & Nabilla Siregar, S. (n.d.). KONSEP SUSTAINABLE DEVELOPMENT. *Jurnal Ekonomi Dan Perbankan Syariah*, 8(2), 2023. <https://doi.org/10.30651/jms.v8i2.19939>
- Swarnakar, V., Singh, A. R., Antony, J., Jayaraman, R., Tiwari, A. K., Rathi, R., & Cudney, E. (2022). Prioritizing Indicators for Sustainability Assessment in Manufacturing Process: An Integrated Approach. *Sustainability (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/su14063264>
- Thomas, D., & Weiss, B. (n.d.). Maintenance Costs and Advanced Maintenance Techniques in Manufacturing Machinery: Survey and Analysis. *International Journal of Prognostics and Health Management*. Retrieved <https://energy.gov/sites/prod/files/2013/10/f3/o>
- Thomas, D., & Weiss, B. (2021). Maintenance costs and advanced maintenance techniques in manufacturing machinery: Survey and analysis. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.36001/IJPHM.2021.V12I1.2883>
- Tito Lukito, Rosi Herlianti, Malinda Mayanti, & Lien Herliani Kusumah. (2025). Implementation of predictive maintenance in various Industry: A Review. *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi Dan Informatika*, 12(1), 133–144. <https://doi.org/10.37373/tekno.v12i1.1338>
- Ucar, A., Karakose, M., & Kırımça, N. (2024). Artificial Intelligence for Predictive Maintenance Applications: Key Components, Trustworthiness, and Future Trends. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Number 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/app14020898>
- Widya Astuti, F., Mail, A., & Alisyahbana, T. (n.d.). *Perencanaan Perawatan Mesin Circulation Water Pump (CWP) dengan metode Markov Chain untuk Meminimumkan Biaya Perawatan di PT. XYZ*.
- Wigger, M., Burggräf, P., Steinberg, F., Becher, A., & Heinbach, B. (2025). Integrating artificial intelligence into energy management: A case study on energy consumption data analysis and forecasting in a German manufacturing company. *Energy and AI*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100576>

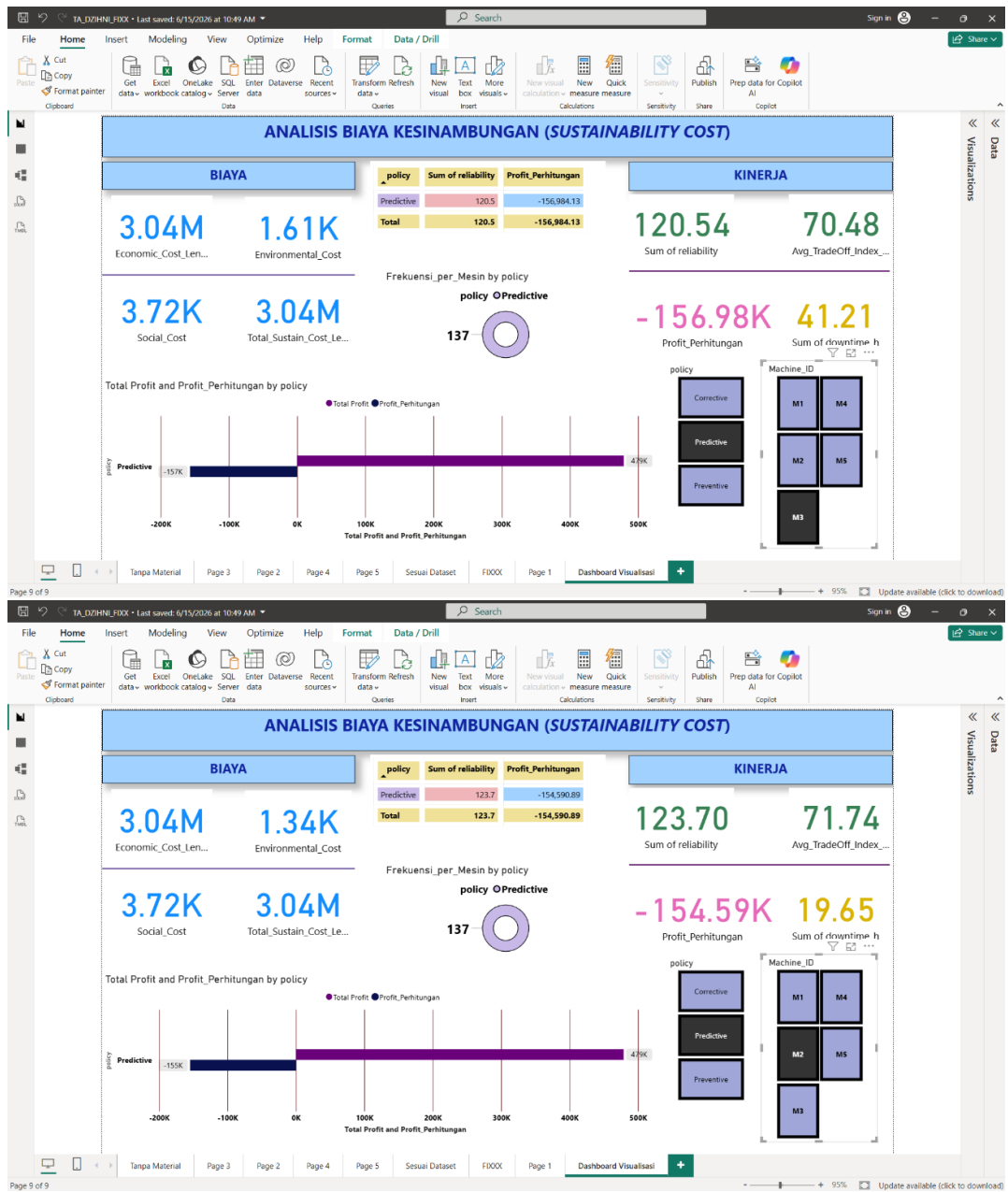
LAMPIRAN

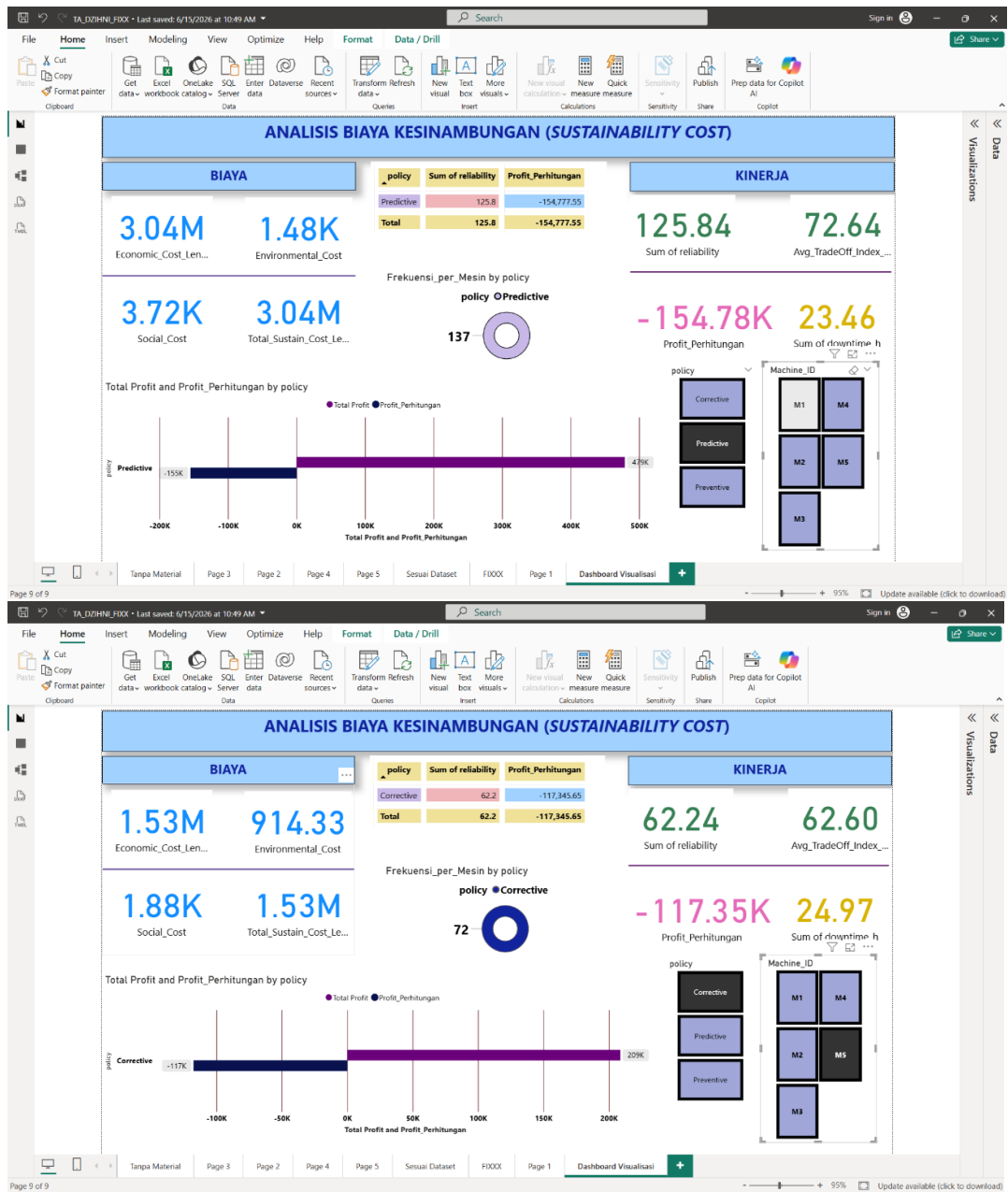


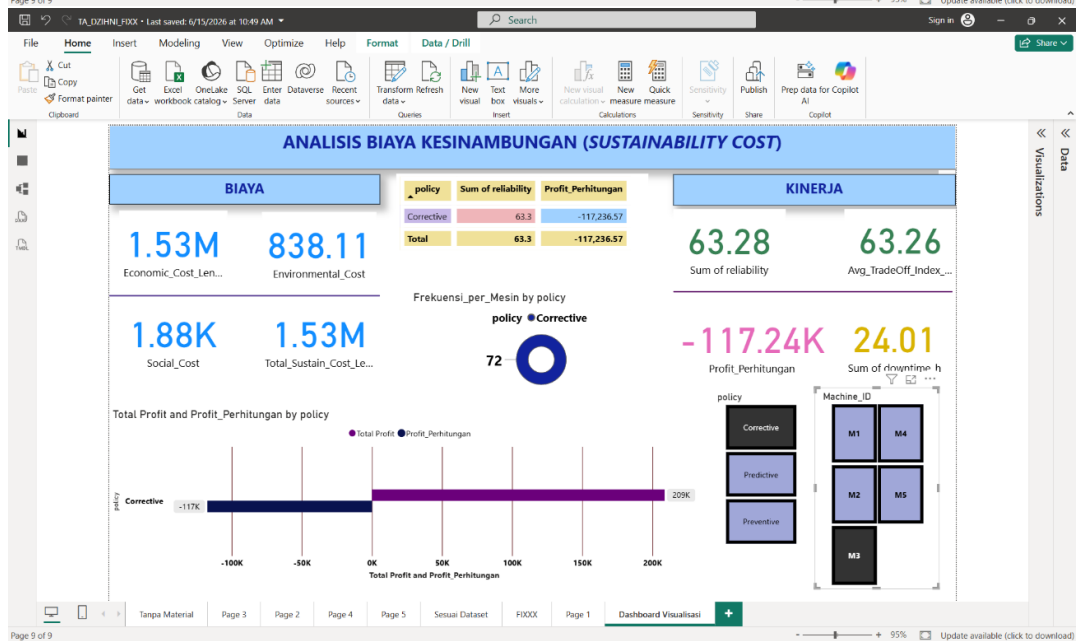
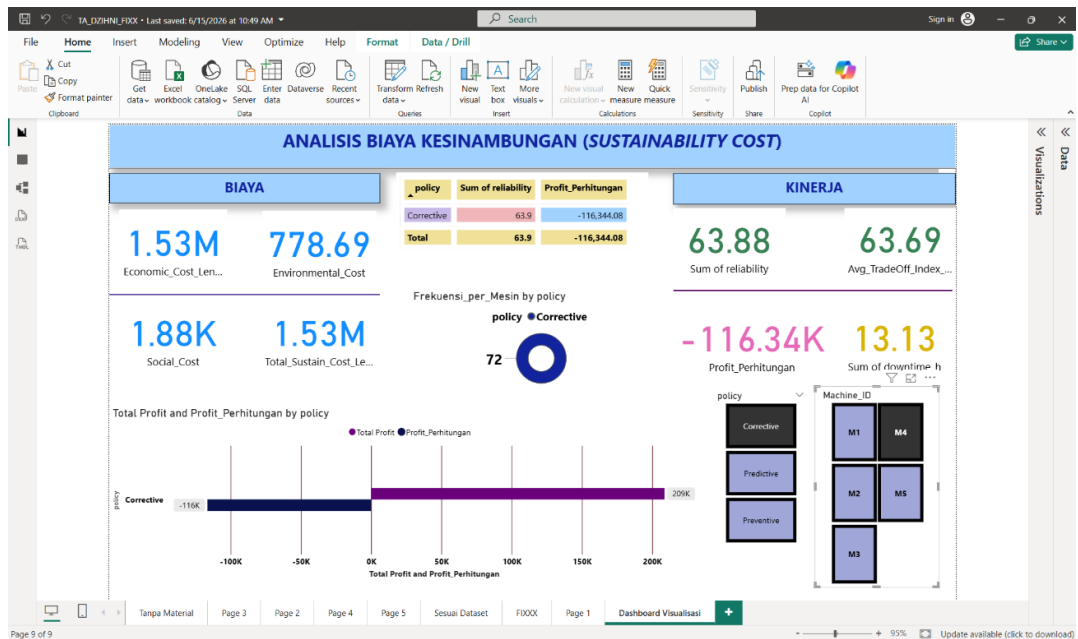


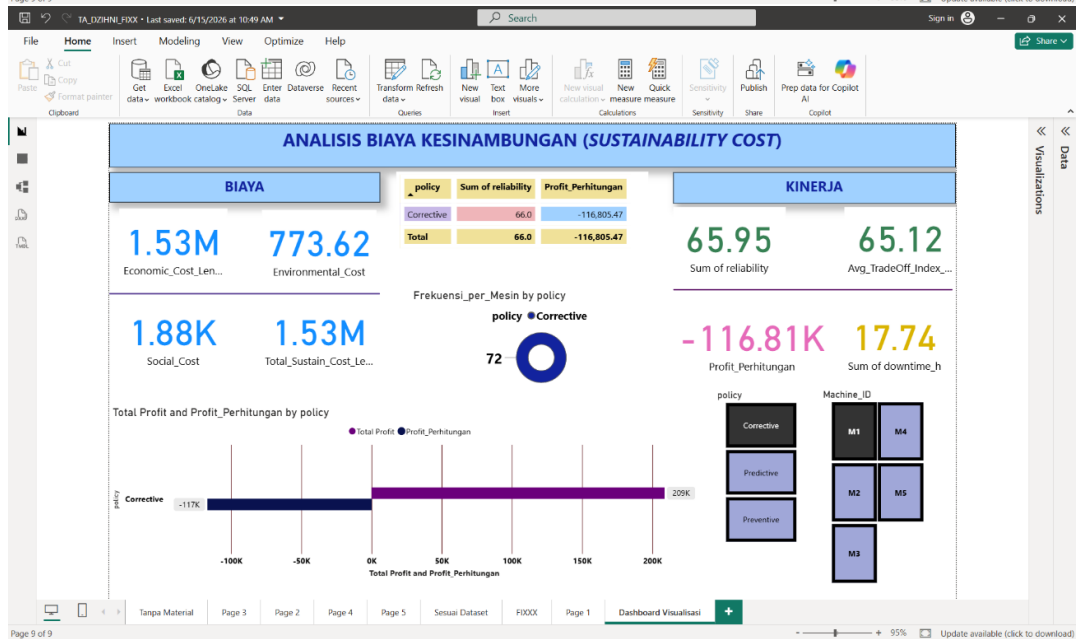
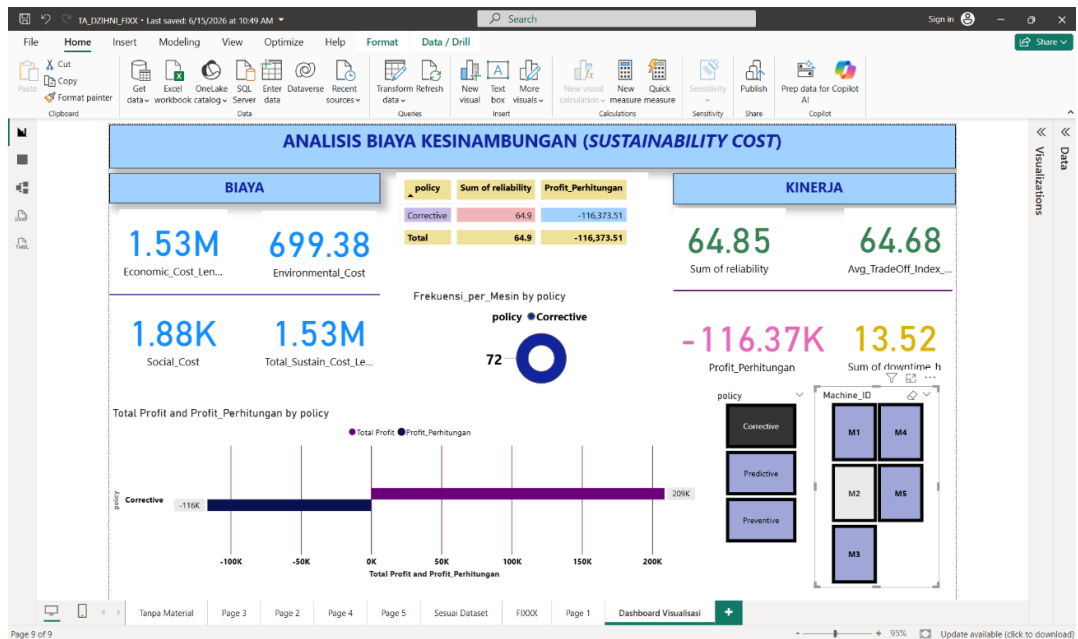












TA_D2HNL_FDXX • Last saved: 6/15/2026 at 10:49 AM

File Home Help

Clipboard Get Excel OneLake SQL Server Enter data Database Recent sources Transform Refresh data Manage relationships New measure column New table Calculation group New parameter View as Manage roles Security Q&A Language Linguistic schema Sensitivity Publish

parameters

- notes
- parameter
- value

records

- age_h
- ambient_humidity_pct
- ambient_temp_c
- carbon_pct_s
- carbon_lg
- datetime
- day_of_week
- disposal_cost_s
- downtime_h

Properties

Cards

Show the database in the header when applicable

No

Show related fields when card is collapsed

Yes

Pin related fields to top of card

No

Tables

Model

Search

parameters

records

All tables

25°C Berawan

TA_D2HNL_FDXX • Last saved: 6/15/2026 at 10:49 AM

File Home Help Table tools

Name records

Manage relationships New measure column New table Mark as date table

Structure

Relationships

Calculations

Calendars

offit_s	target_failure_next_shift	Machine_ID	vibration_g	temp_C	health	age_h	reliability	failed	downtime_h	maint_time_h	maintenance	energy_kwh	water_l	scrap_rate	tradeoff_index
3203.92	1	M2	0.769	37	0.887	56.8	0.921574	0	0.05	0	0	0	39.7	0	0.0564
5119.59	0	M2	0.816	39.1	0.872	83.8	0.900976	0	0.08	0	0	0	39.84	0	0.0571
3753.19	1	M2	0.662	36.8	0.866	96.2	0.922991	0	0	0	0	0	39.63	0	0.0487
3259.42	1	M2	0.894	40.6	0.859	108.7	0.90334	0	0.4	0	0	0	37.9	0	0.0632
5948.47	0	M2	1.118	36.7	0.846	134	0.902054	0	0.05	0	0	0	40.33	0	0.0593
5132.2	0	M2	1.206	34	0.832	160.1	0.905557	0	0.17	0	0	0	40.02	0	0.0726
3871.88	1	M2	1.244	37.4	0.818	186.1	0.904016	0	0.07	0	0	0	40.54	0	0.0677
3243.71	1	M2	1.374	38.5	0.81	199.4	0.884916	0	0.01	0	0	0	41.07	0	0.0766
3175.23	1	M2	1.5	38.3	0.802	212.6	0.876846	0	0.07	0	0	0	39.6	0	0.0723
3295.45	1	M2	1.5	37.8	0.795	225.4	0.905827	0	0.01	0	0	0	41.24	0	0.0693
2362.79	1	M2	1.5	38.4	0.789	237.6	0.898184	0	0.08	0	0	0	38.74	0	0.0786
2364.05	1	M2	1.454	34.5	0.781	250.9	0.885091	0	0.22	0	0	0	39.87	0	0.0826
2381.63	0	M2	1.5	37.9	0.774	263.1	0.895544	0	0.08	0	0	0	39.83	0	0.0821
4416.18	1	M2	0.881	39.8	0.951	26.5	0.910567	0	0.26	0	0	0	39.46	0	0.0512
5166.42	1	M2	0.748	34.6	0.945	28.9	0.928908	0	0.08	0	0	0	36.94	0	0.0382
3799.45	0	M2	0.632	37.6	0.938	52.3	0.917838	0	0.03	0	0	0	39.55	0	0.0471
2943.13	1	M2	0.701	40.3	0.931	64.3	0.916748	0	0.07	0	0	0	38.14	0	0.0541
4270.77	0	M2	1.091	38.5	0.911	101.8	0.907691	0	0.62	0	0	0	31.91	0	0.0609
3838.63	0	M2	1.079	33.2	0.905	114.1	0.911189	0	0	0	0	0	35.27	0	0.0533
4589.79	0	M2	0.864	29.6	0.899	127	0.925959	0	0.07	0	0	0	31.9	0	0.0419
4753.33	1	M2	0.951	39.3	0.91	25.4	0.903363	0	0.02	0	0	0	34.94	0	0.0495
3871.46	0	M2	0.966	35.9	0.903	37.9	0.908357	0	0.02	0	0	0	35.8	0	0.0561
5286.24	0	M2	0.528	35.1	0.897	50.9	0.925216	0	0.32	0	0	0	34.08	0	0.0391
5807.89	0	M2	0.901	28.9	0.891	62.9	0.918579	0	0.05	0	0	0	35.41	0	0.04
3916.9	1	M2	1.047	40.3	0.884	75.6	0.904476	0	0.05	0	0	0	36.2	0	0.0501
4204.38	1	M2	0.751	36.8	0.877	88.7	0.912912	0	0.05	0	0	0	39.08	0	0.0466
4347.4	0	M2	0.987	36.2	0.869	102.4	0.911342	0	0.08	0	0	0	32.25	0	0.0608
3137.88	0	M2	1.127	35.6	0.862	115.5	0.901135	0	0.07	0	0	0	32.31	0	0.0583
3841.72	0	M2	0.919	34.8	0.855	128.5	0.906573	0	0.06	0	0	0	27.25	0	0.0517
5297.79	1	M2	1.036	30.9	0.841	154.9	0.90825	0	0.04	0	0	0	27.33	0	0.0552
2805.53	0	M2	1.411	39.9	0.834	167.6	0.895264	0	0.07	0	0	0	29.32	0	0.0783

Table records (1,800 rows)

Update available (click to download)

20:51 18/06/2026

TA_D2HNFDDX - Last saved: 6/15/2026 at 10:49 AM

File Home Help Table tools

Name records

Structure

Manage relationships

New measure

measure column

Calculations

New table

Mark as date table

Calendars

date	datetime	day_of_week	shift	week	month	policy	operators_team	ambient_temp_C	ambient_humidity_pct	overtime_h	planned_units	produced_units	good_units	scrap_units	line_scrap_rate
01/01/2025 00:00:00	Wednesday	Day	1	1	1	Preventive	E	26.41	61	0.13	950	408	312	96	
02/01/2025 00:00:00	Thursday	Day	1	1	1	Preventive	G	29.43	72	1.55	950	688	521	167	
02/01/2025 12:00:00	Thursday	Night	1	1	1	Predictive	C	25.73	58.4	0.43	950	505	382	123	
03/01/2025 00:00:00	Friday	Day	1	1	1	Preventive	C	31.27	72.7	0.51	923	598	429	169	
04/01/2025 00:00:00	Saturday	Day	1	1	1	Preventive	B	23.21	71.4	0.56	950	666	523	143	
05/01/2025 00:00:00	Sunday	Day	1	1	1	Preventive	B	22.01	55.3	1.58	950	740	553	187	
06/01/2025 00:00:00	Monday	Day	2	1	1	Predictive	G	25.25	65.6	0	950	597	440	157	
06/01/2025 12:00:00	Monday	Night	2	1	1	Corrective	G	25.94	70.9	1.38	950	691	486	205	
07/01/2025 00:00:00	Tuesday	Day	2	1	1	Preventive	D	27.85	80.7	1.17	915	669	471	198	
07/01/2025 12:00:00	Tuesday	Night	2	1	1	Predictive	C	25.32	40	0.81	950	644	458	186	
08/01/2025 00:00:00	Wednesday	Day	2	1	1	Corrective	C	27.92	58.2	0.14	896	606	416	190	
08/01/2025 12:00:00	Wednesday	Night	2	1	1	Predictive	C	25.05	72.6	1.33	939	611	420	191	
09/01/2025 00:00:00	Thursday	Day	2	1	1	Corrective	F	25.85	60.7	0.23	922	597	411	186	
10/01/2025 12:00:00	Friday	Night	2	1	1	Predictive	D	26.33	62.2	1.45	950	627	470	157	
11/01/2025 00:00:00	Saturday	Day	2	1	1	Preventive	H	23.76	56.7	0.4	890	601	468	133	
11/01/2025 12:00:00	Saturday	Night	2	1	1	Predictive	B	27.27	64.2	1.36	950	609	447	162	
12/01/2025 00:00:00	Sunday	Day	2	1	1	Corrective	F	29.62	71.7	0	913	543	389	154	
13/01/2025 12:00:00	Monday	Night	3	1	1	Preventive	G	27.2	73.8	0	788	545	416	129	
14/01/2025 00:00:00	Tuesday	Day	3	1	1	Corrective	F	23.98	73.5	0.25	833	573	425	148	
14/01/2025 12:00:00	Tuesday	Night	3	1	1	Corrective	C	21.39	58.4	0.87	769	601	457	144	
16/01/2025 00:00:00	Thursday	Day	3	1	1	Predictive	C	28.77	71.5	0.82	824	681	509	172	
16/01/2025 12:00:00	Thursday	Night	3	1	1	Preventive	B	24.72	75.1	0.54	848	511	388	123	
17/01/2025 00:00:00	Friday	Day	3	1	1	Preventive	C	24.42	61.4	0.93	845	659	506	153	
17/01/2025 12:00:00	Friday	Night	3	1	1	Predictive	B	21.29	78.9	0	852	635	501	134	
18/01/2025 00:00:00	Saturday	Day	3	1	1	Predictive	G	30.04	65	0.75	851	631	462	169	
18/01/2025 12:00:00	Saturday	Night	3	1	1	Corrective	F	25.52	65.3	1.14	936	662	487	175	
19/01/2025 00:00:00	Sunday	Day	3	1	1	Predictive	D	24.26	54.1	1.62	766	703	515	188	
19/01/2025 12:00:00	Sunday	Night	3	1	1	Predictive	D	26.76	69.8	1.14	763	603	430	173	
20/01/2025 00:00:00	Monday	Day	4	1	1	Predictive	B	26.31	71.7	1.02	650	638	465	173	
21/01/2025 00:00:00	Tuesday	Day	4	1	1	Predictive	E	23.48	75.4	0.6	651	501	350	150	
21/01/2025 12:00:00	Tuesday	Night	4	1	1	Corrective	F	28.45	61.5	0.7	679	629	439	190	

Table records (1,800 rows)

Update available (click to download)

Autosave ON

BI_Shopfloor_Reliability_Dataset

Search

FileHomeInsertDrawPage LayoutFormulasDataReviewViewHelp

Paste

Clipboard

Font

Alignment

Number

Styles

Conditional Formatting

Format as Table

Cell Styles

Insert

Delete

Format

Cells

AutoSum

Fill

Sort & Filter

Find & Select

Comments

Share

Calibri

11

A

A'

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

≡

parameter	value	notes
unit_price_\$	50	Revenue proxy per good unit
unit_cost_\$	30	Variable production cost per produced unit
energy_tariff_\$perkwh	0.12	Electricity cost per kWh
co2_per_kwh_kg	0.82	Carbon intensity of grid electricity
carbon_price_\$perkg	0.03	Internal carbon price for costing
scrap_disposal_cost_\$perunit	0.5	Disposal cost for scrapped units
rework_cost_\$perunit	1.5	Rework processing cost per scrap unit attempted
overtime_cost_\$perhour	7.5	Overtime wage burden per hour per worker
safety_incident_cost_\$	1000	Estimated cost impact if a safety incident occurs
baseline_worker_health_cost_\$per_shift	10	Baseline social/health program cost per shift
shift_hours	12	Shift duration hours