

Metodologi Penilaian Kesehatan Conveyor Berbasis Data Commissioning pada Pabrik Semen

Toto Supriyono, Mohammad Fahrur Rozi

Teknik Mesin, Universitas Pasundan, Bandung, Indonesia
Fakulti Teknologi dan Kejuruteraan Mekanikal, Universiti Teknikal Malaysia,
Melaka

Email: supriyono.toto@unpas.ac.id
m132310027@student.utem.edu.my

Abstrak. Conveyor merupakan peralatan kritis dalam operasional pabrik semen yang keandalannya berpengaruh langsung terhadap kontinuitas proses produksi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metodologi penilaian kesehatan conveyor berbasis data commissioning menggunakan pendekatan Equipment Health Index (EHI). Metode penelitian meliputi pemilihan parameter operasional utama, penetapan batasan berdasarkan data commissioning, perhitungan deviasi kondisi aktual, serta pembobotan parameter sesuai tingkat kepentingannya. Nilai EHI dihitung melalui proses normalisasi dan agregasi parameter, kemudian diklasifikasikan ke dalam kategori kesehatan. Metode ini diterapkan pada tiga unit conveyor di pabrik semen. Hasil menunjukkan bahwa Conveyor A memiliki nilai EHI sebesar 0,887 dan dikategorikan sehat, yang mengindikasikan kondisi operasi sangat mendekati nilai desain tanpa anomali signifikan. Conveyor B memperoleh nilai EHI 0,091 dan berada pada kategori kritis, yang mencerminkan penyimpangan ekstrem pada parameter utama serta risiko kegagalan dini. Sementara itu, Conveyor C memiliki nilai EHI 0,605 dan diklasifikasikan cukup, dengan deviasi moderat namun masih dalam kondisi stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa EHI mampu membedakan tingkat kesehatan conveyor secara kuantitatif dan objektif. Metodologi yang diusulkan efektif sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional conveyor di pabrik semen. Metode ini juga dapat diterapkan pada berbagai peralatan di industri.

Kata kunci. Commissioning; Conveyor; Equipment Health Index; Overhaul; Reliability system.

1 Pendahuluan

Sistem conveyor merupakan komponen kritis dalam rantai produksi pabrik semen karena berperan dalam pemindahan material secara kontinu. Pada pabrik semen modern, conveyor mampu menangani lebih dari 60–70% aliran material internal dengan kapasitas hingga ribuan ton per jam [1]. Gangguan pada sistem ini dilaporkan berkontribusi hingga 30–40% terhadap downtime tidak terencana, yang berdampak pada kehilangan produksi, peningkatan biaya operasional, serta risiko keselamatan kerja [2]. Oleh karena itu, keandalan dan kesehatan conveyor menjadi aspek penting dalam pengelolaan aset industri.

Overhaul dilakukan untuk memulihkan kinerja peralatan, namun tidak selalu mampu mencegah kegagalan dini pada fase awal operasi [3]. Sekitar 20–30% kegagalan pasca overhaul terjadi dalam tiga bulan pertama akibat kesalahan instalasi, misalignment, atau degradasi komponen yang tidak terdeteksi [4]. Hal ini menunjukkan bahwa fase awal operasi pasca overhaul merupakan periode kritis yang memerlukan evaluasi kondisi secara lebih komprehensif.

Tahap commissioning umumnya difokuskan pada verifikasi fungsi dan keselamatan melalui inspeksi serta pengujian tanpa dan dengan beban [5]. Proses ini menghasilkan data penting seperti getaran, temperatur, dan konsumsi daya. Namun, data commissioning sering hanya digunakan untuk keputusan jangka pendek (go/no-go) dan belum dimanfaatkan secara optimal untuk penilaian kesehatan peralatan secara kuantitatif.

Pendekatan pemeliharaan berbasis kondisi dan penggunaan Equipment Health Index (EHI) telah terbukti meningkatkan keandalan dan efisiensi pemeliharaan [6], [7]. Namun, metode ini umumnya berbasis data historis jangka panjang [8] dan kurang efektif pada fase awal pasca overhaul ketika data tersebut belum tersedia [9]. Padahal, hingga 40–50% kegagalan awal peralatan dapat diidentifikasi melalui data commissioning [10], [11].

Berdasarkan hal tersebut, terdapat dua celah utama, yaitu keterbatasan pemanfaatan data commissioning sebagai dasar penilaian kesehatan peralatan, serta belum adanya kerangka metodologis terstruktur untuk mengintegrasikan berbagai parameter commissioning ke dalam indikator kuantitatif [12].

Penelitian ini bertujuan mengembangkan metodologi penilaian kesehatan conveyor berbasis data commissioning menggunakan pendekatan Equipment Health Index (EHI). Metode ini mengintegrasikan data multidomain menjadi indikator kuantitatif untuk mengklasifikasikan kondisi peralatan dan mendukung pengambilan keputusan operasional. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan data commissioning sebagai dasar evaluasi kesehatan peralatan, sehingga dapat meningkatkan keandalan dan mengurangi risiko kegagalan dini pada fase awal operasi.

2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Material yang menjadi objek penelitian adalah satu sistem conveyor sabuk (belt conveyor) yang beroperasi pada lingkungan industri semen dengan karakteristik beban berat dan operasi kontinu. Sistem conveyor tersebut terdiri atas motor listrik, gearbox, kopling, pulley penggerak dan pembalik, belt, idler, sistem penegangan, serta panel elektrik dan sistem kontrol. Gambar 2 memperlihatkan gambar jenis belt conveyor yang dikaji.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi instrumen ukur mekanik, elektrik, dan operasional yang umum digunakan dalam kegiatan commissioning dan asesmen kondisi peralatan industri. Instrumen tersebut antara lain alat ukur getaran portabel, termometer inframerah, clamp meter, alat ukur kecepatan putar, sensor arus dan tegangan, serta perangkat akuisisi data dari sistem kontrol. Selain itu, checklist inspeksi visual dan keselamatan digunakan untuk memastikan kesesuaian instalasi dan kondisi fisik peralatan sesuai standar industri [16], [17].

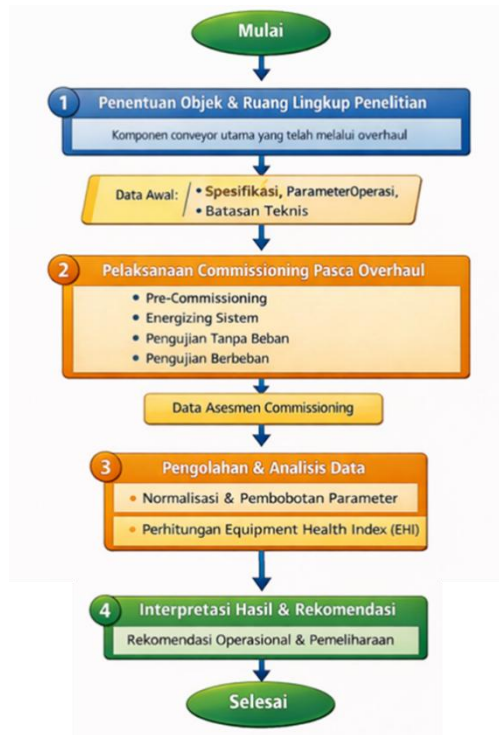
Pemilihan instrumen dan parameter pengukuran disesuaikan dengan praktik terbaik dalam condition monitoring dan pemeliharaan berbasis kondisi, sehingga data yang diperoleh relevan untuk penilaian kesehatan peralatan [18].

2.2. Metode

Metodologi penelitian ini dirancang sebagai suatu kerangka asesmen terstruktur untuk menilai kesehatan sistem conveyor pada tahap commissioning pasca overhaul di pabrik semen diperlihatkan pada gambar 1. Tahapan penelitian secara umum terdiri atas empat fase utama, yaitu: (1) penentuan objek dan ruang lingkup penelitian, (2) pelaksanaan commissioning pasca overhaul sebagai sumber data asesmen, (3) pengolahan dan analisis data untuk perhitungan Equipment Health Index (EHI), serta (4) interpretasi hasil dan perumusan rekomendasi operasional dan pemeliharaan.

Tahap awal penelitian dimulai dengan penentuan objek penelitian berupa sistem conveyor utama pada lini produksi pabrik semen yang telah selesai menjalani kegiatan overhaul. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada komponen utama conveyor yang berpengaruh signifikan terhadap keandalan sistem, meliputi unit penggerak, sistem transmisi, idler dan roller, belt, sistem penegangan, serta sistem elektrik dan kontrol. Data awal berupa spesifikasi desain, parameter operasi nominal, dan batasan teknis dikumpulkan sebagai acuan evaluasi [13], [14].

Tahap berikutnya adalah commissioning pasca overhaul, yang mencakup pre-commissioning, energizing sistem, pengujian tanpa beban (no-load test), dan pengujian beban secara bertahap hingga kapasitas desain. Pada penelitian ini, commissioning tidak hanya diposisikan sebagai proses verifikasi fungsional, tetapi juga sebagai fase akuisisi data terstruktur untuk asesmen kesehatan peralatan [15].



Gambar 1. Diagram Alir



Gambar 2. Jenis belt conveyor yang dikaji

2.3. Pengambilan Data

Data hasil pengukuran selama tahap commissioning dinormalisasi untuk mengatasi perbedaan satuan dan rentang nilai dengan mengacu pada batas desain dan standar industri [30]. Selanjutnya, setiap parameter diberi bobot sesuai tingkat kepentingannya terhadap keandalan sistem berdasarkan pendekatan pemeliharaan berbasis risiko [22].

Nilai Equipment Health Index (EHI) dihitung sebagai agregasi tertimbang dari seluruh parameter yang telah dinormalisasi. Nilai ini kemudian digunakan untuk mengklasifikasi kondisi conveyor menjadi sehat, cukup, tidak sehat, atau kritis. Untuk kondisi tertentu, hasil EHI dapat dikombinasikan dengan analisis risiko kegagalan guna mendukung pengambilan keputusan sebelum operasi penuh [23].

Tabel 1. Parameter yang diukur

Kelompok	Parameter	Satuan
Kinerja	Kapasitas	t/h
	Kecepatan belt	m/s
	Daya motor	kW
Mekanik	Getaran	mm/s
	Temperatur	°C
Elektrik	Arus	A
	Tegangan	V
Operasi	Alarm / trip	kejadian
Keselamatan	Interlock	pass/fail

Tabel 1 menyajikan parameter asesmen yang digunakan dalam perhitungan Equipment Health Index (EHI) pada sistem conveyor selama tahap commissioning pasca overhaul, mencakup aspek mekanik, elektrik, dan operasional. Setiap parameter dievaluasi berdasarkan hasil pengukuran lapangan dan dibandingkan dengan nilai acuan desain atau batas operasional.

Seluruh parameter dinormalisasi ke dalam skala tanpa dimensi untuk memungkinkan integrasi data multidomain dengan satuan yang berbeda. Selanjutnya, parameter diberi bobot sesuai tingkat kepentingannya terhadap keandalan sistem.

Nilai EHI dihitung sebagai agregasi berbobot dari seluruh parameter, yang merepresentasikan kondisi kesehatan conveyor secara keseluruhan. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan kondisi mendekati ideal, sedangkan nilai rendah mengindikasikan penyimpangan yang memerlukan tindakan korektif. Oleh karena itu, Tabel 1 berfungsi sebagai dasar kuantitatif dalam klasifikasi kondisi dan pengambilan keputusan operasional.

Tabel 2. Alat ukur

No.	Kelompok Parameter	Parameter yang Diukur	Alat Ukur	Lokasi / Objek Pengukuran	Tahap
1	Kinerja Operasional	Kapasitas angkut (t/h)	Belt scale / weigh feeder	Lintasan belt	Load tes
2	Kinerja Operasional	Kecepatan belt (m/s)	Handheld tachometer / encoder VFD	Pulley / belt	No-load
3	Kinerja Operasional	Daya input (kW)	Power analyzer	Panel MCC / VFD	No-load
4	Sistem Mekanik	Getaran (mm/s RMS)	Portable vibration analyzer	Motor, gearbox, pulley	No-load
5	Sistem Mekanik	Temperatur (°C)	Infrared thermometer / thermal camera	Bearing, gearbox, motor	No-load
6	Sistem Mekanik	Alignment & kondisi fisik	Feeler gauge / laser alignment tool	Shaft, pulley, idler	Pre-com
7	Sistem Elektrik	Arus motor (A)	Clamp meter (True RMS)	Panel MCC	No-load
8	Sistem Elektrik	Tegangan & frekuensi	Multimeter / power analyzer	Panel kontrol	No-load
9	Sistem Elektrik	Resistansi isolasi (MΩ)	Insulation resistance tester (Megger)	Motor & kabel	Pre-com
10	Kontrol & Proteksi	Alarm & trip sistem	PLC/SCADA monitoring	Ruang kontrol	Seluruh t
11	Keselamatan Operasi	Fungsi interlock & E-stop	Interlock / E-stop tester	Sepanjang sistem	Pre-com
12	Operasi & Lingkungan	Kebisingan (dB)	Sound level meter (opsional)	Area conveyer	Load tes
13	Inspeksi Visual	Belt tracking & idler	Checklist inspeksi	Sepanjang conveyer	Seluruh t

Tabel 2 menyajikan ringkasan instrumen pengukuran, lokasi pengambilan data, serta tahapan pengujian selama commissioning pasca overhaul sistem conveyor. Tabel ini memastikan keterlacakan antara parameter, alat ukur, lokasi, dan kondisi pengujian. Instrumen yang digunakan mencakup aspek mekanik, elektrik, dan operasional, dengan pengukuran dilakukan pada titik-titik kritis seperti unit penggerak, transmisi, belt, serta sistem kontrol. Selain itu, setiap parameter dikaitkan dengan tahapan commissioning, yaitu pre-commissioning, no-load test, dan load test, sehingga data merepresentasikan kondisi pada berbagai tingkat pembebanan. Dengan demikian, Tabel 2 mendukung validitas metodologi dan konsistensi akuisisi data.

Tabel 3 menyajikan kriteria penerimaan kondisi peralatan sebagai dasar evaluasi kelayakan operasional conveyor. Kriteria ini dinyatakan dalam batas ambang yang mengacu pada spesifikasi pabrikan, standar industri, dan praktik terbaik. Dalam penelitian ini, kriteria tersebut digunakan sebagai dasar normalisasi parameter dalam perhitungan Equipment Health Index (EHI), di mana parameter yang memenuhi batas memperoleh skor tinggi, sedangkan yang menyimpang mengalami penurunan skor. Dengan demikian, Tabel 3 meningkatkan objektivitas asesmen serta menjadi dasar pengambilan keputusan operasional sebelum conveyor dioperasikan secara penuh.

Tabel 3. Kriteria penerimaan

No	Parameter Uji	Metode Pengujian	Kriteria Penerimaan
1	Alignment belt	Inspeksi visual & laser alignment	Belt tracking stabil, tidak menyentuh struktur
2	Kondisi sambungan belt (joint)	Visual & running inspection	Tidak ada slip, retak, atau deformasi
3	Getaran motor	Vibration analyzer	≤ 4.5 mm/s RMS (ISO 10816)
4	Getaran gearbox	Vibration analyzer	Dalam batas OEM/ISO
5	Temperatur bearing	Thermal imaging	≤ 80 °C atau sesuai spesifikasi
6	Arus motor	Clamp meter / power analyzer	$\leq 100\%$ arus nominal
7	Ketidakeimbangan arus	Power analyzer	$\leq 10\%$ antar fasa
8	Kecepatan belt	Tachometer / sensor speed	$\pm 5\%$ dari desain
9	Kapasitas angkut	Perhitungan ton/jam	\geq kapasitas desain
10	Konsumsi energi	kWh meter	Tidak melebihi baseline historis
11	Fungsi proteksi	Simulasi trip	Semua proteksi bekerja normal
12	Emergency stop	Uji fungsi	Conveyor berhenti aman
13	Kebisingan	Sound level meter	≤ 85 dB (K3 industri)
14	Spillage material	Inspeksi area	Minimal, tidak mengganggu operasi

2.4. Pengolahan Data

Pengambilan data dilakukan secara bertahap mengikuti urutan proses commissioning pasca overhaul. Pada tahap pre-commissioning, data dikumpulkan melalui inspeksi visual dan keselamatan untuk mengidentifikasi potensi ketidaksesuaian instalasi, kondisi mekanik awal, serta kesiapan sistem elektrik dan kontrol. Parameter pada tahap ini bersifat kualitatif dan semi-kuantitatif, namun penting dalam mendeteksi potensi kegagalan dini [19].

Pada tahap energizing dan pengujian tanpa beban (no-load test), data kuantitatif dikumpulkan meliputi getaran, temperatur, arus listrik, tegangan, dan kecepatan putar. Pengukuran dilakukan pada kondisi operasi stabil untuk memperoleh nilai representatif yang dapat dibandingkan dengan batas desain dan standar yang berlaku [20].

Selanjutnya, pengujian berbeban dilakukan secara bertahap pada tingkat beban 25%, 50%, 75%, dan 100% dari kapasitas desain. Pada setiap tingkat beban, parameter mekanik, elektrik, dan kinerja operasional direkam untuk mengevaluasi stabilitas sistem dan respons terhadap variasi beban. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi anomali yang tidak terdeteksi pada pengujian tanpa beban [21].

$$EHI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i \quad (1)$$

$$S_i = 1 - \frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (2)$$

Tabel 4. Interpretasi nilai EHI

Nilai EHI	Kategori
$\geq 0,80$	Sehat
0,60 – 0,79	Cukup
0,40 – 0,59	Tidak sehat
$< 0,40$	Kritis

Tabel 4 mengklasifikasikan nilai Equipment Health Index (EHI) sebagai indikator kuantitatif kondisi operasional conveyor. Nilai EHI $\geq 0,80$ dikategorikan sehat, menunjukkan operasi optimal dalam batas desain. Rentang 0,60–0,79 termasuk kategori cukup, yang masih layak beroperasi namun memerlukan pemantauan. Nilai 0,40–0,59 diklasifikasikan tidak sehat, mengindikasikan adanya degradasi dan perlunya tindakan korektif. Sementara itu, nilai EHI $< 0,40$ berada pada kategori kritis, yang menunjukkan risiko kegagalan tinggi sehingga tidak direkomendasikan untuk dioperasikan tanpa perbaikan segera.

Tabel 5. Parameter dan bobot

No	Parameter	Simbol	Bobot (w_i)
1	Kapasitas angkut	(X_1)	0.25
2	Kecepatan belt	(X_2)	0.20
3	Konsumsi daya motor	(X_3)	0.20
4	Getaran mekanik	(X_4)	0.20
5	Temperatur bearing	(X_5)	0.15
Total			1.00

Tabel 5 menyajikan parameter utama dalam perhitungan Equipment Health Index (EHI) beserta bobotnya, yang mencerminkan tingkat pengaruh terhadap kesehatan conveyor. Parameter mencakup aspek operasional, mekanis, dan performa, seperti beban, kecepatan, arus motor, temperatur, getaran, dan keselarasan.

Pembobotan menunjukkan bahwa parameter kritis memiliki kontribusi lebih besar dibandingkan parameter pendukung. Dengan demikian, nilai EHI yang dihasilkan mampu merepresentasikan kondisi aktual conveyor secara lebih realistis dan menjadi dasar dalam pengambilan keputusan pemeliharaan serta penentuan prioritas perbaikan.

Tabel 6. Nilai referensi dan batas deviasi

Parameter	(X_{ref})	(X_{lim})
Kapasitas (t/h)	1000	200
Kecepatan belt (m/s)	3	0.6
Daya motor (kW)	200	40
Getaran (mm/s)	2.8	2
Temperatur ($^{\circ}$ C)	65	25

Tabel 6 menyajikan nilai referensi parameter conveyor serta batas deviasinya sebagai dasar evaluasi kondisi kesehatan. Batasan ditetapkan berdasarkan hasil commissioning, spesifikasi desain, dan standar operasional, yang merepresentasikan kondisi operasi normal.

Nilai deviasi menunjukkan selisih antara kondisi aktual dan acuan, di mana deviasi kecil menandakan kondisi stabil, sedangkan deviasi besar mengindikasikan potensi anomali dan penurunan kinerja. Informasi ini digunakan dalam perhitungan Equipment Health Index (EHI) untuk mengkuantifikasi tingkat kesehatan conveyor serta mendukung klasifikasi kondisi dan penentuan prioritas pemeliharaan.

3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengukuran

Pengukuran parameter dilakukan selama tahap commissioning pasca overhaul melalui pengujian tanpa beban dan berbeban hingga kapasitas desain. Tabel 7 menyajikan hasil pengukuran untuk tiga unit conveyor yang menunjukkan variasi kondisi operasional. Conveyor dengan nilai parameter mendekati acuan menunjukkan kondisi lebih stabil, sedangkan penyimpangan yang lebih besar mengindikasikan potensi degradasi kinerja.

Berdasarkan data tersebut, nilai Equipment Health Index (EHI) dihitung melalui normalisasi dan pembobotan parameter. Conveyor A memperoleh nilai EHI sebesar 0,887 (sehat), Conveyor B sebesar 0,091 (kritis), dan Conveyor C sebesar 0,605 (cukup). Perbedaan nilai ini menunjukkan bahwa metode EHI mampu membedakan tingkat kesehatan conveyor secara kuantitatif berdasarkan data commissioning.

Tabel 7. Hasil pengukuran

Parameter	Conveyor A	Conveyor B	Conveyor C
	Nilai (X_i)	Nilai (X_i)	Nilai (X_i)
Kapasitas	980 t/h	780 t/h	900 t/h
Kecepatan belt	2.95 m/s	2.6 m/s	2.8 m/s
Daya motor	195 kW	240 kW	215 kW
Getaran	2.5 mm/s	5.0 mm/s	3.5 mm/s
Temperatur	62 °C	90 °C	75 °C

Tabel 8 menampilkan nilai Equipment Health Index (EHI) dan klasifikasi kondisi masing-masing conveyor. Variasi nilai EHI mencerminkan perbedaan kondisi operasional, di mana nilai tinggi menunjukkan kondisi sehat dengan risiko rendah, sedangkan nilai rendah mengindikasikan kondisi tidak sehat atau kritis akibat deviasi signifikan.

Hasil ini menunjukkan bahwa EHI efektif dalam merepresentasikan kondisi conveyor dan mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi, dengan prioritas tindakan korektif pada conveyor tidak sehat serta pemantauan pada conveyor yang sehat.

Tabel 8. Kondisi conveyor

No	Conveyor	Nilai EHI	Kategori Kondisi	Interpretasi Kondisi	Reko
1	Conveyor A	0.887	Sehat	Seluruh parameter kinerja dan kondisi berada sangat dekat dengan nilai desain; tidak teridentifikasi anomali signifikan	Dapat didesain; n kondisi
2	Conveyor B	0.091	Kritis	Penyimpangan ekstrem pada beberapa parameter utama (getaran, temperatur, dan konsumsi daya); indikasi risiko kegagalan dini	Tidak dir operasi; c korektif c
3	Conveyor C	0.605	Cukup (Moderate)	Deviasi moderat pada parameter mekanik dan operasional; sistem masih stabil namun margin keandalan terbatas	Operasi t pengawa: inspeksi l

Nilai EHI tinggi menunjukkan operasi conveyor yang stabil dan siap dioperasikan, sedangkan nilai rendah mengindikasikan deviasi signifikan, seperti konsumsi daya, getaran, dan temperatur tinggi, yang berpotensi menyebabkan kegagalan dini.

Hasil ini menegaskan bahwa EHI berbasis data commissioning dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan sebelum operasi penuh. Conveyor dengan EHI tinggi dapat langsung dioperasikan, sementara nilai rendah memerlukan tindakan korektif, sehingga mendukung condition-based decision making dan mengurangi risiko downtime awal.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pemanfaatan data commissioning sebagai dasar asesmen kuantitatif kesehatan conveyor. Namun, penelitian masih terbatas pada jumlah

objek dan pendekatan pembobotan, sehingga diperlukan studi lanjutan dengan integrasi data historis dan metode berbasis risiko untuk meningkatkan akurasi dan generalisasi.

4 Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan metodologi penilaian kesehatan conveyor berbasis data commissioning pasca overhaul menggunakan pendekatan Equipment Health Index (EHI). Metode yang diusulkan mengintegrasikan parameter mekanik, elektrik, dan operasional melalui proses normalisasi dan pembobotan untuk menghasilkan indikator kuantitatif kondisi peralatan.

Hasil penerapan pada tiga conveyor menunjukkan bahwa metode ini mampu membedakan tingkat kesehatan secara objektif, dengan kategori sehat, cukup, dan kritis. Nilai EHI yang tinggi menunjukkan kondisi operasi yang stabil dan siap dioperasikan, sedangkan nilai rendah mengindikasikan adanya penyimpangan signifikan yang memerlukan tindakan korektif.

Dengan demikian, EHI berbasis data commissioning efektif sebagai dasar pengambilan keputusan operasional sebelum operasi penuh serta berpotensi mengurangi risiko kegagalan dini. Metodologi ini juga memberikan kontribusi dalam mengoptimalkan pemeliharaan berbasis kondisi dan dapat diadaptasi pada peralatan industri lainnya.

Namun, penelitian ini masih terbatas pada jumlah objek dan pendekatan pembobotan yang digunakan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas objek studi serta mengintegrasikan data historis dan metode berbasis risiko guna meningkatkan akurasi dan generalisasi hasil.

Referensi

1. Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8th ed., Butterworth-Heinemann.
2. Roberts, A. W. (2009). "Bulk solids handling: conveyors and transfer chutes." *Chemical Engineering Research and Design*, 87(9), 1137–1146.
3. Bloch, H. P., & Geitner, F. K. (2012). *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*. 4th ed., Elsevier.
4. Mobley, R. K. (2008). *Maintenance Fundamentals*. 2nd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann.
5. IEEE Standards Association. (2018). *IEEE Guide for the Commissioning of Industrial and Commercial Equipment*. IEEE Press.

6. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
7. Ahmad, R., & Kamaruddin, S. (2012). "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application." *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 135–149.
8. Heng, A., Zhang, S., Tan, A. C. C., & Mathew, J. (2009). "Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(3), 724–739.
9. Smith, R., & Hawkins, B. (2004). *Lean Maintenance*. Elsevier Butterworth-Heinemann.
10. Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
11. Blanchard, B. S., & Fabrycky, W. J. (2011). *Systems Engineering and Analysis*. 5th ed., Pearson Education.
12. ISO 55000. (2014). *Asset Management — Overview, Principles and Terminology*. International Organization for Standardization.
13. ISO 5048. (1989). *Continuous Mechanical Handling Equipment — Belt Conveyors with Carrying Idlers — Calculation of Operating Power and Tensile Forces*. International Organization for Standardization.
14. CEMA. (2020). *Belt Conveyors for Bulk Materials*. 7th ed., Conveyor Equipment Manufacturers Association.
15. IEEE Standards Association. (2018). *IEEE Guide for the Commissioning of Industrial and Commercial Equipment*. IEEE Press.
16. Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2nd ed., Elsevier Butterworth-Heinemann.
17. Bloch, H. P., & Budris, A. R. (2010). *Pump User's Handbook: Life Extension*. 4th ed., CRC Press.
18. Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510.
19. Moubray, J. (1997). *Reliability-Centered Maintenance*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann.
20. ISO 10816-3. (2009). *Mechanical Vibration — Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts*. International Organization for Standardization.
21. Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook*. 5th ed., McGraw-Hill.
22. Tsang, A. H. C. (2002). "Strategic dimensions of maintenance management." *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39.
23. Zio, E. (2016). "Some challenges and opportunities in reliability engineering." *IEEE Transactions on Reliability*, 65(4), 1769–1782.